

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Génie Métallurgie

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

**Comportement structurale et mécanique lors
de la trempe de l'acier 40CrMoV5**

Présenté par :

Belerhmi Sofiane

Proposé et dirigé par :

Dr. Fatima LAMMADI

Promotion : Juin 2019

REMERCIEMENTS

D'abord nous remercions DIEU de nous avoir venu en aide pour que nous puissions aboutir à la réussite.

*Tous le respect et les mots de remercies à notre encadreur **Dr Fatima Zohra LEMMADI** pour ses aides, ses conseils directifs, et son suivi durant la réalisation de cette étude.*

*Nous remercions vivement le président de jury **Dr Salim Messaoudi** Et l'examineur **Dr Moussa Athmani** qui ont bien accepté de juger notre travail.*

Nous remercions aussi tous les responsables les personnels de notre département de Génie Mécanique, tous Les participants à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Merci

LISTES DES FIGURES

Figure (I.1) :	généralités sur les aciers.....	4
Figure (I.2) :	Diagramme Fe-C.....	7
Figure (I.3) :	Structure ferritique.....	9
Figure (I.4) :	Structure austénitique (avec précipités de carbures).....	9
Figure (I.5) :	Structure perlitique.....	10
Figure (I.6) :	Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition.....	11
Figure (I.7) :	Cycle thermique du recuit.....	12
Figure (I.8) :	l'état de structure d'un acier avant et après homogénéisation.....	13
Figure (I.9) :	Cycles thermiques des différents recuits.....	14
Figure (I.10) :	Microstructure de Le Recuit.....	14
Figure (I.11) :	Cycle de traitement thermique des aciers à outils.....	15
Figure (I.12) :	Différentes structures d'un acier H11 après trempe et revenu	16
Figure (II.1) :	Four de Traitement Thermique Nabertherm.....	20
Figure (II.2) :	polisseuse de type PHOENIX.....	21
Figure (II.3) :	papiers abrasifs.....	21
Figure (II.4) :	Microscope optique de type Olympus.....	22
Figure (II.5) :	Essai de dureté Vickers.....	23
Figure (II.6) :	Micro duromètre de type ZWICK.....	23
Figure (II.7) :	Schéma de la loi de Bragg.....	24
Figure (II.8) :	Schéma du principe de diffraction.....	25
Figure (II.9) :	Le diffractomètre de rayons X de type * BRUKER - AXS type D8*.....	25
Figure (III.1) :	La morphologie de l'acier 40CrMOV5 à l'état brut.....	27
Figure (III.2) :	Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe (Homogénéisé à 900°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée.....	28
Figure (III.3) :	Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe (Homogénéisé à 950°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée.....	29

Figure (III.4) :	Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe (Homogénéisé à 1000°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée.....	30
Figure (III.5) :	Spectre de diffraction des rayons X de l'acier à l'état brut.....	31
Figure (III.6) :	Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 900°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents.....	32
Figure (III.7) :	Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 950°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents.....	33
Figure (III.8) :	Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 1000°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents.....	34
Figure (III.9) :	la variation de la dureté en fonction de température d'austénitisation.....	35
Figure (III.10)	Évolution de la micro dureté en fonction de milieu de trempe.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1) :	Composition chimique de l'acier 40CrMoV5 en % massique	17
Tableau (II.1) :	La profondeur de traitement obtenue pour différentes durées de traitement.....	18
Tableau (II.2)	Composition chimique L'acier X40CrMoV5 (en pourcentage massique%).	20

LISTE DES ABREVIATIONS

C : carbone

Si : silicium

Mn : manganèse

P : phosphore

Cr : chrome

Mo : molybdène

V : vanadium

Nitale : une solution composée de 96 % d'éthanol et 4 % d'acide nitrique

Hv : La dureté Vickers (HV) dont

$$Hv = 1.854 \times \frac{F}{D^2}$$

F: charge appliquée.

D: longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

λ : La longueur d'onde du faisceau diffracté.

d_{hkl} : est la distance entre les plans cristallins parallèles.

θ : L'angle d'incidence du faisceau des rayons X.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralités sur les aciers.....	4
I.2.1 Les aciers peuvent être classifiés selon.....	5
I.2.2 Acier faiblement alliés.....	5
I.2.3 Aciers fortement alliés.....	6
I.3 Diagrammes fer-carbone.....	6
I.4 Éléments alpha-gènes et gamma-gènes.....	10
I.4.1 Recuit.....	12
I.4.2 Trempe.....	15
I.4.3 Le revenu.....	16
I.5 Acier pour travailler à chaud 40CrMoV5.....	17
I.5.1 Utilisations.....	17
I.5.2 PROCESSUS.....	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre II : Technique d'étude et conditions expérimentales.....	19
II.1 Introduction.....	20
II.2 Alliage étudiés.....	20
II.3. Traitement thermiques.....	20
II.4 Préparation des échantillons.....	21
II.5. Méthodes expérimentales utilisées :.....	22
II.5.1 Microscope optique :.....	22
II.5.2 La micro-dureté.....	22
II.5.3 Diffraction des rayons X :.....	24
Chapitre III : Résultats et discussion.....	26
III.1 Introduction :.....	27
III.2 Métallographie.....	27

III.2. Etude par diffraction de rayon X.....	31
III.3 La microdureté:	34
Conclusion générale.....	38
Références bibliographiques	38

Introduction générale

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.

L'objectif de ce travail consiste à optimiser la composition et la structure d'un acier devant être mis en forme par un procédé de trempe. L'acier doit présenter des caractéristiques mécaniques élevées après traitement de trempe

De ce fait, le choix des structures martensitiques revenues s'est naturellement imposé pour les applications souhaitées. Les propriétés mécaniques de ces structures sont très largement conditionnées par la précipitation se produisant aux différentes étapes de la trempe. Ainsi, la composition chimique, la taille et la répartition des précipités sont autant de paramètres essentiels pour la caractérisation de ces états. C'est pourquoi, l'optimisation de la composition nécessite essentiellement de comprendre le rôle des divers éléments d'alliages au cours des transformations de phases.

Pour réaliser cette étude nous avons utilisé essentiellement la microscopie optique, la diffraction des rayons X, et la Microdureté.

En plus de cette introduction et d'une conclusion générale ou on résumé l'essentiel des résultats obtenus, la mémoire comprend trois chapitres :

Le premier chapitre : est consacré pour des généralités sur les aciers.

Le deuxième chapitre : contient les méthodes de préparation métallographiques et les moyens de caractérisation

Le troisième chapitre : fait l'objet des résultats obtenus et à leurs interprétations.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Depuis longtemps, l'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Donc la connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation reste impérative.

I.2 Généralités sur les aciers

La production d'alliages à base de fer, c'est-à-dire ceux dont le fer est le principale constituant, est supérieure à celle de tous les autres types de métal.

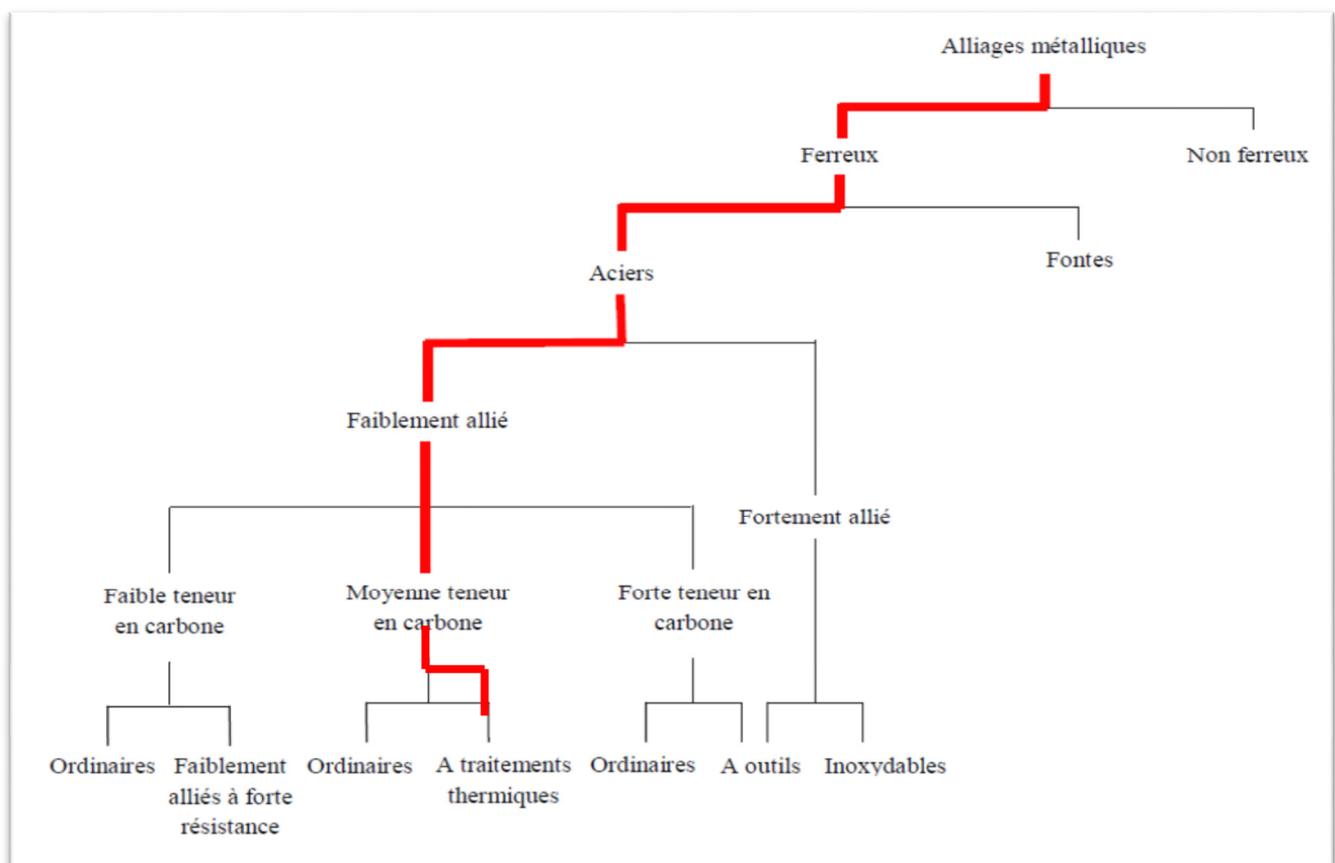


Figure (I.1) : généralités sur les aciers

Les aciers sont des alliages fer-carbone contenant moins de 2 % de carbone qui comportent aussi une concentration appréciable d'autres éléments. Il existe des milliers d'alliages de ce type dont la composition est différente, de même que les traitements qu'ils ont subis. Les propriétés mécaniques dépendent de la teneur en carbone, laquelle est normalement inférieure à 1%.

On classe quelques-uns des aciers les plus courants selon leur concentration en carbone, à savoir les aciers à faible teneur en carbone. Chaque groupe se subdivise en sous-groupes selon

la concentration des autres éléments d'alliage. Les aciers au carbone ordinaires ne contiennent que des concentrations résiduelles en impuretés autres que le carbone et un peu de manganèse. Quant aux aciers alliés, on leur ajoute davantage d'éléments d'alliage en concentration précises[1].

I.2.1 Les aciers peuvent être classifiés selon

- La composition, telle que le carbone, faiblement allié, ou les aciers inoxydables... ;
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique.
- La méthode de finition, telle que le laminage à chaud ou laminage à froid
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ou la forme structurale.
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé
- La microstructure, telle que de ferrite, perlitique, et martensitique.....
- Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique.
- Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM

Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement et sera soulignée comme suit [2]

I.2.2 Acier faiblement alliés

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,)[3].

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, tempe, 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 ferrés 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)[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 résistant 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[4].

I.2.3 Aciers fortement alliés

Pour ces aciers, un élément au moins atteint une teneur de 5%, parmi ces aciers on trouve les aciers rapides pour la confection des outils de coupe et les aciers inoxydables[5].

I.3 Diagrammes fer carbone

Les aciers micro alliés à basse teneur en carbone présentent en quasi-équilibre les mêmes types de transformations allotropiques à partir de l'austénite que le fer pur. En effet, le fer est un élément qui possède plusieurs formes allotropiques, c'est-à-dire que selon les conditions en température et en pression, différentes structures cristallines sont observées. Ainsi à la pression atmosphérique. (Figure I.1)

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présence section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles[1].

