



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté Science de la technologie  
Department de Genie mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Métallurgie**

**Spécialité : Génie Métallurgique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Mohammedi taki eddine**

Le : mardi 9 juillet 2019

## **Influence du chromage sur les caractéristiques mécaniques d'un acier faiblement allié de type (xc100) traité**

---

### **Jury :**

Pr.	Bensaada Said	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	Mosbah Zidani	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Karima Ouannes	MCB	Université de Biskra	Examineur



---

---

# DEDICASE

## *Je dédie ce travail à ... ?*

### *A mes très chers parents :*

*Mon père Larbi et ma mère Hennia Affables, Ma grande mère Saadia honorables, aimables : vous me représentez le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

### *A mes frères et mes sœurs :*

*Redouane , Mohammed et son fils Anes , mon petit frère et soeur Taha et Arwa Salsabil , Randa et Sara Joujou et Doudi , Iman et Aassma et*

*pour tout ce qu'ils ont fait pour encourager moi les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

*Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*



## **Remerciement**

C'est un grand plaisir d'exprimer ma gratitude à mon encadreur Monsieur Mosbah ZIDANI Professeur à l'université de Biskra de m'avoir fait confiance de mener à tenue cette recherche sous sa direction, c'est grâce à lui, que j'ai en effet découvrir le monde de la recherche et vivre cette expérience très riche sur le plan scientifique et humain

J'ai le devoir et le plaisir de remercier Dr. Lachen Mebarki pour sa précieuse collaboration

Je souhaite également remercier les membres de jury :

- **Pr : Saïd Bensaada**
- **Dr : Karima Ouannes**

Je remercie particulièrement tous les personnels du hall mécanique et du deux Laboratoires respectivement de métallurgie et de physique

A tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de près ou de loin à ce projet de fin d'étude.

**Dédicace**

**Remercîment**

**Sommaire**

**Listes des tableaux**

**Listes des figures**

**Introduction général**

**CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES ACIERS**

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>...2</b>
<b>2</b>	<b>Définition d’acier .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Classification des aciers.....</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Différentes classifications.....</b>	<b>3</b>
<b>4.1</b>	<b>Aciers non alliés.....</b>	<b>4</b>
<b>4.2</b>	<b>Les aciers faiblement alliés.....</b>	<b>4</b>
<b>4.3</b>	<b>Les aciers fortement alliés.....</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Aciers spéciaux non alliés de type C.....</b>	<b>4</b>
<b>5.1</b>	<b>Aciers spéciaux.....</b>	<b>5</b>
<b>5.2</b>	<b>Aciers spéciaux non alliés.....</b>	<b>5</b>
<b>5.3</b>	<b>Aciers spéciaux alliés.....</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Aciers inoxydables.....</b>	<b>6</b>

**CHAPITRE II: TRAITEMENT THERMIQUE ET TRAITEMENT DE SURFACE**

<b>1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>Traitements thermiques des aciers.....</b>	<b>9</b>
<b>3.</b>	<b>Durcissement par trempe.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Austénitisation.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Milieu de trempe .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>Le revenu .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>Le recuit.....</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>les transformations de phases à l’état solide des aciers.....</b>	<b>13</b>

<b>5.Traitement de surface.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.Présentation.....</b>	<b>17</b>
<b>5.2.Objectifs Traitement de surface.....</b>	<b>17</b>
<b>5.3.Types de traitement de surface.....</b>	<b>18</b>
<b>6.Chrome.....</b>	<b>20</b>
<b>6.1.Definition Chrome.....</b>	<b>20</b>
<b>6.2.Structure cristalline du chrome.....</b>	<b>21</b>
<b>6.3.Structures et propriétés des carbures de chrome .....</b>	<b>21</b>
<b>7.Chromage.....</b>	<b>23</b>
<b>7.1.Définition Chromage.....</b>	<b>23</b>
<b>7.2.Type de chromage.....</b>	<b>23</b>
<b>8.Polissage électrolytique.....</b>	<b>24</b>
<b>8.1.Principe.....</b>	<b>24</b>
<b>8.2.Effets.....</b>	<b>24</b>
<b>8.3.Avanages.....</b>	<b>24</b>
<b>9.Chromage décoratif.....</b>	<b>25</b>
<b>9.1.Préparation des surfaces.....</b>	<b>25</b>
<b>9.2.Applications.....</b>	<b>25</b>
<b>10.Chromage dur.....</b>	<b>26</b>
<b>10.1.Objectif.....</b>	<b>26</b>
<b>10.2.Caractéristiques essentielles.....</b>	<b>26</b>
<b>10.3.Les contraintes résiduelles.....</b>	<b>27</b>
<b>10.4.Avantages et inconvénients.....</b>	<b>30</b>
<b>11.Corrosion.....</b>	<b>30</b>
<b>11.1.Définition.....</b>	<b>30</b>
<b>11.2.Classification de la corrosion.....</b>	<b>30</b>
<b>11.3.Les différents modes de corrosion.....</b>	<b>31</b>

## CHAPITRE III MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1. Matériau étudié.....	33
2. Les caractéristiques mécaniques.....	33
2.1.Traitements thermiques.....	33
2.1Trempe.....	34
2.1.2 Revenu.....	34
2.2. Essai de dureté.....	34
2.2.1. Essai Rockwell.....	35
3. Essai de traction.....	38
3. 1. Courbe de contrainte et déformation.....	39
3.2 Module d'élasticité longitudinale E MPa.....	39
3.3 Loi de Hooke.....	39
3.4 Limite élastique Re MPa.....	40
3.5 Limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 MPa.....	40
3.6 Limite maximale Rm MPa.....	40
3.7 Forme de l'éprouvette .....	41
4. Essai de résilience.....	42
4.1 Forme de l'éprouvette.....	43
5.Examin métallographique.....	44
5.1Attaque chimique.....	45
5.2 polissage mécanique.....	45
5.3. Microscopie optique (MO).....	45
6 Principe et caractéristiques du chromage.....	46
6 .1 Utilisation du chrome.....	46
6 .2. Les caractéristiques principales du chrome.....	47
6 .3. Le principe de chromage.....	47
6.4 La composition de la solution polissage électrolytique.....	48
6.5 La composition de la solution de chromage.....	48

## CHAPITRE IV: RESULTAT EXPERIMENTALES ET INTERPRETATION

1. Introduction.....	51
----------------------	----

<b>2.</b>	<b>Métallographie.....</b>	<b>51</b>
<b>3.</b>	<b>Les mesures de la dureté.....</b>	<b>53</b>
<b>4.</b>	<b>Essai de traction.....</b>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>Essai de résilience.....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>Chromage dur.....</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b>méthode de la masse perde.....</b>	<b>58</b>

**Conclusion général**

**Bibliographie**

**Résumé**



## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE I**

Tableau I .1 Constituants métallographiques d'équilibre .....	3
---	---

### **CHAPITRE II**

Tableau II.1 Propriétés du matériau chrome .....	21
--	----

### **Chapitre III**

Tableau III.1.Composition chimique de l'acier XC100 étudié.....	33
Tableau III. 2 Les paramètres de refroidissement (échantillon 1).....	37
Tableau III. 3 Les paramètres de refroidissement (échantillon 2).....	37
Tableau III.4 Les paramètres de refroidissement (échantillon 3).....	37
Tableau III.5 : Les notations et unités de la résilience.....	42
Tableau III.6 : Désignation et les dimensions de l'éprouvette entaille U de résilience avant et après trempe.....	44

### **Chapitre IV**

Tableau .IV.1. Mesure de la dureté.....	53
Tableau .IV.2. la résistance à la rupture de chaque échantillon.....	55
Tableau .IV.3 La mesure de l'énergie de rupture absorbée varie en fonction de la dureté.....	56
Tableau .IV.4 La masse perde (eau robinet).....	59
Tableau .IV5 La masse perde (eau salée).....	59

## List du figure :

### CHAPITRE I :

Figure 1.1 : Diagramme de phases d'acier au carbone [2].....2

### CHAPITRE II :

Figure II.1 : Cycle traitement thermique [9].....9

Figure II.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [1].....10

Figure II. 3 : Délimitation des conditions de refroidissement .....11  
permettant de réaliser une Trempe martensitique ou bainito-martensitique [11].

Figure II.4: Début de la transformation perlitique d'un acier eutectoïde,..... 15  
la croissance lamellaire à partir des germes et la formation simultanée de ferrite et de carbure [20].

Figure II.5 : transformation perlitique après la décomposition complète [20].....15

Figure II.6: structure martensitique d'acier à 0,32 % C - 4,12 % Ni - 1,37 % C  
traitement : 850° C (30 min) – eau Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900 [21].....16

Figure II.7: Structure cristalline de la martensite a) réseau cristallin, b) équidistance de  
la martensite et de l'austénite en (fonction de la teneur en carbone) [24].....17

Figure II. 8(a-b-c-d):Dépôts de chrome dur et épais obtenus à partir de chrome  
hexavalent : mise en évidence des fissurations [33].....(28-29)

### Chapitre III

Figure. III.1 : four électrique utilisé.....33

Figure III.2 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell  
C.....35

Figure III.3 Les échantillons avant trempe.....36

Figure III.4 Les échantillons traiter a 800°C et 180PCde revenu.....36

Figure III.5 D'uromètre digital AFFRI.....38

Figure III.6 : Schéma des éprouvettes de traction normalise.....39

Figure III.8 : Eprouvettes cylindriques de traction avant et après la trempe.....41

Figure III.9 machine d'essai hydraulique universel de traction.....41

<b>Figure III.10 : Schéma des éprouvettes entaille U et V de résilience normalise.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.11: Eprouvettes à entaille U de résilience.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.12 machine d'essai de choc semi-auto.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure .III.13 . Instruments de polissage mécanique.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure III.14 microscope optiques (OLYMPUS- BXSAM).....</b>	<b>46</b>
<b>Figure III.15 Les échantillons chromés.....</b>	<b>49</b>

## **CHAPITRE IV**

<b>Figure .IV.1 .L'observation microscopique de l'acier (état brut×500).....</b>	<b>51</b>
<b>Figure .IV.2 .L'observation microscopique après trempe à l'eau×500.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV.3 L'observation microscopique après trempe à huile×500.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure. IV.4 Les variations de la dureté en fonction des millions de refroidissement...54</b>	
<b>Figure VI.5 l'évolution des valeurs moyennes de la résilience.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure VI.6 L'épaisseur de la couche pour <math>75a=0.05\text{mm}</math>.....</b>	<b>57</b>
<b>FigureVI .7 L'épaisseur de la couche pour <math>75a=0.02\text{mm}</math>.....</b>	<b>58</b>

# Introduction générale

La protection contre la corrosion des matériaux et des structures repose sur la réalisation des traitements de surface. Par ailleurs, le traitement le plus couramment employé est le revêtement du chromage. C'est un traitement de surface qui conduit à la formation d'une couche de chrome sur le substrat.

Les conditions opératoires (nature et concentration de l'électrolyte, température, densité de courant appliquée, etc.)

Déterminent les propriétés intrinsèques du revêtement : épaisseur, porosité, l'adhérence, etc. Outre la protection contre la corrosion, le traitement de chromage confère à la pièce traitée diverses fonctionnalités : résistance à l'usure, aspect, etc.

La détermination expérimentale des caractéristiques mécaniques des aciers alliés chromés, implique la maîtrise des relations structure-propriétés, et une connaissance minimale en mécanique des structures.

L'objectif de ce travail, consiste à évaluer le comportement mécanique des aciers faiblement alliés (XC-100) chromés et de mener une analyse des résultats expérimentaux pour deux types d'éprouvettes :

Eprouvettes avant chromage  Eprouvettes après chromage.

La méthode utilisée consiste à réaliser une série d'essais mécaniques (traction, dureté, résilience...), ensuite on mène une comparaison des résultats expérimentaux obtenus.

La première partie est consacrée à la recherche bibliographique, elle est composée de deux chapitres :

- Chapitre 1 : Généralité sur les aciers.
- Chapitre 2 : traitement thermique et traitement de surface.

La deuxième partie, concerne l'expérimentation (essai de traction et dureté, résilience ...), elle est composée de deux chapitres :

- Chapitre 3 : matériaux et méthode expérimentale
- Chapitre 4 : Résultats et discussion

# CHAPITRE I : généralité sur les aciers

## 1 Introduction:

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés de l'acier. Il existe d'autres alliages à base de fer qui ne sont pas des aciers, comme les fontes et les ferroalliages.

L'acier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux.

Pour résister à ces sollicitations, des éléments chimiques peuvent être ajoutés à sa composition en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

## 2 Définition d'acier :

On appelle acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de cette définition, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.

# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

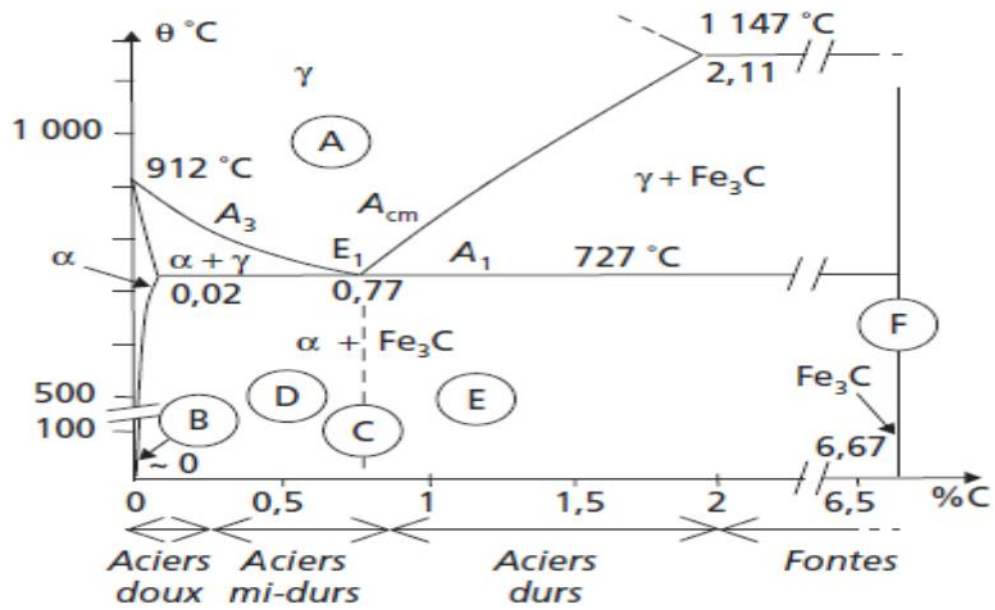


Figure 1.1 : Diagramme de phases d'acier au pourcentage du carbone

# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

## 3 Classification des aciers

On classe quelques-uns des aciers les plus courants constituants des phases selon leur concentration en carbone :

A	Austénite Solution solide cfc de carbone dans le fer $\gamma$ . Ductile. Stable uniquement au-dessus de la ligne A1 dans les aciers non alliés.
B	Ferrite Solution solide cc de carbone dans le fer $\alpha$ . Ductile et peu dure ( $Re \approx 300$ MPA, $HV \approx 80$ , $A \approx 50$ %).
C	Perlite Mélange eutectoïde d'environ 88 % de ferrite et 12 % de cémentite sous forme de fines lamelles alternées ( $Re \approx 800$ MPA, $HV \approx 200$ , $A \approx 10$ %).
D	Cémentite Composé défini $Fe_3C$ . Carbure de fer à structure cristalline orthorhombique. Très dur et fragile ( $HV \approx 700$ , $A \approx 0$ %).
E	Ferrite + perlite Mélange caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone. Les grains de ferrite germent le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\alpha + \gamma$ .
F	Perlite + cémentite : Mélange caractéristique des aciers hypereutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone, mais n'excédant jamais 20 % de cémentite dans les aciers. Le réseau de cémentite se forme le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\gamma + Fe_3C$ .

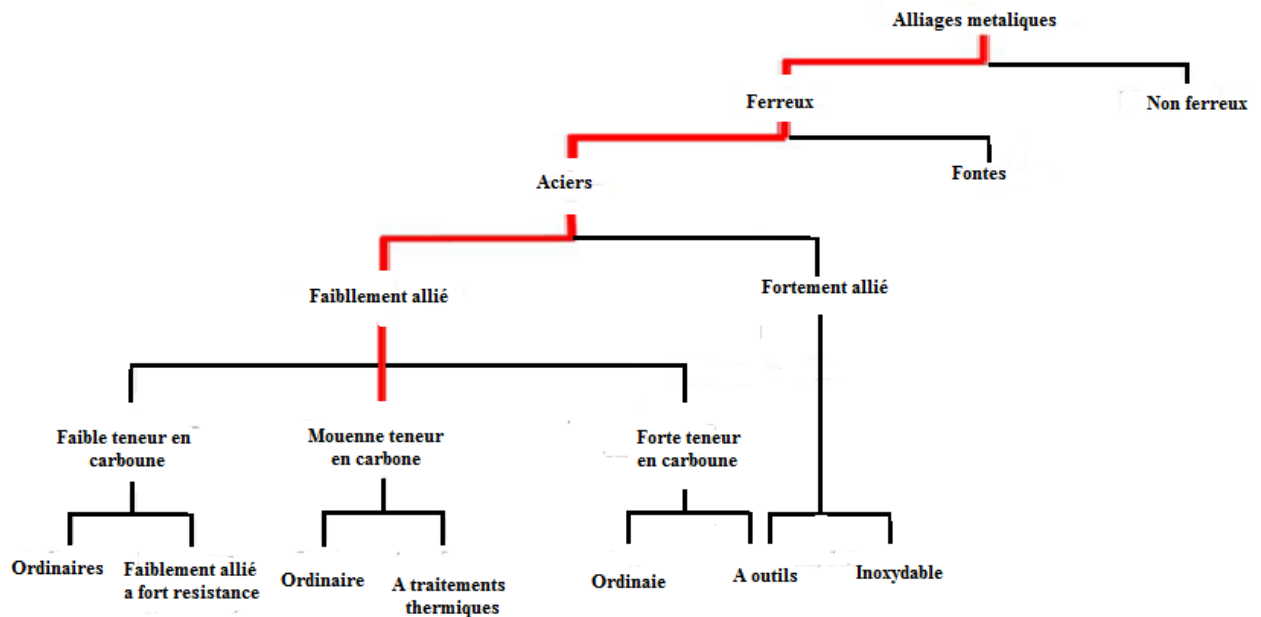
Tableau I.1 Constituants métallographiques d'équilibre

savoir les aciers à faible teneur en carbone. Chaque groupe se subdivise en sous-groupes selon la concentration des autres éléments d'alliage. Les aciers au carbone ordinaires ne contiennent que des concentrations résiduelles en impuretés autres que le carbone et un peu de



# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

manganèse. Quant aux aciers alliés, on leur ajoute davantage d'éléments d'alliage en concentration précises [3].



## 4 Différentes classifications

Les aciers sont groupés d'après leur composition chimique en trois classes :

1. aciers non alliés,
2. aciers faiblement alliés,
3. aciers fortement alliés.

### 4.1 Aciers non alliés

Ils forment presque 70% des aciers dans l'industrie, sont caractérisés par une faible teneur en carbone. Désignés par une lettre (S, E) représentant la classe (S : acier d'usage général de base (construction de bâtiment) ; E : utilisé dans la construction mécanique.), suivie de la limite élastique à la traction en MPa ou N/mm<sup>2</sup> et d'indications complémentaires (S : soudable ; M : moulable, s'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G [4].

### 4.2 Les aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dans lesquels aucun des éléments alliés n'a une teneur à 5% ces aciers sont désignés par :

- Les nombres égaux aux teneurs moyens en carbone en centièmes pour cent (100fois la teneur en %)

# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

- Une série de symboles normalisés correspondant aux éléments alliés rangés par teneurs décroissantes, ne sont énumérés que les éléments nécessaires pour éviter toute ambiguïté.

- Un(ou deux) nombres indiquant la teneur des éléments principaux est obtenus en multipliant la teneur en % :

- Par 4 pour Cr, Co, Mn, Ni et Si.

- Par 10 pour tous les autres (à l'exception de B et N à multiplier par 1000 et 100) [5]

## 4.3 Les aciers fortement alliés

Ce sont des aciers dans lesquels un au moins des éléments d'alliage a une teneur supérieure à 5%.il sont désignés par :

- La lettre Z

- La teneur moyenne en C exprimés en centièmes pourcent.

- La série des symboles normalisés des éléments alliés rangés par teneurs décroissantes

- Les teneurs pour cent d'une partie des éléments rangées dans le même ordre et sans coefficient multiplicateur. [5]

## 5 Aciers spéciaux non alliés de type C

Destinés aux traitements thermiques ((trempe et revenu, trempe superficielle, cémentation...). Le traitement thermique donne à ces aciers des propriétés d'emploi très performantes. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées. Désignation : Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus des indications complémentaires [4].

### 5.1 Aciers spéciaux

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

### 5.2 Aciers spéciaux non alliés

Font partie de cette catégorie :

– des aciers à teneur faible en inclusions ;

– des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit ;

# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

- des aciers dont la résilience KV en long à  $-50\text{ °C}$  est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers ;
- des aciers pour réacteurs nucléaires avec  $\text{Cu} \leq 0,10\%$ ,  $\text{Co} \leq 0,05\%$  et  $\text{V} \leq 0,05\%$  ;
- des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 % ;
- des aciers pour armature de précontrainte du béton.

## 5.3 Aciers spéciaux alliés

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie :

- les aciers de construction mécanique;
- certains aciers soudable à grains fins pour appareils à pression;
- certains aciers résistant au fluage;
- les aciers pour roulement;
- les aciers à outils et les aciers à coupe rapide;
- des aciers à propriétés physiques spéciales. [6]

## 6 Aciers inoxydables

- aciers alliés contenant une teneur en chrome suffisante ( $\% \text{Cr} > 10,5\%$ ) pour passiver la surface de la pièce par formation d'une couche de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , et une faible teneur en carbone ( $\% \text{C} < 1,2\%$ ) pour éviter la précipitation des carbures de chrome;

- phases dépendant des pourcentages relatifs en éléments alphagènes ou gammagènes et des conditions de refroidissement.[2]

Influence spécifique des éléments d'addition

- **Carbone(c)**

Après refroidissement lent, la structure d'un acier comporte deux phases : ferrite et cémentite.

La quantité de la cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone

# CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ACIERS

Les particules dures et fragiles de la cémentite augmentent la résistance aux déplacements des dislocations, c'est-à-dire la résistance à la déformation tout en dégradant la plasticité et la ductilité.

Il en résulte que l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone accroît, la charge de rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience.

- ***Manganèse(Mn)***

Le manganèse renforce sensiblement la résistance sans diminuer pratiquement la plasticité c'est-à-dire la fragilité aux températures élevées dues à la présence du soufre

- ***Silicium (Si)***

Le silicium de la solution solide (ferrite) resté après la désoxydation augmente fortement la limite élastique, ce qui altère l'aptitude de l'acier à l'emboutissage et surtout au refoulement à froid

- ***Phosphore(p)***

le phosphore est soluble dans le fer  $\alpha$  et fer  $\delta$ , et si sa teneur est assez grande, il forme du phosphore de fer  $Fe_3P$  qui contient 15,62% de phosphore.

Soluble dans la ferrite, le phosphore perturbe fortement son réseau cristallin et augmente la limite d'élasticité et la charge de rupture mais diminue considérablement la plasticité et la ductilité.

- ***Soufre(s)***

Les inclusions de soufre altèrent nettement les propriétés mécaniques et surtout la ductilité et la plasticité ainsi que la limite de fatigue.

Les impuretés dégradent encore la soudabilité et la tenue à la corrosion.[5][6][7]

# CHAPITRE II : traitement thermique et traitement de surface



## 1. Introduction

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A\%$  en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie

## 2. Traitements thermiques des aciers

Le procédé de traitement thermique d'un acier consiste à lui faire subir une variation de la température en fonction du temps. Il se compose d'un certain nombre d'opérations de chauffage et de refroidissement. Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux (résistance à la rupture, augmentation de la limite d'élasticité, dureté) pour une meilleure adaptation aux conditions en service. Cette amélioration vient des modifications structurales de la structure : meilleure homogénéisation, amélioration de la taille des grains (il permet de régénérer, par exemple, un métal ayant subi le forgeage et qui présente un grain trop grossier en affinant les grains). Il permet également de réduire les contraintes internes des matériaux, générées de par son histoire, qui peuvent être néfastes pour la pièce. [8]

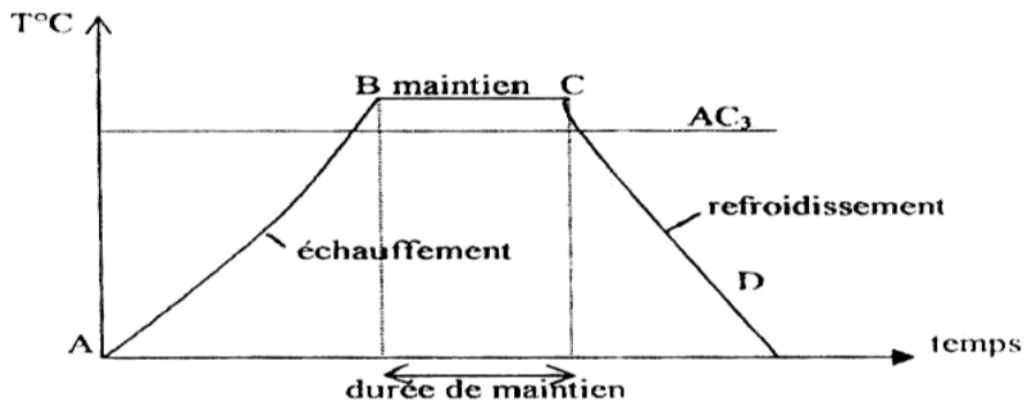


Figure II.1 : Cycle traitement thermique [9]

### 3. Durcissement par trempe

La trempe consiste à refroidir rapidement un acier austénitisé dans le but de le durcir en formant de la martensite.

#### 3.1 Austénitisation

L'austénitisation est la phase de traitement thermique pendant laquelle la structure des aciers à outils est transformée en austénite. Les propriétés physiques et mécaniques dépendent de la vitesse de chauffage, de la température de maintien et du temps de maintien. La première étape du durcissement correspond à l'austénitisation caractérisée par une structure biphasée contenant l'austénite et des carbures non dissous. Plus la température d'austénitisation est élevée, plus la vitesse de dissolution des carbures est grande.

