REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master

Filière : **Génie des procédés**

Spécialité : **Génie des procédés des matériaux**

Thème : Évolution de la dureté d'acier allié suite à une trempe thermochimique

Présenté par :

Saadi Houda

Benali Khadija

Encadré par :

Dr. Rekaik Mouna

Promotion 2019/2020

Remerciement

Remerciements

On remercie dieu le toute puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sons laide et l'encadrement de Madame Rekaik Mouna, on le remercie pour la qualité de ce encadrement exceptionnel, pour patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous exprimons nos remerciements les plus dévoués aux membres de jury qui nous ont honorées en acceptant d'évaluer ce travail.

Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeures pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos sentiments vont également à toutes des personnes qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Dédicaces

Je tiens vivement à dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance à :

À mes très chers parents sans qui je ne serais pas là et qui ont toujours tout fait pour que je sois heureuse: les mots ne suffiront jamais pour vous dire au combien je vous suis reconnaissant alors j'espère que mes actes dépasseront mes paroles.

Mon très marie pour tous ses sacrifices, son encouragement et sa confiance qui m'a donné la volonté de passer toujours en avant

Que Dieu le protège.

À mes très chers frères Youcef, Ismail, Kadour, Mourad, soeurs Salima, Hafida, Doniazad et Chorouq, merci infiniment pour vos encouragements.

À toute ma famille.

À mon binôme Houda, je vous remercie pour votre dévouement et votre amour, je vous remercie pour tous les moments que j'ai partagés avec vous.
Je vous souhaite plein de succès dans l'avenir.

À tous mes amies surtout : Nabila, Chaima, Imen, Ibtissam, Hassiba et Fouzia.

À toute la promotion de génie des matériaux 2019/2020.

Pour finir, je souhaite exprimer ma gratitude à touts les enseignantes et enseignants de département de Génie des procédés et environnement.

Khadidja

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir

Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères, Zaki et Moustapha,

A mes sœurs, Sara et Khadidja,

A mon cher binôme, Khadidja,

A ma chère, Zahia,

Pour son entente et sa sympathie.

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

Qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

Houda

Résumé

ملخص

الفولاذ مادة أساسية اليوم غني بالعديد من نقاط القوة مثل التكلفة المنخفضة و الخصائص البيئية ويمكن استخدامهبأشكال مختلفة وفي مجالات مختلفة وفي مجالات مختلفة عن بعضها البعض.

الهدف من هذا العمل هو توضيحتأثير المعالجات الحرارية لا سيما التبريد المباشر في زيت المحركات المستخدمة من الفولاذ للإنشاءات الميكانيكية .

يتم التوصيف عن طريق اختبارات الصلابة فيكرز وتحليل المعادن الفحص المجهري الضوئي.

تظهر دراسة علم المعادن بنية مرتينسيتية للصلب وتسمح المعالجة المنفذة بزيادة صلابة المادة دون تعديل المصفوفة المعدنية

الكلمات الرئيسية :فولاذ, العلاج الكيميائي , تصلب, صلابة فيكرز, المجهر الضوئي .

Résumé

L'acier est un matériau aujourd'hui incontournable. Riche de nombreux atouts comme son faible coût et ses propriétés environnementales, il peut être utilisé sous différentes formes et dans des domaines différents les uns des autres.

L'objectif du présent travail est de mettre en évidence l'effet des traitements thermiques particulièrement la trempe directe dans l'huile des moteurs usagés d'un acier pour la construction mécanique.

La caractérisation est faite par des tests de dureté de Vickers et de l'analyse métallographique telle que la microscopie optique.

L'étude métallographique montre une structure martensitique de l'acier et le traitement exécuté permet une augmentation de la dureté du matériau sans modification de la matrice métallique martensitique.

Mots clés : *Acier ; Traitement thermochimique ; Trempe ; Dureté de Vickers ; Microscopie optique.*

Abstract

Steel is an essential material today. Rich in much strength like its low cost and environmental properties, it can be used in different forms and in different fields from each other.

The objective of this work is to demonstrate the effect of heat treatments, particularly the direct quenching in oil of used engines of steel for mechanical construction.

Characterization is done by Vickers hardness tests and metallographic analysis such as light microscopy.

The metallographic study shows a martensitic structure of the steel and the treatment carried out allows an increase in the hardness of the material without modifying the martensitic metal matrix.

Keywords: Steel; Thermochemical treatment; Hardening; Vickers hardness; Optical microscopy.

Sommaire

Remerciement ……./
Dédicaces ……./
Résumé ……./
Listes des figures ……./
Listes des tableaux……./
Listes des abréviations……./
Introduction générale……1

Partie théorique

Chapitre I : Les aciers

I.1 Introduction……3
I.2 Diagramme d'équilibre Fer-carbone ……3
I.3 Les constituants et les phases de l'acier ……5
I.3.1 Le fer……5
I.3.2 Le carbone ……5
I.3.3 La ferrite ……6
I.3.4 L'austénite ……7
I.3.5 La cémentite (ou carbure de fer) ……7
I.3.6 Le graphite ……8
I.3.7 La perlite ……8
I.3.8 Ferrite+Perlite ……8
I.3.9 La martensite ……9
I.3.10 La bainite ……9
I.4 Constituants des aciers ……10
I.5 L'étude de la transformation des aciers……12
I.5.1 Notion de transformation eutectoïde ……12
I.5.2 Le processus de formation de la perlite lors du refroidissement ……13
I.5.3 La transformation de l'austénite des aciers eutectoïdes ……13
I.5.4 La transformation de l'austénite des aciers hypoeutectoïdes (<0.77 % C)……14
I.5.5 La transformation de l'austénite des aciers hypereutectoïdes (> 0.77 % C)……15
I.5.6 La transformation de l'austénite lors d'un refroidissement continu (transformation an isothermique) ……15
I.6 Srtucture des aciers……16

Sommaire

I.7 Facteurs influençant sur la structure 20

Chapitre II : Traitement thermique est thermochimique de l'acier

II.1 Introduction 23
II.2 Traitement thermique 24
II.2.1 Introduction 24
II.2.2 Définition 24
II.2.3 Évolution historique des traitements thermique 24
II.2.4 Paramètres disponibles pour la réalisation des traitements thermiques 25
II.2.5 Traitements thermiques des aciers 26
II.2.5.1 Buts des traitements thermiques des aciers 28
II.2.6 Grandes classes de traitements thermiques de l'acier 29
II.2.6.1 La trempe 29
II.2.6.2 Le Revenu 30
II.2.6.3 Recuits 31
a. Principe du recuit 31
b. But de recuit 31
II.2.7 Intérêt des traitements thermiques 32
II.2.8 Structures, propriétés des traitements thermiques 32
II.2.9 Les inconvénients du traitement thermique 33
II.2.9.1 Les tapures 33
II.2.9.2 Déformation et gauchissement 33
II.3 Traitement thermochimique 34
II.3.1 Introduction 34
II.3.2 Types des traitements thermochimiques 34
II.3.2.1 Cémentation 34
a.Techniques de cémentation 34
a.1 Cémentation en caisse 35
a.2 Cémentation liquide 35
a.3 La cémentation gazeuse 35
II.3.2.2 Nitruration 36

Sommaire

a. Techniques de nitruration 36

a.1 Nitruration gazeuse 36

a.2 Nitruration liquide 37

a.3 Nitruration ionique 37

II.3.2.3 La nitrocarburation 37

II.3.2.4 Carbonitruration 38

II.3.2.5 La chromisation 38

II.3.2.6 La boruration 38

II.3.2.7 La siliciuration 39

II.3.2.8 Sulfonitruration 39

II.3.2.9 Sulfinisation 39

II.3.2.10 Cyanuration 40

Chapitre III: la corrosion est l'essai mécanique

Partie A : La corrosion

III.1 Introduction 41

III.2 Généralités sur le phénomène de corrosion 41

III.2.1 Définition de la corrosion 41

III.2.2 Importance économique de la corrosion 41

III.2.3 Cause de la corrosion 42

III.3 Classification de la corrosion 42

III.3.1 La corrosion chimique 42

III.3.2 La corrosion bactérienne 43

III.3.3 La corrosion électrochimique 44

III.4 Aspect morphologique de la corrosion 44

III.4.1 Corrosion généralisée 44

III.4.2 Corrosion localisée (zonale) 45

III.4.2.1 La corrosion galvanique (bimétallique).....45

III.4.2.2 La corrosion caverneuse (par crevasse).....45

III.4.2.3 La corrosion par piqures 46

III.4.2.4 La corrosion intergranulaire 46

III.4.2.5 La corrosion sélective 47

Sommaire

III.4.2.6 La corrosion érosion 48
III.4.2.7 Corrosion frottement (tribocorrosion) 48
III.4.2.8 La corrosion sous contrainte 49
III.4.2.9 Fragilisation par hydrogène 49
III.5 Facteurs de corrosion 50
III.6 Potentiel de corrosion (E_{corr}) 50
III.7 Vitesse de corrosion 52

Partie B : Les essais mécaniques

III.8 Introduction 52
III.9 Intérêt des essais mécaniques 53
III.10 Essais de dureté 53
III.10.1 Mesures de dureté par pénétration 54
III.10.2 Les différentes échelles de dureté 54

Partie expérimentale

Chapitre IV: Matériaux est dispositifs expérimentaux

IV.1 But et objectif de travail 56
IV.2 Matériaux étudié 56
IV.3 Conditions générales d'expérimentation 57
IV.3.1 Choix de la température de trempe 57
IV.3.2 Choix de la durée du chauffage d'austénisation 58
IV.4 Milieu de traitement 59
IV.5 Evaluation de la dureté (Essai de dureté de Vickers) 60
IV.5.1 Principe de la dureté Vickers 60
IV.5.2 Mode opératoire 60
IV.6 Observation métallographique 61
IV.6.1 Mis en résine 61
IV.6.2 Polissage 61
IV.6.3 L'attaque chimique 62
IV.6.4 Préparation de milieu de traitement 62
IV.6.5 La trempe directe 62
IV.6.6 Microscopie optique 63

Sommaire

Chapitre V: Résultats et discutions

V.1 Introduction 64
V.2 Échantillon non traité 64
V.2.1 Mesure de la dureté 64
V.2.2 Observation métallographique 64
V.3 Échantillons traités 66
V.3.1 Mesure de la dureté 66
V.3.2 Observation métallographique 67
Conclusion générale 70
Perspective 71
Références bibliographiques 72

Listes des figures

Figure I.1: Diagramme de phase fer-carbone 4
Figure I.2: Micrographie représentant de la ferrite 7
Figure I.3: Micrographie représentant de l'austénite 7
Figure I.4: La molécule de cémentite (ou carbure de fer) 8
Figure I.5: La perlite....8
Figure I.6: Ferrite + perlite 9
Figure I.7: La martensite 9
Figure I.8: La bainite 10
Figure I.9: Domaines d'existence des différents constituants de l'acier 11
Figure I.10: Le diagramme perlite de la transformation de l'alliage fer-cémentite....12
Figure I.11: La répartition de la ferrite et de la cémentite dans les aciers au carbone 13
Figure I.12: La diffusion des atomes de carbone dans l'austénite 13
Figure I.13: La formation de la perlite 14
Figure I.14: Micrographie de la perlite 14
Figure I.15: La transformation d'un acier hypoeutectoïde 14
Figure I.16: La transformation d'un acier hypoeutectoïde 15
Figure I.17: Les constituants issus des transformations (acier à 0,89 % C)....15
Figure I.18: Le diagramme T.R.C. d'un acier SAE 1045....16
Figure I.19: Diagramme TTT d'un acier....11
Figure II.1: Mode opératoire d'un traitement thermique 24
Figure II.2: Représente la vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit....31
Figure III.1: Schéma traduisant la cause de la corrosion atmosphérique du fer 42
Figure III.2: Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement 43
Figure III.3: Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire 43
Figure III.4: Corrosion généralisée : exemple d'une porte et d'un véhicule corrodes 44

Liste des figures

Figure III.5: Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé 45

Figure III.6: Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.....46

Figure III.7: Corrosion par piqûre de l'aluminium.....46

Figure III.8: Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique 47

Figure III.9: Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc) 47

Figure III.10: Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion 48

Figure III.11: La tribocorosion.....48

Figure III.12: La corrosion sous contrainte.....49

Figure III.13: La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique 50

Figure III.14: Différentes allures de potentiel de dissolution d'une électrode 51

Figure IV.1: Représentation du domaine de température de l'austénisation.....58

Figure IV.2: Principe de la dureté Vickers.....60

Figure IV.3: Dispositif de mesure la dureté de Vickers.....61

Figure IV.4: Polisseuse STRUERS-Labo Pol 5 62

Figure IV.5: Microscope métallographique.....63

Figure V.1: Structure métallographique initiale de l'acier étudié (×150) 65

Figure V.2: Microstructure (de référence) de l'acier 0.28 % C + 0.25 % Cr + 1 % Mo.....66

Figure IV.3: Microstructure du matériau étudié après trempe dans l'huile '' moteur'' (usagée et prétraitée) à t° =860 °C ; D = 10 min (× 150) 68

Liste des tableaux

Listes des tableaux

Tableau III.1: Comparaison entre les méthodes par pénétration.....55

Tableau IV.1: Conditions opératoires 59

Tableau IV.2: Composition minéralogique d'huile de vidange usagée 59

Tableau V.1: Valeur de la dureté de Vickers pour l'échantillon non traité.....64

Tableau V.2: Caractéristiques de l'acier non traité.....66

Tableau V.3: Valeurs de la dureté de Vickers pour les échantillons traités 67

Tableau V.4: Evolution des propriétés de l'acier étudiée suite avant et après la trempe dans l'huile 69

Liste des abréviations

Liste des abréviations

A°: Angstrom (unité).

B + A : Zone de formation de bainite.

°C: Dégrée Celsius.

(C.C) : Le réseau cubique centré.

(C.F. C) : Le réseau cubique à faces centrées.

F + A : Zone de formation de ferrite.

Fe- Fe_3C : Fer-Cémentite.

HB : Dureté Brinell.

HK : Dureté Knoop.

HR : Dureté Rockwell.

HRC : Dureté Rockwell correspondant.

HV: Dureté Vickers.

LIME: Laboratoire d'Interaction Matériaux-Environnement à l'université de Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel- .

M + A : Zone de formation de martensite.

P + A : Zone de formation de perlite.

PS : La ligne correspond à la transformation eutectoïde.

t_c : temps de chauffage.

t_m : temps de maintien.

t_r : temps de refroidissement.

T_r : température de recuit.

T.R.C : Transformation, refroidissement, continu.

TTT: température, temps, transformation.

α : Ferrite

γ: Austénite

Introduction générale

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0.005 % et 1.5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 % [1].

L'acier est un matériau aujourd'hui incontournable. Riche de nombreux atouts comme son faible coût et ses propriétés environnementales, il peut être utilisé sous différentes formes et dans des domaines différents les uns des autres. Le secteur automobile est le second marché, derrière le bâtiment, pour l'emploi de l'acier sous toutes ses formes. En effet, on retrouve le matériau phare dans la carrosserie, le moteur, la direction, le châssis, ou encore dans la carcasse du pneu. Les statistiques dévoilent que l'acier représente plus de la moitié du poids d'une voiture finie [2].

Les propriétés essentielles de l'acier sont de grandes formabilité et durabilité, de bonnes contrainte de traction et limite d'élasticité, une bonne conductivité thermique, et pour les aciers inoxydables une résistance à la corrosion. Lorsqu'ils élaborent un matériau pour une utilisation particulière, les ingénieurs doivent s'assurer qu'il conviendra parfaitement aux conditions de chargement et aux défis environnementaux auxquels il sera plus tard confronté. Comprendre et contrôler les propriétés des matériaux est donc primordial. Les propriétés mécaniques de l'acier peuvent être soigneusement contrôlées à travers une sélection judicieuse de la composition chimique, du processus de transformation et du traitement thermique, menant à sa microstructure finale [3].

Les problèmes de corrosion de l'acier ne peuvent en aucun cas être négligés. L'évaluation du risque de corrosion du métal dans son milieu d'application permet de les éviter ou tout au moins de les limiter. Ceci nécessite de prendre connaissance des facteurs de corrosion présents dans l'environnement avant la réalisation d'un ouvrage. Une fois la corrosivité du milieu déterminée sur la base de ces facteurs, la nuance d'acier et son moyen de protection peuvent ensuite être choisis en tenant compte de cette contrainte [4].

Ce mémoire s'articule sur Cinque chapitres.

Le premier sera consacré à des rappels théoriques sur le diagramme d'équilibre fer-carbone, sur les constituants, les phases et l'étude de la transformation de l'acier et leur structure et les facteurs influençant sur la structure.

Dans un deuxième chapitre, on présente les traitements thermiques et thermochimiques de l'acier ainsi que Grandes classes de ces traitements.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur la corrosion, ses différentes formes, ses types et ses facteurs ainsi que les essais mécaniques.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation du matériau d'étude, à la description des traitements appliqués et aux procédures expérimentales utilisées pour les caractérisations microstructurales et mécaniques. Les caractérisations des phases en termes de composition chimique et microstructures ont été effectuées principalement par microscope optique. Les propriétés mécaniques englobant la dureté est évaluées par le test standard de micro dureté.

Enfin, dans un cinquième chapitre, on présente tous les résultats obtenus et leurs interprétations.

Les principaux résultats seront portés dans une conclusion générale.

I.1 Introduction

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2 % de ce dernier élément. Il peut contenir de petites quantités d'autres éléments incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié. La teneur en carbone de certains de ces aciers alliés peut parfois dépasser 2 %. L'acier peut durcir également sous l'effet d'autres traitements que la trempe, par exemple par écrouissage (travail mécanique à froid).

La possibilité d'attribuer aux aciers une gamme étendue de propriétés grâce à des traitements thermiques, thermomécaniques et mécaniques est à l'origine du très large éventail de leurs utilisations. La quantité d'acier consommée par tête d'habitant a d'ailleurs pu être considérée comme l'indice du développement d'un pays, et l'on peut affirmer que l'industrie moderne a son origine, dès le milieu du XVIII^{e} siècle et surtout au XIX^{e} siècle, dans la découverte des procédés de production massive de l'acier.

I.2 Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme d'équilibre est fabriqué à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone. Dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaît comme une discontinuité. Lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures traitement, il est important de connaître les températures de transformations [5].

La figure I.1 traduit la composition de phases et la structure des alliages dans la concentration varie du fer pur à la cémentite Fe_3C (6.67 %C).

Fe- Fe_3C est un système métastable. Le gain d'énergie libre est plus petit lorsqu'au lieu du graphite il se forme de la cémentite, mais cinétiquement, la formation du carbure de fer est plus probable [6].

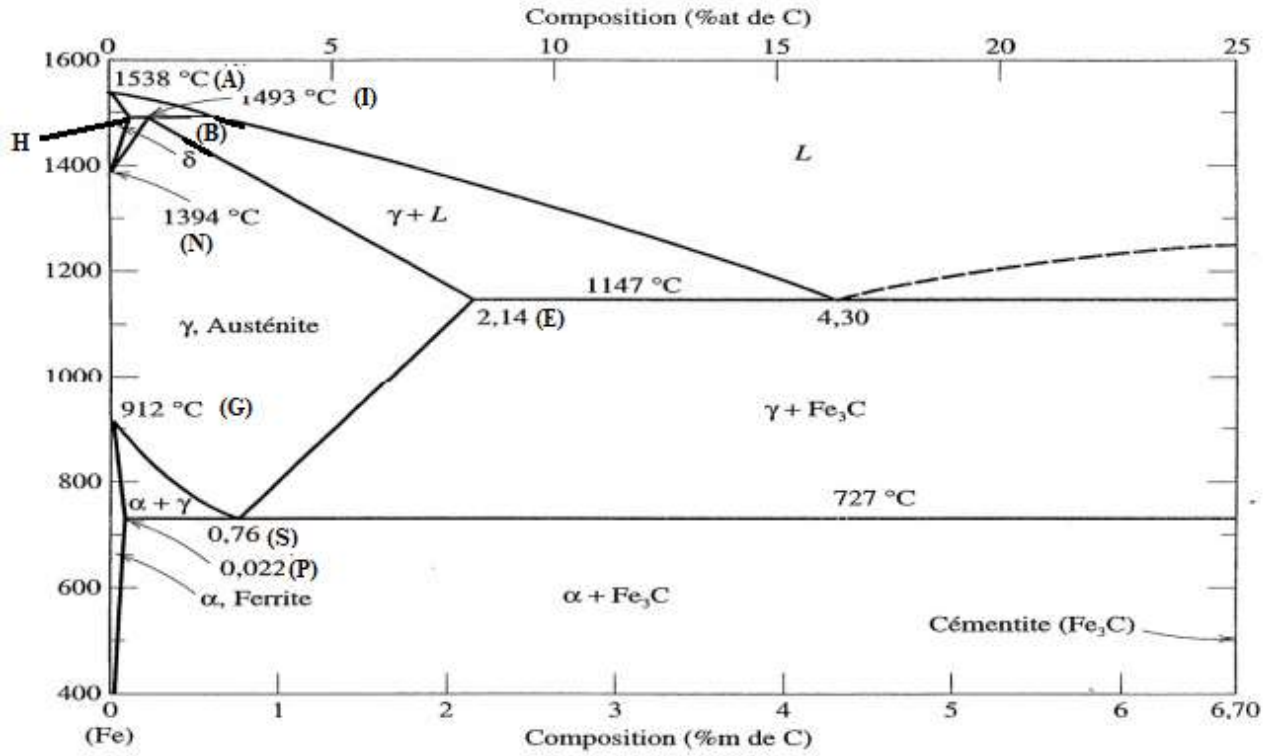


Figure I.1: Diagramme de phase fer-carbone [7].

