



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

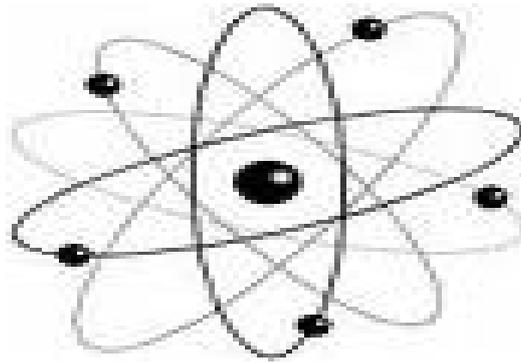


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique photovoltaïque



*Mémoire de fin d'étude en Master*

*Intitulé :*

**Evolutions microstructurales Lors des traitements  
thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4)**

Présenté par:

**BOUNAB Fatima**

Devant le Jury Composé par :

Mme.BenChabane Ghania

*M.C. « B »*

*Université Med Khider- Biskra*

*Président*

Mr.Chala AbdelOuahed

*Professeur*

*Université Med Khider- Biskra*

*Rapporteur*

Mme.Lahraki Nadia

*M.A. « A »*

*Université Med Khider - Biskra*

*Examineur*

Année Universitaire  
2012-2013

## REMERCIEMENTS

*Ce travail de recherche a été réalisé dans nos laboratoires de métallurgie, de physique, de génie mécanique ainsi que dans le laboratoire de MEB et DRX à l'Université de Biskra.*

*Je remercie vivement **Monsieur Abdelouahad CHALA**, professeur à l'Université de Biskra et mon directeur de mémoire, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, pour ses compétences scientifiques, sa rigueur et son soutien.*

*Mes remerciements vont également à **Melle Ghania Benchaabane MCB** à l'Université de Biskra et **Mme Nadia Lehraki MAA** à l'Université de Biskra d'avoir accepté de faire part de mon jury de soutenance en qualité de Président et examinateur respectivement.*

*Que **Mlle Fatima Zohra LEMMADI**, doctorante à l'Université de Biskra trouve ici l'expression de ma gratitude distinguée pour tout l'effort fourni pour mener à terme ce travail.*

***Monsieur Brahim GASMI**, ingénieur et responsable du laboratoire MEB et DRX à l'Université de Biskra qui m'a beaucoup aidé dans les analyses de DRX et MEB.*

*Je remercie également **Monsieur Belhi GUERIRA**, enseignant et responsable du Hall technologique département mécanique.*

*Je remercie ainsi **Madame Saida SEGHIROU**, ingénieur d'état et chef de laboratoire de physique.*

*Pour finir, mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants du Département de physique, le personnel technique et administratif ainsi qu'à mes collègues de la promotion du 2012-2013.*

# SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les aciers	
1.1 Introduction	2
1.2 Fer et alliages ferreux:	2
1.2.1 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer	2
1.2.2 Alliages ferreux	2
1.2.2.a) Éléments alphas et gammagènes	2
1.2.2.b) Diagrammes de phases fer – carbone	4
• La ferrite	5
• L’austénite	5
• La cémentite	5
• La perlite	6
• Le point eutectoïde	6
1.2.3 Aciers	8
1.2.3.a) Aciers à moyenne teneur en carbone	9
1.2.4 Influences des éléments d’addition sur les propriétés des aciers	9
1.2.4.1 Influence d’additions de Silicium et Manganèse	9
1.2.4.2 Influence d’additions Phosphore	11
1.2.4.3 Influence d’additions Soufre	11
Chapitre 2 : Traitements thermiques et les transformations de phases à l’état solide des aciers	
2.1 Introduction	12
2.2 Définitions et procédés des traitements thermiques	12
2.2.1 L’austénitisation	12
2.2.2 La Trempe	13
2.2.2.a) Trempe à l’eau	13
2.2.2.b) Trempe à l’huile	13
2.2.2.c) Trempe à l’air	14
2.2.3 Le Revenu	15
2.3 les transformations de phases à l’état solide des aciers	

---

2.3.1 la transformation de l'austénite	17
2.3.2 Transformation perlitique	17
2.3.3 Transformation martensitique	18
2.3.3.a) La martensite $\alpha'$ (M)	19
2.3.3.b) La transformation martensitique	19
2.3.4 Transformation intermédiaire (bainitique)	20
2.3.4.a) Bainite	21
2.3.4.b) la transformation bainitique	21
	21

### Chapitre 3 : Matériau et méthodes expérimentales

3.1 Matériau étudié	
3.2 Méthodes expérimentales utilisées	23
3.2.1 Traitement thermiques	23
3.2.2 Préparation métallographique	23
3.2.3 Microscopie optique (MO)	24
3.2.4 Microduremètre	25
3.2.5 Diffraction des rayons X	25
3.2.6 Microscope électronique à balayage (MEB)	26
	28

### Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et interprétation

4.1 Introduction	
4.2 Métallographie	29
4.3 Etude par diffraction de rayons X	29
4.4 La Microdureté	36
Conclusion	40
Référence	42
	43

---

## INTRODUCTION GENERALE

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 du 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.

Notre choix s'est porté sur la nuance 53MnSi4 acier faiblement allié au Si, Mn, P et S. Il est utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques.

Dans notre étude nous nous sommes intéressés en particulier, aux évolutions microstructurales lors d'une série de trempe afin de pouvoir caractériser le matériau après différents milieux (vitesse) de trempe.

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

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

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

Le deuxième chapitre présente les différents traitements thermiques qui sont généralement appliqués aux aciers et les transformations de phases à l'état solide dans les aciers.

Le troisième chapitre contient les méthodes de préparation métallographiques et les moyens de caractérisation.

Le quatrième chapitre fait l'objet des résultats obtenus et à leurs interprétations

# Chapitre 1

*Généralités sur les aciers*

## 1.1 Introduction :

Le Fer est un élément chimique. Il est assez difficile d'obtenir du fer très pur, mais ce n'est pas gênant car les propriétés d'emploi du fer deviennent bien plus intéressantes et variées lorsqu'on lui ajoute des éléments d'alliage judicieusement choisis et dosés. [1]

## 1.2 Fer et alliages ferreux:

### 1.2.1 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer

- Point de fusion:  $\theta_f = 1538^\circ\text{C}$
- Structure cristalline:
  - ✓ CC (ferrite  $\delta$ ) entre  $\theta_f = 1538^\circ\text{C}$  et  $1394^\circ\text{C}$
  - ✓ CFC (austénite  $\gamma$ ) entre  $1394^\circ\text{C}$  et  $912^\circ\text{C}$
  - ✓ CC (ferrite  $\alpha$ ) entre  $912^\circ\text{C}$  et l'ambiante
- Passage de l'état ferromagnétique (à basse température) à l'état paramagnétique (à haute température) à  $768^\circ\text{C}$  (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  $\alpha$  à  $20^\circ\text{C}$ ):  $\alpha = 12.6.10^{-6} .\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique:  $0.104 \mu\Omega .\text{m}$
- Caractéristiques mécaniques à  $20^\circ\text{C}$  (fer  $\alpha$  pur):
  - ✓ Résistance à la traction  $R_m = 180$  à  $290 \text{ MPa}$
  - ✓ Limite d'élasticité  $R_e = 100$  à  $170 \text{ MPa}$
  - ✓ Allongement à la rupture A % =  $40$  à  $50\%$  [2] ; [3]

### 1.2.2 Alliages ferreux

#### 1.2.2. a) Éléments alphagènes et gammagènes

Le fer métallique existe sous deux formes cristallines :

1) La variété cubique centrée, stable au-dessous de  $910^\circ\text{C}$  (fer  $\alpha$ ) et au-dessus de  $1400^\circ\text{C}$  (fer  $\delta$ ). Les solutions solides dans le fer  $\alpha$  sont appelées ferrites.

2) La variété cubique à face centrée, stable entre  $910^\circ\text{C}$  et  $1400^\circ\text{C}$  (fer  $\gamma$ ). Les solutions solides dans le fer  $\gamma$  sont appelées austénites.

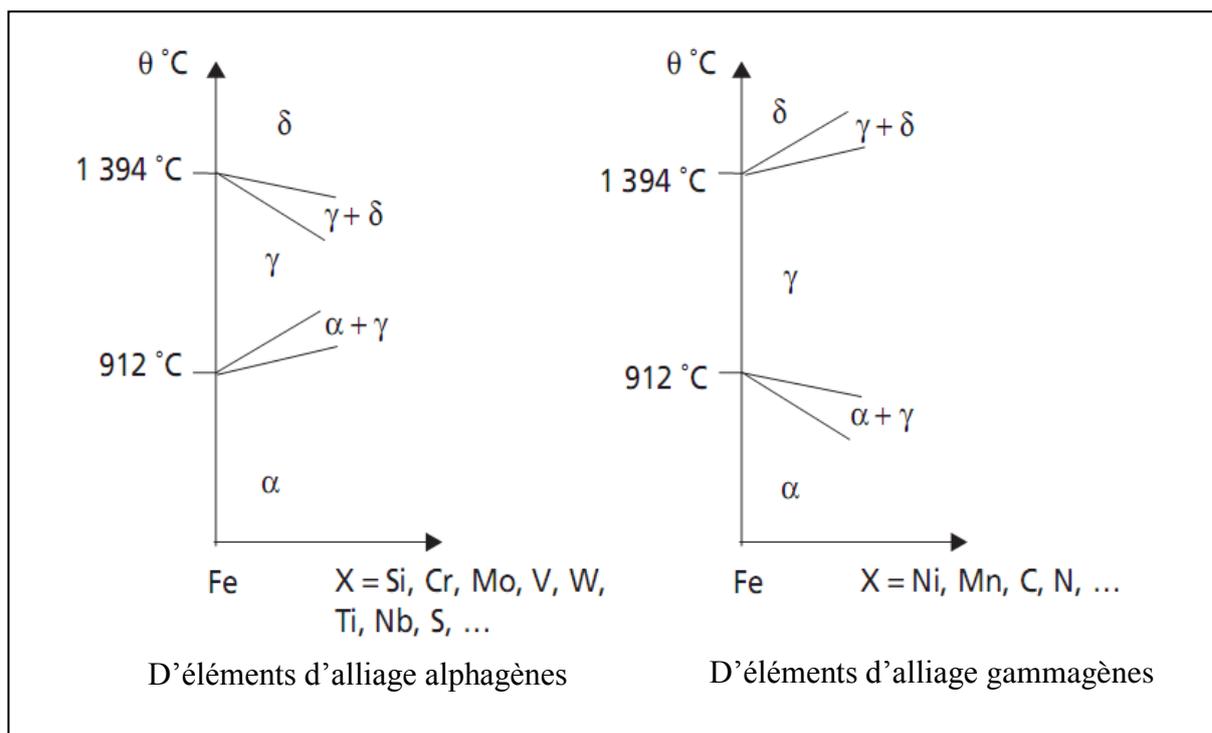
Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'éléments

d'addition (Figure 1.1). Dans le fer pur, le passage de fer  $\alpha$  au fer  $\gamma$  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 : [4]

1) Les éléments gammagènes qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer  $\gamma$  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  $\alpha$  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. [5]



**Figure 1.1 :** Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition

[2]

### 1.2.2. b) Diagrammes de phases fer - carbone:

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. [6]

La figure 1.2 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.