Les carbures dissous enrichissent la structure austénitique en carbone et en éléments d'alliages. Lors de la trempe ces carbures peuvent précipiter au niveau des joints des grains réduisant ainsi la résistance de l'acier. Généralement, une température d'austénitisation égale à 1050 °C donne lieu à une meilleure dissolution des carbures primaires présents à l'état recuit, notamment celle des carbures de vanadium. [10]

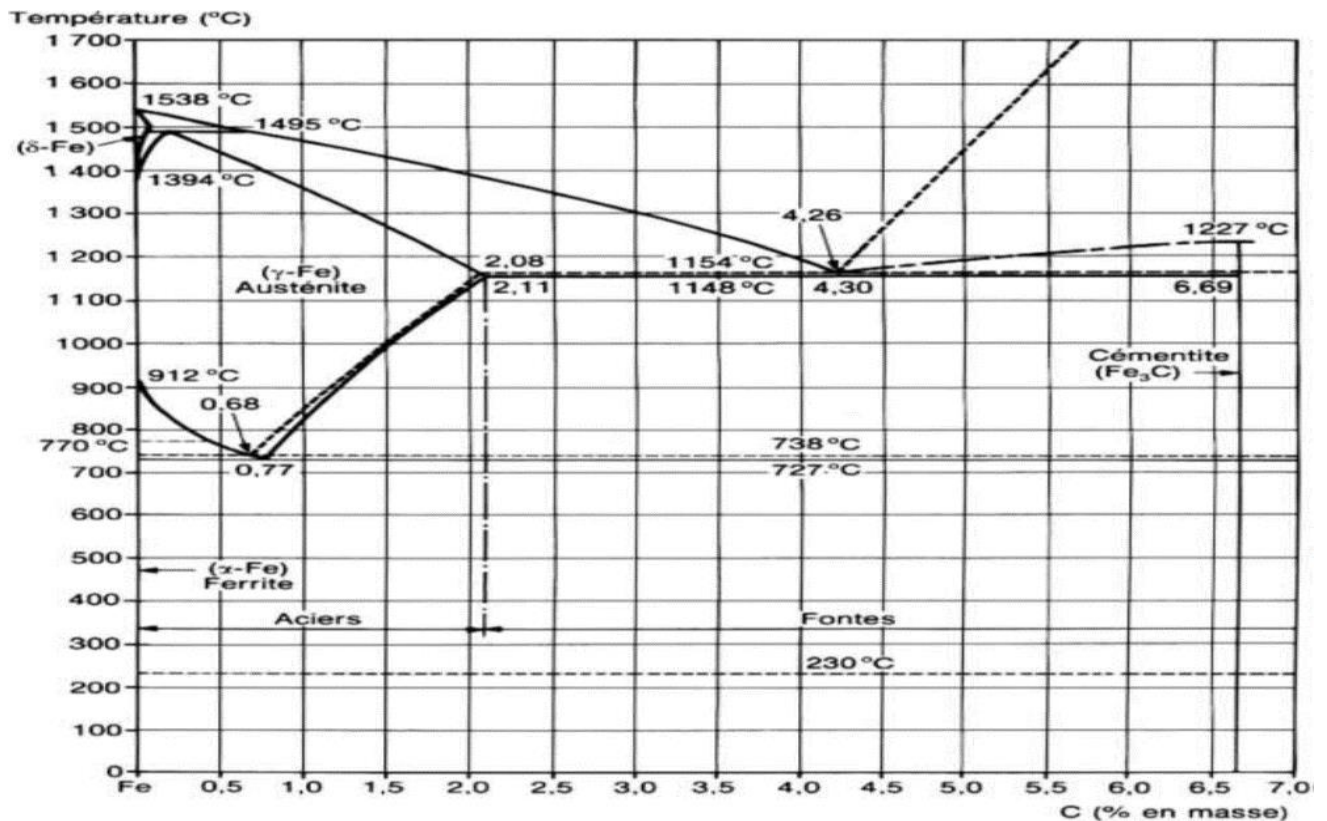


Figure II.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [1].



Le refroidissement doit être suffisamment rapide afin d'éviter la transformation de l'austénite en ferrite, perlite et bainite et d'obtenir plutôt une transformation martensitique [4].

Lors de la trempe, le coeur des outils (pièces) subit des vitesses de refroidissement plus lentes que celles de la surface. Ces vitesses sont assez lentes pour produire la structure non martensitique (perlite et bainite) au centre des pièces. Le diagramme TRC de l'acier permet de définir, pour la procédure d'austénitisation correspondante, les conditions de refroidissement qui provoquent la transformation de l'austénite en martensite (ou éventuellement en martensite + Bainite).

La formation des carbures MC et/ou M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> au cours de la trempe peut jouer un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à l'usure en augmentant la dureté de la surface, cependant les carbures de type M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> sont moins résistants et tendent à diminuer la résistance au fluage des aciers à outils [11].

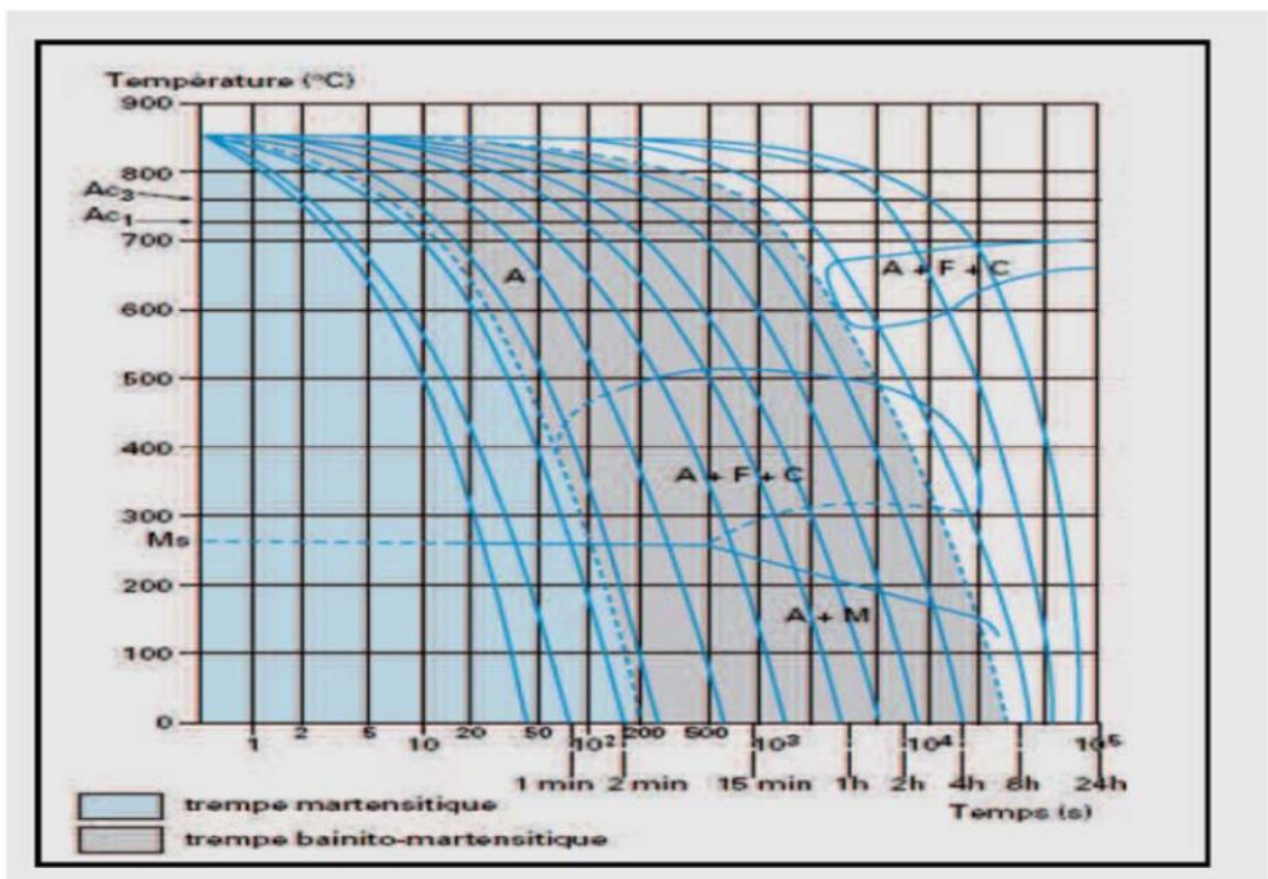


Figure II. 3 : Délimitation des conditions de refroidissement permettant de réaliser une Trempe martensitique ou bainito-martensitique [11].

### 3.2 Milieu de trempe

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

- **Gazeux** : air, gaz (N<sub>2</sub>, Ar, H<sub>2</sub>, He, etc.);
- **Liquide** : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant);
- **Mixte** : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent).

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

- Des propriétés thermiques du métal ;
- De la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.) ;
- De la position du point considéré dans la section de la pièce ;
- des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment) ;
- De la température du milieu de trempe [12].

### 3.3 Le revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement.

Le revenu est pratiqué après trempe pour supprimer les tensions internes qui ont pris naissance au moment de refroidissement brutal et diminuer la fragilité du métal (augmentation de la résilience K). Il a l'inconvénient d'atténuer R<sub>m</sub> et H.

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- . Chauffage entre 300 °C et 600 °C selon les résultats souhaités et le pourcentage de carbone.
- . Maintien en température (la durée est aussi en fonction du volume de la pièce à traiter).
- . Refroidissement lent (à l'air) [13].

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la

température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. [14]

### **3.4 Le 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).[ 15]

## **4.les transformations de phases à l'état solide des aciers :**

### **4.1 la transformation de l'austénite :**

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

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

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

La décomposition de l'austénite ne commence pas instantanément lorsque la température atteint celle qui, au bout d'un temps de maintien suffisant, entraîne sa décomposition isotherme [16].

#### **4.2. Transformation perlitique :**

Au cours d'un refroidissement lent, à la vitesse de 2 à 3 °C / mn, l'austénite se transforme en ferrite et en carbure lamellaire [17].

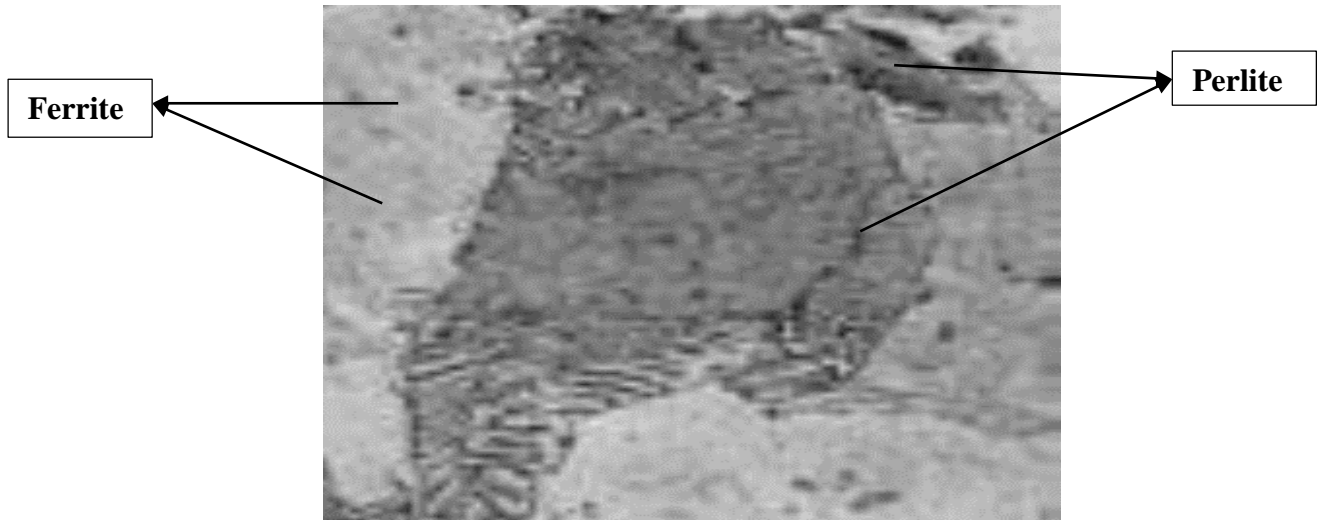
A haute température, l'austénite homogène présente une distribution embryonnaire caractéristique. Le franchissement de la température de transformation entraîne une évolution de cette distribution pendant laquelle on n'observe aucune transformation [18], le temps nécessaire pour atteindre ce nouvel état est appelé temps d'incubation.

A ce température l'énergie motrice de la transformation est négligeable est il s'ensuit une faible vitesse de réaction que l'on observe après temps d'incubation important. c'est-à-dire vers 500°C, l'énergie motrice de la transformation devient très importante, mais l'abaissement de la température ralentit considérablement, la vitesse de diffusion du carbone qui apparaît Comme le facteur contrôlant la transformation et expliquant l'importance du temps d'incubation.

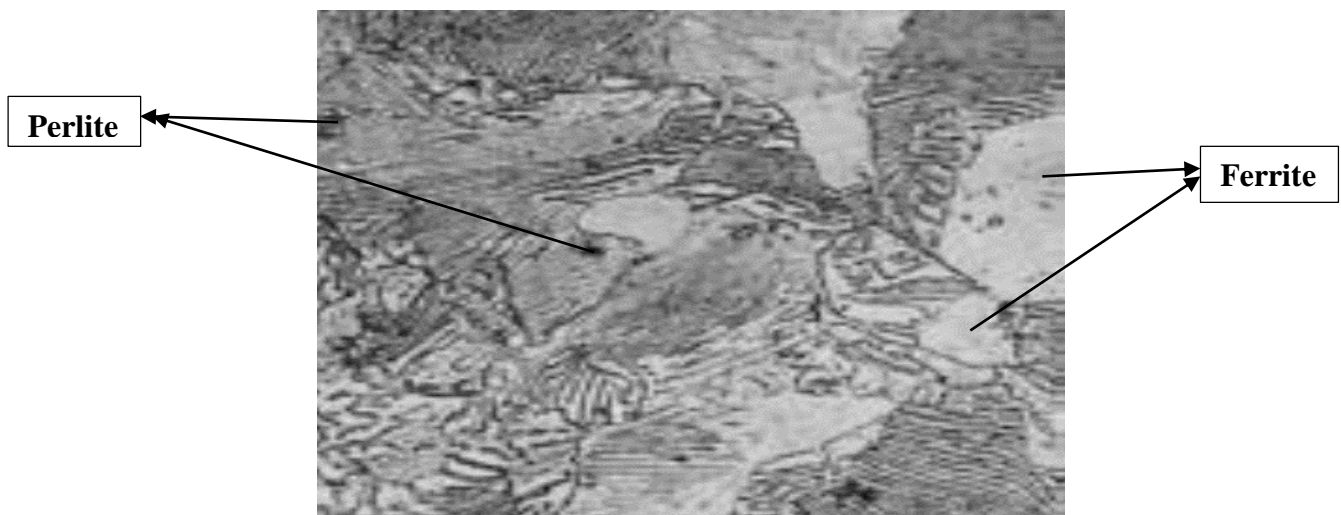
Vers 600 °C, l'énergie motrice et la vitesse de diffusion ont des valeurs telles que la formation de la perlite se manifeste après un très court temps d'incubation.