Le point A (1538 °C) du diagramme correspond à la température de fusion du fer pur, alors que le point N (1394 °C), à celui de la température de fusion de la cémentite (Fe_3C). Les points N (1394 °C) et G (912 °C) marquent la transformation polymorphe ferrite-austénite $\alpha \leftrightarrow \gamma$ [8].

Voici la concentration du carbone (suivant la masse) propre aux points caractéristiques des diagrammes d'équilibre Fe-Fe_3C :

- **B** : 0.51 % C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite δ et l'austénite à la température péritectique 1499°C.
- **H** : 0.10 % C teneur limite du carbone dans la ferrite δ à 1499°C.
- **I** : 0.16 % C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.
- **E**: 2.1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique 1147°C.
- **S** : 0.8 % C dans I'austénite à la température eutectoïde 727°C.
- **P** : 0.022 % C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C [8].

La ligne **PS**, correspond à la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite (C.F.C), se

transforme en solution solide de fer alpha, ferrite (C.C). Puisque la solubilité maximum du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0.025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Donc lors du passage de la ligne **PS**, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite [5].

I.3 Les constituants et les phases de l'acier

I.3.1 Le Fer

Le fer est un métal blanc, son nombre atomique est 26, sa masse atomique 55.86, le rayon atomique 1.27 A°. Le fer le plus pur qui peut s'obtenir actuellement contient 99.99 % [9]. La température de fusion du fer est de 1538 °C.

Il possède une dureté HB de 60 kp/mm², une contrainte limite de traction d'environ 20 kp/mm² et une faible limite d'élasticité. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité (une résistivité électrique à 20 °C de $9.76.10^{-8}$ Ω.m). Grâce à sa grande perméabilité magnétique, il est très utilisé dans l'électrotechnique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande mesure de sa pureté et des régimes de traitement thermiques.

On cornait deux formes (variétés) allotropiques du fer (deux réseaux cristallins différents). Le fer α dont le réseau est cubique centré (C.C) et le fer γ dont le réseau est cubique à faces centrées (C.F.C). Le phénomène de la modification du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique.

Le fer α, appelé aussi la ferrite, existe aux températures inférieures à 912 °C et supérieures à 1394 °C. Sa densité est de 7.68. Aux températures supérieures à 1394 °C, le fer α est désigné par Fe δ. Le fer α possède un réseau cubique centré (C.C) à distance réticulaire de 2.8606 A°, il est magnétique jusqu'à la température de 768 °C. Cette température est appelle point de curie, qui correspond la transformation magnétique [8].

Le Fer γ ou l'austénite, existe entre 910 °C et 1394 °C, il est paramagnétique et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées [10]. Dont l'équidistance vaut 3.6450 A° à 910 °C, et sa densité est supérieure celle du Fe α et vaut 8÷8.1 à g/cm^3 [11].

I.3.2 Le carbone

C'est un élément non métallique peut abondant, (0.1% en masse dans l'écorce terrestre).

Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille, etc.

Ses caractéristiques sont les suivantes : Numéro atomique : 6, Masse atomique : 12, Rayon atomique : 0.77A°, Masse volumique : 2.5 g/cm^3, Température de fusion : 3500 °C.

C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires : le diamant et le graphite [12]. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin cubique à faces centrées et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique. Le graphite possède un réseau hexagonal simple, c'est un matériau réfractaire, relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état poudre pour les mines de crayons, pour la lubrification (combinaison de graphite et de graisse), dans les bronzes graphités ou encore en suspension colloïdale. Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500 °C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe_3C appelée cémentite ou carbone de fer. La phase inter métallique cémentite se différencie par la complexité de sa structure et de sa dureté. La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).
Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent, les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite. Dans le cas contraire, lorsque le refroidissement est rapide, on obtient de la cémentite (Fe_3C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à une température maintenue supérieure à 500 °C [13].

I.3.3 LA ferrite

C'est une solution solide de carbone dans le fer α, c'est-à-dire la ferrite est constituée par du fer α renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0.02 %), ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0.02 % et la ferrite δ à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0.1% [13]. La ferrite est peu tendre et très ductile. Elle est magnétique à ta température ordinaire, au microscope ta ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C [8].

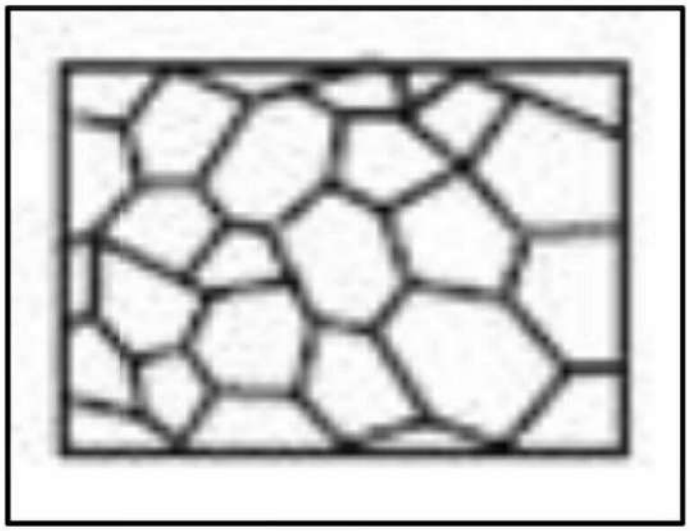


Figure I.2 : Micrographie représentant de la ferrite [5].

I.3.4 L'austénite

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ, La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2.14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est anti-ferromagnétique [13].

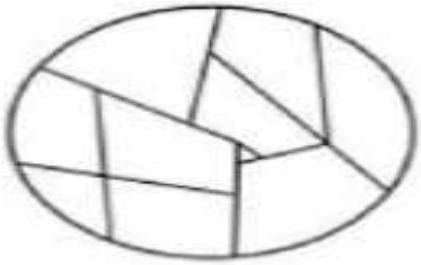


Figure I.3 : Micrographie représentant de l'austénite [14].

I.3.5 La cémentite (ou carbure de fer)

La cémentite est une combinaison chimique du Fer et du carbone dont le carbure le plus stable est Fe_3C. La teneur de la cémentite en carbone est de 6.67 %. Sa densité élevée est de 7.82 et présente une grande dureté [15]. Elle est magnétique jusqu'à 210 °C [13].Sa structure cristalline diffère de celle du Fer et du carbone, elle est orthorhombique avec une maille composée de douze atomes de Fer, entre lesquels sont insérés quatre atomes de carbone ; elle peut être décrite sur la base d'un empilement compact d'atomes de Fer [11].

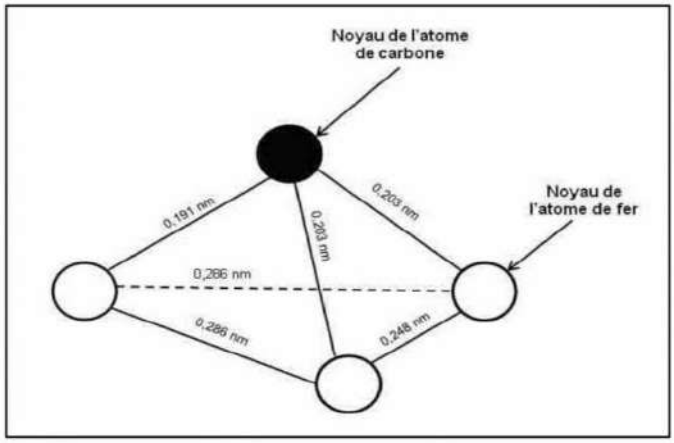


Figure I.4 : La molécule de cémentite (ou carbure de fer) [5].

I.3.6 Le graphite

C'est une forme allotropique du carbone à réseau hexagonale. Les équidistances du réseau ne sont pas grandes et valent 1.4A°. Les couches sont distantes l'une de l'autre de 3.40 A°. Le graphite est doux, sa résistance et sa conductibilité électrique sont faibles.

I.3.7 La perlite

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite). Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0.8 % de carbone. Elle présente clans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0.85 %. La perlite est dure et assez ductile.

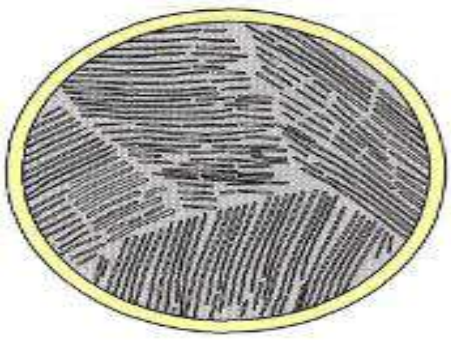


Figure I.5 : La perlite [16].

I.3.8 Ferrite+ perlite

C'est un mélange caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. Proportions variables selon

la teneur en carbone. Les grains de ferrite germent le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine α + γ.

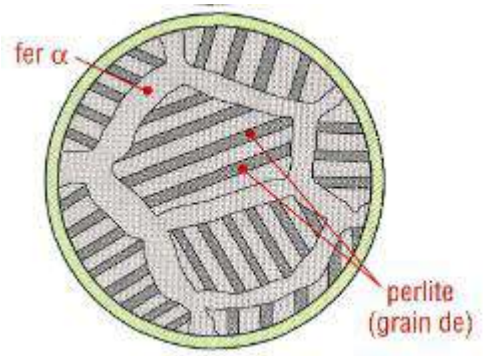


Figure I.6 : Ferrite + perlite [16].

I.3.9 La martensite

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation. La martensite possède une grande dureté (HV = 700 à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite [13].

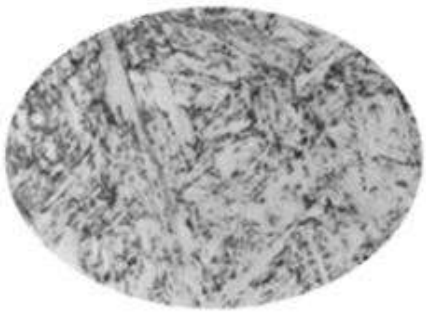


Figure I.7 : La martensite [17].

I.3.10 La 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 apparaissant 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.



Figure I.8 : La bainite [17].

I.4 Constituants des aciers

Rappelons que le fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines. Aux basses températures et jusqu'à 910 °C, ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré, c'est-à-dire qu'ils occupent les sommets et le centre d'un cube : on l'appelle alors fer α. Aux températures supérieures à 910 °C et jusqu'à 1 394 °C, le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées, c'est-à-dire que les atomes sont disposés aux sommets du cube et au centre de ses faces. On l'appelle fer γ. Au-dessus de 1 394 °C et jusqu'au point de fusion, à 1 538 °C, le fer retrouve la structure cubique centrée du fer α : on l'appelle alors fer δ pour distinguer son domaine de stabilité. Lors d'un chauffage, la transformation du fer α en fer γ se fait avec diminution de volume et absorption de chaleur. La transformation inverse se fait avec dilatation.

Cette existence des deux variétés allotropiques du fer joue un grand rôle pour les propriétés de l'acier. Le fait essentiel réside dans la différence de solubilité du carbone dans chacune de ces formes. Alors que cette solubilité du carbone est nulle ou extrêmement faible dans le fer α, elle est notable dans le fer γ, voisine de 2 % à 1 145 °C. Cette solution de carbone dans le fer γ est appelée ***austénite***, tandis que la solution (très diluée : 0.0218 % à 727 °C) dans le fer α est appelée ***ferrite***. En raison de cette faible solubilité, le carbone forme avec le fer un troisième constituant, le carbure de fer Fe_3C, ou ***cémentite***.

Ainsi, un acier, alliage de fer et de carbone, est constitué, à la température ordinaire, d'un mélange de ferrite et de cémentite. Mais, à température plus élevée, alors que le fer α s'est transformé en fer γ, il comporte un seul constituant, l'austénite.

Le chauffage destiné à provoquer cette transformation de l'acier est appelé *austénitisation*. La présence de carbone entraîne d'ailleurs des modifications de la température à laquelle se fait la transformation. Ces modifications sont exprimées dans le diagramme fer-carbone [6].

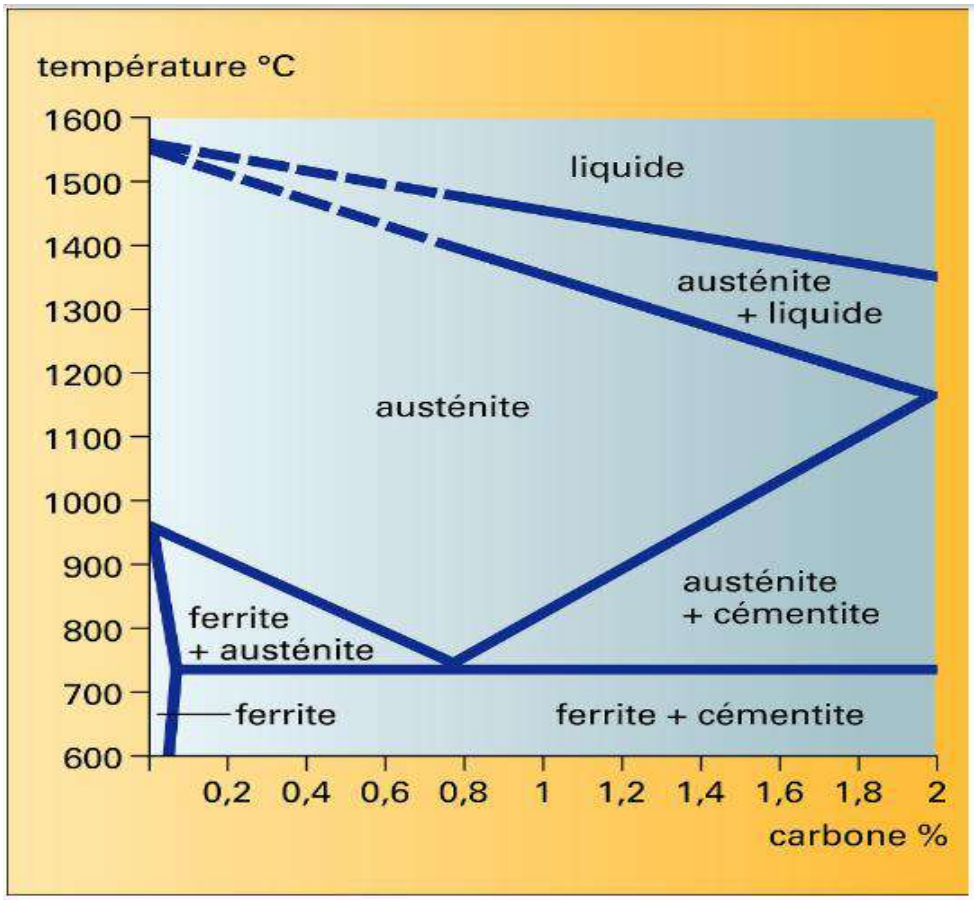


Figure I.9 : Domaines d'existence des différents constituants de l'acier [6].

Ce schéma fait abstraction du domaine du fer d'existant entre 1392 °C, e le point de fusion, pour les aciers à faible teneur en carbone. Un point remarquable doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8 % de carbone. Ce point est dit eutectoïde ; les aciers qui contiennent moins de 0.8 % de carbone sont dits hypoeutectoïdes et ceux qui sont plus carburés, hypereutectoïdes.

Dans les aciers, la transformation α ↔ γ commence dès 730 °C, et se poursuit, dans un intervalle de température variable suivant la teneur en carbone. Pour un acier eutectoïde ayant une teneur en carbone de 0.8 %, la transformation entière se produit à 730 °C [6].

I.5 L'étude de transformation des aciers

L'exploitation du changement de structures métalliques du fer est à la base de nombreux traitements thermiques appliqués aux aciers (trempe, recuit, cémentation, etc.). Encours d'opération, par chauffage ou par refroidissement, on provoque des changements de structure métallique appelés « TRANSFORMATIONS ». Les conditions de transformation de la phase γ (austénite) en phase α (ferrite + cémentite) sont celles qui ont le plus d'influence sur les caractéristiques de l'acier traité [5].

I.5.1 Notion de transformation euectoïde

A la température ambiante, l'acier au carbone est une combinaison de deux solutions solides: la ferrite; la cémentite. Chacune de ces deux solutions solides possède son propre point de transformation (phase α ↔ phase γ). Dans le cas présent, chaque solution exerce une influence sur la température de transformation de l'autre [5].

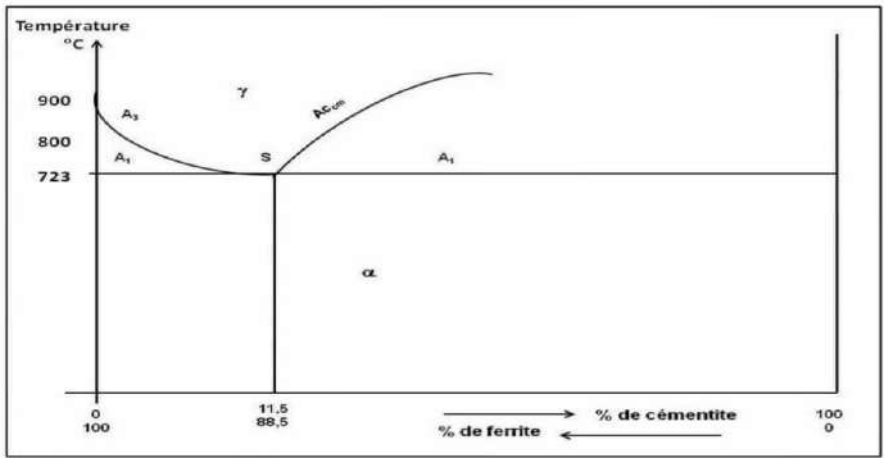


Figure I.10 : Le diagramme partiel de la transformation de l'alliage fer-cémentite [5].

Sur la figure I.10 : la courbe A_3 correspond à la transformation ferrite ↔ austénite. La teneur de cémentite dans l'acier augmentant, la température de transformation de la ferrite diminue; la courbe Ac_m correspond à la transformation cémentite ↔ austénite. La teneur de ferrite augmentant, la température de transformation de la cémentite diminue. Ces deux courbes mettent en évidence l'interaction de la ferrite et de la cémentite sur leurs températures de transformation respectives. Au point S, 11.5 % de cémentite et 88.5 % de ferrite, ces deux

constituants se transforment simultanément en austénite. Cette transformation, dite eutectoïde, est réversible. C'est le cas des aciers eutectoïdes contenant 0,77 % C [5].

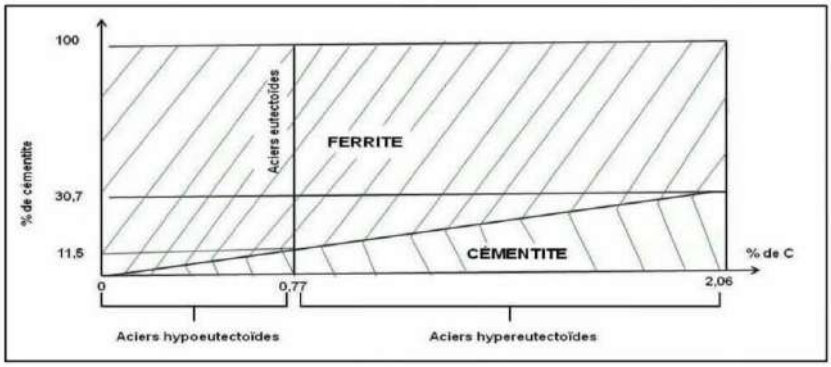


Figure I.11 : La répartition de la ferrite et de la cémentite dans les aciers au carbone [5].

I.5.2 Le processus de formation de la perlite lors du refroidissement

Dans le cas des aciers eutectoïdes (0.77 % C), la ferrite et la cémentite se présentent sous forme d'un mélange hétérogène (agrégat), appelé perlite. Dans la perlite, la cémentite peut se présenter sous forme de lamelles ou de globules. Ce sont les cycles thermiques qui permettent de passer d'une structure lamellaire à une structure globulaire ou le contraire. Dans la matière, elle est présente sous forme de grains et est ferromagnétique. On parle d'une structure mi-dure, avec une dureté de l'ordre de 40 à 43 HRC [5].

