

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

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER**

Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Fabrication Mécanique et productive  
Par :

**ATMANI Redha**  
**YOUBI Slimane**

## **Thème**

---

**Effet des traitements thermiques sur les propriétés structurales,  
microstructurales et mécaniques d'un acier fortement alliés au manganèse**

---

Soutenu le 26/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. M. BRADAI  
Mr. A. IDIR  
Mr. A. SAD-EDDINE  
Mr. S. KHIMA

Président  
Examineur  
Rapporteur  
Invité

**Année Universitaire 2022-2023**

---

## Remerciements

*Nous exprimons nos sincères remerciements en premier lieu à Dieu tout-puissant, l'auteur de notre vie et la source de notre force, pour nous avoir guidés et donné le courage nécessaire pour mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, M. Abdelhamid SADEDDINE, pour son précieux soutien et son encadrement tout au long du semestre. Nous lui sommes reconnaissants d'avoir consacré beaucoup de son temps pour nous aider. Nous aimerions également remercier chaleureusement le professeur Mohand Amokrane BRADAI, M. Salim KHIMA et M. Atmane DJERMOUNE pour leurs précieuses remarques et suggestions qui nous ont permis d'avancer et de réaliser ce travail.*

*Nous souhaitons à rendre hommage à tous les membres de nos familles, en particulier à nos chers parents et frères et sœurs, à qui nous dédions ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Enfin, nous souhaitons à remercier tous nos camarades et amis du hall de technologie avec qui nous avons partagé de précieux moments tout au long de cette expérience. Votre soutien et votre amitié ont été inestimables.*

## Dédicaces

Je dédie ce travail en premier lieu à mes chers parents qui m'ont toujours prodigué des conseils, encouragé et aimé tout au long de ma vie.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes sœurs qui m'ont soutenu et encouragé constamment.

Mes sincères remerciements vont à mes précieux amis : Anis, Chihab, Farouk, Rachad et Raouf, ainsi qu'à tous les autres qui m'ont apporté leur soutien et leur aide.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon binôme Redha pour sa complicité et sa persévérance tout au long de ce projet.

Un grand merci à mes camarades, Nadjim et Said, ainsi qu'à tous les amis de la promo fabrication mécanique, pour leur assistance et leurs encouragements.

Enfin, cette dédicace s'adresse à tous ceux que j'aime et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A tous ceux que j'ai de précieux, mes chers parents mon tout  
dans la vie,  
Qu'Allah les bénisses et les protège en bonne santé.

A mes très chères Frères Amine et Salah.

A tous mes oncles et tantes.

A mes chères cousins et cousines.

A mon binôme Slimane que je remercie beaucoup.

A mes chers copains : Raouf, Sofiane, Kouceila et Zaki,

A tous ceux que j'aime.



**Table de matière :**

<b>Remerciements .....</b>	<b>2</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>3</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>4</b>
<b>Table de matière :.....</b>	<b>6</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>8</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>9</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre I .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.1. Introduction :.....	13
I.2. Recherche bibliographique : .....	13
I.2.1. Définition d'un acier : .....	13
I.2.2. Différentes classes d'acier :.....	14
I.2.2.1. Aciers alliés : .....	14
I.2.2.2. Aciers non alliés : .....	14
I.2.2.3. Les aciers faiblement alliés : .....	15
I.2.2.4. Aciers fortement alliés : .....	15
I.3. Diagramme de phase fer-carbone : .....	15
I.3.1. Nature des phases présentes dans le diagramme d'équilibre : .....	17
Ferrite : .....	17
Austénite : .....	17
Cémentite ou carbure de fer : .....	17
Perlite : .....	17
I.4. Diagramme Fe-Mn.....	18
I.5. Traitement thermique.....	18
I.5.1. L'austénitisation .....	19
I.5.1.1. Chauffage.....	20
I.5.1.2. Déformation au chauffage : .....	20
I.5.1.3. Maintien à la température d'austénitisation.....	21
I.5.2. Trempe : .....	23
I.5.2.1. Le choix des températures : .....	23
I.5.2.2. Le choix de temps de maintien : .....	24
I.5.2.3. Choix de vitesse de refroidissement pour la trempe : .....	25
I.5.2.4. Choix du milieu de trempe : .....	25
I.5.2.5. Modalités de trempe : .....	25
I.5.3. Revenu :.....	27
I.6. Acier Hadfield :.....	29
I.6.1. Définition : .....	29
I.6.2. Composition chimique : .....	30
I.6.3. Caractérisation mécanique : .....	30
I.6.3.1. Comportement mécanique durant l'essai de traction : .....	30
I.7. Types d'usures : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.7.1. Usure par abrasion : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.7.2. Usure par érosion : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

---

<b>Chapitre II</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.1. Introduction :	35
II.2. Définition.....	35
II.2.1. Types des concasseurs .....	36
II.2.1.1. Concasseur à mâchoires .....	36
II.2.1.2. Concasseurs giratoires :.....	37
II.3. La composition chimique du matériau utilisé : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.4. Etude métallographique :	38
II.4.1. Préparation des échantillons :	38
II.4.2. Traitement thermique :	38
II.4.3. Le polissage :	39
II.4.4. L'attaque chimique :	40
II.5. Méthodes de caractérisation .....	40
II.5.1. Microscope optique :	40
II.5.2. Diffraction au rayons X :	41
II.5.3. Fluorescence des rayons X :	43
II.5.4. La micro-dureté :	44
<b>Chapitre III</b> .....	<b>46</b>
III.1. Introduction :	47
III.2. Diffraction des rayons X (DRX) :	47
III.3. Métallographie de l'acier 13%Mn :	50
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	<b>55</b>
<b>Annexe A</b> .....	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>58</b>

## Liste des figures

Figure I-1 Diagramme de phase fer-carbone.....	16
Figure I-2 types de traitements thermiques .....	19
Figure I-3 Distorsions subies par un cylindre arbre lors d'un maintien à haute température à l'état austénitique [7] .....	22
Figure I-4 DIAGRAMME Fe-C-Mn [11]. .....	29
Figure I-5 Ordre de grandeur des propriétés de traction d'un acier Hadfield [12]. .....	31
Figure I-6 Usure par abrasion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure II-1 le concasseur a mâchoires kleemann MOBICAT MC 120zi pro.....	35
Figure II-2 schéma d'un concasseur à mâchoire. ....	36
Figure II-3 concasseur giratoire de pierres.....	37
<b>Figure II-5</b> Four électrique disponible au laboratoire Fonderie du département génie mécanique au niveau du hall de technologie.....	39
<b>Figure II-6</b> La polisseuse utilisée .....	40
<b>Figure II-7</b> Diffractomètre de type PANalytical, .....	42
<b>Figure II-8</b> Principe d'une diffraction des RX .....	43
Figure II-1 Micro-duromètre Vickers .....	44
La figure I-1 représente le spectre de diffraction aux rayons x des échantillons austénitisés à 1050°C suivi d'une trempe à l'eau suivi des revenus à 200°C, 400°C et 600°C. Ce spectre nous donne l'intensité des pics en fonction de la position $2\theta$ (l'angle de diffraction) des différentes phases constituantes de notre dépôt. ....	47
<b>Figure I-2</b> Diffraction des rayons x : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C.....	47
<b>Figure I-3</b> Quantification de phase obtenues par DRX : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C. ....	49
<b>Figure I-4</b> Microstructure de l'acier 13%Mn : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C.....	50
Figure I-5 Histogramme présente la micro dureté Vickers de l'acier 13%Mn. ....	51
Les Figures I-6 montrent les images de l'empreinte Vickers obtenue après essaie, les empreintes ont été effectué pour calculer la micro dureté Vickers. ....	52
<b>Figure I-7</b> les images de l'empreinte Vickers obtenue après essaie de la micro-dureté.....	53



## Liste des tableaux

Tableau I-1 tableau expérimentale des durées totale de chauffage .....	25
Tableau I-2: composition chimique type de l'acier hadfield.....	30
Tableau II-1 .....	43

## Introduction générale

Dans le domaine de la fabrication des marteaux et des concasseurs de broyage, l'utilisation d'aciers fortement alliés au manganèse joue un rôle crucial. Ces aciers présentent des propriétés mécaniques et une résistance à l'usure élevée, ce qui en fait des matériaux idéaux pour les applications de concassage dans l'industrie. Cependant, pour optimiser davantage les performances de ces aciers, il est essentiel de comprendre en détail leur caractérisation microstructurale et mécanique.

Le présent mémoire se concentre sur la caractérisation microstructurale et mécanique d'un acier fortement allié au manganèse spécifiquement dédié à la fabrication des marteaux et des concasseurs de broyage. L'objectif principal est d'étudier l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques. Les traitements thermiques sont des étapes cruciales dans le processus de fabrication de l'acier, et leur optimisation peut considérablement améliorer ses performances.

L'étude de la microstructure de l'acier permettra de comprendre la distribution et la nature des phases présentes, ainsi que la présence d'inclusions ou de défauts potentiels qui pourraient influencer les propriétés mécaniques. De plus, des essais mécaniques seront réalisés pour évaluer la résistance, la dureté et la ténacité de l'acier.

Les résultats obtenus dans cette étude permettront d'obtenir une meilleure compréhension des relations entre la microstructure, les traitements thermiques et les propriétés mécaniques de l'acier fortement allié au manganèse. Ces connaissances contribueront à l'amélioration de la qualité de fabrication des marteaux et des concasseurs de broyage, en offrant des perspectives pour l'optimisation des traitements thermiques et la sélection des matériaux les plus adaptés.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre aborde les notions générales sur les aciers, comprenant un rappel théorique sur les différents types de traitements thermiques, tels que le diagramme fer-carbone, ainsi que la présentation de l'acier Hadfield.
- Le deuxième chapitre se concentre sur les concasseurs et présente en détail la description de l'acier étudié, ainsi que les essais et les tests effectués.

- Le troisième chapitre présentera les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Enfin, nous conclurons par une synthèse générale et aborderons quelques perspectives pour enrichir cette étude.

# Chapitre I

## Revue bibliographique

---

## **I.1. Introduction :**

L'acier est largement utilisé dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie. Il s'agit d'un alliage composé principalement de fer et de carbone, avec une teneur en carbone variant généralement de 0,02 % à 2 % en masse. Cette proportion de carbone est un facteur déterminant pour choisir l'acier approprié en fonction des exigences de la fonction qu'il doit remplir, telles que la résistance, la résistance à la température, et l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Dans ce chapitre, nous aborderons les aciers au manganèse, en fournissant des définitions, en explorant leurs caractéristiques mécaniques et en mettant en évidence leurs divers domaines d'utilisation. Il convient de noter que ces aciers sont utilisés dans plusieurs secteurs industriels, tels que la fabrication de concasseurs, où ils jouent un rôle essentiel.

## **I.2. Recherche bibliographique :**

### **I.2.1. Définition d'un acier :**

Un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ».

Selon la norme NF EN 10020, qui a remplacé la norme NF A 02-025 en juin 1989, l'acier est un matériau dont le fer est l'élément principal et dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 2 %. Il peut également contenir d'autres éléments. Un nombre limité d'aciers contenant du chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais la valeur courante de 2 % représente la limite de teneur en carbone qui sépare l'acier de la fonte.

Au regard de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de teneur en carbone d'un alliage Fe-C que l'on peut appeler acier (par opposition à fonte) est difficile à définir. Par conséquent, une approche plus métallurgique peut être préférée compte tenu des différences qui se produisent lors de la solidification de ces alliages.

La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite. [1]

## **I.2.2. Différentes classes d'acier :**

Dans l'industrie, l'acier est le matériau métallique le plus largement utilisé. Il s'agit d'un alliage de fer et de carbone, avec une teneur en carbone inférieure à 2%. Les aciers sont regroupés en différentes catégories en fonction de leur utilisation, basées sur deux critères principaux.

Le premier critère est la composition chimique, qui classe les aciers en fonction des éléments d'alliage présents et de leur quantité. On distingue ainsi les aciers non alliés, qui contiennent moins de 1% d'éléments d'alliage, les aciers faiblement alliés, dont la teneur en chaque élément d'alliage est inférieure ou égale à 5%, et les aciers fortement alliés.

Le deuxième critère est lié aux propriétés d'usage ou de qualité des aciers. Différents types d'aciers sont identifiés en fonction de leur qualité et de leur utilisation spécifique. On trouve ainsi les aciers de qualité, les aciers spéciaux tels que les aciers d'usage général, les aciers de construction mécanique, les aciers pour appareils à pression, les aciers à outils et les aciers inoxydables.

La norme NF EN 10020 établit des classes de qualité spécifiques pour chaque type d'acier.

### **I.2.2.1. Aciers alliés :**

Ce sont des ferroalliages, qui sont des alliages de fer et de carbone contenant au moins un tiers des éléments d'alliage en quantités suffisantes pour provoquer une modification notable d'une ou plusieurs propriétés de l'acier.