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

La perlite apparaît sous forme de colonies ou l'agrégat ferrite –cémentite progresse, sans relation d'orientation cristallographique avec le grain d'austénite mère [19].



**Figure II.4: Début de la transformation perlitique d'un acier eutectoïde, la croissance lamellaire à partir des germes et la formation simultanée de ferrite et de carbure [20].**



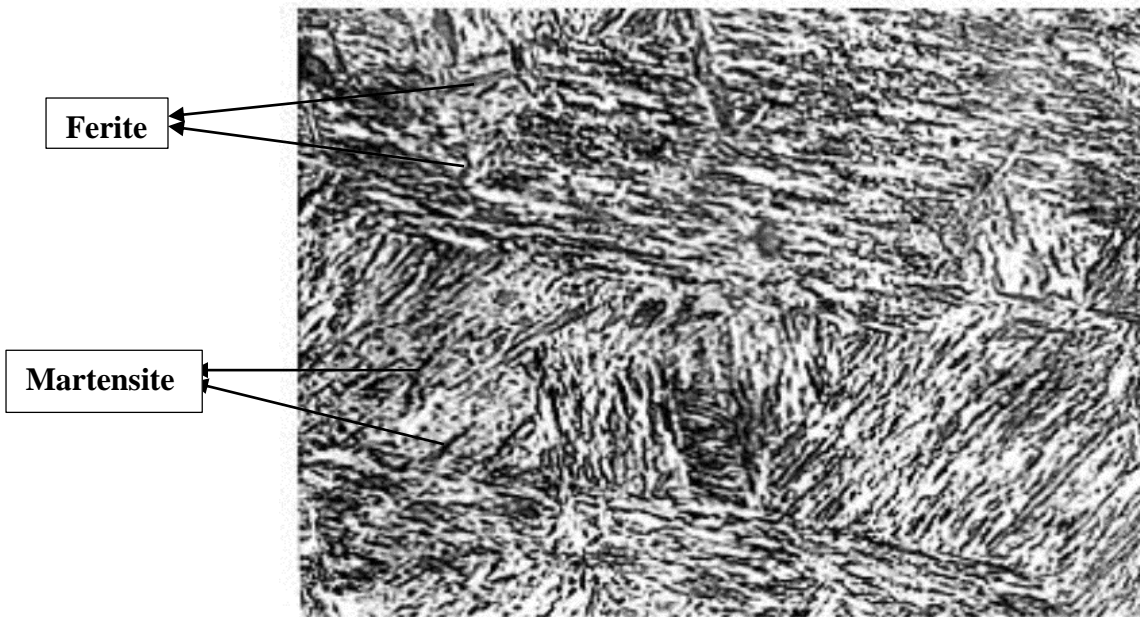
**Figure II.5 : transformation perlitique après la décomposition complète [20].**

#### 4.3. Transformation martensitique :

- La martensite  $\alpha'$  (M) :

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite. La martensite possède une grande dureté (HV = 700 à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. [6]



**Figure II.6: structure martensitique d'acier à 0,32 % C - 4,12 % Ni - 1,37 % C traitement : 850° C (30 min) – eau Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900 [21]**

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

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

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

Les paramètres  $a$  et  $c$  de la maille quadratique de martensite dépendent de la teneur en carbone de l'acier D'une manière générale, la martensite présente plusieurs morphologies selon cette teneur en carbone [25]. A faible teneur ( $c < 0.6 \%$ ), on observe une martensite aciculaire fortement maclée [23]

Le changement de forme, engendré par le cisaillement du volume initial d'austénite se traduit par un gonflement volumique qui donne naissance à des contraintes internes considérables. Ces contraintes, d'autant plus importantes que le carbone est abondant, confèrent à l'acier une forte dureté, mais aussi une grande fragilité que l'on peut atténuer par un traitement thermique ultérieur appelé « Revenu ». [24].

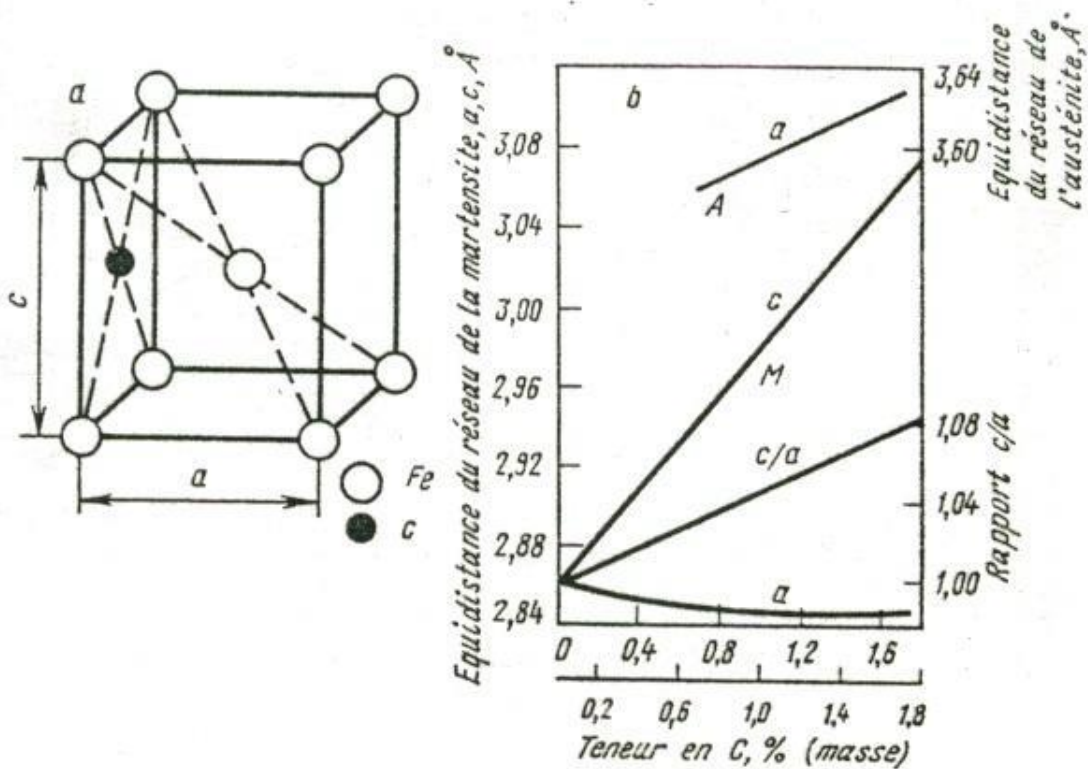


Figure II.7: Structure cristalline de la martensite a) réseau cristallin, b) écart de distance de la martensite et de l'austénite en fonction de la teneur en carbone [24]

## 5. Traitement de surface

### 5.1. Présentation

Le traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique appliquée sur un matériau en vue de lui conférer des propriétés de surface spécifiques. Ainsi, sont regroupées sous la dénomination « traitement de surface », toutes les activités de modification et de transformation de la surface d'un objet. [25]

### 5.2. Objectifs Traitement de surface

Les objectifs d'un traitement de surface sont d'apporter à l'objet traité des propriétés nouvelles telles que :

- Amélioration de la résistance à la corrosion (45%),
- Protection contre l'usure des pièces (dans les zones de frottement) (24%),
- Modification de l'aspect de l'objet, (rugosité, couleur, brillance ...) (11%),
- Modification de la conductibilité électrique ou thermique (8%),
- Autres caractéristiques diverses (modification des caractéristiques de glissement, des Caractéristiques optiques, amélioration de la tenue en fatigue, soudabilité...) (12%). [25]

### **5.3.Types de traitement de surface.**

#### **5.3.1.Traitement mécanique et thermique de surface :**

Ces traitements ont pour objet, soit de préparer la surface pour un traitement postérieur, soit de lui conférer des propriétés mécaniques mieux adaptées que le volume du matériau.

L'écrouissage crée dans les zones les plus superficielles une consolidation du matériau, dont la surface est portée en général dans un état de compression : celle-ci présente en principe une plus grande dureté et une plus grande résistance à la fissuration. Dans d'autres cas, l'écrouissage superficiel peut induire des transformations structurales. La formation de martensite de déformation à la surface des aciers austénitiques métastables, est un procédé efficace de durcissement.

Dans un grand nombre d'applications ( pièces d'usure et de frottement , outils de mise en forme ) , il est indispensable de réaliser un matériau très ductile dans sa masse et de haute dureté en surface, un simple traitement thermique peut obtenir à un durcissement superficiel suffisant : le chauffage par induction est fréquemment utilisé pour ce type d'utilisation par suite d'un effet pelliculaire que l'on peut parfaitement maîtriser en jouant sur divers paramètres électriques , géométriques ou métallurgiques.[26]

#### **5.3.2Traitements électrolytiques et chimiques :**

Ces traitements concernent non seulement des applications pour résister aux frottements et à l'usure, mais également le domaine de résistance à la corrosion et de la protection contre la corrosion.

Les dépôts par électrolyse sont utilisés en raison de leur grande souplesse car on dispose d'une grande variété de paramètres pour modifier la structure et l'épaisseur des revêtements (composition des bains, densités de courant, tension, temps de dépôts).



En, dehors des métaux précieux, de nombreux revêtements métalliques sont effectués par voie électrolytique : Cu , Ni, Zn, Cr, Sn,... .

Vue la variété des procédés, Une énumération des bains électrolytiques et des conditions de dépôts serait fastidieuse et nécessairement incomplète.

### **5.3.3 Traitements par diffusion :**

Ces traitements font appels à des réactions du type gaz- métal, liquide- métal ou encore solide-solide. Nous distinguerons, les cas d'applications suivants :

- **La carburation (cémentation) :**

La carburation superficielle des aciers, appelée (cémentation) .s'effectue en phase  $\gamma$ .

Le procédé le plus ancien consistait à mettre en contact l'acier avec du graphite ou un carbonate.

Plus récemment des procédés de cémentation en atmosphère contrôlée, ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) se sont développés.

La décomposition des hydrocarbures présents à la surface du métal fourni le carbone recherché.

Après traitement de cémentation, l'acier est trempé, ce qui transforme la couche cémentée en martensite de haute résistance mécanique. Les traitements de carburation en phase gazeuses ont été récemment appliqués pour la protection par une couche de carbure, protectrice et très dure pour les métaux réfractaires oxydables.

Donc, on a pour but de faire absorber, superficiellement du carbone par l'acier doux de façon à constituer un alliage hétérogène ayant à la surface une teneur en carbone.[26]

- **La nitruration**

La nitruration est une diffusion d'azote atomique N à la surface des pièces préalablement traitées par trempe et revenu (N et C pour nitrocarburation).

L'insertion de N (ou N et C pour le traitement de nitrocarburation) et la formation de nitrures avec les éléments d'alliage de l'acier, provoquent un durcissement de surface apportant les propriétés recherchées (dureté 750 à 1100V).

Différents procédés de nitruration sont proposés : ionique, bains de sels, basse pression, gazeux.

La nitruration gazeuse contrôlée, (objet de la présente fiche) est réalisée en four à convection forcée à une pression voisine de la pression atmosphérique, d'un mélange ou gaz actif.

Les espèces actives N (ou N et C) sont nées par craquage de  $\text{NH}_3$  (ou  $\text{NH}_3$  et gaz carburant) à la température de traitement (500 à 570°C). [27]

- **La carbonitruration :**

Il s'agit d'un traitement mixte qui s'effectue par adjonction d'ammoniac à l'atmosphère de cémentation. Le phénomène principal est la carburation, associée à la Nitruration qui intervient pour provoquer un durcissement, ainsi on obtient un complément de protection contre l'usure et la corrosion [26]

- **La chromisation :**

Ce procédé de métallisation est la mise en contact du métal avec une atmosphère d'iodure ou de fluorure de chrome. Celle-ci est régénérée par réaction de l'halogène sur du chrome métallique disposé en granules. Le domaine de travail en température est de l'ordre de (850° à 1100°C).

