

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: Métallurgie physique**

Réf: .....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de:**

**MASTER**

*Thème*

**Traitement thermique d'un acier  
à outils de travail à chaud**

**Présenté Par:**

**KHERIF Rachid**

*Devant le jury:*

*Directeur de mémoire:* **Mr. ATHMANI Moussa**

*Président:* **Pr. ZIDANI Mosbah**

*Examineur:* **Dr. DERFOUF Chemseddine**

*Université de Biskra*

*Université de Biskra*

*Université de Biskra*

**Promotion : Juin 2017**

# *Remerciements*

Ce travail a été réalisé dans notre laboratoire de métallurgie en collaboration avec le  
Laboratoire de l'université de Batna.

Je remercie vivement et particulièrement **Mr. M. AHTMANI**, mon directeur de mémoire,  
pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, ses compétences scientifiques, sa rigueur et son soutien.

Je remercie aussi **Mr. H. BENTRAH**, pour ses conseils et son aide.

J'adresse également mes remerciements au responsable de laboratoire de métallurgie à Batna  
pour ses conseils et son aide.

**J'exprime mes remerciements aux autres membres du jury qui ont accepté de  
Juger ce travail :**

**Mr. M. ZIDANI**

**Mr. Ch. DERFOUF**

Je remercie également madame **INES**, responsable de laboratoire de métallurgie et madame  
**SAIDA** responsable de laboratoire de physique de l'université de Biskra.

Je remercie également Monsieur **TRIR Boubaker et Farouk**, pour son accueil au  
Laboratoire d'Hall mécanique à l'université de Biskra.

Je remercie et ma gratitude s'adresse enfin à tous ceux qui d'une manière ou  
d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.

# Dédicace

*Je dédie ce travail à ma chère maman et ma femme qui  
ont été toujours avec moi et qui m'ont donné l'aide moral.*

*A tous mes frères surtout **OMAR.***

*A tous mes amis, spécialement : **ALI, YUCEF** et **HALIM.***

*A tous mes enseignants de département de mécanique.*

*Je dédie ce travail.*

**RACHID**

## Liste des tableaux

<b>N° Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 1</b>	Composition chimique, dureté a l'état recuit, température de trempe et dureté a l'état trempe et revenu des aciers à outils pour travail à chaud.	<b>7</b>
<b>Tableau 2</b>	Choix des aciers à outils pour travail à chaud.	<b>8</b>
<b>Tableau 3</b>	Composition chimique moyenne du <b>55NiCrMoV7</b> étudié	<b>32</b>
<b>Tableau 4</b>	Composition chimique de l'acier AISI L6 d'après la norme ISO/DIS 4957	<b>32</b>

# LISTE DES FIGURES

N° Fig.	Titre	Page
<b>CHAPITRE I</b>		<b>ETUDE THEORIQUE</b>
<b>Figure 1</b>	Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu par quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud.	<b>8</b>
<b>Figure 2</b>	Evolution de la ténacité en fonction de la T (°C) de quelques aciers à outils.	<b>9</b>
<b>Figure 3</b>	Quantité des carbures en fonction de la température d'austénisation.	<b>14</b>
<b>Figure 4</b>	Micrographie d'un acier à outils à l'état recuit	<b>17</b>
<b>Figure 5</b>	Diagramme Fe-C, et diagramme TRC	<b>18</b>
<b>Figure 6</b>	Influence des éléments carburigènes sur le durcissement secondaire à 550 °C d'un acier d'outillage à 0,5% de carbone.	<b>19</b>
<b>Figure 7</b>	Cycle de traitement thermique des aciers à outils.	<b>20</b>
<b>Figure 8</b>	Micrographie d'un acier à outils trempé à 1050 °C	<b>21</b>
<b>Figure 9</b>	Influence des éléments $\alpha$ -gènes et $\gamma$ -gènes dans les aciers	<b>22</b>
<b>Figure 10</b>	Différentes structures d'un acier H11 après trempe et revenu.	<b>23</b>
<b>Figure 11</b>	Austénite résiduelle dans structure trempé	<b>24</b>
<b>CHAPITRE II</b>		<b>MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b>
<b>Figure 12</b>	Spectromètre à fluorescence X	<b>25</b>
<b>Figure 13</b>	Four électrique <i>NEBERTHERM</i>	<b>26</b>
<b>Figure 14</b>	Cycle de traitement de recuit et durcissement par trempe et revenu.	<b>27</b>
<b>Figure 15</b>	Diagramme d'équilibre Fer - Carbone.	<b>27</b>
<b>Figure 16</b>	Polisseuse <i>FORCIPOL</i>	<b>28</b>
<b>Figure 17</b>	Microscope optique	<b>29</b>
<b>Figure 18</b>	Diffractomètre des RX	<b>30</b>
<b>Figure 19</b>	Duromètre <i>WOLPERT</i>	<b>31</b>

<b>Figure 20</b>	Examen métallographique (MO) à l'état recuit ; (T = 850°C, t = 240 min)	<b>33</b>
<b>Figure 21</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état recuit 850 °C	<b>33</b>
<b>Figure 22</b>	Résultats de mesure des duretés en fonction des températures d'austénitisation	<b>34</b>
<b>Figure 23</b>	Résultats de mesure des duretés en fonction des températures de 1 <sup>er</sup> revenu.	<b>36</b>
<b>Figure 24</b>	Examen métallographique (MO) à l'état trempé ; (T = 950°C, t = 20 min ; à huile 120 °C)	<b>36</b>
<b>Figure 25</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état trempé 950 °C	<b>37</b>
<b>Figure 26</b>	Examen métallographique (MO) à l'état trempé ; (T = 1000°C, t = 20 min ; à huile 120 °C)	<b>37</b>
<b>Figure 27</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état trempé 1000 °C	<b>38</b>
<b>Figure 28</b>	Examen métallographique (MO) à l'état revenu ; (T = 550°C, t = 60 min)	<b>41</b>
<b>Figure 29</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état revenu 550 °C	<b>41</b>
<b>Figure 30</b>	Examen métallographique (MO) à l'état revenu ; (T = 500°C, t = 60 min)	<b>42</b>
<b>Figure 31</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état revenu 500 °C	<b>42</b>
<b>Figure 32</b>	Examen métallographique (MO) à l'état 2 <sup>eme</sup> revenu ; (T = 600°C, t = 60 min)	<b>44</b>
<b>Figure 33</b>	Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état 2 <sup>eme</sup> revenu 600 °C	<b>44</b>

## LISTE DES SYMBOLES

**$\alpha$**  : ferrite magnétique formée à basse température (structure Cubique Centrée, CC).

**$\delta$**  : ferrite amagnétique formée à haute température et stable dans tout le domaine de température exploré (CC).

**$\gamma$**  : austénite d'équilibre formée à haute température (structure Cubique à Faces Centrées, CFC).

**$\gamma_{\text{rés 1}}$**  : austénite résiduelle restant à température ambiante après la trempe (CFC).

**$\gamma_{\text{rév}}$**  : austénite de réversion formée au cours du traitement de revenu (CFC).

**$\gamma_{\text{rés 2}}$**  : austénite résiduelle restant à température ambiante après le revenu ; issue, au moins pour partie, de l'austénite de réversion (CFC).

**As** : « austenite start » = température à laquelle la martensite commence à se transformer en austénite pendant un chauffage.

**Af** : « austenite finish » = température à laquelle toute la martensite est transformée en austénite pendant un chauffage.

**M1** : martensite « fraîche » issue de la transformation de  $\gamma$  lors de la trempe (CC).

**M2** : martensite secondaire issue de la transformation de  $\gamma_{\text{rév}}$  au refroidissement après le revenu (CC).

**Mr** : martensite revenue avec précipitation associée (+ restauration), et donc adoucie (CC).

**Ms** : « martensite start » {laquelle l'austénite commence {se transformer en martensite pendant un refroidissement.

**Mf** : « martensite finish » = température {laquelle toute l'austénite est transformée en martensite pendant un refroidissement.

**Ta** : température d'austénitisation.

**ta** : durée du traitement d'austénitisation.

**VR** : vitesse de refroidissement.

**Tf** : température finale de trempe (20°C ou inférieure).

**Tr** : température de revenu.

**tr** : durée du traitement de revenu.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b>	<b>ETUDE THEORIQUE</b>
<b>I LES ACIERS A OUTILS</b>	
<b>I.1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Classification</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1 Les aciers à outils non alliés pour travail à froid</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2 Les aciers à outils alliés pour travail à froid</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3 Les aciers à outils alliés pour travail à chaud</b>	<b>5</b>
<b>I.2.4 Les aciers rapides</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Propriétés des aciers à outils</b>	<b>9</b>
<b>I.4 Composition chimique</b>	<b>10</b>
<b>II LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS À OUTILS</b>	
<b>II-1 Introduction</b>	<b>13</b>
<b>II.2 Recuit et traitements connexes</b>	<b>15</b>
<b>II.2.1 Types de recuit</b>	<b>15</b>
<b>II.3 Les différents produits de transformation au refroidissement</b>	<b>17</b>
<b>II.4 Trempe</b>	<b>18</b>
<b>II.4.1 Conditions d'austénitisation</b>	<b>18</b>
<b>II.4.2 Milieux de trempe</b>	<b>20</b>
<b>II.4.3 Influence d'éléments d'alliage dans les aciers</b>	<b>21</b>
<b>II.5 Le revenu</b>	<b>22</b>

<b>CHAPITRE II</b>	<b>MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b>	
<b>II.1 Matériau</b>		<b>23</b>
<b>II.2 Méthodes expérimentale</b>		<b>25</b>
<b>II.2.1 Traitements thermiques</b>		<b>25</b>
1. Recuit		25
2. Trempe		25
3. Revenu		27
<b>II.2.2 Préparation métallographique</b>		<b>27</b>
<b>II.2.3 Caractérisations après traitements thermiques</b>		<b>28</b>
<b>II.2.3.1 Etude microstructurale</b>		<b>28</b>
1. Microscopie optique		28
2. Détermination des phases en présence par DRX		29
<b>II.2.4 Propriétés mécaniques</b>		<b>31</b>
1. Dureté		31
<b>CHAPITRE III</b>	<b>RESULTATS ET INTERPRETATION</b>	
<b>III.1 Matériau</b>		<b>32</b>
<b>III.2 Traitements thermiques</b>		<b>32</b>
<b>III.2.1 Recuit</b>		<b>32</b>
<b>III.2.2 Trempe</b>		<b>34</b>
<b>III.2.3 Revenu</b>		<b>38</b>
<b>III.2.4 Caractérisation de l'état structural</b>		<b>39</b>
1. La trempe		39
2. Le revenu		40
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>45</b>

### INTRODUCTION GENERALE

La tenue des outillages, qui peut se chiffrer par la durée de vie ou la fréquence entre l'endommagement, ou le ratio consommation d'aciers à outils sur la quantité de produits mis en œuvre, est conditionnée par un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer :

- le dessin et la conception de la pièce ;
- la nature et la qualité du matériau choisi ;
- les qualités de l'usinage et de la finition (rectification par exemple) ;
- le traitement thermique et le traitement superficiel ;
- les conditions d'utilisation en service.

Tous ces facteurs influent sur l'état des contraintes liées d'une part à la mise en œuvre, d'autre part à la fonction. Leur maîtrise doit permettre une optimisation des outillages en vue d'une amélioration de la compétitivité des produits mis en œuvre par une réduction des coûts de production et une amélioration de la fiabilité des procédés de fabrication.

À la différence des aciers d'usage général et même des aciers spéciaux de construction mécanique où se développent de plus en plus des nuances dites économiques pour lesquelles les propriétés d'usage sont obtenues directement par refroidissement contrôlé après forgeage ou laminage, les hauts niveaux de caractéristiques mécaniques demandés aux aciers à outils nécessitent un traitement thermique de qualité, et cela d'autant plus que c'est la surface de ces matériaux qui est sollicitée en service. Par ailleurs, mis à part quelques cas particuliers, notamment dans le domaine des aciers d'outillage à chaud, où il est demandé un cahier des charges avec des caractéristiques mécaniques et des valeurs minimales de ténacité, le seul contrôle mécanique du traitement se réduit la plupart du temps à celui de la vérification de la dureté qui n'intéresse qu'une zone peu profonde du métal.

Pour l'utilisation des aciers à outils, la connaissance et l'exécution correcte des traitements thermiques sont indispensables ; des soins tous particuliers doivent être pris dans les différentes opérations si l'on tient compte des points suivants :

- l’outil doit garder une forme et des dimensions extrêmement précises car, dans de nombreux cas, la rectification finale est une opération qui est à réduire le plus possible, voire à supprimer ;
- l’outil travaille par sa périphérie et cette partie doit donc avoir les propriétés mécaniques optimales ;
- la réponse au traitement thermique des aciers à outils dépend dans une très large mesure de leur composition chimique et, pour une même nuance, des conditions de recuit.

L’objectif de notre travail est d’optimiser les paramètres du traitement thermique (températures de trempe et de revenu) appliqué sur l’acier étudié pour aboutir à des bonnes propriétés mécaniques.

Ce mémoire s'articule sur trois chapitres.

Le premier sera consacré à des rappels théoriques sur les principales familles des aciers à outils et leur classification, sur leurs traitements thermiques, et on présente quelques avancées sur des travaux effectués dans ce domaine, à savoir la considération du rôle de la composition chimique et les paramètres de traitements thermiques sur les propriétés finales de l’outil.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du matériau d’étude et la description des traitements appliqués et aux procédures expérimentales utilisées pour les caractérisations microstructurales et mécaniques. Ainsi qu’au moyen des techniques de diffraction des rayons X. Les propriétés mécaniques englobant la dureté est évaluées par un duromètre.

Enfin, dans un troisième chapitre, on présente tous les résultats et les discussions sur les investigations entreprises et relatives aux traitements préconisés.

Finalement on termine notre travail par une conclusion générale dont la quelle a présente les principaux résultats.

# Introduction

## I LES ACIERS A OUTILS

### I.1 Introduction

Les aciers à outils sont utilisés lors de la mise en forme des métaux à froid et à chaud (poinçons, matrices, cylindres de laminaires). Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux, mais ils diffèrent sensiblement des aciers de construction mécanique. En effet, dans le cas d'un outil, on recherche le maximum de dureté, sans fixer de limite supérieure, alors que l'acier de construction mécanique doit présenter une aptitude suffisante à l'emploi avec des caractéristiques spécifiques bien déterminées à savoir la tenue en fatigue, la résistance à la rupture et l'aptitude à subir un cycle thermomécanique au cours de la mise en œuvre. Par ailleurs, l'outil est sollicité dans la plupart des cas au niveau de sa surface qui doit supporter les contraintes les plus sévères alors que les sollicitations d'un acier de construction intéressent l'ensemble du matériau [1]. De ce fait, ces aciers sont caractérisés par une dureté élevée, une bonne résistance à l'usure et une ténacité assez élevée [2].

### I.2 Classification

La propriété essentielle d'un acier à outil est la dureté qui exprime la résistance du matériau à l'enfoncement ou à la déformation. Cette propriété doit être atteinte soit à la température ambiante, soit le plus souvent à chaud avec des maintiens sous charge souvent prolongés. Suivant la composition chimique de l'acier, des niveaux de duretés compris entre 40 et 70 HRC peuvent être obtenus après un traitement thermique de trempe et un revenu. Dans la mesure où les phénomènes de contact avec les matériaux mis en forme par déformation à froid ou à chaud ou par usinage peuvent entraîner des échauffements importants, il est nécessaire l'acier constituant l'outillage ait en plus une résistance à chaud suffisante pour éviter un adoucissement trop important en service.