### **I.2.2.2. Aciers non alliés :**

Dans le contexte des traitements thermiques pour les petites ou moyennes pièces, les aciers non alliés sont spécifiquement utilisés. Ces aciers se distinguent par une composition soigneusement ajustée, avec une pureté plus élevée que celle des aciers d'usage général, ainsi qu'une présence très limitée d'éléments d'addition. Les propriétés de ces aciers dépendent du type de traitement thermique qui leur est appliqué.

Les aciers non alliés trouvent une variété d'applications, notamment dans la fabrication de pièces forgées, de rasoirs, de lames de foret et de matrices d'outillage. Ils sont généralement identifiés par une désignation utilisant la lettre (C) suivie d'un chiffre représentant la teneur en

carbone de l'acier. Cette désignation permet de classer ces aciers en fonction de leur composition spécifique et de faciliter leur utilisation dans des applications adaptées.

### **I.2.2.3. Les aciers faiblement alliés :**

Ce sont des aciers dont les éléments ajoutés n'excèdent pas 5 % en masse. Ces aciers sont désignés comme suit :

- Les chiffres correspondent à la teneur moyenne en carbone exprimée en pourcentage (multiplié par 100).
- Une série de symboles normalisés représentant les éléments d'alliage, classés par ordre décroissant de concentration. Énumérez uniquement les éléments nécessaires pour éviter toute ambiguïté.
- Un ou deux chiffres indiquant le contenu des principaux éléments, multiplié par le pourcentage de contenu : - 4 pour Cr, Co, Mn, Ni et Si. - Multipliez tous les autres éléments par 10 (sauf B et N, qui doivent être multipliés respectivement par 1000 et 100).

Exemple : 35CD4 : Il s'agit d'un acier au chrome-molybdène faiblement allié avec une teneur moyenne en carbone de 0,35 % et 1 % de chrome. (Norme NF A 35-551). [2]

### **I.2.2.4. Aciers fortement alliés :**

Ce sont des aciers dans lesquels au moins l'un des éléments d'alliage a une teneur supérieure à 5%. Ils sont désignés de la manière suivante :

- La lettre X (ou Z dans l'ancienne norme) est utilisée.
- La teneur moyenne en carbone est exprimée en centièmes de pourcent.
- Une série de symboles normalisés représente les éléments alliés, classés par ordre décroissant de leurs teneurs.
- Les teneurs en pourcentage de certains éléments sont indiquées dans le même ordre, sans coefficient multiplicateur.

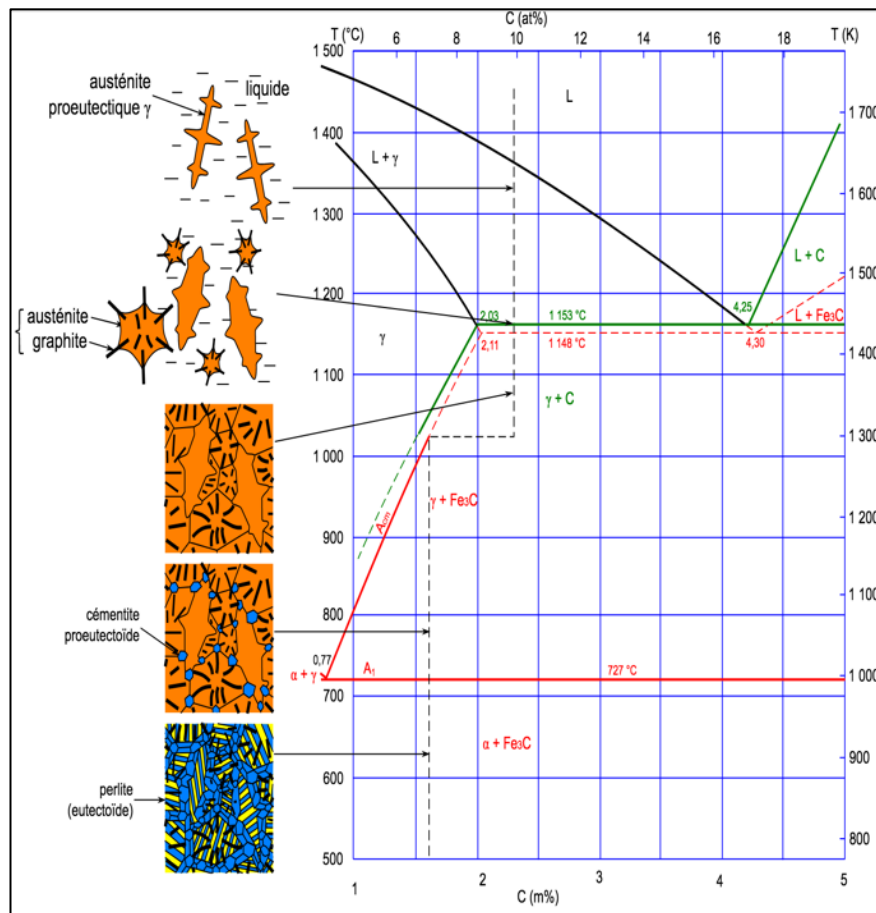
## **I.3. Diagramme de phase fer-carbone :**

Le diagramme fer-carbone est considéré comme le plus crucial parmi tous les systèmes d'alliages binaires. Les aciers et les fontes, qui sont des matériaux structuraux indispensables dans les sociétés technologiquement avancées, sont des alliages de fer et de carbone. Cette section se concentre sur l'étude du diagramme d'équilibre des microstructures possibles.

Le diagramme d'équilibre (figure I. 1.) est établi à partir des courbes de refroidissement des divers alliages de fer et de carbone. Chaque changement de structure cristalline ou de solubilité apparaît comme une discontinuité sur la courbe de refroidissement. Lors de la définition des traitements thermiques, en particulier des températures de traitement, il est important de connaître les températures de transformation.

La ligne HJK représente la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage se refroidit, il traverse cette ligne. À ce stade, la solution solide de fer gamma (austénite) se transforme en solution solide de fer alpha (ferrite). Étant donné que la solubilité maximale du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Ainsi, lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (un mélange de ferrite et de cémentite).

Si l'on souhaite modifier la microstructure (et donc les propriétés mécaniques) de l'alliage, il est nécessaire de modifier les transformations qui se produisent normalement dans cet alliage



**Figure 0-1** Diagramme de phase fer-carbone



### **I.3.1. Nature des phases présentes dans le diagramme d'équilibre :**

Ferrite :

Il s'agit d'une solution solide de carbone dans le fer alpha.

Austénite :

C'est une solution solide de carbone dans le fer gamma.

Cémentite ou carbure de fer :

La cémentite est composée de molécules constituées d'atomes de fer et d'atomes de carbone. Ce composé intermétallique a une concentration de carbone égale à 6,67% en masse. Il est caractérisé par sa grande dureté et sa fragilité.

Perlite :

Il s'agit d'un agrégat composé de 88% de ferrite et de 12% de cémentite, formé lors de la réaction eutectoïde. La perlite peut avoir deux aspects morphologiques : coalescée ou globulaire, où des globules de cémentite sont présents dans une matrice de ferrite, et lamellaire, où de fines lamelles de cémentite sont alternées avec de larges lamelles de ferrite.

Les différents points de transformation des phases dans le diagramme d'équilibre sont les suivants :

- A1 : C'est la température d'équilibre qui définit la limite inférieure du domaine d'existence de l'austénite.
- AC3 : C'est la température à laquelle l'austénite commence à se former lors du chauffage.
- AC3 : C'est la température à laquelle la ferrite achève sa transformation en austénite lors du chauffage.
- Acm : C'est la température à laquelle la cémentite d'un acier hyper-eutectoïde se dissout complètement lors du chauffage.

- Ar1 : C'est la température à laquelle l'austénite achève sa transformation en ferrite ou en ferrite et cémentite lors du refroidissement.
- Ar3 : C'est la température à laquelle la ferrite commence à se former lors du refroidissement d'un acier hyper-eutectoïde.
- Arcm : C'est la température à laquelle la cémentite commence à se former lors du refroidissement d'un acier hyper-eutectoïde. [3]

## I.4. Diagramme Fe-Mn

La structure à haute température de l'alliage Fe-Mn dépend de la proportion relative de manganèse, un élément  $\gamma$ -gène qui étend le domaine austénitique  $\gamma$ . Les éléments présents dans l'alliage peuvent avoir un caractère  $\alpha$ -gène ou  $\gamma$ -gène. Les éléments  $\gamma$ -gènes comprennent le nickel, le carbone, le cuivre et l'azote, tandis que les éléments  $\alpha$ -gènes comprennent le chrome, le silicium, le molybdène, le niobium, le titane et le tungstène, qui sont réputés carburigènes.

Ces aciers sont principalement constitués d'austénite métastable. La présence de 100% d'austénite à température ambiante nécessite un refroidissement rapide. En cas de refroidissement plus lent, la structure peut être composée de cémentite-ferrite-austénite ou de cémentite-ferrite, selon la teneur en carbone de l'alliage et son degré de stabilité déterminé par sa composition chimique. L'austénite peut partiellement se transformer en martensite  $\alpha$  lorsqu'elle est soumise à un écrouissage suffisant ou à une diminution de la température. La formation de la martensite  $\alpha$  se produit généralement par la formation préalable de martensite  $\varepsilon$  à structure hexagonale, qui est compacte mais non ferromagnétique contrairement à la martensite  $\alpha$ . [4]

## I.5. Traitement thermique

Les traitements thermiques sont l'ensemble d'opérations qui consistent à chauffer, maintenir à une certaine température et refroidir des alliages métalliques à l'état solide. Ces traitements ont des bases métallurgiques communes et sont largement utilisés pour stabiliser les dimensions des moulages et homogénéiser les structures. Ils sont également nécessaires pour améliorer les propriétés mécaniques et les performances de surface des pièces soumises à des sollicitations mécaniques élevées ou à des utilisations spéciales. Ces traitements sont couramment utilisés pour différents types d'aciers.

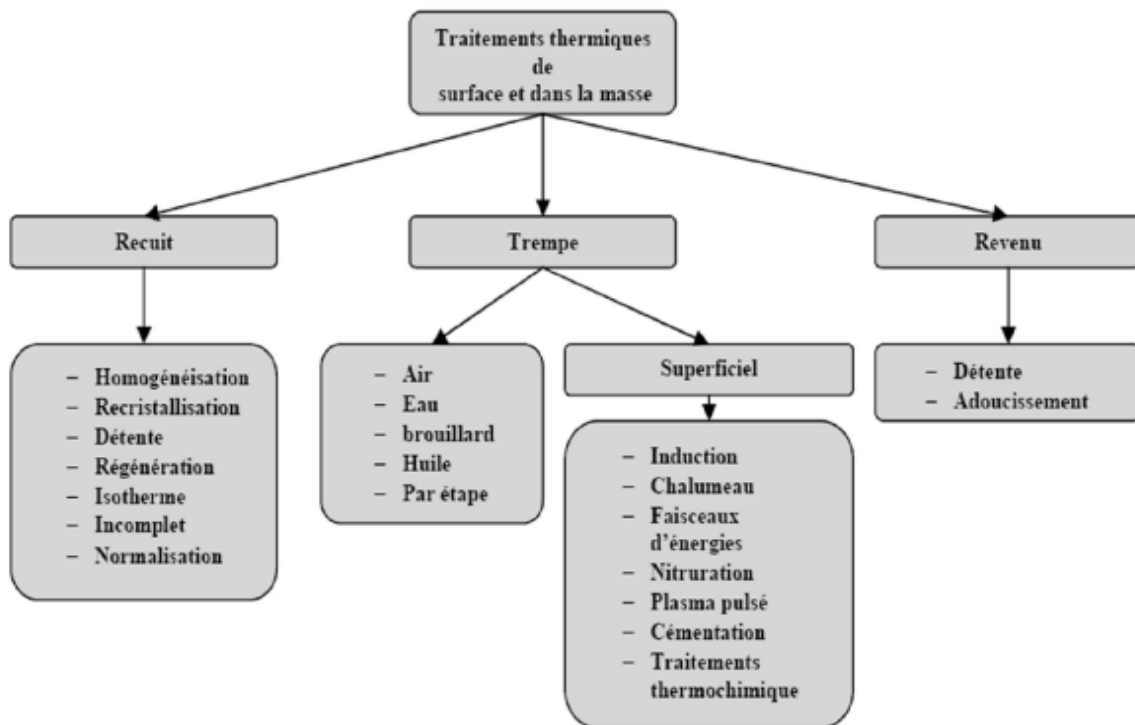


Figure I-2 types de traitements thermiques

### I.5.1. L'austénitisation

La phase d'austénitisation a pour but de dissoudre le carbone et éventuellement les éléments d'alliage qui se sont précipités sous forme de carbures. Pour y parvenir, il est nécessaire de chauffer le matériau jusqu'à une température où le carbone est soluble dans le fer, c'est-à-dire de transformer le fer  $\alpha$  en fer  $\gamma$ . Les diagrammes d'équilibre montrent que les carbures peuvent être de la cémentite (dans les aciers non alliés), de la cémentite substituée (dans les aciers peu alliés) ou formés à partir d'éléments carburigènes (dans les aciers alliés), et que les conditions de dissolution de ces carbures peuvent varier considérablement. [5]

L'austénitisation comporte deux étapes :

- Une élévation de température jusqu'à ce que la température d'austénitisation soit atteinte (parfois appelée à tort température de trempe).
- Un maintien à cette température.