Dans le cas du fer ou d'un acier doux, il se forme une couche de ferrite chargée en chrome de 10 à 100 microns. Compte tenu des faibles vitesses de diffusion du chrome dans l'austénite, presque tout le chrome reste fixé dans cette couche qui, a pour caractéristique d'être inoxydable, ductile et brillante.[26]

## **6.Chrome**

### **6.1.Definition Chrome**

Le chrome est un élément chimique, métallique, de symbole Cr, de numéro atomique 24 et de masse atomique 51,996 u.m.a, il appartient au groupe 6 (ou VI b) du tableau périodique. Cet élément est un métal de transition, dur et d'une couleur gris acier-argenté. Il résiste à la corrosion et au ternissement. Il est souvent en substitution du fer (rayons ioniques très proches  $\text{Fe (III)} = 0,067 \text{ nm}$ ,  $\text{Cr (III)} = 0,061 \text{ nm}$ ,  $\text{Cr (VI)} = 0,044 \text{ nm}$ . Les traces de chrome présentes dans ces minéraux sont souvent responsables de leurs couleurs : le vert de l'émeraude ou le rouge du rubis (Alloway, 1995).[28]

		Propriétés du chrome	
Propriétés générales	Nom, Symbole, Numéro	Chrome, Cr, 24	
	Série chimique	Métal de transition	
	Groupe, Période, Bloc	6, 4, d	
	Masse volumique	7140 kg/m <sup>3</sup>	
Propriétés atomiques	Masse atomique	51,9961 u	
	Rayon atomique (calc)	140 (166) pm	
	Configuration électronique	[Ar] 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	
Propriétés physiques	Température de fusion	2130 °K	
	Température de vaporisation	2945 °K	
	Densité	7.19g.cm <sup>-3</sup> (293 °K)	
	Résistivité électrique	12,9 μΩcm	
	Conductibilité thermique	93,7 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	

**Tableau (II.1) : Propriétés du matériau chrome [29].**

## 6.2. Structure cristalline du chrome :

Le chrome est un métal blanc grisâtre susceptible d'acquies un beau poli. Sa structure cristalline est cubique centré, (arête 2.8 angströms). Le chrome fond à très haute température (1800° C). Le coefficient de dilatation linéaire du chrome est :  $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ .

A l'état de dépôt électrolytique normal, la dureté de chrome est très élevée, de l'ordre de 1000 HV, ce qui correspond à environ 70 HRC, et par extrapolation à 800 HB. Sous l'influence de traitements thermiques à partir de 400° C la dureté des dépôts de chrome, quel que soit le mode opératoire avec lequel ils ont été obtenus, décroît jusqu'à atteindre 200 HV environ pour un traitement thermique à 1200° C [20].

## 6.3. Structures et propriétés des carbures de chrome :

### 6.3.1. Préparation des carbures de chrome :

Les carbures de Cr ont été observés depuis 1893, quand MOISSAN [26] a préparé Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> et "Cr<sub>4</sub>C" dans un four électrique. Les carbures de chrome peuvent être produits par l'échauffement d'un mélange de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et le carbone dans une atmosphère d'hydrogène. Au-

dessous de 1600°C [22]. Des couches du chrome carbonyle. Le métal peut réagir avec le méthane à 600-800°C [30].

### **6.3.2. Propriétés des carbures de chrome :**

L'évaluation des possibilités d'utilisation des divers matériaux dans les états variables auxquels ils peuvent être amenés par des traitements se fait en déterminant un certain nombre de grandeurs relatives aux diverses propriétés du métal. Les plus courantes, sinon les plus importantes, se rattachent, d'une part, à la résistance, c'est-à-dire à la résistance opposée aux déformations, d'autre part, à la ductilité, c'est-à-dire à la capacité de se déformer sans se rompre. Ces deux qualités étant dans une certaine dépendance.

- **Dureté :**

Parmi les grandeurs les plus couramment déterminées, nous citons d'abord la dureté, qui s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. La dureté du carbure de chrome varie selon la qualité du chrome déposé, par électrolyse par exemple, la valeur est de (1500-1800) HV.

- **Usure :**

L'usure est provoquée par un enlèvement de matière d'une surface en contact et en mouvement relatif avec une autre surface. La composition, la microstructure, la topographie de la surface, la présence ou l'absence de lubrifiant ou d'autres médias, la charge, la vitesse de Contact, et la température, sont des facteurs déterminant taux d'usure. Le carbure de chrome a une résistance excellente de l'usure adhésive, l'usure abrasive et l'usure érosive. En général, la durée de vie moyenne des pièces revêtues en carbure de chrome est multipliée par 5 à 10 fois. Les couches de protection contre l'usure obtenues conviennent particulièrement pour des applications à hautes températures et elles ont parfaitement fait leurs preuves dans l'industrie chimique ainsi que dans l'aviation.

- **Frottement :**

Le carbure de chrome possède un très faible coefficient de frottement, qui en fait un très bon matériau pour les frottements dans les usages industriels et notamment les frottements à sec. Le carbure de chrome maintient la résistance à l'usure par frottement à des températures allant jusqu'à 482 °C.

- **Résistance à la corrosion :**

La résistance à la corrosion des carbures de chrome est en général très bonne. Son pouvoir de protection contre la corrosion est considérablement amélioré par une sous-couche de nickel. Pratiquement les carbures de chrome se distinguent par leur très haute stabilité chimique et thermique. Ils résistent à tous les agents chimiques (sauf l'acide chlorhydrique), même à une haute température. Ils sont inoxydables jusqu'à 800 °C [31-32].

## **7.Chromage**

### **7.1.Définition Chromage**

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique sur les surfaces à traiter pour leur conférer les propriétés de ce métal. [33]

### **7.2.Type de chromage**

Ce traitement bien connu est effectué pour deux applications importantes :

- le chromage décoratif et le chromage dur, pour lesquelles, la couche déposée ne diffère essentiellement que par son épaisseur.
- Le chromage décoratif s'effectue sur des surfaces généralement revêtues au préalable d'une couche de nickel (ou éventuellement de couches de cuivre et de nickel) et il a pour but essentiel de donner au revêtement les caractéristiques de brillance du chrome. La résistance au ternissement de ce métal, associée à sa dureté, font que cette couche décorative de l'ordre du micromètre permet de donner un aspect brillant qui peut être entretenu pendant de longues années. Les chromes brillants des automobiles d'antan (toujours visibles à l'heure actuelle) et des motos de maintenant en sont un témoignage.
- Le chromage dur se distingue du précédent par le fait que son épaisseur est plus importante (de quelques micromètres à quelques dixièmes de millimètres).

Ce revêtement procure au matériau sur lequel il est effectué un bon coefficient de frottement et lui assure de bonnes propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion. Il est très visible par exemple sur les vérins des appareillages mécaniques (appareils de levage ou engins de travaux publics...). Ce type de traitement est le revêtement privilégié dans le domaine de la mécanique pour les pièces en rotation ou en translation qui ont à résister à l'usure et à avoir de bonnes

qualités de frottement, et pour les domaines où l'adhérence pourrait être un handicap (plasturgie, cylindres de laminoir...).[33]

## **8. Polissage électrolytique**

L'électro-polissage (ou électropolissage) est un procédé de traitement de surface électrochimique par lequel le métal de la couche superficielle est enlevé par dissolution anodique

### **8.1. Principe**

La pièce à traiter est plongée dans un bain d'électrolyte acide fortement concentré, composé de deux électrodes où on applique un courant électrique. La pièce est reliée au pôle positif (anode). Le processus d'électrochimie produit une dissolution anodique de la couche superficielle, plus ou moins importante en faisant varier l'intensité du courant (continu) à travers la surface.

### **8.2. Effets**

Les surfaces traitées présentent de très faibles rugosités, une résistance accrue à la corrosion. Elles sont plus douces et plus reluisantes (surtout dans le cas de l'inox) ; d'où un entretien plus aisé.

### **8.3. Avantages**

Traitement de surfaces géométriques très complexes,

- élimination des impuretés et tensions,
- résistance à la corrosion plus élevée,
- rendu de surfaces saines empêchant l'adhésion des dépôts,
- suppression de la couche de Beilby (rugosité due aux stries d'usinage),

Inconvénients

- Prévoir une perte d'épaisseur,
- Complexité du réglage de la densité du courant, la température du bain d'électrolyte et la durée du traitement. [34]

## 9.Chromage décoratif

Le chromage décoratif se fait toujours sur une sous-couche dont la nature peut varier selon les caractéristiques que l'on recherche. Généralement, cette sous-couche est du nickel (en couche unique ou bi-couche) avec éventuellement une couche de cuivre électrolytique entre le substrat et le nickel. Le chromage de faible épaisseur est réalisé pour produire des surfaces d'un aspect aussi brillant que possible, pour en augmenter la dureté et aussi pour éviter le ternissement (par oxydation) de la couche de nickel. [33]

### 9.1.Préparation des surfaces

Le dépôt de chrome pour réaliser un chromage décoratif étant d'épaisseur très faible, va donc reproduire l'état de surface avant chromage. Il est donc essentiel que la surface avant chromage soit aussi polie que possible.

Il existe un certain nombre de combinaisons possibles pour produire la sous-couche avant chromage, elles dépendent essentiellement de la présence de cuivre ou de la nature du nickel, brillant ou duplex. Le choix de ces sous-couches est fonction principalement de l'utilisation prévue pour les pièces ainsi revêtues.

Pour ce qui concerne les dépôts de cuivre et de nickel réalisés avant chromage, le lecteur trouvera dans les articles consacrés à ces métaux, les conditions de préparation des surfaces et de déposition pour obtenir les surfaces désirées [35] [36] [37].

Dans certains cas, si la pièce nickelée est restée trop longtemps à l'air ou s'il y a eu un polissage avant chromage, on peut se trouver devant une surface de nickel passivée. Le chromage ne pourra se faire qu'après dépassivation anodique, soit en milieu acide sulfurique, soit en milieu cyanuré alcalin (10 % NaCN) ou après une mise sous tension brutale après immersion, ou encore après une légère dépassivation par l'hydrogène en maintenant la pièce en cathode à un potentiel inférieur à celui correspondant au dépôt de chrome.[33]

### 9.2.Applications

Les applications du chrome décoratif se rencontrent dans de nombreuses industries, et plus particulièrement :

- l'industrie automobile et équipements ;
- les instruments d'optique, de précision et médicaux ;
- les mobiliers métalliques ;

— les articles de sport et les appareillages domestiques.[33]

## 10.Chromage dur

### 10.1.Objectif

Ce procédé de traitement des surfaces a pour objectif d'utiliser les caractéristiques fondamentales des dépôts de chrome, à savoir :

- dureté élevée ;
- résistance à l'usure ;
- faible coefficient de frottement ;
- bonne résistance à la corrosion.[33]

### 10.2.Caractéristiques essentielles

- **La microdureté**

La microdureté est, de manière générale, de l'ordre de 1 000 HV 0,1 pour les dépôts de chrome dur. Cette microdureté est fonction d'un certain nombre de paramètres, comme on le verra par la suite, et peut varier de 800 à 1 200 HV. Pour les dépôts obtenus à partir de chrome hexavalent, cette microdureté chute notablement en fonction de la température de traitement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 300 HV 0,1 à 700 °C.[33]

- **La fissuration**

Le dépôt de chrome dur est dans la majorité des cas microfissuré : le nombre et la taille des microfissures dépendent essentiellement de la nature des catalyseurs utilisés, de l'état du substrat, ainsi que de la forme du courant utilisé pour réaliser le dépôt. La figure II ; 7 présente l'aspect du dépôt de chrome (épaisseur 70 µm) obtenu avec des solutions standards. Les photographies a et b montre l'aspect de surface en sortie de bain à différents grossissements, la c présente cette surface après polissage et légère attaque : on distingue nettement cette fissuration.

Le taux de fissuration doit être quantifié sur une coupe polie du dépôt (figure II ,7 d ). Il est déterminé par la densité linéique (nombre de fissures interceptant un segment de longueur déterminée et parallèle au substrat) : il est exprimé en nombre de fissures par unité de longueur. Ce taux de fissuration est fonction :



— de la nature du bain utilisé, en particulier, cette microfissuration est liée à la nature du catalyseur utilisé, elle est environ 10 fois plus importante pour les bains à catalyseur organique, que pour les bains catalysés avec des ions sulfates (bains standards) ;

— mais aussi à une forte dépendance vis-à-vis de la température du bain [35] .

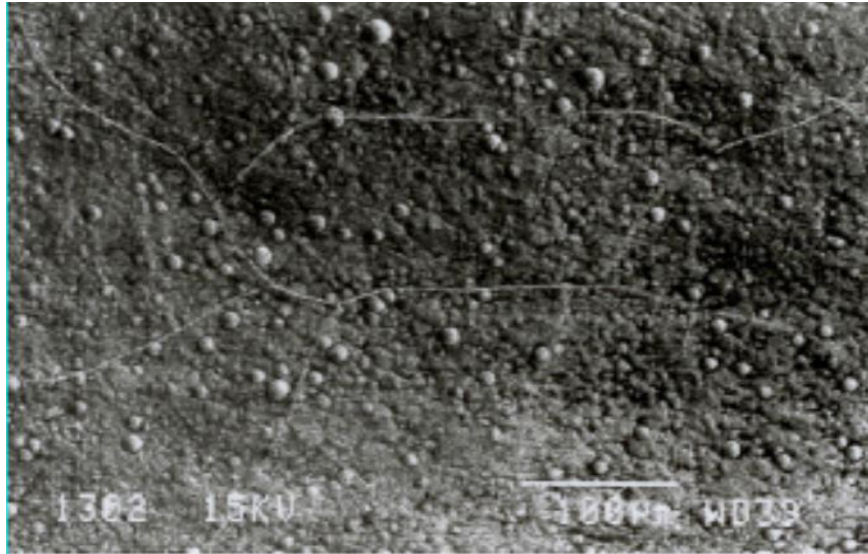
Des travaux de visualisation in situ du développement de cette fissuration ont été réalisés, permettant de montrer que le phénomène de création est discontinu. La fissuration se crée au cours de l'électrodéposition, libérant ainsi en partie les contraintes internes du dépôt, puis au niveau des bords des fissures, la densité de courant étant plus importante, le dépôt se fait plus rapidement, provoquant ainsi la fermeture de ces fissures jusqu'à ce qu'une nouvelle création vienne reproduire le phénomène. [36]

### **10.3. Les contraintes résiduelles**

Les mécanismes de formation des contraintes résiduelles sont encore mal connus mais cette formation semble liée à la présence d'hydrogène au sein du dépôt. Deux modèles ont été proposés sans, pour l'instant, avoir été vérifiés expérimentalement.