C'est cette dernière propriété qui permet de classer les aciers à outils en quatre groupes conformément à la norme ISO/DIS 4957 qui a remplacé la norme NF A 35590. Cette norme s'applique à toutes les normes de produits laminés à chaud ou à froid, forgés ou étirés, et ne prend en compte que les aciers ont acquis une certaine renommée internationale. Elle désigne les aciers à outils suivent quatre groupes différents:

- les aciers non alliés pour travail à froid,
- les aciers alliés pour travail à froid (température de surface inférieur à 200 °C),
- les aciers alliés pour travail à chaud (température de surface supérieur à 200 °C),
- les aciers rapides, température de surface peuvent atteindre, voire dépasser 600 °C).

Comparativement à la norme ISO/DIS 4957, la désignation américaine fait appel à des lettres qui rappellent, soit les propriétés d'emploi (H pour chaud), soit la composition chimique (T et M pour les aciers contenant du tungstène ou du molybdène), soit les propriétés de mise en œuvre (W pour trempant à l'eau, O pour trempant à l'huile et A pour trempant à l'air).

### **I.2.1 Les aciers à outils non alliés pour travail à froid**

C'est le plus simple puisqu'ils ne contiennent que du fer et du carbone (0,45 à 1,2 %), les autres éléments y étant présents en teneurs résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisés.

A teneur en carbone égales, ces aciers acquièrent après trempe des duretés aussi élevées que celles des aciers alliés. Ils diffèrent cependant de ces derniers, par une trempabilité plus faible, ce qui limite leur emploi à des pièces de sections relativement étroites. Leur trempabilité limitée conduit également à l'emploi de moyens de trempe énergiques : eau pure ou salée, et plus rarement pour des pièces de faible section, l'huile [3]. En contrepartie, les aciers au carbone sont moins durs à l'état recuit et présentent de ce fait, une usinabilité et une aptitude de formage à froid bien meilleure [4].

### **I.2.2 Les aciers à outils alliés pour travail à froid**

Ces aciers dont la dureté à la température ambiante est supérieure à 50 HRC, mais avec un abaissement sensible au-dessus de 300 °C, peuvent être divisés en quatre groupes, selon les propriétés d'emploi requis :

**I.2.2.1 Les aciers résistants aux chocs mécaniques**, caractérisés par des teneurs en carbone comprises entre 0,35 et 0,6 % et des additions de chrome, de silicium, de nickel ou de tungstène (50WCrV8, 45NiCrMo16, 35CrMo7);

**I.2.2.2 Les aciers résistants à l'usure**, caractérisés par des teneurs en carbone supérieures à 0,9 %, avec des additions de manganèse, de chrome et de vanadium (105V, 99Cr6, 90MnCrV8, 95MnWCr5);

**I.2.2.3 Les aciers à très haute résistance à l'usure**, caractérisés par des teneurs en carbone supérieures à 0,9 % et des teneurs importantes en chrome, en molybdène et en vanadium (X100CrMoV8, X153CrMoV12, X210Cr12, X210CrW12);

**I.2.2.4 Les aciers résistant à la corrosion**, caractérisés par des additions importantes de chrome et des teneurs en carbone voisines de 0,4 % (X40Cr14, X38CrMo16).

### **I.2.3 Les aciers à outils alliés pour travail à chaud**

Ils sont caractérisés par une dureté à la température ambiante relativement élevée, comprise entre 40 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud. Ces aciers sont répartis en trois groupes:

#### **I.2.3.1 Les aciers résistants aux chocs mécaniques**

Ils sont analogues aux aciers de construction à hautes caractéristiques, mais avec une teneur en carbone plus élevée et une addition de vanadium pour augmenter la résistance au revenu (55NiCrMoV7, 50CrMoV13-15).

#### **I.2.3.2 Les aciers résistants aux chocs thermiques**

Ils sont centrés sur les compositions chimiques à 3 et 5 % de chrome, avec addition de molybdène, de tungstène, de vanadium, éventuellement de cobalt pour augmenter les propriétés mécaniques à chaud (32CrMoV12-28, X37CrMoV5-3, X38CrMoV5-1, X35CrWmoV5);

#### **I.2.3.3 Les aciers résistants à l'usure aux températures élevées**

Ils comportent des nuances à forte addition de tungstène, de chrome, de molybdène et de cobalt afin d'augmenter la pénétration de trempe et le niveau de caractéristiques mécaniques [3]. La présence de ces éléments en teneurs élevées contribue à un meilleur comportement à chaud de ces aciers, qui conservent ainsi aux températures de service des valeurs élevées de dureté et de résistance à l'usure ainsi qu'au fluage. La résistance à l'adoucissement au revenu s'en trouve également améliorée. Ces avantages comportent, en contrepartie, une moins bonne tenue aux chocs mécaniques ou thermiques. La nécessité d'appliquer des températures de trempe élevées implique la prise en considération de grandes précautions quant au

réchauffage de trempe, et au non refroidissement à l'eau des outillages ainsi chauffés [4] (X30WCrV9-3, 38CrCoWV18-17-17) [3].

#### **I.2.4 Les aciers rapides**

Ces aciers sont caractérisés par une très grande dureté supérieure à 60 HRC à la température ambiante et par une très bonne dureté à chaud. Leur composition chimique comporte plus de 0,7 % de carbone et des éléments susceptibles de former des carbures : 4 % de chrome dans tous les cas, du tungstène, du molybdène et de vanadium en proportion variables, éventuellement du cobalt pour améliorer les propriétés à chaud. Ces aciers peuvent être classés suivant l'élément de l'alliage dominant en quatre groupes:

**I.2.4.1 Les aciers rapides de base**, caractérisés par une teneur en carbone comprise entre 0,8 et 1 % et une teneur en vanadium centrée sur 1 ou 2 % (HS 1-4- 1, 2-9-2);

**I.2.4.2 Les aciers rapides surcarburés**, caractérisés par rapport aux précédents par une augmentation de la teneur en carbone et en vanadium dans la proportion du carbure de vanadium (HS 6-6-2, 6-5-3);

**I.2.4.3 Les aciers rapides au cobalt**, caractérisés par une addition de 5 % de cobalt pour améliorer les propriétés de dureté à chaud (HS 6-5-2-5);

**I.2.4.4 Les aciers surcarburés au cobalt**, caractérisés par de hautes teneurs en carbone et en vanadium, avec des additions de cobalt pouvant atteindre 10 % (HS 6- 5-3-8) [3].

Le Tableau 1 représente la désignation et la composition chimique de quelques nuances des aciers à outils de travail à chaud [4].

Et le **Tableau 2** représente le choix des aciers à outils selon la température de travail [1].

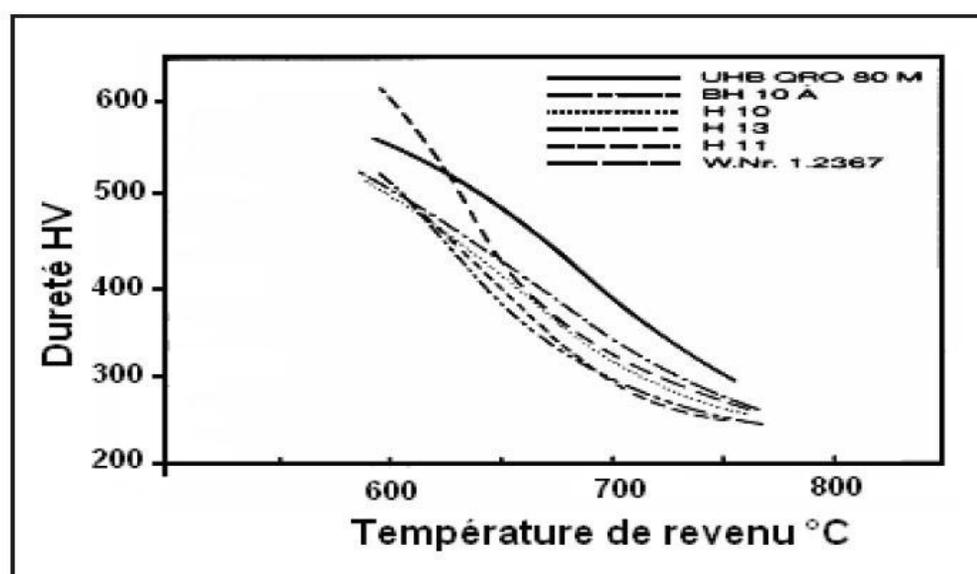
**Tableau 1 :** Composition chimique, dureté à l'état recuit, dureté à l'état trempé, température de trempé, et dureté à l'état trempé et revenu des aciers à outils pour travail à chaud, d'après la norme **ISO/DIS 4957 [4]**

Désignation De l'acier symbolique	Composition chimique en %						Dureté HB (à l'état recuit)	Essai de trempabilité			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V		W	Température de trempé °C	Milieu de trempé	Température de revenu
55NiCrMoV7	0.5-0.6 0.6	0.1-0.4 0.4	0.6-0.9 0.9	0.8-1.2 1.2	0.35-0.55 0.55	0.05-0.15 0.15	--	248	huile	500	42
32CrMoV12-28	0.28-0.35 0.35	0.1-0.4 0.4	0.15-0.45 0.45	2.7-3.2 3.2	2.5-3.0 3.0	0.4-0.7 0.7	--	229	huile	550	46
X37CrMoV5-1	0.33-0.41 0.41	0.8-1.2 1.2	0.25-0.5 0.5	4.8-5.5 5.5	1.1-1.5 1.5	0.3-0.5 0.5	--	229	huile	550	48
X38CrMoV5-3	0.35-0.4 0.4	0.3-0.5 0.5	0.3-0.5 0.5	4.8-5.2 5.2	2.7-3.2 3.2	0.4-0.6 0.6	--	229	huile	550	50
X40CrMoV5-1	0.35-0.42 0.42	0.8-1.2 1.2	0.25-0.5 0.5	4.8-5.5 5.5	1.2-1.5 1.5	0.85-1.15 1.15	--	229	huile	550	50
50CrMoV13-15	0.45-0.55 0.55	0.2-0.8 0.8	0.5-0.9 0.9	3.0-3.5 3.5	1.3-1.7 1.7	0.15-0.35 0.35	--	248	huile	510	56
X30WCrV9-3	0.25-0.35 0.35	0.1-0.4 0.4	0.15-0.45 0.45	2.5-3.2 3.2	--	0.3-0.5 0.5	8.5-9.5	241	huile	600	48
X35CrWMoV5	0.32-0.4 0.4	0.8-1.2 1.2	0.2-0.5 0.5	4.75-5.5 5.5	1.25-1.6 1.6	0.2-0.5 0.5	1.1-1.6	229	huile	550	48
38CrCoWV18-17-17	0.35-0.45 0.45	0.15-0.5 0.5	0.2-0.5 0.5	4.0-4.7 4.7	0.3-0.5 0.5	1.7-2.1 2.1	3.8-4.5	260	huile	600	48

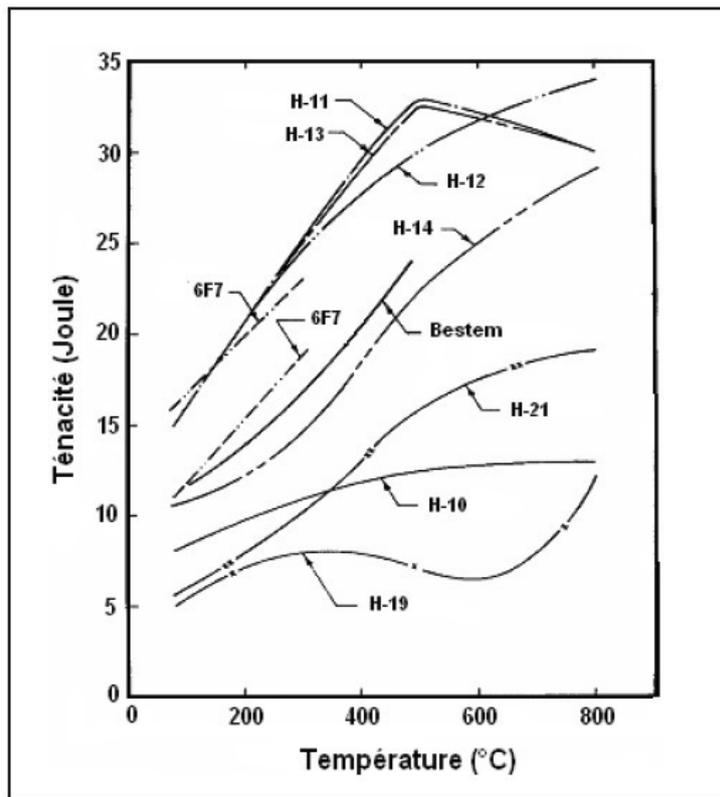
<b>Tableau 2 : Choix des aciers à outils pour travail à chaud<sup>(1)</sup> [1]</b>								
Niveau de résistance pour l'emploi à la température ambiante <b>MPa</b>	Température de travail (°C)							
	400	450	500	550	600	650	700	
1100 à 1250	55NCDV7 45CDV6 40NCD16					Z38CDV5 32DCV28 Z30WCV9	Z30WCV9	
1250 à 1400	55NCDV7 45CDV6		55NCDV7 45CDV6 20DN34-13 Z38CDV5	45CDV6 20DN34-13 Z38CDV5 Z35CWDV5 32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>	Z38CDV5 Z35CWDV5 32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>	Z32WCV5 Z30WCV9 Y80DCV42-16		
1400 à 1600	55NCDV7 45CDV6	45CDV6 Z38CDV5	Z38CDV5 Z35CWDV5 Z32WCV5 32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>	Z38CDV5 Z35CWDV5 32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>	Z35CWDV5 Z32WCV5 Z30WCV9 Y80DCV42-16 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>	Z30WCV9 Y80DCV42-16		
1600 à 1750	Z38CDV5 Z35CWDV5 32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup>				32DCV28 5%Cr-3%Mo <sup>(2)</sup> Z30WCV9			
1750 à 1900	Z38CDV5 Z32WCV5 Z30WCV9 Y80DCV42-16		Z32WCV5 Z30WCV9 Y80DCV42-16	Z30WCV9 Y80DCV42-16				

**(1)** Ce tableau n'est donné qu'à titre indicatif car il est souvent difficile, par des essais de laboratoire, de prévoir avec certitude le comportement de l'outil en service.

**(2)** Nuance non encore normalisée.



**Figure 1 :** Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu par quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud [5]



**Figure 2** : Evolution de la ténacité en fonction de la température de quelques aciers à outils [5]

### I.3 Propriétés des aciers à outils

#### I.3.1 La dureté

Il faut que la dureté soit élevée si l'on veut éviter que des déformations ne se produisent en service, et si l'on veut doter l'acier d'une bonne résistance à l'enfoncement. Par ailleurs, l'acier doit souvent faire preuve d'une dureté suffisante à chaud (jusqu'à 600°C). A titre d'exemple, en Figure 1 on présente la variation de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques aciers à outils [6].

#### I.3.2 La trempabilité

Les outils doivent avoir des propriétés homogènes ; pour les pièces massives, ils doivent présenter une bonne trempabilité. Un grand pouvoir trempant est également nécessaire si l'on veut éviter que des déformations en cours de traitement ou en cours d'utilisation n'apparaissent.

### **I.3.3 La tenue à chaud**

La tenue à chaud est essentielle dans beaucoup de cas d'outils de coupe rapide, moules, filières d'extrusion, matrice de forgeage,...etc. En plus de la dureté, la tenue à chaud doit reposer sur de bonnes propriétés mécaniques, une bonne résistance au fluage et une excellente résistance à l'oxydation.

### **I.3.4 La ténacité**

Les cadences de fabrication étant de plus en plus élevées, il faut que les aciers à outils résistent bien aux chocs, sans se briser ni s'écailler. La **Figure 2** représente l'évolution de la ténacité de quelques aciers à outils en fonction de la température.