Il est nécessaire de sélectionner une température d'austénitisation qui permettra à la fois de dissoudre suffisamment de carbone pour assurer un durcissement adéquat, ainsi que de garantir une répartition homogène des éléments d'alliage dans l'austénite pendant la période de maintien.

On peut obtenir un durcissement homogène en choisissant une température d'austénitisation supérieure à  $Ac_3$ , sans être trop élevée pour éviter le grossissement des grains d'austénite. Différents couples température-durée de maintien peuvent être retenus, et la température peut être plus proche de  $Ac_3$  si le maintien est plus long, comme le montre la Figure 2. Ainsi, les conditions optimales sont déterminées en prenant en compte les caractéristiques du chauffage et du maintien. [5]

### **I.5.1.1. Chauffage**

La montée en température doit concerner toute la pièce jusqu'à la température d'austénitisation. Cependant, étant donné que la chaleur est transmise à travers la surface de la pièce, la température de cette dernière est toujours supérieure à celle du cœur. Le processus de chauffage est terminé lorsque la différence de température entre la surface et le cœur est devenue négligeable ou du moins inférieure à la tolérance admissible.

### **I.5.1.2. Déformation au chauffage :**

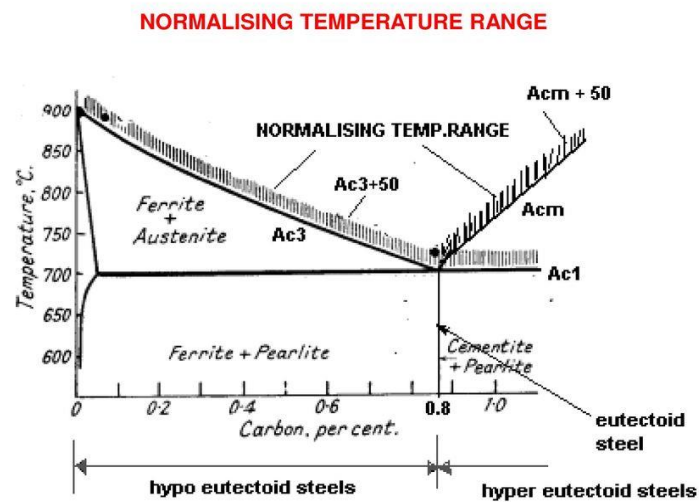
Pendant le processus de chauffage, il existe un gradient de température entre la surface et l'intérieur de la pièce, et ce gradient peut être plus important si la pièce a une section plus importante et si le chauffage est plus rapide. Ce gradient de température peut causer des variations de dilatation, qui peuvent provoquer soit des déformations élastiques (qui se traduisent par une mise en contrainte de l'acier), soit des déformations plastiques, en fonction des propriétés de l'acier à cette température. En outre, la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$  provoque une importante contraction volumique (environ 1 %) au moment où elle se produit. [6]

Pendant le chauffage, il se produit un effet de « pétrissage » de la peau, dont l'ampleur augmente avec la vitesse de chauffage et la taille de la pièce. Bien que ce phénomène ne présente pas de risque de fissuration pour les aciers de construction destinés à un traitement thermique dans la masse, il entraîne des modifications géométriques de la pièce qui constituent une part importante des déformations résultant du traitement thermique. Il est donc conseillé d'effectuer le chauffage le plus lentement possible pour les pièces de section plus importante, et éventuellement de faire des pauses de chauffage pour permettre la résorption du gradient de température, du moins en grande partie. Ces interruptions peuvent être programmées à des températures spécifiques :

- À environ 300°C, ce qui réduit considérablement l'importance du gradient maximal.
- Légèrement en dessous de Ac1 (environ entre  $Ac1 - 50\text{ °C}$  et  $Ac1 - 25\text{ °C}$ ) ; le gradient thermique est fortement réduit avant que ne surviennent les anomalies de transformation. [7].

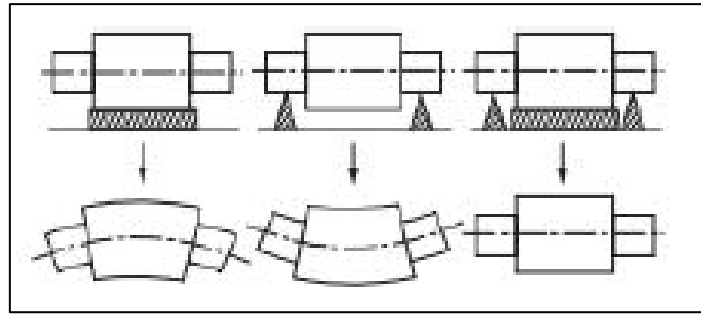
### I.5.1.3. Maintien à la température d'austénitisation.

Le maintien à la température d'austénitisation consiste à maintenir la température uniforme dans toute la section de la pièce pendant un certain temps. La durée de ce maintien dépend de la température d'austénitisation, qui doit être proche de Ac3, et peut être raccourcie si une température plus élevée est utilisée, mais dans les limites nécessaires pour éviter le grossissement des grains d'austénite. Le but de ce maintien est de permettre l'achèvement de la mise en solution des carbures et l'homogénéisation de la répartition du carbone dissous. Cependant, étant donné que l'acier est à l'état austénitique, il peut se déformer plastiquement sous son propre poids, ce qui doit être évité en positionnant correctement et en soutenant les pièces, surtout en cas de porte-à-faux (voir Figure 4). La durée de maintien doit être plus longue pour des températures d'austénitisation plus proches de Ac3. [7].



10

**Figure I-3** diagramme fer-carbon montrant la température Ac3



**Figure I-4** Distorsions subies par un cylindre arbre lors d'un maintien à haute température à l'état austénitique [5]

- a) **Pour les hypo-eutectoïde :** L'austénitisation des aciers non alliés peut être réalisée dans une plage de température allant de  $Ac3 + 25\text{ °C}$  à  $Ac3 + 50\text{ °C}$ . Pour les aciers trempés à l'huile, il est possible d'améliorer légèrement leur trempabilité en choisissant une température d'austénitisation légèrement plus élevée, généralement autour de  $25\text{ °C}$  de plus. La durée de maintien à haute température est déterminée en fonction de la taille de la pièce chauffée afin d'assurer une température uniforme. Cela dépend également du choix de la température d'austénitisation mentionnée précédemment. Le maintien à haute température commence une fois que la pièce atteint une température isotherme avec une tolérance acceptable pour l'écart de température entre la surface et le cœur. Pour les aciers hypo-eutectoïdes non alliés et faiblement alliés, la durée de maintien requise est généralement très courte, quelques minutes suffisent. Il est important de noter que la relation empirique entre le temps nécessaire pour atteindre la température d'austénitisation dans le cœur de la pièce et l'épaisseur de la pièce peut varier selon l'équipement utilisé et ne peut pas être généralisée. [6]
- b) **Pour les hyper-eutectoïdes :**

- La durée du maintien est principalement déterminée par la quantité de carbone que l'on souhaite mettre en solution, car l'austénitisation est généralement effectuée dans le domaine mixte ferrite + carbures + austénite, à une température comprise entre  $Ac1$  et  $ACM$ . Cependant, une légère variation de la température d'austénitisation a plus d'impact sur le processus que la durée du maintien. Pour les aciers alliés contenant des éléments carburigènes, les conditions particulières de mise en solution des carbures peuvent nécessiter une température d'austénitisation élevée et une durée de maintien assez longue. Si les informations disponibles sont insuffisantes, il est possible de procéder à une

série d'essais relativement simples pour définir les conditions optimales d'austénitisation

- L'austénitisation à des températures proches de  $A_{c1} + 50^{\circ}\text{C}$ , qui est souvent utilisée pour les aciers à outils. Cette méthode permet d'obtenir un durcissement important sans provoquer de grossissement des grains d'austénite, de limiter la quantité d'austénite résiduelle après la trempe et de conserver des carbures non dissous relativement grossiers, qui améliorent la résistance à l'usure et à l'abrasion. [6]

## **I.5.2. Trempe :**

La trempe implique le chauffage de l'acier à une température située entre 30 et 50°C supérieure à la ligne GOSK pour les aciers hypo-eutectoïdes et supérieure à  $A_{C1}$  pour les aciers hyper-eutectoïdes. Cette température est maintenue jusqu'à la fin de la transformation des phases, ce qui marque la fin du chauffage complet. Ensuite, l'acier est rapidement refroidi avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe (généralement dans l'eau pour les aciers au carbone et dans l'huile ou un bain de trempe pour les aciers alliés). L'objectif de ce refroidissement rapide est d'obtenir une structure martensitique afin d'éviter la formation d'une structure perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se terminer dans la zone de la martensite. En conséquence, la trempe confère à l'acier une dureté maximale de  $HV = 700$  à  $800$  ou  $HRC = 60$  à  $65$ , ce qui est optimal pour le traitement ultérieur de revenu.

Il est important de noter que la trempe n'est pas un traitement thermique définitif et qu'elle est souvent suivie d'un revenu qui permet de réduire la fragilité et les contraintes internes de l'acier, ainsi que de lui conférer les propriétés mécaniques souhaitées. [7]

### **I.5.2.1. Le choix des températures :**

Les aciers hypo-eutectoïdes requièrent une température de chauffage de 30 à 50°C au-dessus de la ligne GOSK, qui est supérieure à celle de  $A_{C3}$ .

Lorsqu'on chauffe un acier à structure initiale perlite + ferrite, il acquiert une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on le refroidit rapidement à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Pour les aciers hypo-eutectoïdes, il est recommandé de chauffer à une température de 30 à 50°C au-dessus de  $A_{C3}$  pour éviter la présence de ferrite

après la trempe, qui pourrait diminuer la dureté et les propriétés mécaniques de l'acier. Pour les aciers hyper-eutectoïdes, il faut chauffer à une température plus élevée,  $AC1 + (50 \text{ à } 70^\circ\text{C})$ , pour assurer une dureté et une tenue à l'usure plus élevées, avec la présence de particules de cémentite non dissoutes. Dans le cas de nouveaux aciers avec des carbures contenant des éléments d'alliage, l'augmentation de la température d'austénitisation n'entraîne pas un grossissement perceptible du grain d'austénite car les carbures non dissous ralentissent la croissance du grain austénitique. En augmentant la température de chauffe pour la trempe, on peut dissoudre les carbures, homogénéiser l'austénite et obtenir une martensite plus ductile. [7]

### I.5.2.2. Le choix de temps de maintien :

La durée de maintien à la température de trempe doit être suffisante pour atteindre le cœur de la pièce et permettre la complétion des transformations de phases, tout en évitant d'être trop longue pour éviter le grossissement du grain et la décarburation de la surface de l'acier. La durée totale de chauffage ( $t_{tot} = t_{ec} + t_{si}$ ) dépend donc de :

- La durée d'échauffement à cœur ( $t_{ec}$ ), qui correspond à la période nécessaire pour atteindre la température de traitement, dépend de plusieurs facteurs tels que la forme et les dimensions de la pièce, la nuance de l'acier ainsi que le type de four utilisé
- La durée de séjour isotherme ( $t_{si}$ ), qui dépend de la composition et de l'état initial de l'acier, correspond à la période pendant laquelle la pièce est maintenue à la température requise après son échauffement à cœur.

En pratique, on utilise des données expérimentales pour déterminer la durée totale de chauffage ( $t_{tot}$ ).

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 I-1** tableau expérimentale des durées totale de chauffage

Les fours spécialement conçus pour le traitement thermique des pièces peuvent chauffer jusqu'à environ 800 ou 850°C pour une durée d'austénitisation approximative.

**I.5.2.3. Choix de vitesse de refroidissement pour la trempe :**

Pour évaluer la vitesse de refroidissement, on utilise une représentation graphique de la relation entre la température et le temps,  $T = f(\log t)$ . L'utilisation d'une échelle logarithmique permet une visualisation plus claire des courbes de refroidissement rapide. La vitesse de trempe critique pour la formation de la martensite peut être déterminée soit en mesurant la vitesse de refroidissement à une température donnée, soit en utilisant des données expérimentales. O''%

On mesure généralement la vitesse critique de trempe martensitique dans un gradient de température compris entre 700°C et 300°C.

Pour obtenir une transformation complète de l'austénite en martensite, le refroidissement doit se faire à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe, qui correspond à la limite inférieure de vitesse.

**I.5.2.4. Choix du milieu de trempe :**

Le milieu de trempe doit permettre d'obtenir une structure martensitique sans défauts. Le refroidissement le plus efficace est rapide dans l'intervalle de température A1-Ms, mais doit être ralenti dans le domaine de la transformation martensitique Ms-Mf pour éviter les contraintes résiduelles et les tapures. Les liquides les plus couramment utilisés pour la trempe sont l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, ainsi que les huiles. Pour les aciers au carbone, l'eau est souvent utilisée, tandis que pour les aciers alliés, l'huile ou un bain de sel est préféré. La trempe peut être facilitée par une étape de refroidissement pelliculaire, qui protège la pièce et ralentit le refroidissement avant que le liquide ne commence à bouillir.

