

**UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA**

**Faculté des sciences appliquées**

**Département de Génie mécanique**



**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine** : Sciences et Technologies.

**Filière** : Génie mécanique

**Spécialité** : fabrication mécanique et productive

Présenté par :

DJOUDI CHAHRAZAD

HAMADOU ABDELMOUHAIMEN AMDJED

**Thème :**

***Traitement thermique des aciers, Concepts et applications***

Soutenu publiquement le : 14.06.2021

Devant le jury composé de :

|                           |     |           |             |
|---------------------------|-----|-----------|-------------|
| Dr. BENTALEB FAYÇAL       | MCB | Président | UKM Ouargla |
| Mr. GHERFI ABDELHAFID     | MAA | Examineur | UKM Ouargla |
| Dr. KHEIREDDINE ABDELAZIZ | MCB | Encadreur | UKM Ouargla |

**Année universitaire : 2020/2021**

## *Remerciements*

*Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et le courage pour l'élaboration de ce travail. Je remercie mon promoteur **Dr. KHEIREDDINE Abdelaziz** pour avoir bien voulu m'encadrer et pour ses précieux conseils et orientations. Mes remerciements vont également à tous mes enseignants, particulièrement les enseignants de la spécialité **fabrication et production mécanique** ainsi que tous les responsables et le personnel de la faculté de Génie mécanique. J'adresse mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Djouadi Chahrazad*

*Hamadou Abdelmouhaimen*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A Mon Père ET ma Mère*

*Sans qui je ne serais jamais arrivée à ce stade là.*

*Pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse ET leur présence dans*

*les moments les plus difficiles.*

*Merci ET que Dieu vous garde*

*A mes sœurs, ikhîlas et Meriem, zouhour*

*A Mon frère, Abdelmadjid et Mouhamed*

*A mon binôme, Djoudi Chahrazad*

*A toute ma famille chacun à son nom.*

*A tous mes amis.*



*AMDJED*

*Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère*

*Tu es toujours dans mon cœur*



*CHAHRAZAD*

# Sommaire

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

|   |    |
|---|----|
| I.1. Introduction.....                              | 03 |
| I.2. Composition des aciers.....                    | 03 |
| I.3. Elaboration des aciers et des fers .....       | 04 |
| I.4. Propriétés des matériaux.....                  | 06 |
| I.5. Constitution des aciers au carbone.....        | 06 |
| I.6. Classification des aciers.....                 | 07 |
| I.6.1. Classification par emplois.....              | 07 |
| I.6.2. Classification par composition chimique..... | 07 |
| I.7. Diagramme d'équilibre fer-carbone.....         | 08 |
| I.8. Conclusion.....                                | 09 |

## Chapitre II : Traitement Thermique des aciers

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction.....                                 | 12 |
| II.2. Cycle d'un traitement thermique.....              | 12 |
| II.3. principaux type de traitement thermique.....      | 13 |
| II.4. Gammes des traitements thermiques de l'acier..... | 14 |
| II.5. Trempe.....                                       | 14 |
| II.5.1. Différents types de trempe.....                 | 14 |
| II.5.2. Technologies de chauffage.....                  | 15 |
| II.5.3. Choix de temps de maintien.....                 | 16 |
| II.5.4. Milieux de trempe.....                          | 17 |
| II.6. Revenu.....                                       | 18 |
| II.6.1. Revenu de relaxation ou de détente.....         | 19 |
| II.6.2. Revenu de structure ou classique.....           | 19 |
| II.6.3. Revenu de durcissement.....                     | 19 |

|   |    |
|---|----|
| II.6.4. Revenu à basse température.....           | 19 |
| II.6.5. Revenu à température intermédiaire.....   | 20 |
| II.6.6. Revenu à haute température.....           | 20 |
| II.7. Recuit.....                                 | 20 |
| II.7.1. Cycle thermique d'un recuit comprend..... | 21 |
| II.7.2. Recuit d'homogénéisation.....             | 21 |
| II.7.3. Recuit d'adoucissement.....               | 22 |
| II.7.4. Recuit complet.....                       | 22 |
| II.7.5. Recuit régénération.....                  | 22 |
| II.7.6. Recuit de détente.....                    | 22 |
| II.7.7. Recuit de recristallisation.....          | 23 |
| II.7.8. Recuit de coalescence.....                | 23 |
| II.8. Conclusion.....                             | 23 |

## **Chapitre III : Résultats de quelques travaux de recherche**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction.....  | 25 |
| III.2. Effet de la trempe sur la dureté .....                               | 25 |
| III.3. Effet de recuit sur la dureté.....                                   | 29 |
| III.4. Effet du revenu sur la dureté.....                                   | 31 |
| III.5. Effet de traitement thermique sur la Résilience et la ductilité..... | 32 |
| III.6. Effet de traitement thermique sur la résistance à l'usure.....       | 34 |
| III.7. Conclusion.....  | 36 |
| Conclusion générale.....  | 38 |
| Références bibliographiques   |    |

# Liste des figures

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

|   |    |
|---|----|
| Figure. I.1. Schéma de la fabrication du fer et de l'acier..... | 05 |
| Figure. I.2. Diagramme fer-carbone.....                         | 09 |

## Chapitre II : Traitement Thermique des aciers

|  |    |
|--|----|
| Figure. II.1. Cycle de traitement thermique.....                 | 13 |
| Figure. II.2. Cycle thermique lors d'une trempe.....             | 16 |
| Figure. II.3. Cycle thermique complet d'un trempe et revenu..... | 19 |
| Figure. II.4. Cycle thermique d'un recuit comprend.....          | 21 |

## Chapitre III : Résultats de quelques travaux de recherche

|  |    |
|--|----|
| Figure. III.1. Variation de la dureté Shore D du PP/Mmt en fonction de la température de trempe..... | 26 |
| Figure. III.2. Variation de la microdureté en fonction de la température pour 30 min de recuit       | 29 |
| Figure. III.3. Variation de la microdureté en fonction de la température pour 60 min de recuit       | 30 |
| Figure. III.4. Evolution de la dureté en fonction de la température de recuit.....                   | 31 |
| Figure. III.5. La courbe de traction pour l'acier 35CD4 .....  | 32 |
| Figure. III.6. Courbe de traction pour l'acier 42CD4 après traitement de trempe et de revenu..       | 33 |
| Figure. III.7. Courbe de traction pour l'acier 42CD4 avec traitement thermique de recuit.....        | 33 |
| Figure. III.8. Influence de la température de traitement thermique sur la résistance à l'usure...    | 35 |

# Liste des tableaux

## Chapitre II : Traitement Thermique des aciers

|  |    |
|--|----|
| Tableau. II.1. Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours..... | 16 |
| Tableau. II.2. La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe.....  | 17 |

## Chapitre III : Résultats de quelques travaux de recherche

|  |    |
|--|----|
| Tableau. III.1. Résultats de dureté après tempe..... | 26 |
|--|----|



# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

La révolution industrielle est le résultat de la découverte de nombreuses innovations et développements scientifiques qui ont stimulé l'industrialisation.

On constate que l'acier avec ses alliages sont parmi les métaux les plus utilisés dans les applications industrielles, en raison de la grande diversité de leurs nuances et propriétés, et de la possibilité d'apporter quelques améliorations et modifications à certaines propriétés.

Le traitement thermique est l'un des outils les plus importants utilisés pour adapter les propriétés mécaniques de l'acier, en raison de sa simplicité, sa facilité d'utilisation, son faible coût et ses résultats impressionnants.

A cet effet, de nombreuses recherches intéressées par ce sujet ont obtenues des bons résultats concernant l'amélioration des caractéristiques étudiées à partir de nombreuses expériences appliquées.

Ce travail vise à mettre en évidence les aspects de traitement thermique, et d'examiner ses divers techniques et modes, ainsi de grouper et de catégoriser certaines recherches à travers leur participation et leur intérêt à étudier les différents effets sur les propriétés mécaniques, ceci contribue à faciliter le processus de recherche dans ce domaine.

Dans ce but, notre travail est organisé comme suit:

- Un premier chapitre, traite de brefs rappels bibliographiques concernant les matériaux métalliques et exclusivement les aciers.
- Un deuxième chapitre présente une aperçue générale sur le processus de traitement thermique avec ses différents modes d'application.
- Dans le troisième chapitre, on présente les résultats des dizaines travaux de recherche dans ce domaine de manière ordonnée selon leurs effets sur les différentes propriétés mécaniques.
- Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

*Chapitre I :*  
*Généralité sur*  
*Les aciers*

# **Chapitre I : Généralité sur les aciers**

## **I.1. Introduction**

Les aciers sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de L'industrie. L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés physique de l'acier: en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de " fer " ; au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte.

Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage. On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques (éléments d'addition), et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes); on parle alors d'aciers traités.

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales: module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté; résistance aux chocs (résilience).Aujourd'hui la production d'acier est un indice de la richesse nationale et elle est à la base de la production de masse dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction navale, l'automobile, le bâtiment et les travaux publics, la construction mécanique, l'outillage et les équipements industriels et ménagers. Le développement des transports, en particulier par mer, ayant rendu le commerce international des matières premières (minerai de fer, charbon, fioul, ferrailles et additifs) économiquement rentable. [01]

## **I.2. Composition des aciers**

Les aciers de construction contiennent de 0,008 à 2.14 % de carbone en fonction des propriétés recherchées, et, selon les cas, des éléments d'addition tels que manganèse, nickel, chrome, molybdène, titane, tungstène (augmentation des caractéristiques mécaniques), cuivre (contre la corrosion), silicium (désoxydation), aluminium (affinage du grain) ... Ils contiennent également une faible proportion d'azote résiduel, du soufre et du phosphore (impuretés résiduelles défavorables aux caractéristiques mécaniques et à la soudabilité).En fonction de ses composants lors de la mise en nuance et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier aura des propriétés mécaniques et technologiques variables. D'une manière générale, on peut dire qu'en

augmentant la teneur en carbone ou la teneur en éléments d'alliages, on augmente les caractéristiques de résistance des aciers, mais on nuit à leur soudabilité. Pour des aciers non alliés et non traités, on peut établir une correspondance entre les taux de carbone et la résistance à la traction des aciers. C'est ainsi que plus la teneur en carbone est élevée, plus la limite de rupture constatée lors d'un essai de traction est élevée. [02]

### **I.3. Elaboration des aciers et des fers**

- **Fabrication de fer :** La fabrication du fer s'organise essentiellement autour du haut-fourneau à l'intérieur duquel s'opère la fusion (réduction) du minerai pour produire de la fonte. Le haut-fourneau est chargé par le gueulard en minerai, en coke et en castine, tandis que de l'air chaud, souvent enrichi en oxygène, est injecté par le bas. Le monoxyde de carbone produit grâce à la combustion du coke transforme le minerai en fonte, la castine jouant le rôle de fondant. A la température de 1 600 °C, la fonte se fluidifie et s'accumule à la partie inférieure du haut-fourneau, tandis que la castine se combine à la gangue pour former le laitier. La fonte est soutirée périodiquement du haut-fourneau pour être coulée sous forme de gueuses qui seront transformées ultérieurement (par exemple, dans des fonderies) ou déversée dans des poches qui permettent son transfert, à l'état liquide, jusqu'à l'aciérie. [03]