I.5.3 La transformation de l'austénite des aciers eutectoïdes

À 723 °C, la transformation débute généralement au bord des grains, par la formation de germes de cémentite. Les atomes de carbone se déplaçant (ou se diffusant) vers ces germes, laissent de la ferrite dans les régions avoisinantes (figures I.12 à I.14) [5].

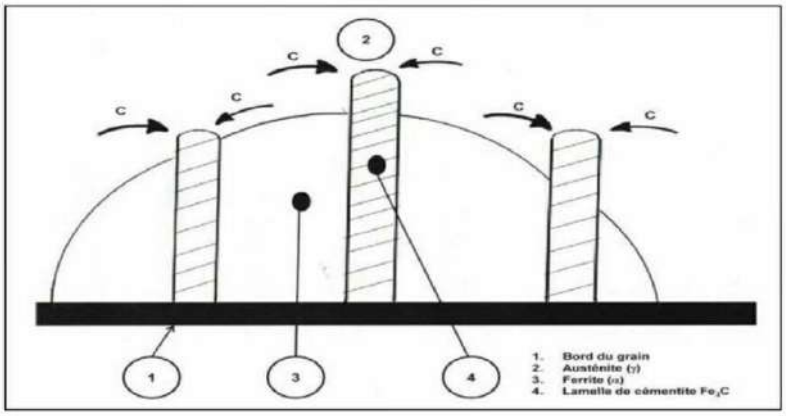


Figure I.12 : La diffusion des atomes de carbone dans l'austénite [5].

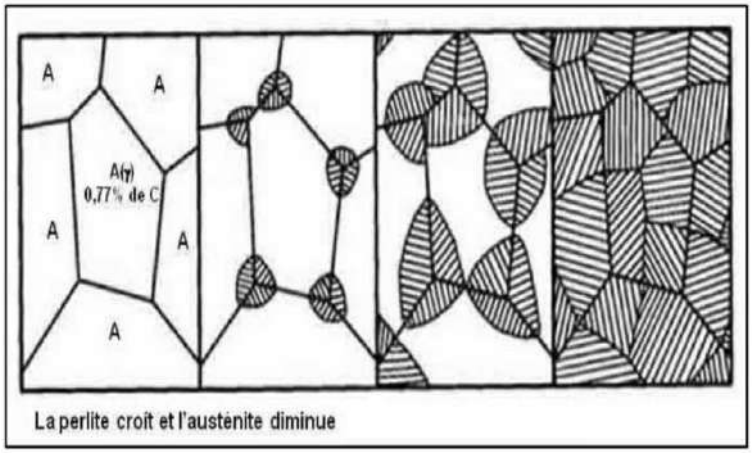


Figure I.13 : La formation de la perlite [5].



Figure I.14 : Micrographie de la perlite [5].

I.5.4 La transformation de l'austénite des aciers hypoeutectoïdes (<0.77 % C)

À la température de transformation A_3, les atomes de carbone insérés dans l'austénite (phase γ) se déplacent vers le centre des grains jusqu'à ce que la teneur en carbone atteigne 0.77 %. Les zones dépourvues en carbone se transforment en grains de ferrite (phase α). On rencontre alors simultanément de la ferrite et de l'austénite. À la température de transformation A_1, il y a transformation eutectoïde de l'austénite en perlite [5].

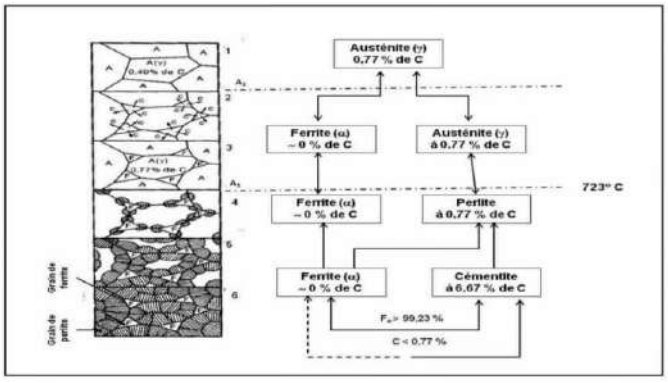


Figure I.15 : La transformation d'un acier hypoeutectoïde [5].

I.5.5 La transformation de l'austénite des aciers hypereutectoïdes (> 0.77 % C)

À la température de transformation A_{cm}, les atomes de carbone migrent vers les joints des grains d'austénite jusqu'à ce que la teneur en carbone au centre du grain atteigne 0.77 % C. Dans les zones enrichies de carbone, il y a formation de grains de cémentite (cm). Il y a alors cohabitation d'austénite et de cémentite. À la température de transformation A_1, il y a formation de perlite par transformation eutectoïde de l'austénite [5].

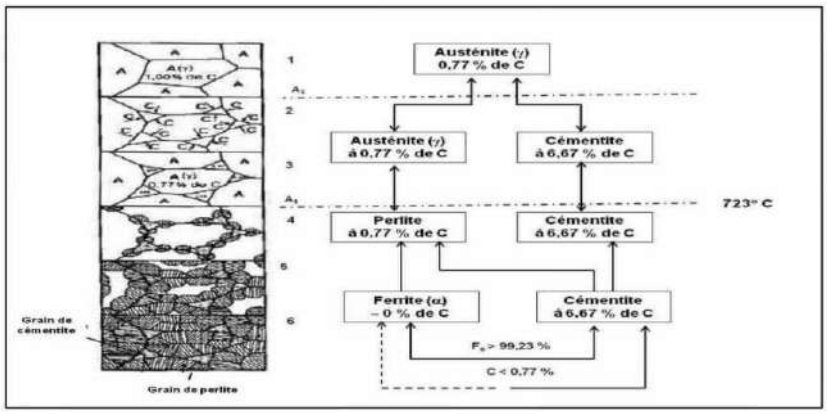


Figure I.16 : La transformation d'un acier hypoeutectoïde [5].

I.5.6 La transformation de l'austénite lors d'un refroidissement continu (transformation isothermique)

La transformation se produisant à différentes températures, les conditions se modifient. Il y a formation successive de différents constituants [5].

Perlite grossière – 5 HRC	Bainite moyenne – 44 HRC
Perlite fine – 31 HRC	Bainite inférieure – 56 HRC
Perlite très fine – 41 HRC	Martensite → Austénite – 62 HRC
Bainite supérieure – 42 HRC	Martensite – 65 HRC

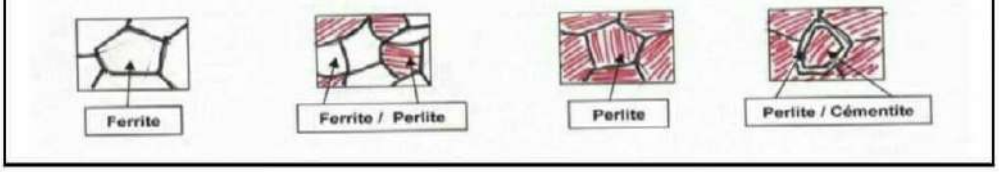


Figure I.17 : Les constituants issus des transformations (acier à 0.89 % C) [5].

Dans le cas d'une transformation lors d'un refroidissement an isotherme, le diagramme T.R.C. (transformation, refroidissement, continu) est utilisé [5].

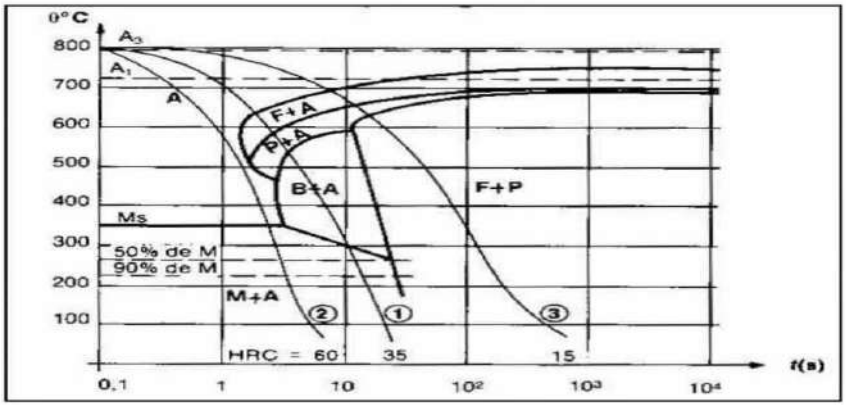


Figure I.18 : Le diagramme T.R.C. d'un acier SAE 1045 [5].

La courbe de refroidissement 1 passe par différentes zones de transformation de l'austénite:

Zone F + A : formation de ferrite;

Zone P + A : formation de perlite;

Zone B + A : formation de bainite;

Zone M + A : formation de martensite.

Par conséquent, après un refroidissement représenté par la courbe 1, l'acier sera constitué de ferrite, de perlite, de bainite, de martensite et d'austénite résiduelle. À la courbe de refroidissement 2, on observe formation de martensite tandis qu'à la courbe 3, il y a formation de ferrite et de perlite [5].

I.6 Structure des aciers

Les aciers sont, à la température ambiante, constitués essentiellement par des mélanges de ferrite et de cémentite. Mais la superposition de ces deux constituants peut prendre des formes très différentes selon les conditions dans lesquelles ils ont pris naissance. Les structures de l'acier peuvent ainsi être extrêmement variées ; elles sont aisément mises en évidence par les techniques de la métallographie.

Celles-ci comportent l'examen d'une surface du métal très soigneusement polie et attaquée par des réactifs convenables qui mettent en évidence, par des différences dans l'intensité de l'attaque, les divers constituants de l'acier. L'examen se fait à l'aide d'un microscope optique. Des procédés un peu différents permettent l'examen au microscope électronique avec des grossissements beaucoup plus grands. On a pu constater que les propriétés d'un acier étaient essentiellement fonction de cette structure ; par conséquent,

l'obtention d'une structure convenable est la clé qui permet d'attribuer à l'acier les propriétés désirées.

Ces structures dépendent des conditions dans lesquelles l'acier a été refroidi depuis le moment où, chauffé au-dessus du point de transformation, il était constitué par de l'austénite. En particulier, suivant la vitesse de refroidissement, on peut avoir, dans le cas de faibles vitesses, une répartition dans la ferrite de particules très grossières de cémentite, ou, au contraire, dans le cas de plus grandes vitesses, une superposition des deux constituants en éléments extrêmement fins, discernables seulement avec de très forts grossissements. À l'extrême, on peut arriver à une solution de carbone dans une ferrite déformée, solution en état de faux équilibre, puisque la solubilité du carbone dans la ferrite est extrêmement faible ; la structure formée est la martensite ; dès qu'un échauffement aura restitué aux atomes de carbone une certaine mobilité, ils se sépareront de la ferrite sous forme de carbure, tandis que la ferrite retrouvera sa cristallisation cubique centrée normale.

La connaissance des diverses structures auxquelles peut aboutir la transformation de l'austénite lors du refroidissement a accompli de grands progrès grâce à l'étude de cette transformation en conditions isothermes à divers températures. Lorsqu'on prend un échantillon d'un acier chauffé dans le domaine de l'austénite, qu'on le refroidit brusquement à une température inférieure à son point de transformation -par exemple, à 600 °C- et qu'on le maintient à cette température pendant une durée suffisante, on peut suivre, par différentes méthodes, la transformation de l'austénite en fonction du temps. On constate alors que cette transformation débute seulement après un "temps d'incubation" qui dépend de la composition de l'acier et, pour un acier donné, de la température. Il peut être d'une fraction de seconde, de quelques minutes ou de quelques heures. Après cette période d'incubation, la transformation commence par l'apparition de ferrite ou de cémentite, suivant que l'acier est hypo- ou hypereutectoïde. Cette formation de ferrite ou de cémentite correspond à un enrichissement ou à un appauvrissement en carbone de l'austénite non transformée. Le phénomène se poursuit jusqu'au moment où le mélange atteint la teneur eutectoïde de 0.8 % de carbone. À partir de ce moment, le constituant formé est un agrégat de ferrite et de cémentite. La transformation continue progressivement jusqu'à ce quelle soit complète.

On a pu tracer ainsi, pour chaque acier, des diagrammes dits TTT (température, temps, transformation) sur lesquels figurent les courbes représentant le début et la fin de la transformation et, très souvent, celle qui correspond à 50 % d'austénite transformée. Sur la

figure I.19, on voit qu'à 700 °C la transformation commence, après environ 20 secondes, par un dépôt de cémentite; après 40 secondes, la transformation produit ferrite et cémentite. Vers 300 secondes, il y a 50 % d'austénite transformée et la transformation est complète après une heure environ. Lorsque la température baisse, la transformation est de plus en plus précoce et de plus en plus rapide. Vers 450 °C, elle débute en moins d'une seconde; elle est terminée en 3 à 4 secondes. Aux températures inférieures, elle est de nouveau plus lente.

Au-dessous d'une certaine température désignée par MS – dans ce cas vers 190 °C –, la transformation prend un tout autre caractère. Elle n'est plus fonction du temps mais seulement de la température: à chaque température, une certaine fraction de l'austénite est transformée instantanément et il faut encore un abaissement de la température pour provoquer la transformation d'une nouvelle fraction.

Ce diagramme est donné à titre d'exemple. Les aciers alliés ont des diagrammes beaucoup plus complexes; des zones de température peuvent apparaître dans lesquelles l'austénite est totalement stable. L'intérêt de l'étude des transformations isothermes de l'austénite ne réside pas seulement dans l'observation de la cinétique de cette transformation. Elle réside aussi dans la caractérisation des structures obtenues à chacune des températures, structures qui, en raison de l'isotherme de la transformation, sont homogènes. La structure observée après un refroidissement continu est, au contraire, souvent beaucoup plus complexe: elle comporte un mélange des structures élémentaires.

Ces structures élémentaires sont les suivantes:

- Par transformation peu au-dessous du point Ac_1, on obtient une structure dite perlite globulaire : il s'agit d'une dispersion de globules de cémentite dans la ferrite, la densité de ces globules étant d'autant plus grande que le pourcentage de carbone est lui-même plus élevé. C'est l'état d'équilibre normal entre ferrite et cémentite, vers lequel tend la structure par maintien suffisamment prolongé à une température élevée mais inférieure à Ac_1. On la rencontre dans l'acier parfaitement recuit. Elle correspond à la plus faible dureté.
- À de plus basses températures, on a, à côté de la ferrite ou de la cémentite, une perlite lamellaire constituée par des lamelles alternées de cémentite et de ferrite. Ces lamelles sont d'autant plus fines que la température de transformation est plus basse. Elles finissent par ne plus être perceptibles en microscopie optique. On a alors une

structure dite troostite. La dureté de l'acier croît avec la finesse de cette structure perlitique.

- Aux températures encore plus basses – disons vers 400 °C – une nouvelle structure, dite bainite, apparaît dont l'éventualité est beaucoup plus fréquente dans les aciers alliés que dans l'acier au carbone. Cette bainite a une apparence aiguillée, elle aussi d'autant plus fine que la température est plus basse. On distingue parfois une bainite supérieure, assez grossièrement aiguillée, et une bainite inférieure, qui ne peut plus être micrographiquement résolue. Là encore, la dureté croît en même temps que la finesse des constituants (figure I.19) et de façon relativement considérable. Alors qu'après transformation à 650 °C (perlite lamellaire souvent grossière) la dureté, mesurée avec une machine Rockwell, est 25 dans l'échelle C (empreinte réalisée avec un cône en diamant), elle devient 59 à 250 °C, après transformation en bainite inférieure.

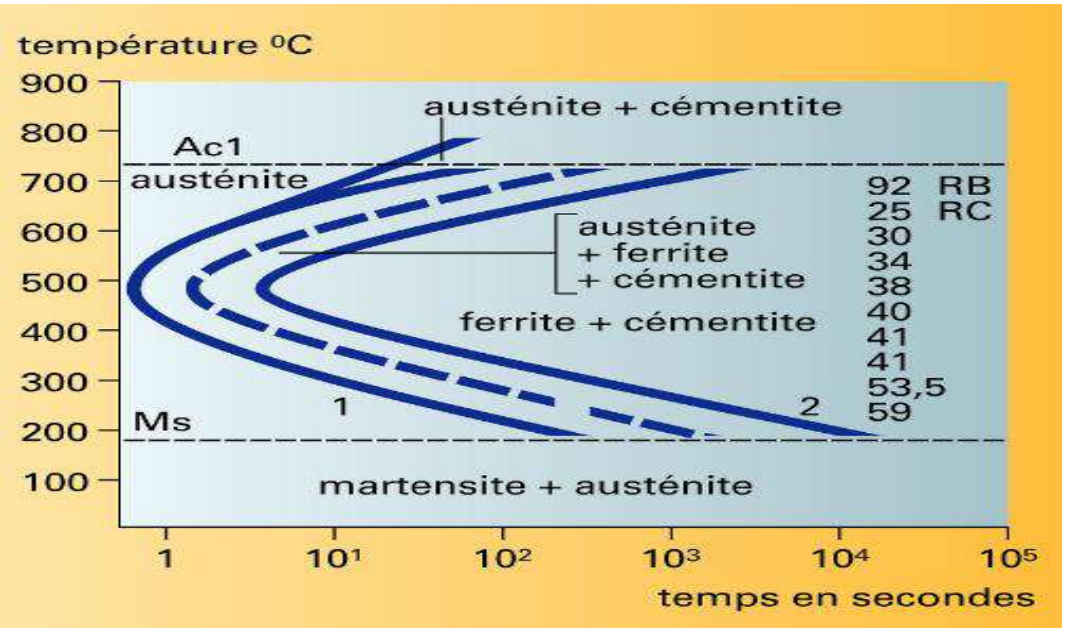


Figure I.19 : Diagramme TTT d'un acier [6].

Le mode de transformation que nous venons de décrire s'arrête au point dit M_S: comme nous l'avons dit, les processus deviennent alors tout à fait différents et ne dépendent plus du temps, mais seulement de la température. Le constituant formé est alors la martensite, solution métastable de carbone dans une ferrite dont le réseau cubique est déformé et devenu quadratique. Cette martensite est le constituant des aciers trempés; elle est d'autant plus dure que l'acier est plus carburé. À chaque température, la martensite existe en présence d'une

certaine quantité d'austénite non transformée, quantité d'autant plus faible que la température est plus basse. Il existe une température, dite M_f, à laquelle la transformation martensitique est complète; mais cette température est souvent inférieure à la température ambiante. À moins de traitements spéciaux, il persiste alors, à côté de la martensite, une certaine quantité d'austénite dite résiduelle; dans certains cas, cette austénite ne peut pas se transformer par refroidissement, même à très basse température, le point M_f étant inférieur aux températures atteintes.

La martensite est, par nature, instable. Il suffit d'un chauffage et d'un maintien vers 100 °C pour qu'elle rejette une très grande partie du carbone qu'elle tient en solution. À mesure de ce rejet, elle revient vers le réseau normal, cubique centré, de la ferrite. Le carbone ainsi précipité l'est sous forme d'un carbure spécial de formule voisine de Fe_2C. À plus haute température, ce carbure se transforme lui-même en cémentite Fe_3C.

L'étude de la transformation isotherme de l'austénite conduit ainsi à la connaissance des constituants pouvant en résulter et des domaines de température dans lesquels ils apparaissent. Mais, dans la pratique, les aciers subissent, le plus souvent, un refroidissement continu depuis l'instant où ils sont purement austénitiques. À moins que l'abaissement de la température ne soit assez lent pour que la transformation se fasse tout entière dans le domaine perlitique, ou assez rapide pour que toute transformation soit évitée avant le point M_S, la structure sera plus complexe: on observera la superposition de constituants formés à mesure du passage dans les divers domaines. Ce phénomène est peu sensible avec les aciers au carbone, pour lesquels la transformation est rapide (quelques secondes vers 500 °C), mais devient prépondérant avec les aciers alliés, pour lesquels les structures sont souvent extrêmement complexes [6,19].

I.7 Facteurs influençant sur la structure

Les conditions de la transformation de l'austénite et, par conséquent, la structure d'un acier à la température ordinaire ne dépendent pas uniquement de la vitesse de refroidissement. Elles sont fonction, entre autres facteurs, de la composition de l'acier. En effet, un acier, même non allié, n'est pas seulement un alliage de fer et de carbone. Il contient une certaine quantité d'autres éléments, ajoutés volontairement au cours de l'élaboration pour répondre à certaines nécessités, ou provenant d'impuretés apportées par les matières premières et qui n'ont pas pu être entièrement éliminées. Il n'est pas rare que la teneur totale en ces éléments dépasse la teneur en carbone de l'acier.