**I.5.2.5. Modalités de trempe :**

Le procédé de trempe le plus couramment utilisé est la trempe continue dans un milieu de refroidissement unique. Toutefois, dans les cas où la forme des pièces est complexe ou pour réduire les déformations, d'autres méthodes de trempe sont également employées.

**A. Trempe a deux bains :** On utilise une méthode de trempe appelée "trempe à deux étages" ou "trempe sélective", qui consiste à refroidir la pièce d'abord dans un agent refroidissant plus sévère, comme l'eau, jusqu'à une température légèrement supérieure à  $M_s$  (300 ou 400°C), puis rapidement la placer dans un agent de trempe moins sévère, tel que l'huile ou l'air, où elle continue de refroidir jusqu'à la température ambiante. Cette méthode permet de réduire les contraintes internes qui peuvent se former lors du refroidissement rapide dans un seul agent refroidissant.

**B. Trempe suivie d'auto-revenue :** Ce procédé vise à obtenir une différence de dureté entre la surface et le cœur de la pièce.

Il consiste à interrompre le refroidissement de la pièce dans un bain de trempe lorsqu'elle conserve encore de la chaleur à l'intérieur. Cette chaleur est alors transmise aux couches superficielles qui sont déjà refroidies, produisant ainsi l'auto-revenu. Lorsque la température souhaitée est atteinte, la pièce est replongée dans le bain de trempe. Cette méthode est couramment utilisée pour les pièces soumises à des charges dynamiques nécessitant à la fois une dureté superficielle élevée et une ductilité accrue au cœur, telles que les burins, les massettes, les marteaux d'ajusteur et les pointeaux.

**C. Trempe isotherme (étagée) martensitique :** Ce procédé de trempe étagée consiste à chauffer la pièce jusqu'à sa température de trempe, puis la refroidir dans un bain légèrement plus chaud que le point  $M_s$  et la maintenir à cette température pendant un court laps de temps avant de la refroidir à l'air libre. Cette méthode permet un nivellement de la température dans toute la section de la pièce sans provoquer la formation de bainite. La trempe martensitique résultante réduit les modifications volumiques, le gauchissement et le risque de formation de tapures. Cependant, elle ne doit être utilisée que pour des pièces relativement petites car la vitesse de refroidissement est plus lente pour des pièces plus grosses, ce qui provoque une décomposition de l'austénite à des températures plus élevées. Pour des pièces plus grosses, une température de trempe inférieure à  $M_s$  est recommandée pour une vitesse de refroidissement plus élevée, mais cela rend le dressage plus difficile en raison de la formation de martensite. Cependant, cette diminution de température n'est pas nécessaire pour les grosses pièces en aciers alliés.

**D. Trempe isotherme bainitique :** La trempe bainitique est similaire à la trempe martensitique, mais nécessite une période plus longue au-dessus du point  $M_s$  pour permettre la décomposition de l'austénite en bainite inférieure. Bien que cela ne produise

pas d'améliorations significatives des caractéristiques mécaniques des aciers au carbone, cela augmente considérablement la résistance fonctionnelle de nombreux aciers. La structure résultante de la trempe bainitique comprend de la bainite et de l'austénite résiduelle enrichie en carbone, offrant une résistance élevée et une ductilité suffisante. Comparée à la trempe et au revenu usuels, la trempe bainitique améliore la plasticité de l'entaille de 1,5 à 2 fois. Cependant, si la quasi-totalité de l'austénite non transformée subit une transformation martensitique pendant le refroidissement ultérieur, les propriétés mécaniques seront meilleures mais la plasticité sera réduite. Pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques des aciers alliés de construction, la trempe bainitique doit inclure une période de décomposition isotherme de l'austénite dans la partie inférieure du domaine bainitique légèrement au-dessus de  $M_s$ .

**E. Traitement à froid de l'acier :** En présence d'austénite résiduelle, un acier trempé contenant 0,4 ou 0,5 % de carbone peut voir sa dureté et sa tenue à l'usure diminuer, et subir des modifications de dimensions aux basses températures en raison de la transformation spontanée de l'austénite en martensite. Les contraintes de contact peuvent également provoquer cette transformation et causer des ruptures. Pour réduire la quantité d'austénite résiduelle, une méthode proposée par A. Goulaev en 1937 consiste à refroidir l'acier trempé à une température inférieure à zéro. Cette méthode s'applique aux aciers dont la température de fin de transformation martensitique  $M_t$  est inférieure à zéro, [7]

### I.5.3. Revenu :

Après la trempe, un acier présente une dureté élevée mais aussi une fragilité excessive, ce qui le rend généralement inutilisable directement. Le revenu consiste à chauffer la pièce trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir, généralement à l'air ou parfois à l'eau. L'objectif du revenu est d'éliminer les contraintes résiduelles issues de la trempe et d'améliorer la ténacité du matériau. Cependant, l'augmentation de la ténacité se fait au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité, qui diminuent plus ou moins.

Les contraintes résiduelles se forment en raison des importantes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique entraîne des contraintes qui dépassent la limite de déformation plastique, voire la résistance à la rupture (ce qui peut causer des fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, variables d'un grain à

l'autre, se forment lors de la transformation martensitique. Ces contraintes résultent des changements de forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et de volume associé à cette transformation. [7]

Il existe trois principaux types de traitements de revenu :

- A. Revenu a basses tempiraures :** Le revenu à basse température est réalisé en chauffant la pièce à environ 250°C, ce qui permet de réduire les contraintes internes. Il provoque la transformation de la martensite issue de la trempe en martensite de revenu. Ce processus de revenu améliore la résistance et la ductilité du matériau, tout en préservant en grande partie sa dureté (entre 58 et 63 HRC), ce qui confère une bonne résistance à l'usure. Cette technique est couramment utilisée pour les outils de coupe et les instruments de mesure fabriqués à partir d'aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de revenu recommandée varie généralement entre 1 et 3 heures.
- B. Le revenu a températures intermédiaires :** Le revenu à température intermédiaire est réalisé dans une plage de 350 à 500°C et est utilisé principalement pour les ressorts variés et les estampes. Ce processus permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure obtenue est généralement de type troostite de revenu ou troostite-martensite, avec une dureté se situant entre 40 et 50 HRC. Après le revenu à une température de 400 ou 450°C, il est recommandé de procéder à un refroidissement à l'eau. Cela contribue à la formation de contraintes de compression résiduelles en surface, ce qui augmente la limite de fatigue des ressorts.
- C. Le revenu a hautes températures :** Le revenu à haute température est effectué dans une plage de 500 à 680°C, et il entraîne la formation d'une structure appelée sorbite de revenu dans l'acier. Ce type de revenu permet d'obtenir un meilleur équilibre entre la résistance et la ductilité de l'acier. Lorsqu'une trempe est suivie d'un revenu à haute température (ce processus combiné est appelé amélioration), cela améliore les propriétés par rapport à l'état normalisé ou recuit, notamment les limites de rupture et d'élasticité, la capacité d'absorption d'énergie (striction) et surtout la résilience. L'amélioration est principalement appliquée aux aciers de construction à teneur en carbone moyenne (0,3 à 0,5%). [7]

## I.6. Acier Hadfield :

### I.6.1. Définition :

Les aciers austénitiques au manganèse, également connus sous le nom d'aciers Hadfield en référence à leur inventeur anglais, M. Robert Hadfield, sont des aciers à haute résistance, très ductiles, extrêmement résistants à l'usure et très résilients. Ils sont fabriqués dans des fours électriques et ont la composition chimique suivante : 1-1,4 % de carbone, 10-14 % de manganèse, 0,3-1 % de silicium. Le manganèse stabilise la phase austénitique, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la rupture et de l'allongement. Si ces aciers ont une teneur élevée en silicium (supérieure à 1 %), ils présentent une limite élastique élevée et une bonne résistance au fluage. La teneur en phosphore de ces aciers doit être maintenue en dessous de 0,06 % pour éviter tout effet néfaste sur les propriétés mécaniques à haute température et la formation de fissures. Les caractéristiques mécaniques de ces aciers varient de 70 dN/mm<sup>2</sup> à 100 dN/mm<sup>2</sup> pour la résistance à la rupture et de 40 % à 70 % pour l'allongement. Ces caractéristiques dépendent de la taille des grains. Les aciers Hadfield subissent une transformation martensitique par déformation, ce qui entraîne une augmentation de leur dureté et donc une amélioration de leur résistance à l'usure [8].

Ces aciers se caractérisent par une surface extrêmement dure, obtenue par un processus d'érouissage par choc, qui provoque une transformation locale de l'austénite en martensite. Ils présentent une excellente résistance à l'abrasion. Cependant, en raison de leur forte propension à l'érouissage, ils sont difficiles à usiner et ne peuvent être façonnés que par moulage et rectification [9].

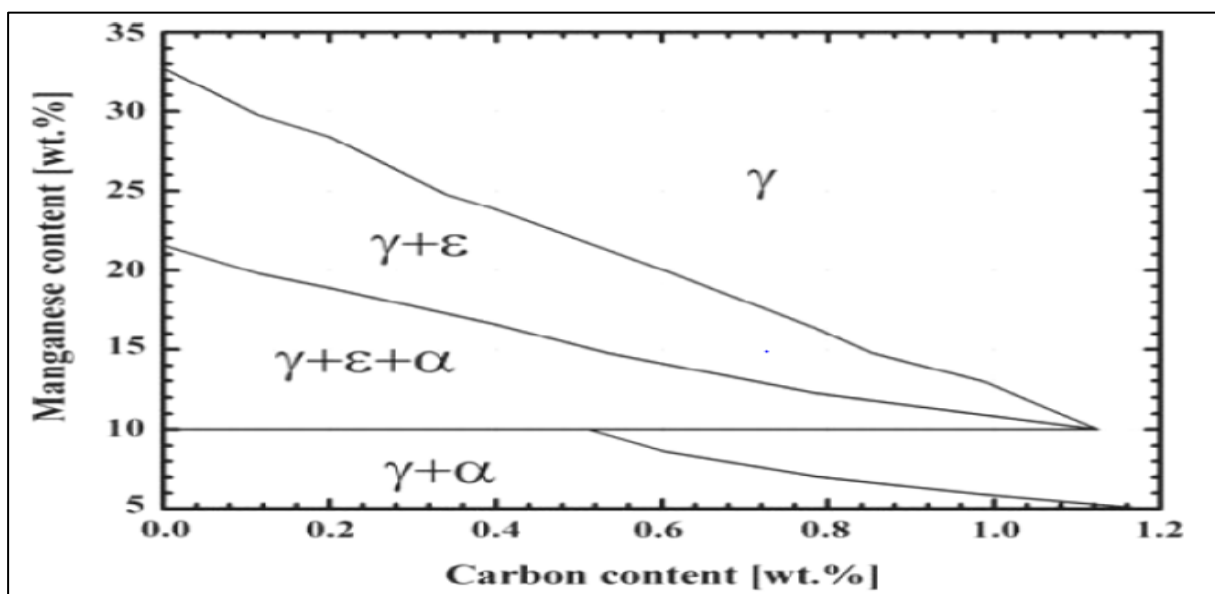


Figure I-3 DIAGRAMME Fe-C-Mn [10].

## I.6.2. Composition chimique :

Les mâchoires des concasseurs sont des pièces fabriquées en utilisant un acier austénitique au manganèse de la nuance Hadfield, qui présente une composition chimique typique décrite dans le tableau I-2.

Le manganèse et le carbone sont les principaux éléments d'alliage dans cet acier austénitique au manganèse. Ils favorisent la formation de la phase austénitique cubique à faces centrées (CFC)  $\gamma$  lorsqu'il subit un traitement de trempe depuis la phase austénitique à haute température. Le carbone, en combinaison avec le manganèse, a une influence significative sur les caractéristiques de l'austénite, notamment sa résistance et sa limite élastique. Une plus grande teneur en carbone accroît la stabilité de l'austénite, mais au-delà de 1,2 %, cela peut réduire la ductilité globale de l'alliage en raison de la formation de précipités qui ne peuvent être complètement dissous. La teneur en manganèse n'a pas un impact majeur sur la limite élastique, mais elle améliore à la fois la résistance et la ductilité. Afin d'obtenir une bonne ténacité et une bonne ductilité de l'austénite, il est nécessaire d'avoir une teneur en manganèse supérieure à 10 %.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0.95-1.3	0.65	11.5-14	0.05	0.03	0.5	0.75	1.75	0.045	0.3

**Tableau I-2:** composition chimique type de l'acier hadfield.

Divers éléments d'alliage peuvent être ajoutés à l'acier pour différentes raisons. Tout d'abord, leur présence permet d'augmenter la stabilité de l'austénite, ce qui réduit la vitesse critique de trempe nécessaire pour former la phase austénitique. De plus, ces éléments d'alliage ont la capacité de retarder la décomposition de l'austénite lors de la déformation plastique ou d'une baisse de température. Enfin, ils permettent d'obtenir un durcissement de la solution solide  $\gamma$  grâce à la précipitation de certaines phases. L'ajout d'éléments d'alliage offre donc la possibilité de contrôler et d'améliorer les propriétés et les performances des aciers en fonction des besoins spécifiques.

