

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE : DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BLIBA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme master en Génie Mécanique

Option : JMS

Thème :

Traitements thermiques des l'aciers à outils
pour travail à chaud

Proposé et dirige par :

➤ **Hadji Youcef**

présenté par :

Fekih Med Oussama

Année universitaire 2020/ 2021



Remerciements

❖ Avant tout, je remercie ‘Dieu’ de m’avoir donné la force, le courage, et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

❖ À Mes chers parents qui m’ont tout donné, qui m’ont soutenu, et encourager durant toute ma formation et éclairer mon chemin avec leurs bénédictions Je leur souhaite une longue vie.

❖ À mes chers frères et chères sœurs.

❖ À mes amis du département de métallurgie génie des matériaux.

❖ À toutes les personnes que j’aime.

❖ Et enfin à tous mes professeurs , mon promoteur

Mr :Hadji youcef et à toute notre famille du département

de génie mécanique



Dédicace

Je dédie ce travail :

- A mes chers parents
 - Mon père Med Hachemi et ma mère Fatma
 - Pour leur patience, leur amour, leur soutien et Leurs
 - encouragements.
 - à mes sœurs : Nawal , Hadjer , Nadia et Asma
à mon frère Farouk
- toute ma famille et tous mes amis et camarades
- Sans oublier tous mes professeurs



Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Sommaire.....	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Généralité sur les acier

I .1 .Introduction.....	3
I.2 définition d'acier.....	3
I.3 Diagramme fer-carbone	3
I.4 Les différentes phases du système Fer-Carbone.....	4
I.4.1 La ferrite α	5
I. 4.2 La ferrite δ	5
I. 4.3 L'austénite γ	5
I.4.4 La cémentite (Carbone de fer Fe_3C).....	6
I.4. 5 La perlite	6
I.5. Les différentes classes des aciers.....	6
I.5. 1 Aciers non alliés et aciers alliés	6
I. 5.1.1 Aciers de qualité.....	7
I.5.1.1.1 Aciers de qualité non alliés	7
I. 5.1.2 Aciers de qualité alliés	8
I.5.1.2 Aciers spéciaux	8
I. 5.1.2.1 Aciers spéciaux non alliés.....	8
8I.5.1.2.2 Aciers spéciaux allies	9
I.5.1.3 Aciers inoxydables.....	9
I.5.2 Les aciers au carbone	9
I.5.2.1 Les aciers faible teneur de carbon	10
I.5.2.2.Les aciers à moyenne teneur de carbone	10
I.5.2.3 Les aciers à forte teneur de carbone	10



I.5.3 Généralités sur les Acier à outils	11
I.5.3. 1 la classification des aciers à outils	11
I.5.3.2 Acier à outils non alliés pour travail à froid	11
I.5.3.3 Acier à outils alliés pour travail à froid	12
I.5.3.4 Acier coupe rapides	12
I.5.3.5 Acier à outils pour travail à chaud	12
I.5.3.6 Propriétés générales d'emploie.....	12
I.5.3.7 Propriétés de mise en œuvre de l'acier à outils	12
I.6 caractérisation des aciers à outils	13
I.6.1 caractéristiques physique	13
I.6.2. Caractéristiques mécaniques	13
I.7. Composition chimique des aciers	14
I.8. Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer	15
I.9 Symbolisation des aciers	16
I.10 Désignation symbolique général des aciers.....	16
I.10.1 Désignation de l'acier au carbone	16
I.10.2 Désignation de l'acier fortement alliés	17
I.10.3 Désignation de l'acier faiblement alliés.....	17
I.11. Les éléments d'addition	18
I.11.1. Le carbone	18
I.11.2. Le chrome.....	18
I.11.3. Le nickel.....	19
I.11.4. Le molybdène.....	19
I.11.5. Le silicium.....	19
I.11.6. Le titane.....	20
I.11.7. Le manganèse.....	20
I.11.8. Le cuivre.....	20
I.11.9 phosphore.....	20
I.11.10. tungstène.....	20
I.11.11 vanadium.....	20
I.12 Influence des éléments d'addition.....	20



I.13 .Transformation de phase dans les aciers.....	21
I.13.1.transformation au cours de chauffage (Austonisation).....	21.

CHAPITRE II : traitement thermique des aciers

II.1.Introduction	24
II.2.Traitements thermiques des aciers.....	25.
II.3.Les types des traitements thermiques des aciers	25.
II.3.1.Trempe	25
II.3 .1.1 Définition	26
II.3.1.2 Les types de trempe	26
II.3.1.2.1. Trempe bainitique	26
II.3.1.2. 2 Trempe martensitique	27
II.3.1.2.3. Trempe d'aciers austénitique ou hypertrempe.....	27
II.3.1.3. Cycle de trempe	27.
II.3.2.Le Revenu	28
II.3.2.1.Principe et But de Revenu.....	28
II.3.2.2.Différents types de revenu	29
II.3.2.2.1. Revenu de structure ou classique.....	29
II.3.2.2.2. Revenu de durcissement	29
II.3.3Recuit.....	31.
II.3.3.1.Les principe de recuit.....	31.
II.3.3.2.1.Chauffage.....	31
II.3.3.2.2. Maintenu.....	31.
II.3.3.2.3. Refroidissement	31.
II.3.3.3.Les types de recuit	31.
II.4.Le but de traitement thermique.....	32
II.5.Cycle de traitement thermique.....	33
II.6 diagramme TRC et TTT.....	33
II.6 .1 diagramme TRC.....	34
II.6.2.diagramme TTT	35



CHAPITRE III : La partie expérimentale

III.1 Introduction	37.
III.2. matériaux utilisé	37
III.3. préparation de échantillon.....	37
III. 3.1 le découpage.....	38
III.4 Observation microscopique	39
III.4.1. Polissage mécanique	39
III.4.2. Attaque chimique.....	39
III.5. Microscopie optique	40
III.5.1 Essai dureté	41
III.5.2 Essai de dureté (ROCKWELL	42
III.6. Traitement thermique.....	43
III.6.1 Tremp.....	43
III.6.2 revenu 1.....	44
III.6.3 revenu 2.....	44

CHAPITRE IV : Résultats et interprétation

VI.1.Introduction	47
IV.2..Analyse Métallographique	47
IV.2.1.Microstructure du métal de base A l'état brut	48
IV.3.Après traitement thermique	48
IV.3.1. .Etat de l'échantillon traité à T=1030°C.....	48
IV.3.2....Etat de l'échantillon Traité à T=500°C.	49
IV.3.3....Etat de l'échantillon traité à T=550°C.....	49
IV.2.Mesure de la microdureté.....	50
IV .4 Les résultats de dureté du traitement thermique	51
Conclusion générale.....	53



Liste des figures

Figure I.1 : Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'aciers [5].....	4
Figure I.2 : Structure cristalline de Fer α	5
Figure I.3 : Structure cristalline de Fer γ	5
Figure I.4 : Structure cristalline de l'austénite.....	6
Figure I.5 : Désignations des aciers au carbone.....	17
Figure I.6: Désignation des aciers fortement alliés.....	17
Figure I.7 : Désignation de l'acier faiblement alliés.....	18
Figure I.8 : diagramme Fe-chrome- Influence de l'addition d'éléments gammagènes [15]...	21
Figure I.9 : Diagramme de phase Fer-Carbone et microstructure observée par	22
Figure II.1 : Equipements utilisés.....	26
Figure II.2: Le cycle de la trempe. [20].....	27
Figure II.3 : cycle complet de traitement thermique l'acier Z40CrMoV5.....	28
Figure II.4 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu...	30
Figure II.5: les différents cycles thermique du Recuite [6].....	32
Figure II.6 : Cycle d'un traitement thermique. [25].....	33
Figure II.7 : diagramme de TRC de la nuance Z40CrMoV5.....	34
Figure II.8 : Diagramme TTT de la nuance Z40CrMoV5.....	35
Figure III.1 : l'échantillon utilisé dans étude et leur dimension.....	38
Figure III.2 : l'opération de découpage ... (SCIES ARUBAN).....	38
Figure III.3 : polisseuse de finition.....	38
Figure III.4 : polisseuse.....	39
Figure III.5 : L'échantillon préparé pour le microscope optique.....	40
Figure III.6 : Microscope optique de type (NIKON éclipse).....	40
Figure III.7 : l'empreinte de dureté la dureté brinelle.....	41
Figure III.8 : l'empreinte de la dureté vickers.....	41
Figure K III.9 : Machine de mesure de la dureté.....	43
Figure III.10 : pièces au cours de traitement des trempe	44
Figure III.11 : pièce obtenue après le traitement thermique.....	44
Figure III.12 : température le traitement de revenu (2).....	45



Figure III.13 : pièces en cour de traitement.....	45
Figure III .14 : pièce obtenue après le traitement.....	45
Figure III .15 : four électrique modèle (NABERTHERM).....	45
Figure IV.1 : Microstructure de l'acier Z40CrMoV5 à l'état brute (x200).....	47
Figure IV.2 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état trempé.(x200).....	48
Figure IV . 3 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état Revenu 1.(x200).....	49
Figure IV .4 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état Revenu 2 .(x200).....	50
Figure IV.5 : Microstructures de l'acier 0 ,40 % C après homogénéisation [(A) l'état brute (B) trempé à l'huile suivie d'un [(c) revenu 1 et après (D) revenu 2].....	51

Liste des tableaux

Tableau I.1 :Délimitations entre aciers non alliés et aciers alliés [7].....	7
Tableau I.2 .Symbolisation des aciers en fonction du type d'acier utilisé [14].....	16
Tableau III. 1 :Composition chimique de l'acier Z40CrMoV5.....	37
Tableau III.2 : Composition du nital et durée de l'attaque chimique.....	39
Tableau IV. 1: Les résultats d'essai de dureté HRC.....	52
Tableau IV . 2 : Les résultats d'essai de dureté HV.....	52





Introduction générale

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles.

La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations . [1]

Les aciers au carbone sont les plus utilisés dans l'industrie.

En raison de leur excellents propriétés physique et chimique, la maîtrise des techniques de leur élaboration et leur production ils sont largement employés dans les secteurs de l'énergie, comme les plateformes de forage, le transport du pétrole ou du gaz naturel par le biais de gazoducs ou d'oléoducs....etc. . [2]

L'objectif essentiel de notre travail est l'étude de l'effet du traitement thermique et le temps de maintien sur la microstructure.

Pour aboutir à notre objectif, on a utilisé trois techniques de caractérisations :

- Microscopie optique.
- Mesure de micro-dureté

Après introduction générale, le mémoire est composé de quatre chapitres et

Se termine par une conclusion générale :

- ✓ Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les aciers.
- ✓ Le deuxième chapitre aborde le traitement thermique des aciers.
- ✓ Le troisième chapitre : Méthodes de caractérisation.
- ✓ Le quatrième chapitre : partie expérimentale

Chapitre

I

Activer Wind

Généralités sur les aciers

I.1. Introduction

L'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes.

Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes révolutions scientifiques et industrielles grâce à leurs propriétés [3]

I.2. définition des aciers

L'acier est un alliage fer- carbone contenant moins de 2 % de carbone, et d'autres éléments. Le fer contenu dans l'acier provient soit de minerai, soit du recyclage. L'acier produit en France, comme dans les autres pays développés, contient en moyenne un peu plus de la moitié de fer recyclé. Dans les pays émergents tels que le Brésil ou la Chine, l'acier est produit majoritairement à partir de minerai puisqu'il n'y a pas encore suffisamment de recyclage.

Pour transformer la fonte en acier, il suffit de la débarrasser de son carbone excédentaire en le brûlant avec de l'oxygène.

La composition chimique de l'acier liquide obtenu à partir de la fonte ou par du fer recyclé, doit ensuite être ajustée en fonction des propriétés de mise en œuvre et d'utilisation souhaitées. L'acier liquide est ensuite solidifié, généralement sous une forme assez massive, puis mis en forme habituellement par laminage à chaud et éventuellement par laminage à froid pour les tôles les plus minces. Les tôles minces peuvent être revêtues d'une couche très fine d'un autre métal, par exemple d'étain pour le fer-blanc ou du zinc pour les tôles galvanisées, voire enduites d'un revêtement organique (vernis, peinture...) avant d'être livrées [4]

I.3. Diagramme fer-carbone :

Le système fer-carbone est théoriquement décrit par le diagramme fer-carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer α précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ($C < 2,11$ %, environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer Fe_3C appelé cémentite, est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre fer-cémentite dont la (figure I.1) présente un schéma.