- **Fabrication de l'acier :** La fonte brute a une forte teneur en carbone et en autres impuretés (principalement du soufre et du phosphore). Il faut donc l'affiner, c'est-à-dire réduire sa teneur en carbone, oxyder et éliminer les impuretés pour la transformer en un métal très malléable pouvant être forgé et façonné. C'est l'objet de l'élaboration de l'acier, qui peut s'effectuer dans trois types de fours: le four à sole, le convertisseur à oxygène et le four à arc. La plupart des fours à sole ont été remplacés par des convertisseurs à oxygène, dans lesquels l'air ou l'oxygène sont injectés dans le fer en fusion, ou par des fours à arc alimentés en ferraille ou en boulettes de fer spongieux. [03]

Les aciers spéciaux sont des alliages auxquels on incorpore d'autres éléments métalliques pour leur conférer des propriétés particulières dans un but précis (du chrome pour éviter la corrosion, du tungstène pour augmenter la dureté et la résistance à haute température, du nickel pour améliorer la résilience, la ductilité et la résistance à la corrosion). Ces éléments peuvent être ajoutés dans la charge du haut-fourneau ou bien dans l'acier en fusion (dans le four ou la poche de coulée). L'acier en fusion est déversé dans des installations de coulée continue pour former des billettes, des blooms ou des brames. Il peut également être coulé dans des moules pour former des lingots. La majorité de l'acier est produit en coulée continue, ce qui offre à la fois un rendement accru, une meilleure qualité, des économies d'énergie et une réduction des coûts d'investissement et d'exploitation. Les

lingots sont stockés dans des pits, c'est-à-dire des fours en sous-sol équipés de portes, où ils peuvent être réchauffés avant de passer aux laminoirs ou de subir d'autres transformations. [04]

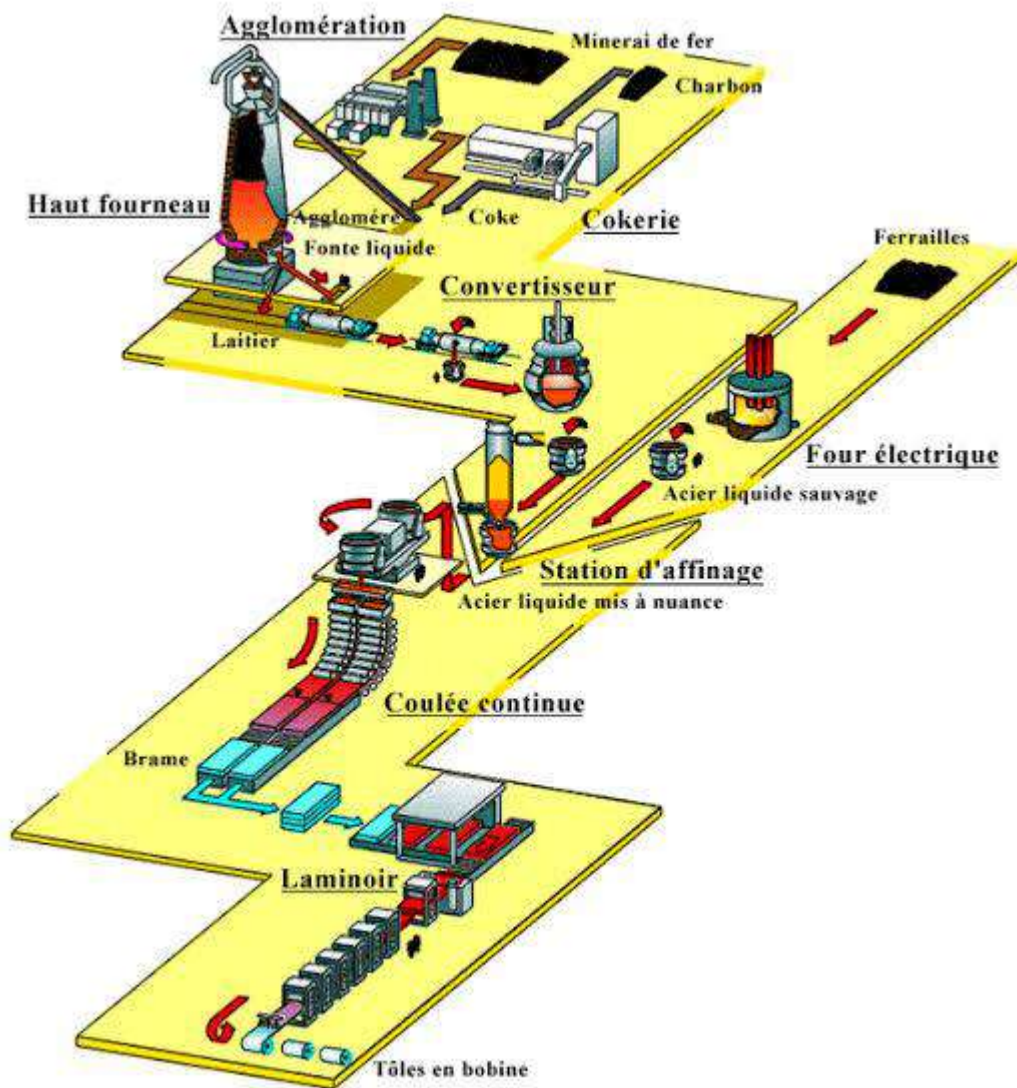


Figure. I.1. Schéma de la fabrication du fer et de l'acier. [04]

## I.4. Propriétés des matériaux

On peut classer les propriétés des matériaux en trois grandes catégories :

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Il est en effet important de sélectionner les matériaux adéquats afin que la pièce créée puisse résister aux contraintes qu'elle subit.

- **Dureté** : propriété d'un matériau de résister à la pénétration d'un autre matériau.
- **Ductilité** : propriété d'un matériau de s'étirer sans se rompre.
- **Elasticité** : propriété d'un matériau de se déformer puis de reprendre sa forme initiale par la suite.
- **Rigidité** : propriété d'un matériau de garder sa forme, même lorsqu'il est soumis à diverses contraintes.
- **Résilience** : propriété d'un matériau de résister aux chocs sans se rompre.

## I.5. Constitution des aciers au carbone

Trois solutions de base constituent les aciers au carbone :

- **Ferrite**: C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$ , c'est à dire la ferrite est constituée par le fer  $\alpha$  renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02%), ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % et la ferrite  $\delta$  à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile (HV = 90, Rm= 300 N/mm<sup>2</sup>, K=300J/cm<sup>2</sup>), Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C. [05]

- **Austénite**: C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer. La solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique. [05]

- **Cémentite**: Carbure de Fer, Fe<sub>3</sub>C, la limite de solubilité du carbone dans la cémentite est de 6.67%C. D'un point de vue morphologique la cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche hyper eutectiques. On la trouve sous trois formes : Primaire (au dessus de 1147°C) secondaire (entre 1147°C et 723°C) et tertiaire (au

dessous de 723°C). Magnétique jusqu'à 210 °C. Ce constituant est très dur (HB=700) et très fragile. On doit à ce composé défini les grandes performances des aciers de point de vue dureté et résistance. [06]

## I.6. Classification des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition.

### I.6.1. Classification par emplois

La désignation commence par la lettre « S » pour les aciers d'usage général et par la lettre « E » pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élastique en Méga Pascals.

*Exemples :*

S235 (acier d'usage général, de limite élastique 235MPa).

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa).

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

### I.6.2. Classification par composition chimique

#### - Aciers non alliés

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées.

Utilisation : ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

*Désignation :* la lettre « C » suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100.

*Exemple :*

C 35 (acier avec 0.35% de carbone).

#### - Aciers faiblement alliés

Pour ces aciers, aucun élément d'addition dépasse 5% en masse.

Utilisation : ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.

*Désignation :*

- un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- les teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par 4, 10, 100 ou 1000.
- éventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou à la déformation à froid (DF).



*Exemple :*

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

- **Aciers fortement alliés**

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Utilisation : ces aciers sont réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (%chrome > 11%)

*Désignation :*

- La lettre « X »,
- Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments.

*Exemple :*

X6 Cr Ni Mo Ti 17-12 (acier fortement allié avec 0.06% de Carbone, 17% de Chrome, 12% de Nickel, du Molybdène et du Titane (moins de 12%).

X4 Cr Mo S 18(acier fortement allié avec 0.04% de Carbone, 18% de Chrome, du Molybdène et du Soufre (moins de 18%). [07]

## **I.7. Diagramme d'équilibre fer-carbone**

L'exploitation du diagramme fer-carbone (Figure 2) permet de comprendre la modification de la structure cristalline du matériau par traitements thermiques, permettant d'améliorer les caractéristiques des matériaux.

En fonction de la température certains métaux ou alliages possèdent des propriétés différentes qui dépendent de leur structure cristalline. Jusqu'à 912 °C, le fer  $\alpha$  possède une maille cubique centrée(CC) et entre 912 °C et 1394 °C, le fer  $\gamma$  possède une maille cubique face centrée (CFC).

Deux grandes familles sont définies en fonction du pourcentage de carbone :

-les aciers, avec un pourcentage de carbone compris entre 0,008 et 1,7. Dans ces aciers, on distingue des aciers hypoeutectoïdes constitués de ferrite et de perlite (les plus utilisés dans l'industrie) et des aciers hypereutectoïdes constitués de cémentite et de perlite.

- Les fontes, avec un pourcentage de carbone compris entre 2,11 et 6,67.