## I.6.3. Caractérisation mécanique :

### I.6.3.1. Comportement mécanique durant l'essai de traction :

L'essai de traction a été largement utilisé pour examiner les caractéristiques mécaniques des alliages Fe-Mn. Le Tableau V.3 présente les propriétés mécaniques d'un acier Hadfield déduites à partir d'un essai de traction réalisé à une vitesse faible et à une température de 20 °C. Ce

matériau se distingue par sa résistance mécanique élevée, son écrouissage significatif et sa ductilité très élevée, ce qui lui confère une ténacité et une résilience élevées d'environ 2,35 MJ/m<sup>2</sup>.

Résistance à la rupture (MPa)	650 – 1000
Limite élastique (MPa)	320 - 400
Module d'élasticité (GPa)	196 - 203
Allongement (%)	30 - 65
Striction (%)	30 - 40

**Figure I-4** Ordre de grandeur des propriétés de traction d'un acier Hadfield [11].

#### 4.1.1. Mécanisme de l'écrouissage :

D'après l'étude menée par Collette et al. [12] les aciers Hadfield sont plutôt mous à l'état hyper-trempé et ne présentent pas une résistance exceptionnelle de décohésion à l'état écroui. Cependant, ces aciers ont une capacité d'écrouissage élevée qui persiste tout au long de la déformation grâce à un ensemble complexe de mécanismes. Les atomes de carbone présents dans l'acier Hadfield, dont la concentration atomique est importante, interagissent fortement avec les champs de contrainte des dislocations tout en restant "liés" aux atomes de manganèse environnants sur le réseau austénitique. Cette interaction explique en partie la faible mobilité des dislocations et les instabilités plastiques observées sur les courbes de traction. Un autre facteur contribuant à la faible mobilité des dislocations est la faible énergie de faute d'empilement de ces aciers, qui favorise la dissociation des dislocations et les rend peu mobiles. La faible mobilité des dislocations limite les processus de restauration, ce qui maintient un taux d'écrouissage élevé et favorise un mécanisme de déformation par maclage [13]. Ce mécanisme produit un durcissement du type Hall-Petch, les joints de macles agissant comme des obstacles au mouvement des dislocations. La capacité d'écrouissage de ces aciers dépend du mode de sollicitation, étant 30% plus importante en compression qu'en traction à partir de 5% de déformation environ. Ce phénomène a été attribué dans un premier temps à la formation de martensite, suivie par une contraction de cet empilement hexagonal compact [13].

Plusieurs études ont tenté de déterminer le mécanisme de déformation plastique le plus efficace entre le glissement des dislocations et le maclage, ainsi que l'ordre dans lequel ils se produisent. Les résultats ont montré que la survenue du maclage au début de la déformation plastique peut

ne pas s'accompagner d'un durcissement notable, contrairement à une survenue ultérieure qui s'accompagne d'un durcissement important. La taille de grain a également une forte influence sur la survenue du maclage dans les échantillons poly-cristallins.

D'autres études ont cherché à supprimer le maclage en augmentant la température ou en ajoutant de l'aluminium pour rendre les dislocations plus mobiles en augmentant l'énergie de faute d'empilement. Dans le premier cas, la précipitation de carbures compense l'absence de joints de macles en tant qu'obstacle au mouvement des dislocations, maintenant ainsi un taux d'écrouissage élevé. Dans le second cas, l'organisation des dislocations en parois de haute densité de dislocations contribue également à la conservation d'un important taux de consolidation.

En raison de la variété de mécanismes durcissants impliqués, les aciers Hadfield présentent un taux d'écrouissage élevé sur une large plage de température jusqu'à 300°C.

#### 4.1.2. Dureté :

La mesure de la dureté par indentation est fortement influencée par les conditions d'essai. Par exemple, la dureté Vickers HV à l'état hyper-trempé est d'environ 360 pour une force de 10 N, mais diminue pour des forces supérieures, se stabilisant autour de HV 220 pour  $P > 50$  N [14]. Collette et al. [15] ont effectué des mesures de dureté à 500 N sur des échantillons écrouis par compression à 20°C. La dureté augmente de manière linéaire avec la déformation, passant de 220 à 600 pour un échantillon comprimé d'environ 50 %. La pente  $dHV/d\epsilon$  est approximativement égale à trois fois la pente d'écrouissage  $d\sigma/d\epsilon$  en compression.

Le taux d'écrouissage très élevé des aciers Hadfield les rend appropriés dans les cas suivants :

- Lorsqu'il est nécessaire d'encaisser des chocs avec une résilience élevée, tout en bénéficiant d'un durcissement progressif et significatif au niveau des impacts (par exemple, pour des pièces soumises à des chocs répétés).
- Lorsqu'une déformation locale se produit dans une couche superficielle devant ensuite résister à une force d'arrachement tangentielle (par exemple, pour des pièces d'usure). Étant donné que leur résistance à la décohésion n'est pas exceptionnelle, il est compréhensible que les aciers Hadfield offrent une meilleure résistance dans le cas de sollicitations subies sous des contraintes de compression, ce qui évite les amorces locales de décohésion qui pourraient se produire sous traction.





---

# Chapitre II :

## Matériaux et techniques expérimentales

---

## II.1. Introduction :

La dislocation d'un objet solide se produit sous l'effet d'une force tridimensionnelle inhomogène qui engendre des contraintes. Le concassage, quant à lui, est une technique de fragmentation visant à réduire la taille des matériaux issus des mines ou des carrières jusqu'à environ un centimètre. Il est essentiel de choisir le concasseur adéquat pour chaque tâche, étant donné que chaque type de concasseur a des fonctions spécifiques. Quels sont donc les critères à prendre en compte pour sélectionner le concasseur le plus adapté à une tâche donnée ?

## II.2. Définition

Un concasseur est un équipement de grande taille conçu pour fragmenter la pierre en de petits morceaux appelés agrégats. Dans cette machine, les morceaux de pierre subissent une compression répétée, comme c'est le cas avec les concasseurs à mâchoires ou giratoires, ou une compression continue, comme c'est le cas avec les concasseurs à cylindres.



**Figure II-1** le concasseur à mâchoires kleemann MOBICAT MC 120zi pro

Ils sont également capables de diminuer la taille d'un mélange solide de matières premières, tel que le minerai, de manière à permettre la séparation de ses différents composants.

Le concassage est un processus de fragmentation ou de réduction de la taille des matériaux solides tels que la pierre, le minerai ou d'autres matières premières. Il est réalisé à l'aide d'un équipement spécialisé appelé concasseur. Le concassage vise à réduire la taille des matériaux en les soumettant à des forces mécaniques telles que la compression, l'impact ou l'abrasion, ce qui entraîne la rupture des matériaux en fragments plus petits, appelés agrégats. Le concassage

est largement utilisé dans les industries extractives, minières, de la construction et du recyclage, pour préparer les matériaux en vue d'une utilisation ultérieure dans la production de béton, d'asphalte, de granulats et d'autres applications.

### II.2.1. Types des concasseurs

Les machines de concassage sont classées selon l'action principalement utilisée pour la fragmentation.

- Les concasseurs qui fonctionnent par compression, tels que les concasseurs à mâchoires, les concasseurs giratoires et les concasseurs à rotors dentés.
- Les concasseurs qui fonctionnent par impact (choc), tels que les concasseurs à percussion à axe (horizontal ou vertical) et les concasseurs à cylindres de frappe.
- Les concasseurs qui fonctionnent principalement par attrition, tels que les broyeurs autogènes et semi-autogènes, ainsi que les trommels concasseurs en particulier.

Divers types de concasseurs existent, et voici les plus couramment utilisés :

#### II.2.1.1. Concasseur à mâchoires

Ces équipements écrasent le matériau entre deux mâchoires verticales, dont une est fixe et l'autre est mobile. La matière est acheminée à travers l'appareil par gravité. Toutefois, pour résoudre des problèmes spécifiques, un autre système de concassage, appelé concasseur horizontal, est également utilisé.

Les concasseurs à mâchoires verticales les plus courants sont les concasseurs à double effet, également appelés à double bascule. Cependant, dans l'industrie minière actuelle, seuls les concasseurs à simple effet sont utilisés, car ils sont moins lourds (et donc moins coûteux) que les concasseurs à double effet [16].

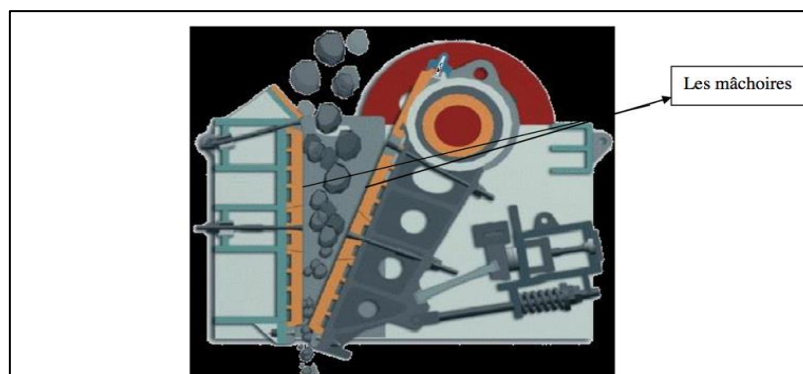


Figure II-2 schéma d'un concasseur à mâchoire.

Les équipements à mâchoires sont principalement employés en tant que concasseurs primaires dans les carrières de roches massives et dures, ainsi que dans les mines, soit dans des installations fixes, soit dans des installations mobiles et semi-mobiles. Dans tous les cas, ils doivent être alimentés à partir d'une trémie, d'un distributeur et, éventuellement, d'un crible pour éliminer les produits dont la taille est inférieure au réglage requis.

### II.2.1.2. Concasseurs giratoires :

Le concasseur giratoire fonctionne sur un principe similaire à celui du concasseur à mâchoires, mais il présente un phénomène d'attrition plus prononcé. Sa structure se compose d'une surface concave fixe et d'une tête conique en mouvement. Le cône interne effectue un léger mouvement circulaire, mais contrairement au concasseur à mâchoires, il ne tourne pas sur lui-même. Ce mouvement est généré par un mécanisme excentrique, qui transforme un mouvement de rotation en un mouvement d'oscillation. La tête excentrée en rotation est recouverte d'un blindage résistant à l'usure pour protéger la surface et assurer une longue durée de vie. L'espace entre la surface concave et la tête conique permet de fragmenter le matériau par compression, tandis que le mouvement giratoire assure une action d'attrition supplémentaire. Cela permet d'obtenir une fragmentation plus fine et une meilleure réduction de la taille des matériaux. Les concasseurs giratoires sont couramment utilisés dans les applications où une réduction de taille précise est requise, notamment dans les carrières de pierre et les mines.



**Figure II-3** concasseur giratoire de pierres.

### II.3. C

Le mémoire porte sur l'utilisation d'un matériau spécifique, qui est un acier allié au manganèse (X120Mn12). Les détails de sa composition chimique sont présentés dans le tableau ci-dessous.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0.95-1.3	0.65	11.5-14	0.05	0.03	0.5	0.75	1.75	0.045	0.3

**Tableau II-1** La nuance du matériau utilisée

## II.4. Etude métallographique :

### II.4.1. Préparation des échantillons :

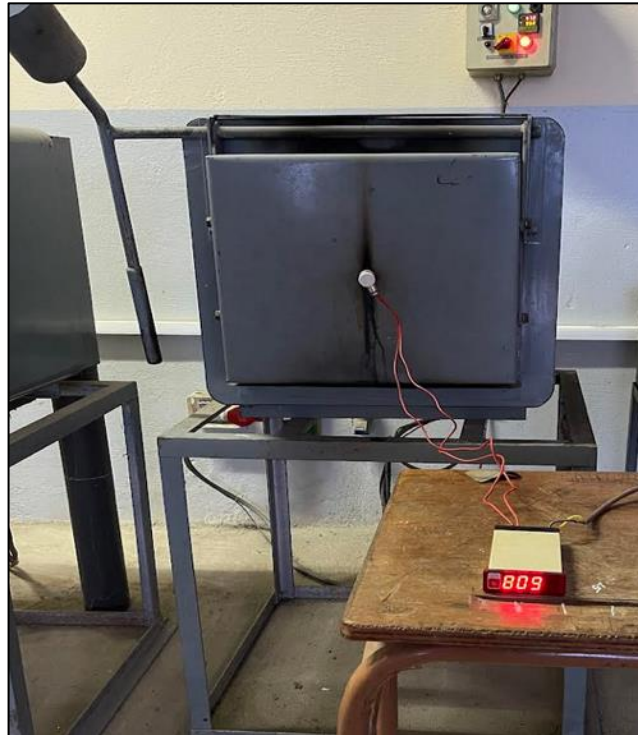
Des petits morceaux à l'état brute, de forme cubique, des dimensions qui ne dépassent pas 50\*40\*15 ont été fournis par la fonderie de Tiaret, nous avons par la suite découpé ces morceaux à fins d'élaborer des échantillons témoins du traitement thermique

Pour préparer les échantillons, une macro tronçonneuse a été utilisée pour le découpage qui s'est déroulé en présence d'eau afin d'éviter une augmentation de la température due au frottement entre le disque abrasif et l'échantillon, ce qui permet de prévenir tout changement de la structure.