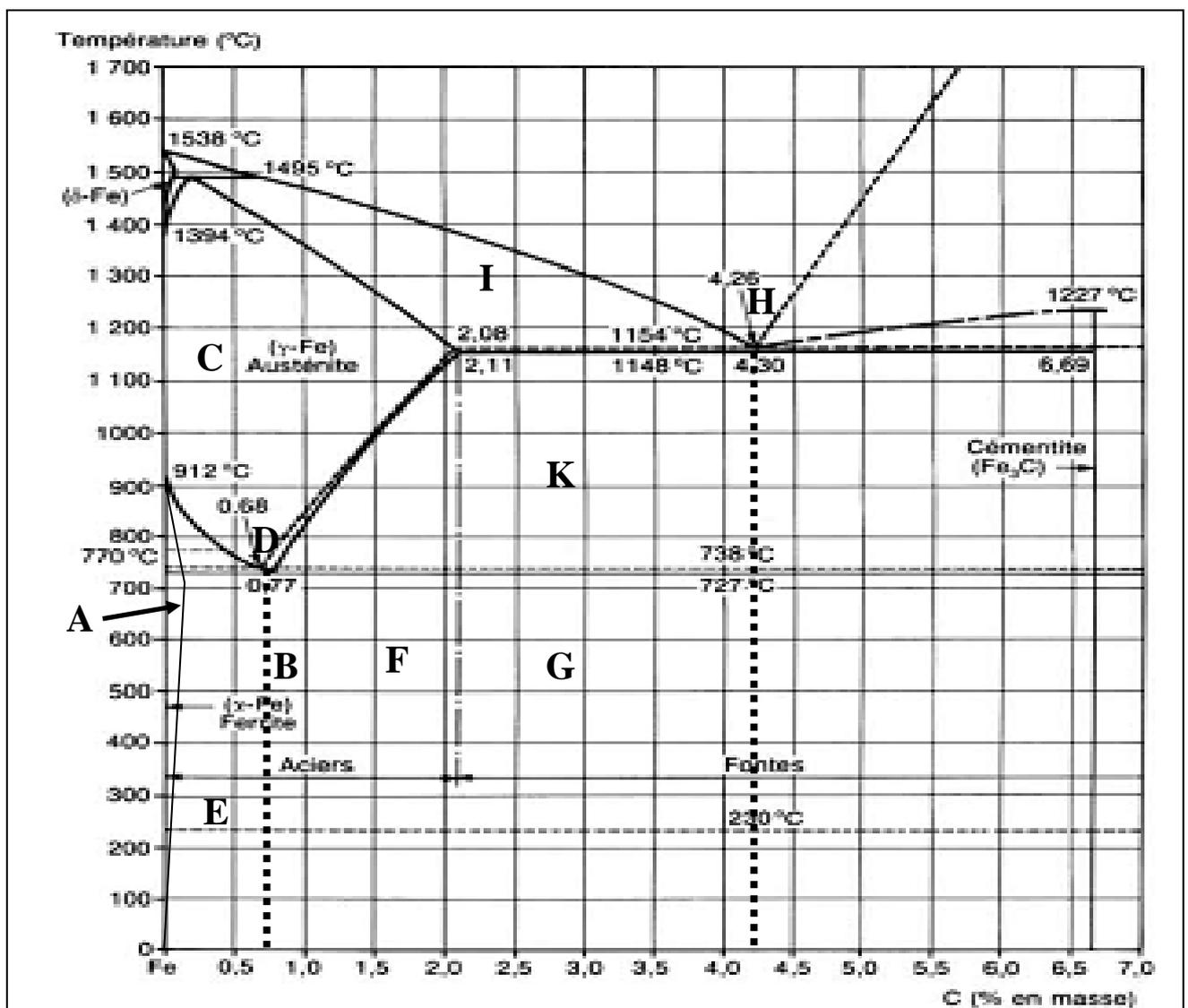


Figure 1.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [3]

- **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.

- **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.

- **La cémentite :**

La cémentite pure a la formule moléculaire  $Fe_3C$ . 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.

- **La perlite :**

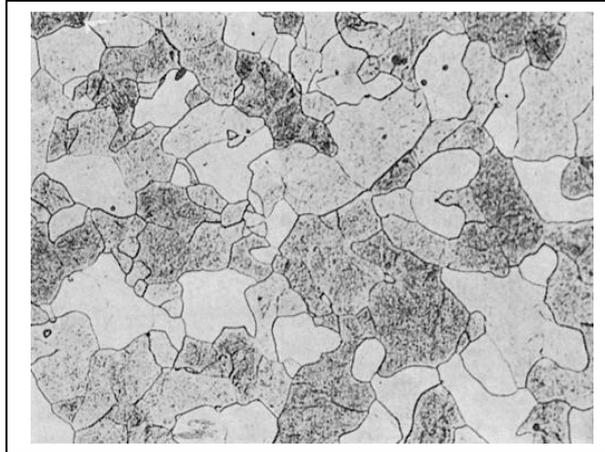
La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure 1.5.

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).

- **Le point eutectoïde :**

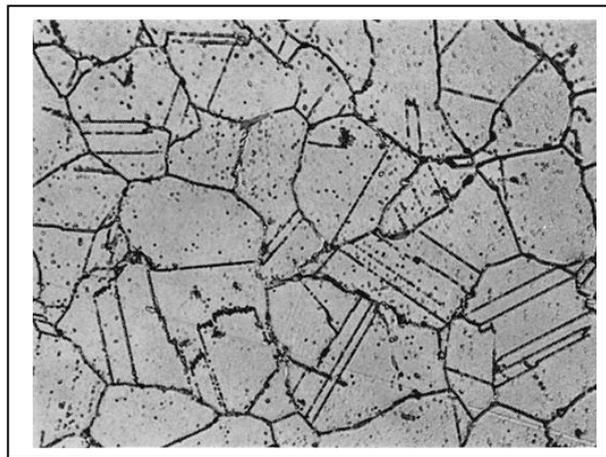
Le point eutectoïde D, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme.

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 1.3** : Structure ferritique

( Fer Armco, Traitement : 950 °C (30 min) – four, Attaque Nital (3 %), Grossissement : 180) [8]



**Figure 1.4** : 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 : 900 [8]



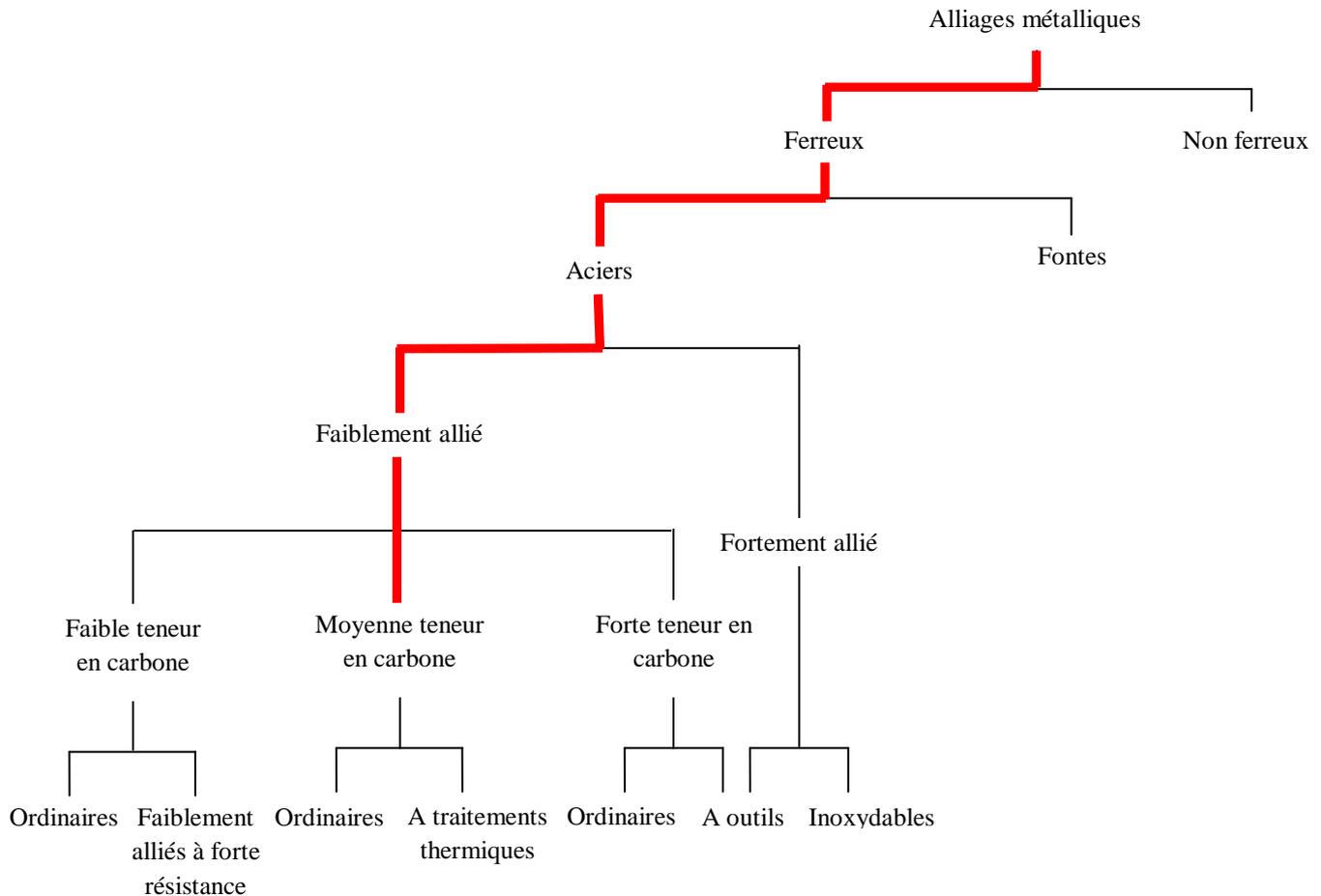
**Figure 1.5** : Structure perlitique

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

Grossissement : 900 [8]

### 1.2.3 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.



Les aciers sont des alliages fer-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% m.

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.

[6]

### 1.2.3.a) Aciers à moyenne teneur en carbone :

La concentration en carbone de ces aciers varie de 0.25%<sub>m</sub> à 0.60%<sub>m</sub>. leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu, auquel cas ils ont une microstructure de martensite revenue.

Les aciers à moyenne teneur en carbone ont une faible trempabilité et leur traitement thermique n'est efficace que si leur section est très mince et si la vitesse de refroidissement est très élevée. L'ajout de chrome (Cr), de nickel (Ni) ou de molybdène (Mn) facilite l'application de traitements thermiques à ces alliages et offre un large éventail de combinaisons résistance-ductilité. Les traitements thermiques produisent des aciers plus résistants que les aciers au carbone ordinaires, mais d'une ductilité et d'une ténacité moindres. Parmi les pièces faites d'acier à moyenne teneur en carbone, mentionnons les roues de train et les voies ferrées, les engrenages, les vilebrequins ainsi que d'autres pièces de machine et des composants structuraux alliant haute résistance, résistance à l'usure et ténacité [6].

### 1.2.4 Influences des éléments d'addition sur les propriétés des aciers :

Les éléments d'addition ajoutés à l'acier ou alliage métallique à base de fer (Fe + C), jouent un rôle particulier sur les caractéristiques générales, ou un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'addition sont présents dans la composition chimique finale. Les éléments d'alliages se répartissent le fer<sub>γ</sub> [9].

Dans la suite de ce chapitre, nous nous limiterons à présenter en détail les effets de quatre éléments présélectionnés pour notre étude: le Silicium, le Manganèse, le Phosphore et le Soufre.

#### 1.2.4.1 Influence d'additions de Silicium et Manganèse :

N'étant pas un élément carburigène, le silicium ne participe pas à la formation de carbures lors du revenu. Toutefois, cet élément retarde la baisse de la dureté et des études ont montré que le silicium retarde l'apparition de la cémentite lors du revenu.