En dehors des domaines de solidification, ce diagramme fer- cémentite fait apparaître . La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. La structure du fer pur dépend de la température : En dessous de 721°C et au-dessus de 1394°C , le fer (fer α) a une structure cristalline cubique à corps centré (structure cristalline à température ambiante). Il ne dissout pratiquement pas le carbone, il est doux, très malléable . [5]

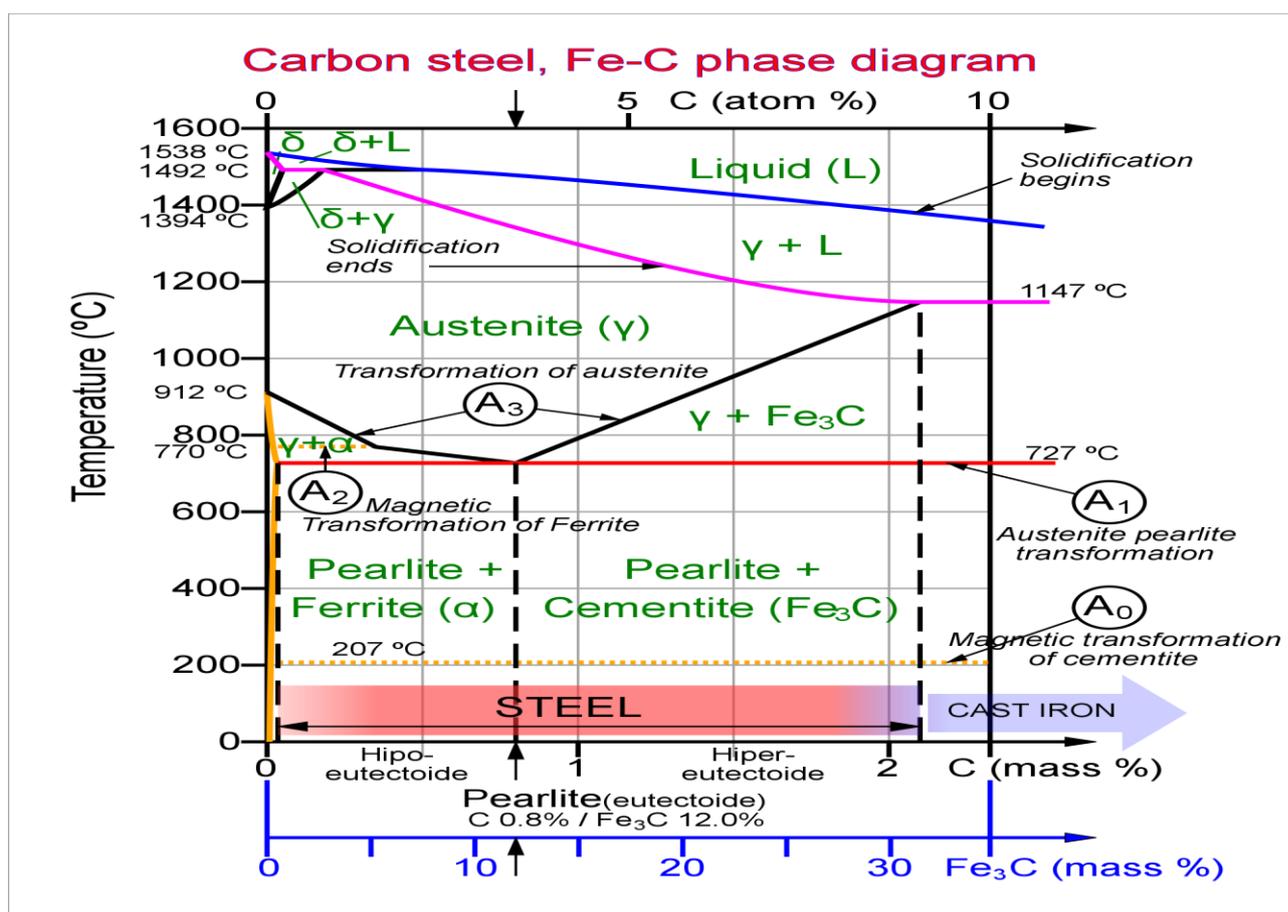


Figure I.1 : Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'aciers [5]

I.4. Les différentes phases du système Fer-Carbone.

I.4.1 . La ferrite α :

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$) [6].

μ

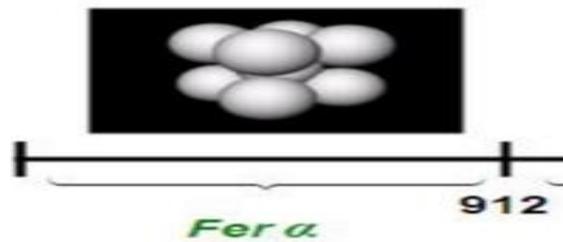


Figure I.2 : Structure cristalline de Fer α

I.4.2. La ferrite δ :

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone [6].

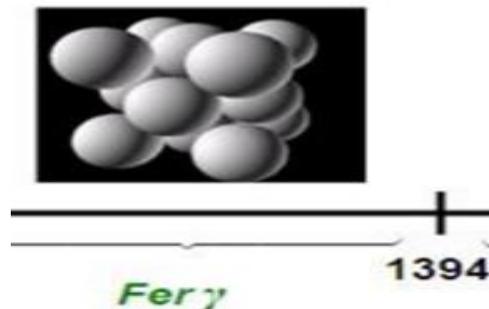


Figure I.3 : Structure cristalline de Fer γ

I.4.3. L'austénite γ :

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%C$ à 1145°C. Il est stable qu'à haute température.

L'austénite est très ductile [6].

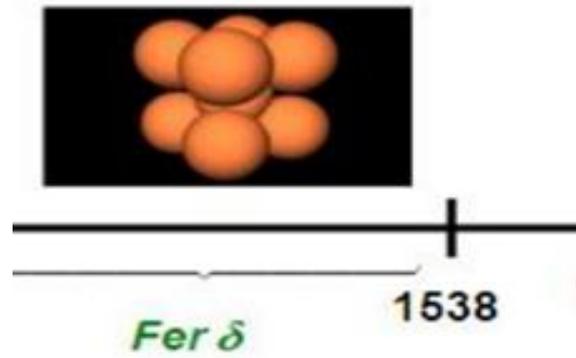


Figure I.4 :Structure cristalline de l'austénite

I.4.4.La cémentite (Carbone de fer Fe₃C) :

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile [6].

I.4.5. La perlite :

Agrégat ectectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure (HB≈200), résistante (Rm≈850 MPa) et assez ductile (A%≈10) . [6]

I.5. Les différentes classes des aciers :

Il est habituel de classer les aciers en plusieurs groupes correspondant à différentes particularités de composition ou d'emploi. C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies .

Ces notions sont définies comme suit :

I.5.1.Aciers non alliés et aciers alliés.

Pour définir ces 2 classes d'aciers, on prend en compte :

- pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée;
- pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue au tableau suivant est alors portée à 1,80 %).

Les limites des teneurs en éléments d'alliage qui séparent le domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés sont indiquées dans le(tableau I .1). Un acier est considéré comme

allié dès qu'une de ces limites est atteinte [7].

I.5.1.1 Aciers de qualité :

Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité .[7]

I.5.1.1.1.Aciers de qualité non alliés

Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux [7].

Tableau I.1 :Délimitations entre aciers non alliés et aciers alliés [7]

Élément spécifié	Limite %	Élément spécifié	Limite %
Al	0,30	Ni (1)	0,30
B	0,0008	Si	0,60
Cr	0,30	Ti (2)	0,05
Cu	0,40	V (2)	0,10
Mn	1,65(3)	W	0,30
Mo (1)	0,08	Zr (2)	0,05
Nb (2)	0,06	Autres (exceptés C, P, S, N)	0,10
<p>(1) et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4 la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles.</p> <p>(3) Si Mn est défini par un maximum la limite est 1,80</p>			

I.5.1.1.2.Aciers de qualité alliés :

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique;
- _ des aciers pour tôles magnétiques;
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine;
- des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et /ou Zr;
- des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu [7].

I.1.5.1.2 Aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement [7].

I.5.1.2.1 Aciers spéciaux non alliés :

Font partie de cette catégorie :

- des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu;
- les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques;
- des aciers à teneur faible en inclusions;
- des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit ;
- des aciers dont la résilience KV en long à 50 °C est supérieure à 27J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers;
- des aciers pour réacteurs nucléaires avec $Cu \leq 0,10 \%$, $Co \leq 0,05 \%$ et $V \leq 0,05 \%$;
- des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %;
- des aciers pour armature de précontrainte du béton . [7].

Désignation :

_ Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires (E = teneur en soufre, C = formage à froid, S = ressort, D = Tréfilage...).

Exemple : GC 35 E (0,35 % de carbone, G = acier moulé, E = teneur maxi en soufre)

I.5.1.2.2 Aciers spéciaux alliés :

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables.

Font partie de cette catégorie :

- les aciers de construction mécanique;
- certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression;
- certains aciers résistant au fluage;
- les aciers pour roulement ;
- les aciers à outils et les aciers à coupe rapide;
- des aciers à propriétés physiques spéciales [7].

I.5.1.3 Aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. On distingue les aciers inoxydables qui contiennent moins de 2,5 % de nickel de ceux qui contiennent au moins 2,5 % de nickel.[7].

I.5.2 .Les aciers au carbone :

Les aciers au carbone ne contiennent aucun élément d'alliage autre que le carbone. L'addition de carbone augmente la résistance à la traction, à la dureté et à la corrosion, mais Diminue la ductilité et la malléabilité. Même en très petites quantité, le carbone modifie Grandement la résistance du fer.

Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles: les aciers doux, les aciers à moyenne Teneur en carbone et les aciers à forte teneur en carbone. Du point de vue pratique, la Teneur en carbone de l'acier peut varier entre 0.05% et 1.35%, donnant ainsi diverses Nuances. Outre le carbone, il existe dans l'acier, en proportions infimes, d'autres éléments tels le manganèse, Mn, le phosphore, P, le soufre, S, et le silicium, Si. La dureté d'un acier en est fonction de sa teneur en carbone [8].

I.5.2.1 Les aciers à faible teneur de carbone (%C<0.25%)

Ces aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance.

Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique).

Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25%. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés. On les trouve dans diverses applications (éléments de construction tels que les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, boîtes de conserve,...) [9].

Exemple : 35 Cr Mo 4S (acier avec 0.35% de Carbone, 1% de chrome, moins de 1% de Molybdène. Cet acier est soudable);

I.5.2.2 Les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C)

Ces aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (austénisation, trempe, revenu et recuit). L'apport d'éléments d'addition tels que le chrome, le nickel et le molybdène facilitent ces traitements. Ces aciers sont utilisés dans la fabrication de vilebrequins, d'engrenages, de roues et voies ferrées et autres pièces de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité.

L'austénisation consiste à chauffer au cours de l'élaboration l'alliage à une température comprise entre 750 et 900°C pour obtenir la structure austénite c.f.c (ou fer gamma) [9].

I.5.2.3 .Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Etant résistants à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices.

On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté [9].

Exemple :

-
- X40 Cr Mo V 5-1 (acier fortement allié avec 0.4% de Carbone, 5% de Chrome,
-
- 1%, du Molybdène et du vanadium (moins de 1%))
-
- X4 Cr Mo S 18 (acier fortement allié avec 0.04% de Carbone, 18% de Chrome, du
- Molybdène et du Soufre (moins de 18%))

I .5.3 Généralités sur les Aciers à outils :

Introduction :

Les aciers à outils, aussi appelés *aciers à outil* ou *aciers outil*, sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, dés de matriçage, outils de coupe, cisailles, marteaux et burins.

Ces aciers se caractérisent par de bonnes propriétés mécaniques générales à des duretés élevées (HRC supérieur à 55).

On distingue les aciers de travail à froid (travail à température ambiante), les aciers de travail à chaud (travail à température élevée), les aciers rapides (conçus pour les applications à haute température, notamment la découpe à haute vitesse . [10]

I.5.3.1 La classification des aciers à outils :

Aciers à outils non alliés pour travail à froid.

Aciers à outils alliés pour travail à froid .

Aciers à outils alliés pour travail à chaud.

Aciers à coupe rapides.

I.5.3.2 Aciers à outils non alliés pour travail à froid :

Les aciers pour travail à froid sont caractérisés par une très grande dureté à la température ambiante, supérieure ou égale à 55 HRC, mais par une faible dureté à chaud. Ils sont divisés, selon leur teneur en éléments d'alliage, en deux groupes :

- aciers à outils non alliés pour travail à froid ;
- aciers alliés pour travail à froid. [10]

I.5.3.3 Aciers à outils alliés pour travail à froid .

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C. Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, ... font preuve d'une grande stabilité de l'austénite sur fusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe. Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200° C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils. Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes.

I.5.3.4 Aciers à coupe rapides :

Les aciers rapides sont caractérisés par une très grande dureté à la température ambiante, supérieure à 60 HRC, et par une très bonne dureté à chaud et Les éléments d'alliage de base sont ;W, Mo, V, Cr [10].

I.5.3.5 Aciers à outils alliés pour travail à chaud;

Les aciers à outils alliés pour travail à chaud sont caractérisés par une dureté à la température ambiante relativement élevée, comprise entre 52 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud.

-I.5.3.6 Propriétés générales d'emplois acier à outils

- Dureté la plus élevée possible, permettant une grande résistance aux déformations lors du travail par enfoncement, pénétration ou cisailage.
- Ténacité élevée permettant de supporter des contraintes élevées sans rupture brutale, caractéristique souvent complétée par une bonne résistance aux chocs répétés. [10]

- I.5.3.7 Propriétés de mise en œuvre de l'acier à outils

- Bonne trempabilité afin d'obtenir des duretés homogènes et élevées sur de grandes

épaisseurs sans déformation excessives.

- Resistances convenables à la surchauffe, au grossissement de grain, à la décarburation
- Résistance à l'adoucissement au revenu.
- Bonne usinabilité et bonne aptitude à la rectification [10]

I.6 Caractérisation des aciers à outils

Pour permettre la caractérisation des aciers à outils, les 3 critères principaux sont

I.6.1 Caractéristiques physiques :

La dilatation est une caractéristique physique forte importante pour le constructeur métallique.

Le coefficient de dilatation de l'acier à outils est $11,5 \times 10^{-6} \text{ m / (m.K.)}$

dans la température 200 C° [10]

I.6.2 Caractéristiques Mécaniques :

Parmi les caractéristiques mécaniques des aciers, les plus couramment utilisées pour une application dans la construction métallique sont :

Limite d'élasticité : R_e en N/mm^2 ou MPa :

C'est la limite de la charge au-delà de laquelle le métal se déforme de façon irréversible c'est-à-dire qu'il ne retrouve plus sa géométrie initiale; la déformation n'est plus élastique et subite, elle devient plastique. Elle sert au calcul à la contrainte des éléments travaillant à la flexion, au cisaillement, au flambement . [10]

- Résistance à la traction (rupture) : R_m en N/mm^2 ou MPa

C'est la plus grande force que le métal peut supporter en traction avant rupture. Elle sert au calcul de fatigue

- Allongement à rupture : A en % C'est l'allongement maximal tolérable avant la rupture [10]

-

Module d'élasticité: E en N/mm^2

Exprimant la rigidité du métal, c'est le facteur de proportion entre une contrainte appliquée à une barre et l'allongement relatif de cette barre dans le domaine plastique [10]

Résilience: KCV en J/cm²

C'est une caractéristique qui permet d'apprécier la résistance d'un métal à une rupture brutale; l'essai consiste à rompre à l'occasion d'un choc unique une section métallique entaillée en son milieu, reposant sur 2 appuis et sollicitée en flexion

Il s'agit d'un des principaux critères de choix de qualité d'acier pour les constructions soudées [10]

- Dureté :

C'est la résistance à la déformation. Cette caractéristique permet d'estimer les propriétés mécaniques d'un métal.