La plaque brute subit une opération de fraisage (surfaçage) en utilisant la fraiseuse universelle du hall de technologie. L'outil utilisé est une fraise en carbure de 120 mm de diamètre avec 6 dents. Les paramètres de coupe suivants sont appliqués : une vitesse de coupe  $V_c$  de 40 m/min, une vitesse d'avance de 50 mm/min et une profondeur de passe de 0,5 mm.

### II.4.2. Traitement thermique :

La formation de la structure de l'acier dépend étroitement des conditions de refroidissement utilisées lors de sa fabrication. Ces conditions permettent d'appliquer différents traitements thermiques afin d'obtenir les propriétés souhaitées dans l'acier final.



**Figure II-4** Four électrique disponible au laboratoire Fonderie du département génie mécanique au niveau du hall de technologie

Les traitements thermiques ont été réalisés dans le laboratoire du département de génie mécanique à l'aide d'un four électrique. Nous avons conservé un échantillon témoin qui n'a pas subi de traitement thermique, tandis que d'autres échantillons ont été soumis à un traitement thermique à une température d'austénitisation de 1050°C pendant une période de maintien de 45 minutes, suivi d'une trempe à l'eau glacée.

Par la suite, nous avons effectué un polissage dans le but d'éliminer la couche de carbone résiduelle présente sur les échantillons. Nous avons conservé un échantillon sans revenu, tandis que les autres échantillons ont subi un revenu à des températures de 200°C, 400°C et 600°C, pendant une durée de 90 minutes, suivis d'un refroidissement à l'air libre.

### **II.4.3. Le polissage :**

Les surfaces ont été polies en utilisant des papiers abrasifs de diverses granulométries : 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000, 4000. Par la suite, les échantillons ont été finalisés en appliquant de la pâte diamantée sur du papier feutre, permettant ainsi d'obtenir un état de surface miroir.



Figure II-5 La polisseuse utilisée

#### II.4.4. L'attaque chimique :

Pour observer la microstructure des phases de l'acier au manganèse, il est nécessaire d'utiliser une méthode d'attaque chimique afin de révéler les différentes phases séparées par des joints de grains. Le réactif utilisé à cet effet est le Nital, qui est composé de 5% d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et de 95% d'éthanol (alcool éthylique  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

Lors de l'observation, la surface de l'échantillon est mise en contact avec le réactif Nital et maintenue dans cette position pour 20 secondes (une décoloration plus sombre apparaisse). Cette réaction chimique permet de mettre en évidence les différentes phases présentes dans l'acier au manganèse, en accentuant les contrastes entre elles. Cela facilite l'analyse et la caractérisation des microstructures, notamment en permettant de distinguer les grains individuels et les phases distinctes.

### II.5. Méthodes de caractérisation

#### II.5.1. Microscope optique :

L'utilisation d'un microscope optique équipé d'une caméra vidéo pilotée par ordinateur offre une méthode précieuse pour l'observation et l'analyse de différentes surfaces. Ce dispositif



permet d'obtenir des images avec un grossissement pouvant atteindre jusqu'à 1500 fois, offrant ainsi une vue détaillée des échantillons étudiés.

En effectuant de nombreuses observations à l'aide de cette technologie avancée et en combinant ces observations avec une solide connaissance de la physique des solides, des diagrammes de phases des matériaux et des paramètres spécifiques du microscope, il devient possible de réaliser une analyse précise et approfondie.

Le microscope optique permet d'explorer et d'analyser les caractéristiques des surfaces des matériaux examinés, tels que leur composition, leur texture, leur morphologie des grains, leurs défauts et les phases présentes. Grâce aux informations recueillies lors de ces observations, il est ensuite possible d'interpréter les résultats obtenus en se basant sur les connaissances théoriques et les paramètres du microscope.

### **II.5.2. Diffraction au rayons X :**

Dans le but d'identifier les phases présentes dans nos échantillons, nous avons utilisé la technique d'analyse par diffraction des rayons X. Cette analyse a été réalisée en utilisant un diffractomètre de type PANanalytical, qui était disponible à la section CRAPC bejaïa.



**Figure II-6** Diffractomètre de type PANalytical,

Les spectres de diffraction ont été obtenus en effectuant un balayage dans la plage de  $0^\circ$  à  $100^\circ$ , couvrant ainsi les pics intenses correspondant aux composés susceptibles d'être présents dans nos échantillons. Pour chaque intervalle de  $0,03$  degré, le temps d'exposition était d'une seconde.

Cette approche nous a permis d'analyser les interactions des rayons X avec les échantillons, ce qui nous a donné des informations sur la structure cristalline et la composition des phases présentes. En comparant les pics de diffraction observés avec les bases de données de référence, nous avons pu identifier les différentes phases présentes dans nos échantillons et obtenir des informations précieuses sur leur nature et leur arrangement atomique.

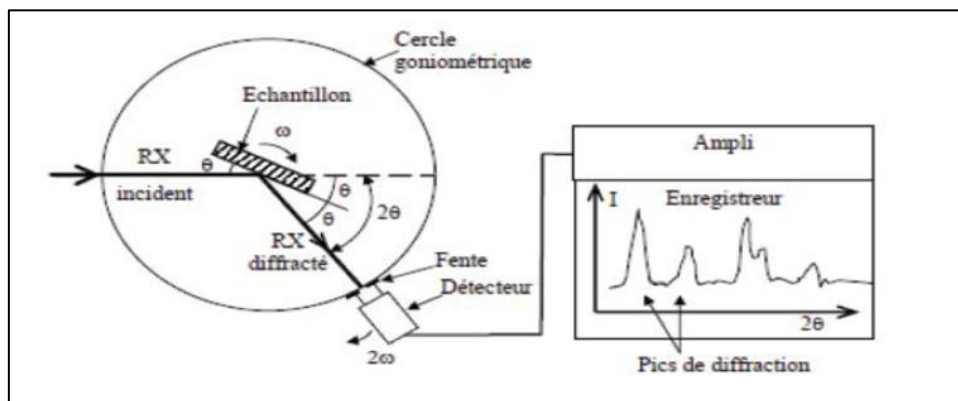


Figure II-7 Principe d'une diffraction des RX

### II.5.3. Fluorescence des rayons X :

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) est une technique d'analyse élémentaire qui permet d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques présents dans un échantillon. Elle est considérée comme une méthode d'analyse globale car elle peut détecter et quantifier une large gamme d'éléments, allant des éléments légers tels que le carbone et l'oxygène aux éléments plus lourds comme le plomb et l'uranium.

<b>Fe_E52100</b>		Unused 1 : Test Pièces Euro
MN: 0		Unused 2 : Amar
2nd Match: Fe_4140		Unused 3 : Univ Bejaia
MN: 0		
3rd Match: Fe_1 1-4 Cr		
MN: 0		
<b>Cr</b> Chromium	1,78% $\pm 0,028\%$	<b>Mn</b> Manganese
1,30% 1,60%		13,07% $\pm 0,173\%$
<b>Fe</b> Iron	84,53% $\pm 0,529\%$	<b>Ni</b> Nickel
97,60% 98,50%		2778,4 PPM $\pm 209,2$ PPM
<b>Cu</b> Copper	2014,2 PPM $\pm 164,0$ PPM	<b>Mo</b> Molybdenum
		1016,5 PPM $\pm 35,3$ PPM
<b>Pb</b> Lead	393,8 PPM $\pm 46,6$ PPM	

Tableau II-2 resultats de l'FRX

### II.5.4. La micro-dureté :

L'obtention de la micro-dureté joue un rôle crucial dans l'identification des composants structuraux de notre acier, tant avant qu'après l'application d'un traitement thermique. La micro-dureté est étroitement liée à la microstructure de l'acier, en particulier à la nature des précipités formés. Les éléments d'addition présents dans les aciers, ainsi que les paramètres des traitements, ont une influence significative sur les résultats de la micro-dureté avant et après les traitements.

Nous avons mesuré la micro-dureté Vickers à l'aide d'un appareil de type « zwick ». Le temps de pénétration de La pointe en diamant était d'environ 10 secondes. Nous avons effectué plusieurs mesures pour chaque constituant structural en appliquant une charge de 200 grammes force. Cette méthode consiste à appliquer une force et à mesurer ensuite l'empreinte résultante.

En utilisant la micro-dureté, nous avons pu obtenir des informations précieuses sur la dureté locale des différentes zones de l'acier et identifier les variations de dureté liées aux changements de microstructure. Ces mesures nous ont permis de caractériser les effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques de notre acier, en mettant en évidence les changements dans la nature et la distribution des phases et des précipités présents.



**Figure II-1** Micro-duromètre Vickers



## CHAPITRE III

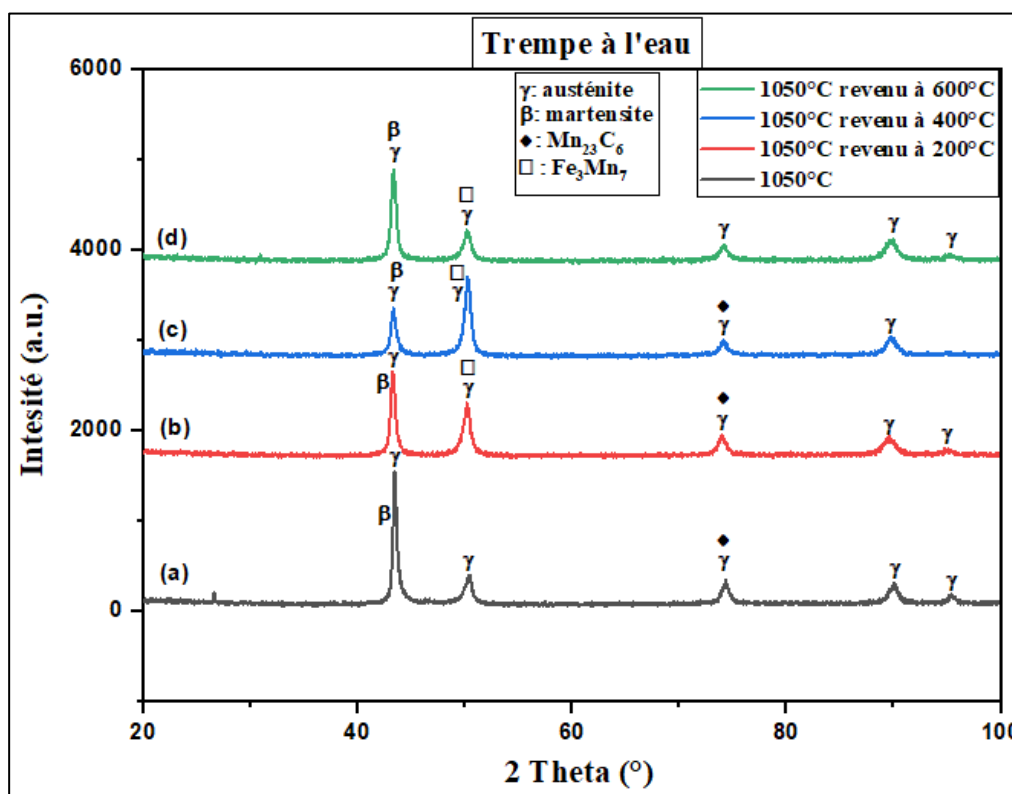
### Résultats et discussions

### III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'examen des principaux résultats liés à l'influence des températures de revenu (200, 400 et 600 °C) appliquées pendant 90 minutes sur l'ensemble des échantillons préparés. Ces échantillons ont été soumis à un traitement thermique comprenant une austénitisation à 1050 °C pendant 45 minutes, suivie d'une trempe à l'eau glacée. L'objectif est d'analyser l'impact de ces températures de revenu sur les propriétés microstructurales, structurales et mécaniques des échantillons.