Le diagramme fer-carbone est limité à droite par la cémentite (6.67% de carbone). Dans cette zone, le matériau est fragile et cassant. [08]

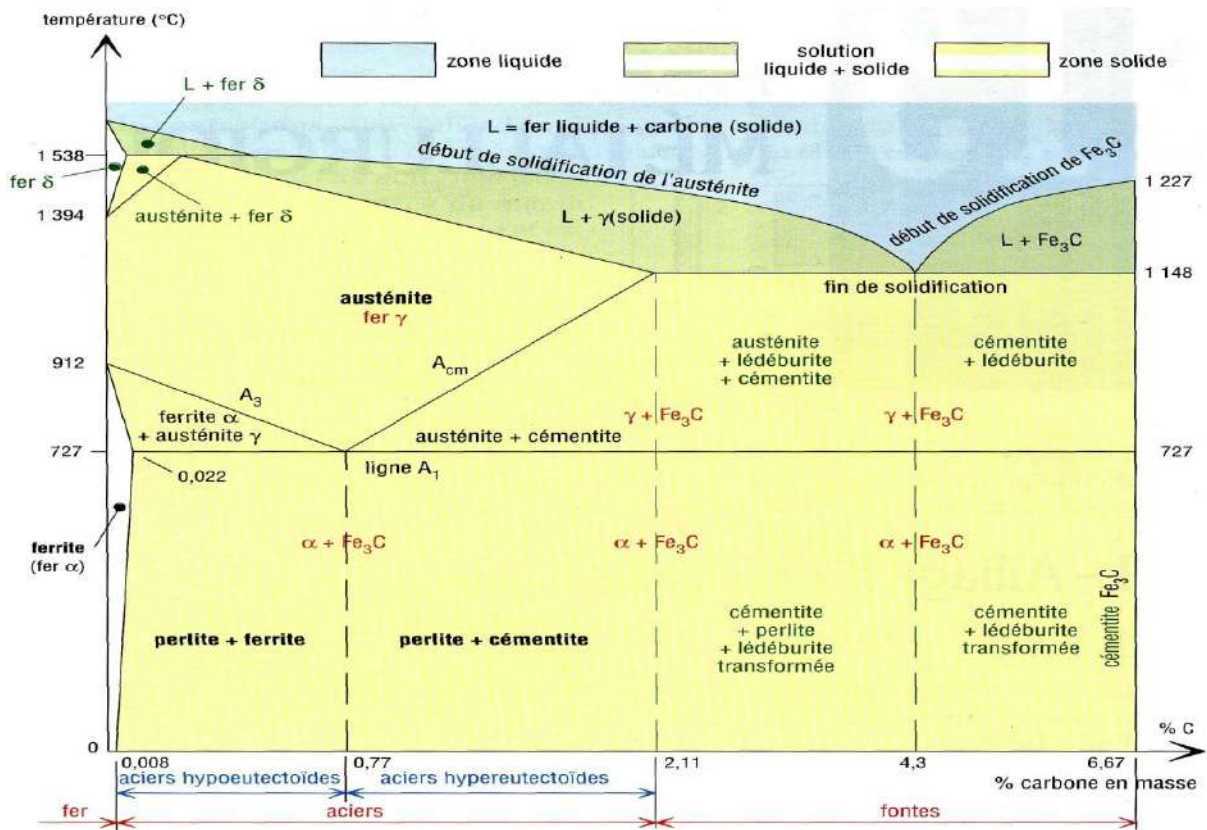


Figure. I.2. Diagramme fer-carbone. [08]

## I.8. Conclusion

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est principalement composé de fer, il est également défini comme le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0,005% et 1,5% en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2%.

Pourtant bien cette teneur en carbone est infime bien qu'elle confère à l'acier de manière assez complexe ses propriétés. Par exemple, plus la teneur en carbone d'un acier est importante plus l'acier est dur.

On distingue deux grandes familles d'acier :

- Les aciers non alliés, composés uniquement de fer et de carbone.
- les aciers alliés, qui intègrent d'autres éléments chimiques tels que le silicium, le molybdène ou le chrome.

L'acier supporte mal la corrosion. Afin de l'éviter, il faut avoir recours à des traitements de surface spécifiques (peinture, galvanisation, etc.) ou à des nuances d'acier de type acier inoxydable.

***Chapitre II :***  
***Traitement Thermique***  
***des aciers***

## **Chapitre II : Traitement Thermique des aciers**

### **II.1. Introduction**

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage, de maintien suivi d'un refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais apporte les modifications suivantes :

- Constitution (état de carbone et forme allotropique du fer).
- Structure (grosseur du grain et répartition des constituants).
- Propriétés mécanique.

Dont le 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  $R_m$ ,  $R_e$ , 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.

### **II.2. Cycle d'un traitement thermique**

En générale le traitement thermique comprend trois étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend de types de traitement voulu.
- Maintient isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

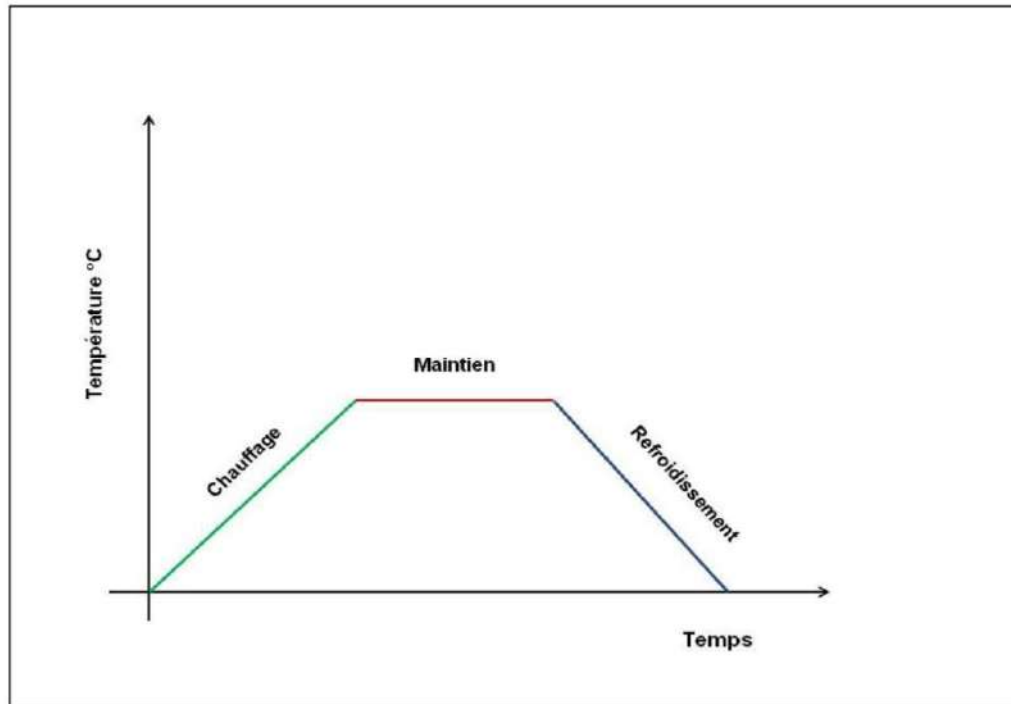


Figure. II.1. Cycle de traitement thermique. [09]

### Eléments d'un traitement thermique

Un traitement thermique consiste à jouer sur trois éléments :

- la température.
- le temps le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif).

En général, la phase déterminante et critique est le refroidissement. La vitesse appropriée pour obtenir les caractéristiques voulues amène à choisir un milieu de refroidissement (par exemple air, eau, bain de sel, huile, gaz ou mélanges gazeux sous pression) en fonction de la dimension de la pièce à traiter et la trempabilité. [09]

### II.3. Principaux type de traitement thermique

Les traitements thermiques appliqués aux aciers peuvent être classés en trois types principaux :

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliqués sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissements par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou en fin de transformation.

Les traitements de trempes structurales comportent :

- une mise en solution.

- une trempe.
- une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement. [10]

## **II.4. Gammes des traitements thermiques de l'acier**

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.
- Le recuit.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement. [10]

## **II.5. Trempe**

Après chauffage et maintien, les pièces sont soumises à un refroidissement selon le mode approprié, dont la vitesse est réglée par le milieu de trempe utilisé, refroidissement qui peut se faire en air calme, air soufflé, dans l'huile, en bains de sels, ... etc. Et suivant les alliages des pièces et les caractéristiques recherchées. Pour obtenir une trempe efficace, on est amené à chauffer le métal à une température assez élevée jusqu'au domaine austénitique. [11]

### **II.5.1. Différents types de trempe**

On distingue différents types de trempe, soit la trempe martensitique, la trempe bainitique, la trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe).

#### **Trempe martensitique**

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique  $M_s$ , généralement inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide. [12]

### **Trempe bainitique**

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240°C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier.

Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500 °C) que la martensite revenue. Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bainite) présentent une dureté élevée. [12]

### **Trempe austénitique (ou hypertrempe)**

Les aciers austénitiques dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel.

Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline. [12]

### **II.5.2. Technologies de chauffage**

Les trois types de trempe peuvent être exécutés dans à peu près tous les milieux de chauffage possible : four sous atmosphère contrôlée, four sous vide, bain de sel, etc. En somme, le choix de la technologie de chauffe est établi en fonction de la nature des pièces, sa grosseur, sa conductibilité, etc. Ci-joint un graphique illustrant de manière générale le cycle d'un traitement par trempe. Précisons ici qu'un traitement de trempe est toujours suivi d'un ou de plusieurs traitements de revenu afin d'enlever la fragilité du matériel, d'éliminer les contraintes et d'ajuster la dureté finale.[12]

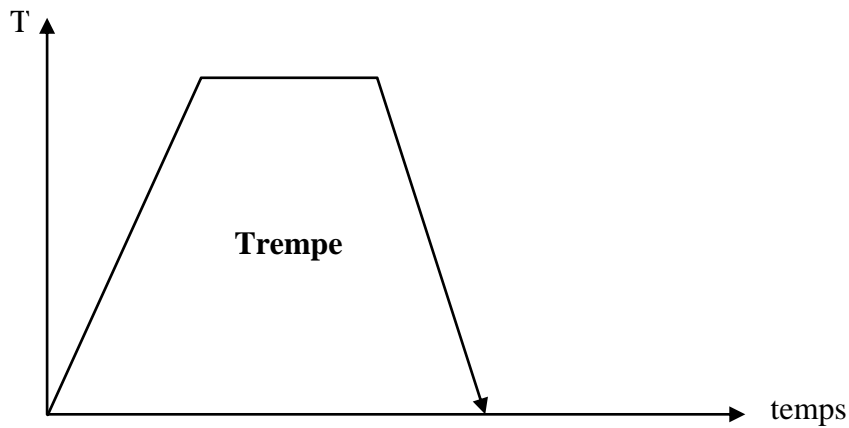


Figure. II.2. Cycle thermique lors d'une trempe. [12]

### II.5.3. Choix de temps de maintien

Le maintien du métal à la température de trempe doit assurer le chauffage à cœur et l'achèvement des transformations de phase, sans qu'il soit trop lent pour éviter le grossissement des grains et la décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale du chauffage  $t_t$  dépend:

- du temps d'échauffement à cœur " $t_{éc}$ " jusqu'à la température demandée. Ce temps dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance de métal, du type de fours, ...etc.
- du temps de maintien isotherme " $t_{mi}$ " qui dépend de la composition et de l'état initial de métal.

Donc:  $t_t = t_{éc} + t_{mi}$

En réalité pour déterminer  $t_t$ , on se réfère aux données expérimentales. Le tableau. (II.1) résume la durée moyenne rapportée à 1 mm d'épaisseur dans différents types de fours.

| Moyen de chauffage | Durée en (s/mm) d'épaisseur de pièce |        |               |
|--------------------|--------------------------------------|--------|---------------|
|                    | Ronde                                | Carrée | Rectangulaire |
| Four électrique    | 40-50                                | 50-60  | 60-75         |
| Four à flamme      | 35-40                                | 45-50  | 55-60         |
| Bain de sel        | 12-15                                | 15-18  | 18-22         |
| Bain de plomb      | 6-8                                  | 8-10   | 10-12         |

Tableau. II.1. Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours. [13]



#### II.5.4. Milieux de trempe

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier. La nature du bain de trempe (eau, huile...etc.) caractérise la vitesse de refroidissement de la pièce immergée après chauffage.

| Nature du bain         | Vitesse de refroidissement                            |
|------------------------|---|
| Saumure                | 220 °C/ seconde                                       |
| Eau froide             | 160 °C/ seconde                                       |
| Eau tiède              | 150 °C/ seconde                                       |
| Eau chaude             | 140 °C/ seconde                                       |
| Huile de trempe        | 70 °C/ seconde  |
| Air soufflé            | 20 °C/ seconde  |
| Air calme              | 2 °C/ seconde   |
| Dans un moule de sable | 0.05 °C/ seconde                                      |
| Dans le four           | 0.01 °C/ seconde (ou selon la programmation du cycle) |

*Tableau. II.2. La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe. [13]*

#### L'essai Jominy

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy.