➤ Entre 1538°C et 1394°C d'une part et 912°C et -273°C d'autre part, la structure cristalline du fer pur est cubique centrée (CC), cette structure n'est pas compacte, et la forme cristalline du fer est dite fer α et fer γ respectivement. Dans les aciers, la phase associée est nommée ferrite.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

➤ Entre 1394°C et 912°C, la structure cristalline du fer pur est cubique à faces centrées (CFC), cette structure est compacte et cette forme est dite fer γ . La phase associée est nommée austénite dans les aciers. De plus, l'évolution des paramètres de maille lors des transformations allotropiques engendrent des modifications du volume spécifique du fer.

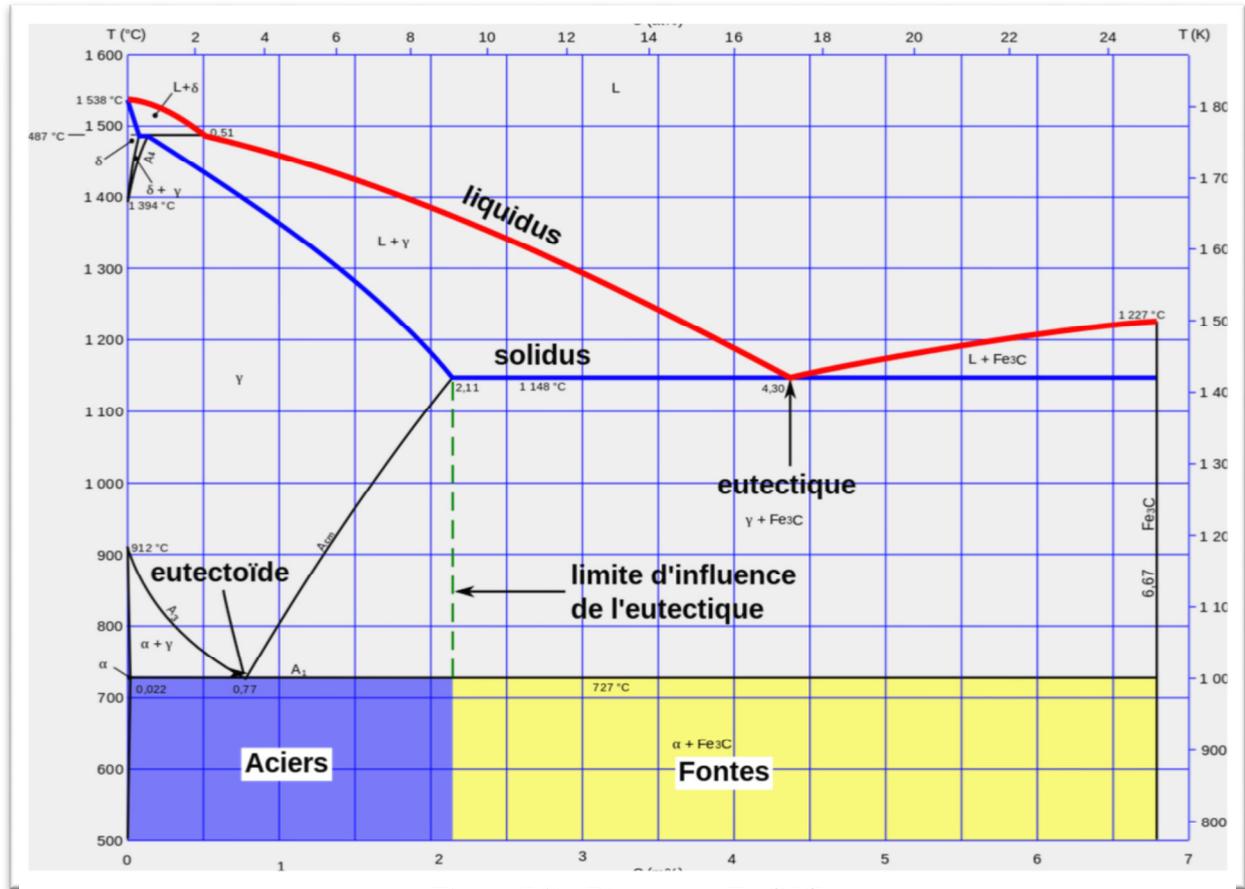


Figure (I.2) : Diagramme Fe-C [6]

• La ferrite:

Région marquée A, contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue.

Tous les aciers et fontes contiennent de la ferrite. Cette phase comporte la même quantité de carbone, quelle que soit la teneur en carbone de l'acier ou de la fonte. La ferrite se forme seule dans les régions A et E. elle se forme conjointement à de la cémentite E, F et G.

La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de

727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace [7].

• L'austénite:

L'austénite région C'est la dernière zone importante sur le diagramme fer-carbone. Cette phase est stable au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F). L'austénite peut contenir 1.86% de carbone. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est une région importante pour le traitement thermique des aciers. C'est une structure cubique faces centrées, qui est différente de la structure cubique centrée de la ferrite. L'austénite est également appelée fer gamma [7].

• La cémentite:

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe₃C. Elle contient 6.69% de carbone. A cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la figure 1.1. Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer.

Quel que soit l'endroit où la cémentite est présente dans le diagramme fer-carbone, elle contient toujours 6.69% de carbone. Dans la région K, entre les températures 1152°C (2106°F) et 727°C (1341°F), la cémentite est mélangée à de l'austénite. En dessous de 727°C (1341°F) on peut trouver de la cémentite seule (dans les régions F et G), ou combinée à de la ferrite sous forme de perlite (régions E, F, et G). Par conséquent, la cémentite se forme dans tous les aciers et fontes [7].

• La perlite:

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure 1.5. la perlite pure (ligne B) se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone, on trouve de perlite et de la ferrite, comme dans la région E. pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (régions F et G) [7].

• Le point eutectoïde:

Le point eutectoïde D, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme.

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers

hypoeutectoïdes (région E). La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes (région F). La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite [7].

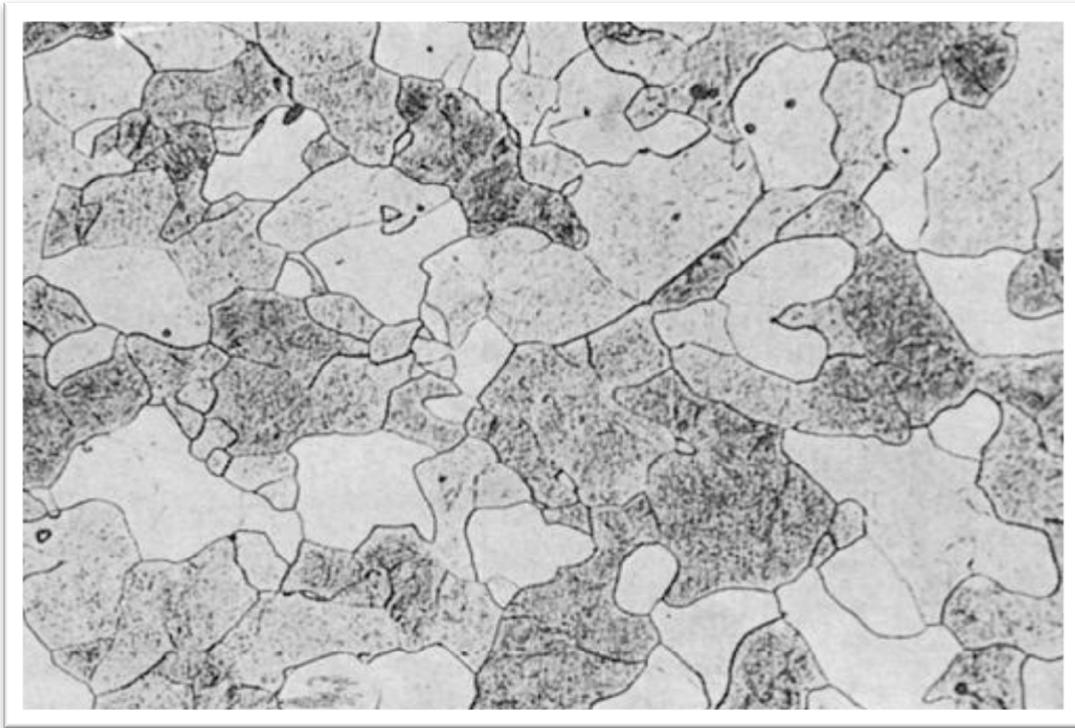


Figure (I.3) : Structure ferritique (Fer Armco, Traitement : 950 °C (30 min) – four, Attaque Nital (3 %), Grossissement : 180 μm [7].

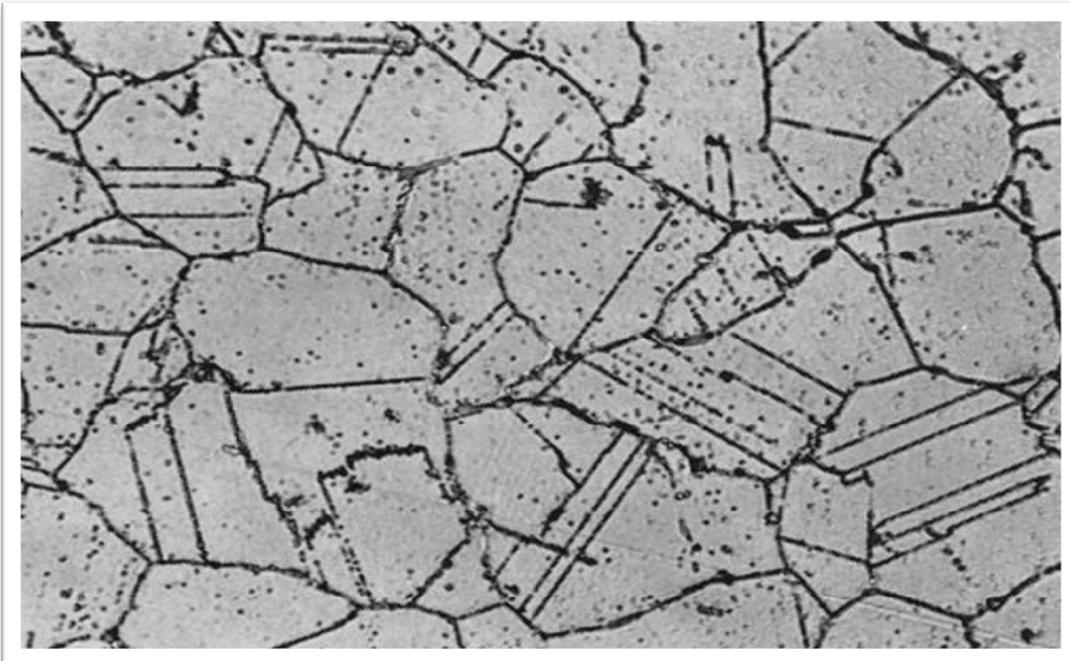


Figure (I.4) : Structure austénitique (avec précipités de carbures)

Acier à 0,12 % C - 25 % Cr - 20 % Ni - 1,5 % Mn - 1,5 % Si Traitement : 1 125 °C (1 h) - eau - 800 °C (30 min). Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement 180 μm [7].

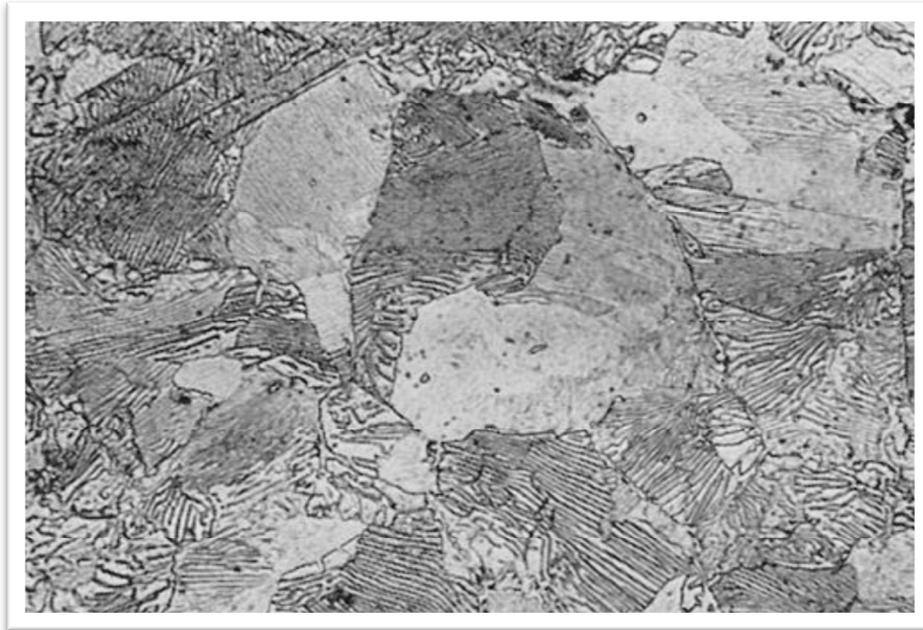


Figure (I.5): Structure perlitique

Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four
Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900 [8]

I.4 Éléments alphagènes et gammagènes

Le fer métallique existe sous deux formes cristallines :

1. La variété cubique centrée, stable au-dessous de 910°C (fer α) et au-dessus de 1400°C (fer δ). Les solutions solides dans le fer α sont appelées ferrites.
2. La variété cubique à face centrée, stable entre 910°C et 1400°C (fer γ). Les solutions solides dans le fer γ sont appelées austénites.

Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'addition (Figure 1.1). Dans le fer pur, le passage de fer α au fer γ se produit à une température définie. La présence d'un élément d'addition entraîne l'apparition d'un domaine plus au moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre.

Les diagrammes permettent de classer les éléments d'addition en deux types : [9]

1. Les éléments gammagènes qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer γ et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite) ; ce sont essentiellement le nickel et le manganèse auxquels on peut ajouter le cuivre (peu utilisé comme élément d'alliage),
2. Les éléments alphagènes qui relèvent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer α et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite) ;

ce sont les plus nombreux des éléments d'alliage tels chrome, silicium, molybdène, vanadium, tungstène, titane. [10]

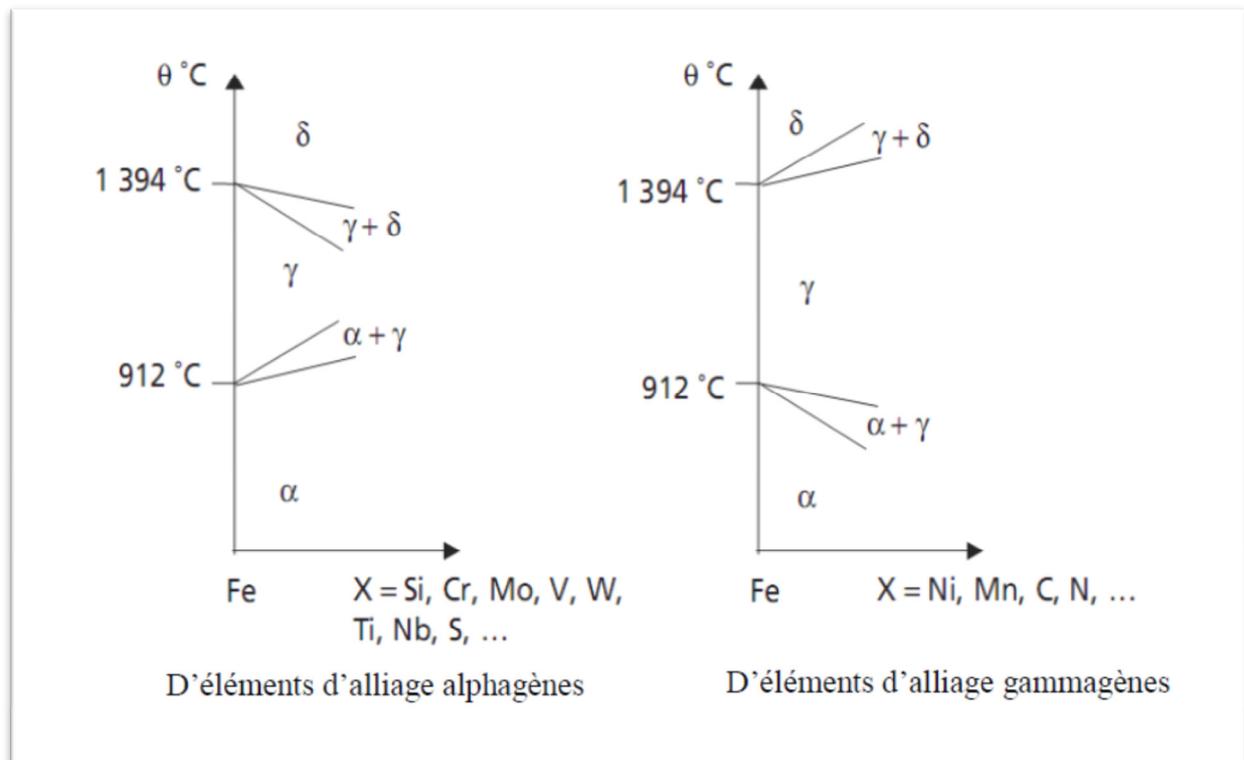


Figure (I.6) : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition [2]

I.5 Traitement thermique des aciers

En général, les nuances standardisées d'aciers telsqu'AISI H11 et H13 sont les plus utilisées. Cela est confirmé par l'existence d'une large littérature, comprenant les différents aspects tels que la composition chimique, la durée de vie et la ténacité de la surface des pièces, utilisant des traitements thermiques classiques [11, 12]. Ces traitements thermiques "classiques" sont réalisés afin d'obtenir une microstructure martensitique ayant une dureté maximale conférant au matériau une appréciable résistance à l'usure [13].

Les principaux objectifs poursuivis peuvent être décrits comme suit :

- Provoquer la formation de microstructures favorables, par exemple à l'usinage ou à la mise en forme par déformation à froid. Les principaux traitements de ce type sont le traitement d'adoucissement et le revenu.

- Eliminer ou réduire les contraintes internes propres ou modifier leur répartition, par modification de la microstructure. Le revenu de détente en est l'exemple le plus courant.
- Provoquer le rétablissement des propriétés physiques ou mécaniques de l'acier écroui sans modifier la structure par un traitement de restauration.
- Atténuer les hétérogénéités de composition chimique par un recuit d'homogénéisation[14].

I.4.1 Recuit

- **Principe**

Au cours de son histoire, un acier peut se trouver dans des états hors équilibre provoqués par des traitements thermiques ou mécaniques antérieurs (ségrégation au cours du processus de solidification, écrouissage par déformation à froid, contraintes de soudage, etc.). Un certain nombre de traitements thermiques sont adaptés à la réduction, voire à l'élimination des effets néfastes de tels états, en vue d'opérations ultérieures du matériau ou de son utilisation appropriée de mise en service. Parmi ces traitements, les recuits forment un ensemble visant l'obtention d'états proches de l'équilibre stable. Le cycle thermique de traitement comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de traitement dépendant du type de "correction" à réaliser ;
- Un maintien isotherme à la température de traitement ;
- Un refroidissement à l'air calme ou au four selon les besoins [14].

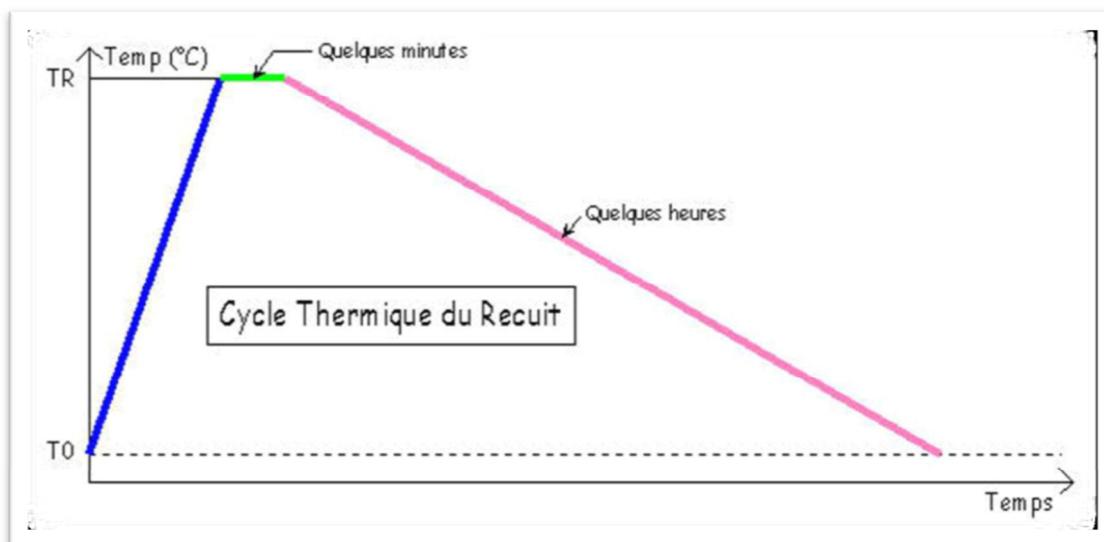


Figure (I.7): Cycle thermique du recuit [5]

1.3.1.b) Les types de recuits

- **Recuit d'homogénéisation**

Aussi appelé recuit de diffusion il est surtout effectué sur des aciers bruts de coulée ou sur des aciers moulés aux dimensions importantes pour supprimer l'hétérogénéité chimique. La pièce est portée à une température aussi élevée que possible sans atteindre le solidus réel.

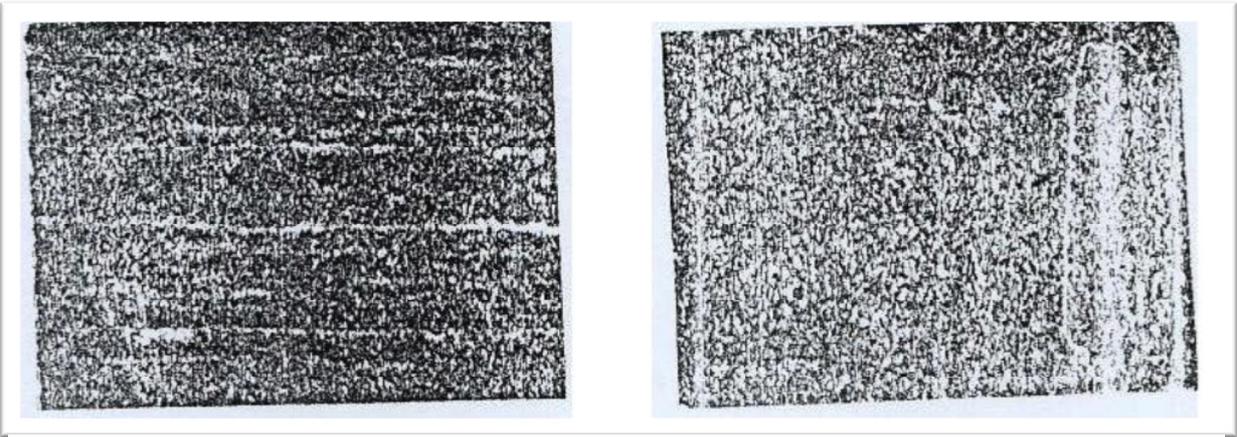


Figure (I.8) : Les figures présentent l'état de structure d'un acier avant et après homogénéisation

Pratiquement, la température est de l'ordre de $AC3 + 200^{\circ}C$ La durée de ce traitement est de plusieurs heures. Le métal qui a été surchauffé et suivi d'un recuit de régénération.

- **Recuit de normalisation**

C'est une variante du recuit de régénération qui s'applique aux pièces brutes de forgeage ou de laminage. Il s'effectue dans les mêmes conditions de chauffe ; la pièce est ensuite refroidie à l'air calme.

- **Recuit de détente ou de stabilisation**

Il est effectué sur des pièces après moulage ou soudage pour éliminer les tensions internes avant l'usinage. La pièce est chauffée vers $600^{\circ}C$ pendant environ une heure puis refroidie à l'air libre.

- **Recuit de recristallisation ou de restauration**

Il est effectué sur des pièces écrouies à une température de l'ordre de $600^{\circ}C$. L'écrouissage provoque une grande augmentation de la fragilité et dans certains cas, il est impossible de continuer le travail de l'acier (tréfilage par exemple)[5].