En effet, des correspondances entre les résultats de mesure de dureté et le niveau de résistance (essentiellement à la traction) ont été établies; elles dépendent de la nature du métal de base [10]

. I.6.3 Caractéristiques chimiques :

Les métaux sont susceptibles de réagir chimiquement une fois en contact avec d'autres éléments. Lorsqu'il y a altération, on parle de corrosion.

La teneur des éléments qui le composent est donnée par les normes ou par les catalogues des producteurs .

La réactivité des aciers avec leur environnement est importante. La corrosion atmosphérique dépend de l'humidité relative et de la pollution de l'air.

Elle engendre une dégradation du matériau en termes d'épaisseur, de poids et par conséquent de performances– [10]

Ténacité :

C'est la capacité d'un métal à résister à la propagation brutale d'une fissure. Comme il est pratiquement impossible de garantir qu'une construction ne comporte aucun défaut, il est indispensable de prendre en compte ces défauts pour estimer la taille critique de ces défauts au-delà de laquelle ils seront responsables de la rupture de laquelle la rupture serait évitée

. Composition chimique des aciers Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure

A 2 % ($C < 2\%$), outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans

sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium, du manganèse, du soufre et du phosphore [10]

I.7 Composition chimique des aciers :

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

I.8 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer

Point de fusion: $\theta_f = 1538^\circ\text{C}$

- Structure cristalline
 - CC (ferrite δ) entre $\theta_f = 1538^\circ\text{C}$ et 1394°C
 - CFC (austénite γ) entre 1394°C et 912°C
 - CC (ferrite α) entre 912°C et l'ambiante
- Passage de l'état ferromagnétique (à basse température) à l'état paramagnétique (à haute température) à 768°C (point de Curie) .
- Masse volumique: $\rho = 7870 \text{ kg.m}^{-3}$
- Module d'élasticité longitudinal (module d'Young) $E: 211400 \text{ N/mm}^2$; ($T=20^\circ\text{C}$)
- Module de Coulomb $G : 81600 \text{ N/mm}^2$; ($T=20^\circ\text{C}$)
- Conductivité thermique: $73.3 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$; ($T=20^\circ\text{C}$)
- Coefficient de dilatation linéique (fer α à 20°C): $\alpha = 12.6.10^{-6} .\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique: 0.104
- Caractéristiques mécaniques à 20°C (fer α pur):
- Résistance à la traction $R_m = 180$ à 290 MPa
- Limite d'élasticité $R_e = 100$ à 170 MPa

- Allongement à la rupture A % = 40 à 50% [12 , 13]

I.9 Symbolisation des aciers : En fonction du type d'acier utilisé, on utilise des symboles différents pour la désignation [14]

Tableau I.2 .Symbolisation des aciers en fonction du type d'acier utilisé [14]

Symbole	Acier	Désignation
B	Acier à béton	Générale
C	Acier non allié avec Mn < 1%	Générale
E	Acier de construction mécanique	Générale
H	Acier à haute résistance laminé à froid pour emboutissage à froid	Générale
HS	Acier rapide	Spécial
HT	Acier à haute résistance laminé à froid pour emboutissage à froid	Générale
L	Acier pour tube de conduite	Générale
M	Acier magnétique	Générale
P	Acier pour appareils de pression	Générale
R	Acier pour ou sous forme de rails	Générale
S	Acier de construction	Générale
T	Fer noir, blanc ou chromé à simple réduction de laminage	Générale
X	Acier allié avec au moins élément de teneur $\geq 5\%$	Spécial

I.10 Désignation symbolique général des acier :

I.10.1 Désignation de l'acier au carbone :

Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique à la traction R_e en MPa ou N/mm². S'il s'agit

d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G. Exemples : GE 335, GS235

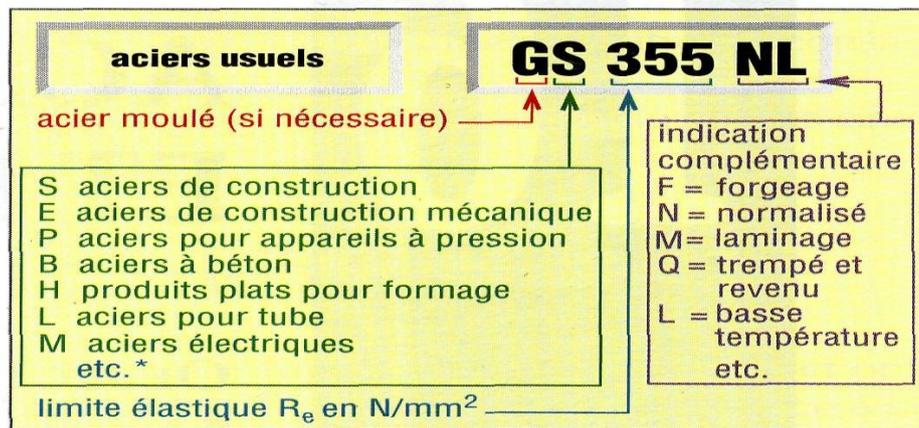
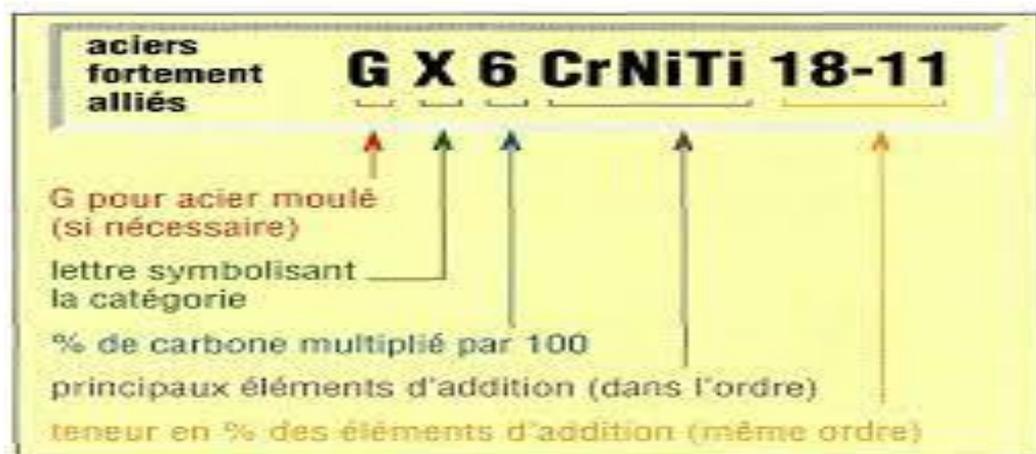


Figure I.5 : Désignations des aciers au carbone

I.10.2 Désignation de l'acier fortement alliés :

Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. Seule différence : pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni 10, ni 4, ...).

Exemple : G X6CrNiTi 18-11 (0,06 % C ; 18 % de chrome ; 11 % de nickel et des traces de titane (< 1%), G pour acier moulé).



.figure I.6: Désignation des aciers fortement alliés.

I.10.3 Désignation de l'acier faiblement alliés :

pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages

de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (voir détails figure I.7), plus au besoin des indications complémentaires.

Exemple : G 35 NiCr Mo 16 (0,35 % de carbone ; 4 % de nickel et des traces < 1% de chrome et de molybdène, G = acier moulé).

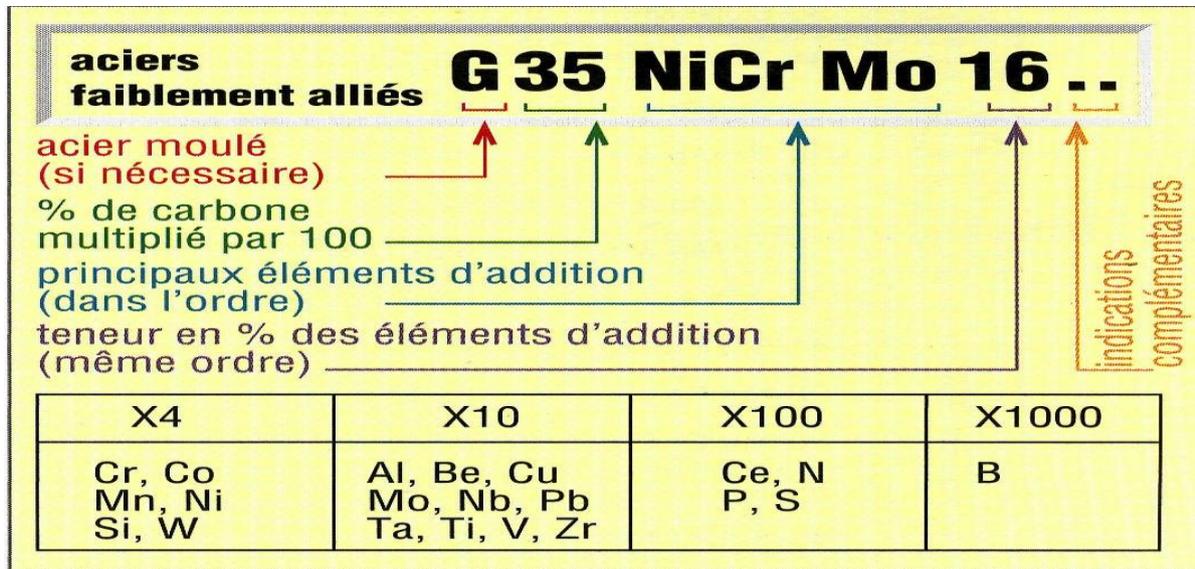


Figure I.7 : Désignation de l'acier faiblement allié

I.11 Les éléments d'addition :

➤ Les principaux éléments d'addition du fer sont :

le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote... ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques. L'action des éléments d'addition dépend essentiellement des deux facteurs décrits ci-dessous:

I.11.1 Le carbone :

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite Fe₃C. [15]

I. 11.2 Le chrome :

Cet élément d'addition alphasène est particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier. Par la formation de carbures de types M₇C₃ (1400-1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation,

retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage) [15].

I.11.3 Le nickel :

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique [15].

I.11.4 Le molybdène :

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M₆C–1500HV, M₂C–2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. De plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le molybdène, élément alphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et les caractéristiques mécaniques [15].

I.11.5 . Le silicium :

Le silicium, autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite

élastique, de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de

synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer

la stabilité des carbures M₂C, ce qui abaisse la fragilité du métal [15].

I.11.6 Le titane :

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'in oxydabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome [15].

I.11.7 .Le manganèse :

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer [15].

I.11.8 Le cuivre :

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par [15].

I.11.9 Le phosphore :

augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu [15].

I.11.10 Le tungstène :

améliore la dureté à haute température des aciers trempés revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène [15].

I.11.11 vanadium :

augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué) [15].

I.12 Influence des éléments d'addition

Les éléments additionnels sont divisés en deux familles les éléments alphagènes (silicium, nickel, chrome, molybdène, tungstène, titane, niobium) et les éléments gamma-gènes (nickel , manganèse ,azote, carbone, cuivre, cobalt) certains éléments ont des plus importants que d'autres notamment l'azote et le carbone dont l'effet gamma-gène est environ Trent fois plus puissant que celui du nickel .

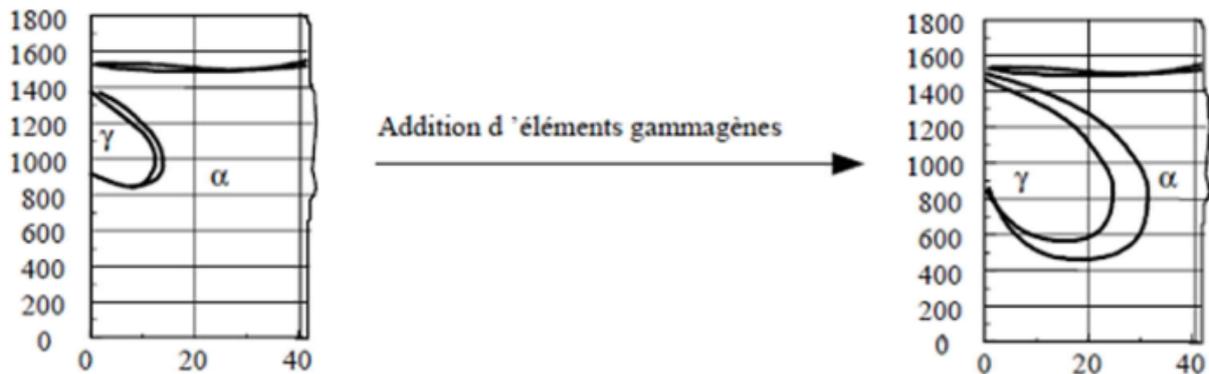


Figure I.8 : diagramme Fe-chrome- Influence de l'addition d'éléments gammagènes [15]

I.13 .Transformation de phase dans les acier :

Les objectifs de cette partie sont :

De présenter le deux type de transformation de austénite au refroidissement : diffusion et intermédiaire ou martensitique, en donnant leurs caractéristiques majeures, de décrire plus en détail les caractéristiques cristallographiques de la transformation martensitique déformation de transformation, plan invariant [16].

I.13 .1 .transformation au cours de chauffage (Austénisation) :

L'austénisation a pour objet de mettre en solution le carbone et éventuellement, les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Pour ce faire, il est nécessaire de se placer dans les conditions où le carbone est soluble dans le fer, c'est à dire de provoquer, par chauffage, la transformation du fer α en fer γ . La transformation austénitique peut être obtenue si la température est supérieure à AC_3 , plus elle est élevée plus le grain austénitique est gros et cela influence notablement les conditions de transformations au refroidissement

On appelle conditions d'austénitisation, les paramètres intervenant dans la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, les principaux sont :

La vitesse de montée en température, la nature et la teneur des éléments alliés, qui influent sur la cinétique de transformation et les points de début et de fin de transformation,

- La température et la durée du maintien, au -delà de AC3 pour la quantité d'austénite nouvellement formée, qui définissent la taille de grain austénitique [16].