Cet essai est réalisé en trois étapes :

- l'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées.
- la mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 - J3 - J5 - Jx. [14]

#### Trempe à l'eau

Ce traitement est réservé à des aciers peu alliés qui ont besoin de ce médium pour atteindre les caractéristiques recherchées (1045, W1). Le taux de refroidissement dans l'eau étant très élevé, ce traitement présente des risques importants de distorsion, voire de fissuration. [14]

### **Trempe à l'huile**

Ce traitement est réservé utilisée pour des aciers faiblement alliés comme 1045, 4140, 4340, 8620, 9310, 52100 ou des aciers outils tel que le O1. [14]

### **Trempe à l'air forcé**

Ce traitement est surtout utilisé sur des aciers dont les dimensions sont supérieures à la capacité des fours sous vide (par exemple, aciers inoxydables 410, 420, 431 et acier outilH13). [14]

### **Trempe sous vide**

Ce type de traitement s'adresse essentiellement aux aciers outils (A2, D2 S7, H13, H21, T1, M2) et aux aciers inoxydables martensitiques. [14]

### **Trempe subzéro (ou cryogénique)**

Ce procédé consiste à refroidir dans la neige carbonique, ou l'air liquide, les pièces traitées en trempe étagée martensitique dont la transformation austénite-martensite est insuffisante pour obtenir la dureté recherchée. Cette trempe est très intéressante avec les aciers cémentés pour lesquels la température de trempe n'est qu'un compromis entre la température assurant la trempe à cœur et celle assurant la trempe des couches extérieures. Le traitement par le froid (ou traitement cryogénique) consiste à refroidir les pièces mécaniques en dessous de la température ambiante après un traitement thermique de trempe. La température de maintien se situe entre 0 °C et 150 °C (le plus souvent entre 80 °C et 100 °C pour les aciers). [14]

## **II.6. Revenu**

Le revenu est une opération finale du traitement thermique qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe. Il consiste à chauffer le métal trempé à une température inférieure à Ac1, à le maintenir à cette température et enfin à le refroidir jusqu'à la température ambiante. Le revenu provoque une évolution de la structure du matériau vers un état plus proche de l'état physico-chimique d'équilibre, sans toutefois l'atteindre. Il permet d'avoir un compromis satisfaisant entre les propriétés de résistance (Rm, Re, H) et de plasticité (A, Z et K).

La vitesse de refroidissement après revenu a une influence très faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles.[15]

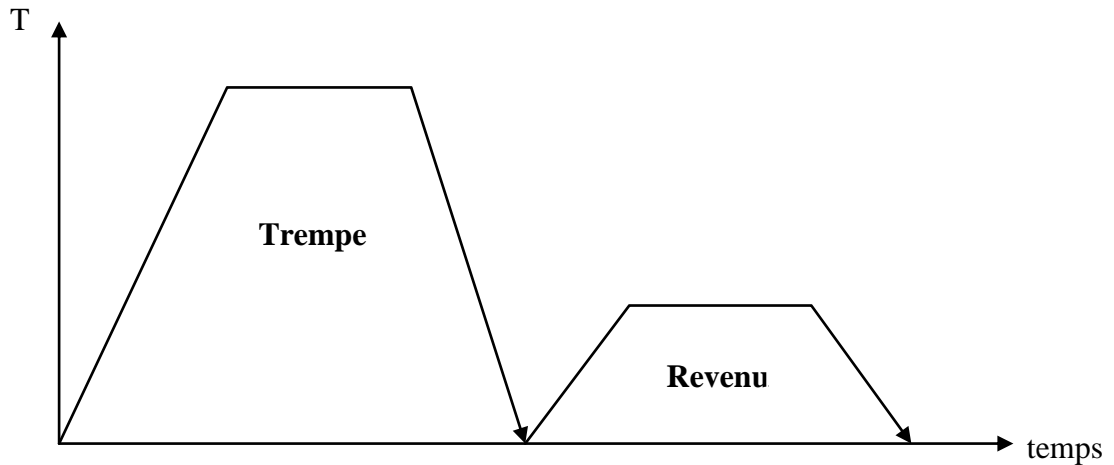


Figure. II.3. Cycle thermique complet d'une trempe et revenu. [15]

### II.6.1. Revenu de relaxation ou de détente

Il s'effectue entre 180°C et 220°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite → martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle. [15]

### II.6.2. Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et Ac1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, R<sub>m</sub> et R<sub>e</sub>. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.[15]

### II.6.3. Revenu de durcissement

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires). [15]

### II.6.4. Revenu à basse température

Il s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et

améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 + 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en acier au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures. [15]

#### **II.6.5. Revenu à température intermédiaire**

Il se réalise entre 350 et 500°C et s'emploie pour les ressorts variés et les étapes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, ce qui contribue à la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts. [15]

#### **II.6.6. Revenu à haute température**

Il se fait entre 500 et 680°C. Il donne à l'acier la structure sorbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore par rapport à l'état normalisé ou recuit les limites de rupture et d'élasticité. La striction et surtout la résilience.

L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 + 0,5%). [15]

### **II.7. Recuit**

Les aciers possèdent un caractère apte d'acquérir grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes. [16]

### II.7.1. Cycle thermique d'un recuit comprend

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (fig.4). [16]

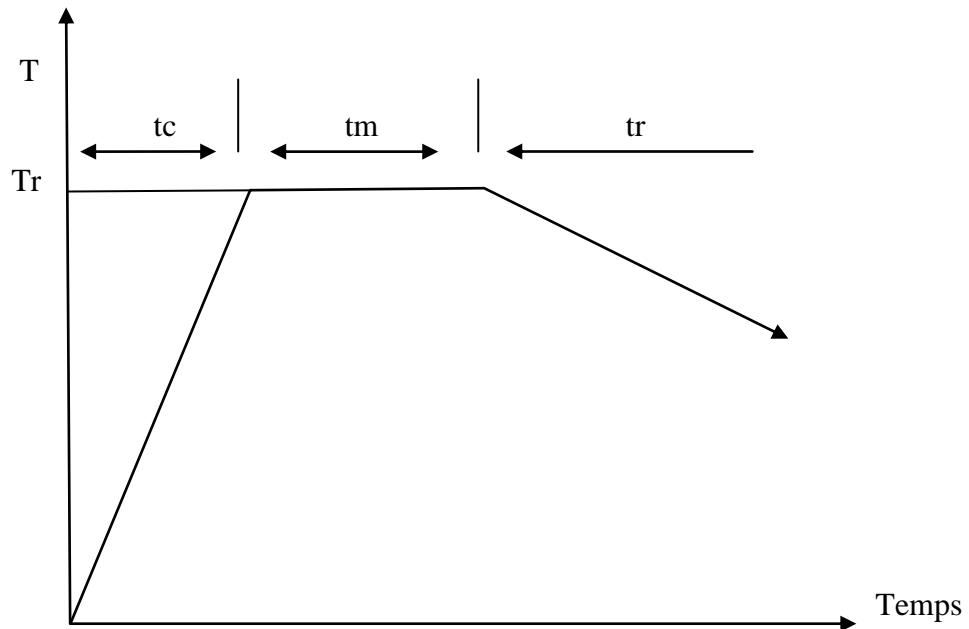


Figure. II.4. Cycle thermique d'un recuit comprend. [16]

Tr : température de recuit

tc : temps de chauffage

tm : temps de maintien

tr : temps de refroidissement

### II.7.2. Recuit d'homogénéisation

Ce traitement s'applique surtout aux produits bruts de coulée en alliages à large intervalle de solidification (eupro-étain, eupro-béryllium), pour en faciliter la transformation ou pour améliorer les propriétés technologiques des demi-produits.

Il a pour effet d'atténuer ou de supprimer la ségrégation dendritique, de dissoudre les phases hors d'équilibre, de précipiter les éléments en solution sursaturée et de répartir uniformément les constituants.

L'homogénéisation peut, parfois, être accélérée par la pratique du recuit oscillant au cours duquel la température de maintien parcourt un certain nombre de cycle entre deux valeurs encadrant généralement un point de transformation. [16]

### **II.7.3. Recuit d'adoucissement**

Ce type de recuit consiste au chauffage de longue durée de l'acier aux températures près de  $AC_1$  (650 - 680°C) suivi d'un refroidissement lent d'environ 10°C/h. Pour les aciers à carbone, la température de chauffage étant de 650 à 750°C.

Pour le domaine de phase  $\gamma + Fe_3C$ , si on refroidit lentement à partir de la température un peu plus supérieure à  $AC_1$ , au point  $AR_1$ , se cristallise le carbide précipité directement en grains globulaires, ce qui détourne la formation de la perlite lamellaire.

Le but du recuit d'adoucissement est de donner à l'acier une structure convenable à la trempe et de la transférer à un état usinable et ductile. Après le forgeage et la normalisation la structure des aciers à carbone est perlitique. [16]

### **II.7.4. Recuit complet**

Il comporte un chauffage et un maintien vers ( $Ac3 + 50^\circ C$ ) suivis d'un refroidissement au four à de faible degrés de surfusion afin d'assurer la décomposition de l'austénite et de parer à la formation de structures à grande dureté (martensite, bainite). Ce recuit s'effectue sur des pièces ayant subies des traitements thermiques et mécaniques variés afin de faciliter leur usinage ou leur déformation à froid. C'est ce qu'on désigne généralement sous le terme "recuit". [16]

### **II.7.5. Recuit régénération**

Ce recuit est utilisé pour rétablir la structure normale après un traitement thermique défectueux, mais il ne peut s'appliquer qu'aux métaux et alliages qui présentent un changement de phase. Il consiste à porter les pièces, pendant un temps relativement court, un peu au-dessus du point de transformation.