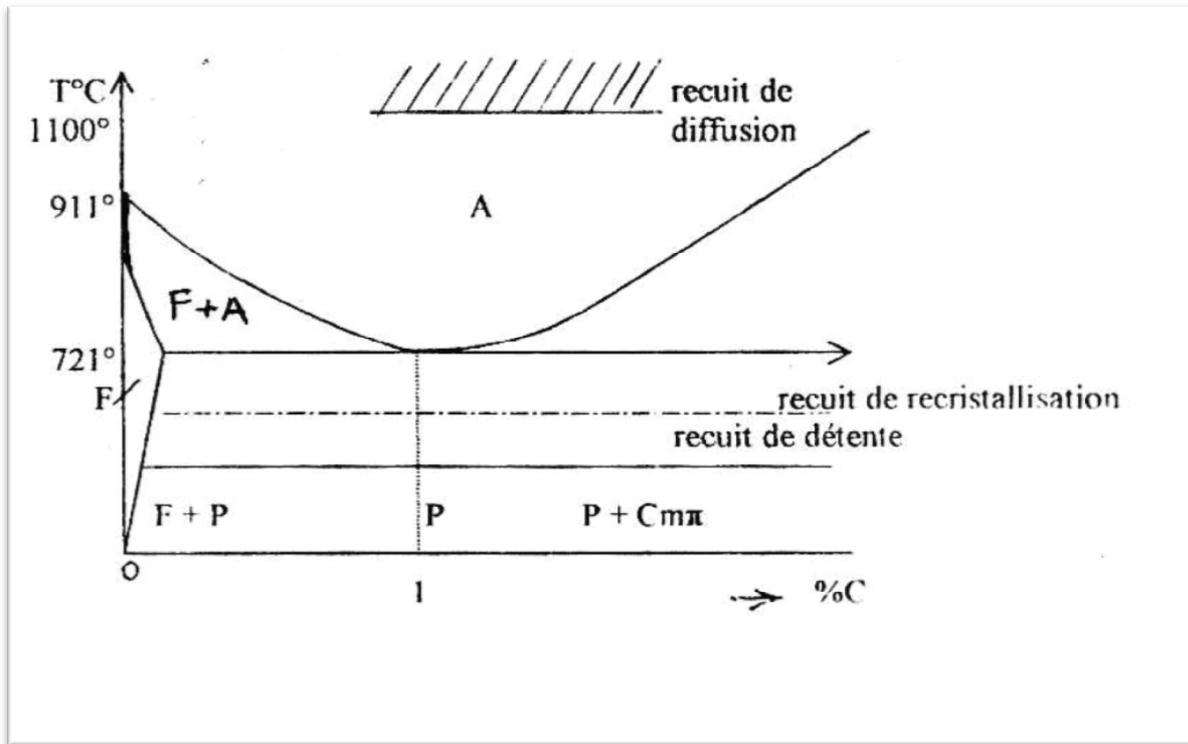


Figure (I.9): Cycles thermiques des différents recuits [5]

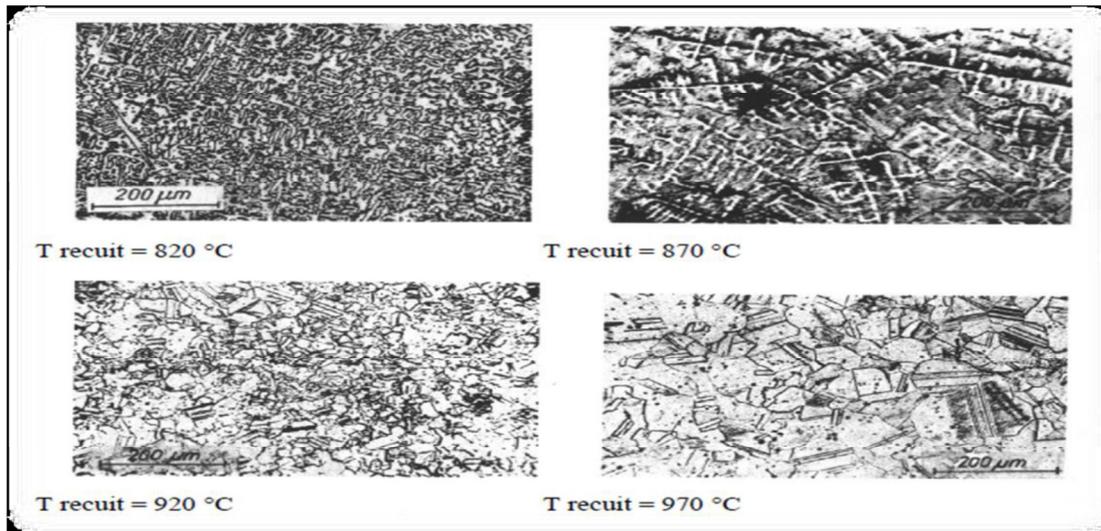
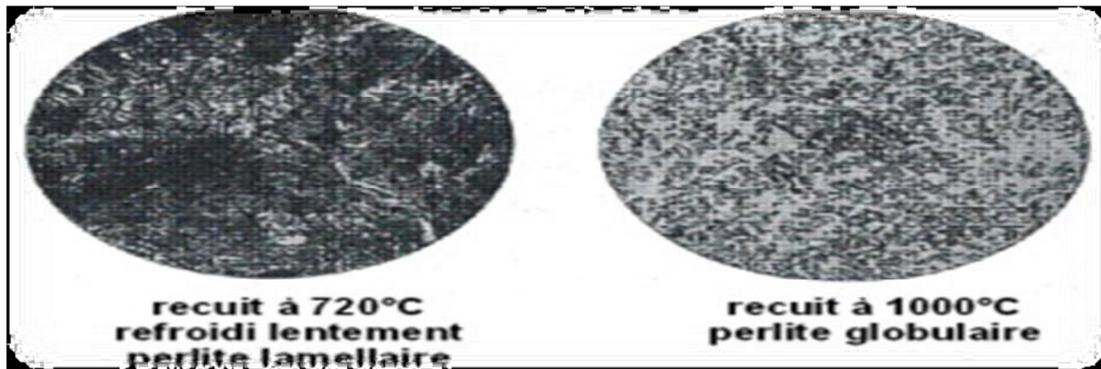


Figure (I.10): Microstructure de Le Recuit [5]

I.4.2 Trempe

- **Principe**

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 durée maximale [15].

➤ **Les types de trempe**

- **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 [15].

- **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 [15].

- **Trempe d'aciers austénitiques 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 [15].

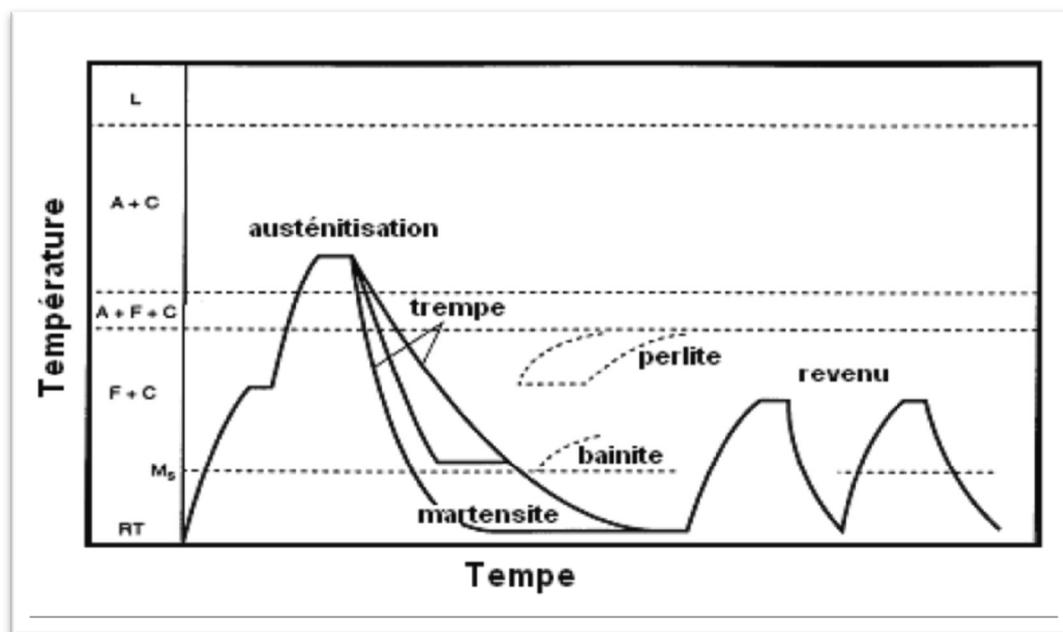


Figure (I.11) : Cycle de traitement thermique des aciers à outils [16]

I.4.3 Le revenu

Le revenu est un traitement thermique auquel est soumis l'acier après durcissement par trempe pour amener ses propriétés au niveau souhaité. Il comporte un ou plusieurs chauffages à des températures déterminées ($<A_1$) avec maintien à ces températures, suivi de refroidissements appropriés. Le revenu peut engendrer une baisse de dureté ou au contraire une augmentation de celle-ci lorsqu'intervient le "*durcissement secondaire*".

Le revenu est généralement effectué à une température comprise entre 500 °C et A_1 pour provoquer la précipitation complète du carbone sous forme de carbures stables à haute température. Il permet d'obtenir une amélioration importante de la ductilité et de la ténacité alors que des diminutions de la dureté, de la résistance à la traction et de la limite élastique peuvent être observées. Toutefois, il peut y avoir une augmentation de la dureté s'il y a "*durcissement secondaire*", lequel est défini comme étant le durcissement de l'acier obtenu à la suite d'un traitement de revenu réalisé après durcissement par trempe. Ce durcissement est dû à la précipitation d'un composé ou à la formation de martensite ou de bénite à partir de l'austénite résiduelle décomposée au cours du revenu, ou déstabilisée pendant celle-ci, puis

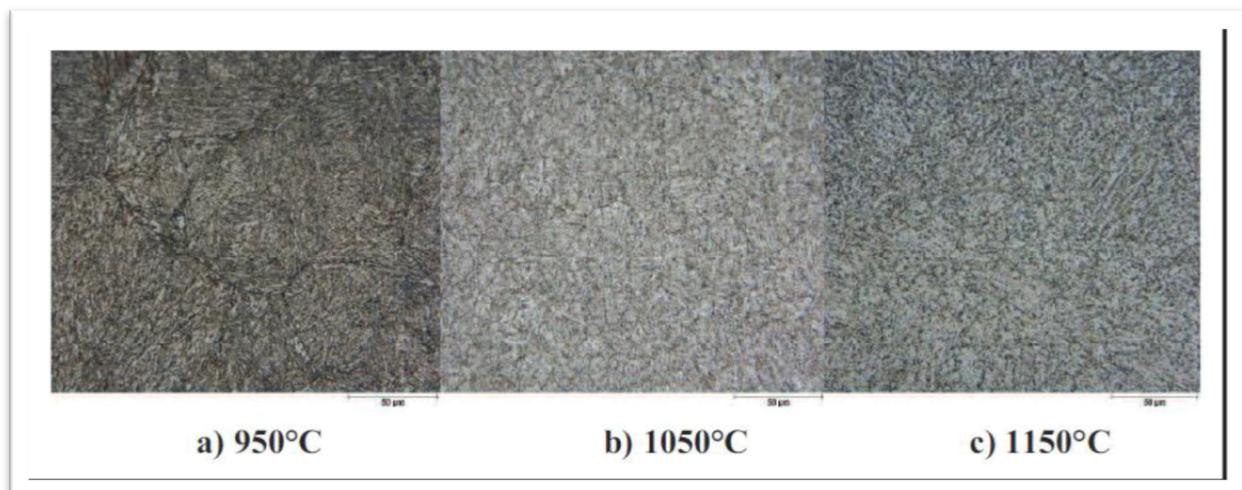


Figure (I.12) : Différentes structures d'un acier H11 après trempe et revenu Grossissement 50µm.

transformée pendant le refroidissement [17].

En général, les aciers à outils subissent un double revenu pour convertir l'austénite résiduelle en martensite et d'autres phases plus stables. Après la trempe, le premier revenu relaxe les contraintes résiduelles brutes de trempe et permet d'obtenir une martensite revenue et la précipitation de carbures secondaires.

I.5 Acier pour travailler à chaud 40CrMoV5

I.5.1 Utilisations

Dans cette étude, un seul matériau de base a été utilisé, à savoir les aciers à outils à chaud 40CrMoV5. Que les aciers alliés ont été examinés dans l'état où ils ont été reçus avec trempe et revenu.

L'acier 40CrMoV5 (acier AISI H13) est principalement utilisé dans la production de moules pour les procédés de moulage sous pression d'alliages d'aluminium et de magnésium.

La majorité des moules fabriqués pour les procédés de moulage sous pression d'alliages d'aluminium et de magnésium utilisent des aciers à outils à chaud (40 CrMoV5 et 40 CrMnNiMo 8 6 4)[18].

Tableau (I.1) : Composition chimique de l'acier 40CrMoV5 en % massique[20]

C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Mo
(max)	(max)	(min)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)
0,45	0,55	1,20	0,030	0,030	5.5	1,15	1.7

Chapitre II : Technique d'étude et conditions expérimentales

II.1 Introduction

Cette partie est consacrée aux techniques utilisées pour la caractérisation des microstructures, des propriétés thermodynamiques et mécaniques de l'acier X40CrMoV5.