### **I.3.5 La résistance à l'usure**

Les outils (de coupe ou de mise en forme) sont en continuel frottement avec les pièces qu'ils servent à fabriquer, ainsi, ils doivent conserver leur tranchant et leur géométrie le plus longtemps possible en l'occurrence, ils doivent présenter une bonne résistance à l'usure [6].

### **I.3.6 La résistance aux chocs thermiques**

Plusieurs types d'outils sont soumis à des chocs thermiques sévères et nombreux, auxquels ils doivent résister sans se déformer ni se fissurer [6].

## **I.4 Composition chimique**

L'obtention de caractéristiques mécaniques que requièrent les aciers d'outillages nécessite l'ajout à l'acier de base d'un certain nombre d'éléments d'alliage carburigènes (chrome, tungstène, molybdène, vanadium) afin d'obtenir des carbures spéciaux aussi bien après l'élaboration et les transformations à chaud (carbures primaires) qu'après traitement thermique (carbures secondaires). A ces éléments d'alliages constituant la base des aciers à outils peut également s'ajouter d'autres éléments pour améliorer telle ou telle propriété fonctionnelle [4]:

### **I.4.1 Le Carbone**

C'est l'élément essentiel de durcissement de l'acier. Au-delà de 0,6 % de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par un haut niveau de dureté correspond au domaine des aciers de travail à froid et des aciers à coupe rapide. Il faut noter que l'augmentation de la teneur en carbone conduit à l'abaissement de la température du liquidus et du solidus réduisant ainsi les domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

### **I.4.2 Le Chrome**

Cet élément est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0,5 à 17 %. Cet élément alphagène joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Bien qu'ayant un pouvoir carburigène inférieur à celui du tungstène, il forme des carbures du type  $M_7C_3$  qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement du grain lors de l'austénitisation [1].

### **I.4.3 Le Tungstène**

Il a été l'un des éléments d'alliage les plus employés dans le domaine des aciers à outils en raison de son pouvoir carburigène très important donnant naissance à des carbures de haute dureté ce qui confèrent aux aciers une grande résistance à l'usure. De plus, favorise le durcissement secondaire [1].

### **I.4.4 Le Molybdène**

Cet élément a un comportement analogue à celui du tungstène. Cependant, sa diffusivité dans le fer est quatre fois supérieure à celle du tungstène, ce qui entraîne une moins grande sensibilité de cet élément au phénomène de ségrégation. Les aciers au molybdène présentent, par rapport aux aciers au tungstène, un certain nombre d'avantages (meilleure ductilité et densité plus faible; mise en solution plus facile des carbures de molybdène) et d'inconvénients (plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation catastrophique pour des maintiens entre 1000 et 1100 °C, plus grande sensibilité au phénomène de surchauffe, d'où réduction de la fourchette de température de trempé [1]).

#### **I.4.5 Le cobalt**

Il améliore les propriétés à chaud et la ténacité des oxydes formés en service,

#### **I.4.6 Le manganèse et le nickel**

Ils augmentent la trempabilité des aciers à outils. Le nickel a un effet favorable sur la résistance aux chocs mécaniques, ainsi que son influence plutôt défavorable sur la résistance au revenu.

#### **I.4.7 Le silicium**

Il contribue à l'amélioration des propriétés élastiques, notamment pour les emplois à des températures inférieures à 300 °C, et qui améliore la pénétration de trempe par effet de synergie notamment avec le molybdène,

D'autres éléments d'alliage présentent un aspect plus prospectif, comme l'azote qui est ajouté au moment de l'élaboration soit par l'intermédiaire de ferroalliages nitrurés, soit par coulée sous laitier avec mise sous pression à 4 bars pour faciliter son insertion. Ajouter en substitution partielle au carbone, l'azote entraîne une amélioration des propriétés mécaniques à chaud et de la résistance à la corrosion d'acier à outils contenant des teneurs en chrome égales 12% au minimum. Par contre, il abaisse la résistance aux chocs, l'aptitude à l'usinage par des moyens comme l'électroérosion, ainsi que l'aptitude au soudage [4]

## II LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS À OUTILS

## II-1 Introduction :

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et maintien, suivies d'un refroidissement, et qui ont pour but de donner à une pièce mécanique les propriétés les plus convenables, pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les propriétés de résistance et de réduire les défauts, en particulier la fragilité. Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique, dans la plupart des cas, un traitement thermique approprié.

D'une manière générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition, mais apporte des modifications du point de vue :

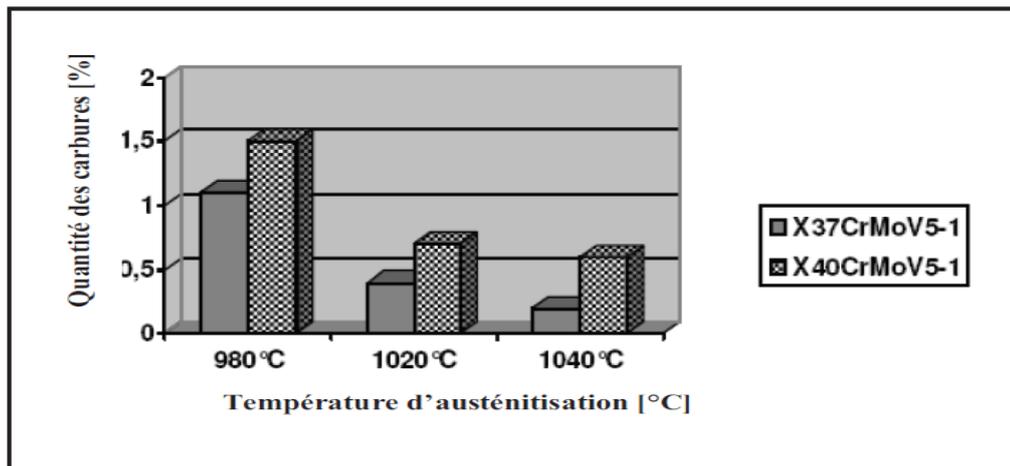
- ❖ Constitution (état du carbone, forme allotropique du fer).
- ❖ Structure (taille du grain, répartition des constituants).
- ❖ Etat de contraintes (à cause des gradients de température).

Les paramètres des traitements thermiques dépendent :

- ❖ Du produit à traiter (composition chimique, forme et volume des pièces ...)
- ❖ De la qualité du produit que l'on veut obtenir en vue de l'application (propriété, structure...) [7].

Les traitements thermiques adéquats des aciers de travail à chaud sont de grande importance pour les propriétés de leur mise en service.

Les aciers à outils sont habituellement livrés à l'état recuit à partir duquel la microstructure est composée d'une matrice ferritique englobant des carbures plus ou moins globulaires. Habituellement, les aciers à outils de travail à chaud présentent une teneur en carbure de 5 % à l'état recuit. Le durcissement de l'acier, nécessite la dissolution de la plupart des carbures dans la matrice. A titre d'exemple, La **Figure 3** représente la quantité des carbures en fonction de la température d'austénitisation de deux types d'acier à outils H11 et H13. Il y est remarquable que plus la température d'austénitisation est élevée plus la dissolution des carbures est importante impliquant toutefois un problème de grossissement de grains [4].



**Figure 3 :** Quantité des carbures en fonction de la température d'austénitisation [4]

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage et qui sont imposés en fonction des prescriptions que doivent satisfaire les semi-produits (pièce moulées, forgées, laminées, etc.) et les produits finis sont : 1) le recuit ; 2) la normalisation ; 3) la trempe ; 4) le revenu et le vieillissement [8].

L'augmentation de la teneur en carbone et en élément d'alliage élève la température de recristallisation. Pour assurer la recristallisation suivant le volume tout entier et réduire la durée du processus, la température de recuit doit dépasser celle de seuil de recristallisation. Dans le cas des aciers à 0.08 ou 0.2 % C, les plus utilisés dans le travail à froid (laminage, emboutissage, tréfilage), cette température est de 680 à 700 °C. Les rondins calibrés (étiré à froid) en acier allié à haut carbone (au chrome, chrome-silicium, etc.) sont recuits à 730 °C. La durée de chauffage est de 0.5 à 1.5 h.

Recuit de détente ou de stabilisation. Cette forme de recuit est appliquée aux pièces moulées, produits soudés, élément usinés, etc., dans lesquels les gammes de fabrication précédentes ont produit des contraintes résiduelles dues au refroidissement irrégulier, à la déformation plastique hétérogène, etc. La température de ce recuit est choisie entre 200 et 700 °C, le plus souvent entre 350 et 600 °C ordinairement, le maintien établi par voie expérimentale est de quelques heures.

Les contraintes résiduelles sont également supprimées par d'autres formes de recuit, par exemple, par le recuit de recristallisation, avec recristallisation de phase, ainsi que par le revenu, surtout par le revenu à haut température, de l'acier trempé [8].

## **II.2 Recuit et traitements connexes**

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 [2].

### **II.2.1 Types de recuit**

#### **II.2.1.1 Recuit de normalisation**

Chauffage dans le domaine austénitique ( $50^{\circ}\text{C}$  au-dessus de la température d'austénitisation,  $A_3$ ) et maintien pendant environ une heure suivi d'un refroidissement à l'air. La structure obtenue est un mélange de ferrite et de perlite fine. Une microstructure uniforme (affinement des grains) et une amélioration des propriétés de l'acier après une déformation à chaud sont recherchées.

#### **II.2.1.2 Recuit complet**

Semblable à la normalisation ce traitement est toutefois destiné à l'obtention d'une perlite plus grossière et à un adoucissement plus marqué des propriétés; le refroidissement est dans le four.

### **II.2.1.3 Recuit de coalescence**

Chauffage et maintien prolongé à une température légèrement inférieure à la température de début de transformation A1. L'obtention d'une perlite globularisée est visée, afin de rendre les aciers durs plus facilement usinables. La structure obtenue est moins dure que celle d'une perlite lamellaire.

### **II.2.1.4 Recuit de recristallisation**

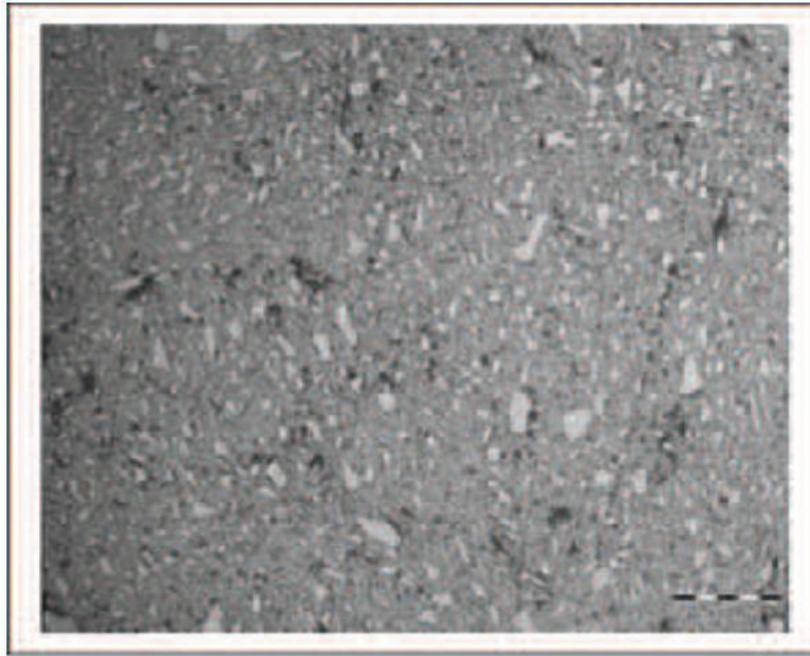
Chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 700 °C) et contrôle du refroidissement; ce traitement est appliqué aux produits déformés à froid afin d'éviter les structures d'écrouissage et faciliter ainsi une mise en forme ultérieure.

### **II.2.1.5 Recuit de détente**

Chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 650 °C) avec refroidissement lent. Ce traitement est destiné à réduire, voire éliminer les contraintes internes engendrées au cours de la fabrication [4].

### **II.2.1.6 Recuit d'homogénéisation**

Lors de la première solidification, des phénomènes de ségrégation ont lieu se traduisant par une répartition hétérogène à l'échelle du grain austénitique des éléments d'addition et du carbone. Cette hétérogénéité chimique, qui se conserve plus ou moins lors des transformations ultérieures, est néfaste pour les propriétés du métal (réponse au traitement thermique de trempe, difficulté de travail à chaud). Le recuit d'homogénéisation permet d'éliminer ou réduire cette hétérogénéité en maintenant l'acier dans le domaine austénitique. L'homogénéisation a donc lieu par diffusion dans la phase g à une vitesse d'autant plus grande que la température de maintien est plus élevée [4].



**Figure.4** : Micrographie d'un acier à outils à l'état recuit [5]

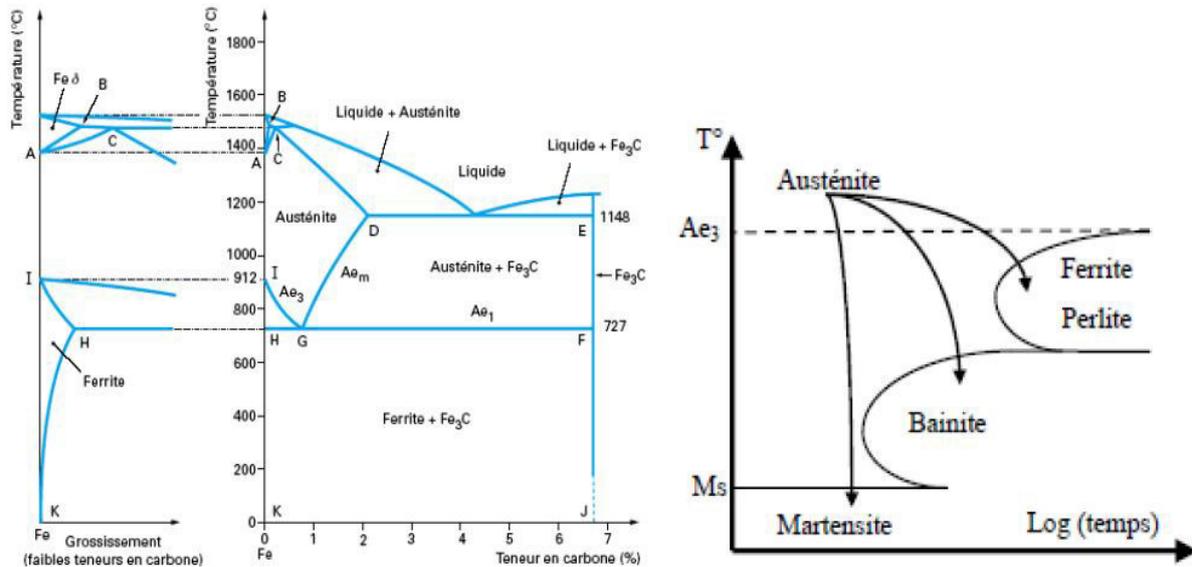
### II.3 Les différents produits de transformation au refroidissement :

Selon les conditions de refroidissement et la composition de l'alliage, différentes transformations de phases à l'état solide peuvent se produire (**fig.5**).

- Si la vitesse de refroidissement est faible (*inférieure à 1°C/s*), on se trouve dans un état proche de l'équilibre. La diffusion du carbone est alors possible. Le refroidissement de la phase austénitique va conduire à la formation d'un mélange de fer  $\alpha$  et de cémentite  $Fe_3C$ . La température de début de transformation ferritique est notée **Ar<sub>3</sub>**.