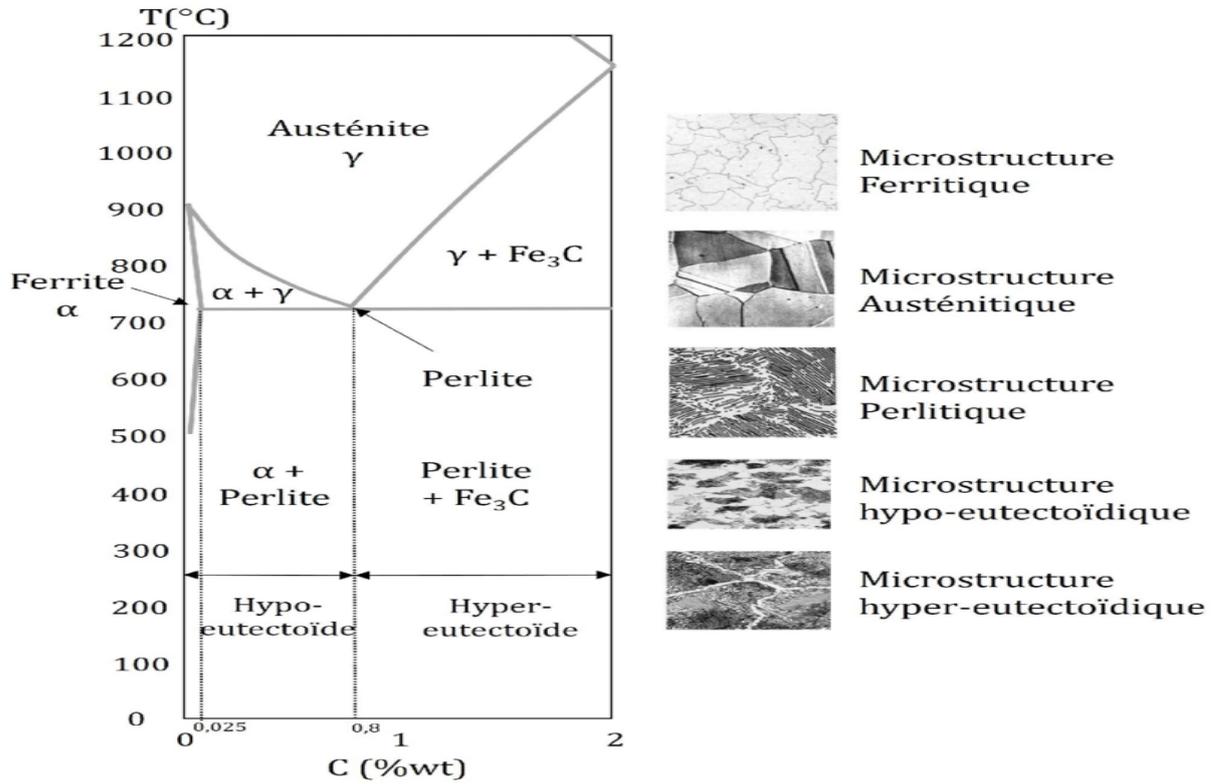
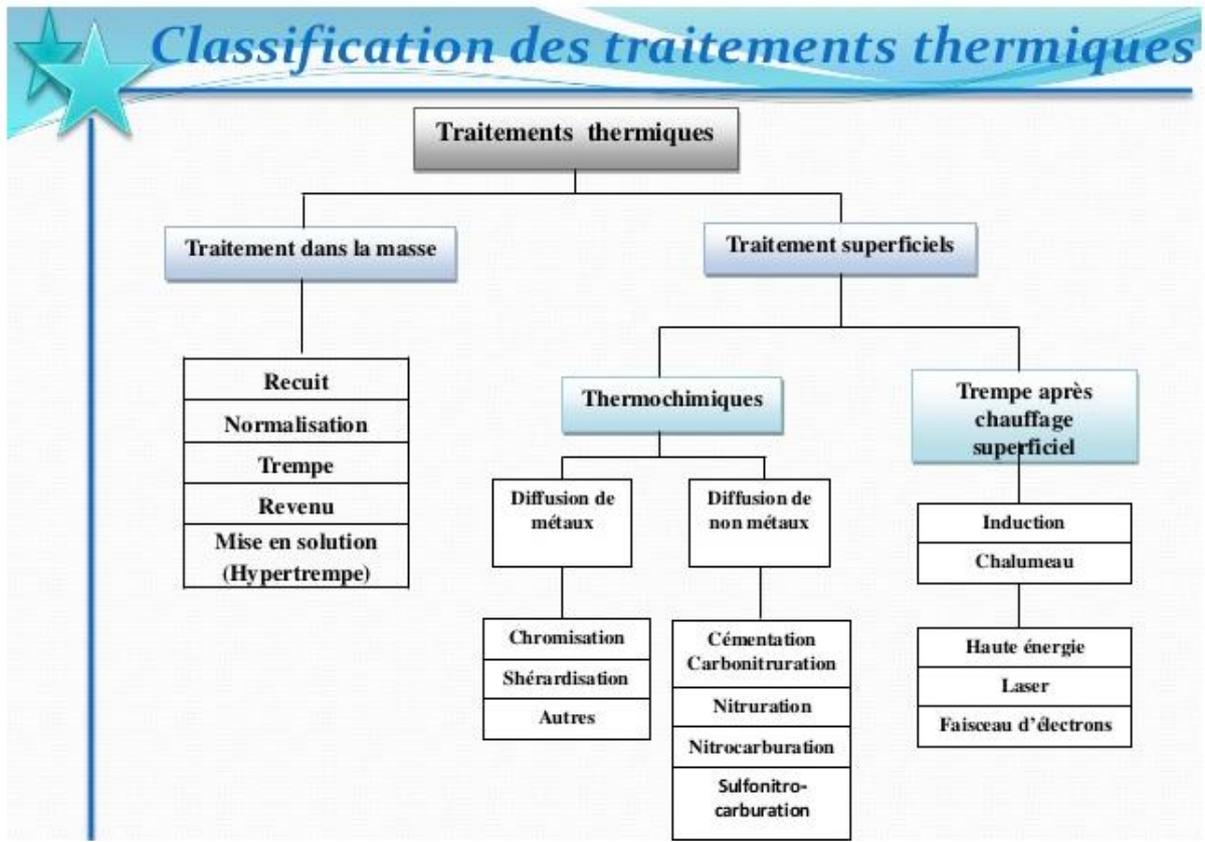


Figure I.9 : Diagramme de phase Fer-Carbone et microstructure observée par microscopie

Chapitre

II

Traitement Thermique des Aciers :



Introduction

Un traitement thermique est une opération ou une succession d'opération pendant laquelle (les quelles) un alliage métallique, à l'état solide, est soumis à un ou plusieurs cycles thermiques

. Les traitements thermiques ont pour but de donner à la pièce traitée les propriétés les plus convenables pour sa mise en œuvre et son emploi. D'une manière générale les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique mais apporte des modifications du point de vue constitution (état du carbone, forme allotropique), structure (taille de grain, répartition des constituants) et état de contrainte. Un traitement thermique comporte obligatoirement :

1. Un chauffage
2. Un maintien pendant un temps à la température de traitement
3. Un refroidissement (retour à la température ambiante) [17] .

Traitements thermiques des aciers :

Le procédé de traitement thermique d'un acier consiste à lui faire subir une variation de la température en fonction du temps. Il se compose d'un certain nombre d'opération de

chauffage et de refroidissement. Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux (résistance à la rupture, augmentation de la limite d'élasticité, dureté) pour une meilleure adaptation aux conditions en service. Cette amélioration vient des modifications structurales de la structure : meilleure homogénéisation, amélioration de la taille des grains (il permet de régénérer, par exemple, un métal ayant subi le forgeage et qui présente un grain trop grossier en affinant les grains). Il permet également de réduire les contraintes internes des matériaux, générées de par son histoire, qui peuvent être néfastes pour la pièce [18].

.

Les types des traitements thermiques des aciers :

Les traitements thermiques des aciers consistent à mettre en application les nombreux changements structuraux qui peuvent découler des transformations de phase ainsi que des phénomènes de recristallisation et de diffusion. On peut les subdiviser en trois groupes :

- ❖ **Les recuits**
- ❖ **Les trempes**
- ❖ **traitements d'amélioration (revenus) [19].**

II.3.1 Trempe :

II.3.1.1 Définition :

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer $\alpha \rightarrow$ fer γ (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale [20].

. - Principe :

Une trempe se compose de trois phases principales :

Chauffage :

destiné à amener l'acier à l'état austénitique. Acier hypoéutectoïde (de 0 à 0,85% de carbone) Température de chauffage ($Ac_3 + 50^\circ C$). La ligne Ac_3 va de $721^\circ C$ à $906^\circ C$, le chauffage d'un acier hypoeuctoïde dépend donc de sa teneur en carbone. Acier euctoïde (0,85 % de carbone) Température de chauffage ($Ac_1 + 50^\circ C$) soit environ $780^\circ C$. Acier hyperetectoïde (de 0,85 à 1,7% de carbone) Température de chauffage ($Ac_1 + 50^\circ C$) soit environ $780^\circ C$.

- Maintien à température d'austénisation :

Dépend : iv. Des dimensions et des formes de la pièce.

v. Des types d'aciers, 15 min pour les aciers ordinaires, 30 min pour les aciers alliés, en particulier pour ceux contenant des carbures.

- **Refroidissement (air, eau ou huile)** : C'est lui qui conditionne la structure finale. De lui dépend l'apparition de nouveaux constituants tels que : (dans l'ordre croissant de dureté) , bainite , martensite.

Equipements utilisés :

Pendant un essai de trempe nous sommes amenés à utiliser les dispositifs suivants :



Figure II.1 : Equipements utilisés

II.3.1.2 Les types de trempe :

II.3.1.2.1 Trempe bainitique :

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à θ_b (température de Trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante [20]

II.3.1.2.2. Trempe martensitique :

La trempe est un procédé de traitement d'un matériau. Il concerne surtout les métaux et le verre

. Ce traitement peut être thermique (refroidissement rapide) ou chimique (immersion dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface

II.3.1.2.3 Trempe d'aciers austénitique ou hypertrempe :

Sur certains aciers austénitiques, cette trempe crée une structure d'austénite homogène à température ambiante. Elle provoque l'adoucissement du matériau (comme certains aciers inox). Elle se produit si la température de trempe est trop élevée [20].

II.3.1.3 Cycle de trempe :

On cherche à obtenir la transformation de l'austénite (stable à température élevée) en constituants métastables (pas stables mais la très faible vitesse de réaction donne une apparence de stabilité) : solution sursaturée de carbone dans le fer α . Le cycle de trempe comprend 2 étapes : l'austénisation puis le refroidissement [20].

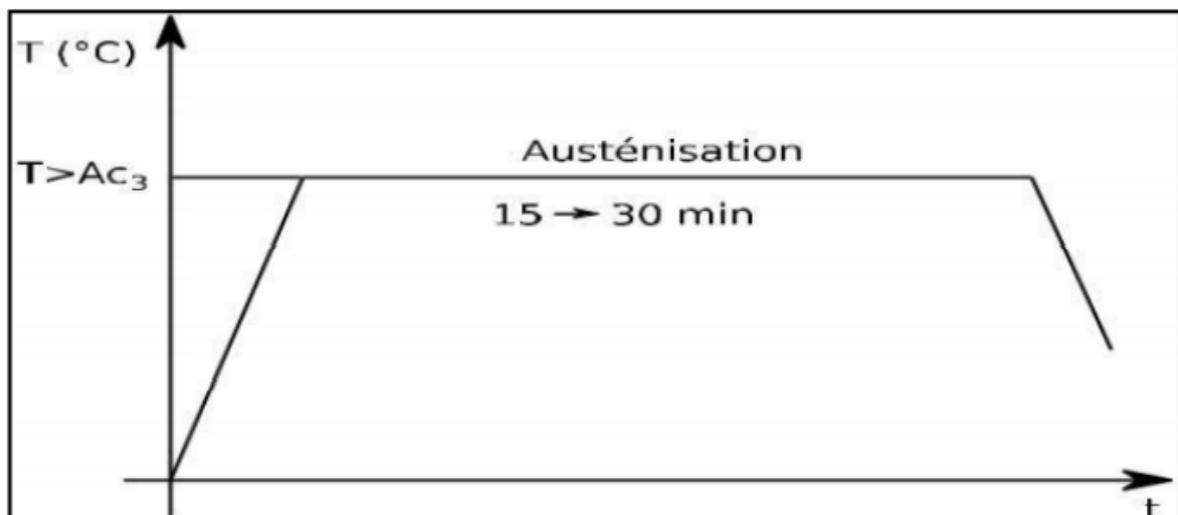


Figure II.2: Le cycle de la trempe. [20].

II.3.2 Le Revenu :

II. Principe et But de Revenu :

La trempe en isotherme est en général un traitement énergétique conduisant à un métal à R_m , R_e , H élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité ($A\%$) et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé.

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et $A\%$, K d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal.

Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en:

- Un réchauffage à une température $T_R < A_c1$,
- Un maintien de durée t_R à T_R .
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physico-chimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre [21].

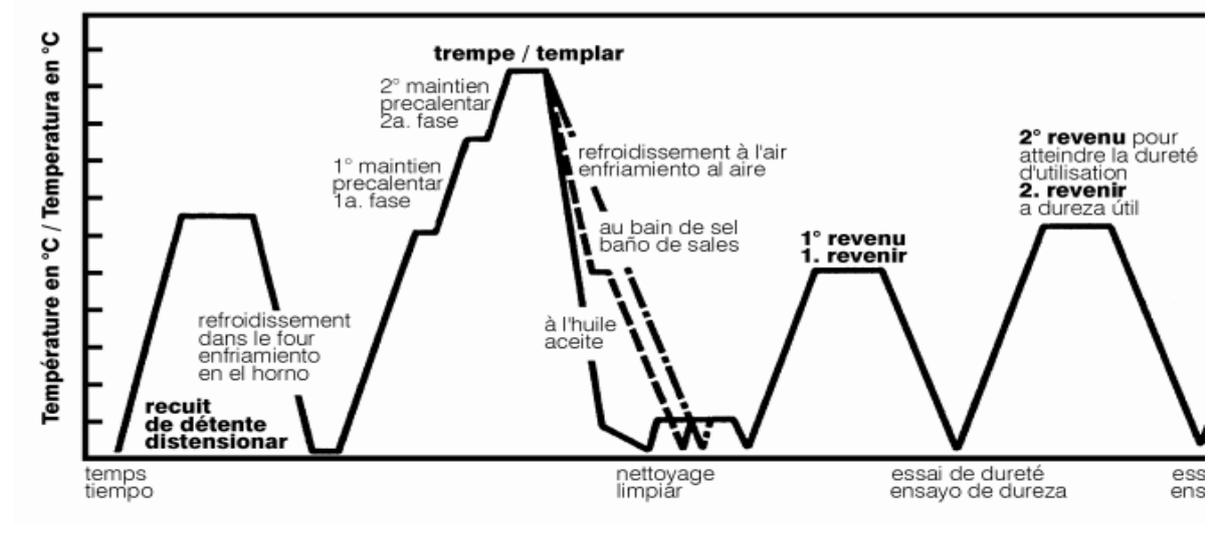


Figure II.3 : cycle complet de traitement thermique l'acier Z40CrMoV5

II.3.2.2 Différents types de revenu :

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

Revenu de relaxation ou de détente Il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite et martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [21].