Le cas le plus fréquent est la destruction de la structure de surchauffe qui favorise la fragilité intergranulaire. Ce traitement n'est pratiquement pas applicable aux alliages cuivreux industriels, dont la régénération du grain après surchauffe ne peut être obtenue que par un écrouissage suivi d'un recuit de recristallisation. [16]

### **II.7.6. Recuit de détente**

Ce recuit est surtout utilisé pour éliminer ou atténuer les contraintes internes des produits mis en forme à froid. Il est effectué dans une zone de température inférieure à celle de la recristallisation, de manière à ne pas trop altérer les caractéristiques mécaniques obtenues par écrouissage. Le recuit de détente est également utilisé pour stabiliser certaines pièces en cours d'usinage, lorsque la coupe

dissymétrique des fibres détruit l'équilibre des contraintes internes et provoque des déformations.[16]

### **II.7.7. Recuit recristallisation**

Le travail à froid d'un métal par déformation plastique (laminage, tréfilage...) conduit à un écrouissage. Une structure écrouie est caractérisée par une forte déformation orientée des grains et une grande densité de défauts cristallins. La structure devient fragile et s'accompagne d'un accroissement des propriétés de résistance et d'une réduction des propriétés plastiques. Ce recuit s'effectue dans la zone de recristallisation située au-dessus d'une température qui dépend de la nuance de l'acier et de son degré d'écrouissage. Il y a germination de nouveaux grains puis croissance jusqu'à contact mutuel. [16]

### **II.7.8. Recuit de coalescence**

Ce recuit consiste, après chauffage à une température légèrement inférieure à  $A_{c1}$ , à maintenir l'acier à cette température pendant un temps plus ou moins long, puis à le refroidir lentement, de façon qu'il soit dans un état aussi doux que possible et exempt de contraintes. Il s'agit également d'un recuit permettant de faire évoluer la forme géométrique des carbures, telles que les lamelles de cémentite, vers la forme sphérique stable. Il sert également à améliorer la capacité de déformation à froid du matériau traité. [16]

## **II.8. Conclusion**

En conclusion nous disons que le traitement thermique de l'acier a plusieurs types et se déroule par de nombreuses étapes afin de nous donner un acier avec de bonnes propriétés appropriées.

# *Chapitre III :*

## *Résultats de quelques travaux de recherche*



## **Chapitre III : Résultats de quelques travaux de recherche**

### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous avons exposé des dizaines résultats des travaux de recherche concernant les effets de traitement thermique sur les aciers et ses alliages d'une façon collectionné et synthétisé selon leurs impact sur les différentes propriétés communs, dont le but de faciliter la recherche dans ce sujet.

### **III.2. Effet de la trempe sur la dureté**

Dans le travail de recherche de BENCHABANE Mustapha et MEDSANA Hand [17], les auteurs ont montré selon une étude expérimentale, que la trempe a une grande influence sur la dureté superficielle sur l'acier 35CD4. Leurs résultats obtenus à partir des essais de duretés (HB, HRA, HV) confirment que :

- la dureté de l'acier trempé est supérieure à celle de l'acier de référence. L'augmentation est très marquée. Ils ont observés les mêmes résultats pour les autres types de dureté (dureté Rockwell et dureté Vickers).

Dans la recherche de CHERIFI Naima et BESSAH Chafia [18] concernant l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier, les auteurs ont constaté que l'augmentation de la dureté sur les différents échantillons d'aciers caractérisés après les traitements thermiques utilisés est atteint un maximum (53 HRC) sur l'acier traité à 950°C.

La plus faible dureté a été enregistrée après trempe à 1040°C (43 HRC), ils remarquent que la microstructure formée après ce cycle de traitement thermique présente des carbures précipités plus volumineux par rapport aux autres cycle thermiques appliqués et d'une austénite résiduelle grossière.

Dans la recherche de MOUMEN Abdelhak [19], Contribution à l'étude de l'effet du traitement thermique sur les diverses propriétés d'un nano composite à matrice polypropylène, l'auteur a montré que la plus petite valeur de la dureté Shore D est obtenue à la température de trempe -20°C. À cette température, les chaînes sont allongées résultant une structure libre, et ceci implique une résistance relativement faible à l'indentation pendant la mesure de la dureté. Les valeurs de la dureté augmentent avec l'accroissement de la température de trempe.

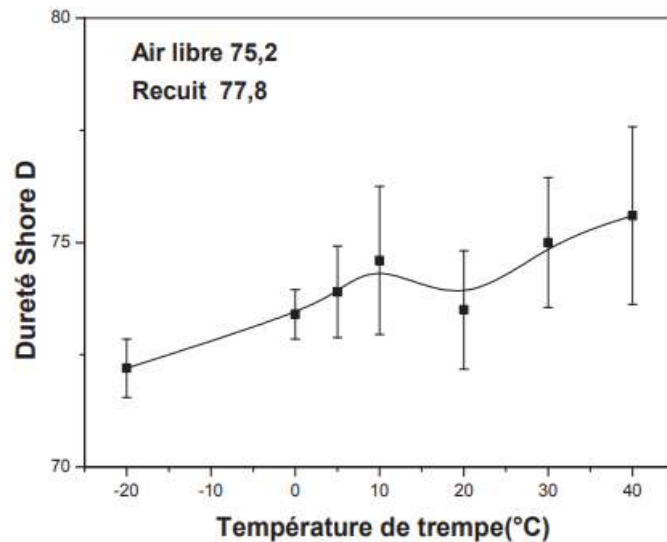


Figure.III.1. Variation de la dureté Shore D du PP/Mmt en fonction de la température de trempe. [19]

Dans le travail expérimental de OUSSADANE Nassim [20], sur un acier de type X155CrVMo12.1, l'auteur a conclu que la dureté HRC est augmentée après un traitement de trempe, mais ce n'est pas proportionnel, croissant ou décroissant. Il donne ses résultats obtenus dans le tableau suivant:

| Température de trempe °C | Dureté HRC |
|--------------------------|------------|
| 990                      | 49         |
| 1025                     | 56         |
| 1040                     | 53         |

Tableau.III.1. Résultats de dureté après trempe [20]

Il a interprété cette variation non proportionnelle par le degré relatif de grossissement des grains austénitiques.

Dans la recherche de RAHIMI Naoufel [21], l'auteur a montré que la trempe à une grande influence sur la dureté. Après l'analyse des résultats obtenus, le chercheur a conclu que:

Les duretés moyennes de l'acier étudié des différents états: forgé, le revenu à 250°C dans tout les cas, et trempé à 870°C, 950°C et à 1150°C sont : 47,7 HRC ; 51 HRC ; 53,76 HRC et 49,1 HRC respectivement. Les variations des valeurs en fonction de l'état de l'acier étudié, sont fonction des différentes structures obtenues. Il a constaté que lorsque la température d'austénitisation augmente, la surfusion du matériau augmente, et en conséquence une augmentation de la dureté. Donc des traitements thermiques d'amélioration trempe et revenu effectué sur matériau étudié par

l'augmentation de sa dureté. Lorsque la température dépasse 950°C on obtient une structure à gros grain qui dégrade la dureté et les propriétés mécaniques en général.

Dans le travail expérimental de BOUIADA Boutheyna et NOURI Besma [22] sur des aciers ont des pourcentages de carbone différents (1%C et 0.38%C), Ils ont remarqués après une trempe de différents paramètres que la dureté de l'acier qui à 1 %C est toujours supérieure à celle de l'acier qui à 0,38 %C. Ils ont conclu que la richesse de carbone en acier est un facteur très important pour la dureté après trempe.

Dans la recherche de AIT GHERBI Hamza et SALHI Sofiane [23], Amélioration de la dureté de la vanne de contrôle dans les systèmes de forage à entraînement supérieur, Les auteurs ont estimés que la dureté de l'acier trempé a augmenté d'une manière importante par rapport à la dureté du matériau de référence, ce qui s'aligne bien avec l'objectif souhaité de leurs étude.

Dans le travail de recherche expérimental de MOKRANI Kenza [24], sur un acier de type BS, l'auteur a montré que La micro dureté de l'échantillon à l'état brut est inférieure par rapport à la valeur de l'échantillon traité par une trempe à 500 ° C.

Dans la recherche de TAYEBBEY Yacine [25], Optimisation du temps de maintien à la température de revenu après trempe de deux types d'acier C45et 42CrMo4, l'auteur est arrivé au résultat suivant: Après une trempe de l'acier 42CrMo4, ce dernier présente des duretés nettement supérieures par rapport à l'acier non allié (XC48) trempé. Il a commenté ce résultat que l'acier 42CrMo4 contient des éléments d'alliages carburigènes comme le chrome et le molybdène qui favorisent la formation des carbures stables et plus dures par rapport à la cémentite Fe<sub>3</sub>C (carbure de fer) seule.

Dans la recherche de BLAOUI Mohamed Mossaab [26], dans son étude de l'influence des traitements thermiques sur le comportement en fatigue des aciers, l'auteur a conclu que l'effet de la trempe sur l'acier C45 augmente sa dureté avec une diminution du temps de maintien et de la vitesse de chauffage.

Dans la recherche de BOUNAB Fatima [27], Evolutions microstructurales Lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4), Elle prenne trois températures de maintien (800°C, 850°C, 900°C) avec différents milieux de refroidissement (air, eau, huile). Elle a remarqué que la trempe à température T°=850°C, est la meilleure pour les aciers de son étude afin d'obtenir une dureté élevée.

Dans le travail expérimental de BELERHMI Sofiane [28], sur un acier de type 40CrMoV5, a trois températures de maintien (900 °C, 950 °C et 1000 °C), et trois milieux de refroidissement (air,

eau, huile), l'auteur a constaté que la meilleure température d'austénitisation des aciers de référence est  $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , à cette température la micro dureté augmente rapidement en fonction de milieu de trempe et vitesse de refroidissement.

Dans la recherche de HOUZÉ Marc [29], Influence des traitements thermiques sur le pouvoir thermoélectrique des aciers de cuve, l'auteur a montré selon ses résultats obtenus que la dureté de l'acier FS diminue après une trempe à température de maintien  $1050^{\circ}\text{C}$ .

Dans le travail de recherche de Bourenane Hichem et Haddaden Billal [30], L'effet de traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium de nuance AU4G, Les auteurs ont constaté après des essais mécaniques de dureté Brinell, que la dureté la plus élevée obtenue est celle par le refroidissement par glace.

Dans le travail expérimental de TAOUINT Lounis et BenkadouM Rachid [31], Etude de l'effet du traitement thermique sur un acier à différentes températures, les auteurs ont montrés que la dureté est proportionnelle avec la température jusqu'au la température  $1100^{\circ}\text{C}$  où la dureté est commence à diminuer.

Dans le travail de recherche de BERBITI Antar [32], Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains, l'auteur a montré qu'une trempe à température de  $850^{\circ}\text{C}$  avec un milieu de refroidissement d'huile après brunissage, permet d'augmenter la dureté jusqu'a  $50.6\text{ HRC}$  après qu'elle était de  $41.6\text{ HRC}$ .

Dans le travail de recherche de MEBARKI Nadia [33], Etude comparative du comportement tribologique des aciers  $100\text{Cr6}$  et  $16\text{MnCr5}$  en milieu sévère, l'auteure a montrée que la dureté de  $16\text{ MnCr5}$  cémenté augmente par rapport à celle de l'acier  $100\text{Cr6}$  trempé, et la dureté de ce dernier est supérieure par rapport au acier de base.

Les essais qui ont été réalisés par LAADJAL Djamel [34], afin de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques, l'auteur a utilisé deux types d'échantillons de l'alliage d'aluminium 6101, montrent une augmentation importante de la dureté des alliages trempés par rapport aux alliages de base.

Dans le travail de recherche de OUALI Omar et KHADIR Samir [35], les auteurs ont montré selon une étude expérimentale la trempe provoque augmentation de la dureté.

ZIANE Jugurtha [36], dans son travail de recherche expérimental sur un alliage, L'auteur a montré que l'alliage de son étude trempé a une dureté supérieure à l'alliage de base quelque soit les températures des essais et quelque soit le milieu de refroidissement.