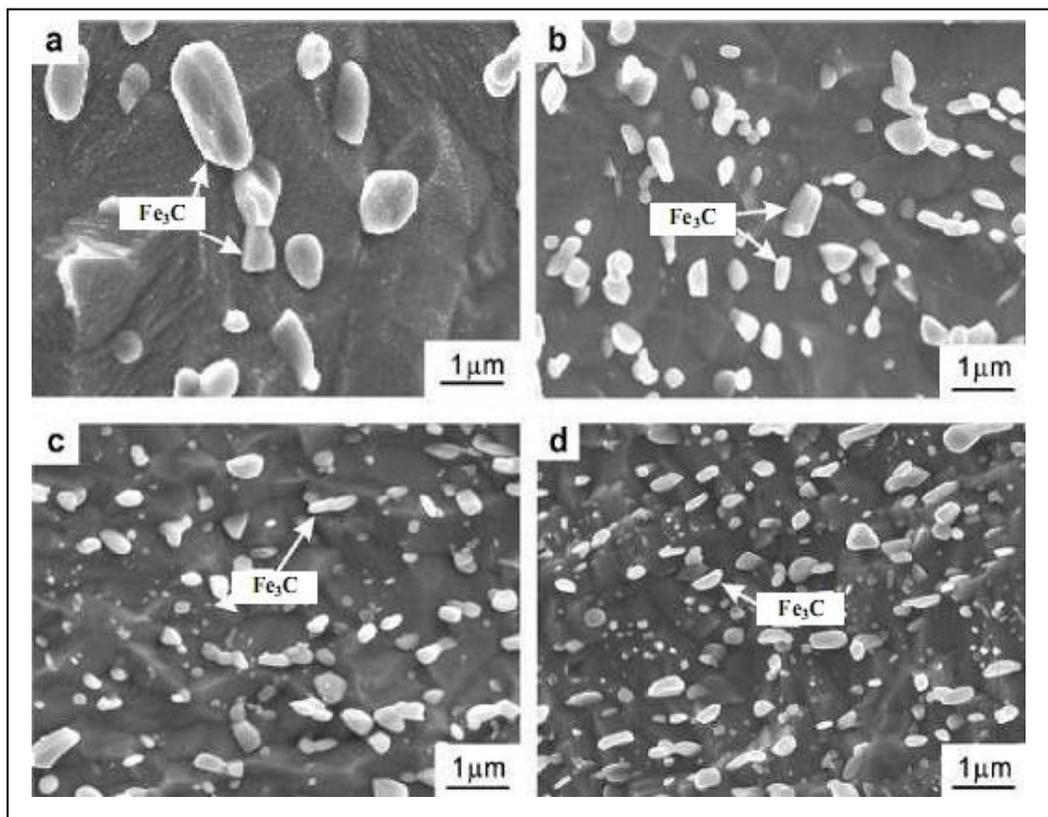
Le Tableau 1.1 présente ces résultats. Ainsi, on constate que dans le cas d'un alliage contenant du silicium, la cémentite n'est pas encore observée même après un long revenu de 1200 s à 250°C, contrairement aux deux autres nuances étudiées.

Le silicium présente toutefois un autre effet sur le revenu : comme observé sur la Figure 1.6, il retarde considérablement le mécanisme de coalescence des particules de Fe<sub>3</sub>C dans la gamme de températures allant de 400°C à 600°C.

Les précipités conservent alors une taille plus fine pour des températures de revenu plus élevée, retardant alors la chute de dureté. Notons toutefois que le manganèse présente les mêmes caractéristiques. Cet effet pourrait s'expliquer par la très faible solubilité du silicium dans la cémentite. Le silicium est alors rejeté au fur et à mesure que la croissance des particules progresse, ce qui augmente la teneur en silicium au voisinage des carbures formés, créant ainsi une barrière de diffusion pour le carbone [10]

**Tableau 1.1 :** Carbures présents dans la microstructure après différents temps de revenu à 250°C ou 450 °C

	250°C		450°C			
	30 s	1200 s	30 s	120 s	300 s	1200 s
Fe-0.6C	$\epsilon$	$\text{Fe}_3\text{C}$	$\text{Fe}_3\text{C}$	-	-	$\text{Fe}_3\text{C}$
Fe-0.6C-2Mn	$\epsilon$	$\text{Fe}_3\text{C}$	$\text{Fe}_3\text{C}$	-	-	$\text{Fe}_3\text{C}$
Fe-0.6C-2Si	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$ et $\text{Fe}_3\text{C}$	$\text{Fe}_3\text{C}$	$\text{Fe}_3\text{C}$



**Figure 1.6:** Observation au MEB de la martensite revenu à 650°C pendant 18 ks  
**a)** alliage Fe-0,6C ; **b)** alliage Fe-0,6C-2Si ; **c)** Fe-0,6C-1Mn ; **d)** Fe-0,6C-2Mn

### **1.2.4.2 Influence d'additions Phosphore :**

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement du grain, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségréant facilement, contribue à l'hétérogénéité de l'acier. Sa teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040%.

Le phosphore augmente la limite élastique et la charge de la rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

### **1.2.4.3 Influence d'additions Soufre :**

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid le soufre amène également une diminution importante de la résistance la teneur limite en soufre doit être inférieure à 0.035 – 0.06%.

Parfois on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 - 0,025) % afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02%) est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité [11].

# Chapitre 2

*Traitements thermiques et  
les transformations de phases à l'état  
solide des aciers*

## 2.1 Introduction :

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 suivantes :

- 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.

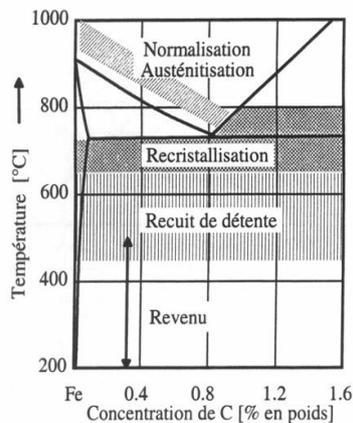
De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité.

En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage. [12]

## 2.2 Définitions et procédés des traitements thermiques :

### 2.2.1 L'austénitisation :

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritique ( $\alpha$ , cc) en austénite ( $\gamma$ , cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite. [14]



**Figure 2.1 :** Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone

### 2.2.2 La Trempe :

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine.

La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C.

La trempe s'effectue en général soit : [14]

#### 2.2.2.a) Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau ;
- de l'agitation des pièces ;
- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants. [13]

#### 2.2.2.b) Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique) ;
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente [13].

### 2.2.2.c) Trempe à l'air :

Est le cas le plus simple à mettre en œuvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le monde de refroidissement est plus rapide [13].

Le milieu de trempage est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier.

Pour les aciers au carbone, la trempage se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempage plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempage l'augmente.

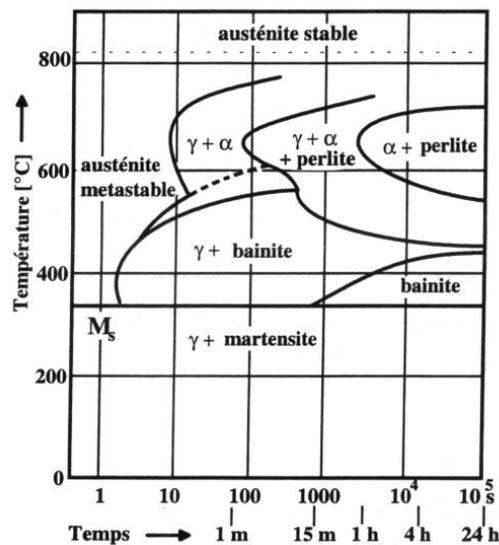
Le refroidissement rapide par trempage ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable.

L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion.

Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.

Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille.

L'effet d'une trempage sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation  $\alpha - \gamma$ . Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure 2.2) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure 2.3) dans le cas des trempages.

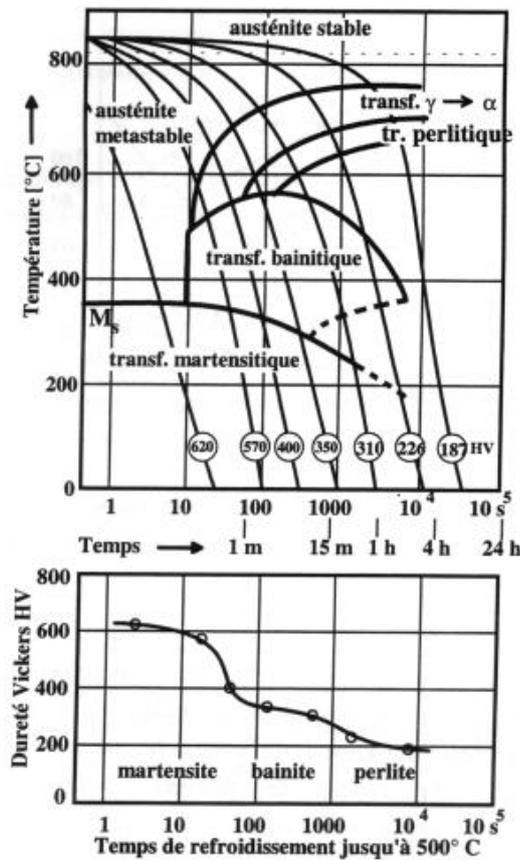


**Figure 2.2 :** Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.

### 2.2.3 Le Revenu :

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

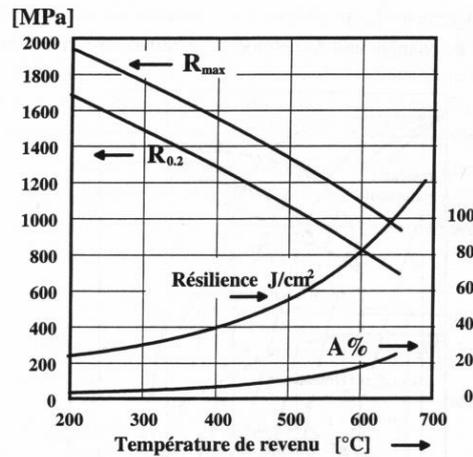


**Figure 2.3 :** Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

Le diagramme montré en Figure 2.4 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages).

En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo.



**Figure 2.4 :** Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6.

Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 840 °C)

[14]

## 2.3 les transformations de phases à l'état solide des aciers :

### 2.3.1 la transformation de l'austénite :

Le traitement thermique de l'acier commence lorsqu'il est porté à haute température dans un état complètement ou très largement austénitique. L'austénite possède alors deux caractéristiques intéressantes :

- 1) Composition et l'homogénéité de la composition ;
- 2) La grosseur du grain.

Au refroidissement, l'austénite se transforme en ferrite et carbure. En ajustant les conditions de refroidissement, en particulier la vitesse, il est possible de contrôler la structure microscopique, autrement dit le mode de répartition du carbure dur dans la matrice ferritique douce. L'une des vitesses de refroidissement de l'acier à partir du domaine austénitique est la vitesse de refroidissement des produits laminés ou forgés après la dernière passe à chaud. Ce refroidissement n'est pas techniquement, un traitement thermique. Il s'agit pourtant, d'un point de vue métallurgique, d'un véritable traitement, reproductible pour une section donnée.

La décomposition de l'austénite ne commence pas instantanément lorsque la température atteint celle qui, au bout d'un temps de maintien suffisant, entraîne sa décomposition isotherme [15].

### 2.3.2 Transformation perlitique :

Au cours d'un refroidissement lent, à la vitesse de 2 à 3 °C / mn, l'austénite se transforme en ferrite et en carbure lamellaire [16].

A haute température, l'austénite homogène présente une distribution embryonnaire caractéristique. Le franchissement de la température de transformation entraîne une évolution de cette distribution pendant laquelle on n'observe aucune transformation [17], le temps nécessaire pour atteindre ce nouvel état est appelé temps d'incubation.

A température  $\theta_{iso}$ , légèrement au dessous de  $A_1$  (pour un acier proche de la composition eutectoïde), l'énergie motrice de la transformation est négligeable et il s'ensuit une faible vitesse de réaction que l'on observe après temps d'incubation important.