Les éléments ajoutés volontairement sont essentiellement des désoxydants - manganèse, silicium, aluminium, etc. -, dont le rôle est de fixer l'oxygène dissous dans le métal liquide sous une forme qu'on a cru longtemps inactive. D'autres éléments proviennent des matières premières ou de l'atmosphère des fours: azote, hydrogène, soufre, phosphore, etc. et, éventuellement, nickel, chrome ou autres éléments apportés par les riblons ou les ferrailles.

Tous ces éléments, qu'on appelle souvent "oligo-éléments" (à cause de leur faible concentration dans le mélange final), jouent, à côté du carbone, un rôle important lors de la transformation de l'austénite et agissent donc sur les propriétés de l'acier. Ils modifient les vitesses de transformation, dans un sens ou dans l'autre, mais généralement en les diminuant, c'est-à-dire que les courbes du diagramme TTT sont plus ou moins reportées vers la droite.

Cette influence est souvent renforcée par le fait qu'ils ne sont pas toujours répartis d'une façon homogène dans l'acier mais que, comme le carbone d'ailleurs, ils peuvent être "ségrégés", c'est-à-dire être rassemblés, lors de la solidification, dans certaines parties du métal, très souvent entre les cristaux ou dans les fractions du lingot solidifiées en dernier lieu. Ces ségrégations, très importantes dans le métal brut de coulée, s'atténuent lors des transformations ultérieures du lingot, à l'occasion des chauffages successifs et des déformations du métal. Mais elles restent décelables même après des déformations importantes. Les teneurs en ces éléments peuvent être très élevées en certains points de l'acier, de sorte que les conditions de transformation, donc la structure, peuvent être très hétérogènes.

La présence d'éléments autres que le carbone est aussi importante en raison de leur action sur la position des courbes de transformation, donc sur les constituants de l'acier après un cycle de refroidissement. Mais elle se manifeste également par leur effet sur un caractère important d'un acier: sa grosseur de grain à l'état austénitique.

Les méthodes de la métallographie montrent qu'une solution solide métallique, ce qui est le cas de l'austénite, est constituée par une juxtaposition de grains ayant chacun une orientation cristalline déterminée. Cette caractéristique s'explique par les processus de germination et de croissance, le développement d'un cristal à partir d'un germe étant limité par celui des cristaux voisins. Entre ces "grains", une zone de transition désorientée constitue le "joint de grain". La "grosseur de grain", mesurée par le nombre de cristaux dans un certain volume ou, plus simplement, par le nombre de cristaux rencontrés dans une coupe de section

déterminée, joue un rôle important. On montre qu'elle dépend, d'une part, de la température à laquelle l'acier est chauffé et de la durée du maintien à cette température, d'autre part, d'un caractère inhérent à l'acier qui le rend plus ou moins sensible à un grossissement des grains pendant le chauffage, caractère qui est lié à la présence de certaines impuretés ou constituants de l'acier, tels que le nitrure d'aluminium, des oxydes ou des carbures peu solubles. On a montré, par exemple, qu'à un grain plus gros correspondait un déplacement vers la droite des courbes du diagramme TTT, donc une plus grande stabilité de l'austénite et une transformation plus lente.

Ainsi, de multiples facteurs agissent sur la vitesse de transformation de l'austénite et, par conséquent, sur la structure et les propriétés de l'acier. On retrouve, en particulier, l'influence de toute l'histoire de l'acier, celle des matières premières dont il provient, des détails du processus d'élaboration et des déformations et traitements qu'il a subis. Cela explique la complexité des phénomènes et le fait qu'ils ne soient connus que depuis peu de temps [18].

Chapitre II Traitement thermique et thermochimique de l'acier

II.1 Introduction

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). 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). Généralement, 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) [19].

Les traitements thermochimiques permettent d'obtenir des caractéristiques particulières à la surface d'une pièce sans altérer les caractéristiques dans la masse. Selon leur principe, ils améliorent principalement une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : la dureté en surface, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et le comportement au frottement [20].

II.2 Traitement thermique

II.2.1 Introduction

Les traitements thermiques confèrent aux propriétés produits métalliques les propriétés nécessaires pour leur transformation, leur mise en œuvre ou leur utilisation : ils constituent donc une opération métallurgique fondamentale.

Ces traitements s'appliquent aux métaux et alliages à l'état solide ; ils comprennent essentiellement un maintien à une température déterminée suivi d'un retour à la température ambiante.

Les paramètres principaux des traitements thermiques sont : la température maximale, la durée de maintien à cette température, la loi de refroidissement et la nature du milieu ou des milieux successifs (atmosphères, bain de sels,…etc).

Les valeurs de ces paramètres sont déterminées par la nature des produits à traiter (composition chimique, état structural et masse) ainsi que par les caractéristiques recherchées.

Les traitements thermiques influencent les propriétés mécaniques et certaines propriétés physiques et chimiques des métaux et des alliages en modifiant les constituants micrographiques (proportions relatives, composition chimique, répartition, morphologie) ainsi que la concentration et la distribution des défauts réticulaires [21].

II.2.2 Définition

On désigne par traitement thermique, tout cycle d'opération faite à chaud, destinée à modifier les propriétés mécaniques d'un métal pour lui donner de nouvelles qualités mécaniques. Le mode opératoire du traitement thermique consiste en un chauffage, un maintien et ensuite un refroidissement (figure II.1) [22].

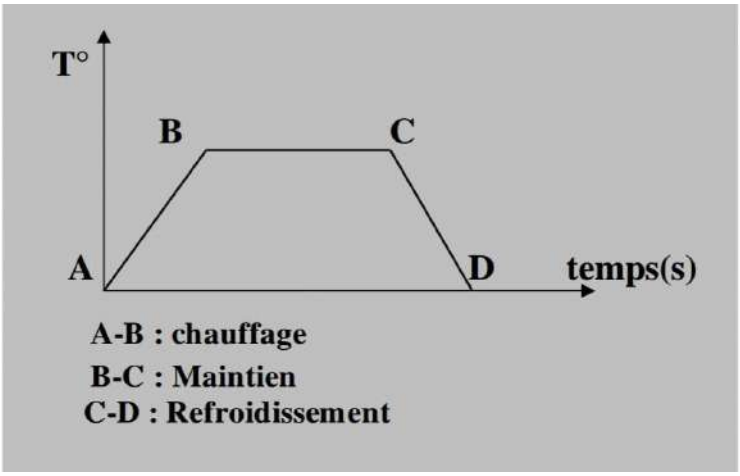


Figure II.1 : Mode opératoire d'un traitement thermique [22].

II.2.3 Évolution historique des traitements thermiques

L'évolution des traitements thermiques s'effectue dans le sens d'une association de cycles de température à d'autres sollicitations : déformations plastiques, contraintes d'origines diverses, influence de l'environnement, en particulier emploi d'atmosphères spécifiques de chaque traitement et de chaque alliage, etc. Les traitements thermiques modernes pour les alliages performants comprennent souvent une succession complexe d'opérations très précises ; c'est dans les traitements thermiques des alliages d'aluminium qu'on en trouve une illustration spectaculaire. Il faut aussi ajouter l'évolution vers des traitements thermiques superficiels ou localisés sur certaines parties de pièces, utilisant parfois des techniques

physiques très récentes : laser, bombardement électronique par exemple. Les progrès dans les traitements thermiques n'ont pu être obtenus que grâce aux développements de la physique des matériaux et à l'amélioration de la connaissance des mécanismes structuraux dont dépendent les diverses propriétés des matériaux. Ces progrès ont donc été étroitement liés à la découverte et au développement des appareils de laboratoire et des méthodes d'investigation de la structure des matériaux [23].

II.2.4 Paramètres disponibles pour la réalisation des traitements thermiques

Les paramètres que l'on peut utiliser pour la réalisation des traitements thermiques sont ceux qui caractérisent l'existence des différentes phases d'un même alliage, les transformations entre elles et les mécanismes de ces transformations. Le rôle de la température et du temps s'impose largement parmi ces paramètres qui sont les suivants :

- ✓ composition chimique globale de l'alliage ;
- ✓ hétérogénéités chimiques locales à l'échelle de la structure
- ✓ micrographique (à l'échelle des grains ou des défauts cristallins) ;
- ✓ hétérogénéité chimique à l'échelle d'une pièce métallique (enrichissement ou appauvrissement superficiel en certains éléments) ;
- ✓ structure micrographique de l'alliage (morphologie des phases, phases dispersées) ;
- ✓ texture de l'alliage ;
- ✓ atmosphère ou milieu de traitement pour éviter ou favoriser des modifications de composition superficielle (protection contre l'oxydation ou traitements superficiels) ;
- ✓ température de traitement ; elle est le plus souvent supérieure à la température ambiante, mais peut parfois être inférieure (déstabilisation de l'austénite résiduelle dans les aciers) ;
- ✓ vitesses de chauffage jusqu'à la température de traitement et de refroidissement depuis cette température : elles dépendent beaucoup de la taille des pièces à traiter et plus précisément de la diffusivité thermique du matériau, elles ne peuvent donc pas toujours être librement choisies ;
- ✓ temps de séjour à la température de traitement ;
- ✓ profondeur chauffée (pour les traitements thermiques superficiels) ;
- ✓ cycles thermiques complexes faisant intervenir de multiples combinaisons température-temps (trempes isothermes, etc.) ;

- ✓ écrouissage, conduisant à une modification du taux de défauts cristallins ;
- ✓ contraintes résiduelles, internes ou superficielles ;
- ✓ contraintes ou déformations appliquées pendant le traitement ;
- ✓ champ magnétique appliqué pendant le traitement thermique de certains aimants ;
- ✓ champ électrique appliqué pour la nitruration ionique ou la cémentation sous vide.

Dans la recherche d'une amélioration des caractéristiques des alliages, obtenues par traitement thermique, le choix des paramètres joue évidemment un rôle capital et l'on s'aventure désormais dans des domaines autre fois interdits comme le traitement dans le domaine de brûlure pour les alliages d'aluminium, ou le laminage dans des domaines biphasés pour les aciers, par exemple.

II.2.5 Traitements thermique des aciers

Ces considérations sur la structure de l'acier, fonction des conditions de refroidissement, ont une grande importance pratique. Elles sont, en effet, à la base des divers traitements thermiques qui permettent d'attribuer à un acier un large éventail de propriétés.

Le plus simple de ces traitements est le recuit , qui comporte soit un chauffage au-dessus du point de transformation suivi d'un refroidissement très lent, soit un chauffage un peu au-dessous du point de transformation, avec un maintien très prolongé à cette température, suivi d'un refroidissement qui peut être assez rapide, à l'air, par exemple. La vitesse du refroidissement, dans le premier cas, la durée du maintien du chauffage, dans le second cas, sont fonction de la composition de l'acier. Le recuit fait disparaître toutes les contraintes qui pouvaient subsister dans l'acier à la suite des déformations et des traitements thermiques ou mécaniques qu'il avait antérieurement subis. Il le ramène dans un état voisin de l'état d'équilibre avec une structure de cémentite, souvent globulaire, dispersée dans la ferrite. C'est l'état d'adoucissement maximal, qui est parfois le plus favorable pour l'usinage.

Un autre traitement thermique souvent pratiqué est la normalisation : celle-ci comporte un chauffage au-dessus du point de transformation, suivi d'un refroidissement à l'air. Il en résulte un adoucissement et l'élimination d'une grande partie des contraintes, mais la structure et les propriétés ne sont pas toujours bien définies puisque la vitesse de refroidissement est

fonction de la dimension de la barre ou de la pièce. La normalisation permet cependant de mettre le métal dans un état bien reproductible, compte tenu de ces réserves.

Mais le durcissement par trempe est peut-être le traitement thermique le plus important. Il consiste à chauffer l'acier au-dessus du point de transformation – c'est ce que nous avons appelé l'austénitisation – et à le refroidir brusquement par immersion dans un liquide, eau ou huile, ou même simplement à l'air pour certains aciers (dits parfois autotrempants). L'alliage acquiert alors une grande dureté, d'autant plus grande qu'il est plus carburé.

Rappelons que, dans cet état, la structure de l'acier est dite martensitique; elle comporte parfois des restes d'austénite non transformée, ce qui explique la dureté moindre des aciers alliés très carburés. Cette structure est fondamentalement instable, le carbone se trouvant en sursaturation dans la ferrite.

La déformation du réseau cubique centré de la ferrite en un réseau quadratique est la cause de la dureté élevée de la martensite. Mais elle provoque également une fragilité, d'autant plus grande que la teneur en carbone est plus élevée. Le durcissement par trempe est donc accompagné d'une fragilisation. C'est pour cette raison que le traitement de trempe est habituellement suivi d'un revenu, qui est un chauffage avec maintien plus ou moins prolongé à une température inférieure au point de transformation. Ce revenu a pour effet un adoucissement avec, simultanément, une diminution de la fragilité. Il permet d'ajuster les caractéristiques de résistance et de ductilité de l'acier à celles qui conviennent pour l'emploi envisagé.

Les phénomènes se produisant au cours du revenu sont parfois très complexes. Dans le cas des aciers non alliés, la cémentite précipite puis se "coalesce" à mesure que la température s'élève ou que la durée du revenu s'accroît: la dureté diminue progressivement. En présence d'éléments d'alliage, la précipitation de carbures alliés autres que la cémentite complique beaucoup les phénomènes. Il peut même se produire, dans certaines zones de température, des durcissements secondaires. Il faut tenir compte, enfin, de la décomposition de l'austénite résiduelle éventuelle, soit au cours du revenu, soit pendant le refroidissement consécutif à ce traitement. Les conditions du revenu, c'est-à-dire la température atteinte et la durée du

maintien, doivent être fixées, suivant le but visé, en tenant compte de la composition de l'acier et de cette complexité des phénomènes.

Il existe bien d'autres traitements thermiques pouvant être appliqués aux aciers, en particulier certaines variantes dans le processus même de la trempe: on peut, par exemple, immerger l'acier non pas dans un liquide froid mais dans un bain à température plus ou moins élevée et l'y maintenir un certain temps. On peut modifier ainsi les structures de trempe ou éviter des déformations et obtenir une grande variété de résultats.

Dans certains cas, ces traitements thermiques ne sont appliqués qu'à une partie d'une pièce d'acier, en général la surface, et sur une profondeur limitée. Cela peut être obtenu en chauffant la pièce partiellement, soit en la maintenant dans un four un temps insuffisant pour laisser la chaleur pénétrer jusqu'au centre, soit en appliquant des modes de chauffage particuliers qui n'intéressent que la surface (chalumeaux, chauffage par induction...).

D'autres traitements consistent à modifier superficiellement la composition de l'acier, par exemple en y incorporant du carbone (cémentation) ou de l'azote (nitruration) ou les deux éléments simultanément (carbonitruration).

On peut ainsi faire varier dans de très larges limites les propriétés des aciers en agissant sur les traitements thermiques qu'il est possible de leur faire subir. C'est là, très certainement, l'origine du développement extraordinaire de leurs utilisations [24].

II.2.5.1 Buts des traitements thermiques des aciers

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limité élastique R_e, A % en donnant une meilleure tenue de l'élément ;
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

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

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage [25].

II.2.6 Grandes classes de traitements thermiques de l'acier

II.2.6.1 La trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite. La température d'austénitisation, aussi appelée « température de trempe » dépend de la teneur en carbone de l'acier ; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C [26].

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier. Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20 - 40 °C. En ajoutant environ10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérant à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du carbone et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Lors de la transformation, les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la

transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - Taux de Transformation) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu) dans le cas des trempes [27].

II.2.6.2 Le Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus on moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe [28]. Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique métastable vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille C.C de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées.

Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu sont représentées sur le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

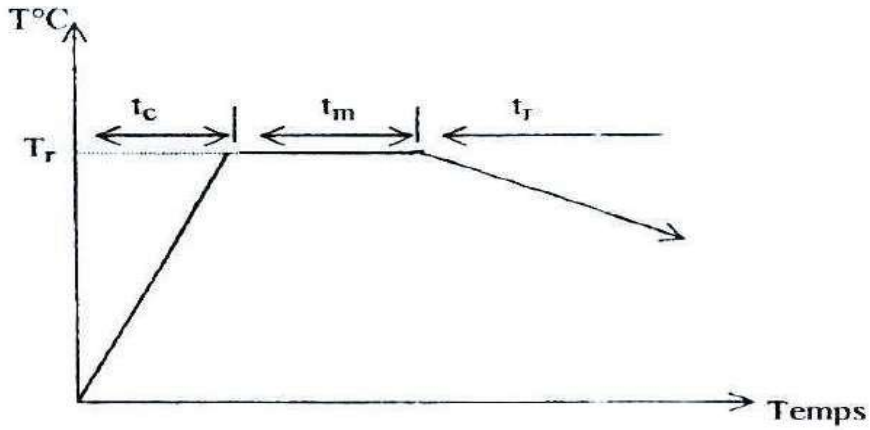
Le revenu doit s'effectuer immédiatement après trempe, surtout pour les aciers très carburés ayant subi une trempe énergique. Le réchauffage doit être conduit lentement au début du revenu, une trop brusque élévation de température pouvant produire des tapures. Aussi faut-il se garder d'introduire brusquement une pièce trempée dans un bain ou un four chauffé [29]. Comme le revenu se pratique à une température inférieure au point de transformation de l'acier, celui-ci en se refroidissant ne traversera aucune région de transformation, et la vitesse de refroidissement ne pourra avoir d'influence sur la texture. On peut donc, si on désire hâter le travail, refroidir les pièces à l'huile ou à l'eau, mais, si on le préfère, on peut simplement laisser refroidir à l'air ambiant après revenu. Certains aciers

fortement alliés nécessitent deux voire minimum trois revenus : c'est le cas par exemple des aciers rapides.

II.2.6.3 Recuits

a. Principe du recuit

Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs [30].



T_r : température de recuit. t_c : temps de chauffage.

t_r : temps de refroidissement. t_m : temps de maintien.

Figure II.2 : Représente la vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit [30].

b. But de recuit

- Diminuer la dureté d'un acier trempé ;
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques ;
- Régénérer un métal cristallin, écroui ou surchauffé ;
- Homogénéiser des structures hétérogènes;
- Réduire les contraintes internes ;
- Stabiliser des tensions moléculaires ;
- Consiste à chauffer une pièce jusqu'à une température dite de recuit (350 °C-1200 °C) qui dépend du type de recuit à réaliser pendant un temps déterminé t_r puis procédé à un refroidissement très lent généralement à l'air calme.

En réalité, le recuit nécessite dans chaque cas des applications assez différentes de chauffage et de refroidissement, suivant la classe de l'acier et le but atteindre. On a généralement recours à deux méthodes de traitement bien distinctes :

- ✓ Le recuit intégral par chauffage au dessus de la température de transformation, amenant l'acier à l'état de solution solide homogène comme pour le tremper et en le refroidissant assez lentement pour éviter le durcissement ;
- ✓ Le recuit à une température inférieure au point critique, ce qui correspond à un revenu à température maximum [31].

II.2.7 Intérêt des traitements thermiques

Les industries mécaniques utilisent des aciers qui doivent avoir les propriétés optimales qui leur permettent de satisfaire aux exigences imposées par les sollicitations auxquelles ils sont soumis pendant leur service. Dans ces conditions, il est nécessaire (techniquement et économiquement) que les caractéristiques de résistance de ces aciers soient portées aux valeurs maximales compatibles pour assurer la sécurité du fonctionnement en service [32]. Ce résultat est généralement obtenu en faisant subir aux aciers un traitement thermique de durcissement. En effet, il a été montré, que les différentes structures qui peuvent se former pendant les transformations des phases des aciers ont des propriétés mécaniques très différentes, qui vont de la dureté extrême des martensites (qui nécessite un revenu pour parvenir au meilleur compromis entre l'exploitation la plus poussée de la capacité de durcissement et la conservation de la ductilité nécessaire) aux caractéristiques de résistance relativement faibles des structures ferrito-perlitiques. Ainsi, les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un acier (en général à un matériau) des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation [33]. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

II.2.8 Structures, propriétés des traitements thermiques

Les métallurgistes, chargés de concevoir et de fabriquer les matériaux métalliques s'intéressent à leurs propriétés, mais surtout au moyen de les obtenir. Pour cela ils ont fait des

études et ont vu que les propriétés mécaniques des matériaux dépendent essentiellement, outre de leur nature et de leur composition, de leur structure interne, tant micrographique que cristalline : leurs préoccupations principales sont donc de comprendre les relations entre la structure interne et les propriétés, ce qui leur permet de les contrôler et, mieux, de les améliorer.

Leur étude a montré ensuite, que la structure micrographique qui permet pour un alliage donné, de faire varier ses propriétés dans une plage de valeurs étendue, est profondément modifiée par les traitements thermiques.

II.2.9 Les inconvénients du traitement thermique

Parmi les défauts principaux qu'un traitement thermique peut produire, on peut citer les tapures extérieures et intérieures, la déformation et le gauchissement et les microfissures après la trempe.