II.3.2.2.1 Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et AC1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers . [21].

II.3.2.2.2 Revenu de durcissement :

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides).

Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [21].

II.3.2.2.3 -Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermiques :

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (figure II.4)

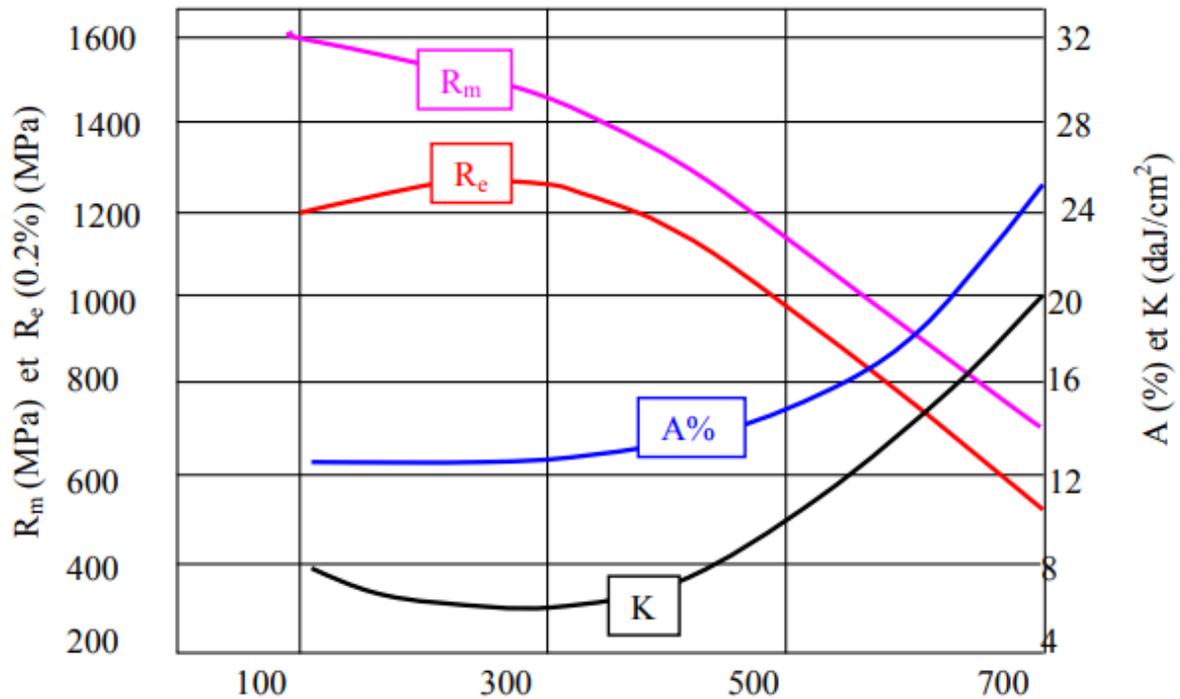


Figure II.4 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu

II.3.2.2.4 EN résumée de revenu :

le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200°C et 600°C, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent

-chauffage à 200°C mini pour éliminer les tensions internes dues au refroidissement brutal de la périphérie de la pièce sur le cœur dilaté. La contraction brutale de la périphérie, lors de la trempe, engendre des tensions entre le cœur et la périphérie. entre 200° Cet 600°C pour rechercher une valeur de caractéristique mécanique précise.

b) - maintien à température pendant une heure mini pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse.

c) - refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes

II.3.3 Le Recuit :

➤ Définition et rôles du recuit :

Il est défini par un cycle thermique dont les étapes sont :

- Un chauffage jusqu'à une température de recuit
- Un maintien isotherme à cette température
- Un refroidissement généralement lent qui s'opère habituellement à l'air ou on utilise
- Un milieu assurant une vitesse de refroidissement plus faible (four)

II.3.3 Les principes de recuit :

II.3.3.1.1 Chauffage :

Le chauffage se fera à vitesse modérée. Certains aciers "difficiles" demanderont des paliers intermédiaires ou des vitesses de montée en température précises.

La température de recuit (TR sur le graphe) est spécifique à chaque acier. Une fourchette est généralement donnée par le fournisseur d'acier. A défaut, il sera toujours possible d'utiliser les données techniques d'un acier proche ou similaire.

En général, cette température est de l'ordre de :

- > Pour les aciers hypoeutectoïdes = $AC_3 + 50^\circ C$.
- > Pour les aciers hypereutectoïdes = $AC_1 + 50^\circ C$ [6].

II.3.3.1.2 Refroidissement

Idéalement, le refroidissement devrait être le plus lent possible. Dans la pratique, il doit être adapté à l'acier. Certains aciers (particulièrement ceux avec du Chrome) exigent un refroidissement très lent. Le meilleur compromis, influant directement sur les moyens à mettre en œuvre, découle de l'expérience acquise avec un acier [22]

II.3.3.2 Les types de recuit

- Recuit d'adoucissement
- Recuit de normalisation
- Recuit de détente ou de stabilisation
- Recuit de recristallisation ou de restauration . [22].

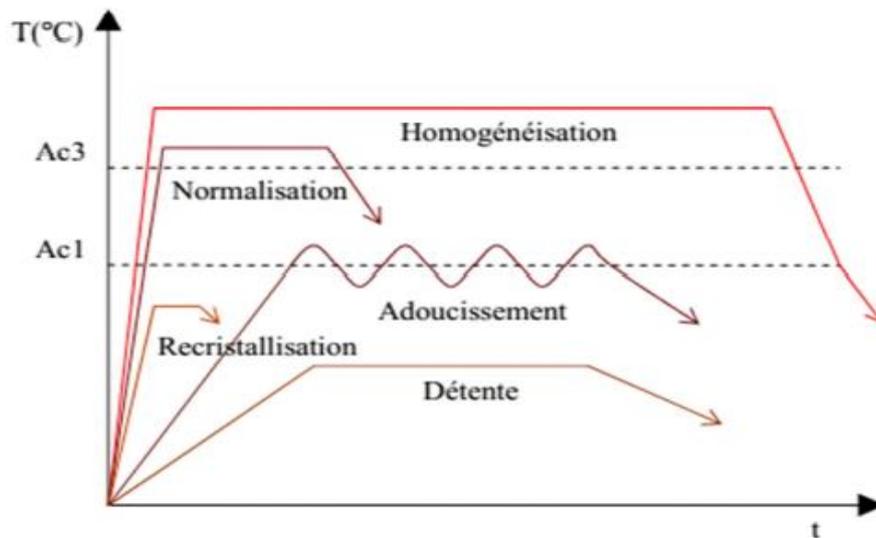


Figure II.5: les différents cycles thermique du Recuite [6].

II.4. Le but de traitement thermique :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivant Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , 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. – De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

-De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

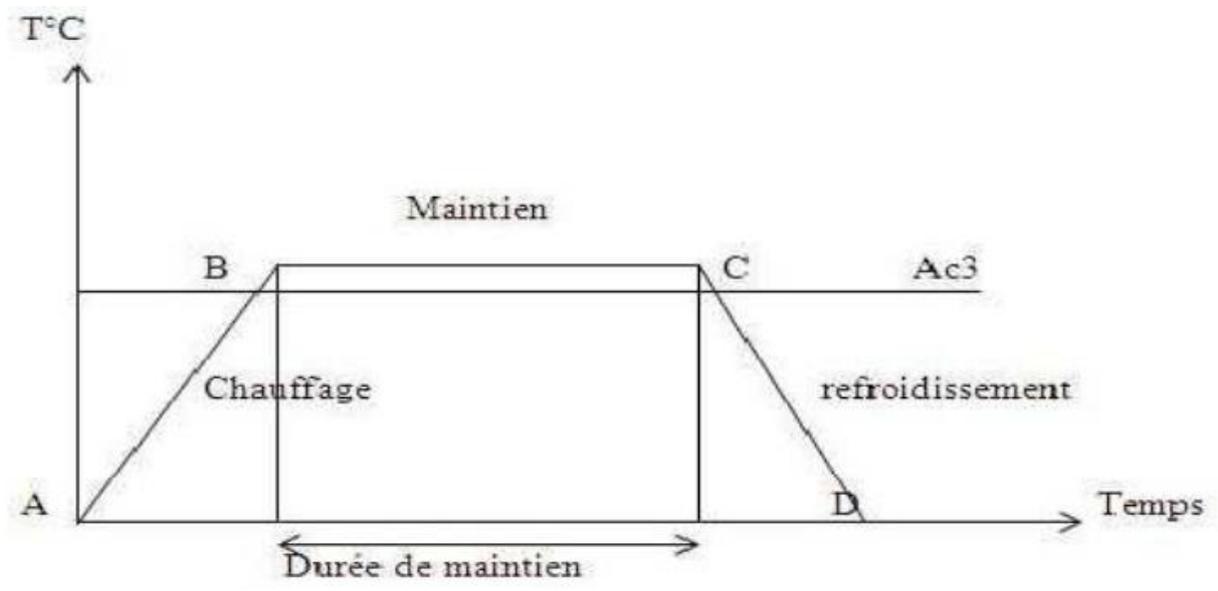
En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage,

les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour les quel son recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage [23].

II. 5 Cycle de traitement thermique :

En général le traitement thermique comprend 3 étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini. Toute fois le choix du traitement le plus approprié est en lui-même d'une grande difficulté plus particulièrement dans le choix de ces paramètres, et ce en fonction des structures et des propriétés physiques et mécaniques souhaitées . [24].



FigureII.6 : Cycle d'un traitement thermique. [25].

II.6 Diagramme TRC et TTT :

Le métallurgiste dispose de deux modélisations des transformations diffusionnelles : une approche isotherme d'une part représentée par les diagrammes TTT (Transformations Temps Températures), et une approche en isotherme d'autre part représentée par les diagrammes TRC (Transformations à Refroidissement Continu). Les températures caractéristiques de ces diagrammes sont dépendantes de la teneur en élément d'alliage . [26]

II.6.1 Diagramme TRC :

Un diagramme de transformations en refroidissement continu, est un diagramme utilisé pour prévoir la structure cristallographique d'un acier soumis à des transformations thermomécaniques.

Ces diagrammes sont généralement tracés par étude dilato-métrique. On homogénéise les échantillons dans la phase de haute température. On refroidit ensuite ceux-ci à différentes vitesses contrôlées. La dilatation des échantillons est enregistrée graphiquement en continu afin de tracer la courbe dilato-métrique .

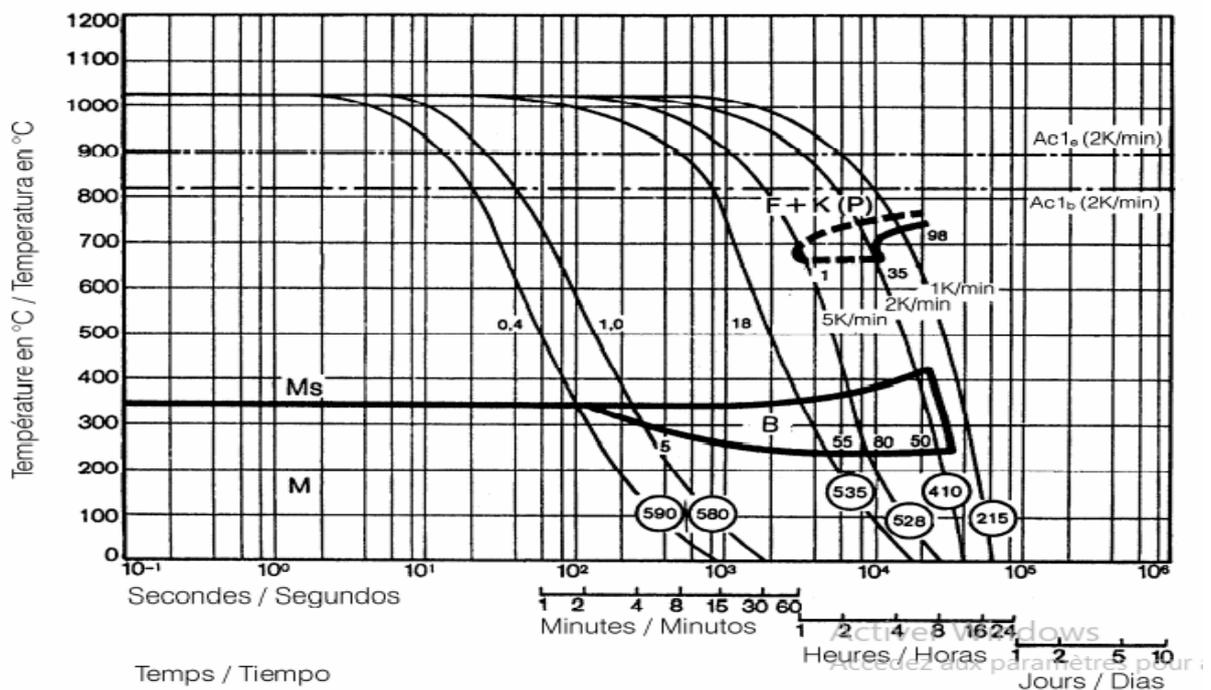


Figure II.7 : diagramme de TRC de la nuance Z40CrMoV5

A = Austénite

C = Cémentite

F = Ferrite

M = Martensite

II.6.2 Diagramme TTT :

Le diagramme temps-température-transformation, est utilisé pour étudier les transitions de phases ou d'état, spécialement pendant les traitements thermiques dits de revenu.