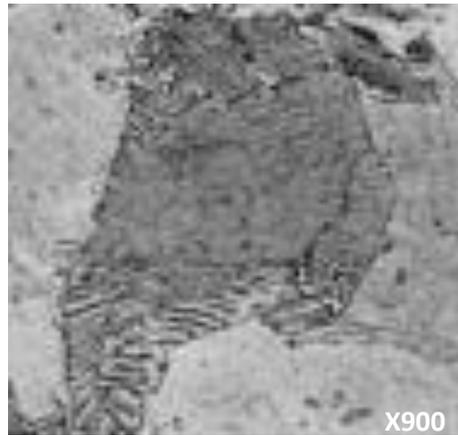
A température  $\theta_{iso}$ , c'est-à-dire vers 500°C, l'énergie motrice de la transformation devient très importante, mais l'abaissement de la température ralentit considérablement, la vitesse de diffusion du carbone qui apparaît

Comme le facteur contrôlant la transformation et expliquant l'importance du temps d'incubation.

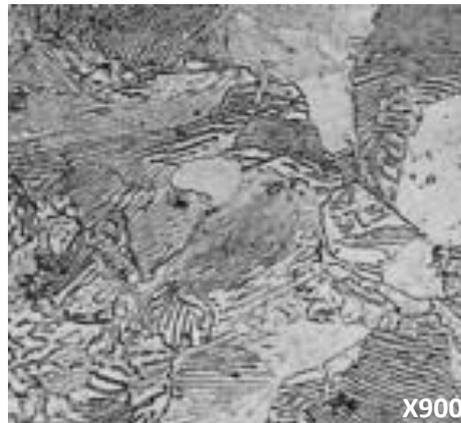
Vers 600 °C, l'énergie motrice et la vitesse de diffusion ont des valeurs telles que la formation de la perlite se manifeste après un très court temps d'incubation.

Pour un acier hypoeutectoïdes, la transformation commence par l'apparition de la ferrite aux joints des grains austénitiques ; simultanément, l'austénite restante s'enrichit en carbone jusqu'à atteindre la composition eutectoïde.

La perlite apparaît sous forme de colonies ou l'agrégat ferrite –cémentite progresse, sans relation d'orientation cristallographique avec le grain d'austénite mère [18].



**Figure 2.5** : Début de la transformation perlitique d'un acier eutectoïde, la croissance lamellaire à partir des germes et la formation simultanée de ferrite et de carbure [19].



**Figure 2.6** : transformation perlitique après la décomposition complète [19].

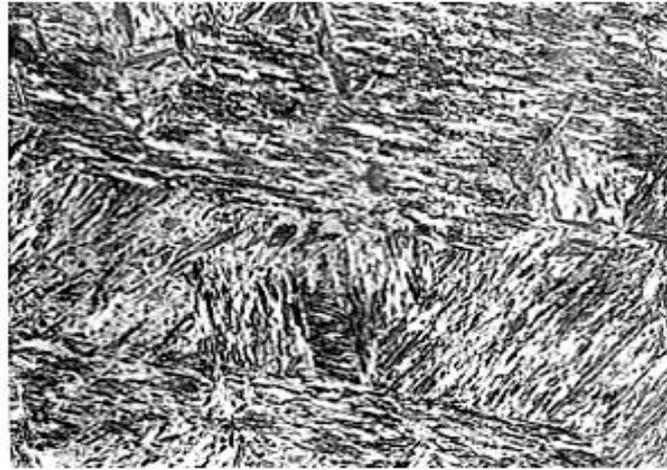
### 2.3.3 Transformation martensitique :

#### 2.3.3.a) La martensite $\alpha'$ (M) :

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite.

La martensite possède une grande dureté (HV = 700 à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite. (Figure 2.7)

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. [5]



**Figure 2.7:** structure martensitique d'acier à 0,32 % C - 4,12 % Ni - 1,37 % C  
traitement : 850° C (30 min) – eau Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900 [8]

### 2.3.3.b) La transformation martensitique :

Est une transformation sans diffusion. (Par glissement) Du point de vue de la cinétique, la martensite apparaît dès que l'on atteint, par un refroidissement rapide, une certaine température dite de début de la transformation martensitique ( $M_s$ ), mais elle ne se poursuit pas en condition isotherme.

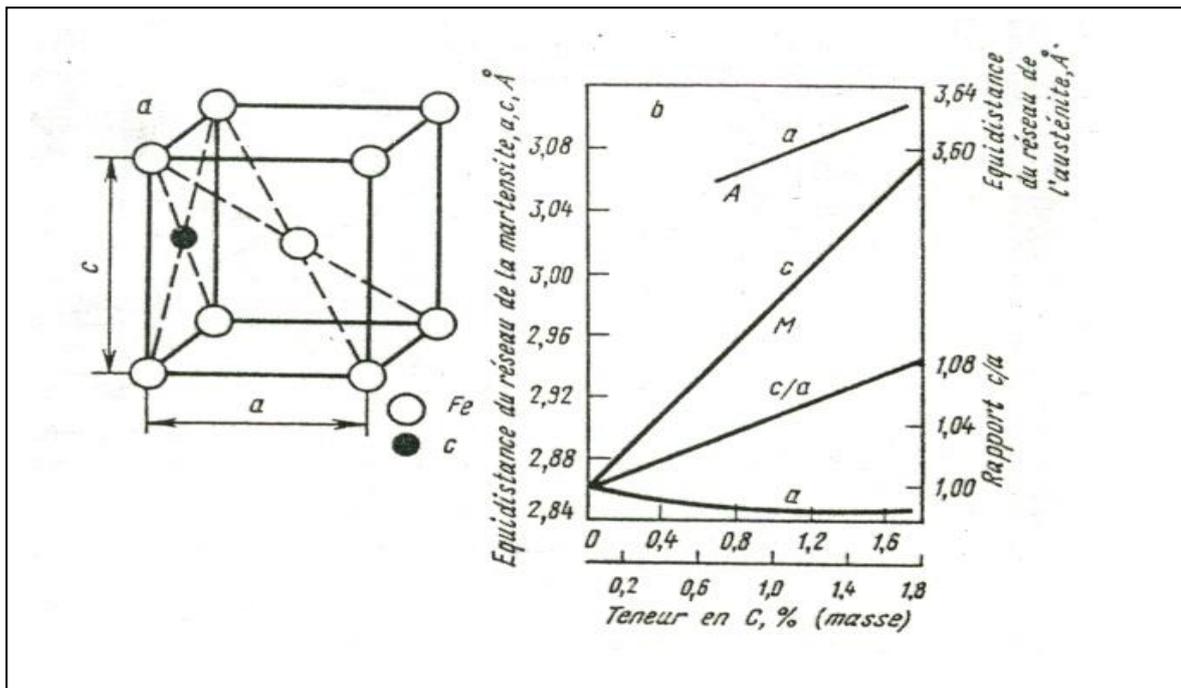
Du point de vue structural, la transformation martensitique correspond à un basculement coopératif des atomes qui participent à la formation d'une plaquette de martensite. La martensite a une structure proche celle de la ferrite.

La présence en sursaturation du carbone retenu dans la martensite, confère à la maille une légère déformation et le réseau devient quadratique centré, les atomes de carbone se trouvant dans les sites octaédriques. (Figure 2.8)

Les paramètres  $a$  et  $c$  de la maille quadratique de martensite dépendent de la teneur en carbone de l'acier. D'une manière générale, la martensite présente plusieurs morphologies selon cette teneur en carbone [20]. A faible teneur ( $c < 0.6$  %), on observe une martensite aciculaire fortement maclée [21, 24].

Le changement de forme, engendré par le cisaillement du volume initial d'austénite se traduit par un gonflement volumique qui donne naissance à des contraintes internes considérables. Ces contraintes, d'autant plus importantes que le carbone est abondant, confèrent

à l'acier une forte dureté, mais aussi une grande fragilité que l'on peut atténuer par un traitement thermique ultérieur appelé « Revenu ».



**Figure 2.8:** Structure cristalline de la martensite

a) réseau cristallin, b) équidistance de la martensite et de l'austénite en (fonction de la teneur en carbone) [24]

### 2.3.4 Transformation intermédiaire (bainitique) :

#### 2.3.4.a) Bainite :

Mélange de fines plaquettes de carbures  $\text{Fe}_3\text{C}$  et  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ) dans une matrice de ferrite. Accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés. moins dur, mais moins fragile que la martensite. [2]

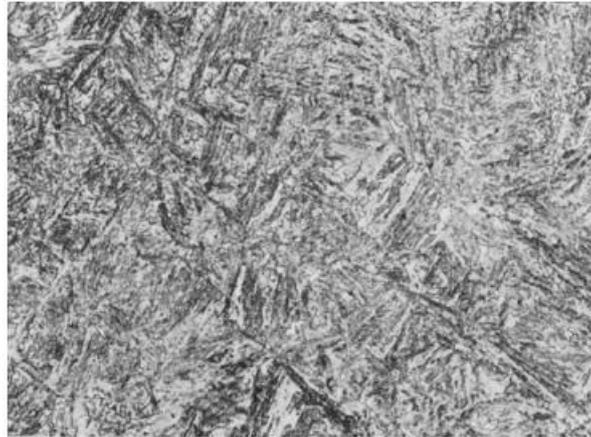
#### 2.3.4.b) la transformation bainitique :

La transformation perlitique est contrôlée par un mécanisme de diffusion, alors que la transformation martensitique procède par cisaillement et en absence de diffusion.

La transformation bainitique est intermédiaire entre les deux précédentes, puisque le mécanisme mis en jeu est mixte : on observe simultanément un phénomène de cisaillement de l'austénite en ferrite, et une diffusion à courte distance du carbone.

La bainite qui apparaît à haute température, dite bainite supérieure, présente la forme de lattes, les aiguilles de ferrite bainitique étant séparées par de petites plaquâtes de cémentite. Aux températures plus basses, le carbone dont la vitesse de diffusion est de plus faible, précipite sous forme de très fins carbures de type cémentite ou epsilon ( $Fe_2; 4 C$ ) à l'inférieur même des aiguilles de ferrite bainitique.

Ceux –ci plus petits sont allongés selon des directions faisant un angle de l'ordre de  $60^\circ C$  avec l'axe des lattes de ferrite [22.23] on parle alors de bainite inférieure. (Figure 2.9)



**Figure2.9 :** Structure bainitique (bainite inférieure)

(Acier à 0,35 % C - 4,1 % Ni - 1,6 % Cr - 0,4 % Mo)

Traitement : 850 °C (30 min) -refroidissement interrompu à 300 °C (16 h)

Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900

# Chapitre 3

*Matériau  
et méthodes expérimentales*

### 3.1 Matériau étudié :

L'acier 53MnSi4 est utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques, est un acier faiblement allié sa composition chimique (en pourcentage massique) est la suivante :

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Phosphore (P)	Soufre (S)
0.5 - 0.57 %	0.8 - 1 %	0.8 - 1.2 %	0.035%	0.035%

### 3.2 Méthodes expérimentales utilisées:

#### 3.2.1 Traitement thermiques :

Pour mettre en évidence les différentes transformations de phases à l'état solide, dans nos aciers, on a opté pour les traitements thermiques suivants :

- Austénitisation pendant 1 heure à ( $T= 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T= 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $T= 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Suivie d'une trempe dans trois milieux différents (air, eau et huile) pour chaque température.

Les températures sont choisies à partir du diagramme d'équilibre.