L'auteur BOUNOUA Salheddine [37], a montré que la trempe à l'eau du Tt à T° 900°C, et du Tr à T°= 450°C, donne une homogénéisation et forte augmentation de dureté jusqu'à 56 HRC.

Dans la recherche A.BELAHCENE, M.S. HAMANI et D.E.HAMMOUDI [38], les auteurs ont montré selon une étude expérimentale, qu'il ya une augmentation de la dureté de l'alliage d'aluminium de type A-G10 après la trempe quelque soit le milieu de refroidissement avec des températures différentes.

### III.3. Effet du recuit sur la dureté

Dans la recherche de BENCHABANE Mustapha et MEDSANA Hand [17], les auteurs ont montré que le traitement thermique par recuit rend l'acier 35CD4 moins dur et plus ductile que l'acier de référence.

Dans la recherche de AIT GHERBI Hamza et SALHI Sofiane [23], L'acier de leur étude qui subit à un recuit donne la même dureté que l'acier de base.

Dans le travail expérimental de BOURAHLA Smain [39], L'auteur enregistre la variation de la micro-dureté HV en fonction de la température pour les temps de recuits choisis 30 et 60 minutes des échantillons. Il a été remarqué une diminution de la valeur de la micro-dureté à 300°C par rapport à celle relevée à l'état initial, suivi d'un léger accroissement pour le traitement thermique à 400°C. Une augmentation remarquable de cette valeur est observée à 500°C.

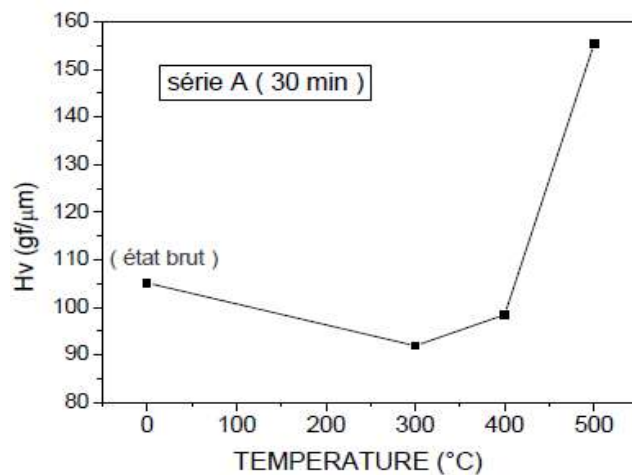
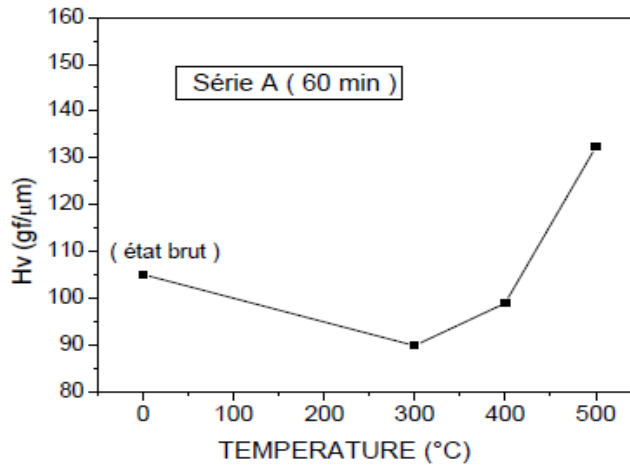


Figure.III.2. Variation de la micro-dureté en fonction de la température pour 30 min de recuit. [39]



**Figure.III.3.** Variation de la micro-dureté en fonction de la température pour 60 min de recuit. [39]

Dans le travail expérimental de ZAOUI Moussa [40], influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées cas des soudures épaisses, l'auteur a montré selon ses résultats obtenus, qu'il y a une chute de dureté assez remarquable après un recuit à une température inférieure à 720°C.

Dans le travail expérimental de BADR Amira [41], l'auteur a montré que le traitement thermique à 185 °C augmente la dureté de l'alliage Al-Mg-Si, la phase métastable  $\beta$  est la phase la plus durcissante, sa valeur de micro-dureté Vickers est au voisinage de 85 HV.

Dans la recherche de BADJI Riad [42], l'auteur a montré que Les traitements thermiques effectués dans la tranche de température 800-1000 °C ont causé la précipitation de la phase  $\sigma$  et des carbures de chrome  $M_{23}C_6$  qui a entraîné la dégradation des différentes propriétés mécaniques du joint soudé. La figure III. Montre une élévation très significative de la dureté par rapport à l'état brut de soudage. Au-delà de 850 °C les précipités commencent à se dissoudre d'où la chute de dureté observée. La chute de dureté observée entre 1050 et 1100°C est due à un phénomène complexe qui lie la recristallisation de l'acier et la croissance des grains. Au-delà de cette température la dureté de l'acier se remet à accroître du fait de l'augmentation du taux de ferrite.

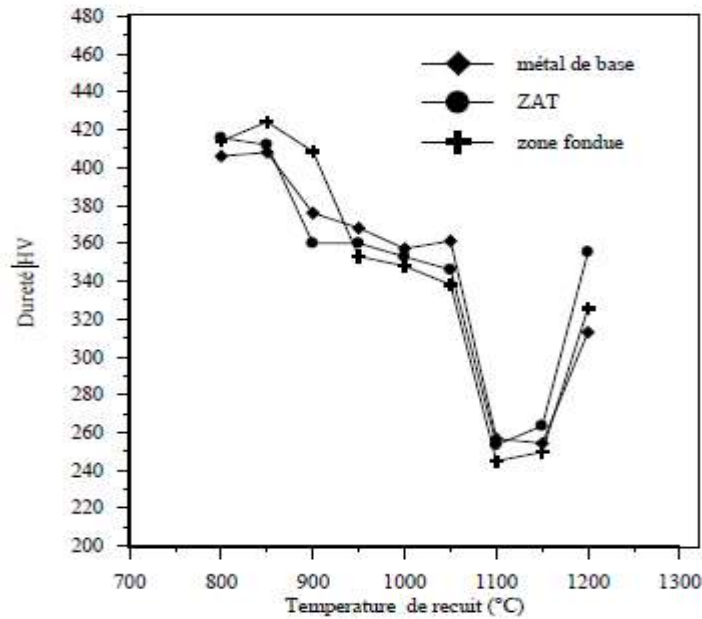


Figure III.4. Evolution de la dureté en fonction de la température de recuit. [42]

### III.4. Effet du revenu sur la dureté

Dans le travail expérimental de BOUIADA Boutheyna et NOURI Besma [22] concernant leur étude sur les traitements thermiques (revenu) des aciers de type 1 % C et de 0,38 % C, les auteurs ont conclu que l'augmentation de la dureté est proportionnelle avec la température de revenu.

Les auteurs A. Saad Eddin, M.A. Bradai et M. Kerkaret A. Benabbas [43], ont montré à partir des résultats obtenus, le traitement de revenu à des températures de 500 ° C et 525 ° C offre une dureté élevée par rapport aux autres températures.

Dans le travail expérimental de B.Chermime et al. [44], les auteurs ont constatés que:

- Une diminution de la dureté avec un revenu de température à partir de 200°C.
- Une augmentation de la dureté avec un revenu de température entre 400°C et 500°C.

Dans le travail expérimental de OURTI Abderrahmane et FENGAL Massinissa [45], sur les aciers 35CrMo4 et 25CrMo4, Après les opérations des revenus, la dureté des deux nuances d'aciers diminue.

Dans le travail de HADJI Hicham et MABROUKI Djelloul [46], les auteurs ont montrés qu'après la trempe une petite augmentation de la valeur de la dureté, et après avoir appliqué le revenu une augmentation significative de la valeur de micro dureté.

Dans l'étude expérimentale d'Emilie HERNY [47], l'auteur est arrivé à la conclusion suivante:

Après un traitement de revenu, la dureté de l'acier étudié augmente environ de 20HV. En comparant les valeurs obtenues, Il a constaté que la valeur moyenne obtenue en micro-dureté est très proche de la valeur obtenue en macro-dureté.

Dans la recherche de Tayebbey yacine [48], sur de deux types d'acier C45et 42CrMo4, l'auteur a montré par une étude expérimentale, qu'il ya une diminution légère de la dureté après le revenu en fonction du temps de maintien.

Dans le travail expérimental de Nicoleta RADUTOIU [49], influence des traitements thermiques sur le comportement d'un alliage, l'auteur a constaté que le traitement thermique de sur revenu provoque la diminution de la dureté.

Dans le travail de Mauriès Sébastien [50], l'auteur a montré que la dureté de la nuance Co est légèrement plus élevée après un traitement de revenu que dans la nuance X38CrMoV5 sans revenu.

Dans la recherche de MEHALA Sofiane [51], les auteurs ont constatés qu'avec un revenu à température de maintien 420°C d'acier d'étude, il ya une l'augmentation de la dureté. Mais il ya encore plus d'augmentation de la dureté à la température 490°C.

### III.5. Effet de traitement thermique sur la Résilience et la ductilité

Dans la recherche de BENCHABANE Mustapha et MEDSANA Hand [17], Etude expérimentale de l'usure d'un corps de pompe à boue de forage en acier 35CD4, les auteurs ont montrés suivant leurs résultats obtenus que la résilience de l'acier 35CD4 trempé soit supérieure à celui non trempé.

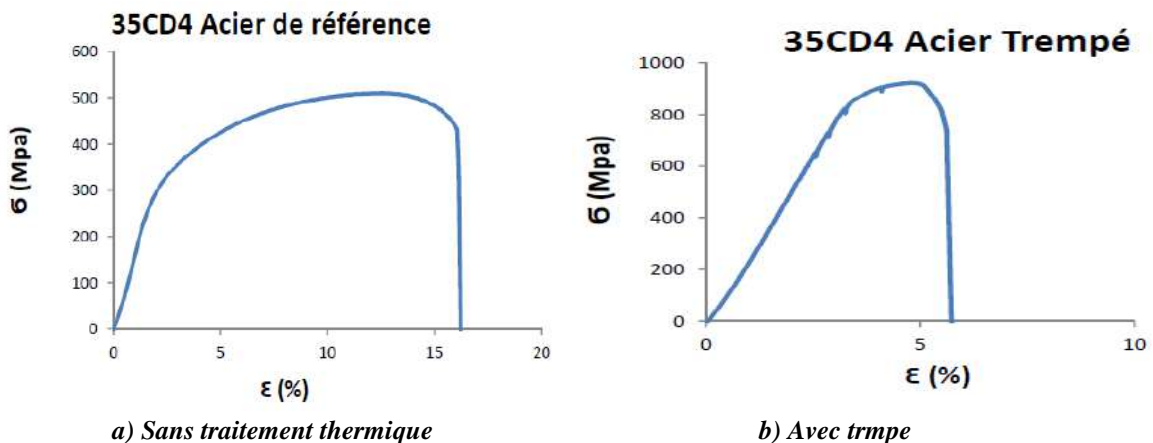


Figure.III.5. La courbe de traction pour l'acier 35CD4 [17]



Dans le travail expérimental de AIT GHERBI Hamza et SALHI Sofiane [23], sur un acier de type 42CD4, les auteurs ont montrés suivant leurs résultats obtenus que la résilience de l'acier 42CD4 trempé est supérieure à celui non trempé.