Ce type de diagramme s'obtient par des expériences de trempe suivies d'un maintien à une température donnée. On mesure alors le taux de transformation.

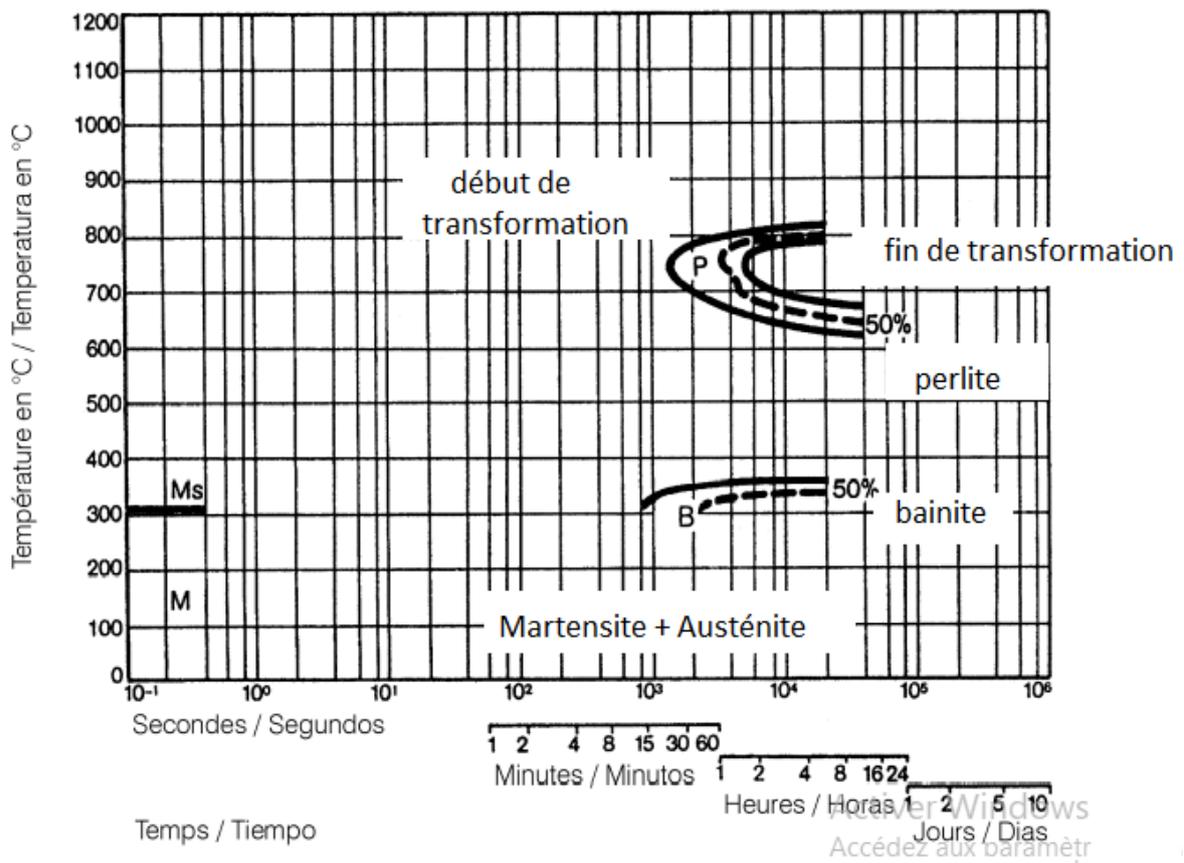


Figure II .8 : Diagramme TTT de la nuance Z40CrMoV5

Chapitre

III

La partie expérimentale

Matériaux et technique expérimentale

III.1 Introduction :

Dans ce partie chapitre, le but est de présenter les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'étude des caractéristiques de la structure de l'acier Z40CrMoV 5 Le pourcentage de carbone 0,40 % ° C

Diverses techniques ont été utilisées pour caractériser nos échantillons les observations Micrographiques et des mesures de la micro-dureté (Hv). Le travail a été abordé en respectant les étapes suivantes :

- Prélèvement de l'échantillon ;
- Réalisation du traitement thermique
- Examen Métallographique ;
- Une observation micrographique à l'aide d'un microscope optique ;
- _ Mesure de la dureté [1].

III.2 Matériau utilisé :

Dans notre étude nous avons utilisé un Acier à outils pour travail à chaud par désignation Z40CrMoV5 pour pourcentage de carbone 0,4 % C Acier pour travail à chaud avec très bonne résistance mécanique aux températures élevées, une bonne ténacité et une bonne résistance à la formation des criques à chaud.

Tableau III. 1 : Composition chimique de Z40CrMoV5 :

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
0,39	1,10	0,40	5,2	1,40	0,95	

III.3 Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons pour l'observation micrographique nécessite un polissage mécanique. Celui-ci consiste en une série de polissage au papier émeri de granulométrie de plus en plus fine pour terminer avec un tissu recouvert par du poudré la alumine (à chaque fois suivis de nettoyage à l'eau à la fin de chaque étape de polissage pour enlever les plus grosses particules qui pourraient griffer la surface).

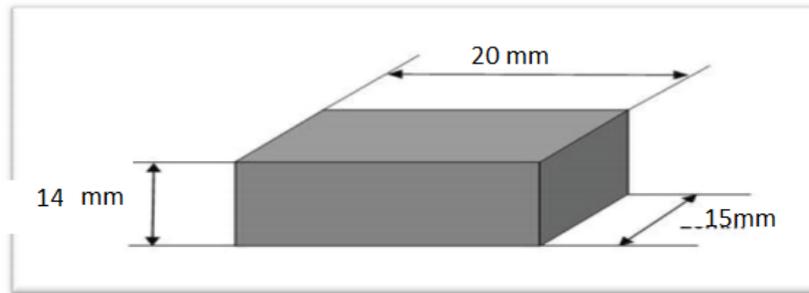


Figure III . 1 : l'échantillon utilisé dans étude et leur dimension sur la forme cube

III.3 .1 le découpage :

Pour le découpage on a utilisé une Machines à découper pour préparer les échantillons .Le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter l'augmentation de la température (a cause de frottement) donc par conséquence on évite le changement de la structure .



Figure III.2 :l'opération de découpage(SCIES ARUBAN)

III.4 Observation microscopique :

Avant chaque observation microscopique les échantillons subissent un polissage mécanique puis une attaque chimique .

III.4 .1 Polissage Mécanique :

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon plane, brillante et sans rayures. Dans le but de réaliser un bon polissage, on a procédé d'abord, par un pré polissage des surfaces à examiner, qu'on a réalisé avec un touret sous eau et des abrasifs de plus en plus fin de granulométrie 80 ,120 ,240,280,400,600,800,1000,1200 puis par du poudre la alumine répartie à l'aide d'un diluant sur un disque de feutre [27].



Figure III.3 : polisseuse de finition



Figure III.4 : polisseuse

III.4.2 L'attaque chimique :

L'attaque a pour but de révéler les joint de grains et de différencier les constituants de notre acier utiliser. Le réactif chimique utilisé pour nos échantillons est le nital qui est une solution composée de l'acide nitrique dans l'alcool éthylique (5 ml d'acide nitrique avec 95 ml ALCOHOL), on injecte sur l surface poli cette solution, un temps de maintien suivi d'une opération de nettoyage à l'eau et d'un séchage par flux d'air sur la surface traitée. cette attaque permet un examen microscopique à des grossissements jusqu'à 1000 fois (microscopie optique) . [27].

Tableau III.2 : Composition du nital et durée de l'attaque chimique.

Nuance	Réactif	Durée
--------	---------	-------

Z40CrMoV5	Nital :[5 %d'acide nitrique (NHO3) et 95 % d'alcool .(HCL)]	35 à 1.85 secondes.
-----------	--	---------------------



Figure III.5 :L'échantillon préparé pour le microscope optique

III.5 Microscopie optique :

La microscopie optique est une méthode physique d'observation des métaux, qui consiste à examiner par réflexion au microscope une surface polie et généralement attaquée. Elle a pour but principal, la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques. Nos examens de microscopie optique ont été réalisés à l'aide d'un microscope. Le but des observations microscopiques, est la détermination des structures des différents échantillons en fonction du temps [27].

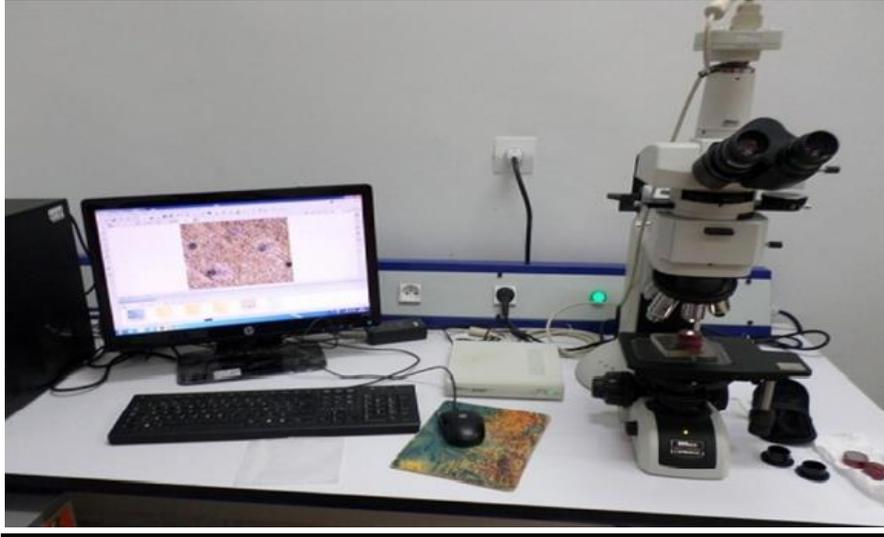


Figure III.6 : Microscope optique de type (NIKON éclipse)

III.5.1 Essai de dureté (VICKERS) :

Sont méthode de la mesure de caractérisé les matériaux , la machine de mesure de la dureté est présentée dans la (figure III 9) de type Vickers ; dont le poids varie entre 10 et 150 kg .

L'essai de dureté VICKERS consiste à imprimer sur la surface de la pièce un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet de 136° sous une charge **F** et à mesurer la diagonale (**d**) de l'empreinte laissée après suppression de la charge.

On obtient la valeur (**d**) en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 c'est le (**d**) qui sera utiliser pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées cet essai est le plus précis est permet de tester des pièces fines. La surface doit être rectifiée ou polie .

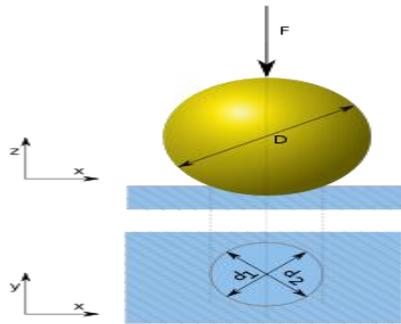


Figure III.7 : l’empreint de dureté la dureté
brinelle

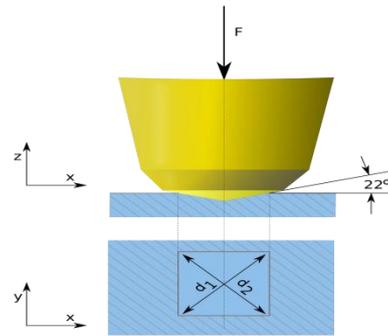


Figure III.8 : l’empreint de la
dureté vickers

$$HV = \frac{0,102 \times 2F \sin (136 / 2)}{d^2} = \frac{0,189 F}{d^2}$$

HV = Dureté vickers

HB = Dureté brinell

F =force appliquée (N)

D =moyenne des diagonales de l’empreinte (mm)

III.5.2 Essai de dureté (ROCKWELL) :

Le test de dureté Rockwell est l'un des nombreux tests de dureté par indentation couramment utilisés aujourd'hui, d'autres exemples étant le test de dureté Brinell et le test de dureté Vickers. La plupart des tests de dureté par pénétration sont une mesure de la déformation qui se produit lorsque les matériaux testés sont pénétrés avec un type spécifique de pénétrateur. Dans le cas de l'essai de dureté Rockwell, deux niveaux de force sont appliqués au pénétrateur à des vitesses et avec des temps de séjour spécifiés, contrairement aux tests Brinell et Vickers, où la taille de l'indentation est mesurée à la suite du processus d'indentation, la dureté Rockwell du matériel est basée sur la différence de profondeur du pénétrateur à deux moments spécifiques au cours du cycle d'essai.

La valeur de la dureté est calculée à l'aide d'une formule qui a été dérivée pour donner un nombre tombant dans une plage de nombres définie arbitrairement connue sous le nom d'échelle de dureté Rockwell.

Étant donné que la valeur de dureté dépend de la définition de la méthode d'essai, il n'existe pas de systèmes de mesure alternatifs pour mesurer directement ou indépendamment la dureté Rockwell, ni d'artefacts intrinsèques à référencer. La procédure générale de test Rockwell est la même quelle que soit l'échelle ou le pénétrateur Rockwell utilisé.

Une mesure de dureté Rockwell est indiquée comme un nombre de dureté Rockwell, sans unités. Le nombre de dureté Rockwell est calculé à partir de la différence des profondeurs d'indentation avant et après l'application de la force totale, tout en maintenant la force d'essai préliminaire .