II.2.9.1 Les tapures

Les tapures se forment le plus souvent au cours de la trempe, lorsque les contraintes internes de traction dépassent la résistance de l'acier à décohésion. L'aptitude à la formation des tapures s'accroît avec l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone, l'élévation de la température et l'accélération du refroidissement dans l'intervalle de température de la transformation martensitique.

Les tapures peuvent encore résulter de la concentration des contraintes élastiques locales. Les tapures sont un défaut incorrigible.

II.2.9.2 déformation et gauchissement

La déformation qui résulte de la modification des dimensions et de forme de la pièce enregistrée au cours d'un traitement thermique, et l'effet des changements de volume provoqués par des transformations de phase non homogène, ainsi que des contraintes thermiques et structurales.

Le gauchissement s'observe surtout lorsque le chauffage est irrégulier ou trop poussé, ainsi que le positionnement défectueux de la pièce immergée et la vitesse de refroidissement

trop grande dans l'intervalle de température martensitique. L'élimination de ces causes réduit nettement le gauchissement [25].

II.3 Traitement thermochimique

II.3.1 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, carbonitruration, nitruration, nitrocarburation ou boruration. Ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées. Selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée [34].

II.3.2 Types des traitements thermochimiques

Il existe de nombreux types de traitements thermochimiques ayant pour but d'améliorer la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage, à la corrosion…etc, on se limitera à décrire quelques traitements à savoir la cémentation par le carbone, la nitruration, la nitrocarburation et la carbonitruration [35].

II.3.2.1 Cémentation

C'est un traitement thermique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone, élément qui se trouve alors en solution solide dans l'austénite. Le produit ferreux cémenté subit un durcissement par trempe immédiate ou ultérieure [35].

a. Techniques de cémentation

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux

a.1 Cémentation en caisse

Les céments solides sont des mélanges à bases de matière carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé, peu utilisé actuellement et réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées de petites pièces.

a.2 Cémentation liquide

Les céments liquides sont à bases de cyanures ou de ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. La cémentation en bain de sel permet un chauffage homogène et une action chimique régulière ; sa mise en œuvre est simple et son coût d'investissement est faible, mais les sels de cyanure utilisés ont des effets polluants.

a.3 La cémentation gazeuse

Est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par décomposition à chaud de liquides organiques tels que méthanol, éthanol utilisé pur ou dilués, ou par combustion des hydrocarbures, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considéré. Il y a carburation si, initialement, l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales, le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre libéré s'insère dans le réseau cubique à faces centrées du fer ; ils donnent avec l'austénite des équilibres réversibles :

$$\mathbf{2CO \leftrightarrow CO_2 + C}$$

$$\mathbf{CH_4 \leftrightarrow 2H_2 + C}$$

définis en fonction de la pression, de la température, de la composition gazeuse et de la concentration en carbone C de l'austénite [36].

II.3.2.2 Nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique de durcissement superficiel d'aciers utilisé pour produire un composé. Il en résulte un véritable matériau composite dont la structure macroscopiquement hétérogène présente une âme résiliente et une zone superficielle de dureté moyennement élevé avec augmentation simultanée de la résistance à la corrosion, à l'usure, à l'abrasion et à la fatigue. La nitruration est une opération chimique qui consiste à faire absorber du carbone par des pièces en acier doux. Il suffit pour cela de chauffer la pièce à traiter à une température suffisante, nécessaire à la formation de la structure austénitique et favorise la diffusion du carbone, en présence d'une source riche d'azote. La couche superficielle absorbe l'azote et se transforme en acier très nitruré dans la zone superficielle. Par refroidissement, la structure de cet acier passe de son état initial à une structure contenant des nitrures de fer durs et cassants. Après la trempe, les pièces subissent un revenu, qui a pour but de diminuer les effets de la trempe en augmentant la résilience et la ténacité et d'abaisser la fragilité et la dureté de la couche cémentée [37].

a. Techniques de nitruration :

Les différents processus de nitruration peuvent être principalement différentiés selon leur source de nitrogène et alimentation en énergie. La nitruration par bain de sel, par gaz et par bombardement ionique comporte différents avantages en matière de coût d'investissement, de temps de processus, d'environnement, de sécurité et de qualité. Les propriétés de la surface nitrurée ou obtenue ne dépendent pas, dans de nombreux cas, du processus de production. On distingue trois types de nitruration suivant l'état du milieu nitrure: nitruration ionique, nitruration liquide, nitruration gazeuse [20].

a.1 Nitruration gazeuse :

La nitruration gazeuse fait partie des procédés de diffusion thermochimique. A des températures de traitement de 480 à 580 °C, la sur face est soumise à un traitement thermochimique en présence d'azote et éventuellement de carbone. Grâce aux derniers développements des techniques de nitruration gazeuse contrôlées et de régulation en continuent du quotient de nitruration, il est possible de superviser l'ensemble du traitement et de moduler de manière ciblée la constitution et la composition de la couche de combinaison et

de diffusion ainsi que la dureté. Dans ce mémoire, nous sommes intéressés uniquement au procédé de nitruration gazeuse [20].

a.2 Nitruration liquide

Elle s'effectue à une température de 570 °C pendant 0.5 à 3 heures dan un bain de cyanures alcalins (60 % NACN et 40% KCN), 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 carbonitrurée (7 à 8 µm) de Fe_3, (N, C).

Ce procédé présente l'avantage d'un faible changement de dimensions et l'absence du grandissement des pièces. Ses inconvénients sont la toxicité et le prix élevé des cyanures [25, 20].

a.3 Nitruration ionique

Schématiquement, elle s'effectue par décharges électriques entre une anode et les pièces qui forment la cathode. La tension est comprise entre 300 et 1000 V. L'atmosphère est à basse pression (10 à 100 Pa) et constituée d'azote et d'hydrogène. L'azote se dissocie et s'ionise. Les ions N^+ sont ainsi attirés par la cathode, leur énergie cinétique permet de chauffer les pièces, les décapent et pénètrent dans la couche superficielle. Les traitements sont ainsi plus précis et plus rapides [38].

II.3.2.3 La nitrocarburation

La nitrocarburation est la "sœur" de la nitruration qui consiste à introduire en plus du carbone dans l'atmosphère de nitruration [39]**.** Ainsi, le carbone et l'azote diffusant simultanément en surface de la pièce, conduisent à la formation d'une couche de combinaison composée de carbonitrures de fer et d'une couche de diffusion renfermant de l'azote en solution solide et des précipités de nitrures d'éléments d'alliage. Au cours de la nitrocarburation, l'azote pénètre dans les carbures alliés provoquant leur conversion en nitrures. Cette conversion est basée sur l'affinité élevée qu'ont les éléments d'alliage (chrome, vanadium et molybdène) pour l'azote que pour le carbone [40].

La nitrocarburation est largement utilisée afin d'améliorer les propriétés surfaciques de l'acier, tels que la résistance à l'usure, à la fatigue et à la corrosion [41]. La résistance à l'usure, dépendant essentiellement de la dureté de la zone de diffusion [42], est améliorée par la fine précipitation des nitrures et des carbures, dispersées de façon homogène dans la matrice ferritique [43].

II.3.2.4 Carbonitruration

La carbonitruration est un traitement thermochimique similaire à celui de la cémentation. Le produit ferreux est porté à l'état austénitique afin de réaliser un enrichissement superficiel en carbone et en azote [44] .Généralement cette opération est suivie immédiatement d'un durcissement par trempe. L'opération chimique se fait en atmosphère gazeuse CO + H_2 + N_2 additionnée de petites quantités d'ammoniac (5%) et de propane (2%), vers 840 °C, pendant quelques heures. On opère sur des aciers au carbone ou des aciers de cémentation [45].

L'azote a deux effets :

- Il accélère l'enrichissement en carbone.
- Il modifie les propriétés de la couche enrichie. En effet, l'azote a une action fortement gamagène, il augmente la stabilité de l'austénite et abaisse donc la vitesse critique de refroidissement pour la formation de la martensite [46].

II.3.2.5 La chromisation

C'est la saturation en chrome de la couche superficielle des pièces de l'acier, par diffusion du chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à AC_3, (1000 à 1050 °C). Généralement la chromisation augmente la tenue à la corrosion jusqu'à 800 °C et celle des aciers à teneur élevée en carbone (> 0.3 à 0.4 % C) (Chromisation dure) augmente la dureté et la tenue à l'usure [25].

II.3.2.6 La boruration

C'est la 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 2000 HV), une bonne tenue à l'usure et à la corrosion [25].

II.3.2.7 La siliciuration

C'est la saturation en silicium de la surface de l'acier, ce qui donne à l'acier une bonne tenue à la corrosion, vis-à-vis des différents milieux, la siliciuration accroit quelque peu l'usure. L'opération s'effectue dans un mélange pulvérulent (75 % de ferro-silicium + 20 % de chamotte et le reste H_4Cl), ou le plus souvent, dans un milieu gazeux ($SiCl_4$), obtenue en faisant passer du chlore par un espace réactif contenant les pièces à traiter et du ferro-silicium ou du carbure de silicium.

La température de saturation est de 950 à 1000 °C. La couche siliciurée se distingue particulièrement par une porosité accrue, sa profondeur est de 0.3 à 1 mm, mais caractérisée par une faible dureté (200 à 300 HV).

La siliciuration est appliquée aux pièces utilisées dans l'équipement chimique, du papier, du pétrole,…etc [25].

II.3.2.8 Sulfonitruration

Ce traitement augmente la résistance à l'usure en améliorant considérablement le frottement par autolubrification. La profondeur traitée est de 0.2 à 0.5 mm. La surface de la pièce est enrichie en souffre par chauffage vers 750°C. Tous les matériaux ferreux peuvent être sulfonitrurés. Un autre traitement à basse température s'effectue par électrolyse en bain de sels à 190°C sur des aciers et sur des fontes. La pénétration est moins grande que pour la sulfonitruration mais la température plus basse n'occasionne pas de revenu parasite. Aucune reprise d'usinage ne doit être faite après le traitement. Ce traitement ne peut pas s'appliquer sur des aciers contenant plus de 12% de chrome. Les aciers cémentés trempés, les aciers et les fontes trempés peuvent recevoir ce traitement [47].

II.3.2.9 Sulfinisation

La sulfinisation ou cémentation par le souffre communique à la surface traitée une haute résistance à l'usure, sans accroissement de la dureté. Elle s'applique à tous les matériaux ferreux.

Les pièces sont chauffées à 570 °C pendant trois heures dans un creuset de cyanure et de sels dérivés du souffre, le refroidissement se fait dans l'eau à 80 °C.

On obtient une couche d'environ 0.3 mm, il faut prévoir 0.02 à 0.03 mm de surépaisseur pour la rectification. Une bonne résistance aux frottements résulte de la porosité de la couche

traitée (réserve de graissage). Ce traitement est surtout utilisé pour les pièces de frottements servant de contact mobile : les patins, les coussinets, les glissières de machines-outils [22].

II.3.2.10 Cyanuration

La cyanuration est procédée ayant pour but la saturation simultanée de la surface de l'acier en carbone et en azote afin d'augmenter la dureté et la tenue à l'usure. Les aciers destinés à subir un tel traitement contiennent de 0.2 à 0.4 % C. La cyanuration réalisée à des températures de 820 à 860 °C, dans des bains contenant 20 à 25 % NaCN, 25 à 50 % NaCl et 25 à 50 % Na_2CO_3, est destinée pour obtenir une couche de faible épaisseur (0.15 à 0.35 mm). La durée de l'opération varie en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir est de 30 à 90 mm.

Pour obtenir une couche plus épaisse (0.5 à 2 mm), l'opération se déroule dans un bain différent composé de NaCN, $BaCl_2$ et NaCl. La cyanuration est très employée dans l'industrie automobile et applicable aux petites pièces, telles que les pignons de commande de la pompe à huile, les compteurs de vitesse, les axes de ressort de la suspension arrière, les vis sans fin du volant, les petits arbres, les écrous,…etc. L'inconvénient de la cyanuration est le prix élevé et la nocivité des cyanures, ainsi que la nécessité imposée de prendre des mesures de protection spéciales [25].

Partie A : La corrosion

III.1 Introduction

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement [48].

III.2 Généralités sur le phénomène de corrosion

III.2.1 Définition de la corrosion

Le nom « corrosion » vient du latin « corroder » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés (physicochimiques, mécaniques, etc.) par interaction chimique avec le milieu environnant.

Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible car il détruit le matériau et réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Mais d'un autre point de vue la corrosion est un phénomène bien venu, voir souhaité, car elle détruit et élimine un nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion (anodisation de l'aluminium, polissage électrochimique, etc.) [48].

III.2.2 Importance économique de la corrosion

Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants :

- Pertes directes : remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés ;
- Pertes indirectes : couts des réparations et pertes de production (temps) ;
- Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

La diversité des coûts rend toute estimation des charges économiques dues à la corrosion difficile et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés [48].

III.2.3 Cause de la corrosion

Dans la nature tous les métaux, à l'exception des métaux nobles tels que l'or (Au) et le platine (Pt), se présentent dans la nature sous forme d'oxydes et de sulfures métalliques. Cet état de point de vue thermodynamique est très stable. Cependant, l'énergie considérable fournit pour l'obtention des métaux de ces minerais fait que les métaux obtenus se trouvent dans un niveau énergétique élevé, ils sont thermodynamiquement instables. C'est pour cette raison que tous les métaux usuels ont tendance à retourner à leur état initial en énergie, cela se fait à l'aide du milieu environnant [48].

Exemple :

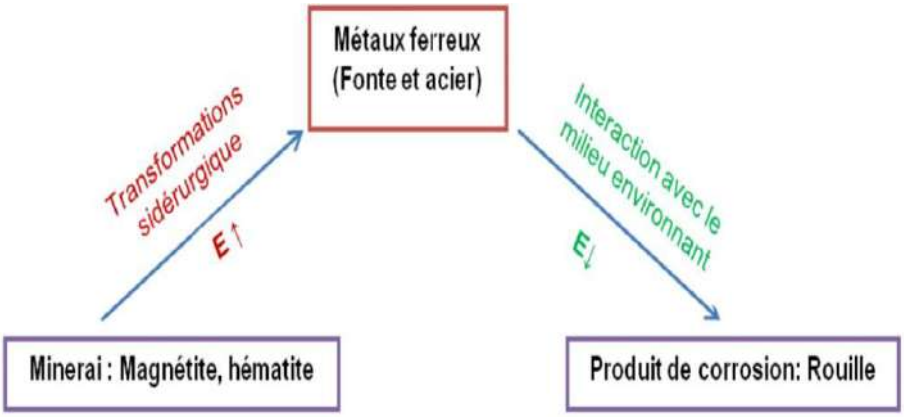


Figure III.1 : Schéma traduisant la cause de la corrosion atmosphérique du fer [48].

III.3 Classification de la corrosion

Selon la nature du milieu environnant avec lequel le matériau rentre en interaction, la corrosion peut être classée en trois grandes classes : chimique, bactérienne et électrochimique.

III.3.1 La corrosion chimique

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche» ou corrosion à haute température.

Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques.

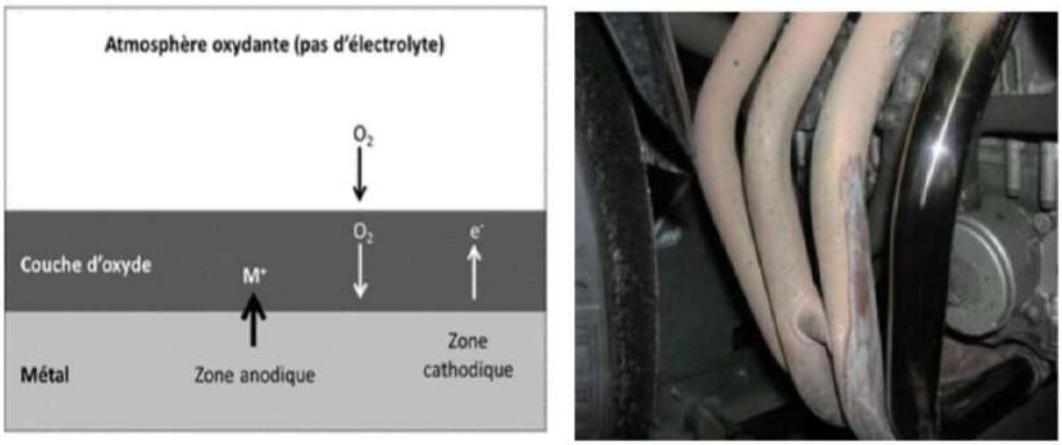


Figure III.2 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement [48].

III.3.2 La corrosion bactérienne

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries).

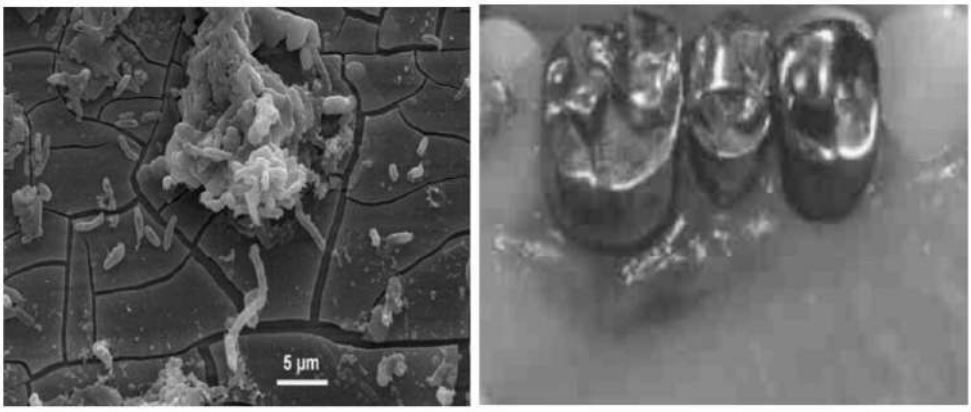


Figure III.3 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire [48].

III.3.3 La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes.

La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O, O_2, H_2, etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction, dont :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique»,
- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction «cathodique».

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables [48].

III.4 Aspect morphologique de la corrosion

La première approche de la corrosion étant généralement visuelle, la corrosion peut être divisée, d'un point de vue aspect morphologique, en deux grandes classes : corrosion généralisée et corrosion localisée appelée encore corrosion « zonale ».

III.4.1 Corrosion généralisée

La corrosion généralisée ou uniforme est une corrosion progressant approximativement à la même vitesse sur la totalité de la surface d'un métal donné en contact avec un milieu environnant corrosif. C'est la forme de corrosion la plus simple.



Figure III.4 : Corrosion généralisée : exemple d'une porte et d'un véhicule corrodes [48].

III.4.2 Corrosion localisée (zonale)

Ce mode de corrosion est le mode le plus fréquent et le plus ennuyeux car il vise uniquement certaines zones bien distingues du matériau, on distingue plusieurs types, à savoir:

III.4.2.1 La corrosion galvanique (bimétallique)

La corrosion galvanique ou bimétallique peut se définir simplement par l'effet résultant du contact de deux métaux ou alliages différents dans un environnement corrosif conducteur. Ce contact conduit à la formation d'une pile électrochimique entre les deux métaux ou alliage. Le métal le moins résistant, moins noble, se dégrade et sa dégradation s'intensifie avec le temps.

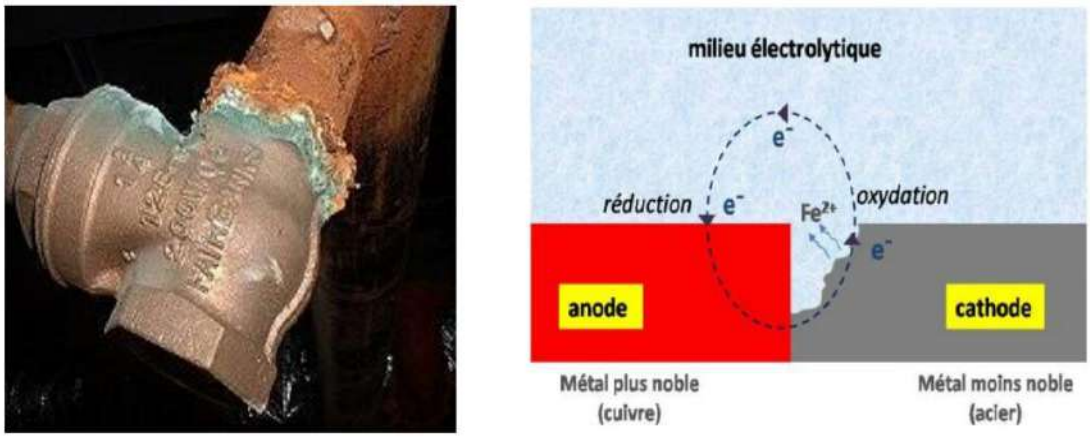


Figure III.5 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé [48].