II.2 Alliage étudiés

L'acier X40CrMoV5 utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques, est un acier faiblement allié sa composition chimique (en pourcentage massique) est la suivante:

Tableau (II.1) : composition chimique L'acier X40CrMoV5 (en pourcentage massique)

C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	V
0.35-0.42	0.80-1.20	0.25-0.50	0.030	0.020	4.8-5.5	1.20-1.50	0.85-1.15

II.3. Traitement thermiques

Le système acier X40CrMoV5 constitue une classe importante d'alliages industriels a caractéristiques mécaniques moyennes, qui sont obtenues par application d'untraitement thermique approprié, dit traitement de durcissement structural ce traitement a passe par les étapes suivantes :

- Mise en solution (homogénéisation), consiste en un chauffage à 3 températures différentes (900C°, 950C°, 1000C°) pendants 15 mn

Les températures sont choisies à partir du diagramme d'équilibre figure (I.2)

- Trempe dans différentes milieux (air, eau, eau glacée, huile)



Figure (II.1): Four de Traitement Thermique Nabertherm

II.4 Préparation des échantillons

Pour l'étude métallographique, l'observation en microscope optique nécessite une bonne préparation de la surface. Les échantillons traités ont subi un polissage mécanique et ensuite une attaque chimique.

- Le polissage mécanique est fait avec les papiers abrasifs suivants : 150, 200, 350, 600, 800, 1000, 1200. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés avec l'eau distillée. Ensuite, ils subissent un polissage fin en utilisant la pâte diamantée de granulométries $3\mu\text{m}$.
- L'échantillon est attaqué par un réactif d'attaque très utilisé pour les aciers étant le Nitale, une solution composée de 96 % d'éthanol et 4 % d'acide nitrique pour une durée d'attaque 3 secondes.



Figure (II.2) : polisseuse de type PHOENIX



Figure (II.3) : papiers abrasifs

II.5. Méthodes expérimentales utilisées :

II.5.1 Microscope optique :

Le microscope optique sert à déterminer ou à observer la microstructure de l'échantillon (taille des grains, forme des grains.....etc.). On a utilisé un microscope métallographique de type Olympus relié à un appareil photo numérique Figure (II.4). C'est un appareil optique qui permet l'agrandissement de l'image et par conséquent, l'observation des petits détails.



Figure (II.4) : Microscope optique de type Olympus

II.5.2 La micro-dureté

L'étude de la micro dureté a été faite à l'aide de l'essai Vicker's. La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge donnée durant 15 secondes.

Le pénétrateur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope. La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$Hv = 1.854 \times \frac{F}{D^2}$$

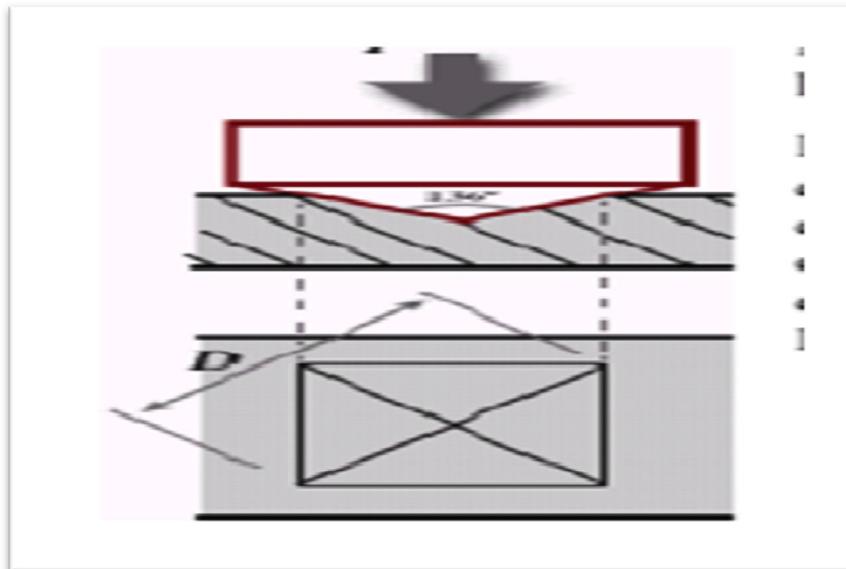


Figure (II.5) : Essai de dureté Vickers.

Dans notre cas nous avons utilisé un microduromètre du type **ZWICK**

F: charge appliquée.

D: longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode de Vickers et sous une charge de 500 g. Chaque mesure correspond à une moyenne de 5 points.

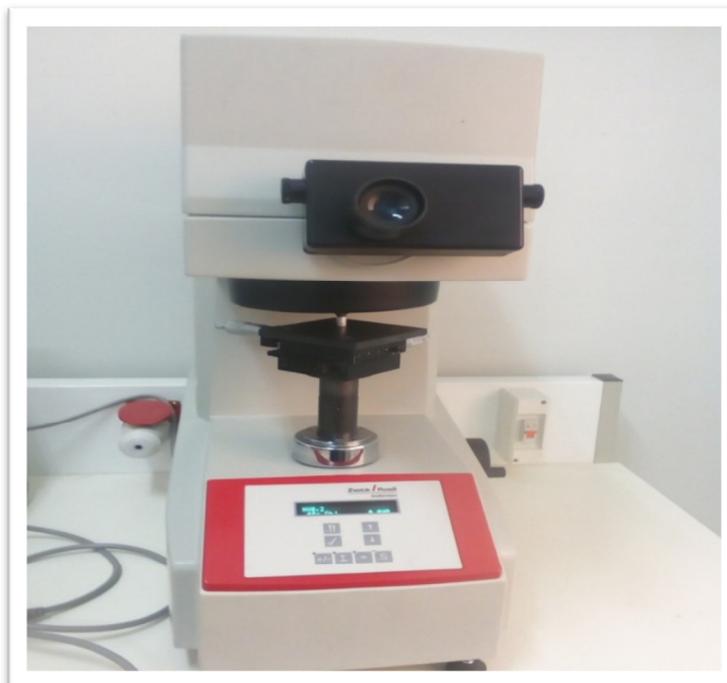


Figure (II.6) : Microduromètre de type ZWICK.

II.5.3 Diffraction des rayons X :

La diffraction des rayons X est l'une des méthodes les plus puissantes utilisées pour la caractérisation des matériaux. Elle permet, en particulier, l'identification des phases présentes dans le matériau ainsi que l'étude de la formation des différentes textures lors d'une déformation plastique ou un traitement thermique de recristallisation. L'identification est rendue possible par l'obtention d'un diagramme de diffraction des rayons X.

Un diagramme de diffraction des rayons X est caractéristique d'un matériau ou d'un composé donné. La position angulaire θ des raies de diffraction obéit à la relation de Bragg:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Dont : n : 1,2,...ordre de la diffracté.

λ : La longueur d'onde du faisceau diffracté.

d_{hkl} : est la distance entre les plans cristallins parallèles.

θ : L'angle d'incidence du faisceau des rayons X. Le schéma du principe de diffraction est présenté dans la figure (II.7 et II.8)

De la mesure des angles on en déduit ainsi les distances inter-réticulaires d_{hkl} qui permettent alors de déterminer qualitativement les phases en présence par comparaison des distances inter-réticulaires calculées avec celles stockées dans des bases de données (fichiers ASTM par exemple) si le composé est déjà connu et répertorié.

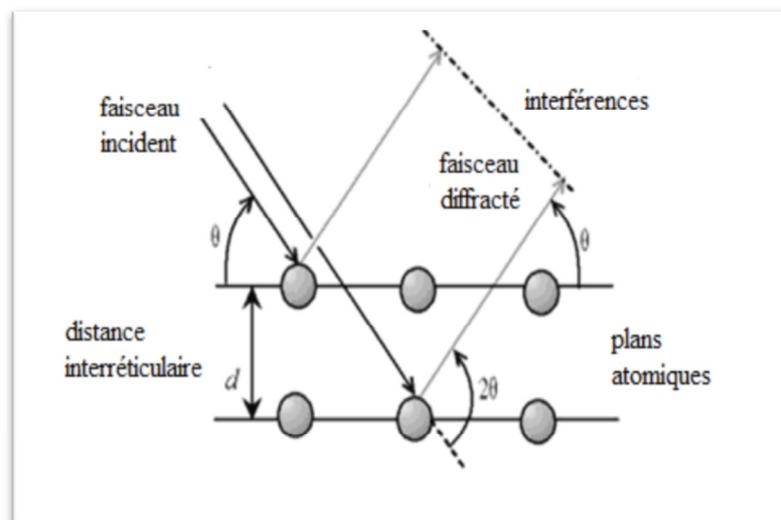


Figure (II.7) : Schéma de la loi de Bragg.

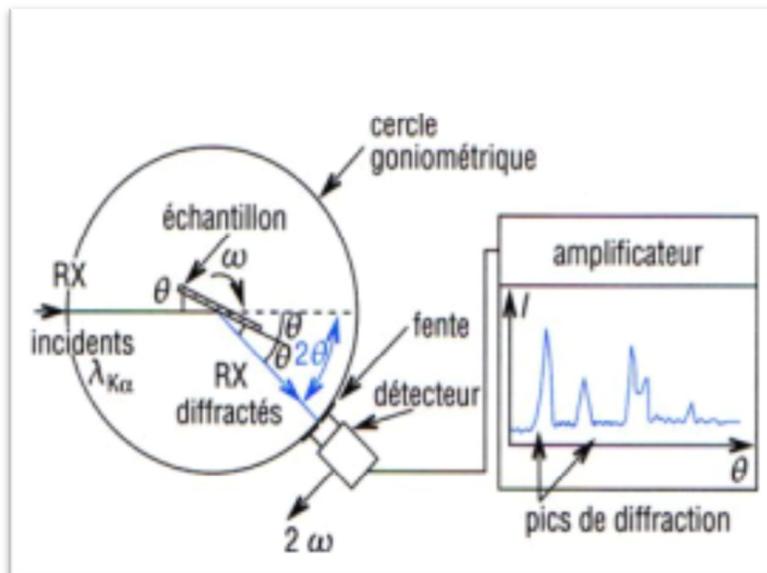


Figure (II.8) : Schéma du principe de diffraction.

Nous avons utilisé un diffractomètre* **BRUKER - AXS type D8***.une tension de 40kVet un courant de 20 mA(Fig. II.9).

Monté en géométrie à haute résolution. L'intervalle angulaire qu'il permet de mesurer étend de 10à 120° sur l'échelle 2θ.



Figure (II.9) : Le diffractomètre de rayons X de type * BRUKER - AXS type D8*

Résultats et Expérimentaux et Interprétation

III.1 Introduction :

Dans ce travail nous présenterons des résultats concernant l'influence des conditions de trempe lors des traitements thermiques sur les propriétés microstructurales et mécaniques de la nuance 45 CrMoV5. Dans cette partie d'étude, on expose en premier lieu les résultats obtenus sur l'acier à l'état brut et puis présentera les résultats de l'acier après la trempe.

III.2 Métallographie

1. la morphologie de l'acier à l'état brut

L'observation de la structure à l'état brut montre qu'elle est de type ferrito-perlitique (Figure III.1)

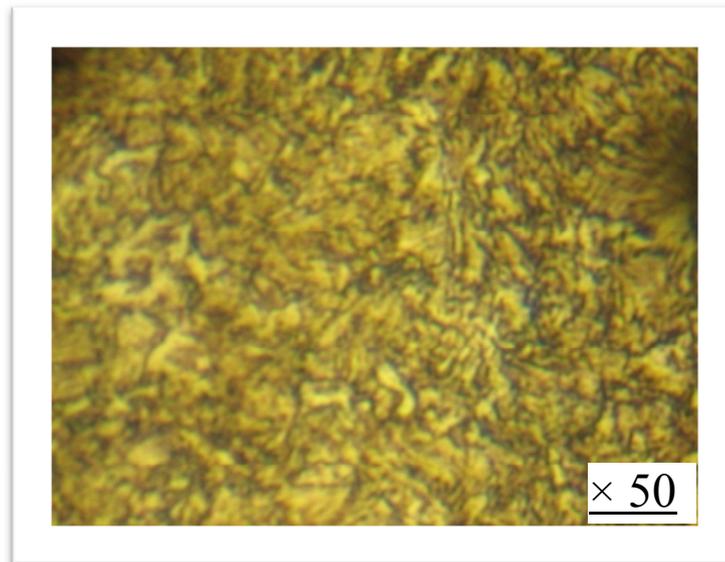


Figure III.1 La morphologie de l'acier 40CrMOV5 à l'état brut

Après avoir caractérisé le matériau à l'état brut nous avons procédé à une série de trempe dans des milieux différents (air, eau, eau glacée ; huile) pour chaque température (900 °C, 950 °C et 1000 °C).