Pour l'utilisation de l'escalade utilisant un pénétrateur diamant sphéroconique, le nombre de dureté Rockwell est calculé à partir de h (en mm)

$$\text{La dureté régulière ROCKWELL} = 100 - \frac{h}{0.002 \text{ mm}}$$

$$\text{La dureté superficielle ROCKWELL} = 100 - \frac{h}{0.001 \text{ mm}}$$

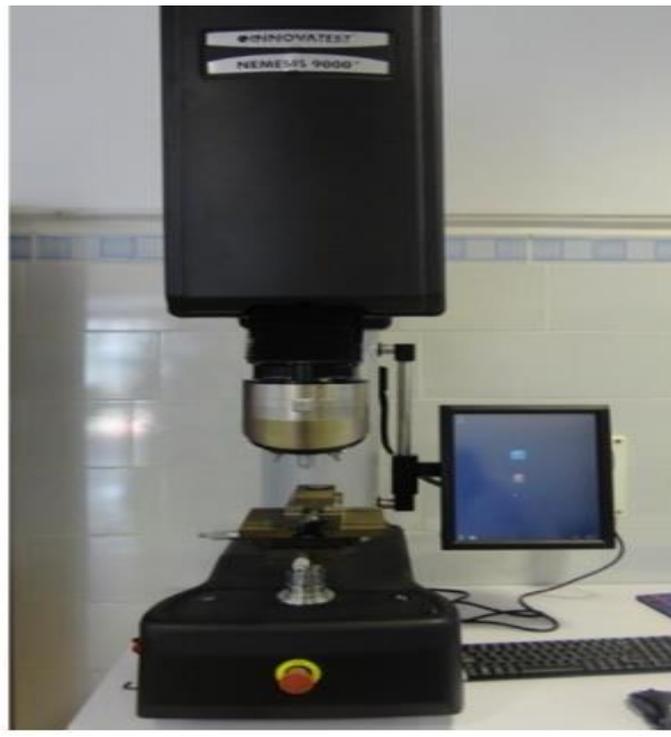


Figure III.9 : Machine de mesure de la dureté

III.6 Traitement thermique ; suivent b

Lors du traitement thermique, les échantillons ont été traités comme suite :

III.6.1 A trempe :

Est un procédé de durcissement qui consiste à chauffer l'acier au-dessus de sa température de transformation, puis à la refroidir rapidement en la trempant dans un bain liquide ou dans un fluide gazeux. La trempe de l'acier permet d'augmenter sa dureté et sa résistance. On l'utilise pour durcir les pièces mécaniques lorsque leur fonction exige une dureté accrue pour résister à l'usure ou aux chocs répétés. La première étape de la trempe consiste à chauffer la pièce au-dessus de sa température de transformation. Elle varie selon le pourcentage de carbone contenu dans l'acier et dans notre cas, la température de L'austénitisation est $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ de l'acier Z40CrMov5 .

Pour le chauffage des échantillons, on a utilisé un four (Figure. III 15) qui permet d'obtenir une température uniforme, ce qui se traduit par une trempe de qualité. On utilise un four électrique, il est propre, son réglage est simple et la température développée est uniforme et réglage le temps de maintien (1 heure et 35 minutes).

Une fois les échantillons installés dans le four, on doit maintenir la température suffisamment longtemps pour permettre à la chaleur de se distribuer à travers toute la pièce. Donc, le temps de chauffage nécessaire varie en fonction des dimensions de l'échantillon à tremper, le refroidissement se fait à l'huile.

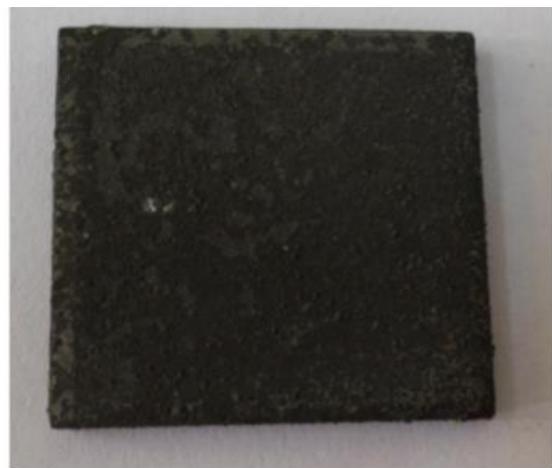
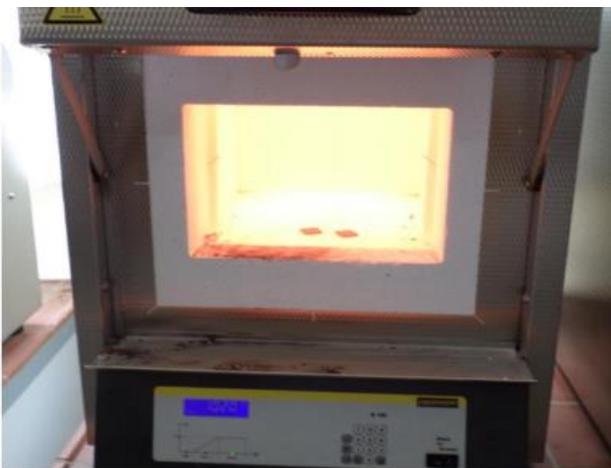


Figure III.10 : pièces au cours de traitement **figure III.11** : pièce obtenue après le traitement
des trempe thermique

III.6.2 Revenu 1 :

Chauffage lent à la température de **revenu 1** (500 °c) immédiatement après la trempe et le refroidissement temps de séjour dans le four **1 heure** par **20 mm** d'épaisseur,

La vitesse de refroidissement après revenu a une influence très faible sur l'état des contraintes résiduelles.

Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles

III.6.3 Revenu 2 :

Chauffage lent à la température de **revenu 2** (550 °C) et le refroidissement temps de séjour dans le four **1 heure** par **20 mm** d'épaisseur

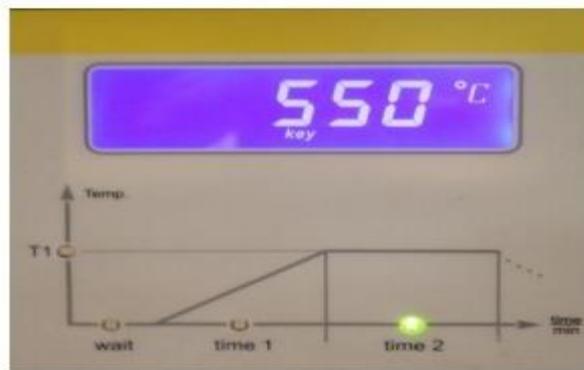


Figure III .12 :température le traitement de revenu (2)



Figure III.13 : pièces en cour de traitement

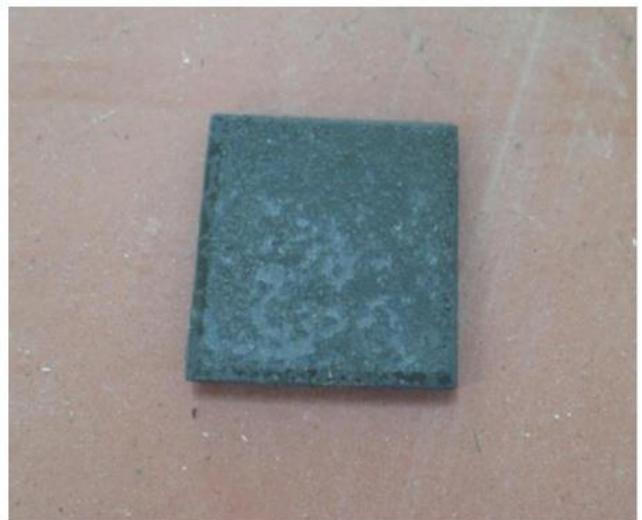


figure III .14 : pièce obtenue après le traitement

_ Pour ces traitements thermiques nous avons utilisé un four électrique :



Figure III .15 : four électrique modèle (NABERTHERM)

Chapitre

IV

Résultats et interprétation

Observations microscopiques et essais de la dureté :

IV . 1 Introduction :

Dans cette partie, nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées lors de la réalisation de ce travail. L'interprétation exacte des différents résultats obtenus lors de cette étude repose sur les mesures correctes et justes provenant des instruments techniques utilisés et des limites technologiques de chaque équipement. Parmi les objectifs du présent travail. On peut citer en premier lieu, la compréhension de l'influence de température et le temps de maintien sur les propriétés de ce métal .

IV.2 Analyse Métallographique :

IV.2.1 Microstructure du métal de base à l'état brute :

La (figure IV . 1) présente la micro structure de métal de base à l'état brut , elle est constituée globalement d'une structure de ferrite et de perlite ; ferrite (la zone claire) et la perlite (la zone en noire). On constate que la microstructure de cette Acier (Z40) est dominée par la perlite car le pourcentage de carbone de cette Acier est 0 ,40% C .

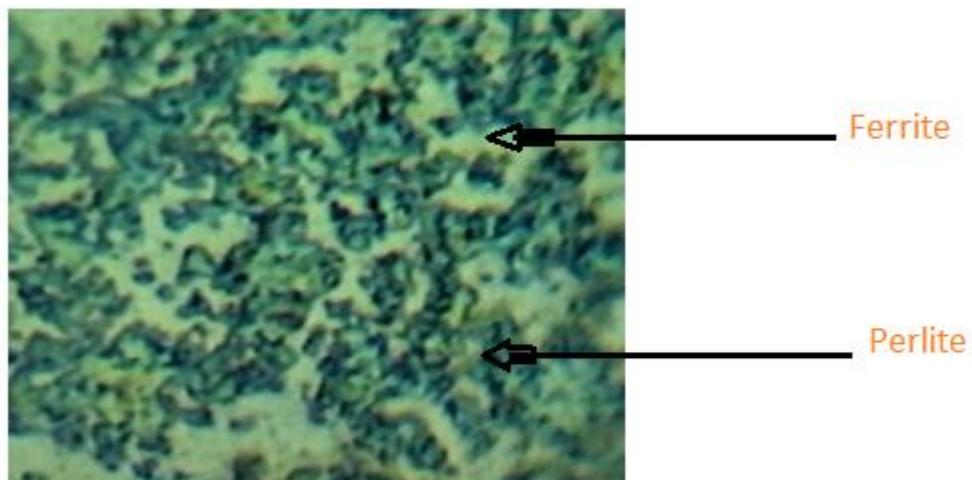


Figure IV.1 : Microstructure de l'acier Z40CrMoV5 à l'état brute (x200)

IV. 3 Après traitement thermique :

L'objectif de cette partie d'étude est de présenter l'effet des traitements thermique et le temps de maintien sur l'évolution microstructurale d'acier Z 40 Cr MoV 5 pour cela on a appliquée des traitements thermiques à températures (1030 °C) pendant 1 heure et 35 min

. IV.3 .1 Etat de l'échantillon traité à T=1030 °C (trempe)

L'opération consiste à chauffer l'échantillon à 1030 °C et avec un temps de maintien défini, puis, un refroidissement rapide dans un bain d'huile à température ambiante .

L'observation microscopique par rapport à la comparaison avec l'état brut

l'observation au microscope métallographique a révélé la formation de la bénite dans toute la matrice (figure IV 2), on note que la structure est **bainitique** .

La trempe bainitique peut être dû au fait que l'environnement de refroidissement à huile ne permet pas un grand abaissement de la température comme dans le cas du refroidissement à l'eau, donc la vitesse de refroidissement est supérieure à celle de la vitesse critique compatible à la martensitique.

D'autre part, les joints de grains sont très apparents où une zone blanche est très apparente aux endroits proches à ces joints de grains.

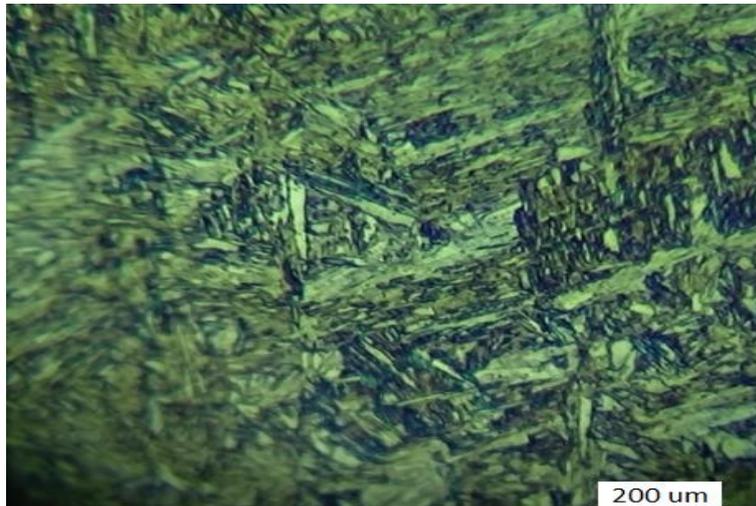


Figure IV.2 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état trempe.(x200)

IV.3.2 Etat de l'échantillon traité à T= 500 °C (Revenu 1)

Le revenu est une opération finale de traitement thermique. Son but est l'obtention des Meilleures propriétés mécaniques, il supprime complètement ou partiellement les

contraintes internes dues à la trempe. Les réactions au cours du revenu varient avec le temps et surtout avec la température. Nous savons que le revenu à 500°C diminue les contraintes internes .

L'évolution microstructurale de l'acier lors du revenu à différentes températures d'un échantillon préalablement trempé est présentée dans (figure IV 3). A travers ces micrographies, nous remarquons qu'il n y a pas de changement dans la morphologie de la structure initiale (la bainitique)

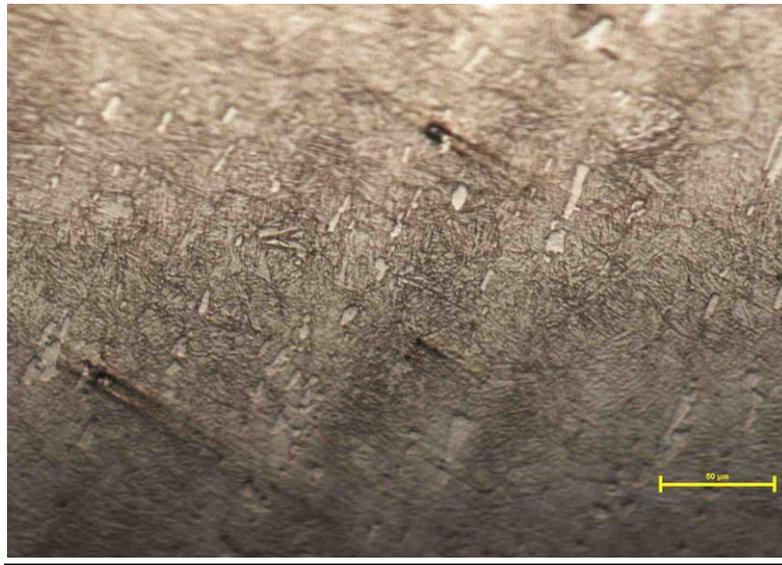


Figure IV . 3 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état Revenu 1.(x200)

IV.3.3 Etat de l'échantillon traité à T= 550 °C (Revenu 2)

Le Revenu 2 a été appliqué à notre acier Z40CrMoV5 après avoir été chauffé à 550°C. La microstructure finale est présentée dans la (figure IV 4) .