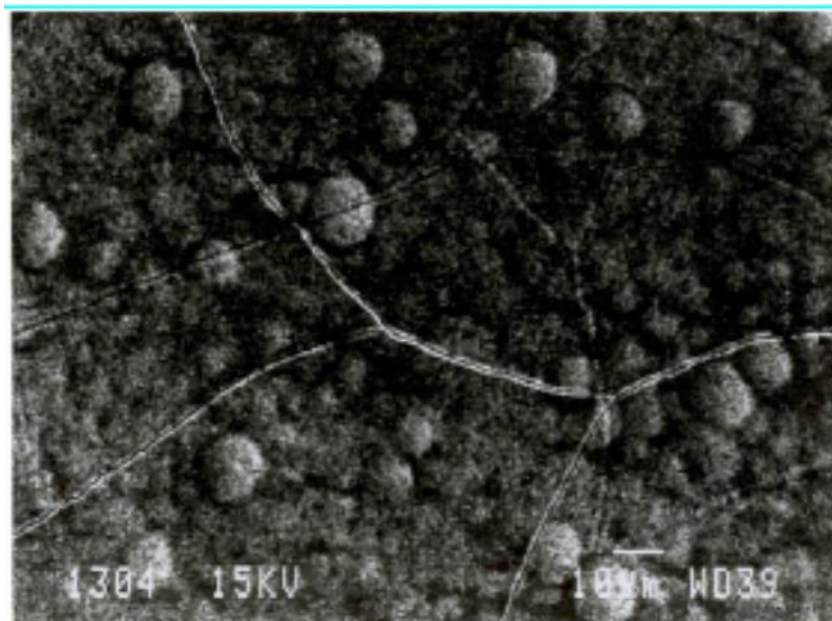
Le premier fait l'hypothèse que ces contraintes seraient liées directement à la présence d'hydrogène piégé au cours de l'électrolyse et qui diffuserait par la suite en provoquant une contraction du dépôt. Cette contraction étant bloquée par le substrat, il s'ensuivrait l'apparition de contraintes résiduelles de traction. [37]

Le second modèle proposé fait appel, au cours du dépôt, à la formation d'hydrures de chrome de structure hexagonale (possibilité due à la présence simultanée d'hydrogène atomique naissant et de chrome métallique), qui se transformeraient en chrome de structure cubique centrée de taille plus réduite que la structure hexagonale, provoquant par là des contraintes de traction.

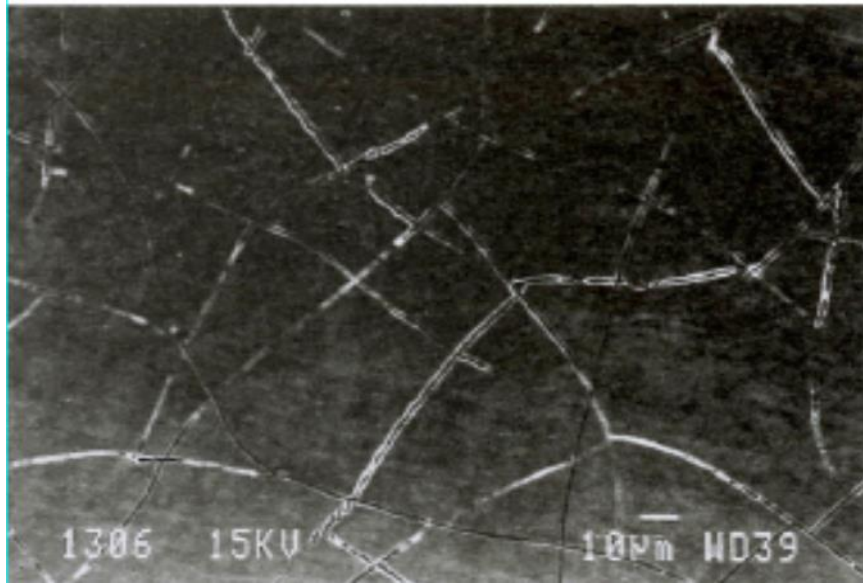


Aspect de surface en sortie du bain (fissuration apparente)

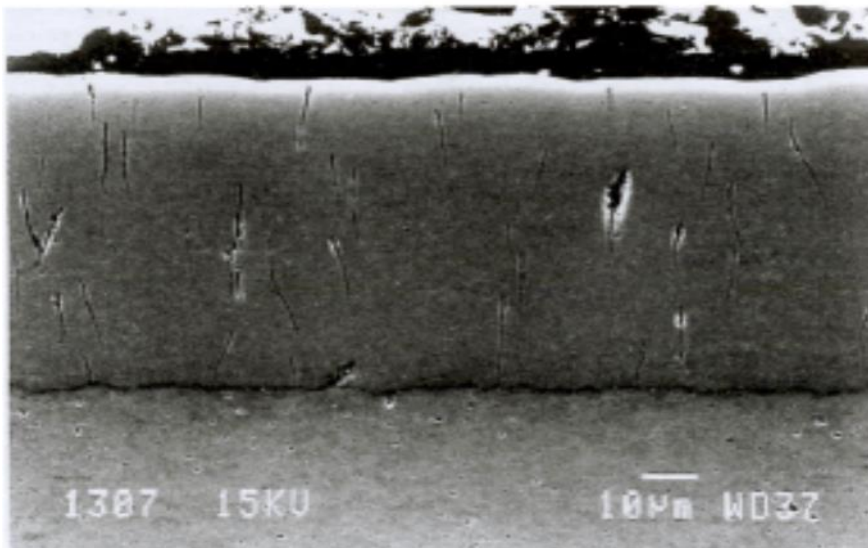
Ⓐ dépôt de chrome ( $70\ \mu\text{m}$ ) obtenu en solution de chromage standard



Ⓑ dépôt dans les mêmes conditions que Ⓐ mais à plus fort grossissement :



③ aspect de surface d'un dépôt de chrome (standard) après polissage et légère attaque



③ aspect de surface d'un dépôt de chrome (standard) après polissage et légère attaque

**Figure II. 8(a-b-c-d): Dépôts de chrome dur et épais obtenus à partir de chrome hexavalent : mise en évidence des fissurations [33]**

## 10.4. Avantages et inconvénients

La facilité de réalisation des dépôts, le faible coût d'application, comparé aux autres procédés concurrents, ainsi que le fait qu'il n'y ait pratiquement pas de modification des propriétés du substrat (il est nécessaire toutefois de prévenir la fragilisation du substrat par l'hydrogène) font que le chromage s'avère un traitement de choix dans de nombreuses applications.

Toutefois, le mauvais rendement cathodique (compris entre 10 et 25 % suivant la nature du catalyseur) ainsi que le médiocre pouvoir de pénétration et couvrant rendent délicate sa mise en oeuvre sur des pièces de formes complexes. L'utilisation pour les dépôts de chrome, de composés de chrome hexavalent, produit réputé toxique, peut rendre ce procédé polluant si les mesures de prévention ne sont pas utilisées correctement.[33]

## 11. Corrosion

### 11.1. Définition

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés, entraînée par une interaction physicochimique sous forme d'une réaction inter faciale irréversible du matériau avec son environnement [42] .

La corrosion peut également être définie comme étant un processus de dégradation ou de détérioration des propriétés d'usage que peut subir un métal ou un alliage, sous l'effet des actions chimiques, électrochimiques ou biologiques. En générale, on a affaire au retour du métal à son état original de minerai [43].

### 11.2. Classification de la corrosion

La corrosion se développe selon deux processus:

- **La corrosion sèche**

La dégradation des matériaux existe lorsque ceux-ci sont en contact avec des gaz à des températures où toute trace d'humidité a disparu. Ce phénomène joue un rôle très important dans les appareils qui fonctionnent à haute température [44].

- **La corrosion humide**

C'est la plus répandue, elle se manifeste dans le couple métal / fluide, exemple la dégradation du matériau organique et du béton [45].

### **11.3. Les différents modes de corrosion**

Il existe plusieurs modes d'agressivité parmi lesquels on distingue :

- La corrosion chimique
- La corrosion électrochimique
- La corrosion biochimique (la bio corrosion)
- La corrosion en présence d'une sollicitation mécanique [46]



**CHAPITRE III :**  
**Matériaux et techniques**  
**expérimentale**

## 1. Matériau étudié

Le matériau étudié est l'acier micro allié de norme AFNOR XC100 destinée pour la fabrication des outillages et différentes pièces mécaniques. La composition chimique (massique) de l'acier grade AFNOR XC100 est illustre dans le tableau suivant :

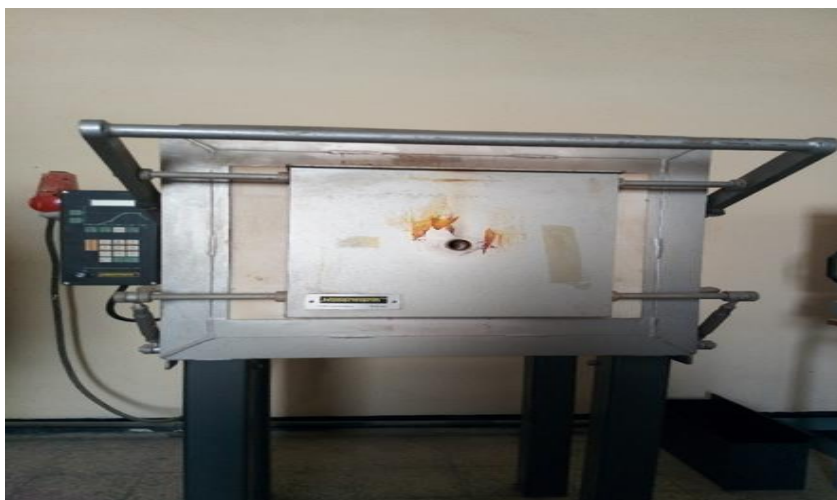
%C	Si	Mn	P	S	Sr	Cu	Ni
<b>1.04</b>	0.35	0.4	0.03	0.02	0.25	0.3	0.2

**Tableau III.1.Composition chimique de l'acier XC100 étudié**

## 2. Les caractéristiques mécaniques

### 2.1.Traitements thermiques

Pour mettre en évidence les différentes transformations de phases à l'état solide, dans notre acier, nous avons opté les traitements thermiques suivants : Une trempe à 910 °C puis de revenu à (180) °C pour un temps de maintien de 20min suivi d'un refroidissement à l'eau et A huile. Pour ces traitements thermiques nous avons utilisé un four électrique à température maximale Tmax =1000 °C



**Figure. III.1 : four électrique utilisé**



Pour notre étude on 'a utilisé un four de trempe sous vide. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques et structurelles des échantillons élaborés après frittage. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure des alliages, à ses compositions chimiques et aux traitements thermiques appliqués . Les éléments d'alliages, entrant en solution solide interstitielle ou substitutionnelle, jouent un rôle prépondérant dans les différentes transformations de phases des aciers. L'étude de leur rôle, de leur influence et des conditions dans lesquelles elles surviennent constitue donc une étape incontournable dans la compréhension des différentes propriétés d'un alliage. Ces éléments influent sur les différentes propriétés en modifiant les transformations, leur cinétique, et par conséquent, les microstructures obtenues.

### **2.1 Trempe**

Il est nécessaire d'effectuer les traitements thermiques pour améliorer les propriétés mécaniques des alliages obtenues. La trempe a pour but d'augmenter la dureté et améliorer les caractéristiques mécaniques des pièces. La température de chauffage est estimée à 1000C° dans un four électrique.

#### **2.1.2 Revenu**

Le revenu s'effectue après trempe dans un four électrique à bain de nitrate de sodium à une température de 180 C°, afin de produire un durcissement structural et diminuer la fragilité de la pièce ainsi pour éliminer les contraintes résiduelles.

### **2.2. Essai de dureté**

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétreur-surface indentée, la géométrie de pénétreur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les

## CHAPITRE III MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.

### 2.2.1. Essai Rockwell

Le pénétrateur est soit une bielle en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge. Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec un pré charge  $F_0$ . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures

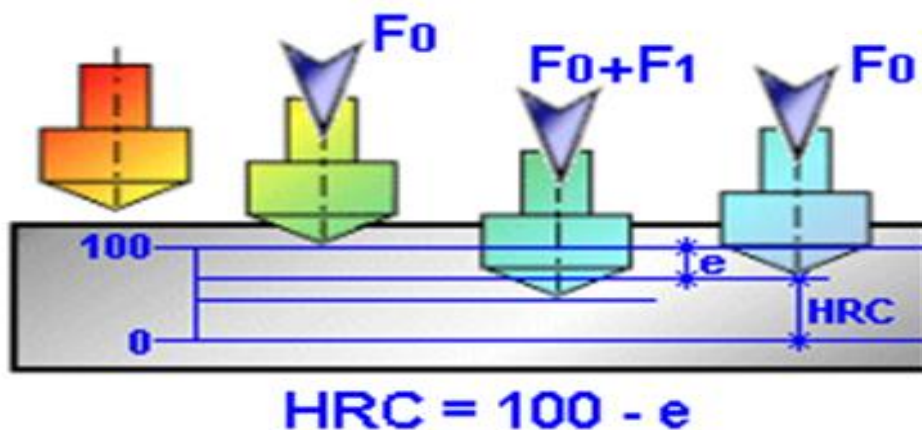


Figure III.2 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell C.