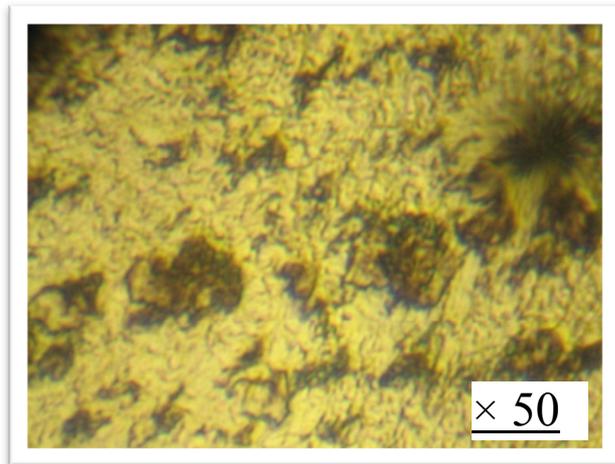
2. Résultats obtenus à T=900 °C :

La figure III.2 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à 900°C.

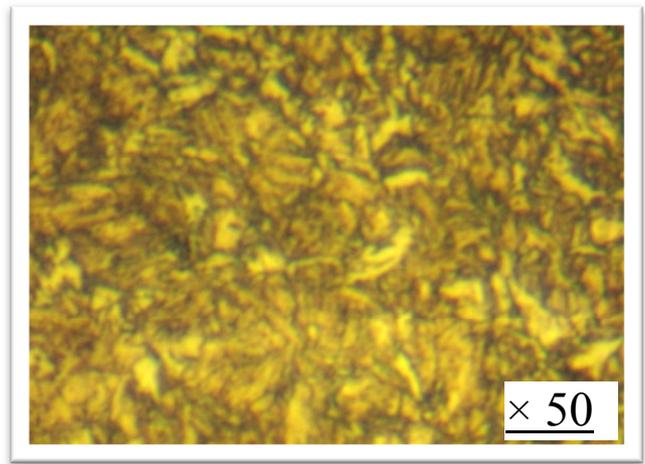
- Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible et l'austénite se transforme en ferrite et perlite (figure III.2.a)

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétation

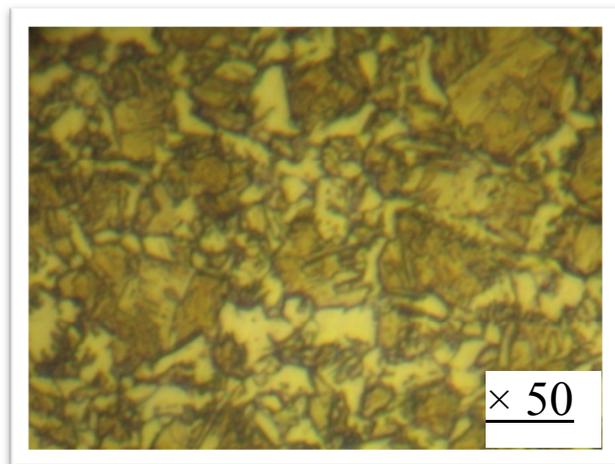
- Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne on observe la structure martensito-bainitique (figure III.2.b)
- Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide donc présence d'une structure martensite en lattes (figure III.2.c)
- Pour la trempe à l'eau glacé, la vitesse de refroidissement est rapide nous avons observé la présence d'une structure martensite avec des ferrite et perlite (figure III.2.d)



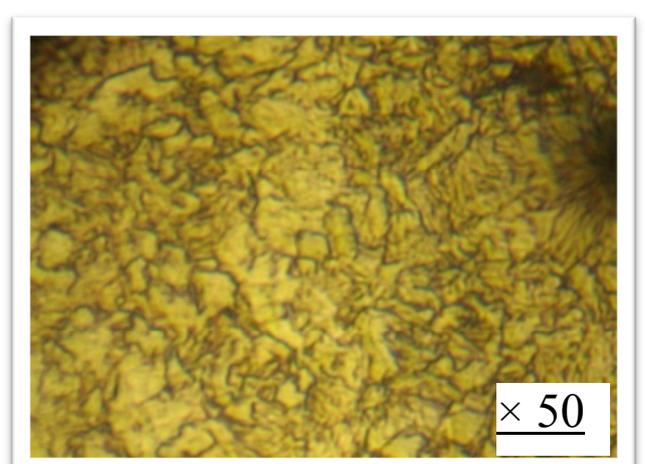
(figureIII.2.a)



(figureIII.2.b)



(figureIII.2.c)



(figureIII.2.d)

Figure III.2 : Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe (Homogénéisé à 900°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée

3. Résultats obtenus à T=950°C :

La figure III.3 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à 950°C.

- Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible nous avons remarqué la présence de la ferrite et la perlite (figure III.3.a)
- Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne nous avons une structure martensite bainitique avec une proportion de bainite plus ou moins importante (figure III.3.b).
- Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide nous avons observé l'austénite se transforme à une structure de martensite en lattes (figure III.3.c)
- Dans le cas de trempe à l'eau glacé la vitesse de refroidissement est très rapide la transformation martensitique conduit à des structures bainito-martensitique à forte proportion de martensite surtout dans les joints de grains (figure III.3.d)

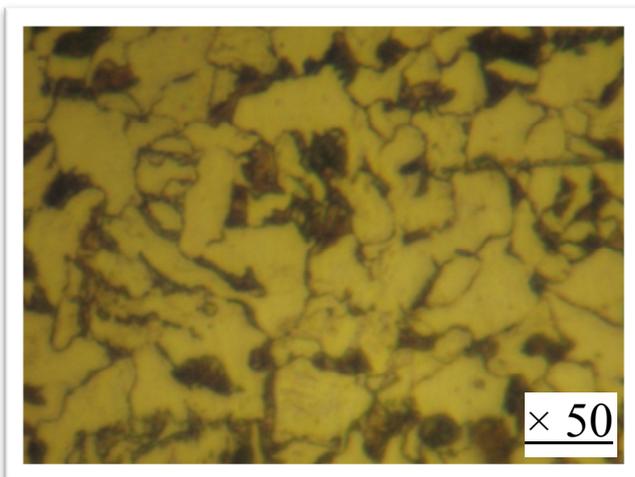


Figure (III.3.a)

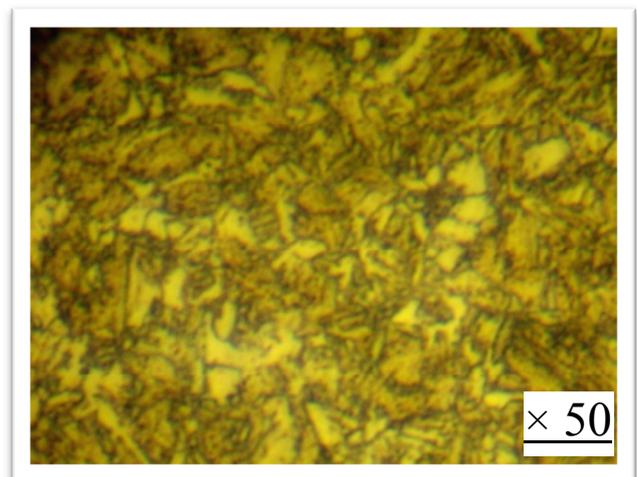


Figure (III.3.b)

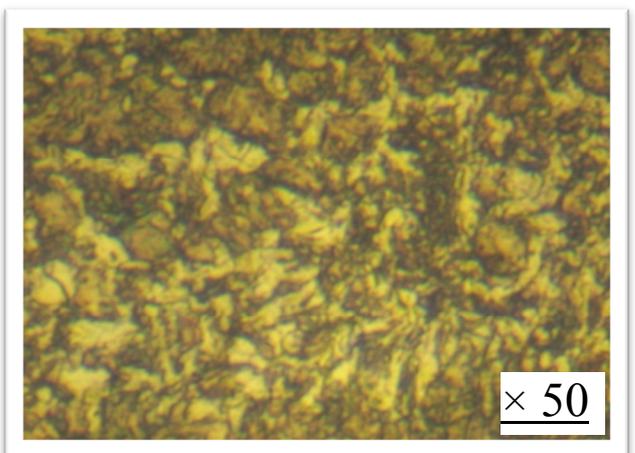


Figure (III.3.c)

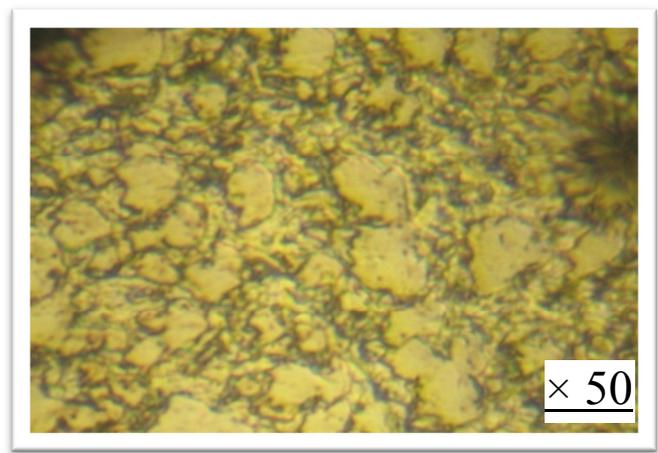


Figure (III.3.c)

Figure III.3 : Examen métallographique de l'acier pour différentes milieux de trempe (Homogénéisé à 950°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée

4. Résultats obtenus à $T=1000^{\circ}\text{C}$:

La figure III.4 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à 1000°C .

Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible nous avons remarqué la structure ferritique (figure III.4.a)

Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne nous avons une structure martensite bainitique avec proportion de bainite plus importante par rapport à les deux températures (figure III.4.b)

Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide donc l'austénite se transforme a une structure de martensite en lattes (figure III.4.c)

Pour la trempe à l'eau glacée nous avons une structure d'austénite avec quelques lattes qui illustre la martensite (figure III.4.d)

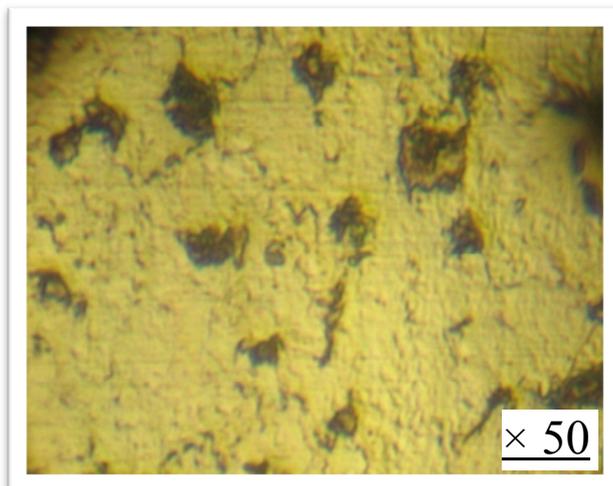


Figure (III.4.a)

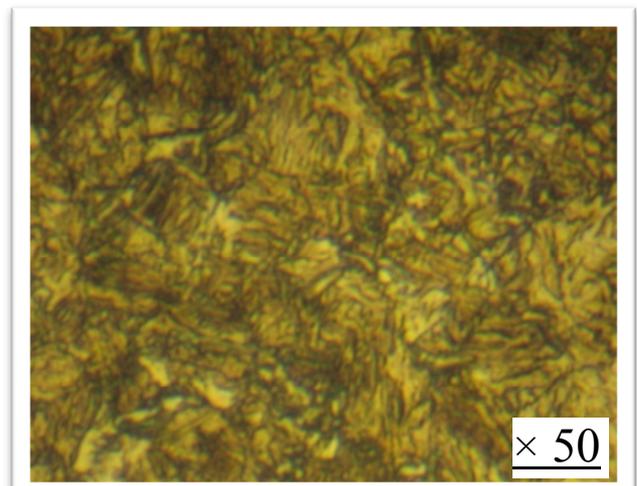


Figure (III.4.d)

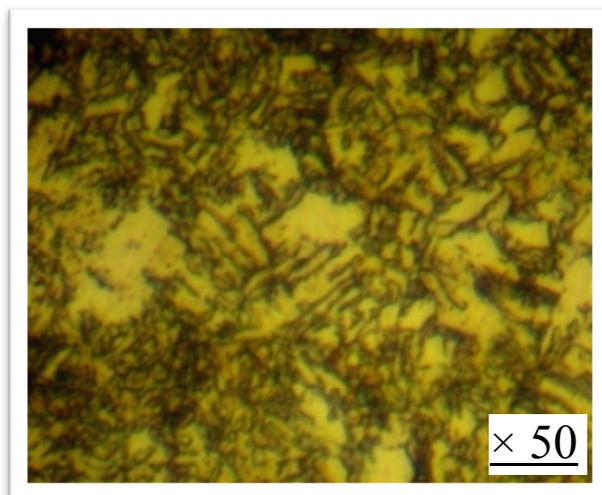


Figure (III.4.c)

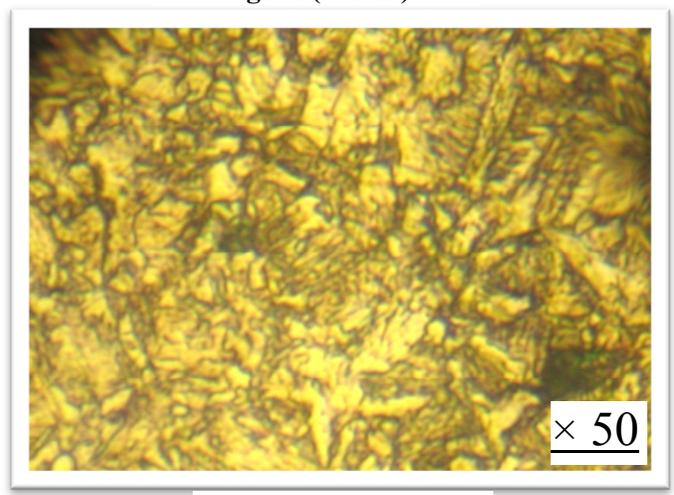


Figure (III.4.b)

Figure III.4 : Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe (Homogénéisé à 1000°C pendant 15min) [(a) air, (b) huile, (c) eau], (d) eau glacée

III.2. Etude par diffraction de rayon X

Dans cette partie d'étude, nous présentons les spectres de diffraction des rayons x à l'état brut et l'état trempé.