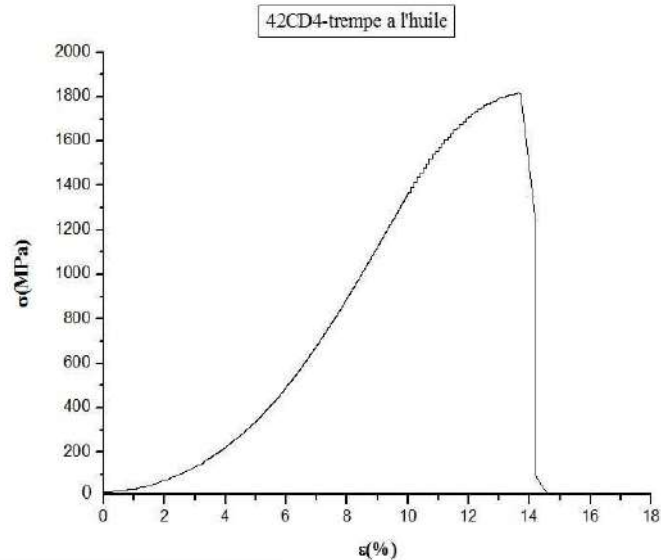


Figure. III.6. Courbe de traction pour l'acier 42CD4 après traitement de trempé et de revenu. [23]

Dans le même travail, les auteurs ont montrés aussi que l'acier 42CD4 après un recuit donne une déformation de 12%, ce qui résulte une augmentation de la résilience.

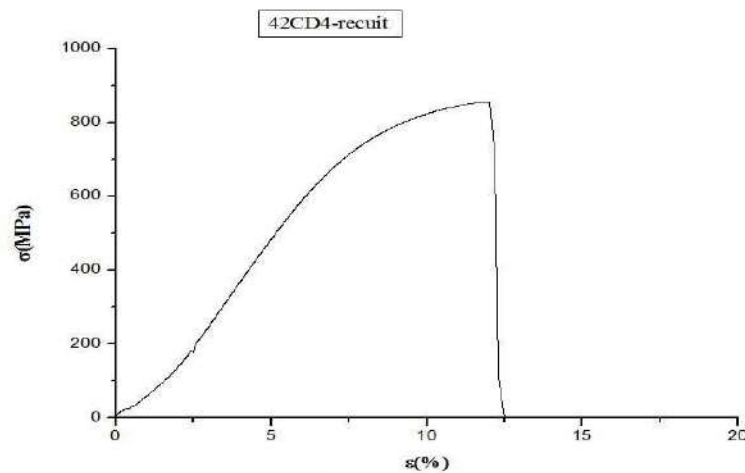


Figure.III.7. Courbe de traction pour l'acier 42CD4 avec traitement thermique de recuit. [23]

Mais, dans la recherche menée par MEBARKI Nadia [33], sur des aciers de type 16MnCr5 et 100Cr6, Elle a conclu que la résilience diminue après traitement thermique par rapport l'acier de base.

Dans la recherche de BOUNOUA Salheddine [37], l'auteur a montré par ses résultats obtenus, que la trempe à l'huile donne une meilleure ductilité par rapport le refroidissement à l'air/eau.

Dans le travail expérimental de ZAOUI MOUSSA [40], et selon ses résultats obtenus, l'auteur a montré que la valeur de résilience est augmentée en fonction de la température du Revenu ou Recuit. Il a constaté aussi que la résilience est augmentée plus pour un refroidissement à l'air que celle à l'eau.

A partir des résultats obtenus par le travail de recherche de A. Saad Eddin et al [43], les auteurs ont constatés que les échantillons trempés à 1050°C et ensuite subi à des revenus à températures de 525°C et 575°C ont des valeurs de résilience plus que les échantillons trempés uniquement.

Dans le travail expérimental de OURTI ABDERRAHMANE et FENGAL MASSINISSA [45], Influence de l'effet de traitement de revenus sur les propriétés de dureté-résilience de deux nuances d'acier 25CD4 et 23CD4, les auteurs ont conclus que la résilience des deux nuance d'aciers après un revenu augmente proportionnellement avec la température de revenu.

Dans le travail de recherche Nicoleta RADUTOIU [49], l'auteur remarque que le traitement thermique de sur-revenu entraîne la diminution de la résilience, d'après ses résultats sur les nuances étudiés.

Mauriès Sébastien [50], dans son travail, il a conclu qu'après un revenu à température de 500°C, la résilience de l'acier HY180 est augmente.

Dans le même travail, l'auteur a remarqué aussi qu'il ya une augmentation de ductilité après un recuit à température inférieure à 720°C.

Sébastien Morin [51], dans son travail expérimental, il a montré que Le traitement de mise en solution à 495 °C pendant 8 heures donne une amélioration significative de la résilience de l'alliage de son étude par rapport le refroidissement dans l'eau.

### **III.6. Effet de traitement thermique sur la résistance à l'usure**

Dans un article réalisé par BENCHABANE Mustapha et MEDSANA Hand [17], Etude expérimentale de l'usure du carter de pompe à lisier en acier 35CD4, les auteurs ont confirmé les résultats d'une diminution de l'usure après traitement thermique.

Dans le travail expérimental de CHERIFI Naima et BESSAH Chafia [18], les auteures ont obtenues des résultats qui montrent l'amélioration de la résistance à l'usure et corrosion d'un acier

de type 35CD4 et un acier de type (X38CrMoV5-1), après qu'ils subits à un cycle de traitement thermique.

Dans le travail de recherche OUSSADANE Nassim [20], Etude de l'influence des traitements thermique sur la résistance a l'usure des aciers de type X155CrVMo12.1, l'auteur a obtenu des résultats qui prouvent l'amélioration de la résistance à l'usure de l'acier étudié après qu'il subit à un traitement thermique (trempe/revenu).

Dans la recherche de RAHIMI Naoufel [21], Etude de l'influence du traitement thermique sur le comportement à l'usure d'un acier forgé, l'auteur a conclu que la résistance à l'usure des échantillons d'étude trempés ou subits à un revenu est mieux que les échantillons non traités.

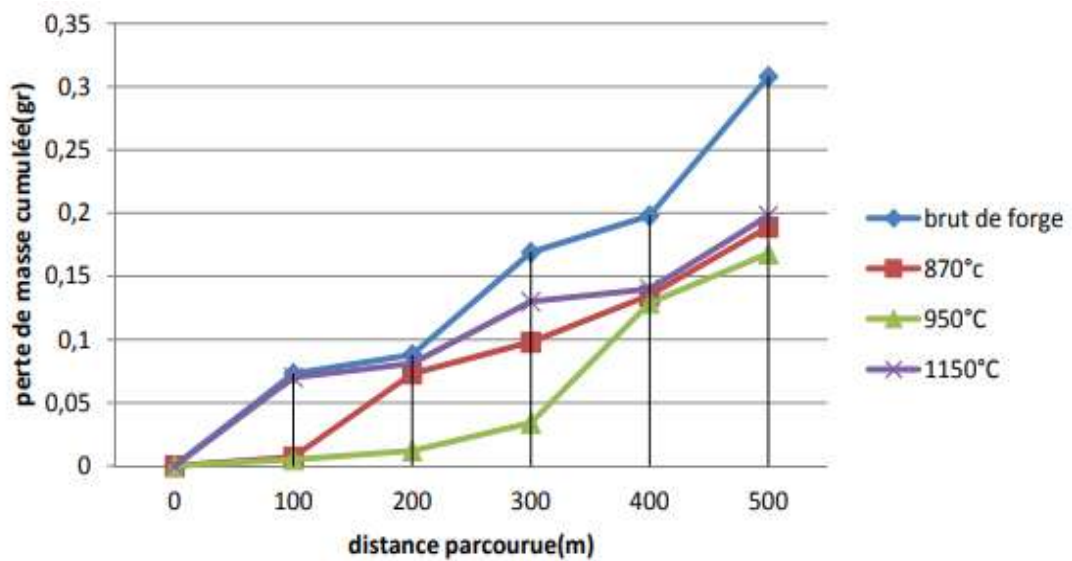


Figure.III.8. Influence de la température de traitement thermique sur la résistance à l'usure. [21]

Les auteurs BOURENANE Hichem et HADDADEN Billal [30], selon leurs étude sur le comportement à l'usure des différents échantillons de l'aluminium (2017A), ils ont conclu que le vieillissement glace est le traitement le plus approprié pour avoir la meilleure tenue à l'usure.

Dans le travail expérimental de TAOUINT Lounis et BENKADOUM Rachid [31], les auteurs ont obtenus des résultats à partir d'une étude comparative des comportements en matière de perte de masse et ceux obtenus de la caractérisation morphologique ont aidé à tranché sur le fait que l'acier traité à 850°C présente une meilleure tenue à l'usure par rapport aux autres échantillons traités et non traités.

Dans le travail de recherche MEBARKI Nadia [33], sur des aciers de type 16MnCr5 et 100Cr6, l'auteure a conclue après des résultats obtenus, que Le traitement superficiels augmentent la résistance à l'usure.

Dans le travail de recherche de A. Saad Eddin et al. [43], les auteurs ont conclu que les échantillons, ayant subi un traitement thermique ont une résistance à l'usure mieux que les autres échantillons, et qu'un revenu à 525°C pendant 5 heures, présente une meilleure résistance à l'usure parmi les différentes températures étudiées.

Par contre, MEHALA Sofiane [51], dans son travail de recherche, a montré que la L'application d'une mise en solution à 490°C induit une corrosion inter-granulaire qui constitue un site favorable pour le développement d'une corrosion localisée dans le matériau.

Dans le travail expérimental de HAKIM Ahmed [53], l'auteur a prouvé qu'après un traitement thermique sur AlSi10M2, il lui donner une bonne résistance à la corrosion

### **III.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné des dizaines de recherches publiées, et nous avons les groupés et les classés suivant leurs études et influences sur les différentes caractéristiques.

Nous avons constaté que la plupart des résultats des travaux sont semblables dans le sens général de point de vu l'influence des traitements thermiques sur les différentes caractéristiques d'un matériau.

# *Conclusion général*

## **Conclusion général**

Suite aux effets étendus des traitements thermiques sur les différents matériaux, et en particulier les aciers et leurs alliages, on trouve une abondance de recherches scientifiques expérimentales qui s'intéressent à ce type de sujet. Ce qui offre un nombre très important de données et résultats. Cette richesse d'avis et recommandations similaires et comparables parfois et compléments ou contradictoires d'autres fois selon le matériau d'étude ou les paramètres de traitement utilisés, autant cela aide le chercheur, autant cela le fait perdre dans cette énorme quantité de recherches.

Nous avons participé par ce modeste travail afin de faciliter la recherche bibliographique sur ce sujet, où nous avons commencé notre travail par généralité sur les aciers suivi par un chapitre consacré à la définition du processus de traitement thermique avec ses différents types et paramètres.