- Si la vitesse de refroidissement est rapide (*supérieure à 80°C/s*), le carbone ne peut pas diffuser et se retrouve alors piégé dans la maille. La transformation se produit hors équilibre et conduit à la formation d'une phase métastable obtenue par trempe : la martensite. La température de début de transformation martensitique est notée **Ms**. La capacité d'un acier à former de la martensite dépend de sa trempabilité, i.e. son aptitude à éviter la formation du fer  $\alpha$  et de  $Fe_3C$  lors du refroidissement. La trempabilité peut être augmentée à l'aide d'éléments d'alliage. Les plus efficaces sont, par ordre décroissant d'influence : C, Mo, Va, Cr, Mn, Ni, Si.

- Pour des vitesses de refroidissement intermédiaires, des structures bainitiques sont observées. Il s'agit d'agrégats formés de plaquettes de ferrite saturées en carbone et de cémentite, dont l'aspect diffère suivant leur température de début de transformation **Bs** [9].



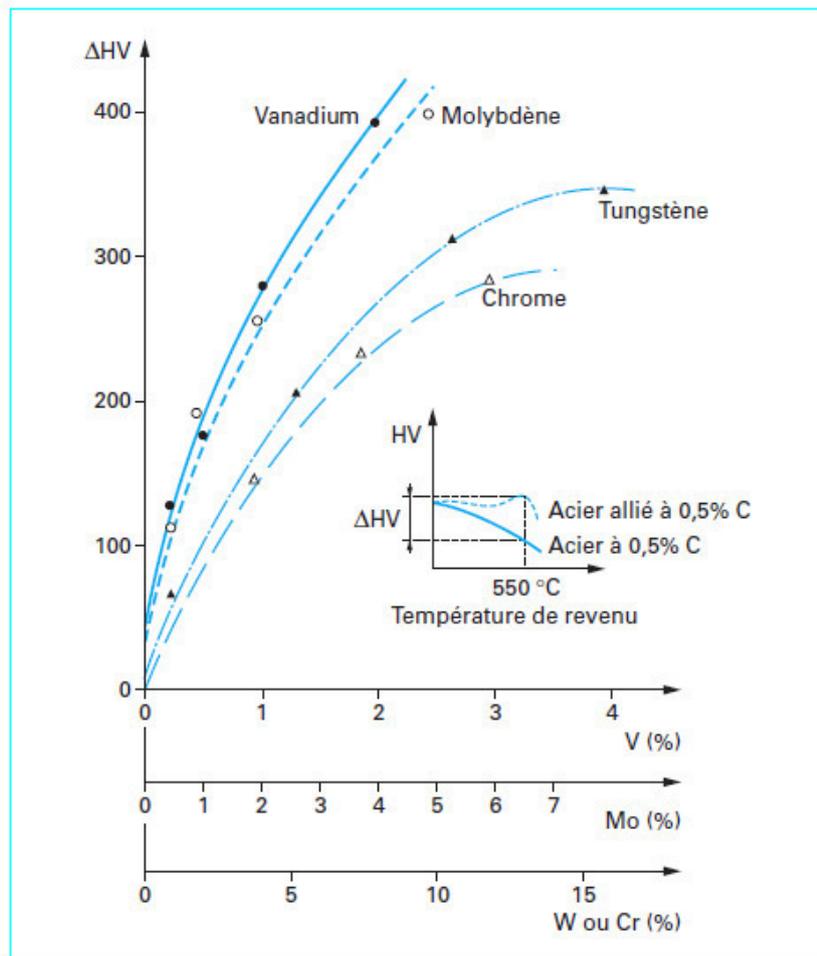
## II.4 Trempe

### II.4.1 Conditions d'austénitisation

Lors de la montée en température, la structure ferrite – carbures de l'acier à outils se transforme en austénite, avec ou sans carbures selon la composition chimique de l'acier. La formation de l'austénite commence vers 720 °C dans le cas d'un acier à outils non allié, avec ou sans zone intermédiaire Ac1- Ac3 selon la teneur en carbone.

Cette température est fortement augmentée par tous les éléments alphagènes (chrome, molybdène, tungstène, vanadium, silicium) qui tendent à réduire le domaine austénitique du diagramme fer carbone et est abaissée par les éléments gammagènes tels que le nickel et le manganèse qui ont un effet inverse.

**La Figure 6** représente l'influence des éléments carburigènes sur le durcissement d'un acier d'outillage à 0,5% de carbone.



**Figure 6 :** Influence des éléments carburigènes sur le durcissement secondaire à 550 °C d'un acier d'outillage à 0,5% de carbone [10]

#### II.4.1.1 Aciers à outils peu alliés

La structure de ces aciers à l'état recuit est constituée par de la ferrite et des carbures du type  $M_3C$  (cémentite plus ou moins substituée); la remise en solution de ce type de carbures est aisée dans le domaine austénitique, et la température de trempe est choisie en général 50 °C au-dessus du point correspondant à la fin de la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Cette température est un bon compromis entre une mise en solution suffisante des carbures et une taille de grains correcte. Le temps de maintien à cette température doit assurer une homogénéité des conditions d'austénitisation dans la totalité du volume de l'outil.

### II.4.1.2 Aciers à outils alliés

Pour les aciers à outils alliés et les aciers à outils lédeburitiques, la température d'austénitisation est plus élevée car la mise en solution des carbures  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  et  $MC$  de la structure à l'état recuit est beaucoup plus difficile. Les conditions de remise en solution de ces carbures dépendent de trois paramètres : la température de recuit, la température d'austénitisation et le temps de maintien à cette dernière température [10].

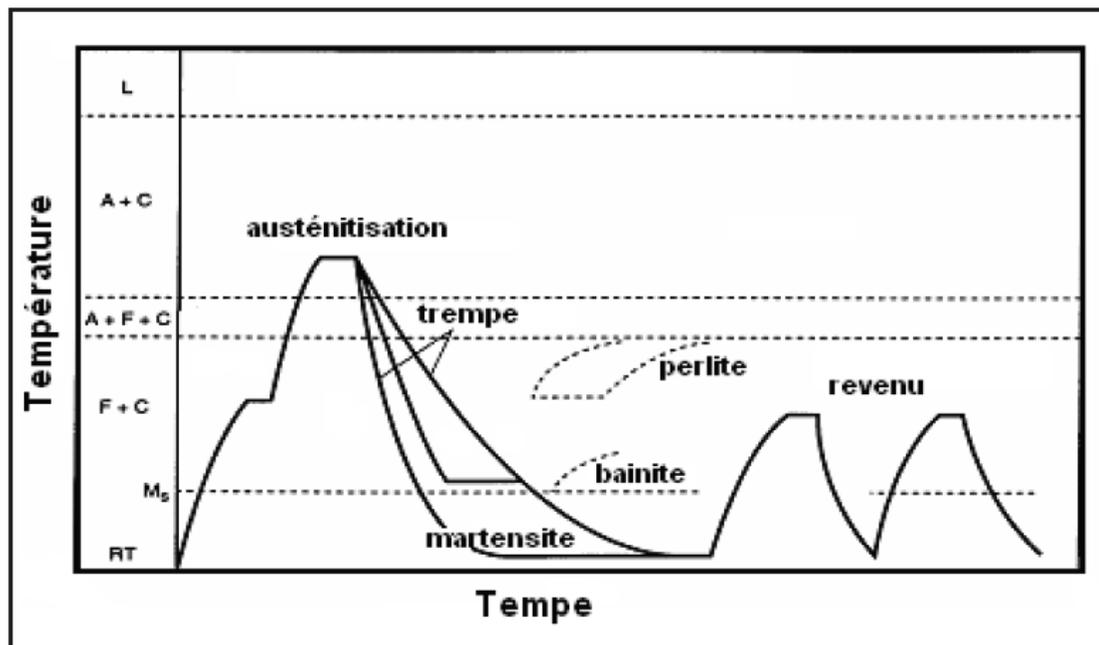


Figure 7: Cycle de traitement thermique des aciers à outils [5]

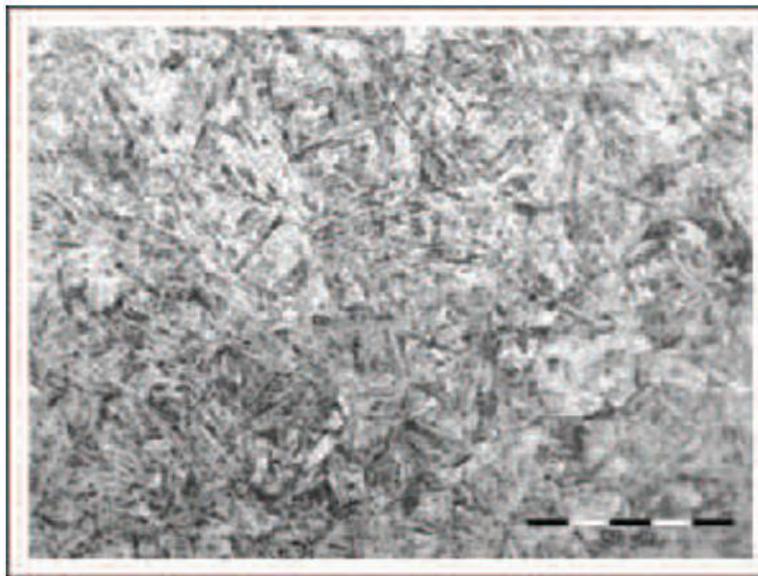
### II.4.2 Milieux de trempe

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- gazeux : air, gaz ( $N_2$ ,  $Ar$ ,  $H_2$ ,  $He$ , etc.);
- liquide : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant);
- mixte : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent).

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion). Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- des propriétés thermiques du métal;
- de la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.);
- de la position du point considéré dans la section de la pièce;
- des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment);
- de la température du milieu de trempe [1].



**Figure 8** : Micrographie d'un acier à outils trempé à 1050 °C [4]

#### II.4.3 Influence d'éléments d'alliage dans les aciers

Les aciers contiennent souvent des éléments d'alliage qui sont susceptibles de modifier leurs états d'équilibre. Une première indication concernant ces effets peut être tirée de l'examen des diagrammes binaires fer-éléments d'alliage.

En effet, certains éléments d'alliage, tels le Chrome, augmentent la stabilité de la phase  $\alpha$  au point que l'alliage, au-delà d'une certaine teneur, reste CC à toutes températures ; un tel

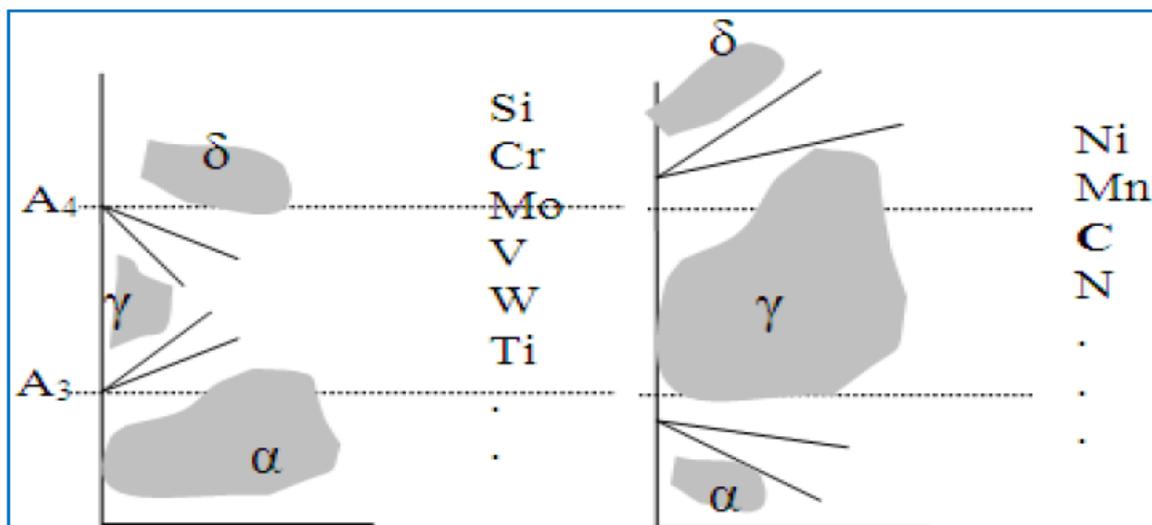
élément est dit alphagène. La liste des éléments alphagène comprend presque tous les éléments d'alliage habituels tels que Si, Al, Cr, Mo, Ti, W.

D'autres éléments d'alliage, tels le Nickel, augmentent au contraire la stabilité de la phase  $\gamma$  au point qu'au-delà d'une certaine teneur, l'alliage puisse rester CFC quelle que soit la température.

Un tel élément est dit gammagène ; la liste des éléments gammagènes est assez limitée puisqu'elle ne comporte que Ni, Mn et Cu.

Mais il est nécessaire de considérer aussi l'influence des éléments d'alliage sur les états d'équilibre du système fer-carbone. Dans ce domaine, on constate tout d'abord que les éléments alphagène augmentent la surface du domaine dans lequel la phase  $\alpha$  est stable [11].

La **Figure 9** illustre l'influence des éléments  $\alpha$ -gènes et  $\gamma$ -gènes dans les aciers.



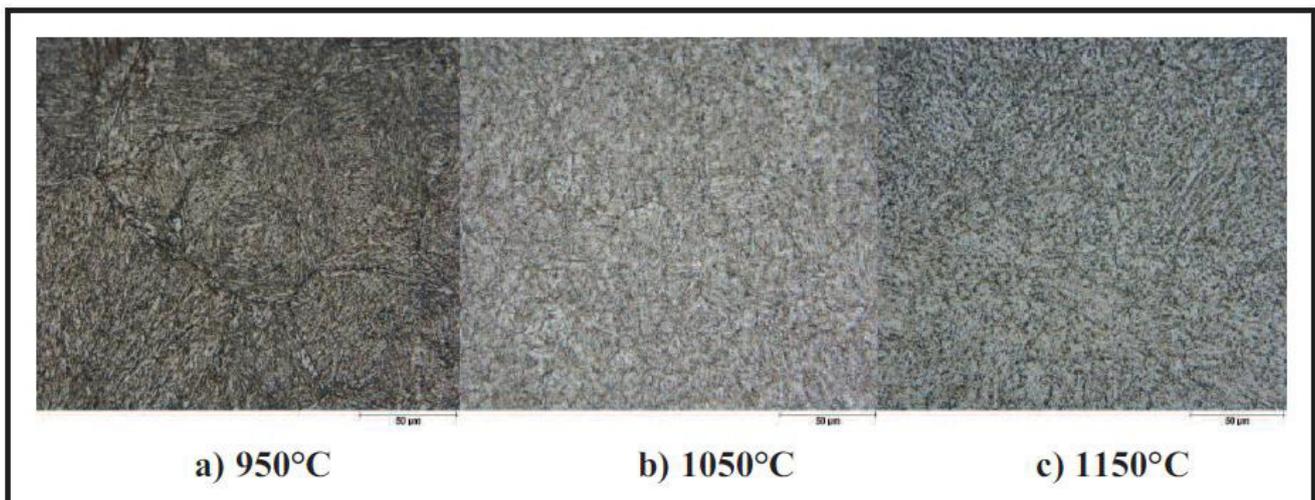
**Figure 9** : Influence des éléments  $\alpha$ -gènes et  $\gamma$ -gènes dans les aciers [12]

## II.5 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 A1 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.

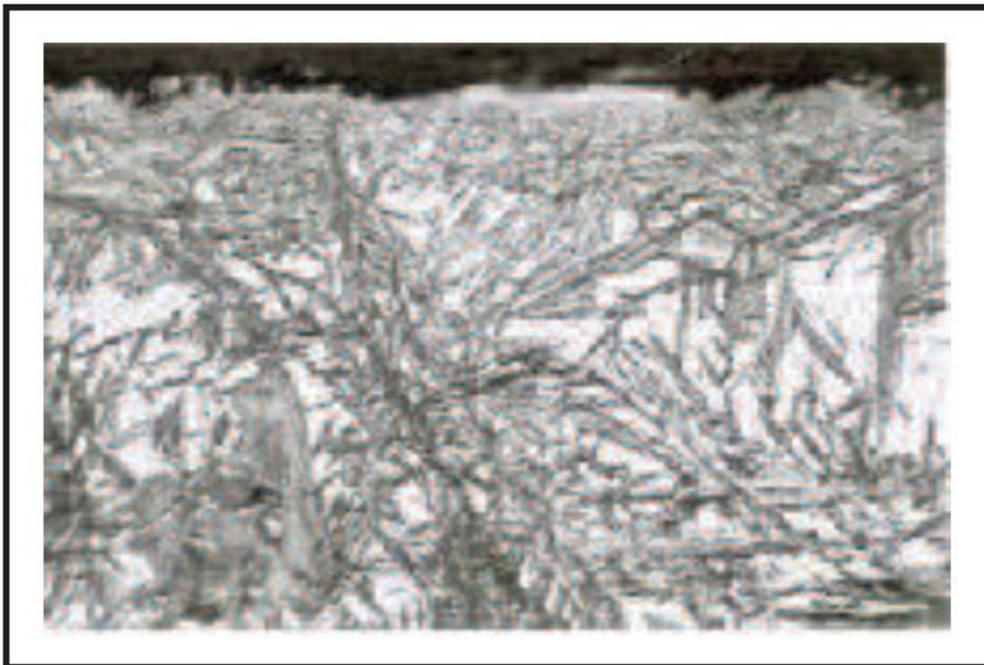
Ce durcissement est dû à la précipitation d'un composé ou à la formation de martensite ou de bénite à partir de l'austénite résiduelle décomposée au cours du revenu, ou déstabilisée pendant celle-ci, puis transformée pendant le refroidissement [4].