III.4.2.2 La corrosion caverneuse (par crevasse)

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution électrolytique stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets. Le sable, la poussière, le tartre, les produits de corrosion sont autant de corps solides susceptibles de créer des zones dans lesquelles le liquide n'est que difficilement renouvelé. Ce phénomène concerne tous les matériaux. C'est aussi le cas des joints en matériau souple, poreux ou fibreux (bois, plastique, caoutchouc, ciment, amiante, tissus, etc.).

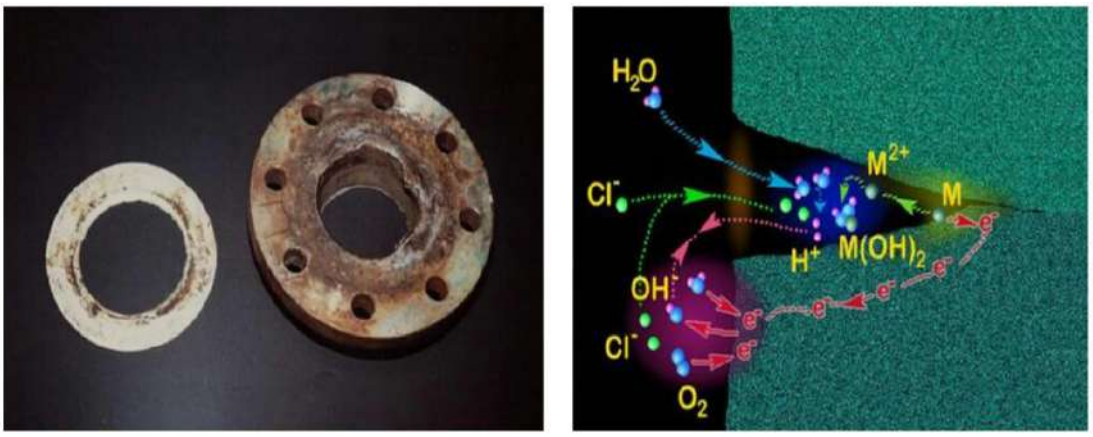


Figure III.6 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse [48].

III.4.2.3 La corrosion par piqûres

C'est une forme de corrosion qui se produit par certains anions, notamment les ions chlorures, sur les métaux dit « passivables » (aluminium, chrome, cobalt, cuivre, acier inoxydable, acier dans le béton, etc.) qui sont protégés par un film d'oxyde passif. Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse, l'attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse.

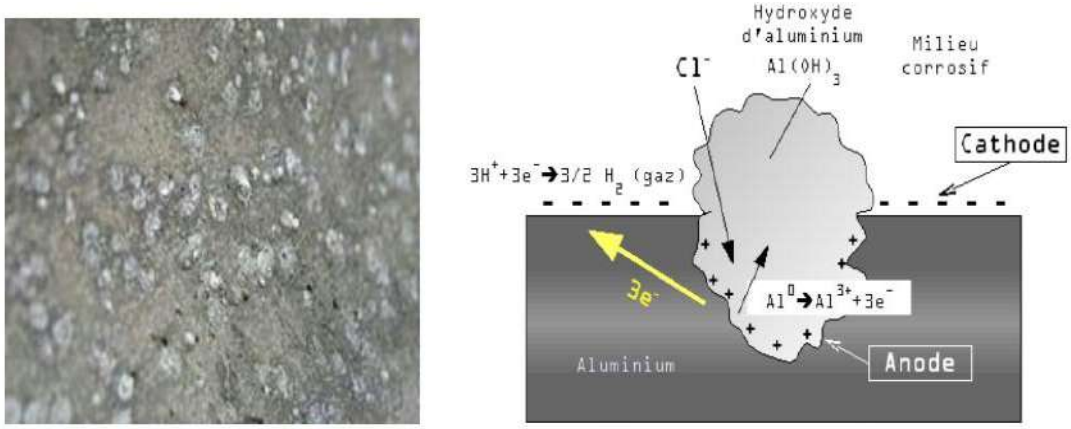


Figure III.7 : Corrosion par piqûre de l'aluminium [48].

III.4.2.4 La corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et

perd toutes ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion est due soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants ou bien à la précipitation des phases et combinaisons chimiques lors d'un traitement thermique (martensite, nitrures, carbures, etc.).

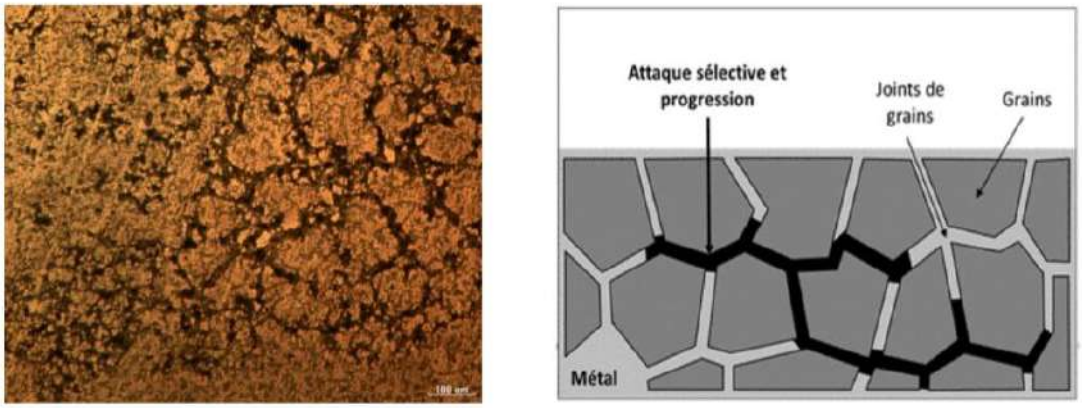


Figure III.8 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique [48].

III.4.2.5 La corrosion sélective

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé, conduisant ainsi à la formation d'une structure métallique poreuse. La dézincification (dissolution sélective du zinc) dans un laiton est l'exemple le plus connu.

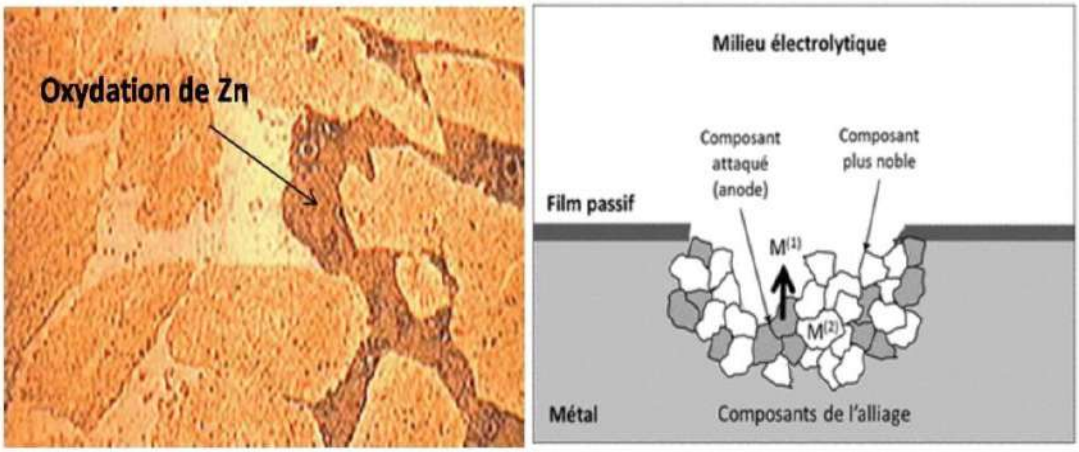


Figure III.9 : Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc) [48].

III.4.2.6 La corrosion érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a lieu, souvent, sur des métaux exposés à un écoulement rapide d'un fluide (air, eau, etc.). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb, etc.) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables).

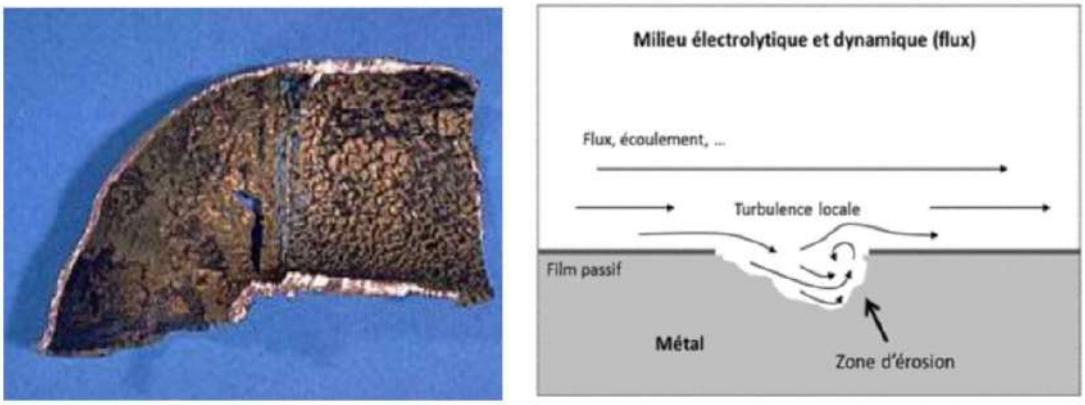


Figure III.10 : Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion [48].

III.4.2.7 Corrosion frottement (tribocorrosion)

La corrosion frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression. En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion.

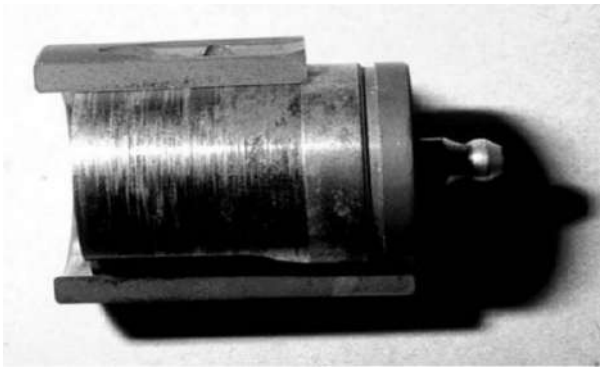


Figure III.11 : La tribocorosion [48].

III.4.2.8 La corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion correspond à une fissuration du métal qui résulte d'une action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. Elle se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif.

Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion, qui sont dangereuses. Les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice.

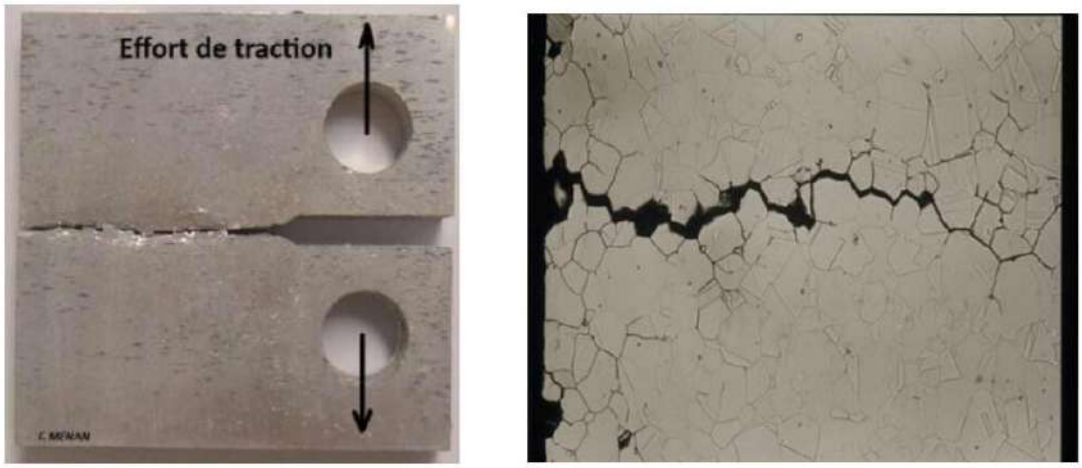


Figure III.12 : La corrosion sous contrainte [48].

Un autre phénomène très comparable à la corrosion sous contrainte, il s'agite de la fatigue-corrosion. La différence étant que la sollicitation est alors cyclique (ex : les roues des trains en service). La rupture peut intervenir même si la contrainte appliquée est très inférieure à la résistance mécanique attendue pour l'acier.

III.4.2.9 Fragilisation par hydrogène

La présence d'hydrogène dans un réseau métallique génère de très fortes pressions à l'intérieur du métal pouvant aboutir à une rupture différée. Ces atomes d'hydrogène ont pour origine : l'atmosphère environnante, les procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique.



Figure III.13 : La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique [48].

III.5 Facteurs de corrosion

Le phénomène de corrosion dépend d'un nombre de facteurs généralement en relation les uns avec les autres. Ces facteurs peuvent être d'origine interne ou externe, à savoir :

- Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque : T, P, pH, teneur en O_2, teneur en impuretés, etc ;
- Facteurs métallurgiques : composition chimique du matériau (alliage métallique), traitements thermiques, etc ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi (du service) : état de surface, forme des pièces, sollicitation, etc ;
- Facteurs dépendant du temps : vieillissement, mode de diffusion d'oxygène ou d'autres gaz (CO_2), modification des revêtements protecteur (peintures) [48].

III.6 Potentiel de corrosion (E_{corr})

Appelé encore potentiel de dissolution ou d'abondant, il correspond au potentiel que prend une électrode (métal) par rapport à une solution quelconque.

Lorsque l'on mesure le potentiel de corrosion d'un métal, on observe qu'il n'atteint pas en général immédiatement une valeur stationnaire. En effet, au moment où le métal est plongé dans la solution, celle-ci ne contient pas d'ions de métal, si bien qu'un potentiel stationnaire est long à atteindre. D'autre part. L'interface métal-solution peut être modifiée par formation d'un produit de corrosion insoluble ou d'un gaz comme l'hydrogène [48].

Cette grandeur n'est pas caractéristique au métal mais elle dépend des conditions expérimentales, à savoir : la concentration, la température, l'état de surface, etc. Les différentes allures de l'évolution du potentiel de corrosion avec le temps sont représentées par la figure suivante :

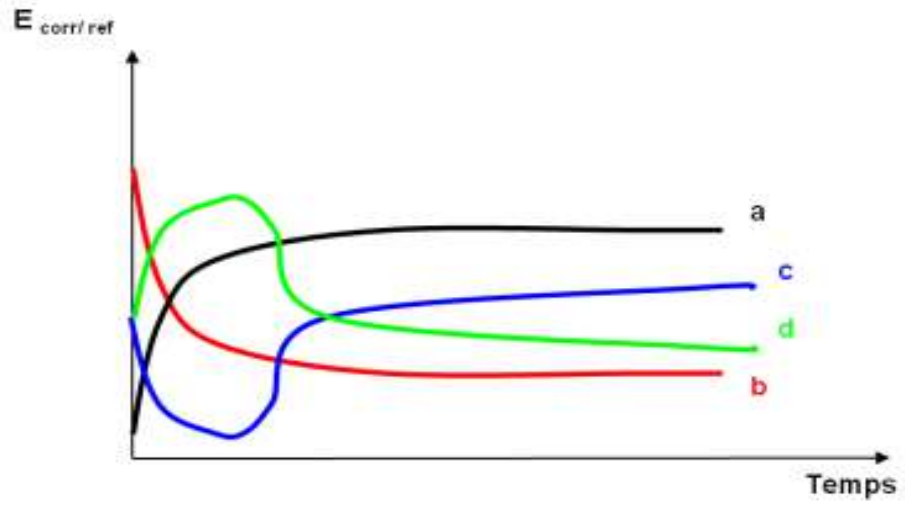


Figure III.14 : Différentes allures de potentiel de dissolution d'une électrode [48].

Courbe a : le potentiel devient de plus en plus noble, il y a passivation du métal par formation à la surface d'un produit de corrosion insoluble protecteur. C'est le cas du fer plongé dans l'acide nitrique concentré.

Courbe b : le potentiel devient de moins en moins noble, ou plus négatif, il y a attaque du métal c'est le cas de l'aluminium plongé dans la soude.

Courbe c : le potentiel devient d'abord plus négatif, puis tend vers des valeurs plus positives, il y a attaque suivie de passivation. C'est le cas de l'aluminium plongé dans une solution d'acide nitrique à 15 ou 20 %.

Courbe d : le potentiel devient plus noble puis se déplace vers des valeurs plus négatives. C'est le cas lorsqu'au moment de son immersion, le métal est recouvert d'une couche protectrice, celle-ci se développe dans un temps plus ou moins long puis elle est détruite. Le métal est alors mis à nu. L'aluminium oxydé naturellement à l'air, puis plongé dans une solution aqueuse de chlorure de sodium contenant des sels mercureux présente une courbe potentiel-temps de ce type [48].

Les métaux peuvent être aussi classés suivant leur potentiel de dissolution dans une solution. Cette classification permet de connaitre la tendance d'un métal à passer en solution. Cette tendance est beaucoup plus grande que le potentiel de corrosion est moins négatif. Les métaux présentant des potentiels plus positifs sont dits « métaux nobles » [48].

III.7 Vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion est la vitesse de transfert des charges (vitesse des réactions électrochimiques). Elle représente la quantité du métal dissous pendant l'unité du temps. De même, la vitesse de corrosion est proportionnelle à l'intensité du courant d'une réaction électrochimique (intensité du courant des demi-réactions anodique et cathodique). Elle est inversement proportionnelle à la résistance de polarisation du métal dans le liquide considéré [49].

A l'abondon, l'intensité du courant de la réaction d'oxydation (réaction anodique) est égale à celle de la réaction cathodique. Ceci permet de déterminer le courant de corrosion en l'absence de toute perturbation électrique et déterminer le potentiel moyen du métal où se produisent les deux types de réactions.

Plusieurs méthodes pratiques rigoureuses (essais électrochimiques) servent à la détermination de la vitesse de corrosion citons : les courbes de polarisations, mesure des impédances, perte de masse…etc. Ceux-ci amènent à exprimer la vitesse de corrosion en :

- ✓ Masse de métal dissous par unité de temps ;
- ✓ Perte d'épaisseur par unité de temps ;
- ✓ Profondeur de piqure par unité de temps ;
- ✓ Taille de fissure par unité de temps.

Partie B : Les essais mécaniques

III.8 Introduction

Les essais Effectués en laboratoire ou sur le terrain, ils apportent des renseignements précis et fiables sur les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre qui sont réglementés par des normes internationales pour la plupart. Les principaux essais sont : traction, dureté, résilience, fatigue, fluage…etc).

III.9 Intérêt des essais mécaniques

Pendant plus longtemps, l'empirisme et l'habitude suffisaient pour mener à bien les opérations de mise en œuvre des matériaux tels que : le laminage, le filage, l'extrusion, le forgeage, l'usinage, etc. Or, l'augmentation de la dimension des demi-produits, les exigences accrues de qualité et de précision, les économies d'énergie et même la fiabilité du produit fini à réaliser concourent à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations. La fabrication des diverses structures mécaniques et le rôle fonctionnel que joue chaque pièces dans son assemblage exige en premier lieu de connaitre le comportement mécanique du matériau vis-à-vis les sollicitations qui sont imposées par le milieu extérieur. En fait connaitre les propriétés mécaniques d'un matériau, c'est un indice technique indispensable pour les ingénieurs qui s'occupent des calculs des structures à chaque étape de mise en œuvre des matériaux. Il est évident que ces calculs ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux souvent influencées par d'autres phénomènes extérieurs telles que : la vitesse de sollicitation, la température, ou même les interactions entre les propriétés mécaniques et les évolutions de la structure microscopique.

Quoique plusieurs modèles et des lois de comportement mécanique ont vu le jour ces derniers temps [50]. La validation de ces modèles ne peut être signée qu'une fois les résultats trouvées seront en bonne corrélation avec les valeurs expérimentales. C'est-à-dire que les essais mécaniques qui fournissent directement la réponse des matériaux face à une sollicitation donnée, sont d'un grand intérêt pour la caractérisation de ceux-ci [51].

Nous définissons dans le cadre de ce travail, un essai fondamental (dureté) qui intéresse d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérise sa consolidation. Il y a plusieurs méthodes de mesure de la dureté.

III.10 Essai de dureté

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple la bille ou la pointe d'un duromètre. À la différence des minéraux dont la dureté est caractérisée par rayage, on utilise généralement des essais de pénétration pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser et de donner des résultats reproductibles. Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux [52].