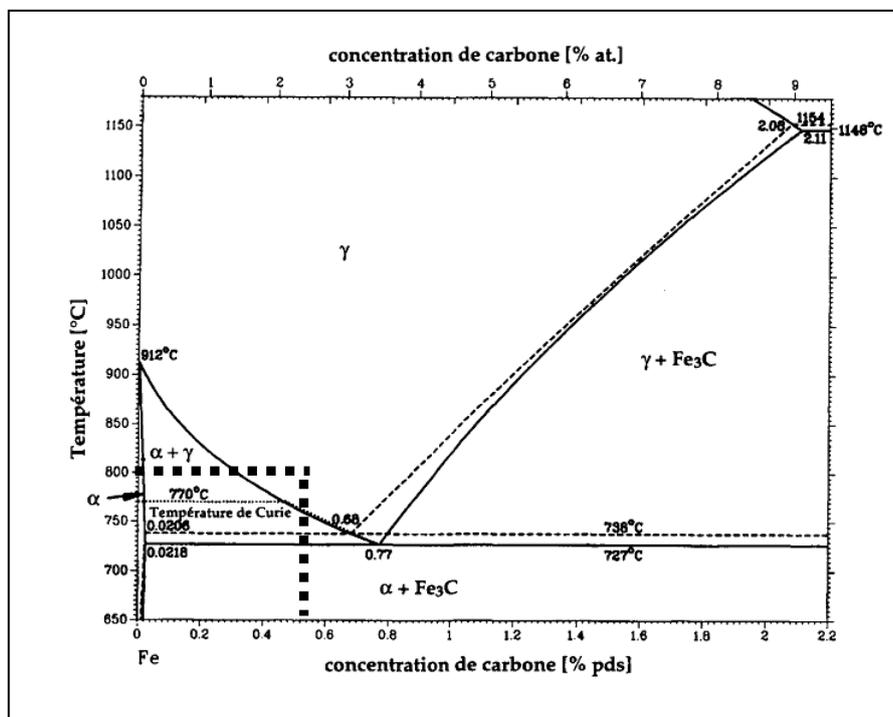


Figure 3.1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone

Pour ces traitements thermiques ; on utilisé un four électrique à température maximale  $T_{\text{max}} = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , figure 3.2



**Figure 3.2 :** four électrique

### 3.2.2 Préparation métallographique :

L'étude de la microstructure nécessite des surfaces bien polies, de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen micrographique. Pour cela ; les échantillons sont polis mécaniquement sur papiers abrasifs (du numéro 120, 320, 400, 600, 800, 1000,1800) ; puis à la pâte diamantée de granulométrie  $0.5\mu\text{m}$ .

Après chaque polissage ; les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés, les surfaces sont ensuite attaquées chimiquement par le Nital 4 % (une solution alcoolique-nitrique) de composition :

4 ml d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$

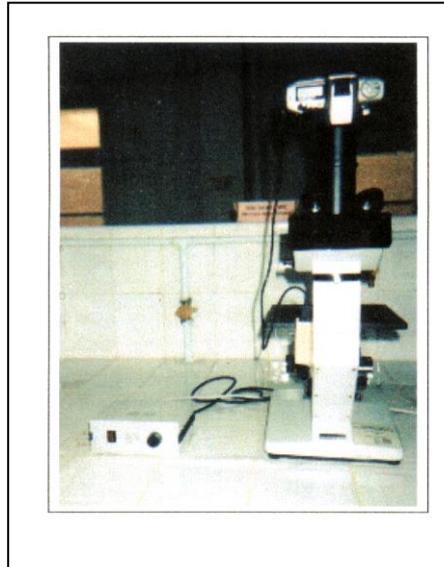
100 ml d'éthanol  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$



**Figure 3.3 :** Instruments de type FORCIPOL 2V Metkon

### 3.2.3 Microscopie optique (MO) :

Le microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons durant les différents traitements thermiques. Pour notre étude, on a utilisé une microscopie optique de type Hund



**Figure 3.4 :** Microscopie optique de type Hund

### 3.2.4 Microduremètre:

On appelle dureté la propriété d'un corps de s'opposer à la déformation plastique provoquée par des contacts de la couche superficielle ; la rapidité et la simplicité de l'essai de dureté, ainsi que la possibilité de juger des propriétés d'une pièce sans la détruire, contribuent à sa large extension pour le contrôle de la qualité du métal des pièces et des produits métalliques.

Pour cela on utilise la dureté Vickers HV est le rapport entre la charge appliquée et la surface projetée de l'empreinte rémanente :

$$HV = (1.854 \cdot F) / (9.81 \cdot d^2)$$

Avec F la charge appliquée et la diagonale de l'empreinte en  $\mu\text{m}$ . Cette méthode est largement appliquée pour mesurer des pièces de faibles épaisseur ou couches superficielles minces à dureté élevée. La dureté est déterminée par l'empreinte laissée dans la surface mise à l'essai (réactif ou même polie) par une pyramide en diamant à base carré sous une charge de 300 g. De trois mesures sont effectuées sur chaque échantillon et une moyenne est prise, Le Microduremètre utilisé est illustré dans la photo suivant (Figure 3.5)



**Figure 3.5:** Microduremètre de type Hardness

### 3.2.5 Diffraction des rayons X :

La diffraction des rayons X permet l'étude cristallographique des phases au sein des alliages métalliques. Sachant qu'au cours de la décomposition des solutions solides sursaturés par le mode discontinue, l'intensité des raies de la phase mère diminue et celle des raies correspondant à la phase d'équilibre augmente.

#### Principe :

Lorsqu'un faisceau de rayon X monochromatique est dirigé sur un matériau polycristallin, il est en partie réfléchi par les plans atomiques de certains cristaux. Pour que la diffraction des photons X soit mesurée, l'incidence du faisceau par rapport aux plans atomiques doit avoir lieu sous un angle particulier. Il faut en effet que les ondes réfléchies soient en phase de sorte à l'interférer de manière constructive pour ensuite être mesurées par le détecteur. Les conditions nécessaires à cette interférence constructive sont données

Par la loi de Bragg :

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

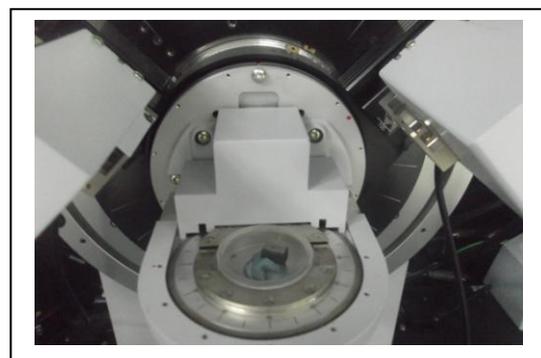
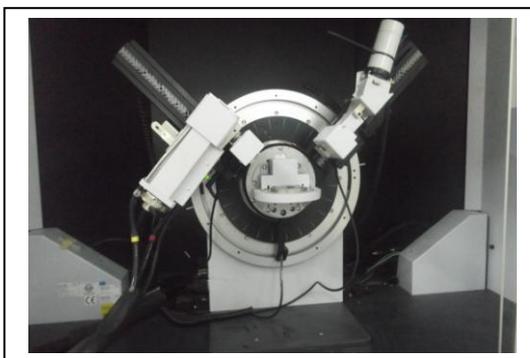
Où  $d_{hkl}$  est la distance interréticulaire séparant les plans définis par les indices de Miller (h, k, l)  $\theta$  l'angle d'incidence et donc de réflexion par rapport à ces plans et enfin  $\lambda$  la longueur d'onde des photons X.

**Exploitation des diffractogrammes :**

Le diffractogramme est un enregistrement de l'intensité diffracté en fonction de l'angle  $2\theta$  formé avec le faisceau direct. L'étude de diffractogramme permet de remonter à un grand nombre d'informations sur les caractéristiques structurales de l'échantillon telles que les structures cristallines des différentes phases, la présence des précipités etc....

Pour notre étude, on a utilisé un diffractomètre automatisé de type D8 Advance of Bruker

AXS, lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractogrammes (Figure 3.6)



**Figure 3.6:** Diffractomètre des rayons X de type D8 Advance of Bruker AXS

### 3.2.6 Microscope électronique à balayage (MEB):



**Figure 3.7:** Microscope électronique à balayage de type JEOL

# Chapitre 4

*Résultats expérimentaux  
et interprétation*

## 4.1 Introduction :

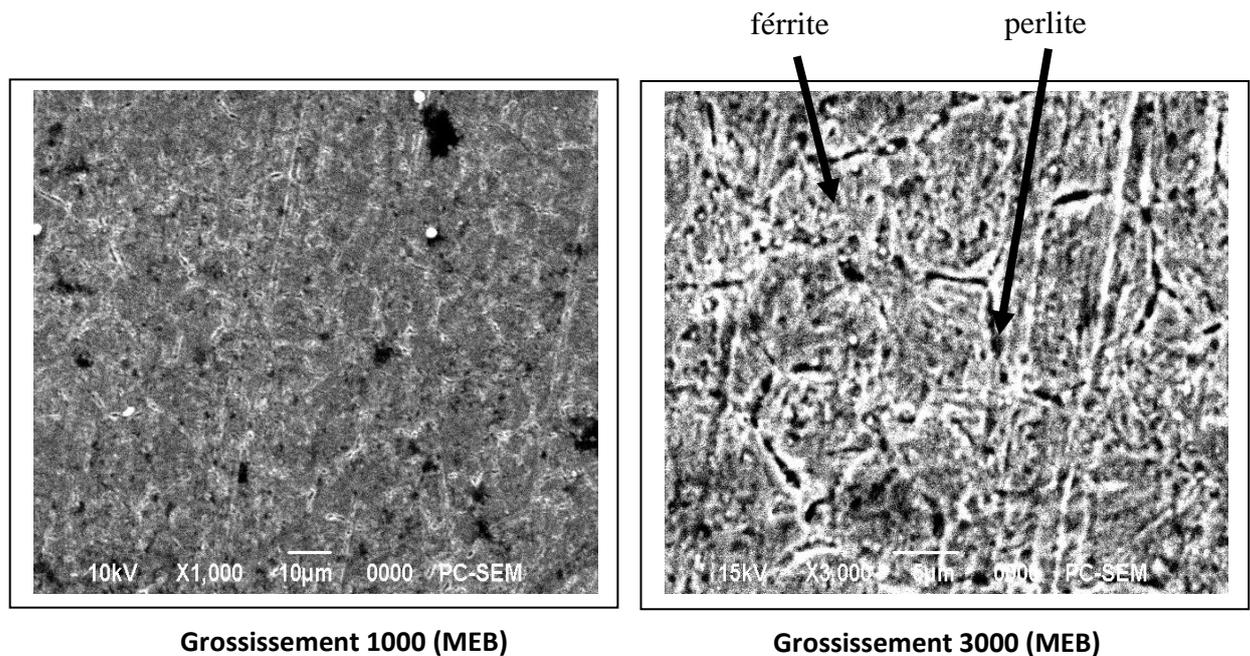
Dans ce travail nous présenterons des résultats concernant l'influence des conditions de trempe lors des traitements thermiques sur les propriétés microstructurales et mécaniques de la nuance 53MnSi4.

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 pour toutes les analyses.

## 4.2 Métallographie :

L'acier 53MnSi4 est un acier faiblement allié. Il est utilisé généralement dans la fabrication des outils mécaniques.