**Figure 10** : Différentes structures d'un acier H11 après trempe et revenu [4].

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.

L'austénite résiduelle, issue de la première trempe, se transforme en martensite secondaire après le premier revenu. La martensite secondaire est ensuite adoucie pendant le second revenu. La Figure 10 représente les différentes structures d'un acier à outils de travail à chaud H11 austénitisé et double revenu à différentes températures. La température du second revenu ne joue pas sur la diversité des carbures puisque l'on retrouve les mêmes types de précipités à la fin du premier revenu. Si le second revenu est effectué à une température inférieure à 600 °C, la coalescence des carbures n'est pas observée, mais la forte densité de dislocations introduite au cours de la trempe diminue. Cependant, Si le revenu secondaire est réalisé à une température supérieure à 600° C, il conduira à la coalescence des précipités  $M_{23}C_6$  issus du premier revenu [4].



**Figure 11:** Austénite résiduel dans structure trempé [4].

# Chapitre II

# Chapitre II

---

**MATERIAUX  
ET  
TECHNIQUES  
EXPERIMENTALES**

## II. MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

### II.1 Matériau

L'outil faisant l'objet de cette étude est un acier industriel dont la composition chimique est proche de celles des aciers normalisés de types **AISI L6**.

Toutefois, il présente des différences dans les pourcentages des éléments tels que le carbone, le vanadium, et le silicium. La composition chimique, reportée dans le **Tableau 4**, a été réalisée à l'aide d'un SPECTROMAX MX6M BT sous un logiciel de traitement des données **SPARK ANALYZER**, avec une alimentation de 220 V AC 50 HZ. Un tel appareil est représenté sur la **Figure 12**.



**Figure 12:** Spectromètre à fluorescence X

Les aciers à outils pour travail à chaud se caractérisent généralement par une faible ou moyenne teneur en carbone, associée à des éléments d'alliages comme le nickel, le chrome, le molybdène, le vanadium ou le tungstène.

## II.2 Méthodes expérimentale

### II.2.1 Traitements thermiques

Les traitements thermiques de recuit complet, de trempe et de revenu ont été effectués dans un four électrique à résistance *NEBERTHERM* ( $max = 1200^{\circ}C$ ). La trempe des échantillons a été réalisée directement dans un bain d'huile à  $120^{\circ}C$ .



**Figure 13** : Four électrique '*NEBERTHERM*'

#### II.2.1.1 Recuit

Selon le cycle donné par la **Figure 14**, le traitement de recuit est réalisé en trois étapes qui consistent un chauffage à  $850^{\circ}C$  avec un maintien de **4 h** suivi d'un refroidissement lent dans le four. Ce traitement a pour buts essentiels d'éliminer les contraintes résiduelles résultantes du découpage et d'obtenir une structure appropriée pour le durcissement escompté.

#### II.2.1.2 Trempe

Des échantillons cubiques de dimensions (12x12x04) mm ont été austénitisés à différentes températures: **950, 1000, 1050, et 1100 °C** avec un temps de maintien de **20 min** pour être ensuite refroidis rapidement dans un bain d'huile à  $120^{\circ}C$  (**fig.14**). Un tel refroidissement rapide a pour but de conférer à l'acier la plus grande dureté possible par la

formation d'une structure martensitique. Après chaque opération de trempe, les niveaux de dureté des échantillons ont été mesurés afin d'en choisir la plus élevée qui correspond à la température d'austénitisation égale à 950 °C conformément aux résultats obtenus.

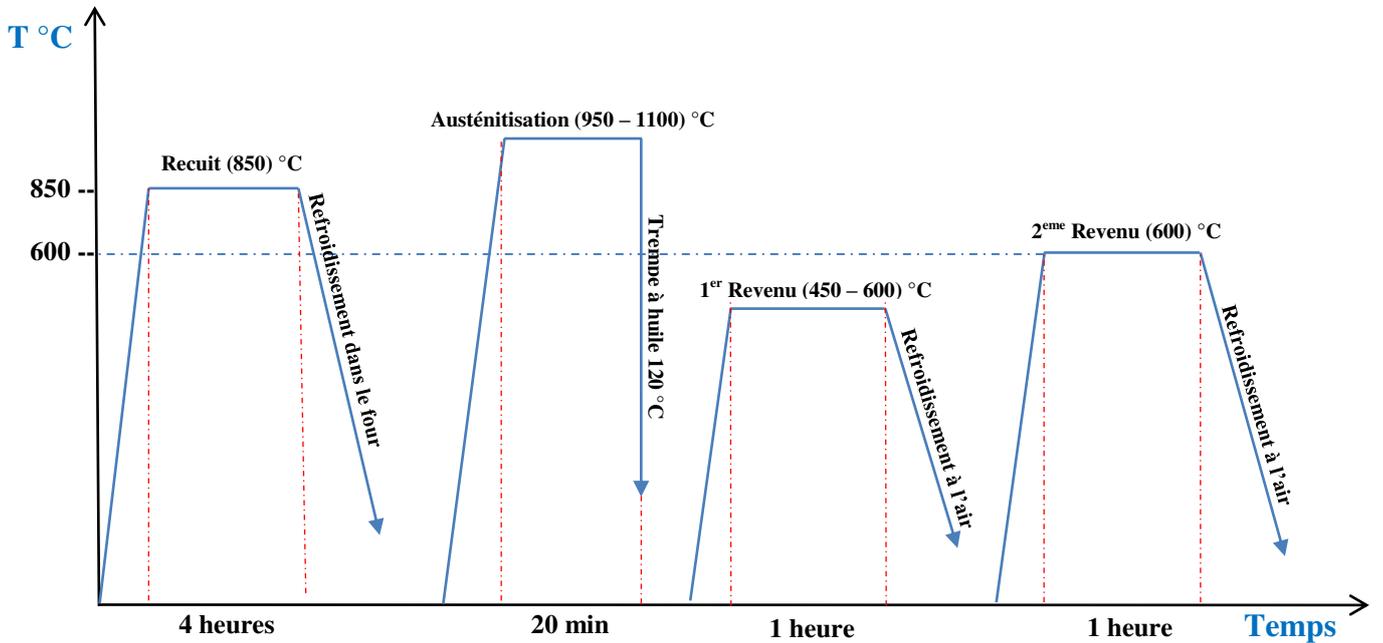


Figure 14 : Cycle de traitement de recuit et durcissement par trempe et revenu.

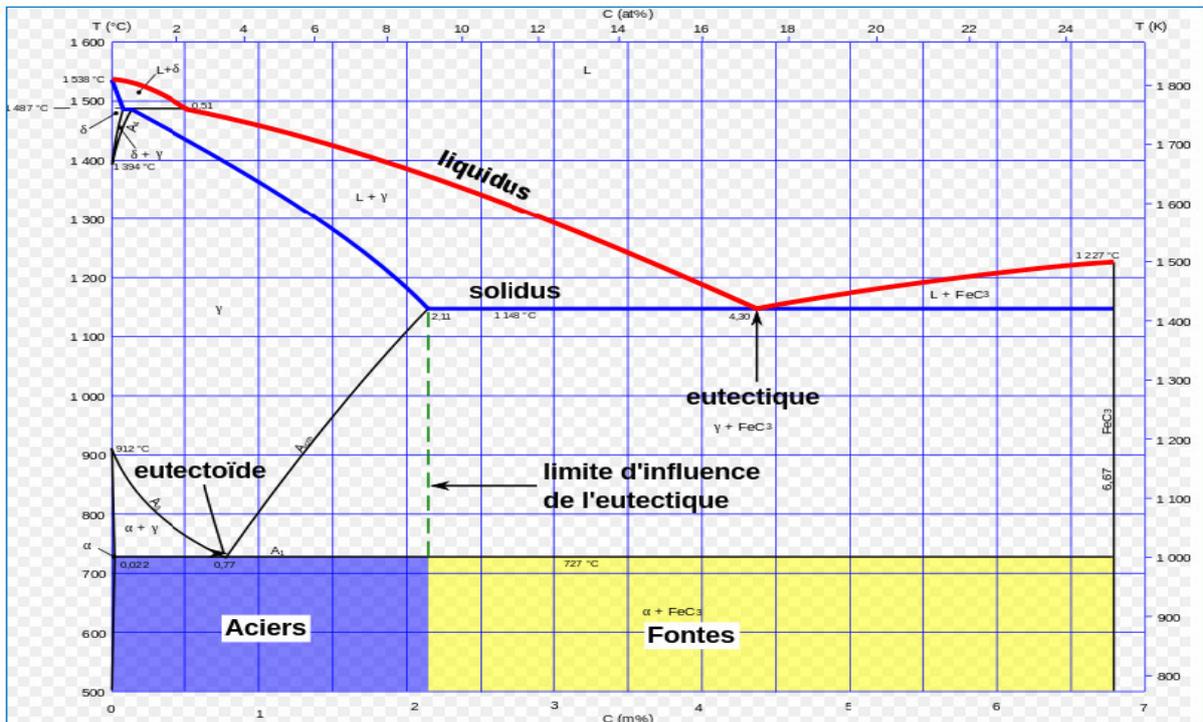


Figure 15 : Diagramme métastable Fe<sub>3</sub>-C [12].

### II.2.1.3 Revenus

Afin de d'estimer la température relative au durcissement secondaire, nous avons fait subir aux échantillons trempés à **950 °C** des revenus entre **450 et 600 °C** selon un pas de **50 °C**.

Le temps de maintien est une heure suivi d'un refroidissement à l'air. L'échantillon donnant la plus grande valeur de la dureté HV a subi un deuxième revenu à **600 °C** pendant une heure, avec un refroidissement à l'air (**Fig.14**)

### II.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, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, et 1200), puis à la pâte diamantée de granulométrie 3 µm.



**Figure 16 : Polisseuse FORCIPOL**

Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés, les surfaces sont ensuite attaquées chimiquement par le **Nital 2%** (une solution alcoolique nitrique) de composition :

**2 ml d'acide nitrique HNO<sub>3</sub>**

**98 ml d'éthanol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH**

## II.2.3 Caractérisations après traitements thermiques

### II.2.3.1 Etude microstructurale

#### II.2.3.1.1 Microscopie optique

Afin de révéler les microstructures après les traitements préconisés, les échantillons ont été enrobés à chaud dans de la résine pour subir ensuite un polissage mécanique puis la finition a été réalisée à l'aide de la patte diamantée à 3  $\mu\text{m}$ .

Après l'opération de polissage, les échantillons ont été attaqués chimiquement à l'aide d'une solution de Nital à 2% pour être observés au microscope optique de type *HUND*.



**Figure 17** : Microscope optique '*HUND*'

### II.2.3.1.2 Détermination des phases en présence par diffraction des Rayons-X

La technique d'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutie à l'obtention d'un diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction.

La loi de Bragg définit la relation entre la longueur d'onde du faisceau incident ( $\lambda$ ), le paramètre réticulaire repéré par les indices de Miller ( $d_{hkl}$ ) et l'angle de diffraction ( $\theta$ ), l'entier naturel  $n$  représentant l'ordre de diffraction.

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

L'ensemble des spectres de diffraction ont été réalisés sur un diffractomètre « PANalytical X'Pert PRO », lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractogrammes (**fig. 18**). Le traitement des spectres de DRX est effectué par le logiciel X'pert Highscore.



**Figure 18** : Diffractomètre des RX 'BRUKER'

## II.2.4 Propriétés mécaniques

### II.2.4.1 Dureté

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 ont utilisé la dureté *Vickers HV* est le rapport entre la charge appliquée et la surface projetée de l'empreinte rémanente :

$$HV = \frac{1.854 * F}{9.81 * d^2}$$

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 par une pyramide en diamant à base carré sous une charge de **300 g**. De trois mesure sont effectuées sur chaque échantillon et une moyenne est prise, la Microduromètre utilisé est illustré dans la photo suivante :



Figure 19 : Duromètre 'Wolpert'

# Chapitre III

# Chapitre III

---

## RESULTATS ET INTERPRETATION

### III.1 Matériau

Selon les résultats obtenus à partir de l'analyse chimique (Tableau 3), l'acier d'étude peut être classé dans le groupe des aciers à outils de travail à chaud proche de ceux normalisés tels que l'**AISI L6**. Sa comparaison avec ces derniers laisse entrevoir une différence dans les éléments : Nickel, Cuivre et Chrome.

La composition du 55NiCrMoV7 est donnée dans le Tableau suivant :

Composition chimique moyenne du 55NiCrMoV7 étudié (composition massique %).