Et dans le troisième chapitre, nous avons assemblé des dizaines de recherches expérimentales, et nous avons les ordonnés et classées selon l'effet du traitement thermique sur chaque propriété mécanique. On a obtenu beaucoup de résultats similaires pour chaque caractéristique, et quelques résultats des travaux qui ont contredit avec d'autres, mais d'une façon complémentaire.

# *Référence Bibliographique*

- [01] [www.reliance-foundry.com](http://www.reliance-foundry.com), 07/04/2021.
- [02] J.BARALIS, G. MAEDER, Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [03] [www.ilocis.org/fr](http://www.ilocis.org/fr), 22/03/2021.
- [04] S.BENSAADA, Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers), 2010.
- [05] TLILI Adnane, Matériaux métalliques, ISET-Nabeul, 2014/2015.
- [06] J.BARRALIS, G.MAEDER, précis de métallurgie, structure, propriétés, normalisation.
- [07] HIDOURI, cour de matériau, 2016/2017.
- [08] Lycée Jean Zay, Traitements thermiques des aciers, s2i.pinault-bigéard.com, 19/01/2021.
- [09] [www.a3ms.fr](http://www.a3ms.fr), 22/03/2021.
- [10] C.EGOUIN, Manganese steel that don't require heat treatment, Climax Molybdenum Company of michigan, 1976.
- [11] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr), 06/03/2021.
- [12] [www.comiteperform.ca](http://www.comiteperform.ca), 09/01/2021.
- [13] LOKHMIDE, Métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, moscow, 1986.
- [14] <http://copperalliance.fr>, 14/03/2021.
- [15] ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, Matériaux Métalliques, 2009/2010.
- [16] [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), 14/03/2021.
- [17] BENCHABANE Mustapha, MEDSANA Hand, « Etude expérimentale de l'usure d'un corps de pompe a boue de forage en acier 35CD4 », Mémoire de Master université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.
- [18] CHERIFI Naima, BESSAH Chafia, « Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier à outils pour travail à chaud (X38CrMoV5-1) », Mémoire de Master université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [19] MOUMEN Abdelhak, « Contribution à l'étude de l'effet du traitement thermique sur les diverses propriétés d'un nanocomposite à matrice polypropylène », Mémoire de Magister université Ferhat Abbas Setif, 2014.
- [20] OUSSADANE Nassim, « Etude de l'influence des traitements thermique sur la résistance a l'usure des aciers à outils de type X155CrVMo12.1 », Mémoire de Master université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.
- [21] M. RAHIMI Naoufel, « Etude de l'influence du traitement thermique sur le comportement à l'usure d'un acier forgé », Mémoire de Master université Badji Mokhtar Annaba, 2018.

- [22] BOUIADA Boutheyna, NOURI Bisma, « Les effets des traitements thermique sur la structure des aciers », Mémoire de Master université Larbi Ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2019.
- [23] AIT GHERBI Hamza, SALHI Sofiane, «Amélioration de la dureté de la vanne de contrôle dans les systèmes de forage à entraînement supérieur », Mémoire de Master Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU, 2013.
- [24] MOKRANI Kenza, « Microstructure et caractérisation d'un acier BS », Mémoire de Master Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [25] TAYEBBEY Yacine, « Optimisation du temps de maintien à la température de revenu après trempe de deux types d'acier C45et 42CrMo4 », Mémoire de Master Université de M'sila, 2016.
- [26] BLAOUI Mohamed Mossaab, « etude de l'influence des traitements thermiques sur le comportement en fatigue des aciers », Thèse de doctorat Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2019.
- [27] BOUNAB Fatima, « Evolutions microstructurales Lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) », Mémoire de Master Université Biskra, 2013.
- [28] BELERHMI Sofiane, «Comportement structurale et mécanique lors de la trempe de l'acier 40CrMoV5 », Mémoire de Master Université Biskra, 2019.
- [29] HOUZÉ Marc, «Influence des traitements thermiques sur le Pouvoir Thermoélectrique des aciers de cuve » Thèse de doctorat Ecole Universitaire D'Ingénieurs de Lille, 2002.
- [30] BOURENANE Hichem, HADDADEN Billal, « Influence des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium de nuance AU4G », Mémoire de master Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2019.
- [31] TAOUINT Lounis, BENKADOUM Rachid, « Influence des Traitements thermiques sur les propriétés Mécaniques et microstructurales d'un dépôt réalisé par projection thermique », Mémoire de master Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2017.
- [32] BERBITI Antar, « Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains », Mémoire de Master université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [33] MEBARKI Nadia, «etude comparative du comportement tribologique des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 en milieu severe », Mémoire de Magister Université 8 Mais 1945 Guelma, 2008.
- [34] LAADJAL Djamel, « Alliage d'aluminium-évolution de la microstructure et propriétés mécanique », Mémoire de Master Académique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA. Juin 2018.



- [35] OUALI Omar, KHADIR Samir, « influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution de caractéristiques d'élasticité, de plasticité et structurales de l'alliage corroyé 2017A trempé dans l'huile », Mémoire de Master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [36] ZIANE Jugurtha, « influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution de caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage AL4%Cu trempé des l'eau », Mémoire de Master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [37] BOUNOUA Salheddine, « Effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des assemblages soudées », Mémoire de Master Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2019.
- [38] A.BELAHCENE, M.S. HAMANI et D.E.HAMMOUDI, « Influence des traitements thermiques (durcissement structural) sur la propriété de dureté de l'alliage d'aluminium de type A-G10 », Université Badji Mokhtar- Annaba, 2008.
- [39] BOURAHLA Smain, « Influence du recuit sur la recristallisation de l'alliage Al-Li », Mémoire de Magister Université mentouri Constantine, 2007.
- [40] ZAOUI Moussa, « influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées cas des soudures épaisses », Thèse de doctorat Université mentouri Constantine, 2009.
- [41] BADER Amira, « Etude de l'effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un alliage à base d'aluminium Al-Mg-Si », Mémoire de Master Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.
- [42] BADJI Riad, « Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205 », Thèse de doctorat Université Paris13, 2008.
- [43] A. SADEDDINE, M.A. BRADAI, M. KERKAR, A. BENABBAS, « Influence des traitements thermiques sur la résistance à l'usure et aux chocs d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans la fabrication des boulets de broyage », Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2013.
- [44] B.CHERMIME, H.DJEBAILI, B.MEDDOUR, H.ZEDIRA, A.ABOUDI, « Elimination de l'austénite résiduelle d'une fraise de forme par un traitement thermique adéquat (revenus cumulé) », Universitaire kasdi Merbah Ouargla, 2011.
- [45] OURTI Abderrahmane, FENGAL Massinissa, « Influence de l'effet de traitement de revenus sur les propriétés de dureté-résilience de deux nuances d'acier 25CD4 et 23CD4 », Mémoire de Master Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2019.

- [46] HADJI Hicham, MABROUKI Djelloul, « effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium », Mémoire de master Université of M'sila, 2020.
- [47] HERNY Emilie, « Caractérisation mécanique et étude des mécanismes de vieillissement thermique et thermomécanique de l'acier inoxydable martensitique 15-5PH, soudé par faisceau d'électrons », Thèse de doctorat l'institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [48] TAYEBBEY Yacine, « Optimisation du temps de maintien à la température de revenu après trempe de deux types d'acier C45et 42CrMo4 », Mémoire de master Université of M'sila, 2016.
- [49] RADUTOIU Nicoleta, « influence des traitements thermiques sur le comportement en corrosion a l'échelle locale de l'alliage d'aluminium en AW 2024 », Thèse de doctorat Université de Toulouse, 2013.
- [50] MAURIES Sébastien, « Caractérisation et modélisation de la séquence de précipitation de carbures au cours du traitement thermique d'aciers martensitiques alliés », Thèse de doctorat Université de Toulouse, 2008.
- [52] ZAOUI Moussa, « influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudees cas des soudures epaisses », Thèse de doctorat Université mentouri Constantine, 2009.
- [51] MEHALA Sofiane, « Effet du traitement thermique sur le comportement à la corrosion et la microstructure de l'alliage AA2024 soudé par l'alliage AA5554 », Mémoire de Master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.
- [52] MORIN Sébastien, « effet du magnésium, des traitements thermiques et de la Porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression A380.1 », Mémoire de Magister Université du Québec a Chicoutimi, 2002.
- [53] HAKIM Ahmed, « effets du mode d'elaboration et de maturation sur les propriétés mécaniques et la microstructure des alliages de fonderie Al-Si », Thèse de doctorat Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.



## Résumé

Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour modifier les propriétés physiques, mécaniques et parfois chimiques de ce dernier. Ce traitement est utilisé souvent lors de la fabrication des matériaux métalliques.

Le traitement thermique (en particulier: la trempe, le revenu et le recuit) implique l'utilisation du chauffage et/ou du refroidissement, normalement à des températures extrêmes, pour obtenir le résultat souhaité, tel que la modification de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance du matériau.

Le travail proposé est destiné de mettre en évidence les aspects purement métallurgiques des traitements thermiques, et d'examiner les divers techniques et modes des traitements thermiques ainsi que la modification des caractéristiques mécaniques qui les accompagnent en basant sur des dizaines résultats des recherches déjà publiés afin de simplifier la recherche dans ce domaine.

**Mots clés:** Traitement thermique, Trempe, Revenu, Recuit, propriétés mécaniques.

## Abstract

The heat treatment of a material is a group of industrial processes used to modify the physical, mechanical and sometimes chemical properties of the material. This treatment is often used in the manufacture of metallic materials.

Heat treatment (in particular : quenching, tempering and annealing) involves the use of heating and/or cooling, normally at extreme temperatures, to achieve the desired result, such as change in hardness, ductility, brittleness, plasticity, elasticity or strength of the material.

The proposed work is intended to highlight the purely metallurgical aspects of heat treatments, and to examine the various techniques and modes of heat treatments as well as the modification of the mechanical characteristics that accompany them, based on dozens of research results already published in order to simplify research in this area.

**Keywords:** Heat treatment, Quenching, Tempering, Annealing, mechanical properties.

## ملخص:

المعالجة الحرارية للمواد، هي مجموعة من العمليات الصناعية المستخدمة لتغيير الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وأحياناً الكيميائية للمادة. تستخدم هذه الطريقة من المعالجة غالباً أثناء تصنيع المواد المعدنية. تتضمن المعالجة الحرارية (بالأخص: التقسية، الإرجاع والتلدين) استخدام التسخين و / أو التبريد ، عادة في درجات حرارة عالية دون حرارة الإنصهار ، لتحقيق النتيجة المرجوة ، مثل تعديل قابلية المادة للتحطم أو الصلابة أو اللدونة أو الهشاشة أو المرونة أو المقاومة.

يهدف العمل المقترح إلى تسليط الضوء على الجوانب التعدينية البحتة للمواد ، ودراسة مختلف التقنيات والأنماط المختلفة للمعالجة الحرارية بالإضافة إلى التحولات الهيكلية وتعديل الخصائص المصاحبة لها، اعتماداً على عشرات من الأبحاث السابقة المنشورة، وهذا لتسهيل عملية البحث في هذا المجال.

**الكلمات المفتاحية :** المعالجة الحرارية، تقسية، الإرجاع، التلدين، الخصائص الميكانيكية.