Nous commençons par l'état brut : nous avons observé dans la figure III.5 clairement les pics (110) α et (211) α de la structure cubique de la ferrite (α) ainsi que le pic (111) γ de la structure cubique à face centrée de l'austénite (γ).

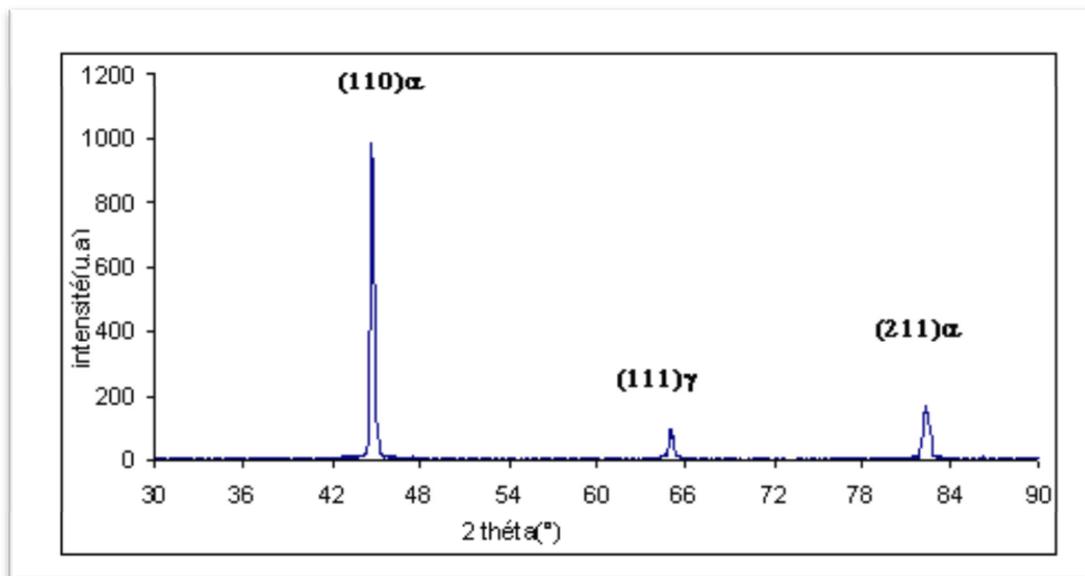


Figure III.5 : Spectre de diffraction des rayons X de l'acier à l'état brut

1. L'état trempé :

Des enregistrements diffractométriques ont été réalisés à partir de quatre échantillons pour chaque température d'austénitisation 900°C, 950°C, 1000°C.

- Un échantillon trempé à l'air.
- Un échantillon trempé à l'eau.
- Un échantillon trempé à l'huile.
- Un échantillon trempé à l'eau glacée

2. Résultats obtenus à $T = 900^{\circ}\text{C}$

La figure III.6 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite α et de la martensite α' , ainsi que l'évolution du pic (111) γ de l'austénite résiduelle

Nous avons comparé les résultats à l'état brut (figure 4.5) nous avons peut conclure que : La trempe à l'air et à l'eau glacée, nous avons remarqué une diminution importante des trois pics (110), (111) et (211) due probablement à une structure compacte.

Dans le cas de la trempe à l'air, huile l'intensité des pics reprend son intensité initiale. Mais pour la trempe à l'eau et à l'eau glacée : nous avons une diminution importante de intensité des trois pics due probablement à une structure compacte. L'austénite résiduelle dans cette structure est négligeable

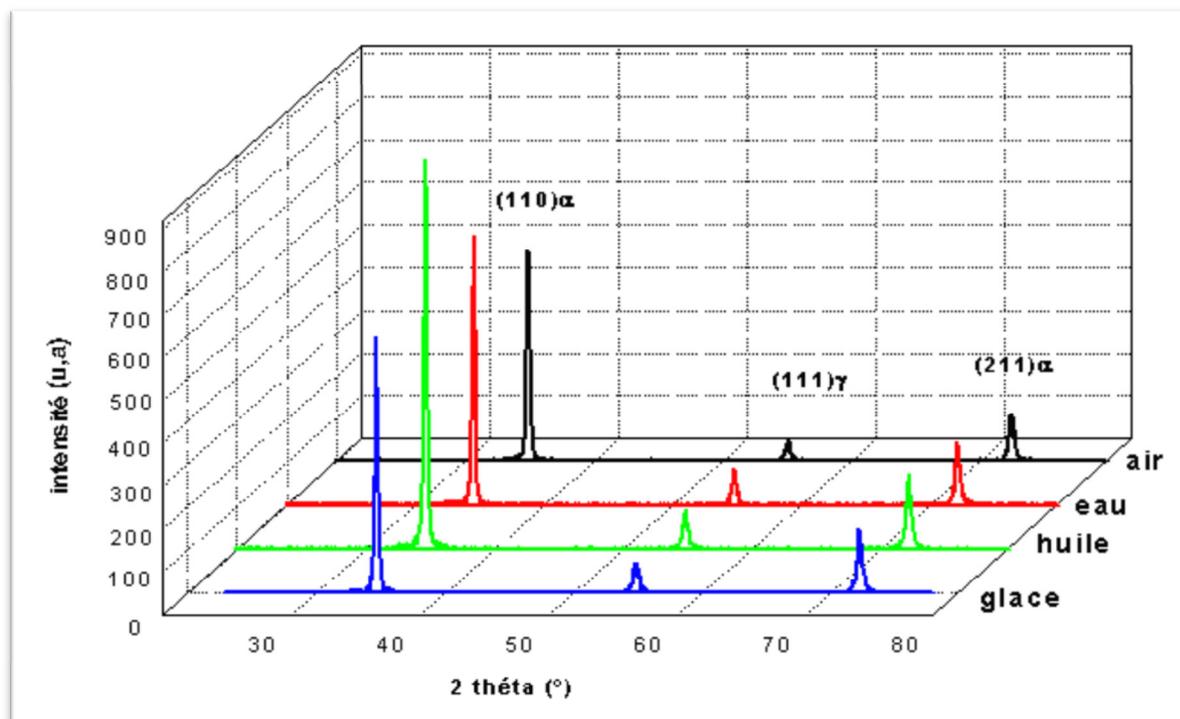


Figure III.6. Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 900°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents :

3. Résultats obtenus à $T = 950^{\circ}\text{C}$:

La figure III.7 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite α et de la martensite α' , ainsi que l'évolution du pic (111) γ de l'austénite résiduelle.

Nous avons observé pour la trempe à l'air et l'huile. L'intensité des pics reprend sont intensité initiale Mais pour la trempe à l'eau et à l'eau glacée : nous avons une diminution importante de intensité des trois pics due probablement à une structure compacte. L'austénite résiduelle dans cette structure est négligeable

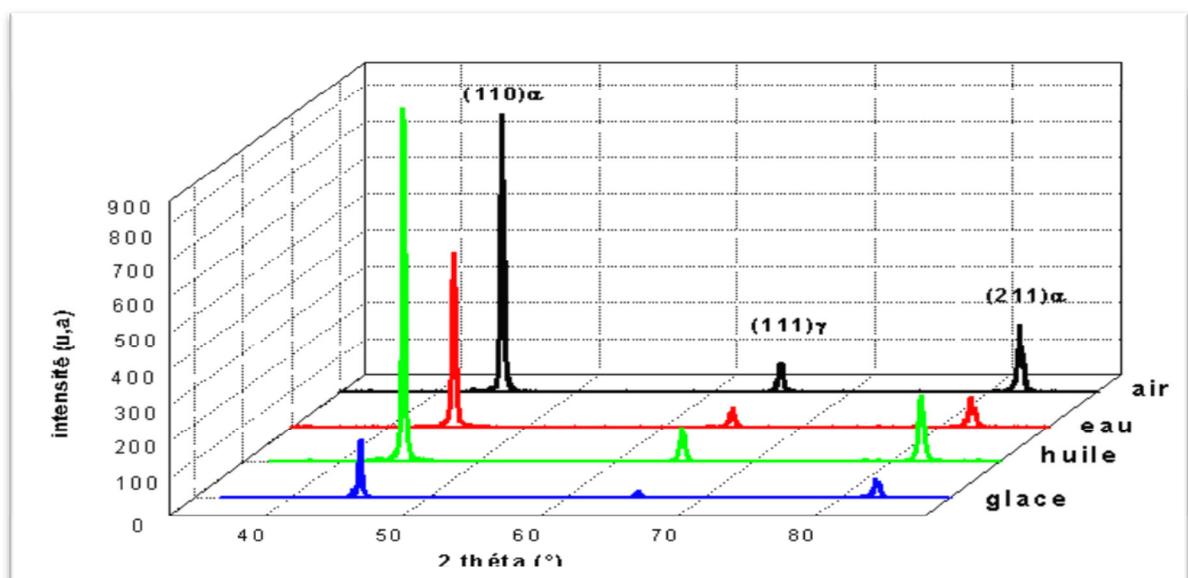


Figure III.7 Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 950°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents:

4. Résultats obtenus à $T = 1000^{\circ}\text{C}$:

La figure III.8 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite α et de la martensite α' , ainsi que l'évolution du pic (111) γ de l'austénite résiduelle.

Nous avons observé pour la trempe à l'air et l'huile.

L'intensité des pics reprend sont intensité initiale. Dans le cas l'eau, nous avons observé un élargissement de la raie (110) α ceci est traduit par des grains de martensite finis donc le cristal est petit et la quantité de martensite est grande.

Dans le cas l'eau glacée nous avons une diminution importante des intensités des trois pics (110), (111)et (211) due probablement à une structure compacte.

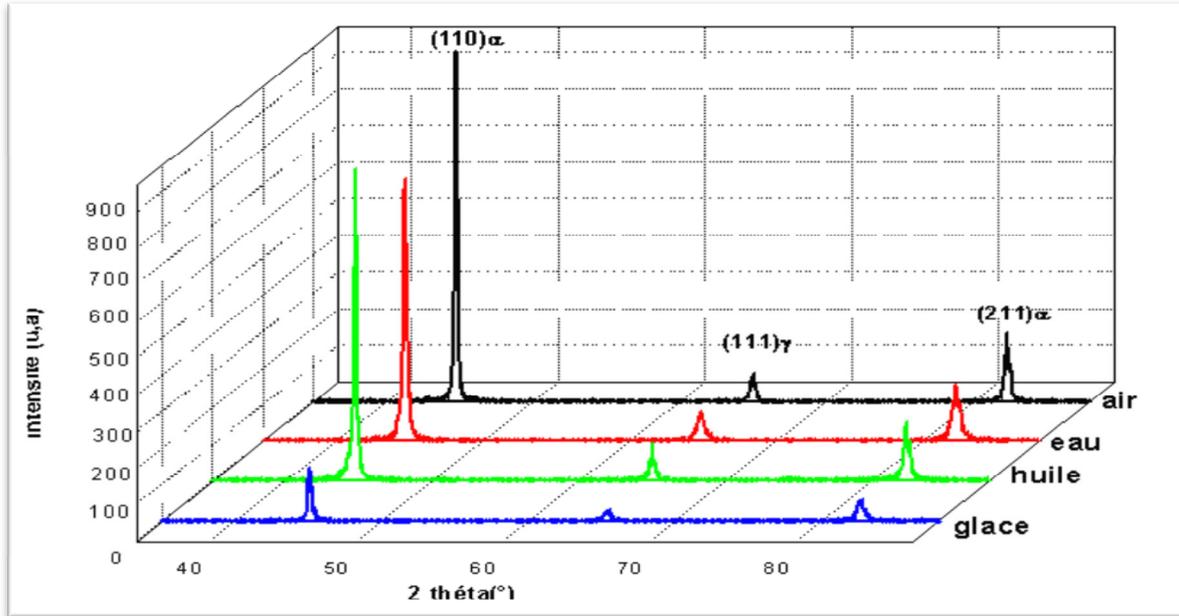


Figure III.8 Les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 1000°C pendant 15mn, trempé dans milieux différents:

III.3 La micro dureté:

Cette technique nous a permis de déterminer la variation de la micro dureté en fonction de la Température d'austénitisation et en fonction du milieu de trempe.