**Figure III.3** Les échantillons avant trempe



**Figure III.4** Les échantillons traités à 800°C et 180PC de revenu

## CHAPITRE III MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

**Tableau III. 2 : les paramètres de refroidissement utilisent (échantillon 1)**

<b>Echantillons</b>	<b>Température °C</b>	<b>Temps de maintien (min)</b>	<b>Refroidissement</b>
<b>1</b>	<b>800°C</b>	<b>20min</b>	<b>Eau salée</b>

**Tableau III. 3 : les paramètres de refroidissement utilisent (échantillon 2)**

<b>Echantillons</b>	<b>Température °C</b>	<b>Temps de maintien (min)</b>	<b>Refroidissement</b>
<b>2</b>	<b>800°C</b>	<b>20min</b>	<b>huile</b>

**Tableau III.4 : les paramètres de refroidissement utilise (échantillon 3)**

<b>Echantillons</b>	<b>Température °C</b>	<b>Temps de maintien (min)</b>	<b>Refroidissement</b>
<b>3</b>	<b>180°C</b>	<b>60min</b>	<b>Bain de nitrate</b>

Les mesures de dureté Rockwell (HRC) avec trois mesures pour chaque échantillon ont été effectuées avec une pointe de diamant en forme de cône et charge de 150N. L'échelle HRC a été utilisée puisqu'elle couvre une plage très intéressante de valeurs de dureté.



Figure III.5 D'uromètre digital AFFRI

### 3. Essai de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

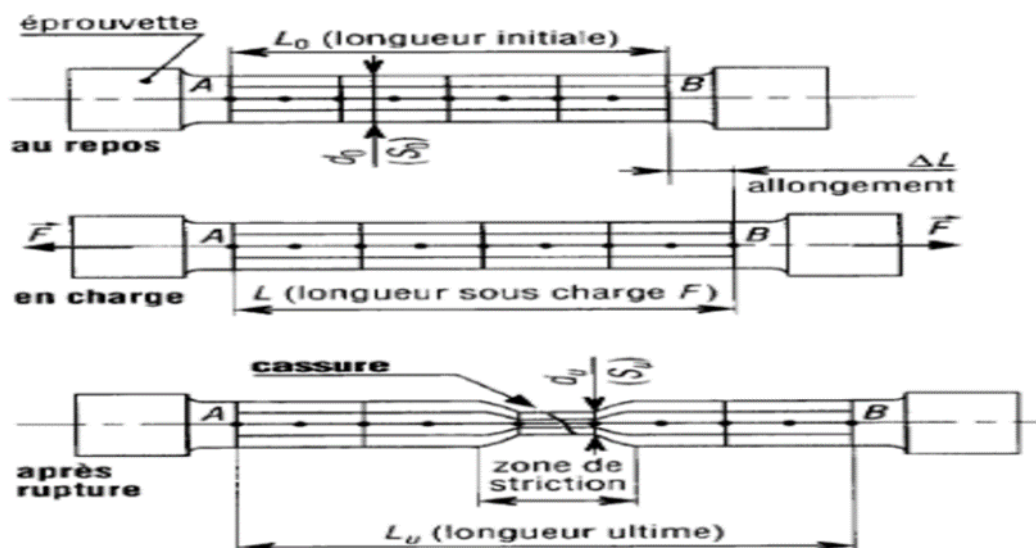


Figure III.6 : Schéma des éprouvettes de traction normalise

## 3.1. Courbe de contrainte et déformation

Pour un grand nombre de matériaux, comme les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation (ou l'allongement) est proportionnelle à la contrainte et le matériau se déforme élastiquement.

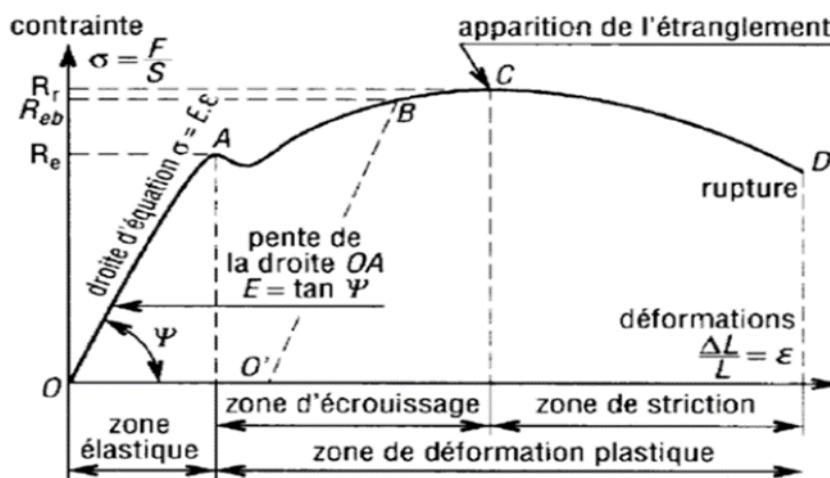


Figure III.7 : Courbe de contrainte en fonction de déformation

## 3.2 Module d'élasticité longitudinale E MPa

Il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente donc l'élasticité du matériau

Testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement Exemples : acier  $\Rightarrow E = 200\ 000$  MPa et élastomère  $\Rightarrow E = 1$  MPa.

## 3.3 Loi de Hooke

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Cette loi, ou équation de la droite OA, traduit la proportionnalité précédente ( $\sigma$  en MPa, E en MPa et  $\varepsilon$  sans unité)

### **3.4 Limite élastique Re MPa**

Elle marque la fin du domaine élastique (au point A). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après "déchargement", il subsiste un allongement permanent soit un phénomène de rémanence)

### **3.5 Limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 MPa**

On utilise cette détermination pour les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement. Pour la mesure de Re on tolère une légère déformation permanente de 0,2% ( $A\% = 0,2$ ).

### **3.6 Limite maximale Rm MPa**

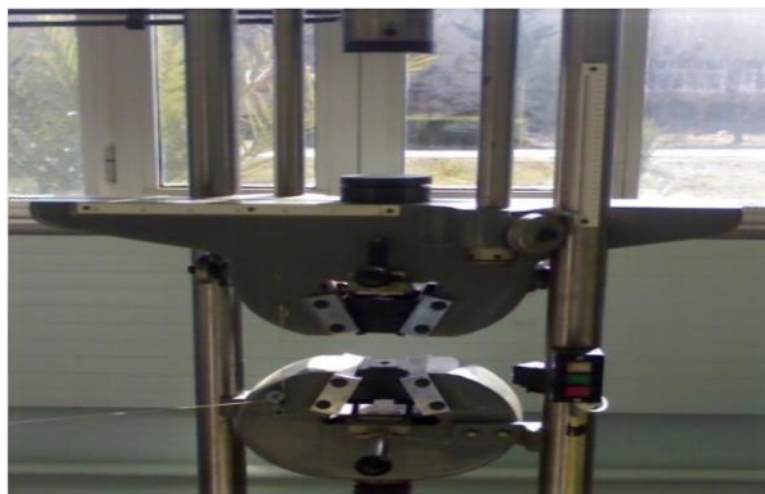
C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture.

### 3.7 Forme de l'éprouvette

Eprouvettes cylindriques normalisées découper au niveau de l'unité de production machine agricole (ETRAC).



**Figure III.8 : Eprouvettes cylindriques de traction avant et après la trempe**



**Figure III.9 machine d'essai hydraulique universel de traction**



#### 4. Essai de résilience

La résilience, de symbole général K, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs

sans se rompre. Ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée). L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester. L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W=P \times h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1=P \times h_1$ ) :

$$W = P \times h_0 - P \times h_1 = P (h_0 - h_1)$$

La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille. Deux cas :

$$\mathbf{KCU \text{ Ou } KCV = (W_0 - W_1) / S_0}$$

On appelle résilience l'énergie de rupture ramenée ou non à la section sous entaille de l'éprouvette : elle s'exprime donc en joules ou en joules/cm<sup>2</sup>. Les notations précises pour cette résilience sont : KU pour la résilience sur éprouvette à entaille en U en Joules, KCV pour la résilience sur éprouvette à entaille en V en Joules/cm<sup>2</sup>.

Forme de l'entaille	Unités [Joules]	Unités [Joules/cm <sup>2</sup> ]
V	KV	KCV
U	KU	KCU

**Tableau III.5 : Les notations et unités de la résilience.**

**Remarque :** KCV est obtenu en multipliant KV par 1,25. De même KCU est obtenu par multiplication de KU par 2..

### 4.1 Forme de l'éprouvette

On utilise les éprouvettes dont les dimensions sont normalisées et dont la façon de prélèvement est définie dans la norme du produit appropriée. En ce qui concerne la forme d'entaille, les deux types des éprouvettes peuvent être utilisées: soit avec l'entaille en U, soit avec l'entaille en V à 45°.

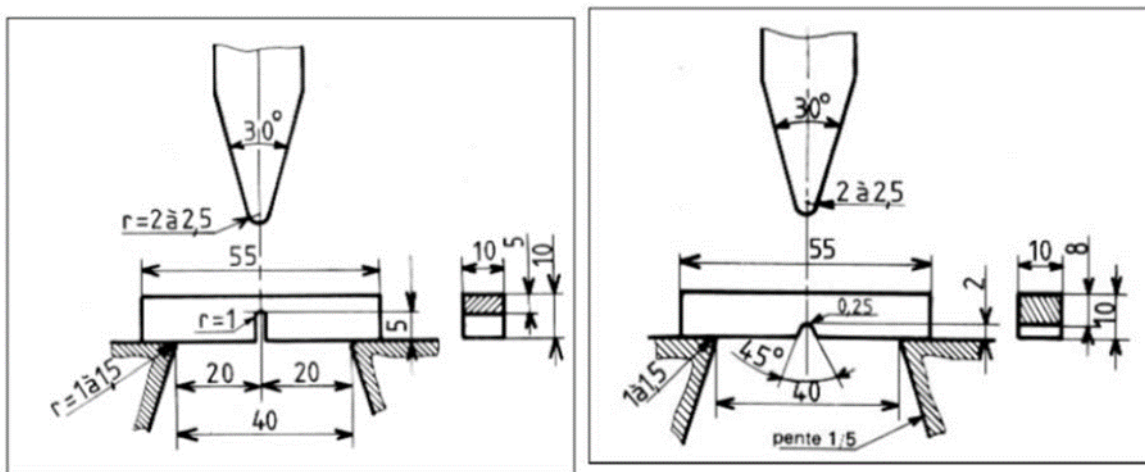


Figure III.10 : Schéma des éprouvettes entaille U et V de résilience normalisée.

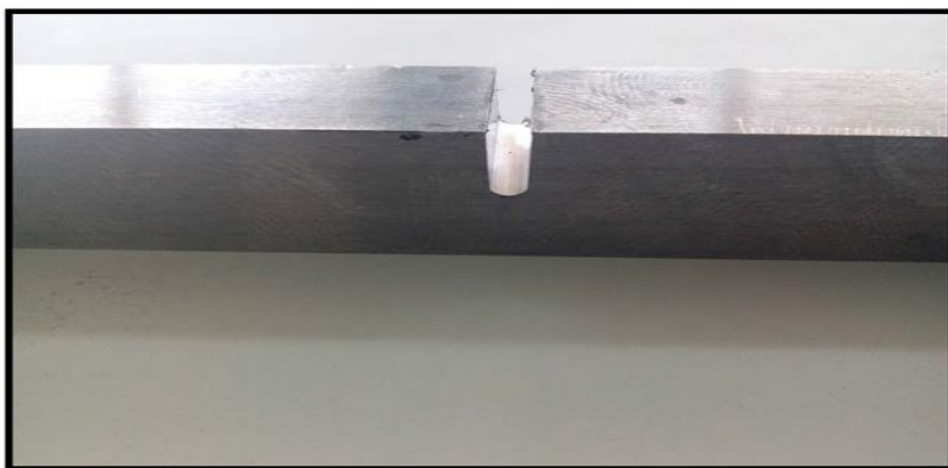


Figure III.11: Eprouvettes à entaille U de résilience

## CHAPITRE III MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Désignation	Dimension	Unités
longueur	55	Mm
Logeur	10	Mm
Hauteur	10	Mm
Hauteur restant à fond d'entaille	5	Mm
Profondeur d'entaille	5	Mm
Rayon du fond cylindrique de l'entaille	2	Mm

**Tableau III.6 :** Désignation et les dimensions de l'éprouvette entaille U de résilience avant et après trempé.



**Figure III.12** machine d'essai de choc semi-auto

### 5 .Examin métallographique

Pour obtenir une image de la structure métallographique par microscope optique, il faut d'abord préparer l'échantillon par le polissage sur une polisseuse mécanique, avec papiers abrasifs de différentes granulométries du (400, 800 et 1000) en suite sur tissus feutré avec addition du alumine. Après chaque polissage l'échantillon est nettoyé à l'eau distillée, séché puis attaqué chimiquement par le réactif approprié (nital 4%), durée d'attaque 10s secondes.

### 5.1 Attaque chimique

#### Composition :

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

96 ml d'éthanol  $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$

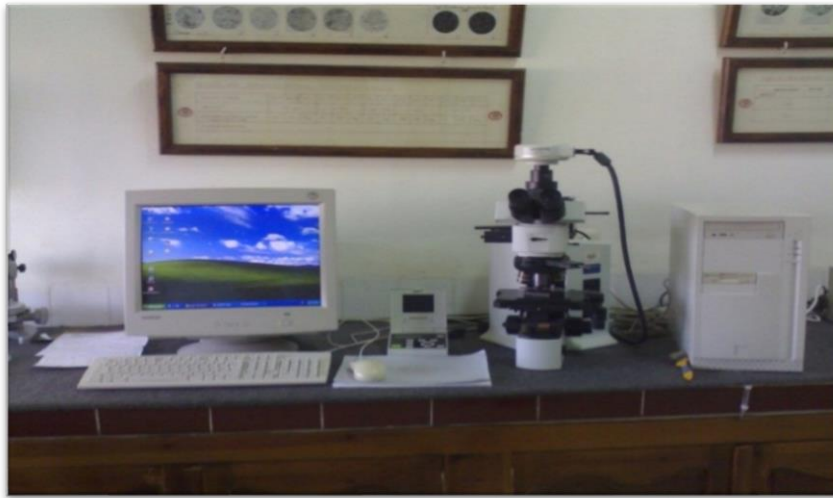
### 5.2 polissage mécanique



Figure .III.13 . Instruments de polissage mécanique

### 5.3. Microscopie optique (MO)

Le microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons durant les différents traitements thermiques. Pour notre étude, nous avons utilisé une microscopie optique de type Hund équipé (X 40) avec appareil téléphonie pour prendre les photos .