**Tableau 3:** Composition chimique moyenne du 55NiCrMoV7 étudié □

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V	S	P	B
0.555	0.551	0.269	0.657	1.56	0.134	0.0077	0.298	0.0039	0.103	0.0188	0.0058	0.0005

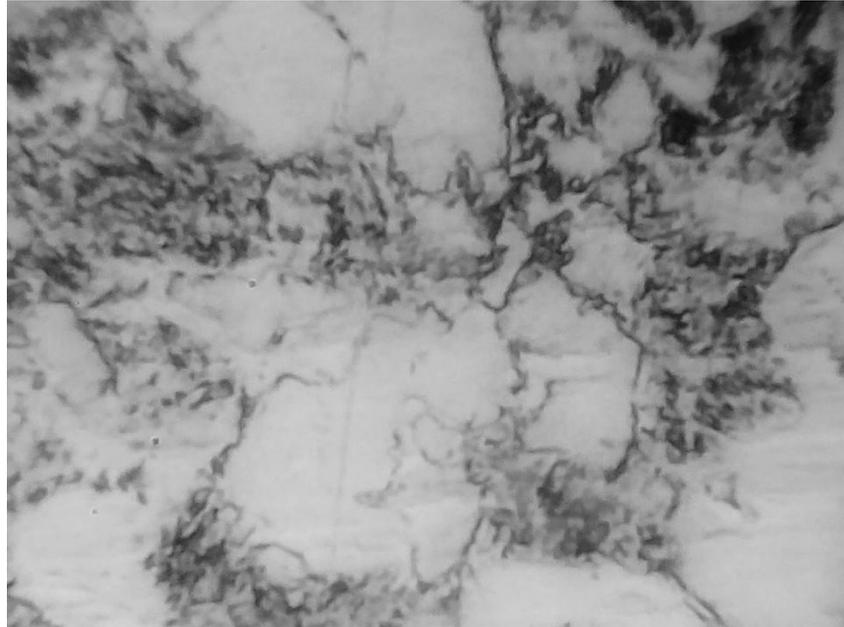
**Tableau 4:** Composition chimique de l'acier **AISI L6** d'après la norme ISO/DIS 4957.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V	W	S	P	B
0.5-0.6	0.6-0.9	0.1-0.4	0.8-1.2	--	--	--	0.35-0.55	--	0.05-0.15	--	--	--	--

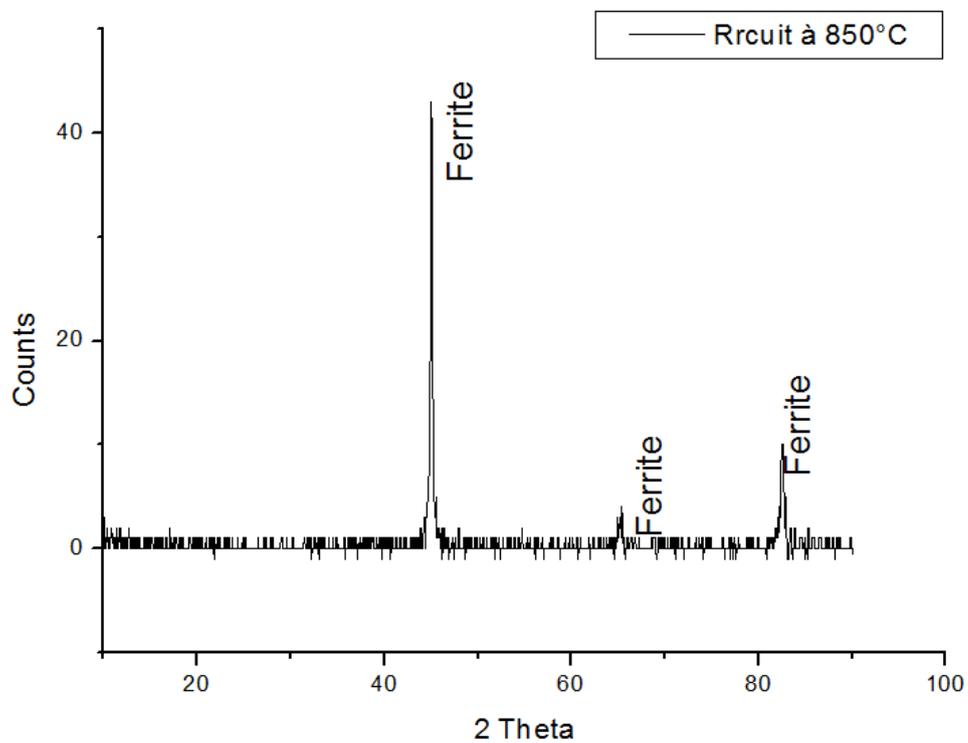
### III.2 Traitements thermiques

#### III.2.1 Recuit

Une composition chimique équilibrée en éléments carburigènes tels que le Nickel, Chrome, Molybdène et le Vanadium, est susceptible de donner une structure initiale de recuit adéquate afin d'assurer un durcissement ultérieur des outils, en l'occurrence obtenir de bonnes propriétés mécaniques à hautes températures. La **Figure 20** illustre une structure de l'acier d'étude à l'état recuit, composée principalement de ferrite. Une telle configuration correspond à une structure optimale appropriée aux traitements thermiques ultérieurs. Le niveau de dureté mesuré, est **314 HV**, présente bien un niveau d'adoucissement convenable permettant un usinage ou une mise en forme plus facile.



**Figure 20** : Examen métallographique (MO) à l'état recuit ;  
(T = 850°C, t = 240 min) X400

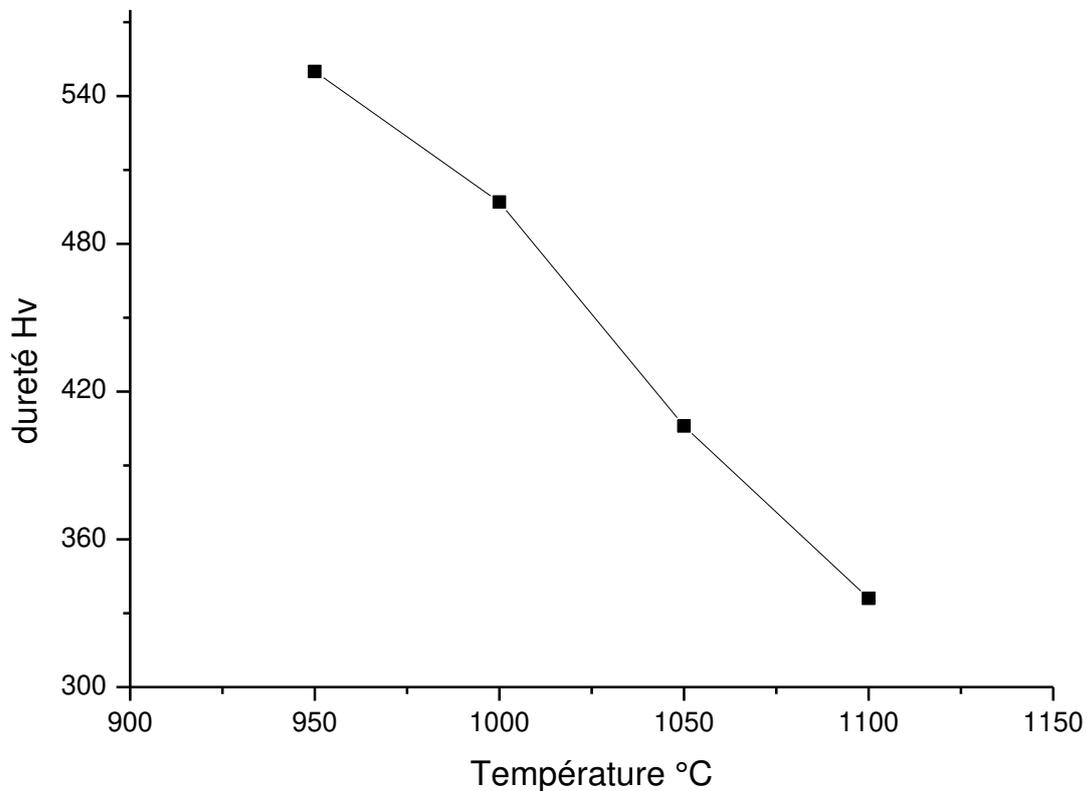


**Figure 21** : Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état recuit 850 °C

La diffraction des rayons X a permis d'identifier la nature des phases en présence, on remarque que le domaine est la ferrite.

### III.2.2 Trempe

Selon les cycles de traitements thermiques présentés en **Figure 14**, il est à rechercher une microstructure martensitique présentant une dureté maximale favorable à la résistance au choc des aciers. Il est bien connu que les propriétés optimales de mise en service des outils, telles que la dureté et la ténacité dépendent de la température d'austénitisation. En **Figure 22** sont reportés les résultats de mesure des duretés obtenus en fonction des températures d'austénitisation réalisées dans une gamme variant de **950 à 1100 °C**, avec un pas de **50 °C** pendant un temps de maintien de **20 min**.



**Figure 22** : Résultats de mesure des duretés en fonction des températures d'austénitisation

Il est bien observable, qu'aux températures supérieures à **950 °C**, le niveau de dureté est faible en raison de la mise en solution incomplète et probablement au grossissement des grains austénitiques.

On remarque que le max de dureté est obtenu à la température d'austénitisation **950 °C** (échantillon T1). Cependant sa valeur peut être modifiée par les traitements ultérieurs de revenus. D'autre part, l'acier étudié austénitisé à **950 °C** conduit à une ténacité optimale et à une grande résistance à la fatigue thermique. Dans tous les cas, la valeur de la dureté dépend des fractions volumiques de l'austénite transformée d'une part en martensite et d'autre part en austénite résiduelle.

La relation de *Steven et Haynes* est la plus indiquée dans notre cas car elle peut s'appliquer aux aciers contenant jusqu'à **0,6%** de carbone:

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474C\% - 33Mn\% - 17Ni\% - 7Cr\% - 21Mo\%$$

D'autre part, la relation définie par *Koistinen et Marburger* permet d'évaluer la fraction volumique d'austénite non transformée liée aux points  $M_s$  et  $T_q$  (température de trempe) :

$$V_{\gamma} (\%) = \exp(-1.10 * 10^{-2} (M_s - T_q))$$

Le point  $M_s$  est calculé par la relation de *Steven et Haynes* citée précédemment.

Ainsi, la quantité de martensite est donnée par la relation :

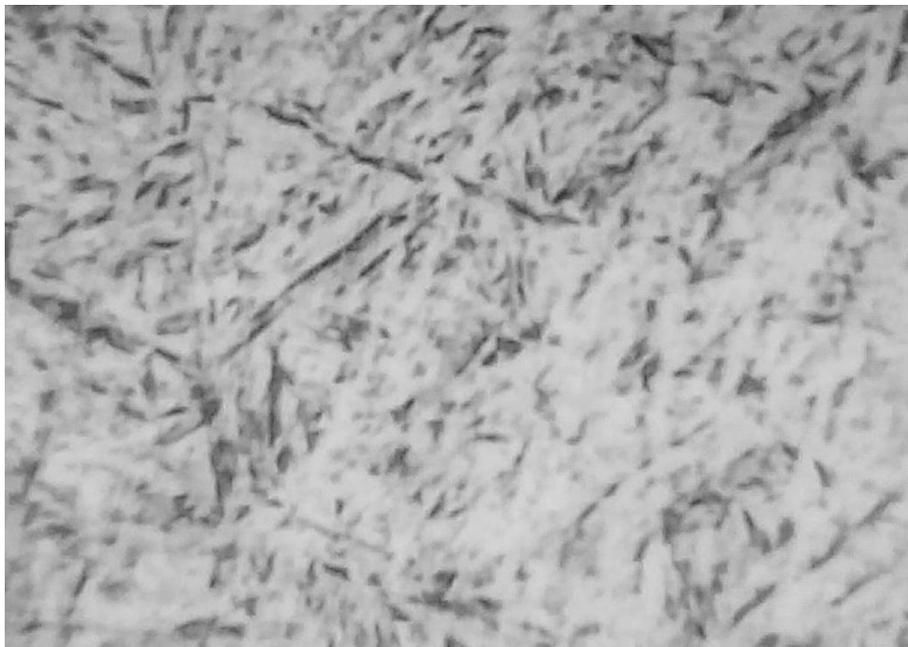
$$V_m (\%) = 1 - V_{\gamma}$$

Ce résultat peut être associé à la vitesse élevée de trempe qui a un effet considérable sur la microstructure obtenue et les propriétés correspondantes de l'acier à outil de travail chaud lui conférant ainsi toute sa performance. En outre, un refroidissement rapide permet d'éviter la formation de la bainite qui peut affecter négativement le niveau de dureté requis [4].

Au-delà de **950 °C**, l'augmentation de la température d'austénitisation provoque une diminution importante de la dureté atteignant la valeur de **343 HV**. Cette baisse de dureté peut être expliquée par le degré relatif de grossissement des grains austénitiques.



**Figure 23** : Examen métallographique (MO) à l'état trempé ;  
( $T = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20$  min ; à huile  $120^{\circ}\text{C}$ ) « X400 »



**Figure 24** : Examen métallographique (MO) à l'état trempé ;  
( $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20$  min ; à huile  $120^{\circ}\text{C}$ ) « X400 »

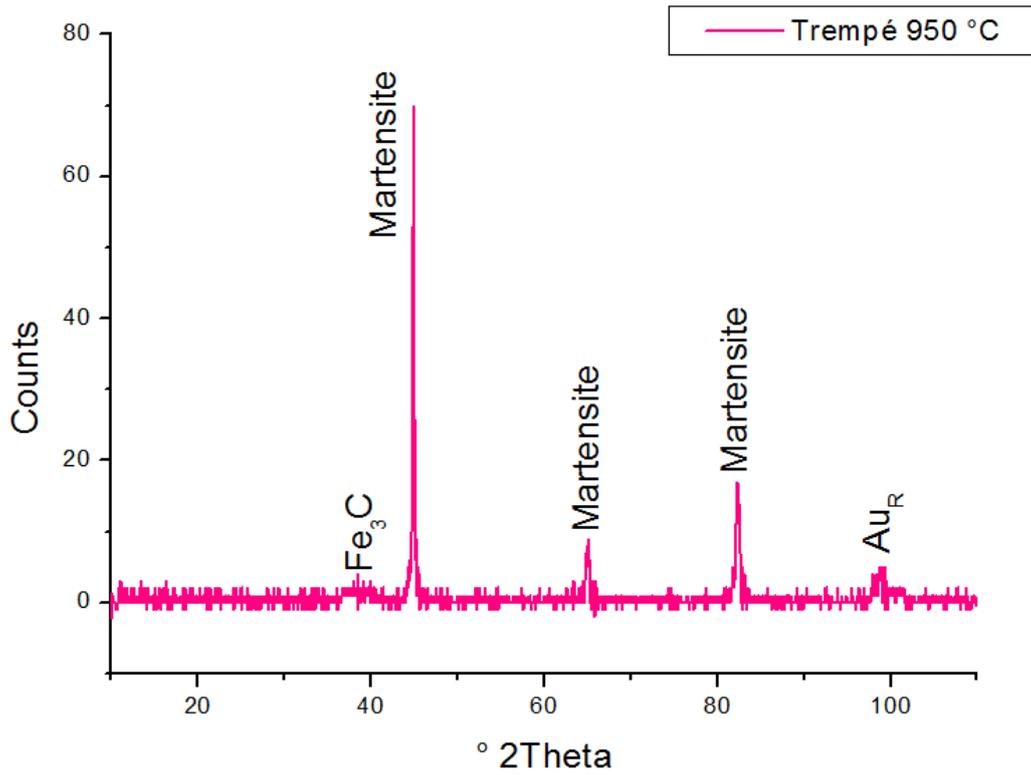


Figure 25 : Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état trempé 950 °C