L'observation de la structure à l'état brut montre qu'elle est de type ferrito-perlitique (Figure 4.1)



**Figure 4.1** : la morphologie de l'acier 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, huile) pour chaque température (800 °C, 850 °C et 900 °C)

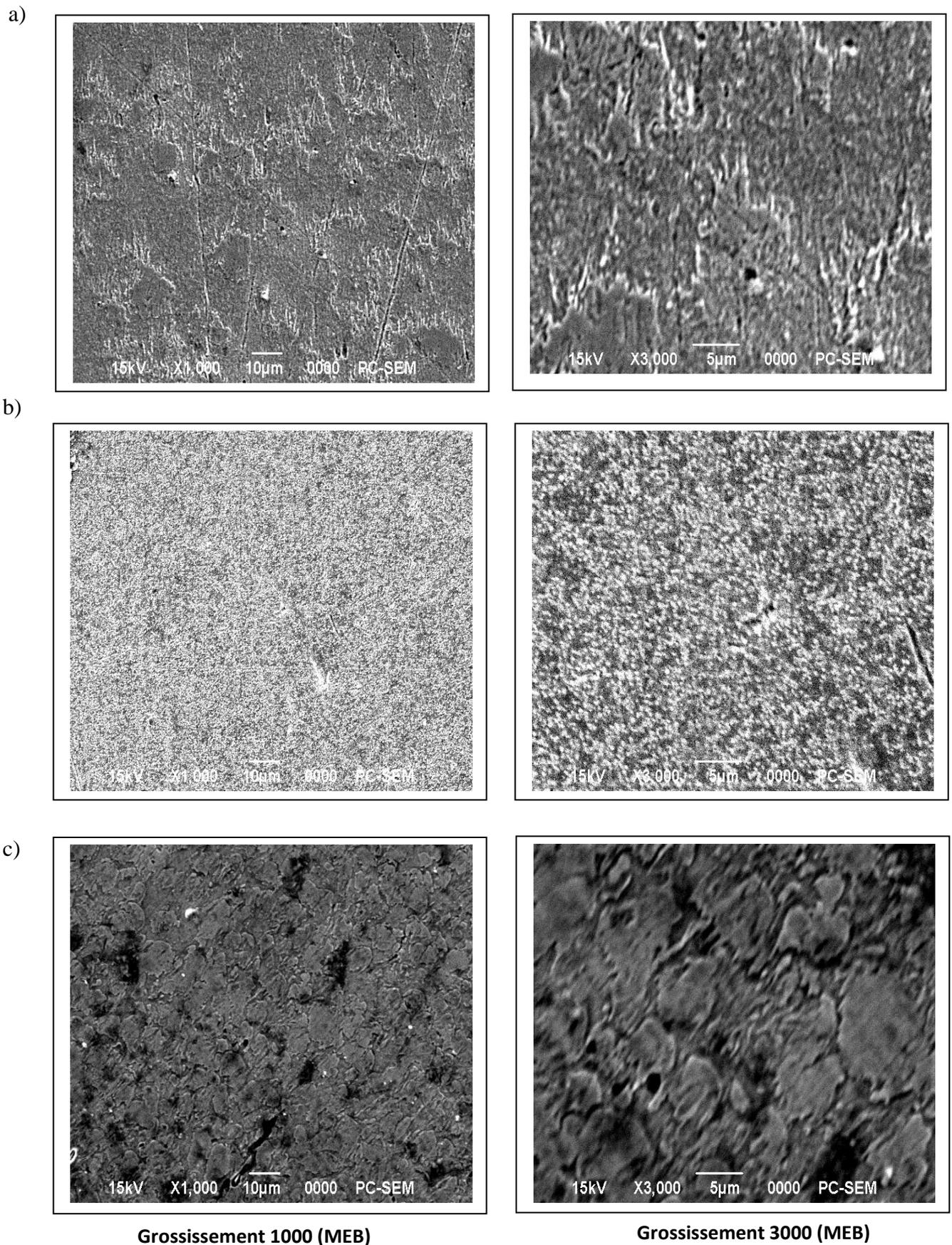
**Résultats obtenus à  $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$  :**

La figure 4.2 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à  $800^{\circ}\text{C}$ .

Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible et l'austénite se transforme en ferrite et perlite (figure 4.2.a)

Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne on observe la structure martensite-bainitique (figure 4.2.b)

Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide donc présence d'une structure martensite en lattes (figure 4.2.c)



**Figure 4.2 :** Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe  
(Homogénéisé à 800°C pendant 1 heure) [(a) air, (b) huile, (c) eau]

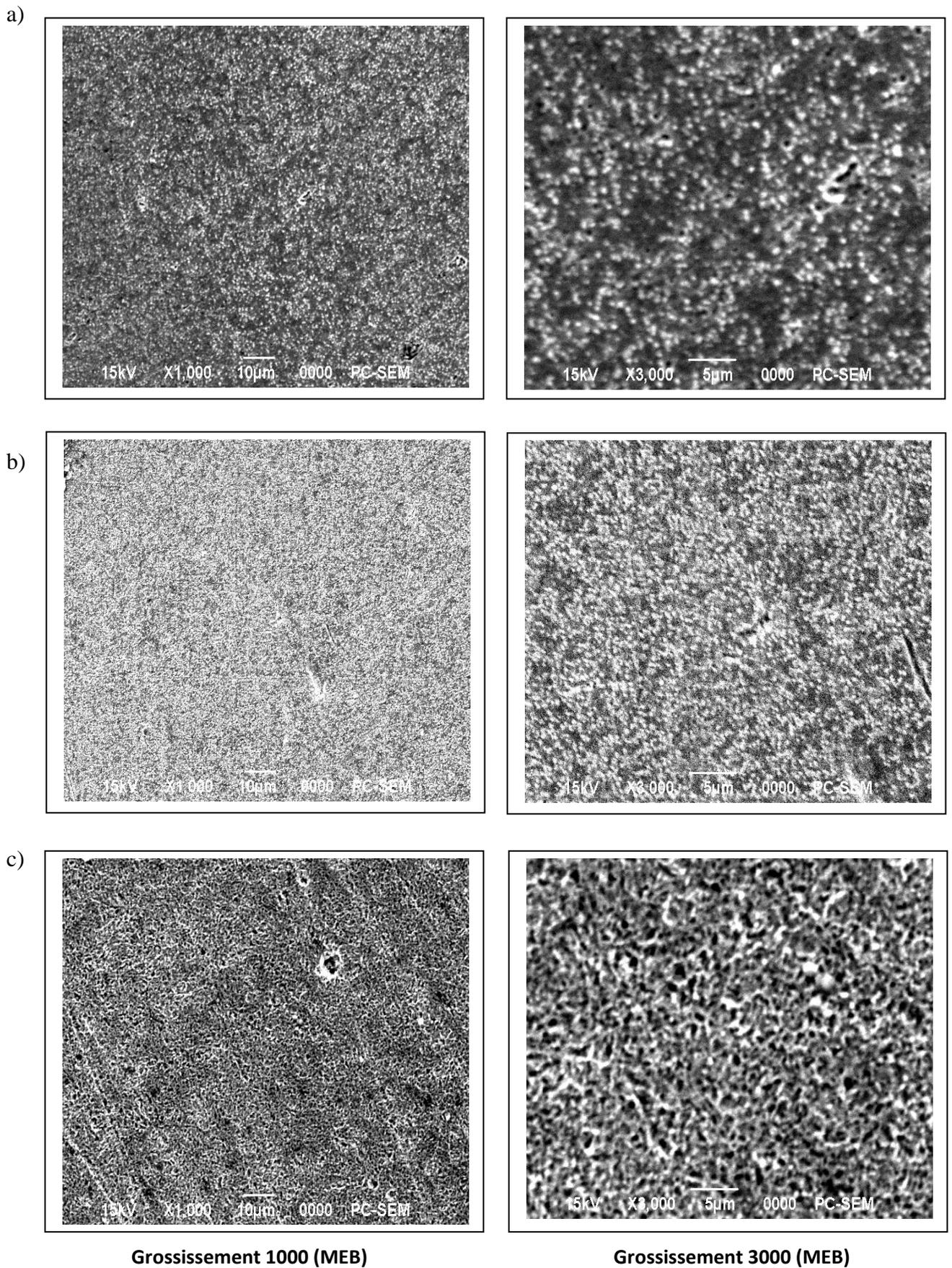
**Résultats obtenus à  $T=850^{\circ}\text{C}$  :**

La figure 4.3 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à  $850^{\circ}\text{C}$ .

Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible on remarque la ferritique (figure 4.3.a)

Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne on a une structure martensito-bainitique avec une proportion de bainite plus ou moins importante (figure 4.3.b).

Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide donc l'austénite se transforme en une structure de martensite en lattes (figure 4.3.c)



**Figure 4.3 :** Examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe  
(Homogénéisé à 850 °C pendant 1 heure) [(a) air, (b) huile, (c) eau]

**Résultats obtenus à  $T=900^{\circ}\text{C}$  :**

La figure 4.4 représente l'examen métallographique de l'acier pour différents milieux de trempe après austénitisation à  $900^{\circ}\text{C}$ .

Pour la trempe à l'air, la vitesse de refroidissement est faible on remarque la ferritique (figure 4.4.a)

Pour la trempe à l'huile la vitesse de refroidissement est moyenne on a une structure martensito-bainitique avec proportion de bainite plus importante (figure 4.4.b)

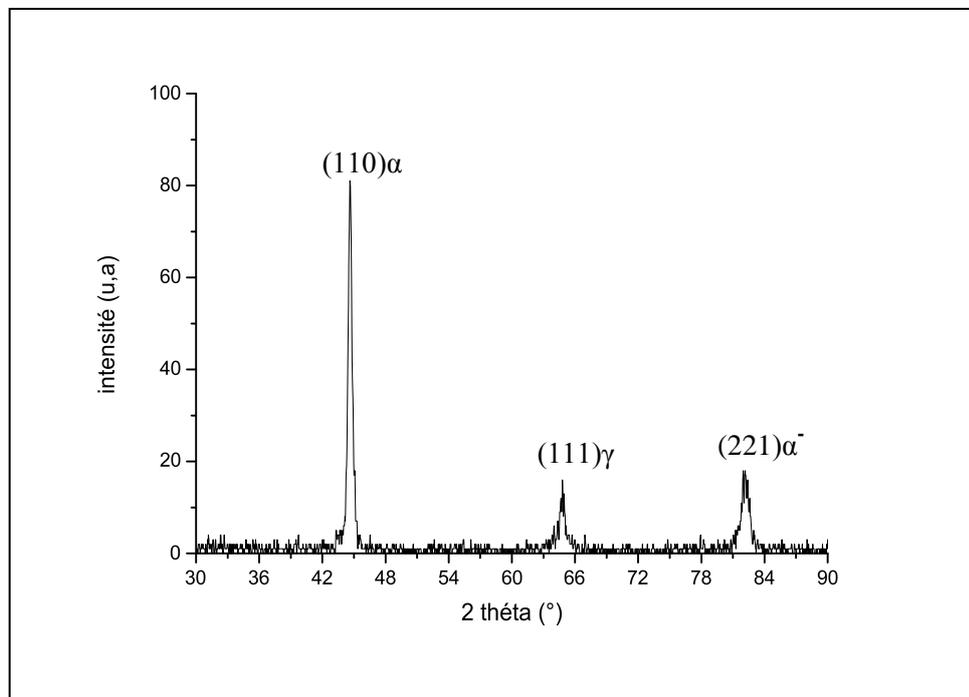
Pour la trempe à l'eau, la vitesse de refroidissement est rapide donc l'austénite se transforme a une structure de martensite en lattes (figure 4.4.c)



### 4.3 Etude par diffraction de rayons X :

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

Nous commençons par l'état brut : on observe dans la figure 4.5 clairement les pics (110) et (211) de la structure cubique de la ferrite ( $\alpha$ ) ainsi que le pic (111) de la structure cubique à face centrée de l'austénite résiduelle ( $\gamma$ ).