### III.2. Diffraction des rayons X (DRX) :

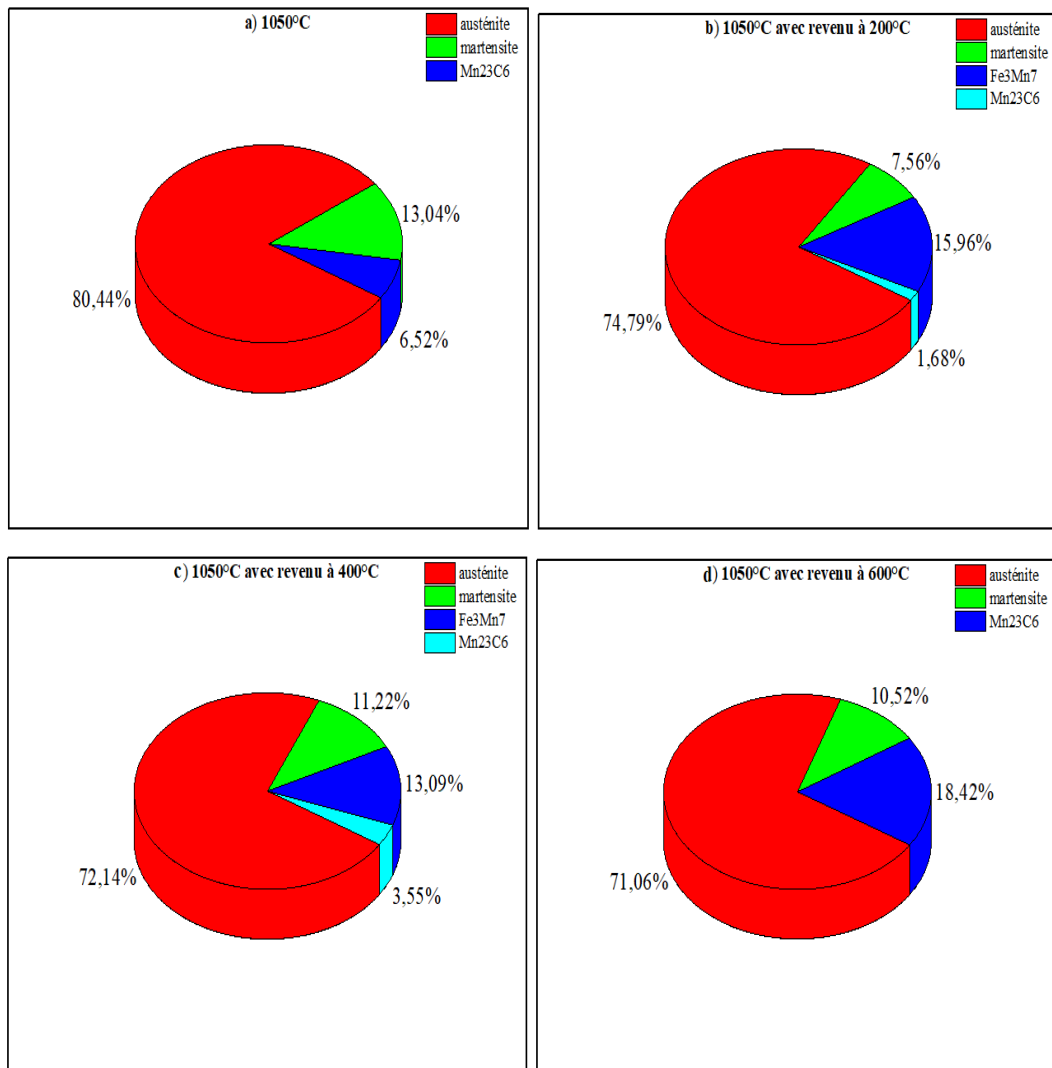
La figure III.1 représente le spectre de diffraction aux rayons x des échantillons austénitisés à 1050°C suivi d'une trempe à l'eau suivi des revenus à 200°C, 400°C et 600°C. Ce spectre nous donne l'intensité des pics en fonction de la position  $2\theta$  (l'angle de diffraction) des différentes phases constituantes de notre dépôt.



**Figure 0II-1** Diffraction des rayons x : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C.

- Le spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'acier austénitisé à 1050°C montre la présence de pics correspondant à la phase majoritaire de l'austénite et de la martensite et un autre pic correspond à l'austénite et de carbure de manganèse de type (Mn<sub>23</sub>C<sub>6</sub>).
- Le spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'acier austénitisé à 1050°C suivi d'un revenu à 200°C montre la diminution d'intensité des pics de la phase de l'austénite et de la martensite et l'apparition d'une phase qui contient de l'austénite et Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub>.
- Le spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'acier austénitisé à 1050°C suivi d'un revenu à 400°C montre la diminution d'intensité des pics de la phase de l'austénite et de la martensite et l'élargissement des pics qui contient la phase de l'austénite et Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub>.
- Le spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'acier austénitisé à 1050°C suivi d'un revenu à 600°C montre un pic de l'austénite et de la martensite, un pic d'austénite et de Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub> et d'autres pics de la phase austénite.
  - Position des pics de diffraction : En analysant les angles de diffraction ( $2\theta$ ) et leur intensité, On remarque que les pics caractéristiques de l'échantillons austénitisé à 1050°C sont à des degrés 44.8°, 50.8°, 74.5°. Et les pics des autres spectres ont presque les mêmes positions avec un écart de quelques dixièmes de degrés. On remarque aussi une instabilité des intensités des spectres varie de 1400 à 600 (a.u.) pour le spectre détecté à 44,8°, et un écart de variation de 400 à 700 (a.u.) pour le pic détecté à 50,8°.
  - Structure cristalline : La structure cristalline de la phase majoritaire qui est de l'austénite est une structure cristalline à faces centrées. Le spectre de DRX confirme la présence de cette structure caractéristique en montrant aussi des pics de diffraction correspondant aux plans cristallins typiques de martensite.
  - Le spectre DRX nous montre une phase principale qui est de l'austénite Cubique a face Centrée (CFC) avec un paramètre de maille 3.586 Angstrom.





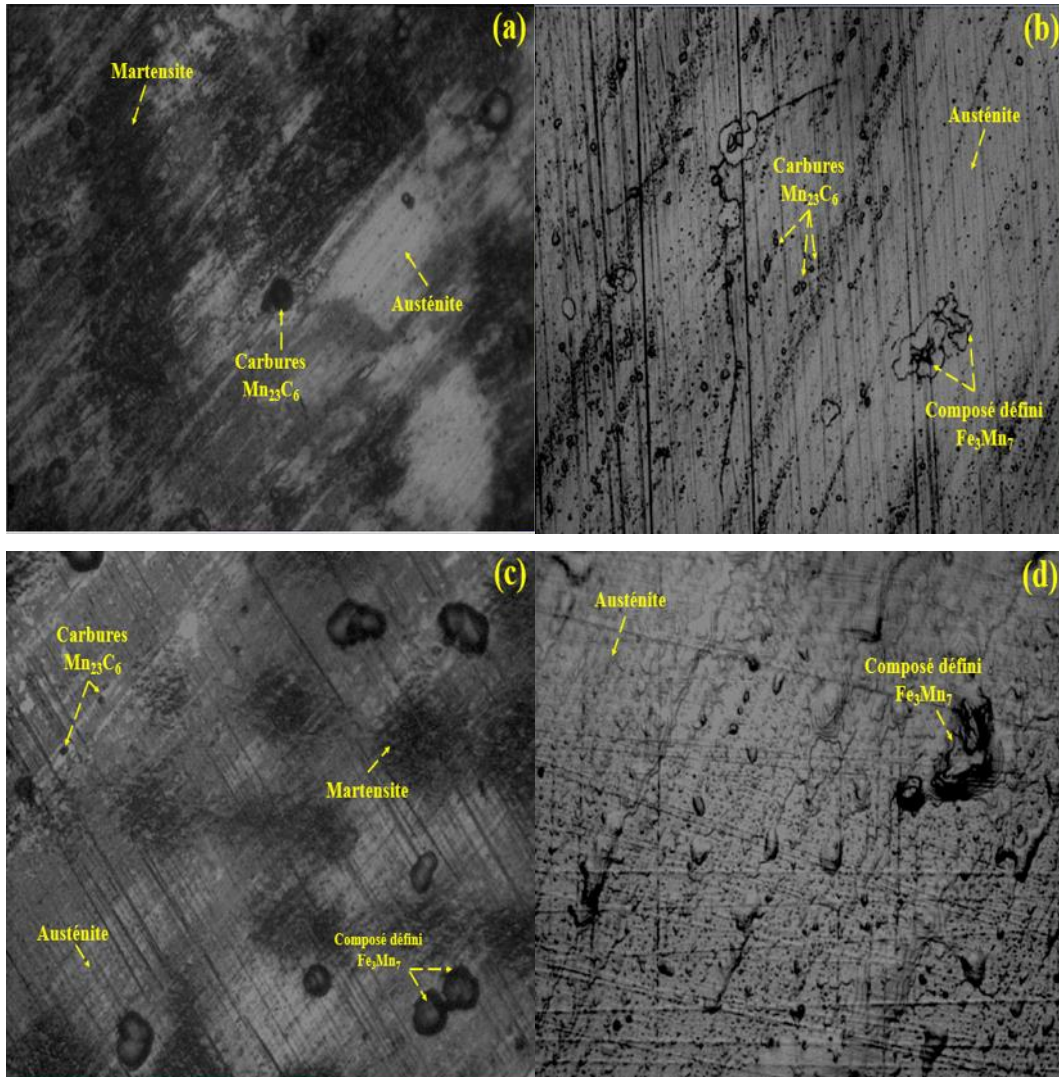
**Figure III-2** Quantification de phase obtenues par DRX : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C.

- a) 1050°C : À cette température, l'échantillon est constitué de la phase dominante qui est l'austénite avec un taux de 80,44%, une phase de martensite de 13,04% et de 6,52% du composé défini (Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub>)
- b) 1050°C revenu à 200°C : Après un revenu à 200°C, des transformations de phases se produisent, ce qui a engendré l'apparition de carbures Mn<sub>23</sub>C<sub>6</sub> avec un taux de 1,68% et également la présence de 74,79% d'austénite, 7,56% de la martensite et 15,96% du composé défini (Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub>)
- c) 1050°C revenu à 400°C : Le revenu à 400°C est similaire à celui de 200°C. on observe la présence de 72,14% d'austénite, 13,09% de composants définie (Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub>), 11,22% de la martensite et 3,55% de carbures (Mn<sub>23</sub>C<sub>6</sub>).

- d) 1050°C revenu à 600°C : À cette température de revenu, on a remarqué la disparition du composé défini ( $\text{Fe}_3\text{Mn}_7$ ), et la présence d'austénite, la martensite et des carbures avec des pourcentages de 71.06%, 10,42% et 18,42% respectivement.

### III.3. Métallographie de l'acier 13%Mn :

Les différentes morphologies sur les surfaces transversales observées par un microscope optique de l'acier 13%Mn sont illustrées dans les figures ci-dessous :



**Figure III-3** Microstructure de l'acier 13%Mn : a. 1050°C, b. 1050°C revenu à 200°C, c. 1050°C revenu à 400°C, d. 1050°C revenu à 600°C.

L'acier 13%Mn, composé de 13% de manganèse, présente une microstructure qui peut être analysée en fonction des différentes températures de traitement thermique. Voici une interprétation de la microstructure pour chaque condition spécifique :

- 1) 1050°C : À cette température élevée, l'acier subit une austénitisation, ce qui permet de visualiser des phases d'austénite, qui est une phase cubique à faces centrées (CFC). Ainsi des phases de la martensite et des carbures de type  $Mn_{23}C_6$
- 2) 1050°C revenu à 200°C : Après avoir été austénitisé à 1050°C, l'acier est ensuite revenu à une température plus basse de 200°C. à ce stade on remarque toujours la présence de l'austénite et les carbures et l'apparition des composés définies  $Fe_3Mn_7$
- 3) 1050°C revenu à 400°C : Lorsque l'acier austénitisé est revenu à 400°C, la microstructure présentera une combinaison de l'austénite et de martensite. Les carbures de manganèse de type  $Mn_{23}C_6$  forment à cette température. La présence de carbures peut renforcer l'acier et améliorer sa résistance à l'usure.
- 4) 1050°C revenu à 600°C : À 600°C, l'acier austénitisé revenu forme une microstructure composée principalement de la phase de l'austénite. Les carbures de manganèse se développent davantage et se transforment en une phase plus stable à cette température. La microstructure sera donc riche en carbures de manganèse dispersés dans la matrice.

#### III.4. Caractérisation mécanique :

La figure ci-dessous illustre le profil de micro dureté Vickers réalisés sous une charge de 200g de l'acier 13%Mn.