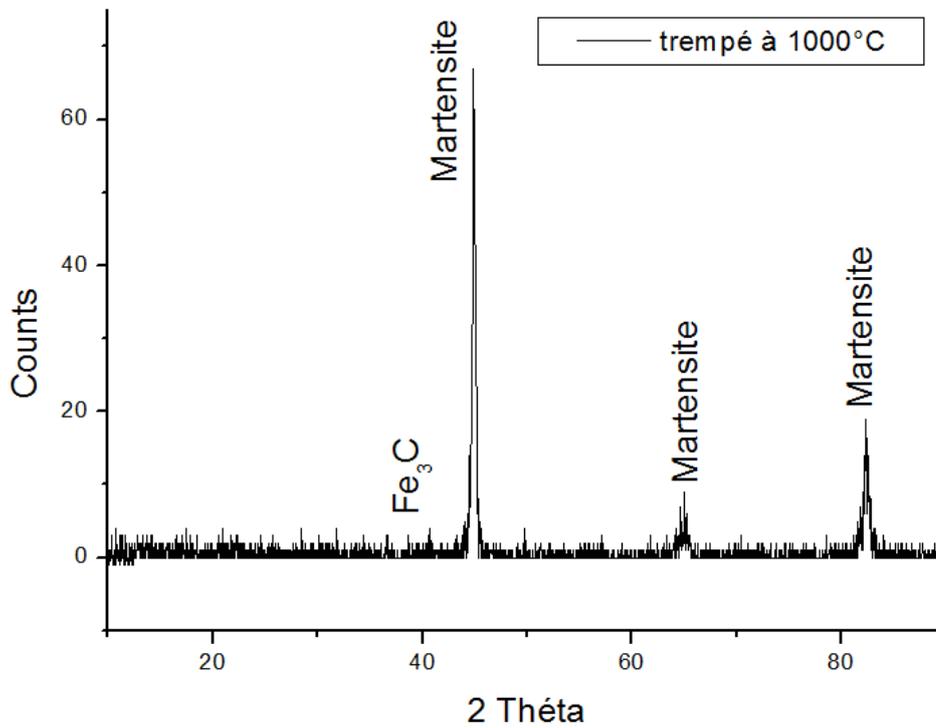
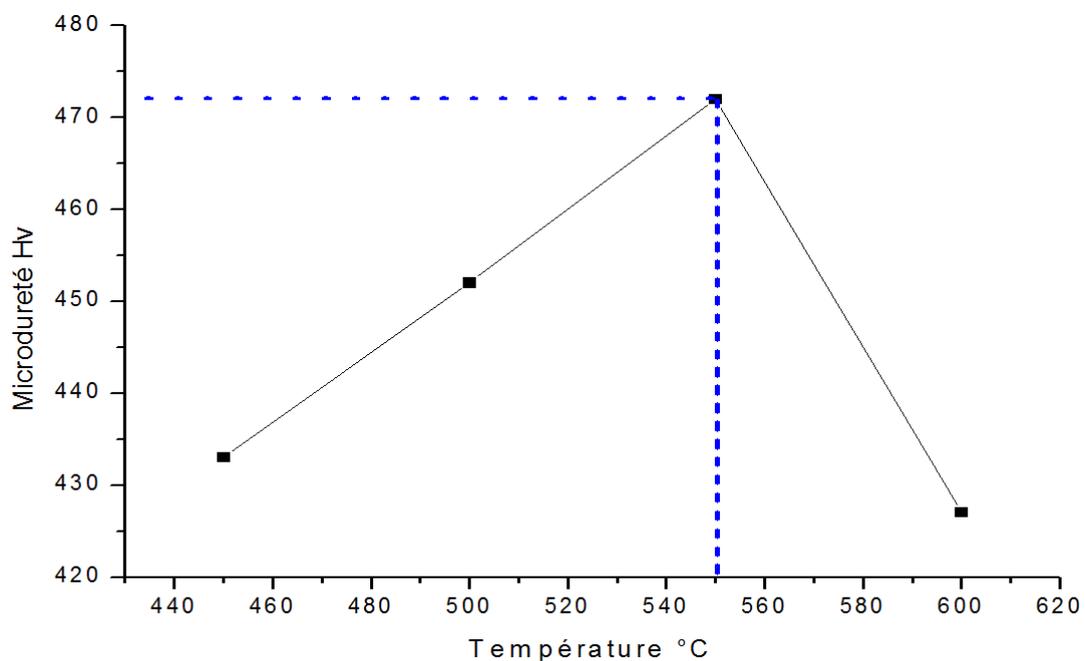


Figure 26 : Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état trempé 1000 °C

### III.2.3 Revenu

L'échantillon T1 a été soumis à un premier revenu suivant la gamme de température de **450 à 600°C**, avec un pas de **50 °C** pendant un temps de maintien d'une heure.

La **Figure 27** montre la résistance au revenu évaluée à partir de la courbe de dureté de revenu à température ambiante en fonction des températures de revenu considérées.



**Figure 27** : Résultats de mesure des duretés en fonction des températures de 1<sup>er</sup> revenu.

On peut constater dans la fourchette de **450 à 550 °C**, une augmentation de la dureté de **433 à 472 HV**. Cette augmentation est associée à deux différentes transformations se déroulant lors du revenu:

- \* une déstabilisation de l'austénite qui est sensibilisée par le revenu et qui se transforme au moment du refroidissement,
- \* une transformation en martensite revenue,

Il est intéressant de remarquer qu'à la température **550 °C**, l'échantillon (TR1) affiche un durcissement significatif de **472 HV** (valeur maximale) correspondant au mécanisme de durcissement secondaire qui devrait normalement conduire à une précipitation fine et homogène de carbures. Cette étape correspond à l'échange de carbone entre la cémentite et les carbures.

La valeur de la dureté affiche une chute atteignant **427 HV** pour une température de revenu de **600 °C**. Il en ressort que l'augmentation de la température de revenu au-delà de **550 °C** contribue à la décomposition de la martensite formée ce qui influe sur le niveau de dureté

A ce stade, la basse teneur du silicium (0,27%) peut avoir un effet favorable sur les propriétés de l'acier à outil ainsi trempé et revenu. En contrepartie, suggèrent qu'une grande teneur de Nickel peut affecter négativement l'acier AISI L6, en déplaçant le point de durcissement secondaire vers des températures plus basses. Comme conséquence, la réduction de la teneur du Nickel dans les aciers revenus favorise une utilisation possible des outils aux températures plus élevées.

### III.2.4 Caractérisation de l'état structural

#### III.2.4.1 La trempe

La température d'austénitisation **950 °C** permet d'assurer la transformation de la ferrite (cubique centré) en austénite (cubique à face centrée) et la mise en solution presque totale de la cémentite dans l'austénite. Après refroidissement rapide dans l'huile à la température **120 °C**, une structure martensitique en lattes, associée à une fraction volumique d'austénite résiduelle, est obtenue comme il est montré en **Figure 24**. Cette martensite est produite par cisaillement complexe du réseau de l'austénite. A cause de la vitesse élevée de refroidissement (huile à **120 °C**), le phénomène de diffusion n'intervient pas dans cette transformation **[13]**.

Il peut être retenu que la température d'austénitisation optimale de **950 °C** et le temps de maintien de **20 min** ont un effet positif sur la taille de grains primaires d'austénite, malgré la faible teneur en vanadium qui reste quand même assez suffisante pour empêcher le

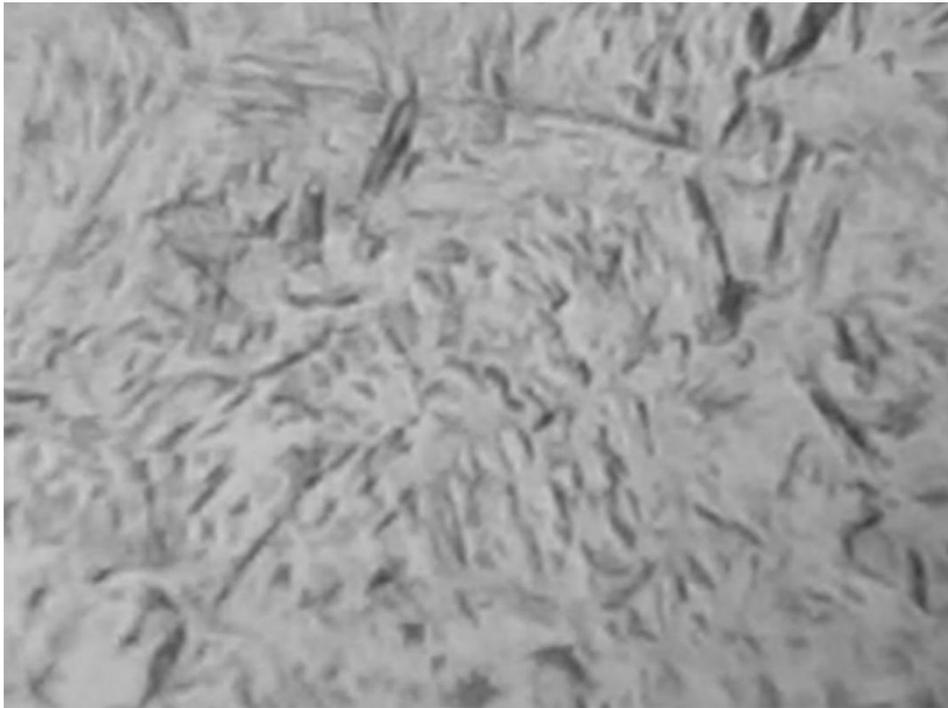
grossissement des grains. Les **Figures.25** et **26** montres les spectres de diffraction des R-X des échantillons trempé à **950** et **1000 °C**.

On rappelle que l'austénite résiduelle, en raison de sa différence structurale avec les autres phases, produit un pic de diffraction à des endroits différents que ceux de la ferrite. La quantité d'une phase dans l'acier est proportionnelle à l'intensité intégrée de son pic de diffraction. Aucune distinction n'a été faite entre les phases de ferrite et de martensite en raison que les intensités théoriques de diffraction des rayons-X sont presque les même. Ainsi, le terme ferrite peut aussi s'appliquer à la martensite.

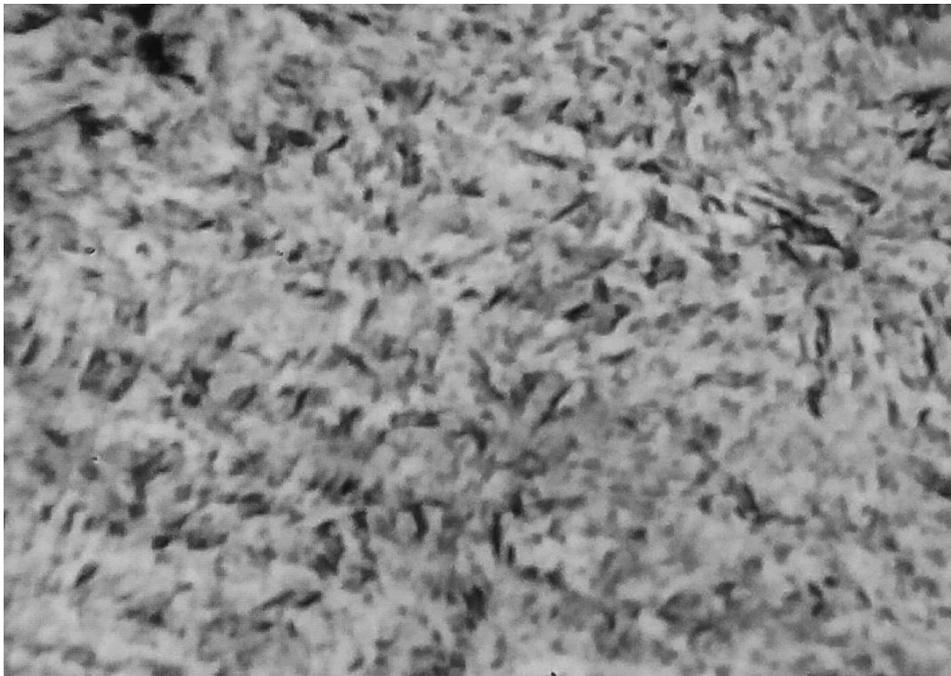
#### III.2.4.2 Revenu

La trempe martensitique contribue à l'obtention d'une dureté élevée mais en contre-partie rend l'acier fragile (faible ténacité), inapte à des applications industrielles. C'est pourquoi un (ou des) traitement(s) de revenu ultérieur(s) est (sont) requis pour l'obtention d'une microstructure composée principalement de martensite revenue induisant des propriétés mécaniques appropriées à de telles applications. Un compromis satisfaisant est à rechercher entre les caractéristiques  $R_m$ ,  $R$  et  $H$  d'une part et  $A\%$  et  $K$  d'autre part [2].

Lors du ou (des revenus), certaines transformations se produisent en premier lieu dans la martensite, et en deuxième lieu dans l'austénite résiduelle. Après le premier revenu effectué dans la gamme de température de **450** et **550 °C**, l'échantillon T1 montre le début du processus de précipitation qui a pour effet d'induire un durcissement structural. Selon la **Figure 28**, la microstructure optique relative à l'échantillon TR1 revenu à **550 °C** pendant **1 h**, la martensite obtenu après trempe se transforme en martensite de revenu, on remarque que les lattes martensitique devient plus larges par rapport aux celles de l'état trempés.



**Figure 28** : Examen métallographique (MO) à l'état revenu ;  
( $T = 550^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 60 \text{ min}$ ) « X400 »



**Figure 29** : Examen métallographique (MO) à l'état revenu ;  
( $T = 500^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 60 \text{ min}$ ) « X400 »

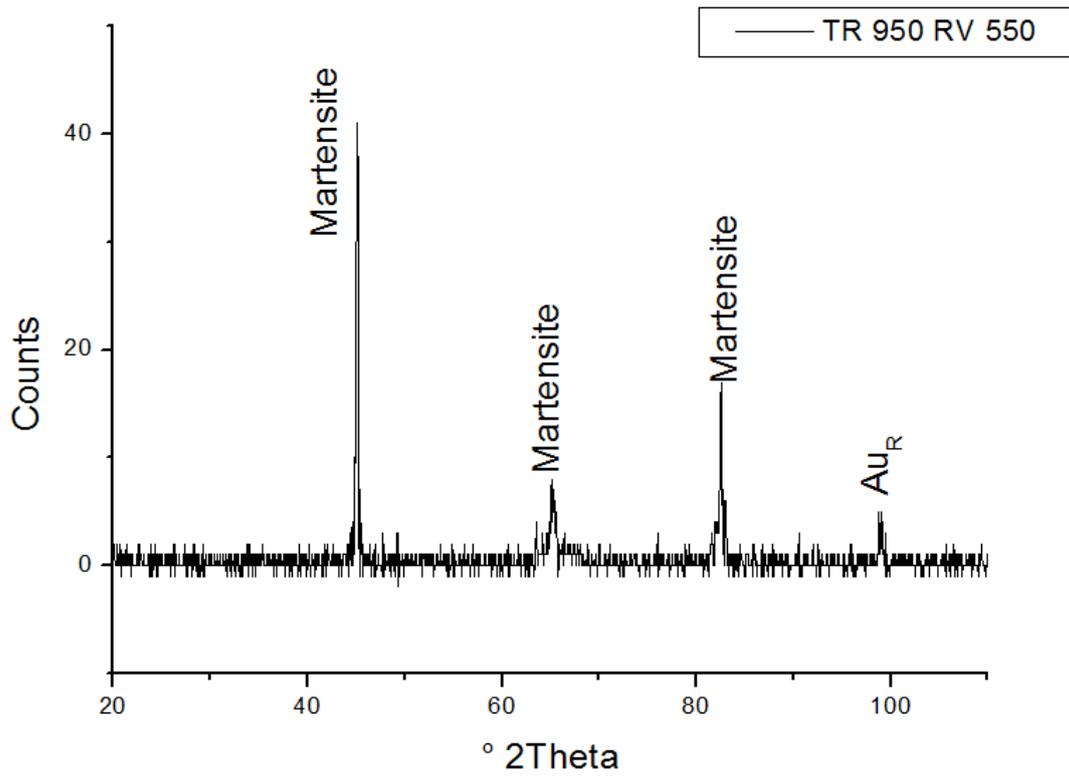


Figure 30 : Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état revenu 550 °C