Probablement nous savons que le revenu diminue les contraintes internes, mais en revanche , ils peuvent aussi changer la microstructure, la formation d'un grossissement de grains en formation précipitée.

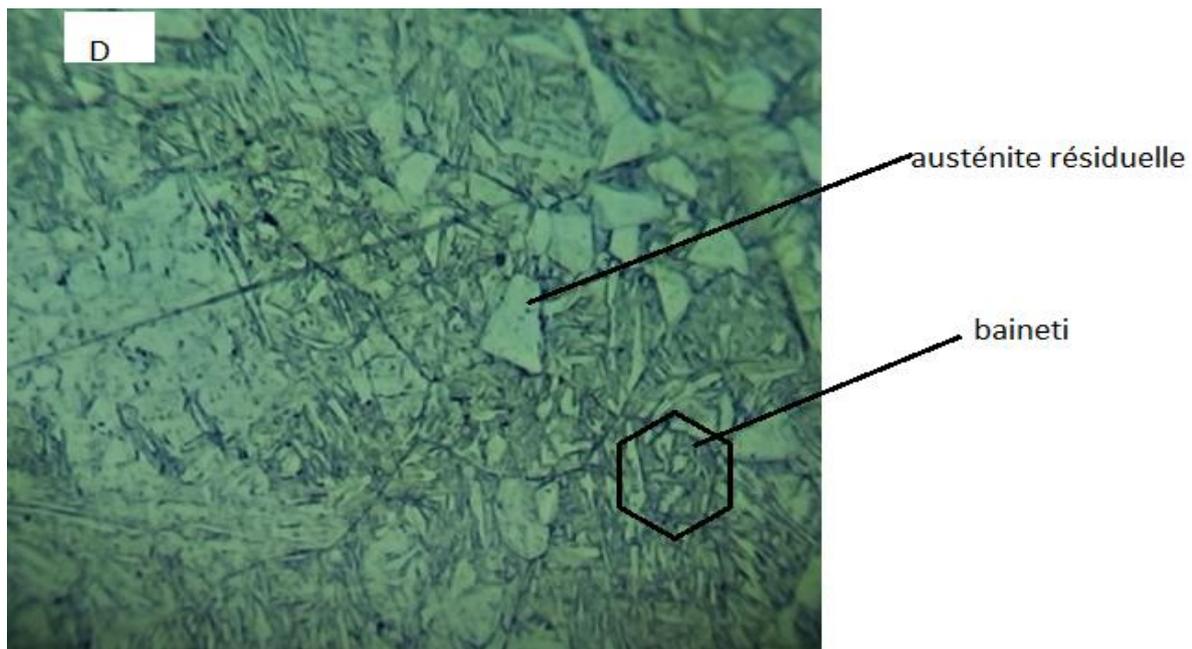


Figure IV .4 : Microstructure d'un acier Z40CrMoV5 à l'état Revenu 2 .(x200)

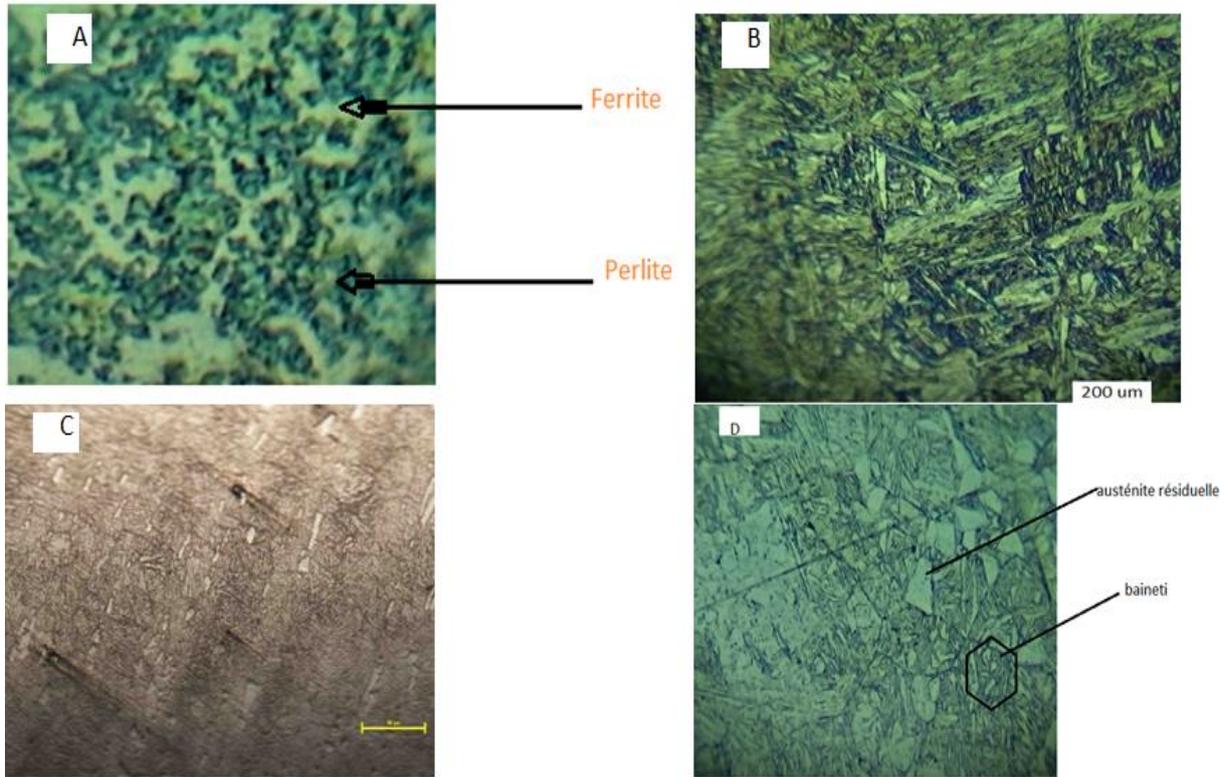


Figure IV.5 : Microstructures de l'acier 0 ,40 % C après homogénéisation [(A) l'état brute (B) trempe à l'huile suivie d'un [(c) revenu 1 et après (D) revenu 2]

IV .4 Les résultats de dureté du traitement thermique :

Chaque échantillon est placé sur le support , la charge appliquée est égale à **1Kg** pour chaque échantillon. **03** empreintes sont réalisées donnant ainsi **03** mesures de la dureté vickers ou HRC . La moyenne et l'écart -type ont été calculés pour chaque échantillon. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau.

Nous remarquons une augmentation de la dureté comme suit :

Tableau IV. 1: Les résultats d'essai de dureté HRC

Traitements	l'état brute	(trempe) traité à T=1030 °C	Revenu 1) traité à T= 500 °C	(Revenu 2) traité à T= 550°C
Dureté HRC Moyenne	35 ,49	36 ,02	36 ,46

Tableau IV . 2 : Les résultats d'essai de dureté HV

Traitements	l'état brute	(trempe) traité à T=1030 °C	(Revenu 1) traité à T= 500 °C	(Revenu 2) traité à T= 550°C
Dureté HV Moyenne	199.23	332.51	391.46	400.05

Les deux tableaux (tableau IV .1 et tableau IV.2) représentent les duretés de chaque échantillon (l'état brute , la trempe et le revenu 1 et 2)

Par comparaison, les valeurs mesurées de la dureté de l'échantillon à l'état brut est inférieur à la valeur d'échantillon traité à 1030 °C , c'est l'effet de la trempe il ya une transformation d'une phase ferrite et la perlite en bainite .

Nous avons suivi la variation de la dureté de notre acier préalablement trempé puis revenu à différentes températures.

Nous constatons bien que le tableau de dureté évolue d'une manière qui confirme les différents résultats déjà obtenus dans ce type d'acier.

Nous remarquons une augmentation minime de la dureté après le revenu 1 .

Dans le revenu **1** : le augmentation de la dureté par rapport à la trempe peut être dû à une formation précipité .

Dans le revenu **2** : malgré qu' il y avait un grossissement des grains ,la dureté est augmentée parce que probablement il y a eu un durcissement par précipitation .

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude d'un acier à outil de travail à chaud industriel dont la composition chimique d'aciers Z40CrMoV5. Ces aciers trouvent leurs applications dans différents domaines tels que le moulage sous pression, l'extrusion à chaud, le matriçage et le moulage de plastique. À cause des conditions de mise en service très sévères, ils sont appelés à remplir des critères assez rigoureux concernant leur propriétés d'emploi: dureté, résistance à l'usure, ténacité et stabilité dimensionnelle dans le but d'assurer à l'outil une bonne performance et une durée de vie acceptable. Par conséquent, des éléments d'alliage appropriés combinés avec des paramètres optimaux de traitement sont impératifs pour leurs propriétés finales. Celles-ci sont en étroite dépendance avec les microstructures obtenues, la distribution adéquate de phases formées. C'est dans cette optique que notre étude trouve sa signification par des traitements thermiques.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Après austénitisation à 1030 ° C pendant 1h 35 min et une trempe à l'huile à température ambiante, la transformation de la microstructure en une trempe bainitique et la microstructure dominante est la bainite .

-les deux revenu (revenu 1 A 500°C et revenu 2 A 550 °C) appliqués sur des échantillons Après trempe à l'huile n'ont pas affecté la microstructure de cette Acier (Z40) .

-la microstructure des échantillons de (Z40) trempé n'était pas affecté par les deux Traitements de revenus .

-la dureté :

Les valeurs mesurées de la dureté de l'échantillon à l'état brut est inférieur à la valeur d'échantillon traité à 1030 °C , c'est l'effet de la trempe.

L'augmentation légère de la dureté après des traitements de revenu peut être expliquer par une formation de précipité où il y avait un durcissement, probablement, par précipitation.

Références Bibliographique

- [1] : Y. BARKAT ; « Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines » ; Mémoire de Master ; Université De Mouhamed Kheider ; 2016.
- [2] : M. KADDOURI ; « Les effets des traitements thermiques sur les aciers de Construction des pipelines de pétrole (API5L- X60) » ; Mémoire de Master ; Université De Mouhamed Kheider ; 2017.
- [3] : H.LITEM, « caractérisation avec rayonnement X des Revêtements Dures Sur des Substrats en Acier », Mémoire de Master, Spécialité : Rayonnement, Spectroscopie et Optoélectronique, Univ Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [4] : Fédération Française de l'Acier ; juillet 2012.
- [5] : G. MURRY, « Transformations dans les aciers, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M1115 », Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
- [6] : <https://www.technologuepro.com/cours-materiaux-metalliques/chapitre-3-etude-dudiagramme-fer-carbone.pdf>.
- [7] : G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2^e édition Métaux • Alliages • Propriétés, Dunod », Paris, 2004, 2010.
- [8] : K. SAADI ; « L'étude de l'effet thermique sur une soudure d'un pipeline » ; mémoire de master ; unive de biskra;2012.
- [9]..... Technique d'ingénieur, M300, 2011
- [10] : <https://fr.scribd.com/document/243951940/Acier-annexes1-pdf>.
- [11] : H. GAYE et P.-V .RIBOUD ; « Modèle d'optimisation physico-chimique et économique de l'enfournement en aciérie » ; Rev. De Métall . p. 131-136, CIT février 1982.
- [12] : M. Dupeux, « Aide-mémoire science des matériaux », DUNOD, Paris 2004
- [13] : G. Murry, « Aciers Généralités, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M300 », Centre français d'exploitation 2002.
- [14] : <http://docs-avms.com/FICHES/20%20-%20Acier.pdf>.
- [15] : H. MAROUF ; « caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la Liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/Acier anti-usureNAXTRA70 utilisé par L'unité Grue de

Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation ».

[16] : A. BOUDIAF, « Relation microstructure-comportement macroscopique dans les aciers : Effet de la taille de grain austénitique sur la plasticité de transformation », Thèse Doctorat,

Specialite Mecanique des Matériaux, Ecole Militaire Polytechnique et Institut National des

[17] : D. TOUALBIA ; « cours de sciences des matériaux » ; Univ Souk Ahras ; (fichier PDF) pp45.

[18] : N. GUELAI, F. BOUTERFIF ; « Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation » ; Mémoire de MASTER ; 2015/2016.

[19] : K. ZOUAOUID ; « Analyse avec Spectroscopie d'électron Auger de la réaction entre des couches minces en Chrome et des substrats en Acier » ; Mémoire de MASTER ACADEMIQUE ; Univ KASDI MERBAH OUARGLA ; 2011-2012.

[20] : [http : //ptetoile.free.fr/](http://ptetoile.free.fr/) Traitements thermiques des aciers.

[21] : A. ARFAOUI, A. CHAKER ; Matériaux métalliques isetkasserine ; Année 2009/2010.

[22] : D. TOUALBIA, Cours De Sciences Des Matériaux, Destiné Aux Étudiants De La Deuxième Année Licence Sciences Et Technique, Option Génie Mécanique, Univ Mohamed Cherif Massaada Souk Ahras.

[23] : « soudage des canalisation et installation conneses, segment canalisation Norme API 1104 », de uxième édition, septembre 1999.

[24] : Z. MOUSSA, « influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudures, cas des soudures épaisses », thèse de doctorat, univ mentouri, constantine, 200

[25] : I. LAKHTINE, « Métallographie et traitements thermiques des métaux » ; édition Mir Moscou, 1978.

[26] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_temps-temp%C3%A9rature-transformation

[27] : N. AKILAL ; « Étude de la corrosion de la soudure de l'acier A33 utilisé en construction navale » ;

diplôme de MAGISTER ; Univ Abderrahmane Mira de Béjaïa.

[28] : F. BOUNAB ; « Evolutions microstructurales Lors des traitements thermiques imposés à un acier

faiblement allié (53MnSi4) » ; Mémoire de Master ; Univ De Mouhamed Kheider ; Biskra, 2012-2013