**Figure 4.5 :** Spectre de diffraction des rayons X de l'acier à l'état brut

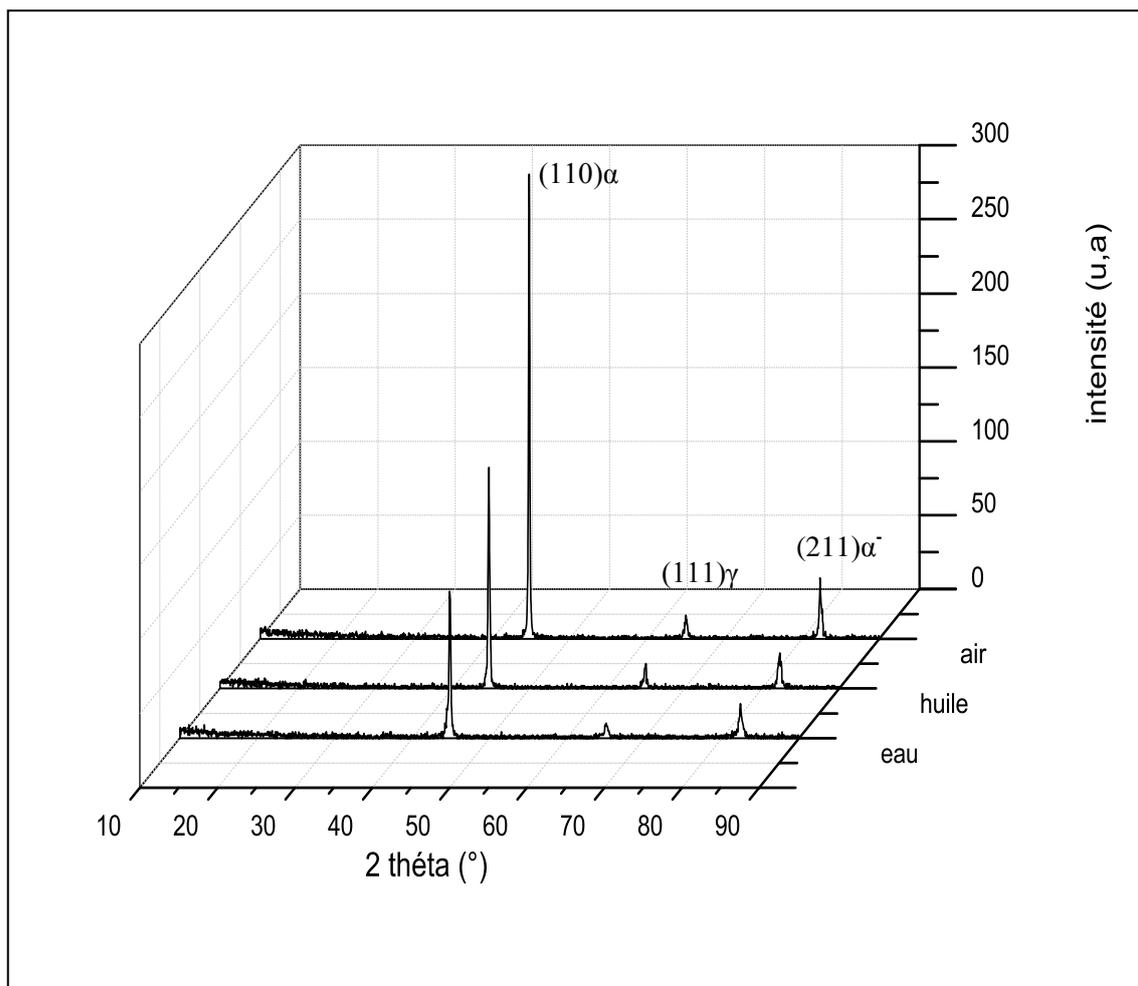
- **L'état traité :**

Des enregistrements diffractométriques ont été réalisés à partir de trois échantillons pour chaque température d'austénitisation 800°C, 850°C, 900°C.

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

**Résultats obtenus à T = 800°C :**

La figure 4.6 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite  $\alpha$  et de la martensite  $\alpha'$ , ainsi que l'évolution du pic (111) $\gamma$  de l'austénite résiduelle



**Figure 4.6 :** les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 800°C pendant 1 heure, trempé dans les milieux différents

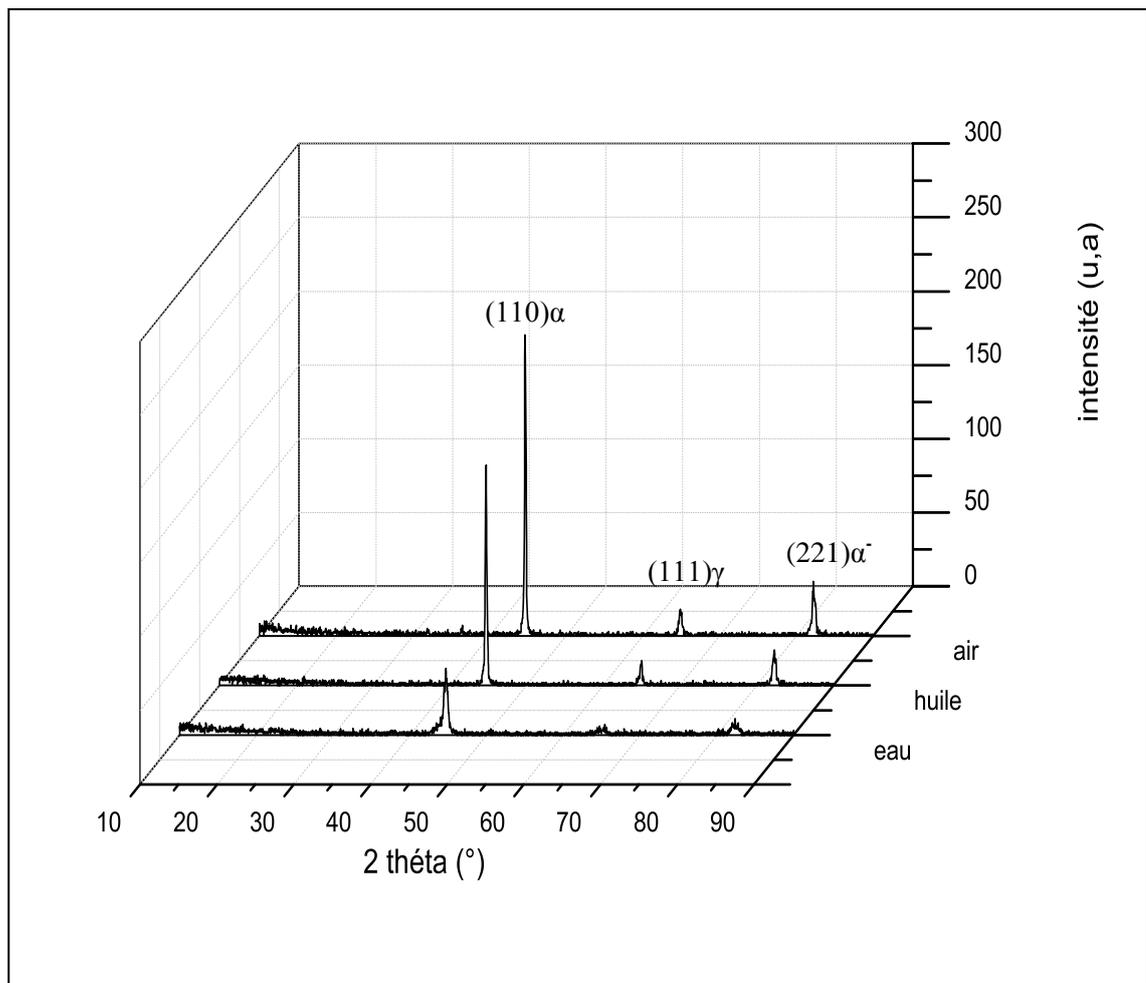
On comparant les résultats à l'état brut (figure 4.5) on peut conclure que :

La trempe à l'eau et à l'huile, on remarque 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, l'intensité des pics reprend sont intensité initiale.

### Résultats obtenus à $T = 850^{\circ}\text{C}$ :

La figure 4.7 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite  $\alpha$  et de la martensite  $\alpha'$ , ainsi que l'évolution du pic (111) $\gamma$  de l'austénite résiduelle.



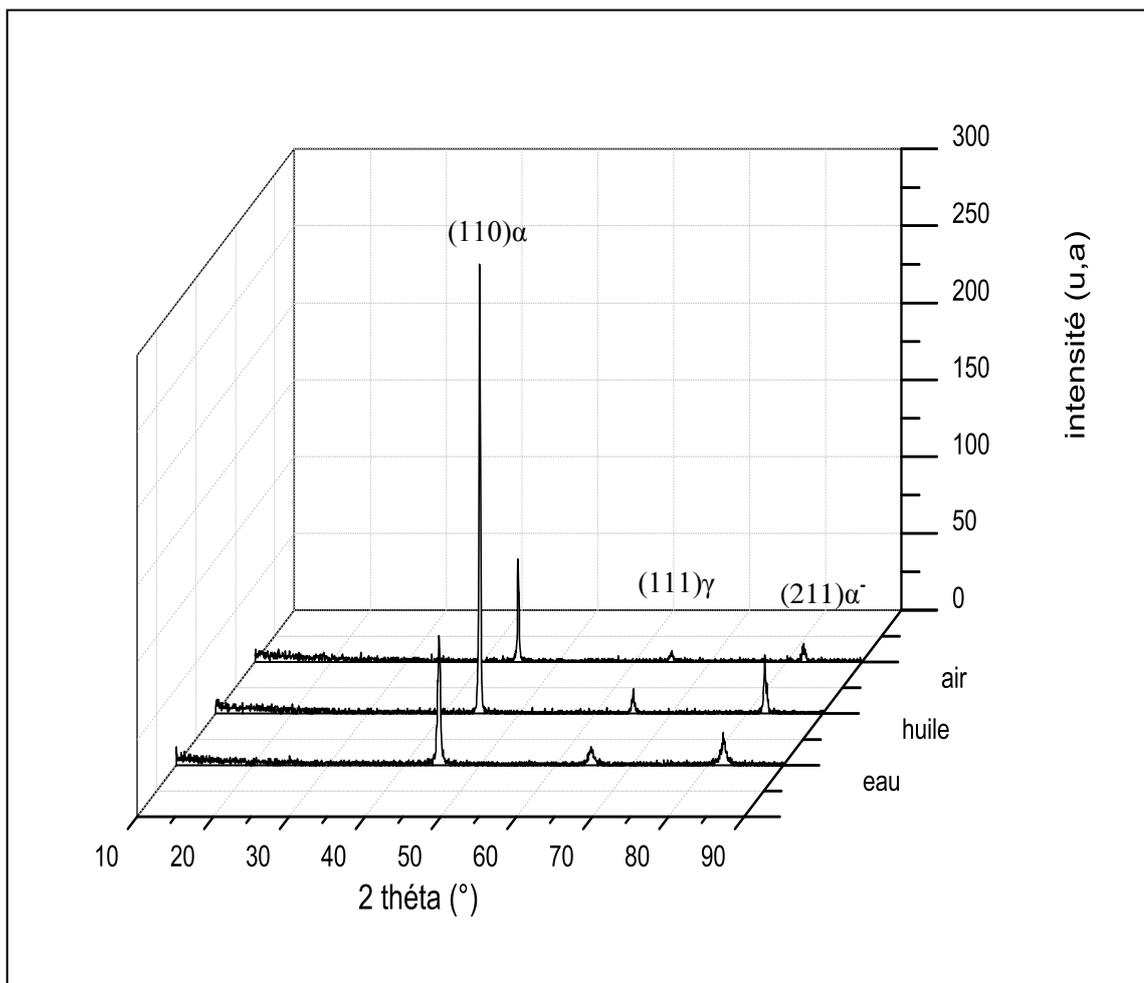
**Figure 4.7** : les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 850°C pendant 1 heure, trempé dans les milieux différents

On observe la même remarque que celle observé pour la température 800°C pour la trempe à l'air et l'huile.

Mais pour la trempe à l'eau : on à une diminution importante de intensité des trois pics due probablement à une structure compacte. L'austénite résiduelle dans cette structure est négligeable.

### Résultats obtenus à $T = 850^{\circ}\text{C}$ :

La figure 4.8 montre l'évolution de l'intensité des pics (110) et (211) de la ferrite  $\alpha$  et de la martensite  $\alpha'$ , ainsi que l'évolution du pic (111) $\gamma$  de l'austénite résiduelle.