III.10.1 Mesures de dureté par pénétration

Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours identique : un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté. Dans une première approche, on peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité R_e avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pression s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est plus suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête, et on a donc :

$$\mathbf{R_e = \frac{F}{S}}$$

Les valeurs de dureté obtenues grâce aux différents protocoles et dispositifs d'essais indiqués ci-dessous sont cette limite d'élasticité R_e mais les résultats ne sont pas identiques car ces calculs simplifiés prennent en compte la surface de la projection de l'empreinte (comme un disque ou un carré) au lieu de prendre en compte la vraie surface de l'empreinte (comme la surface de la calotte sphérique ou des facettes de l'empreinte pyramidale). Un essai Brinell et un essai Vickers sur la même éprouvette ne donnent pas la même valeur en résultat, mais en ramenant par le calcul la valeur de la force à la vraie surface de l'empreinte (respectivement une calotte sphérique ou une pyramide), on tombe dans les deux cas sur la même valeur qui est la valeur « de pression » du matériau solide. Elles ne prennent pas en compte l'écrouissage qui est différent pour chaque type d'essai.

III.10.2 Les différentes échelles de dureté

Il existe une grande variété d'essais de dureté possible:

• Dureté Vickers (HV), qui a l'échelle la plus large ;

• Dureté Brinell (HB) ;

• Dureté Knoop (HK), pour des mesures de petite surface ;

• Dureté Janka, pour le bois ;

• Dureté Rockwell (HR), principalement aux États-Unis d'Amérique ;

• Dureté Shore, surtout pour les polymères ;

•Dureté Barcol, surtout pour les matériaux composites [52].

Le tableau **III.1** regroupe les principales directives pour une bonne réalisation d'un essai de dureté par indentation [51, 53].

Tableau III.1 : Comparaison entre les méthodes par pénétration.

Type d'essai	Pénétration de la pièce	Utilisation principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage ou meulage).	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre OO par exemple). la présence de rayures donne des valeurs sous estimée.	En atelier	L'essai est simple et rapide Convient pour des duretés plus élevées (supérieures à 400 Brinell). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces (il est nécessaire que la pièce soit parfaitement stable). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.
Vickers	Etat de surface très soignée (on obtient de petites empreintes, les présences d'irrégularité gène le lecteur)	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces des petites dimensions. La lecture de longueur de diagonale est généralement lente.

IV.1 But et objectif de travail

Le but est d'évaluer la dureté d'échantillon d'un acier allié avant et après trempe thermochimique. L'évolution de ces propriétés est la conséquence directe d'une modification structurale que nous quantifierons en termes de nombre et quantité relative des composants structuraux de cet acier.

L'objectif est de déterminer :

- Les conditions opératoires de ce traitement (température et durée de maintien) ;
- L'aptitude du bain de trempe choisi (huile ''moteur'' usagée et prétraitée) à etre utilisée en substitution de bains classiques de trempe.

IV.2 Matériaux étudié

Dans ce travail nous avons utilisé l'acier spécial de construction mécanique pour les coussinets de bielle de composition chimique standard (AFNOR55S7) :

(0.52-0.60) % C + (1.50-1.80) % Si + (0.70-1.00) % Mn.

Selon la norme européenne NF 1002, un acier spécial est, la plupart du temps destiné à un traitement thermique (trempe et revenu, trempe superficielle…). Sa composition, ajustée dans le cadre d'une élaboration particulière, lui confère une bonne propriété inclusionnaire des facilités de façonnage et des aptitudes particulières à l'emploi .Il peut être allié ou non [54]. Parmi les aciers spéciaux se trouvent les aciers de construction mécanique.

Le traitement thermique finale donne à ces aciers des propriétés d'emploi très performantes, tandis qu'un ou plusieurs traitement thermique intermédiaire les mettent en œuvre (par formage, usinage, etc.) dans les conditions les moins pénalisantes et les plus économiques.

Les mécaniciens mettent à profit la remarquable facilité d'adaptation des aciers, les traitements thermiques permettent d'obtenir des propriétés mécaniques très variés en fonction des états structuraux. De plus, il est possible obtenir des propriétés très particulières sur la zone de surface en acier par une modification locale de la composition chimique. Ce sont toutes les solutions apportées par traitement thermochimiques, lesquels justifient parfois, pour une meilleure exploitation, l'utilisation de nuances d'acier spécifiques

En utilisant les traitements thermiques industriels de durcissement pour acier spécial de construction, on recherche un judicieux compromis entre les caractéristiques de résistance et celles de ductilité, pour assurer simultanément la performance des pièces et sécurité en service.

Les caractéristiques de résistance sont de la capacité de durcissement de l'acier tandis que le niveau des caractéristiques de ductilité dépend :

- d'une part, de l'habituelle compétition entre résistance et ductilité ; quand l'une augmente, l'autre diminue ;
- d'autre part, de divers facteurs métallurgiques tels que l'état inclusionnaire et la grosseur de grain [55].

IV.3 Conditions générales d'expérimentation

IV.3.1 Choix de la température de trempe

Les aciers hypoeutectoïdes doivent être chauffés de 30 °C à 50 °C au dessus de A_{C3}. Selon le diagramme de la température en fonction de la teneur en carbone on peut définir l'intervalle de la température de chauffage, à partir d'une projection 0.6 % C sur la phase d'austénisation, on obtient la température de chauffage égale 760 °C.

Un acier à structure initiale (perlite + ferrite) donne alors une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit à une vitesse plus grande que la vitesse critique de la trempe [8].

Pour de nombreux aciers, pou obtenir le titre d'alliage nécessaire, la température de chauffage pour trempe dépasse sensiblement les points critique ; ceci est du à une faible dissolution des carbures contenant les éléments d'alliage nécessaire pou assurer le degré d'alliage requis l'austénite. Dans de nombreux cas, cette augmentation de la température n'entraîne pas de grossissement perceptible du grain, car les carbures non dissous ralentissement la croissance du grain austénitique. Par exemple, le chauffe par trempe des aciers inoxydables à teneur chrome élevée (11 à 14 % Cr) jusqu'à 900 °C (un peu au dessous de A_{C3}) achève la transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$, mais la structure garde des carbures en quantique. C'est pourquoi dissoudre les carbures de la forme $M_{23}C_6$ et augmenter la teneur en élément d'alliage de l'austénite, ces aciers sont trempés à des températures dépassent A_{C3} de (150 à 250 °C).

L'augmentation de la température de chauffe pour trempe (ou augmentation de séjour à cette température) entraîne la dissolution des carbures, le grossissement du grain et l'homogénéisation de l'austénite.

L'austénite surfusionnée se trouve aussi stabilisée surtout dans l'intervalle de température de la transformation perlitique, la vitesse critique de trempe diminue et la pénétration de trempe de l'acier s'améliore [25]. Pourtant, lorsqu'on dépasse trop la température de trempe, on augmente la quantité d'austénite résiduelle, ce qui dégrade la dureté de l'acier, fait grossir fortement le grain et accroît la déformation des pièces soumises au traitement [56].

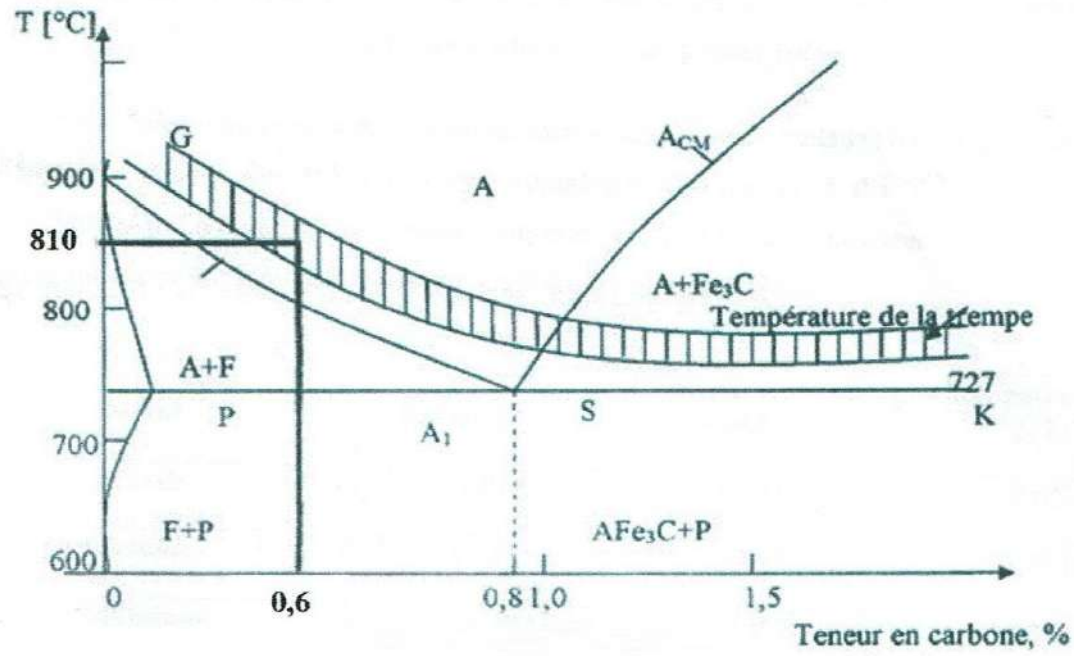


Figure IV.1 : Représentation du domaine de température de l'austénisation.

IV.3.2 Choix de la durée du chauffage d'austénisation

Le maintien à la température nécessaire doit assurer le chauffage d'une pièce à cœur et l'achèvement des transformations de phase, sans être trop long pour ne pas provoquer le grossissement du grain et la décarbonatation des couches superficielles de l'acier.

La durée de ce traitement à cœur (jusqu'à la température terminale) est définie par la forme et la dimension de la pièce :

$$\tau_{gen} = \tau_{éc} + \tau_{si}$$

Où :

$\tau_{éc}$: durée d'échauffement de la pièce.

τ_{si}: durée de séjour isotherme à la température donnée qui ne dépend pas de la forme et dimensions de la pièce, mais seulement de la composition et de l'état initial de l'acier.

Pour déterminer τ_{gen}, on utilise le plus souvent les données expérimentales ou les formules empiriques.

En résume, ces conditions opératoires sont portées sur le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Conditions opératoires

Paramètres	Température (t) de maintien [°C]	Durée du maintien [min]
Valeurs limites	**760 - 810 – 860**	**10 - 15 – 20**

IV.4 Milieu de traitement

Nous envisageons de tremper les échantillons dans un bain d'huiles ''moteur'' (après vidange) usagées mais préalablement traitées selon les étapes suivantes :

Décantation – filtration sur papier carton - filtration sur papier filtre – centrifugation – filtration ultra-fine sur papier filtre.

Ces huiles contiennent de nombreux cations d'éléments (métaux) lourds [57], des organiques, des phénols, des composés aromatiques parmi lesquels deshydrocarbures polycycliques. La composition minéralogique moyenne des huiles utilisées (par la méthode spectrophotométrie UV visible) est reportée sur le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Composition minéralogique d'huile de vidange usagée.

Métal	Forme	Concentration en mol/l	Concentration en g/l
Plomb	Pb^{2+} : PbO	$3.36.10^{-4}$	0.074
Chrome	Cr^{3+} : Cr_2O_3	$7.10.10^{-3}$	$0.107.10^{-2}$
Cadmium	Cd^{2+} : CdO	$3.10.10^{-4}$	$3.98.10^{-2}$
Fer	Fe^{2+} : FeO Fe^{3+} : Fe_2O_3	$1.107.10^{-3}$ $4.37.10^{-5}$	$7.95.10^{-4}$ $6.97.10^{-4}$

IV.5 Evaluation de la dureté (Essai de dureté de Vickers)

IV.5.1 Principe de la dureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramida le normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136°. L'empreinte donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales $\mathbf{d_1}$ et $\mathbf{d_2}$de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur **d** en effectuant la moyenne de $\mathbf{d_1}$ et $\mathbf{d_2}$. C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées [52].

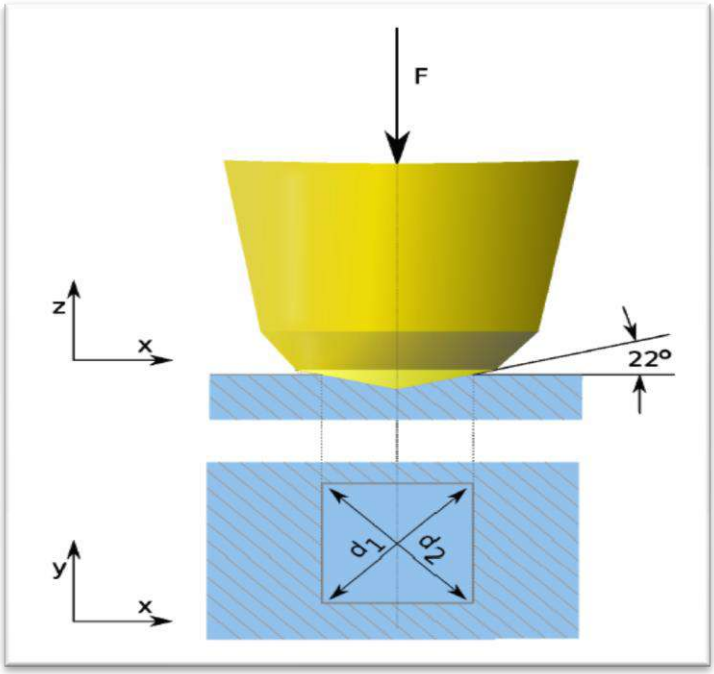


Figure IV.2 : Principe de la dureté Vickers [52].

$$\mathbf{HV} = \frac{\mathbf{2F}\sin\left(\frac{\mathbf{136}^{\circ}}{\mathbf{2}}\right)}{\mathbf{g}\,.\,\mathbf{d^2}}$$

Avec :

HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée [N].

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm] avec : ($d = \frac{d_1+d_2}{2}$).

g = Accélération terrestre. [m. s^{-2}] (9.80665).

IV.5.2 Mode opératoire

- Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau ;
- Appliquer la force ;
- Maintenir cette charge pendant 10 à 15 secondes ;

- Mesurer sur l'empreinte deux diamètres à 90° l'un de l'autre. La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement.

Le degré de dureté, noté HV, est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.



Figure IV.3 : Dispositif de mesure la dureté de Vickers.

IV.6 Observation métallographique

Avant toute observation, il faut mettre en résine les échantillons et les préparer à la polisseuse.

IV.6.1 Mis en résine

Le matériau choisi est un acier allié pour coussinet de bielles. Les échantillons sont donc de faible épaisseur. Aussi, pour les préparer, il faut les mettre en résine.

IV.6.2 Polissage

Après la résine, nous procédons à la préparation (polissage) de la surface de l'échantillon. Cette opération se fait sur une machine spéciale TRUERS-Labopol 5 dans laboratoire d'interaction matériaux-environnement (LIME) à l'université de Jijel.

La préparation des échantillons se passe les étapes suivantes :

A l'aide d'une tronçonneuse on partition une pièce de coussinet de bielle (06) six échantillons de volume égaux en utilise le tour pour façonner les surfaces des pièces, en les faisant tourner sur elle-même par plusieurs type papiers abrasifs avec un grossissement

différents (120, 320, 500, 800 et en fin 1200 grain/cm^2) pour obtenir des surfaces très polie à l'aide d'une polisseuse électrique [58].



Figure IV.4 : Polisseuse STRUERS-Labo Pol 5 [59].

IV.6.3 L'attaque chimique

Pour révéler les différentes phases en présence, elle se fait par immersion pendant quelques secondes dans une solution de Nital (à 4 % de l'alcool préparer par addition de 2 à 5 ml de l'acide nitrique à 100 ml de l'éthanol).

IV.6.4 Préparation de milieu de traitement

La trempe se fait dans l'huile de vidange industrielle usagée filtrée qui est d'huile sans suspension qui obtient par une opération de filtration à l'aide d'un papier filtre puis décantation centrifugeuse.

IV.6.5 La trempe directe

Les paramètres retenus pour l'expérimentation sont :

1. Température : t° = (760 – 810 – 860) °C ;
2. Durée de maintien : (10 – 15 – 20) min.

Les échantillons sont numérotés et placés (puis retirés) dans un ordre défini dans le four.

On laisse l'échantillon N°0 comme référence, et les autres cinq échantillons (N°1, N°2, N°3, N°4, N°5) les met sur une plaque dans le four. On ajuste la température à 760 °C, après

10 minute on prendre l'échantillon N°1 (-,-) et on émerge directement dans l'huile filtré, après 10 minute on retire l'échantillon N°2 (+,-) dans le même milieu.

Nous augmentons la température jusqu'à 810 °C, après 15 minute on retire l'échantillon N°3 (0,0) avec le trempe dans le bain.

Nous élevons la température pour la deuxième fois à 860 °C, après 10 minute on prendre l'échantillon N°4 (+,-) en suite en va tremper l'huile, après 10 minute on retire l'échantillon N°5 (+,+) dans le même milieu.

IV.6.6 Microscopie optique

Microstructure de l'échantillon à divers grossissement. L'évaluation du pourcentage (surface relative) occupée par les carbures dans la surface superficielles des pièces s'effectuée après les étapes suivantes :

- ✓Le polissage : l'objectif est l'obtention d'une surface très lisse ;
- ✓L'attaque chimique : par l'immersion de la surface polie dans l'acétone pour voir différentes phases.

Après les deux étapes précédent on va fixer lentille de microscope optique sur une zone quelconque de la surface superficielle de la pièce relative occupe par les carbure ; on répète cette mesure avec quatre zones de même surface des pièces, puis on calcule la moyenne des quatre valeurs [58].



Figure IV.5 : Microscope métallographique [59].

V.1 Introduction

Dans cette partie nous présentons les résultats trouvés correspondant aux différentes caractérisations effectuées.

Dans notre travail nous commençons par l'étude métallographique (microscopie optique) suivie par les résultats de l'étude mécanique traduite par des mesures de la dureté de 6 échantillons.

V.2 Échantillon non traité

V.2.1 Mesure de la dureté

L'échantillon de référence (non traité) est numéroté N°0 dans le tableau suivant :

Tableau V.1 : Valeur de la dureté de Vickers pour l'échantillon non traité.

N°	t° [°C]	D [min]	HV
0	/	/	**49.75**
1 (-,-)	760	10	/
2 (-,+)	760	20	/
3 (0,0)	810	15	/
4 (+,-)	860	10	/
5 (+,+)	860	20	/

Remarque : Sa dureté Vickers est de 49.75 HV moyenne arithmétique de 04 mesures.

V.2.2 Observation métallographique

L'acier considéré a pour composition chimique (AFNOR55S7) :

(0.52-0.60) % C + (1.50-1.80) % Si + (0.70-1.00) % Mn.

Sa structure métallographique (figure V.1) révélée au Nital (solution d'éthanol à 5 % d'acide nitrique) est composée de :

- 90 % martensite aciculaire : surface marron claire, en aiguilles ordonnées ;
- 2 % carbures : grains clairs, très fins ;
- 3 % sulfures : grains sombres, sphériques.

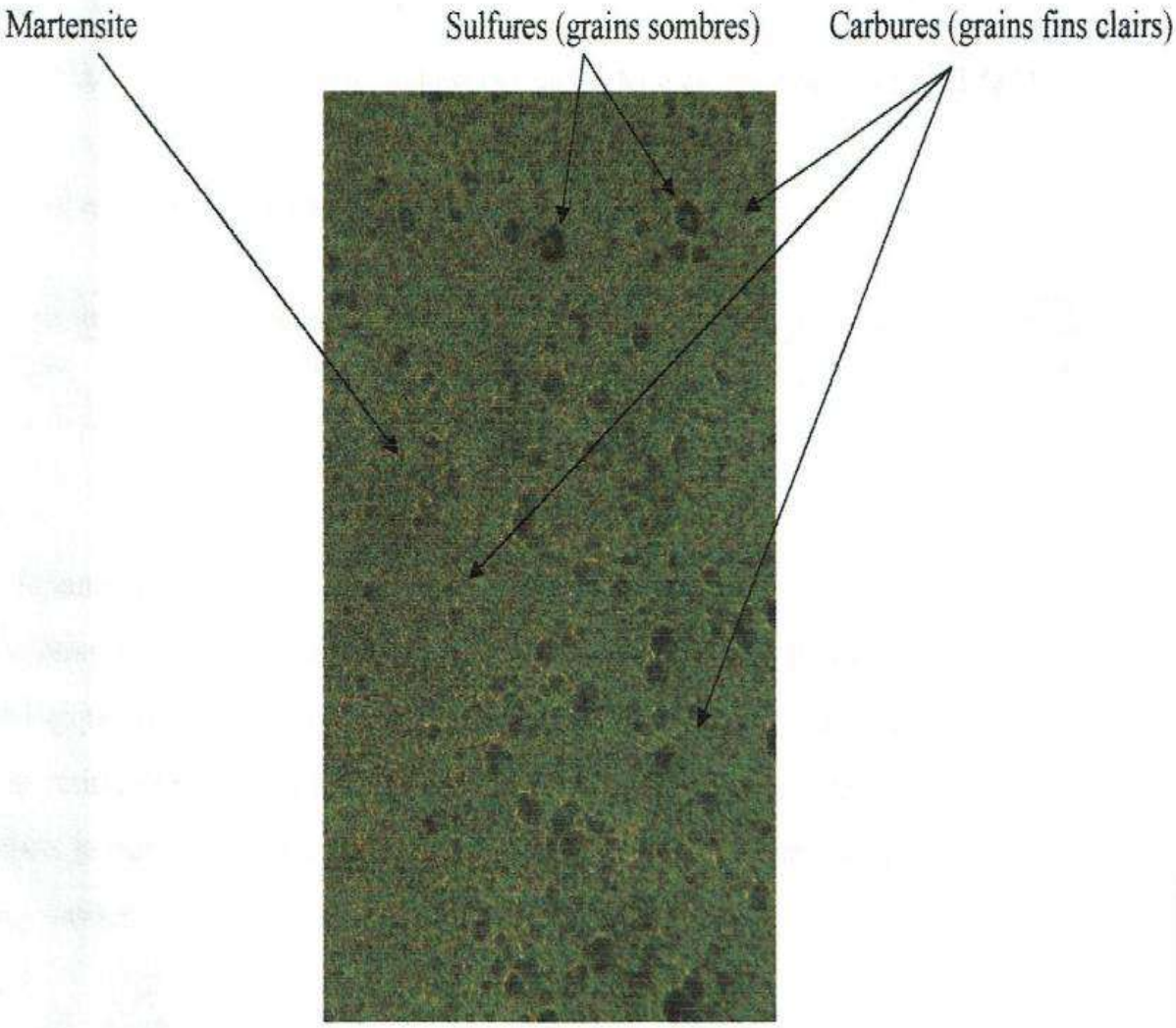


Figure V.1 : Structure métallographique initiale de l'acier étudié (×150).