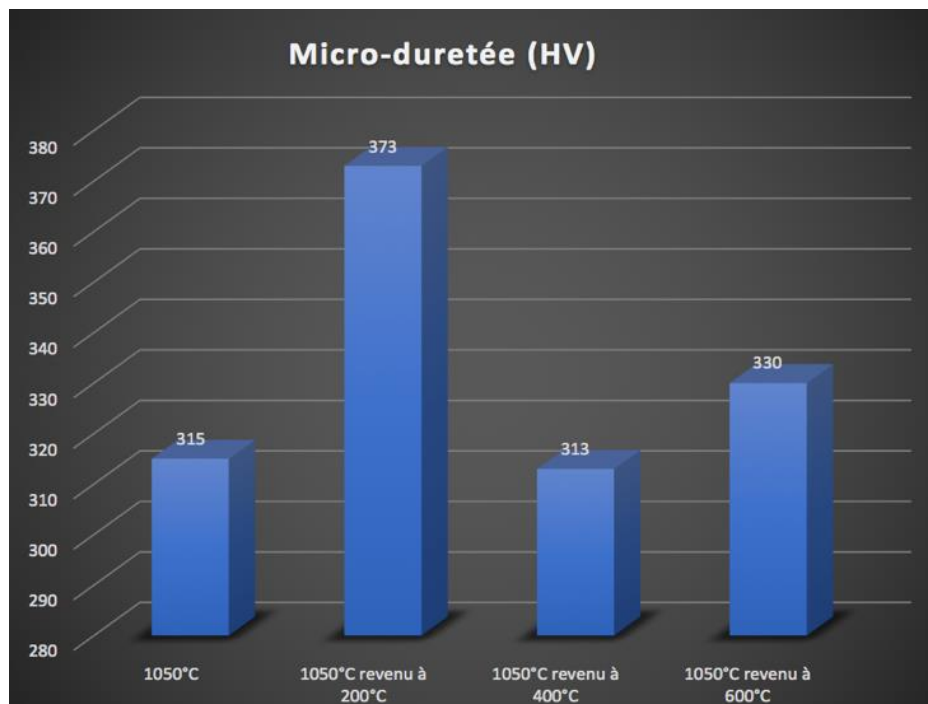
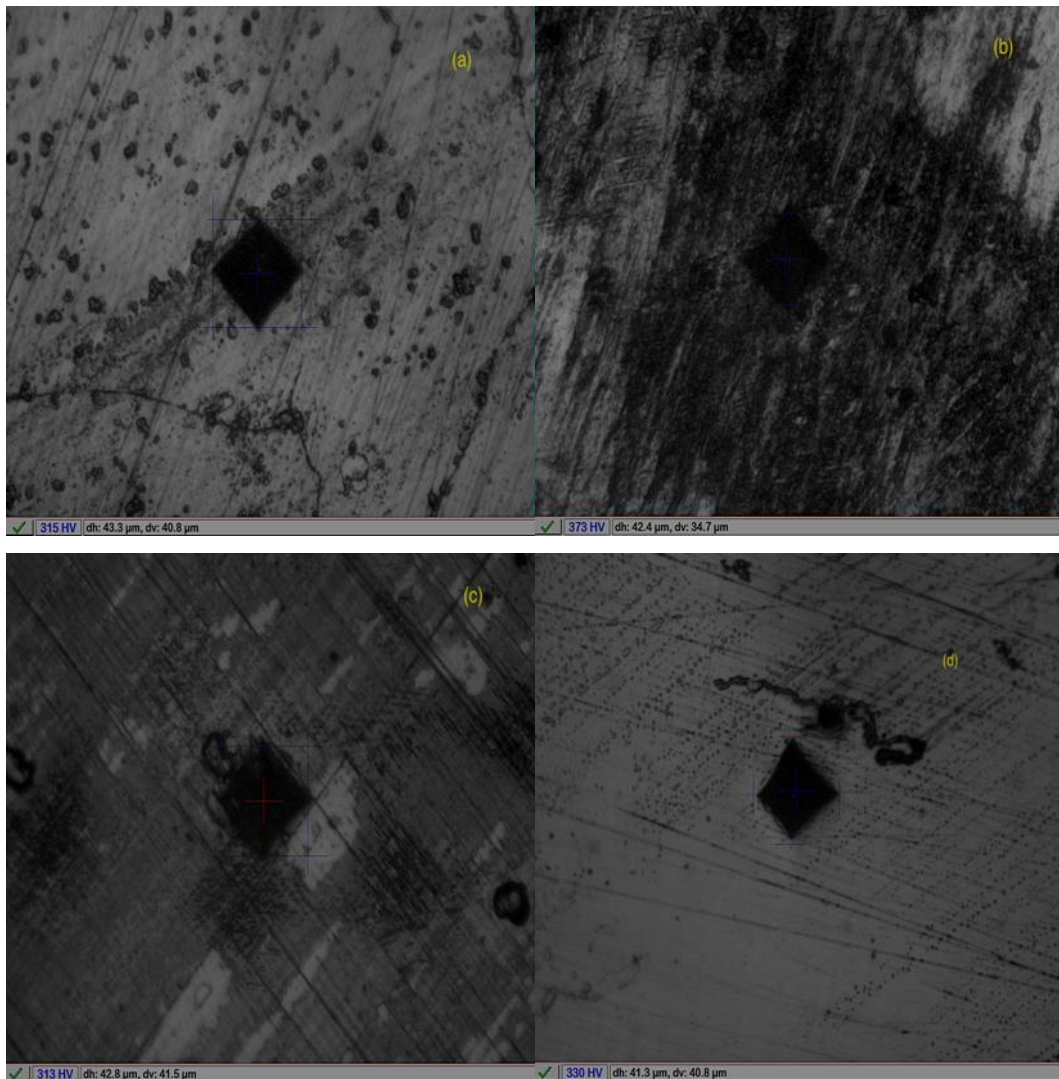


Figure III-4 Histogramme présente la micro dureté Vickers de l'acier 13%Mn.

L'histogramme met en évidence une variation des valeurs de micro dureté Vickers entre les échantillons, allant de 313 HV à 373 HV. Cette variation peut être attribuée aux différents traitements thermiques appliqués. En comparant les valeurs de micro dureté Vickers des échantillons, on peut observer des tendances qui peuvent être liées aux traitements thermiques spécifiques. Par exemple, l'échantillon revenu à 200°C (373 HV) présente la plus haute valeur de dureté, suggérant que ce traitement thermique a renforcé la dureté de l'échantillon.

Les échantillons ayant subi des revenus à différentes températures (200°C, 400°C et 600°C) montrent des valeurs de micro dureté différentes. Cela indique que la température de revenu a un impact sur les propriétés mécaniques de l'acier 13%Mn. Il est possible que des températures de revenu plus élevées (600°C) aient conduit à une diminution de la dureté par rapport à des températures plus basses (200°C et 400°C). L'histogramme permet également de visualiser la distribution des valeurs de micro dureté mesurées. Si les valeurs sont regroupées étroitement autour d'une moyenne avec une faible dispersion, cela suggère une microstructure plus homogène. Si les valeurs sont plus dispersées, cela peut indiquer des différences dans la microstructure ou la présence de différentes phases dans les échantillons.

Les Figures III-5 montrent les images de l'empreinte Vickers obtenue après essai, les empreintes ont été effectuées pour calculer la micro dureté Vickers.



**Figure III-5** les images de l'empreinte Vickers obtenue après essai de la micro-dureté.

Les images de l'empreinte Vickers obtenue après un essai de micro-dureté permet d'évaluer les caractéristiques de la surface et les propriétés mécaniques de l'échantillon testé.

La taille de l'empreinte Vickers est mesurée à partir de l'image. Une empreinte plus grande peut indiquer une dureté plus faible, tandis qu'une empreinte plus petite peut indiquer une dureté plus élevée. Cependant, il est important de noter que la taille de l'empreinte doit être considérée en relation avec la charge de l'essai et les caractéristiques spécifiques de l'indenteur Vickers utilisé.



## Conclusion générale et perspectives

En conclusion, cette étude a permis d'explorer les caractéristiques structurales, microstructurales et mécaniques d'un acier fortement allié au manganèse utilisé dans la fabrication de marteaux et de concasseurs de broyage. Une série de traitements thermiques a été réalisée afin d'évaluer leur influence sur les propriétés de cet acier.

Les résultats ont révélé que les traitements thermiques ont un impact significatif sur la structure et les propriétés mécaniques de l'acier. Ils ont permis d'optimiser la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité de l'acier, ce qui est essentiel pour assurer des performances optimales et une longue durée de vie des pièces fabriquées. Cette étude offre donc des perspectives prometteuses pour l'amélioration des procédés de fabrication et le développement de matériaux adaptés aux conditions d'utilisation difficiles dans l'industrie de concassage.

- La température de revenu appliquée a un impact sur les propriétés mécaniques de l'acier examiné.
- Avec une température d'austénitisation de 1050°C et une trempe à l'eau glacée suivi d'un revenu à 200°C, nous avons obtenu un matériau avec des caractéristiques d'un ordre optimales. Une micro-dureté égale à 373HV et une structure composée essentiellement des phases Fe<sub>3</sub>Mn<sub>7</sub> et d'austénite

## Perspectives et recommandations

Cette étude a permis d'évaluer l'impact des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier au manganèse. Toutefois, nous pensons que tous les aspects du phénomène n'ont pas été pleinement explorés. Ainsi, les perspectives de cette recherche pourraient être complétées par les points suivants :

- Refaire des traitements thermiques d'austénitisations avec d'autres températures de revenu
- Rajouter les essais de résilience afin de confirmer les températures de revenue appliquées
- Rajouter d'autres analyses microstructurales dans le but de mieux observer et analyser les phases, défauts, et autres caractéristiques internes des matériaux





**Annexe A**

## Références bibliographiques

- [1] Guy Murry, 2004, aide mémoire Métallurgie, Dunod, Paris.
- [2] J. Paul Bailon, J. Marie dorlot. "Des matériaux", 3eme édition 2000-2001.
- [3] AZZOUG, N et BENCHEIKH, S. (2016). Optimisation des paramètres des traitements thermiques d'austénitisation de l'acier de construction mécanique XC48. Mémoire de master, Université Abderrahmane mira, Bejaia, Algérie.
- [4] ARZALLAH, R. (2010). Etude du comportement mécanique et tribologique des aciers austénitiques au manganèse : application aux cœurs de voies ferroviaires. Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines, Paris.
- [5] Technique d'ingénieur, M1126, 2011.
- [6] M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976)
- [7] Bensaada S. Traitements thermiques des aciers. Book. 2019. Université de Biskra.
- [8] Yves Martin. Module n° 2.15 « Aciers fortement alliés et aciers inoxydables ». Swiss Welding institute. Mise à jour 2006. P2.
- [9] JEAN-NOËL, JESUS LOPEZ. CISM « Conceptions et Innovations en Sécurité Magnétique ». La lettre de casimir - janvier 2005 - n° 69.
- [10] A. SAEED-AKBARI, J. IMLAU, U. PRAHL, and W. BLECK « Derivation and Variation in Composition-Dependent Stacking Fault Energy Maps Based on Subregular Solution Model in High-Manganese Steels » The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009 DOI: 10.1007/s11661-009-0050-8.

[11] Taotsung shun, C.M.Wan and J.G. Byrne : A study of work hardening in austenitic Fe-Mn-C and Fe-Mn-C-Al alloys. Acta materialia: 12, 3407-3412,1992.

[12] G. Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, M. Weisz : Contribution à L'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie LIV : 6,433-481, 1957.

[13] Taotsung shun, C.M. Wan and J.G. Byrne: A study of work hardening in austenitic Fe-Mn-C and Fe-Mn-C-Al alloys. Acta Materialia: 12, 3407-3412,1992.

[14] M. Wiest, E. Kassa, W. Davas, J. C. O Nielsen and H. Ossberger: assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact. wear.

[15] Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, M. Weisz : Contribution à l'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie LIV : 6,433-481, 1957.

[16] BENSADI Ahmed. Etude de l'usure du concasseur à marteaux intermédiaires EV250\*300-2-85. Mémoire de master.2018. Université de M'sila

## Résumé

Ce travail s'est concentré sur l'étude de l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield, ainsi que sur l'analyse de son état microstructurale de base, afin d'évaluer les performances et la durée de vie des pièces fabriquées soumises à des sollicitations continues d'usure et de choc. Une caractérisation microstructurale et structurale a été effectuée en utilisant des techniques telles que le microscope optique (MO) et la diffraction des rayons X (DRX). De plus, des essais de micro-dureté ont été réalisés pour caractériser les propriétés mécaniques. Les résultats obtenus ont démontré l'influence des traitements thermiques sur la dureté et, plus particulièrement, sur la structure des phases de l'acier. Des variations significatives ont été observées entre les valeurs et les phases avant et après les traitements thermiques.

## Abstract

This study focused on investigating the influence of heat treatments on the mechanical properties of Hadfield steel and analyzing its baseline microstructural state to assess the performance and lifespan of manufactured parts subjected to continuous wear and impact in harsh environments. Microstructural and structural characterization was conducted using techniques such as optical microscopy (OM) and X-ray diffraction (XRD). Additionally, micro-hardness tests were conducted to characterize the mechanical properties. The results demonstrated the influence of heat treatments on the hardness and, specifically, the phase structure of the steel. Significant variations were observed in the values and phases before and after the heat treatments.

## ملخص

تركزت هذه الدراسة على استكشاف تأثير المعالجات الحرارية على الخواص الميكانيكية لفولاذ هادفيلد وتحليل الحالة المجهرية الأساسية لتقييم أداء وعمر الأجزاء المصنعة التي تتعرض للاحتكاك المستمر والتأثير في بيئات قاسية. تم إجراء التوصيف المجهرية والهيكلية باستخدام تقنيات مثل المجهر البصري وتفريق الأشعة السينية. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء اختبارات صلادة الميكرو لتوصيف الخواص الميكانيكية. أظهرت النتائج تأثير المعالجات الحرارية على الصلابة وبشكل خاص هيكل المرحلة للفولاذ. لوحظ تباين كبير في القيم والمراحل قبل وبعد المعالجات الحرارية