La figure III.9 représente la variation de la micro dureté en fonction du milieu de trempe, pour les trois températures (900 °C, 950 °C et 1000 °C).

Nous remarquons :

1. Pour la température $T = 900^{\circ}\text{C}$:

La dureté augmente en fonction de la vitesse de trempe.

Au début ceci est dû à la formation de la ferrite et de la perlite, (trempe à l'air), et la formation de la bainite et de la martensite (trempe à huile), et enfin la formation de la martensite dure (trempe à l'eau).

Nous avons observé dans la trempe à l'air que la valeur de la dureté est minimale
 $H_v = 114.05$,

2. Pour la température $T=950^{\circ}\text{C}$:

La micro dureté augmente rapidement en fonction de milieu de trempe (vitesse de refroidissement) où nous avons dans la trempe à l'air et l'huile une diminution de la dureté, par rapport au cas de l'eau et eau glacée une augmentation de la dureté parce que on a formation de la martensite.

3. Pour la température $T=1000^{\circ}\text{C}$:

Nous avons dans la trempe à l'air une diminution de la dureté.

Nous avons observé dans la trempe à l'huile que la valeur de la dureté est maximale

$H_v = 850.45$

Pour confirmer l'influence de la température d'austénitisation sur l'effet du milieu de la trempe (figure III.10)

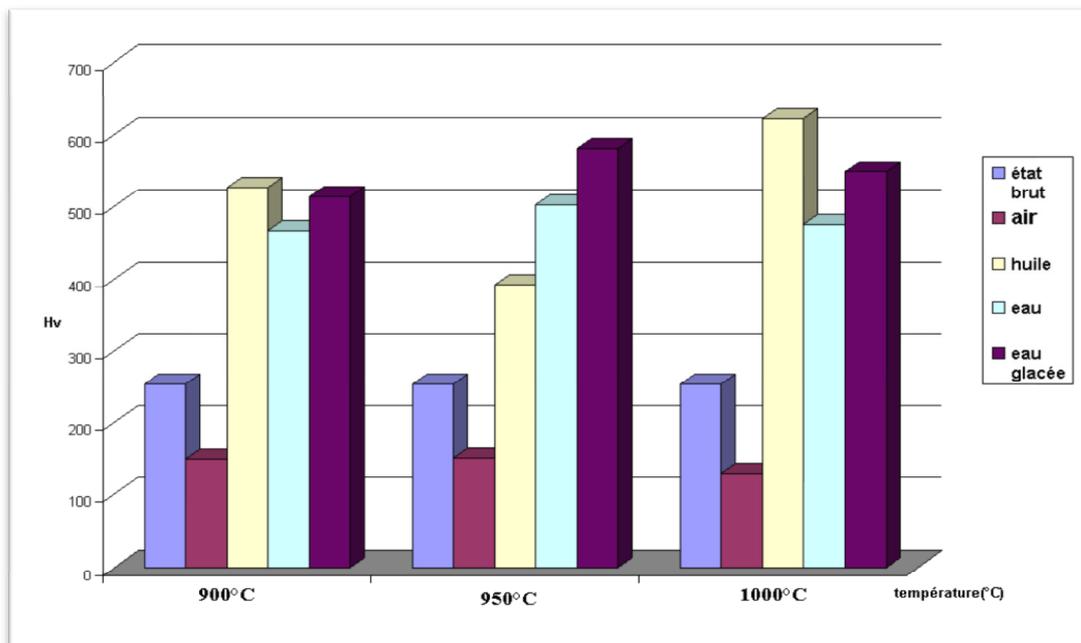
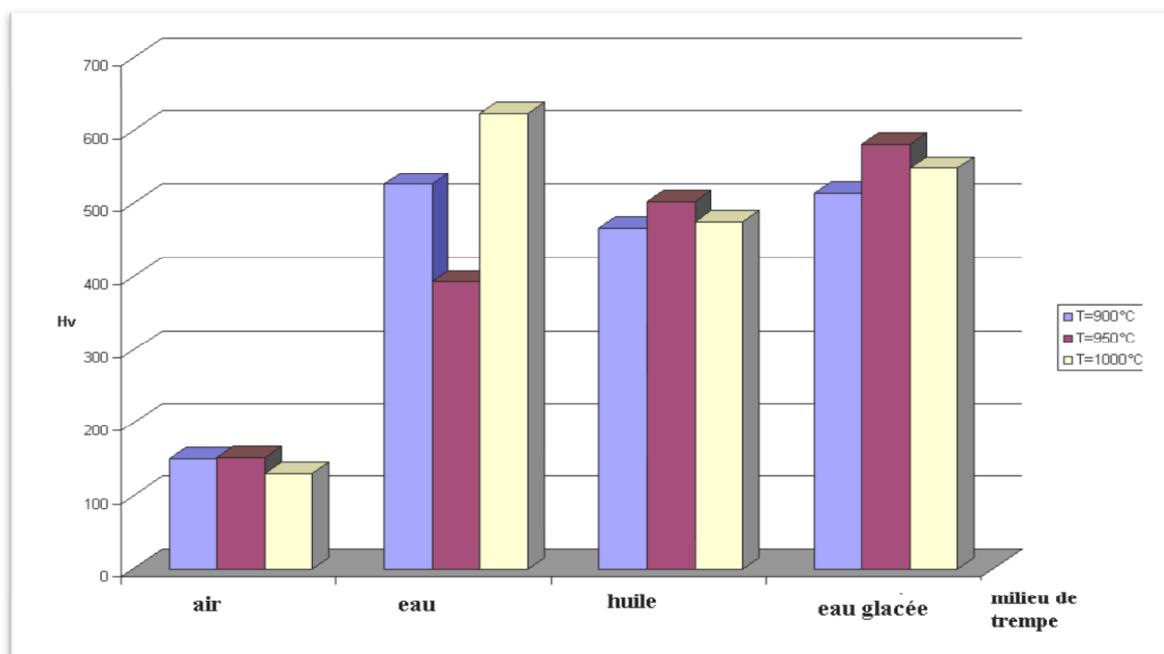


Figure III.9 la variation de la dureté en fonction de température d'austénitisation



Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude a été réalisée sur la nuance 45CrMOV5 acier faiblement allié. Il est utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques.

Notre étude s'est portée sur l'influence de la trempe sur les propriétés mécaniques et structurales de l'acier.

A travers ce travail, on a pu mettre en évidence l'effet de la température d'austénitisation et le milieu de trempe sur le comportement structurel et mécanique.

Pour réaliser ce travail nous avons utilisé plusieurs techniques conventionnelles à savoir la microscopie optique, la diffraction des rayons X, et la microdureté.

Au terme de cette étude nous sommes en mesure de dégager quelques points essentiels :

- L'acier à l'état brut à une structure ferritoperlitique.
- La proportion des constituants formés varie selon le milieu de trempe et la température d'austénitisation.
- La trempe à l'air dépend des structures ferritique et perlitique.
- Pour la trempe à l'eau l'austénite se transforme en martensite en lattes.
- La trempe à l'huile donne une structure martensito-bainitique.
- L'augmentation de la température d'austénitisation conduit à une trempabilité un peu améliorée.
- L'intensité des pics varie selon le milieu de trempe.
- L'effet du milieu de trempe est relié avec la température d'austénitisation.
- La meilleure température d'austénitisation de nos aciers est 950 °C.

Références bibliographiques

1. William D. Callister, J., *Science et génie des matériaux*. MODULO, canada 2001.
2. VLLEGAS, R., *Genèse de la ferrite aciculaire dans les aciers à moyen carbone microalliés au vanadium. Morphologie fractale en relation avec les propriétés mécaniques*, in *Discipline Science et Ingénierie des Matériaux*. 2007, Institut National Polytechnique De Lorraine.
3. DERFOUF, C.-E., *effet de la soudure sur la structure de l'acier*, ,
, in *Spécialité Génie Mécanique*. 2001, Université Mohamed Khieder: biskra
4. 16/05/2016.; Available from: disponible sur le site: <http://cte.univ-setif.dz/coursenligne/hamidouche1/metaux.html>.
5. TOUALBIA, D., *Cours De Sciences Des Matériaux*, U.M.C. Massaada, Editor., Génie Mécanique: Souk Ahras.
6. H.LITEM, *Caractérisation avec Rayonnement X des Revêtements Durs Sur des Substrats en Acier*, in *Spécialité : Rayonnement, Spectroscopie et Optoélectronique*. 2012, Université Kasdi Merbah: ouargla.
7. Michel Bramat, M.V., *Technologie des métaux*,. contrôles et essais des soudures, De Boeck,, Canada juillet 2007.
8. Guy Murry. *Transformations dans les aciers*. Centre français d'exploitation 2002; Available from: Techniques de l'ingénieur.
9. Fatima Zohra Lemmadi. Univ. De Biskra.
10. Murry, G., *Aide-mémoire Métallurgie*, in *Métaux • Alliages • Propriétés*. 2010, paris: DUNOD, Paris 2e édition,.
11. N. Mebarki, D.D., P. Lamesle, F. Delmas, C. Levailant, Mater, *Sci. Eng.A387-389*.2004. **171**.
12. M. KRAUB, B.S., *hermal Fatigue of Shot Peened on Hard Turned HotWork steel AISI H11*.**2002042**: p. 324-330.
13. A. Bahrami, S.H.M.A., M. A. Golozar, M. Shamanian, N. Varahram, *Wear*. 2005: p. 258-846.

14. J.BANALIS, G.M., *Précis de métallurgie-Elaboration, structure,propriétés, normalisée* Edition Nathau 1997.
15. ; Available from: Disponible sur le site :<http://ptetoile.free.fr/> Traitements thermiques des aciers.
16. L.COLOMBIER, *les aciers à outils et leur traitement thermique*, ed. PYCEDITION. 1971, Paris.
17. A.Constant, G.H.e.J.C.C., *Principes de base des traitements thermiques,thermomécaniques, et thermochimiques des aciers*, ed. E. 1992.
18. B, G., *Development, properties and characteristics of a new maraging steel for die casting dies. In: Proceeding of the conference on the die casting technology in harmony with the environment*. Cleveland, USA 1993. **17**: p. 209.
19. L.P. Borrego a, J.T.B. Pires b, J.M. Costa c, J.M. Ferreira c, *Engineering Failure Analysis* 14, 2007: p. 1586–1593.
20. Prabhudev, K.H., *Handbook of Heat Treatment of Steels*. 1988: Tata McGraw-Hill.

Résume :

L'objectif de cette mémoire est l'étude de l'effet de la trempe sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier 40CrMoV5, utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques.

Pour suivre les évolutions structurales et mécaniques de cette nuance, plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées à savoir la microscopie optique ainsi que les mesures de dureté et la diffraction des rayons X.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que :

- La température optimale d'austénitisation est $T = 950\text{ °C}$.
- La température et le milieu de trempe (l'air, l'huile, l'eau) sont les deux facteurs essentiels en traitement.
- La trempe à l'eau donne une structure martensitique en lattes.

ملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية التبريد على الخصائص البنيوية والميكانيكية للسبيكة

40CrMOV5 لمتابعة التطورات البنيوية والميكانيكية للعينات التي تستعمل عادة في تصنيع الأدوات

استعملنا عدة طرق تجريبية مثل المجهر الضوئي والتحليل بواسطة الأشعة السينية وقياس الصلادة

سمحت النتائج المتحصل عليها بتبيان ما يلي :

درجة الحرارة النموذجية للأستنة هي 950 °C

درجة الحرارة والوسط هما أهم عاملين في المعالجة

التبريد بواسطة الماء يعطينا البنية المرتنسية