**Figure 4.8** : les spectres de diffraction des rayons X de l'acier homogénéisé à 850°C pendant 1 heure, trempé dans les milieux différents

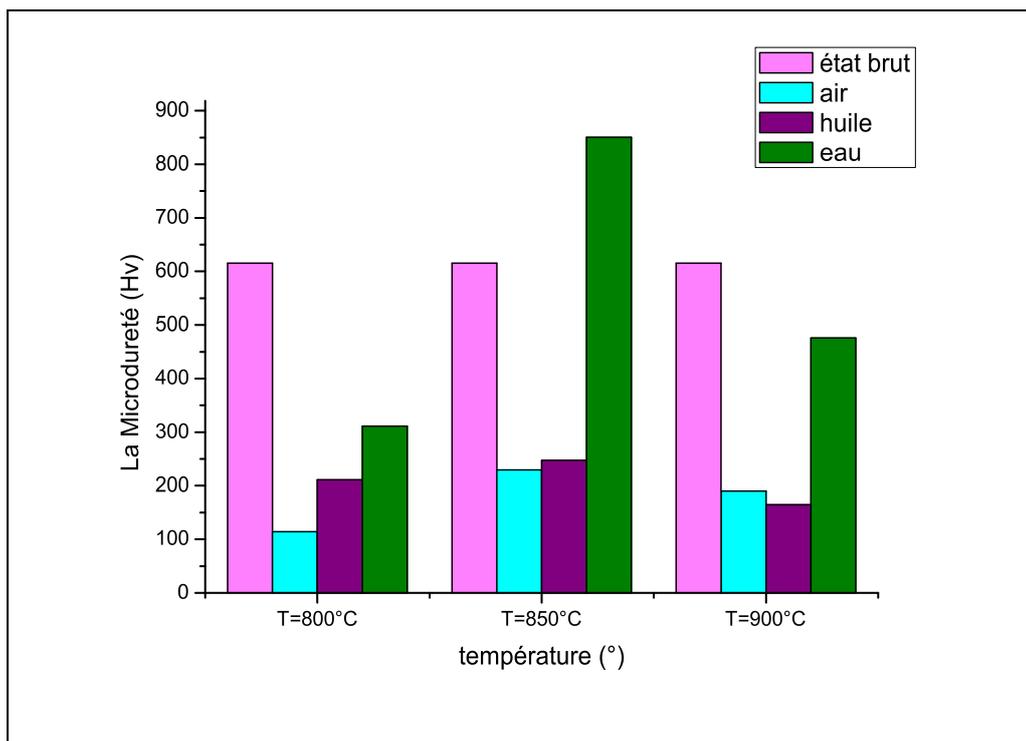
On remarque que dans la trempe à l'huile, les pics reprennent leurs intensités initiales.

Dans la trempe à l'air et à l'eau, on a une diminution d'intensité des pics  $(111)\gamma$ ,  $(110)\alpha$  et  $(211)\alpha'$ , lorsque la température  $T$  augmente. Dans le cas l'eau, on observe un élargissement de la raie  $(110)\alpha$  ceci est traduit par des grains de martensite fins donc le cristal est petit et la quantité de martensite est grande.

#### 4.4 La microdureté:

Cette technique nous a permis de déterminer la variation de la microdureté en fonction de la température d'austénitisation et en fonction du milieu de trempe.

La figure 4.9 représente la variation de la dureté en fonction du milieu de trempe, pour les trois températures (800 °C, 850 °C et 900 °C).



**Figure 4.9 :** Variation de la dureté en fonction de la température d'austénitisation

Nous remarquons :

- Pour la température  $T = 800^\circ\text{C}$  :

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).

On observe dans la trempe à l'air que la valeur de la dureté est minimale  $Hv = 114.05$ , et dans la trempe à l'eau elle est minimale  $Hv = 311.1$ .

- Pour la température  $T=850^{\circ}\text{C}$  :

On a dans la trempe à l'air et l'huile une diminution de la dureté, par rapport au cas de l'eau une augmentation de la dureté parce que on a formation de la martensite.

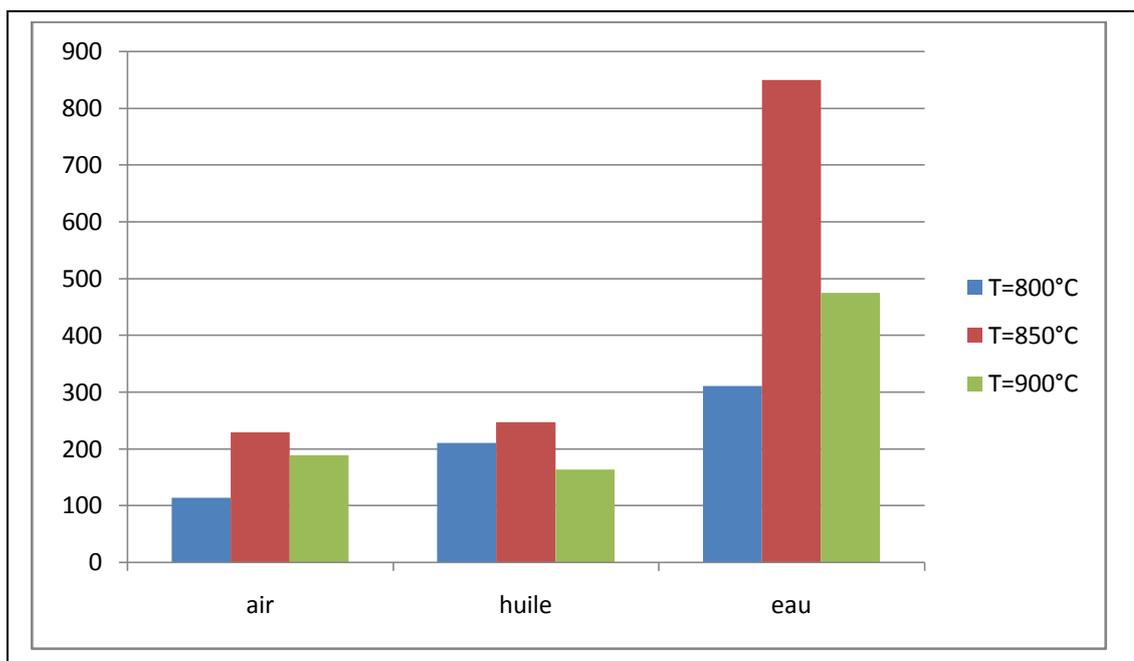
On observe dans la trempe à l'eau que la valeur de la dureté est maximale  $H_v = 850.45$

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

On dans la trempe à l'huile, l'air et l'eau une diminution de la dureté.

On observe dans la trempe à l'huile que la valeur de la dureté et minimale  $H_v = 164.3$

- Pour confirmés l'influence de la température d'austénitisation sur l'effet du milieu de la trempe figure 4.10



**Figure 4.10** : Evolution de la Microdureté en fonction de milieu de trempe

Dans la trempe à l'eau, la martensite est la plus dure dans le cas  $T = 850^{\circ}\text{C}$ , pour la même température, la trempe à l'air donne une valeur de la dureté maximale par rapport à tout les cas.

Pour la trempe à huile, la bainite dure est obtenu pour la température  $T = 850^{\circ}\text{C}$ .

Pour la trempe à l'air, l'échantillon le plus dur est obtenue pour la température  $T = 850^{\circ}\text{C}$  lorsque la perlite obtenu est fine.

D'après la figure 4.10 On peut dire quand d'austénitisation change, l'effet du milieu de trempe sur la dureté change, donc l'effet de milieu de trempe a une relation avec la température d'austénitisation.

## Conclusion

L'étude a été réalisée sur la nuance 53MnSi4 acier faiblement allié au Silicium et Manganèse. 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 structurale et mécanique.

Pour réaliser ce travail nous avons utilisé plusieurs techniques conventionnelles à savoir la microscopie optique, la diffraction des rayons X, la microscopie électronique à balayage MEB 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 ferrito perlitique.
- 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 850 °C.
- Le traitement d'austénitisation à 850 °C pendant 1 h donne naissance à une martensite la plus dure.

## Références bibliographiques

- [1] Fédération Française de l'Acier, Comment fabrique-t-on l'Acier, juillet 2012.
- [2] Michel Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux, DUNOD, Paris 2004.
- [3] Guy Murry, Aciers Généralités, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M300, Centre français d'exploitation 2002.
- [4] Fatima Zohra Lemmadi, thèse de magistère, Rapporteur Mr. A. Chala, Univ. De Biskra.
- [5] Guy Murry, Aide-mémoire Métallurgie, Métaux • Alliages • Propriétés, DUNOD, Paris 2<sup>e</sup> édition, 2010
- [6] William D. Callister, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.
- [7] Michel Bramat, Martin Villeneuve, Technologie des métaux, contrôles et essais des soudures, De Boeck, Canada juillet 2007.
- [8] Guy Murry, Transformations dans les aciers, Normalisation (AFNOR), Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 115, Centre français d'exploitation 2002.
- [9] Said Oulbani, thèse de magistère, Rapporteur Mr A. Ait Saada, Univ. De Boumerdes.
- [10] Muriel Hantcherli, pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 Avril 2010.
- [11] Cours Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers), Pr. Bensaada Said Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS, Faculté des sciences et de la technologie, Univ. De Biskra.
- [12] Cours Traitements thermiques, Classification et Désignation des aciers et fontes, Pr. Bensaada Said Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS, Faculté des sciences et de la technologie, Univ. de Biskra.
- [13] Guy Murry, Traitements thermiques dans la masse des aciers. Partie 1, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 126, Centre français d'exploitation 2002.
- [14] M. Massin, Métallurgie Pratique pour Mécaniciens, tome 1, Pyc édition 1982.
- [15] R.F. MEHL et C.WELLS, Constitution of High Purity Iron-Carbon Alloys, Technical Publication n° 798, A.I.M.E. Iron and Steel Division, 125 (1937); Metals Technology, juin 1937.
- [16] P. KOISTINEN et R.E. MARBURGER, Acta Met, (1959)
- [17] A.CHALA, thèse de magistère, Constantine (1994)

## Références bibliographiques

- [18] C.Bouchy et F.Gobin « Métallurgie »,1-Métallurgie structurale, Armond Collin(1971)
- [19] M.Aouragh thèse de magister à université d'Annaba (2007).
- [20] A.Kumar Sinha, Butter worth publishers, Ferrous Physical Metallurgy Ch 6 Martensite, (1989)
- [21] J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILIBERT et J.TALBOT, « Métallurgie générale » p231-239, (1984).
- [22] G.KRAUSS et A.R.MARDER, Met, Trans, (Sep, 1971).
- [23] D.V.EDMONDS et R.C.COCHRANE .Met, Trans ,21A, (juin 1990).
- [24] I.Lakhtine (métallugraphie et traitements thermiques des métaux) Edition Mir,Moscou 1982.

## Résumé :

Le but de ce travail est l'étude de l'influence de la trempe sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier 53MnSi4 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 et électronique (MEB) 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  $T = 850$  °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 عملية التبريد على الخصائص البنيوية و الميكانيكية لسبيكة الفولاذ 53MnSi4 التي تستعمل عادة في صناعة الأدوات الميكانيكية. لمتابعة التطورات البنيوية و الميكانيكية للعينات استعملنا عدة طرق تجريبية مثل، المجهر الضوئي و الإلكتروني و التحليل بواسطة انعراج الأشعة السينية و كذلك قياسات الصلادة. سمحت النتائج المتحصل عليها بتبيان ما يلي:

- درجة حرارة الأستنة النموذجية هي 850 ° م.
- درجة الحرارة و الوسط (الهواء، الزيت، الماء) هما أهم عاملين في المعالجة .
- التبريد بواسطة الماء يعطينا البنية المارتنسيكية.

## Abstract :

The objective of this memory is to determine the Influence of the quenching on the structures and mechanical properties of the low alloy steel 53MnSi4. This steel is usually used to manufacture mechanical tools.

To follow the structural and mechanical changes of the samples we used too many experiments like: The optical microscopy, SEMicroscopy, X-ray diffraction and Hardness

The essential results obtained are:

- The optimum austenitic temperature is 850° C
- The temperature and the environment (air, oil, water) are the most two important factors in the treatment.
- Cooling by water gives us a martenstic structure.