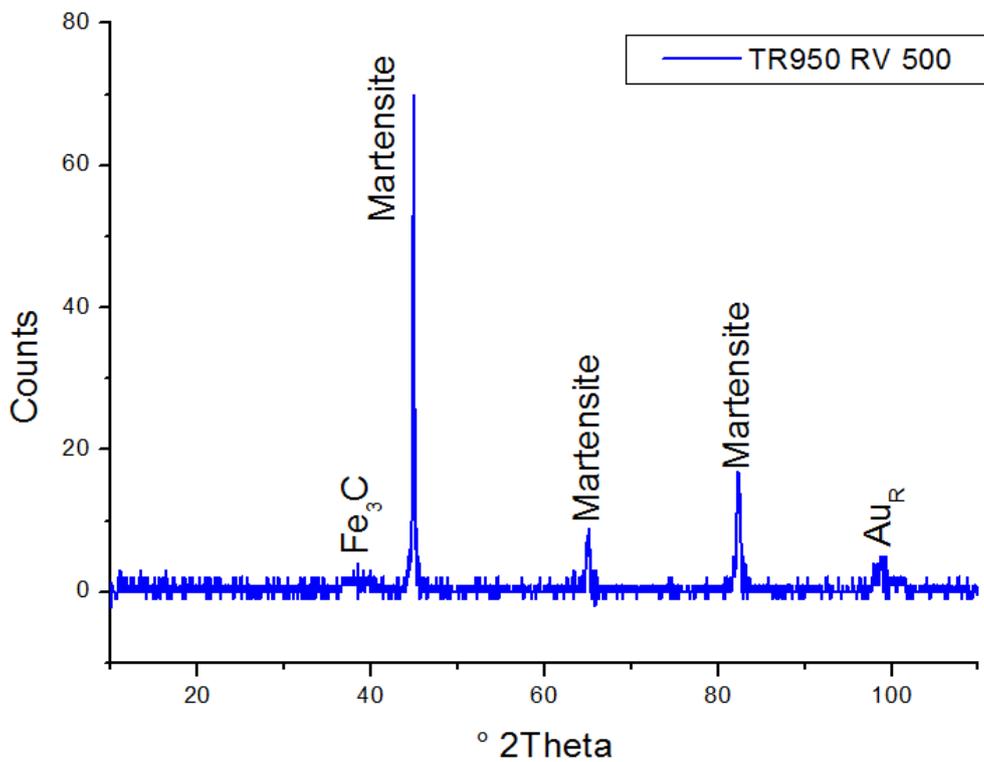
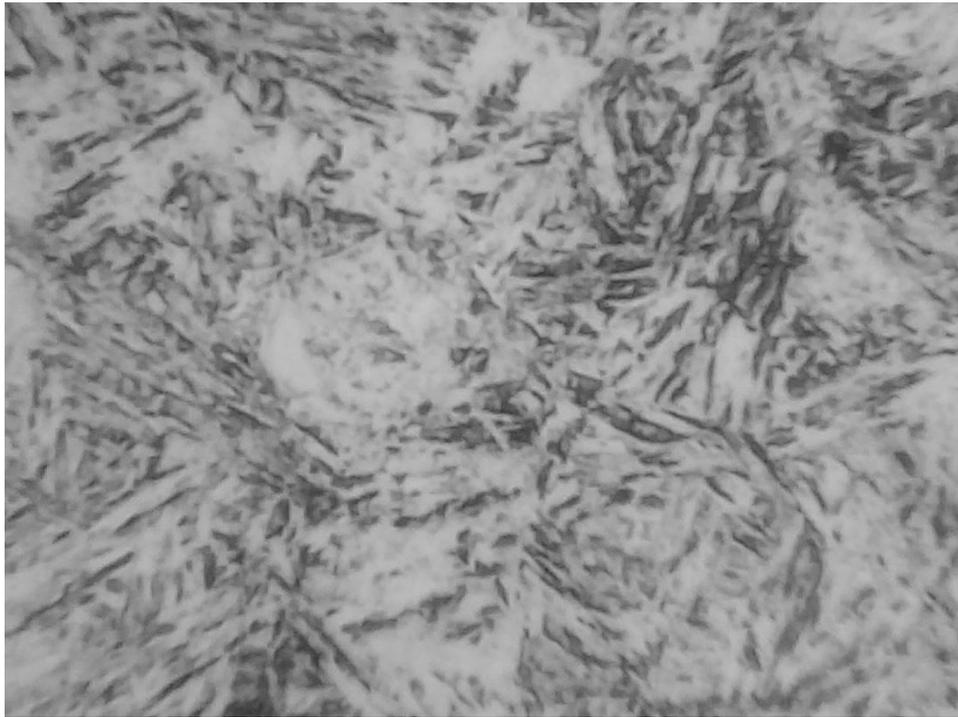
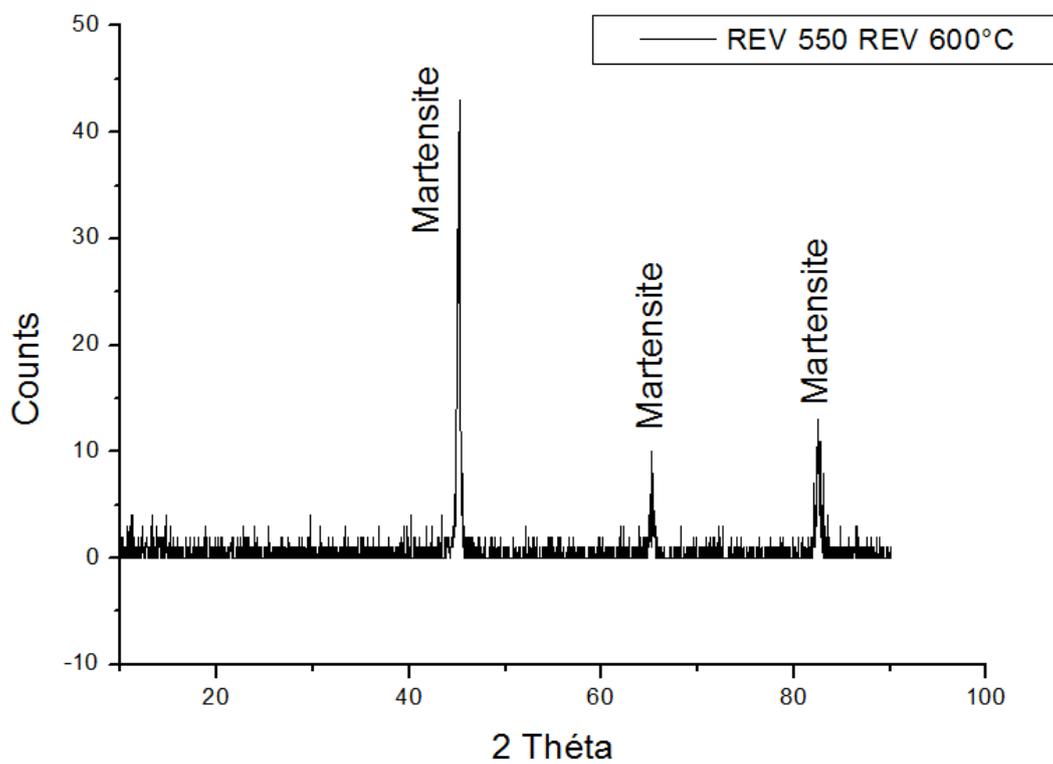


Figure 31 : Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état revenu 500 °C

Lors du premier revenu, une fraction de l'austénite résiduelle en cémentite dans une martensite revenue provoque ce que l'on appelle le "durcissement secondaire". En outre, les contraintes résiduelles de trempe sont relâchées et la densité des dislocations formées après trempe est diminuée. Tous ces mécanismes multiples conduisent à une diminution de la valeur de la dureté de **427 HV** (après trempe) à **472 HV**. La température du second revenu (**600 °C**) a pour but la stabilité thermique de la structure obtenue après le premier revenu. Les aciers à outils ne doivent pas être revenus à une température inférieure à la température de mise en service. La **Figure 32** montre la microstructure optique de l'échantillon TR2 soumis à un deuxième revenu à la température **600 °C** à un temps de maintien de **1 heure**. La valeur mesurée de la dureté est de l'ordre de **400 HV**. On note aussi que, les lattes de martensite de revenu, sont plus larges que celles de la martensite du premier revenu (TR1).



**Figure 32:** Examen métallographique (MO) à l'état 2<sup>ème</sup> revenu ;  
(T = 600°C, t = 60 min) « X400 »



**Figure 33 :** Spectre des rayons X de l'acier d'étude à l'état 2<sup>ème</sup> revenu

Conclusion

Générale

### CONCLUSION GENERALE

Dans le cas des outillages de forge à chaud, le chapitre bibliographique a montré que les outils subissent de nombreux phénomènes tels que la fatigue, l'usure et l'oxydation,...etc. Ces aciers utilisés trouvent leurs applications dans différents domaines industriels. A cause des conditions de mise en service très sévères, ils sont appelés à remplir des critères assez rigoureux concernant leur propriétés d'emploi: dureté, résistance à l'usure, ténacité et stabilité dimensionnelle dans le but d'assurer à l'outil une bonne performance et une durée de vie acceptable. C'est dans cette optique que notre étude trouve sa signification par des traitements thermiques.

Cette mémoire a pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques un acier à outils de travail à chaud utilisé en forgeage à chaud de type *55NCDV7 (AISI L6)*.

Sur la base de nos résultats issus des investigations entreprises, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Des informations sur la microstructure et sa relation avec les propriétés citées sont fournies. Ainsi, après le recuit d'homogénéisation, l'acier étudié présente une structure ferrito-perlitique Ceci est confirmé par l'analyse par diffraction des rayons X.

- Après austénitisation à **950 °C** pendant **20 min** et une trempe à l'huile à **120°C**, l'acier acquière une structure martensitique en lattes avec une fraction volumique d'austénite résiduelle de **2 %** avec un niveau de dureté égale à **560 HV**.

- Après un double revenu à **550 °C** puis **600 °C** respectivement, l'acier affiche certains processus de transformation au niveau de la martensite, consistant principalement en une diminution de la dureté mesurée **472 HV** pour la température **550 °C** et **400 HV** pour la température **600 °C**. Les valeurs relatives à la dureté après traitement global suggéré confirment la fiabilité de l'outil de par la microstructure obtenue.

- Les tests de dureté révèlent une augmentation des valeurs de dureté superficielles de **314** à **400 HV**. Cette augmentation est expliquée par le mécanisme de durcissement structural.

L'analyse per diffraction des rayons X ne révèle pas l'existence des carbures dans nos échantillons, ceci est du peut être aux leur faible pourcentage, par ce que certains éléments d'alliage forment des carbures stables même à faible teneur comme le Vanadium. Pour déceler ces carbures il faut appliquer une analyse **DRX** sur un petit intervalle **2θ** avec une très faible vitesse de balayage.

La microstructure des états revenus est une structure martensitique en lattes, ou ces derniers sont plus larges que celles obtenues après trempe.

# BIBLIOGRAPHIE

[1]	Robert LÉVÊQUE, <i>Technique de l'ingénieur, Les aciers à outils.</i>	M330
[2]	J.BANALIS, G.MEADER, Précis de métallurgie-Elaboration, structure, propriétés, normalisée ;	Edition Nathau 1997.
[3]	M. COLOMBIE, Matériaux industriels, matériaux métallique ;	DUNOD,Paris 2000
[4]	Moussa ATHMANI, <i>Mémoire magistère (université Annaba 2011)</i> Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outil de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation)	
[5]	L.COLOMBIER, Les aciers à outils et leur traitement thermique,	1971, PYC - EDITION, Paris.
[6]	Jean Marie Dorlot, Jean Paul Baïlon, Jacques Masounave Des Matériaux, 2 <sup>ème</sup> édition,	ISBN : 2-553-00176-2
[7]	TEMACINI, FADJI, BENTALEB ; Impact des traitements thermique sur les propriétés mécaniques des aciers (trempe- revenu)	Mémoire DEUA (à 2007 université de Biskra)
[8]	I. LAKHTINE Métallographie et traitement thermique des métaux, 3 <sup>ème</sup> édition 1982,	
[9]	Elodie BOUCARD, Thèse docteur soutenue le 10 décembre 2014 ( <i>Université de Lorraine-Pôle M4</i> ) Étude de l'influence de l'état métallurgique de l'austénite sur la microstructure de transformation de phase dans les aciers bas carbone.	
[10]	Robert LÉVÊQUE, <i>Technique de l'ingénieur, Traitement thermique dans la masse.</i>	M1134
[11]	Guy MURRY, <i>Technique de l'ingénieur, Transformations dans les aciers</i>	M1115
[12]	BEN NASSER Mohamed, AMDOUNI Hatem, HAJBRAHIM Fawzi, HSSIN Hichem <b>Cours matériaux métalliques, Niveau : 1<sup>er</sup> année Licence Génie Mécanique,</b> <i>Etude de diagramme d'équilibre (chapitre 3), République Tunisienne.</i>	
[13]	Jean Philibert, Alain Vignes, Yves Bréchet, Pierre Combrade ; Métallurgie du minerai au matériau, Masson, Paris 1998,	ISBN : 2-225-82978-0

**ملخص:** تمت دراسة الأثار المترتبة عن المعالجات الحرارية التقليدية (سقاية + ارجاع) على الخصائص الميكانيكية لفولاذ مخصص للعمل في درجات حرارة عالية قريب من صيغة **AISI L6** مع وجود اختلاف في العناصر: النيكل والسيليسيوم والنحاس. الهدف من هذه المعالجات الحرارية هو الحصول على أداة فعالة من حيث الصلابة. بعد رفع درجة حرارة العينات الى 950 °م لمدة 20 د المعدن المبرد بسرعة في الزيت الساخن (120°م) ينتج بنية قريبة من المارتنسيت تحوي كمية من الحديد  $\gamma$ . بعد ارجاع مضاعف عند درجة حرارة 550 ثم 600 °م ينتج عن ذلك تقسية ثانوية للمعدن. النتائج النسبية لمختلف أوقات المعالجة تبين وجود نسبة من الحديد  $\gamma$ . هذا وقد تمت الاستعانة بالمجهر الضوئي و التحليل بالأشعة السينية لتحديد البنية, أما الخصائص الميكانيكية فقد درست بجهاز قياس الصلابة.

**Abstract:** The effects of conventional heat treatments (quenching and tempering) on the mechanical properties of hot-working industrial tool steel close to AISI-L6 are studied. The difference in chemical composition resides in the elements Nickel, Silicium and Copper. The objective of the heat treatments is to obtain an efficient and effective tool in terms of hardness. The experimental results of the recommended thermal treatments provide an explicit understanding of the surface properties mainly in relation to the chemical composition and the optimal parameters of treatments after austenitizing at 950 °C for 20 minutes, the steel quenched in oil (120 °C.) a fully martensitic structure bound to a small fraction of residual austenite result a double temper at 550 then 600 °C contributes to the secondary hardening phenomenon. Consequently, the mechanical properties required in terms of hardness are achieved for a defined lifetime. In addition, the productivity of the parts is greatly improved when the suggested treatment is used. Metallurgical characterization is carried out using metallographic techniques, optical microscopy (MO) and X-ray diffraction techniques. Mechanical properties are determined mainly by hardness tests.

**Résumé:** Les effets des traitements thermiques classiques (trempe et revenu) sur les caractéristiques mécaniques d'un acier à outil industriel de travail à chaud, proche de AISI-L6 sont étudiées. La différence dans la composition chimique réside dans les éléments Nickel, Silicium et Cuivre. L'objectif des traitements thermiques est d'obtenir un outil efficace et performant en termes de dureté, de et de résistance au choc. Les résultats expérimentaux des traitements thermiques préconisés fournissent une compréhension explicite des propriétés de surface principalement par rapport à la composition chimique et les paramètres optimaux de traitements après l'austénitisation à 950 °C pendant 20 min, l'acier trempe à l'huile (120°C) une structure entièrement martensitique liée à une petite fraction d'austénite résiduelle est obtenue un double revenu à 550 puis 600 °C contribue au phénomène de durcissement secondaire. En conséquence, les propriétés mécaniques requises en termes de dureté sont atteintes pour une durée de vie définie. En outre, la productivité des pièces se voit largement améliorée lorsque le traitement suggéré est utilisé. La caractérisation métallurgique est effectuée par le biais de technique métallographique, de la microscopie optique (MO) et les techniques de diffraction des rayons X. Les propriétés mécaniques sont déterminées principalement par les essais de dureté.