La présence inhabituelle de sulfure dans cet acier due au fait que ce matériau (coussinet de bielle de moteur Renault ; modèle : Clio) a travaillé dans un milieu lubrifié à l'huile moteur en subissant des gradients de température répétés et violents (marche et arrêt souvent répétés du moteur pendant 80000 Km soit 05 années d'exploitation avant changement). A titre de référence, voici la microstructure (figure V.2) d'un acier de composition chimique similaire (à 0.28 % C + 0.25 % Cr + 1 %Mo) : martensite après revenu avec des traces de sulfures (zones noires).

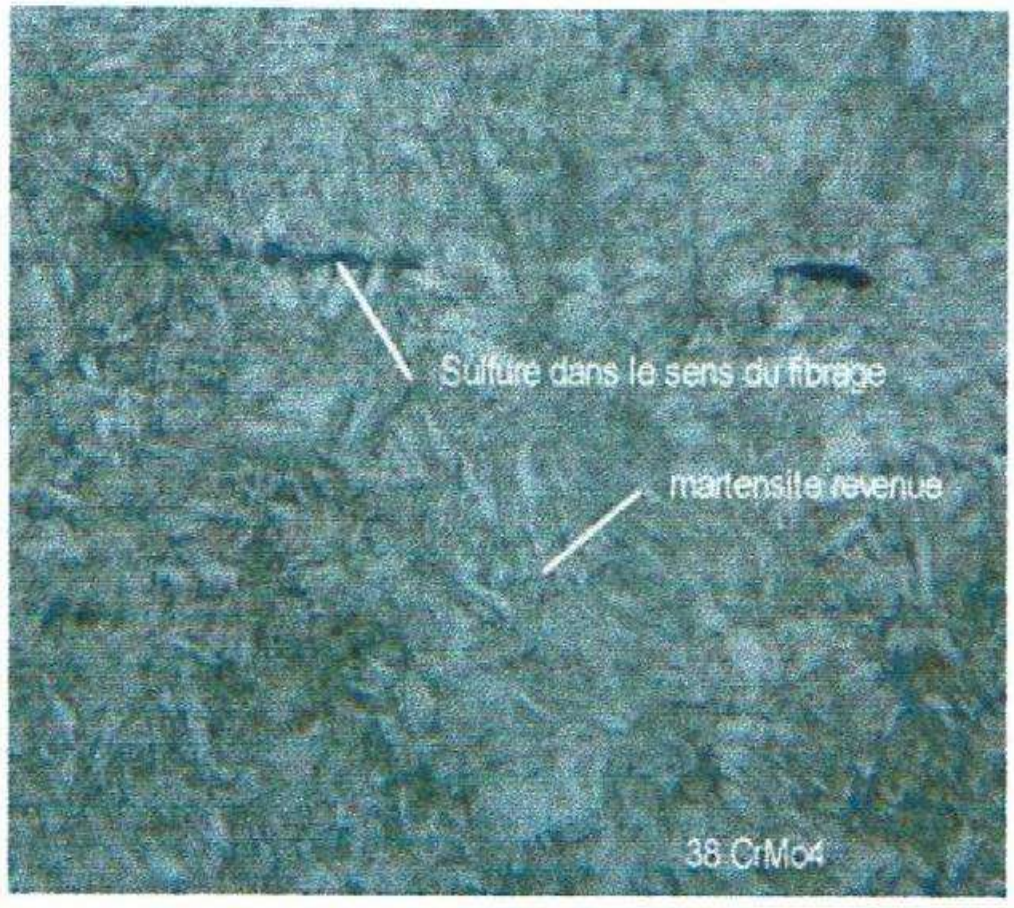


Figure V.2 : Microstructure (de référence) de l'acier 0.28 % C + 0.25 % Cr + 1 % Mo.

Nous résumons les caractéristiques de l'acier étudié dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Caractéristiques de l'acier non traité.

Désignation	Structure métallographique	Dureté
Valeur	95% M + 2% M_xC_y + 3% M_pS_q	49.75

V.3 Échantillons traités

V.3.1 Mesure de la dureté

La trempe est exécutée selon le protocole décrit dans la partie expérimentale. L'essai de la dureté de nos échantillons nous donne la résistance à la pénétration sous l'effet de la force appliquée. Les valeurs remarquées représentent la moyenne des 4 essais différents de la même surface d'un échantillon sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau V.3 : Valeurs de la dureté de Vickers pour les échantillons traités.

N°	t° [°C]	D [min]	HV
0	/	/	**49.75**
1 (-,-)	760	10	115
2 (-,+)	760	20	127.75
3 (0,0)	810	15	134.75
4 (+,-)	**860**	**10**	**137.50**
5 (+,+)	860	20	134.75

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que la dureté de l'échantillon quatre (4) est plus élevée par rapport aux autres échantillons.

L'amélioration de propriété d'exploitation (dureté) est due principalement à la précipitation supplémentaire de carbures M_xC_y : combinaisons chimiques très dures et saturées en carbone (malgré la conservation de la même matrice métallique).

Remarque : Dans ce travail on utilise l'échantillon N°4 (qui a la meilleure valeur de la dureté) pour les observations métallographiques.

V.3.2 Observation métallographique

Après traitement, les conditions opératoires **t° = 860°C ; D = 10 min** ont permit l'obtention de la microstructure (figure V.3) suivante de l'échantillon N°4 :

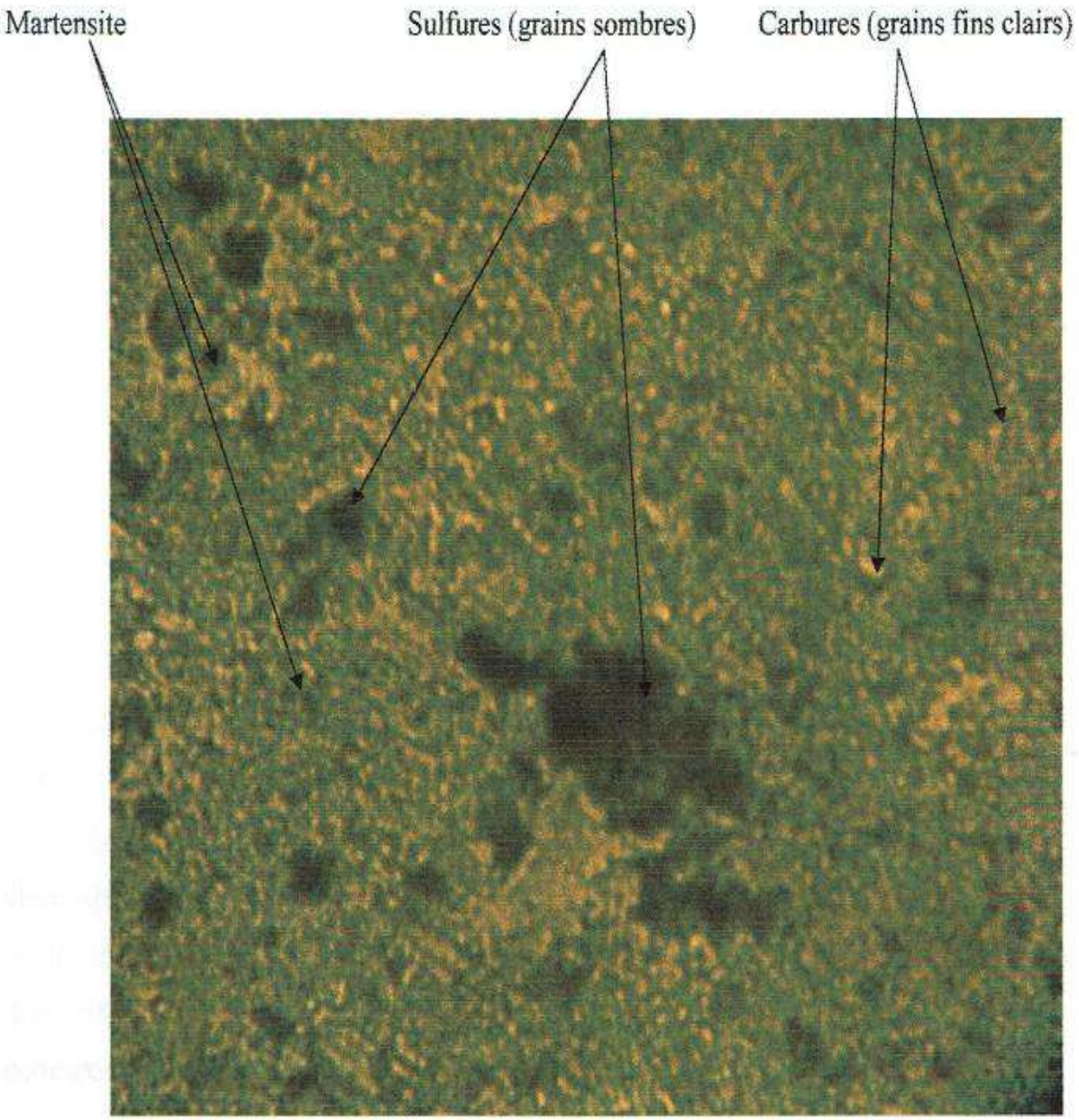


Figure V.3 : Microstructure du matériau étudié après trempe dans l'huile '' moteur'' (usagée et prétraitée) à t° =860 °C ; D = 10 min (× 150).

Nous remarquons :

- ✓ La conservation de la même structure martensitique ;
- ✓ L'augmentation de la taille, du nombre et de proportion des grains de carbures (2 à 10 %) ;
- ✓ L'augmentation de la taille des grains de sulfures (avec une proportion pratiquement constante).

Le tableau suivant résume les caractéristiques de l'acier étudié (avant et après trempe) (nous avons noté une augmentation de sa dureté).

Tableau V.4 : Evolution des propriétés de l'acier étudiée suite avant et après la trempe dans l'huile.

Désignation	**Structure métallographique**	**Dureté**
Acier non trempé	95% M + **2% M_xC_y**+ 3% M_pS_q	**HV = 49.75**
Acier trempé (échantillon N° 4 : t° =860°C ; D = 10 min)	87% M + **10% M_xC_y**+ 3%M_pS_q	**HV = 137.5**

Conclusion générale

L'objectif du présent travail est de mettre en évidence l'effet des traitements thermiques particulièrement la trempe directe dans l'huile des moteurs usagés d'un acier pour la construction mécanique.

Les résultats obtenus sont résumés aux points ci-dessous :

- L'étude métallographique montre une structure martensitique de l'acier faiblement allié (avec quelques grains de carbures et de sulfures) à l'état brut pris comme états de référence ;

- Quelques grains de sulfures apparaissent déjà initialement et avant traitement proprement dit. Ceci est du au fait que le travail prolongé de ce matériau dans un milieu lubrifié et soumis à des gradients de température est apparenté à un traitement thermochimique initial ;

- Une structure martensitique similaire (à l'échantillon de référence) correspond à l'acier traité trempé dans l'huile : elle ressemble à celle de l'état de référence mais avec variation de la quantité des combinaisons chimiques carbures et sulfures ;

- Le traitement exécuté permet une augmentation de la dureté du matériau sans modification de la matrice métallique martensitique. Cette augmentation est plus forte que pour les matériaux aciers non alliés ;

- Le traitement de trempe directe dans les huiles ''moteurs'' usagées et traitées a un effet remarquable sur les valeurs des propriétés étudiées. Malgré l'apparition-avant traitement- des sulfures, nous avons noté une nette amélioration de ces propriétés d'exploitation.

Conclusion générale

Perspective

A travers cette étude nous avons pu évaluer l'effet du traitement thermique sur la dureté de l'acier. Les résultats obtenus ont prouvés le traitement exécuté permet une augmentation de la dureté du matériau sans modification de la matrice métallique. Cependant, l'efficacité de ce traitement exécuté permet une étude de la tenue à la corrosion (extraire par traitement des données électrochimique). Ceci fera l'objet d'un futur travail.

Références bibliographiques

[1] https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/chimie-fer-tombe-masque-565/page/6/.

[2] https://atf-aciertolefer-78.fr/2018/02/21/les-differentes-utilisations-de-lacier/

[3] https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Proprietesdelacier&LN=FR

[4] https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact12&art=189&lang=fr

[5] R. Desgagnés, R. Langevin, -Guide d'auto- Apprentissage pour les opérateurs et traitement thermique (page 8).

[6] L. Colombier, G. Fessier, G. Fessier, J. Pontet, « ACIER - Technologie », Encyclopædia Universalis. [En ligne], URL : https://www.universalis.fr/encyclopedie/acier-technologie/

[7]http://www.fast.u-psud.fr/~hattali/Cours/LaH_Amphi-3_Diagrammes%20d'%C3%A9quilibre%20Alliages%20fer-carbone.pdf.

[8]http://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/4%20Diagramme%20fer%20carbone%2036%20pages.pdf.

[9] H. De Leiris, Métaux et Alliages, Tome 2, Editions Masson et Cie, 1971.

[10] E. Ben Fredj, Évolution de la microstructure des aciers à haute résistance mécanique durant le traitement thermique de trempe, thèse de doctorat à l'école de technologie supérieure à l'université du Québec, 2019.

[11] I. Moussaoui, Étude théorique de quelques combinaisons chimiques dans les matériaux métalliques, thèse de doctorat en science en chimie à l'université Mentouri de Constantine, 2010.

[12] R. J. Borg and G. J. Dienes, The physical chemistry of solids, Editions Academic press, Inc, 1992.

[13] R. P. Ezekel, Étude et conception d'un thermomètre à l'infrarouge adapté à l'industrie métallurgique, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies, 2015.

[14]https://fgc.ummto.dz/bitstream/handle/ummto/2873/Mazid%2C%20Said.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[15] J. Philibert et Cie, Métallurgie du minerai au matériau, Editions Masson, 1998.

[16] http://www.zpag.net/Tecnologies_Indistrielles/Metaux_Ferreux.htm.

[17] https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-science/phase-diagrams-of-iron-carbon-system/martensite/.

[18] http://couteaux.free.fr/acier_technique/acier.html.

[19] B. Silini, M. Roubache, Étude de traitements thermochimiques des aciers, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master académique, université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2018/2019.

[20] http://laviateur08.free.fr/ecole/CPI/M%E9ca/cours/Mat%E9riaux/Traitement%20de%20surfa pdf.

[21] http://copperalliance.fr/uploads/2018/03/1_generalites.pdf.

[22] A. Djeribaa, Influence des traitements de surface sur les propriétés mécanique, mémoire de magister à l'université de Mentouri Constantine, 2007.

[23] P. Poupeau, Traitements thermique des métaux et alliage, technique de l'ingénieur, M 1105.

[24] http://couteaux.free.fr/acier_technique/acier.html#thermique.

[25] http://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf.

[26] C. J. Barton, the tempering of low carbon internally twinned martensite, Acta Met., vol 17, p 1085-1093, 1969.

[27] Y. Hirotsu, S. Nagakura, Crystal structure and morphology of the carbides precipitated from martensitic high carbon steel during the firststage of tempering, Acta Met., vol 20, p 645-653, 1972.

[28] G. Eldis, Austforming and tempering of high alloy steels, PhD thesis, MIT, 1971.

[29] K. H. Jack, Sructural transformation in the tempering of high carbon martensitic steels, Journal of the Iron and Steel Institute, vol 169, p 26-36, 1951.

[30] http://www.fast.u-psud.fr/~hattali/Cours/LaH_Amphi-6_Traitements_thermiques.pdf

[31] T. C. Lei, J. Sun, C. H. Tang and M. Lei, Precipitation–segregation mechanism for high temperature temper embrittlement of steels revealed by Auger electron spectroscopy and internal friction measurements, Matériel Science and Technologie, vol 6, p 124-133, 1990.

[32] G. Murry, Traitements thermiques dans la masse des aciers. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques 3p.

[33] P. Poupeau, Traitements thermiques des métaux et alliages, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, 14p

[34] O. Barrau, C. Boher, R. Gras, F. Rezai-Aria, Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging, Wear, vol 255, p 1444-1454, 2003.

[35] A. Arfaoui, M. A. Chaker, traitement mécanique, traitement thermochimique, matériaux métallique ISET Kasserine, Chapitre 9, page 98, 2009/2010.

[36] https://fr.slideshare.net/RafaelNadal4/traitements-mcaniques-et-thermochimiques.

[37] http://www.precimetal.be.

[38] http://cf.geocities.com/mbara2/revenu.htm.

[39] E. Haruman, T. Bell, Y. Sun, Compound layer characteristics resulting from plasma nitrocarburizing in atmospheres containing carbon dioxide gas addition, Surface Engineering, vol 8, p 275–282, 1992.

[40] J. Slycke, L. Sproge, Kinetics of the gaseous nitrocarburising process, Surface Engineering, vol 5, p 125-140, 1989

[41] T. Bell, Gaseous and plasma nitrocarburizing, vole 4. ASM International, Materials Park, Ohio, ASM Handbook, 1997.

[42] I. M. Hutchings, Friction and wear of engineering materials tribology, London, Publication E. Arnold, p 158, 1998.

[43] M. B. Karamis, E. Gerçekcioglu, Wear behaviour of plasma nitrided steels at ambient and elevated temperatures, Wear, vol 243, p 76-84, 2000.

[44] O. Salas, K. Kearns, S. Carrera, J. J. Moore, Tribological behavior of candidate coating for Al die casting dies**,** Surface and Coatings Technology, vol 172, p 117-127, 2003.

[45] G. Chassin, G. Hillge, Métallurgie, Tome II, Ed DUNOD.1995.

[46] M. Athmani, Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation), mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010/2011.

[47] http://laviateur08.free.fr/ecole/CPI/M%E9ca/cours/Mat%E9riaux/Traitement%20de%20surface.pdf.

[48] H. Bensabra , Cours de corrosion et protection des métaux, pour les étudiants de première année Master, option génie des matériaux, université de Jijel, 2016.

[49] A. Raharinaivo el al, la corrosion et la protection des aciers dans le béton, livre de presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1998.

[50] H. Hamadache, Concepts fondamentaux de la mécanique des matériaux, éditions dde l'université de Badji Mokhtar, 2007.

[51] O. Taâmallah, Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier, mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister à l'Université Badji Mokhtar Annaba, 2012.

[52] http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/durete%20(materiau).pdf.

[53] Http://Fr.Wikipedia.Orgiwiki/Duret%%C3%A9 %28mat%C.3%A9riatty 029, Catégories: Science des matériaux • Métallurgie • Essai mécanique.

[54] https://www.pro-dist.com/produits/list/cat/81.

[55] G. Murry, Aciers pour traitements thermiques. Propriétés et guide de choix, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M 4 530.

[56] G. Béranger, G. Henry , G. Sanz, Le livre de l'acier, Éditeur Tec & Doc, ISBN-10 2852069814, novembre 1999.

[57] J. Sarrazin, M. Verdaguer, L'oxydoréduction Concepts et expériences, éditeur Ellipses, isbn 9782729891220, livre neuf année 1997.

[58] J. Deruelle, Préparation des surfaces, technique de l'ingénieur, M 1435.

[59] Laboratoire d'Interaction Matériaux-Environnement à l'université Mohammed Seddik BenYahia de Jijel.