**Figure III.14** microscope optiques (OLYMPUS- BXSAM)

### **6 Principe et caractéristiques du chromage**

#### **6.1 Utilisation du chrome**

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique sur les surfaces à traiter pour leur conférer les propriétés de ce métal. Ce traitement bien connu est effectué pour deux applications importantes : le chromage décoratif et le chromage dur

Le chromage dur se distingue du chromage décoratif par le fait que son épaisseur est plus importante (de quelques micromètres au millimètre). Ce revêtement procure au matériau sur lequel il est effectué un bon coefficient de frottement et lui assure de bonnes propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion. Il est très visible par exemple sur les vérins des appareillages mécaniques (appareils de levage ou engins de travaux publics...). Ce type de traitement est le revêtement privilégié dans le domaine de la mécanique pour les pièces en rotation ou en translation qui ont à résister à l'usure et à avoir de bonnes qualités de frottement, et pour les domaines où l'adhérence pourrait être un handicap (plasturgie, cylindres de laminoir...).

### 6.2. Les caractéristiques principales du chrome :

Dans le domaine chimique, la résistance des dépôts de chrome est bonne (à très bonne) à température ordinaire pour :

- les acides : chromique, nitrique, sulfurique, gluconique, mantélique, oxalique, salicylique, stéarique ;

- les gaz : ammoniac, dioxyde de carbone, oxygène, air ;

- certains produits : les acides de fruit, le lait, le pétrole, les encres d'imprimerie, le sucre, les huiles lourdes.

Pour les propriétés mécaniques, la caractéristique essentielle est le coefficient de frottement bas (qui dépend des conditions de température, nature du lubrifiant, force appliquée, nature de l'antagoniste... dans lequel il est mesuré) de ce matériau, comparativement à d'autres métaux lorsqu'il est électrodéposé.

- Anti-usure (frottement, abrasion, érosion)

- Anticorrosion (seul ou en bidépôts)

- Amélioration des caractéristiques de glissement

- Amélioration de l'aspect

### 6.3. Le principe de chromage

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique.

Notre chromage s'effectue par électrolyse d'une solution d'acide chromique, la cathode étant la pièce à chromer. (Norme NF EN ISO 6158)

## CHAPITRE III MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Le produit livré par nos soins est donc un revêtement de CHROME sous sa forme métallique et ne constitue aucun risque chimique pour l'utilisateur une fois sortie de nos installations.

Avant chromage il faut faire un polissage électrolytique pour préparer la surface  
Enlever la couche de l'épaisseur demandée.

### 6.4 La composition de la solution polissage électrolytique

-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 65-70%

-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3-6%

-CrO<sub>3</sub> 8-10%

-La densité de courante anodique 35-50 a/dm<sup>2</sup>

-Tension de solution de bac 8-12v

-Température 55-60°C

### 6.5 La composition de la solution de chromage

CrO<sub>3</sub> 200 -250g/l

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2-2.5g/l

Température de travail 58-62 °C

Densité courant 50 -70A/dm<sup>2</sup> suivant la forme de la pièce

vitesse de chromage 0.01mm de 10-15min



**Figure III.15** Les échantillons chromés



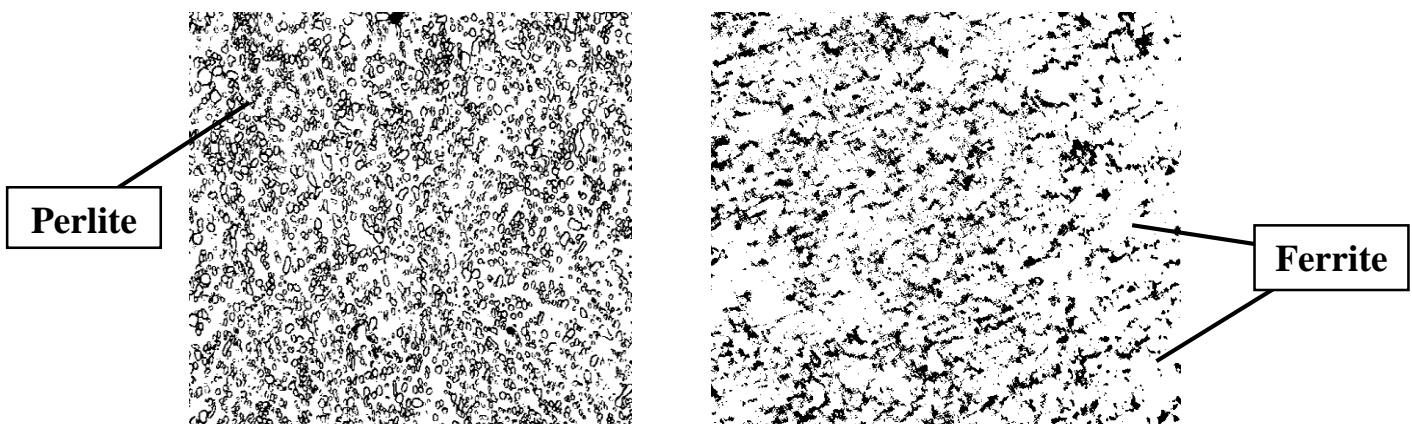
CHAPITRE IV :  
Résultats expérimentales et  
interprétations

## 1. Introduction

Dans cette chapitre nous présenterons les résultats des (microstructures et duretés et chromage) de l'acier à l'état brut, trempé et après les traitements thermiques de revenu pendant différents millions de Refroidissement (eau et huile). Ainsi les mesure da la dureté de l'acier trempé avant et après traitement thermique à température de revenu à (180) °C. Suivant un traitement de surface de chromage dur de différents ampérages (75A et 150A).et l'évaluation de la masse perde après chromage dans les millions (eau et eau dessille)

## 2. Métallographie

L'observation de la structure de l'acier à l'état brut montre que nous avons une structure ferrito perlitique (figure. IV .1). La (figure .IV.2.) représente la microstructure l'échantillon à l'état trempé après homogénéisation à température 950°C et le temps de maintien 60min ; nous avons remarqué que le nombre des grains de ferrite diminuer et le nombre des grains de perlite augment par apport l'état brut et nous observons des aiguilles qui illustrent la phase martensite. Les figures (figure. IV .2). (figure .IV.3) illustrent l'effet de revenu à température 180°C aux différent temps (30min ,60min, 120min et 180min) pour les deux premiers temps (30min ,60min) nous pouvons remarquer la structure ferrite localisée aux joints de grains et la perlite. Dans le cas de revenu a (60min) nous remarquons l'apparition des quelques phases de cémentite. Dans le dernier durée, nous avons observons la diminution de les phases de cémentite, donc nous avons une structure ferrito perlitique avec quelque agrégats de cémentite.



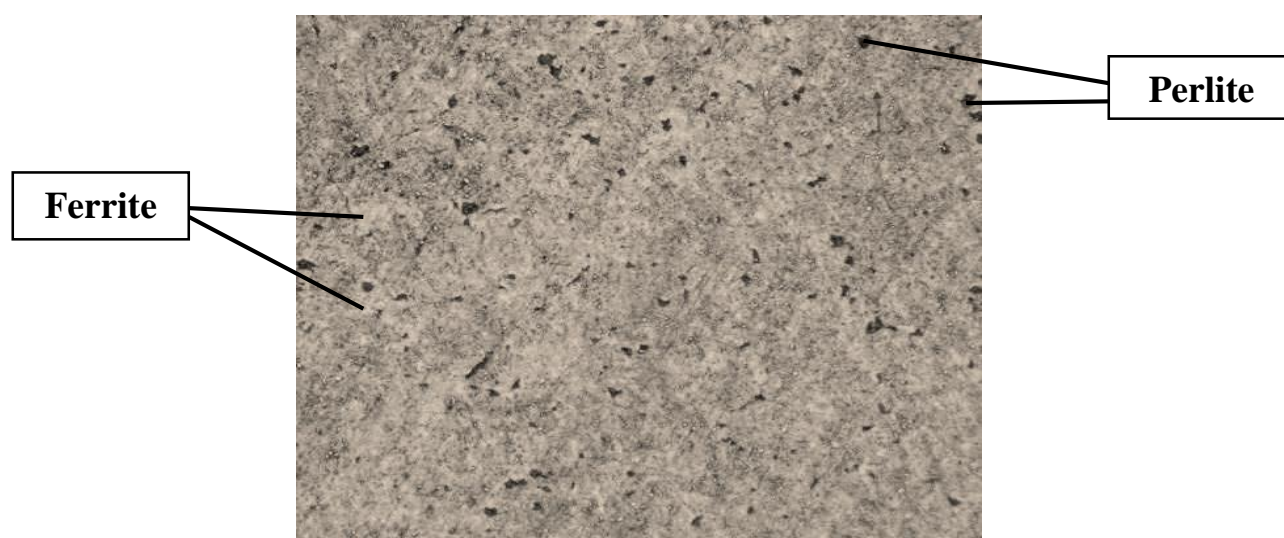
**Figure .IV.1** .L'observation microscopique de l'acier (état brut×500)

.L'influence de la distribution des joints du grain est très importante pour les deux structures. La distribution des éléments entrant dans la composition de l'alliage n'est pas homogène sur toute la structure surtout le carbone. La présence de la ferrite et perlite dans l'état brut indique que la transformation de phase du fer  $\alpha$  en fer  $\gamma$  n'est pas complète. On remarque aussi que le pourcentage de l'austénite est supérieur à la norme, par conséquent la dureté est faible

On remarque qu'il y a une nette amélioration dans les valeurs de la dureté par rapport à ceux obtenues lors du chauffage à 800 °C. On note la présence sur les structures de plusieurs phases résultats de la trempe. La martensite est en couleur blanche tandis que les autres couleurs indiquent la précipiter de carbone. Les autres éléments entrant dans l'alliage sont en solution d'insertion. Cette température de deuxième ligne de transformation et le complètement de transformation thermique

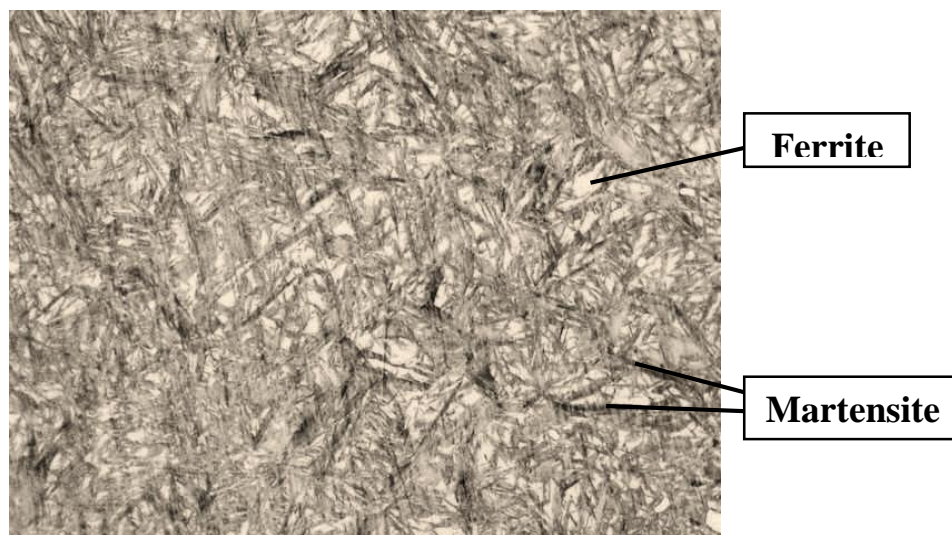
Les résultats obtenus pour une trempe de 800 °C des deux milieux (eau et huile) sont représentées sur le tableau suivant. Dans ce cas, il est préférable de faire un près chauffage des pièces à une température de revenu 18 trempe par palier.

Il y a une augmentation considérable de la dureté par rapport aux deux températures (800 °C et 1000 °C). La transformation thermique est complète (martensitique + pourcentage de austénite faible  $\leq (5 - 15)$ ) donc la température de chauffage et suffisante et la dureté obtenue est entre 58 à 62 HRC. C'est la dureté de l'acier de référence.



**Figure .IV.2** .L'observation microscopique après trempe à l'eau×500

D'après les structures obtenues par la microscopie optique, la transformation martensitique ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) est complète avec du teneur d'austénite résiduelle ne dépassant pas les valeurs des normes surtout pour ( $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), agrandissement X100. On note la présence sur les structures de plusieurs phases résultats de la trempe. La martensite est en couleur blanche tandis que les autres couleurs indiquent la porosité et le carbone. Les autres éléments entrant dans l'alliage sont en solution d'insertion.



**Figure IV.3** L'observation microscopique après trempe à huile  $\times 500$

### 3. Les mesures de la dureté

Cette technique nous a permis de déterminer la variation de la dureté en fonction de temps de maintien lors des traitements thermiques. Les mesures de la dureté avant et après traitements thermiques sont présentées dans la (Figure IV.8).

Etat de traitement	dureté HRC
Etat brut	16
revenu à $180^{\circ}\text{c}$ pendant 20min a eau	64
revenu à $180^{\circ}\text{c}$ pendant 20min a huile	50
après chromage	68

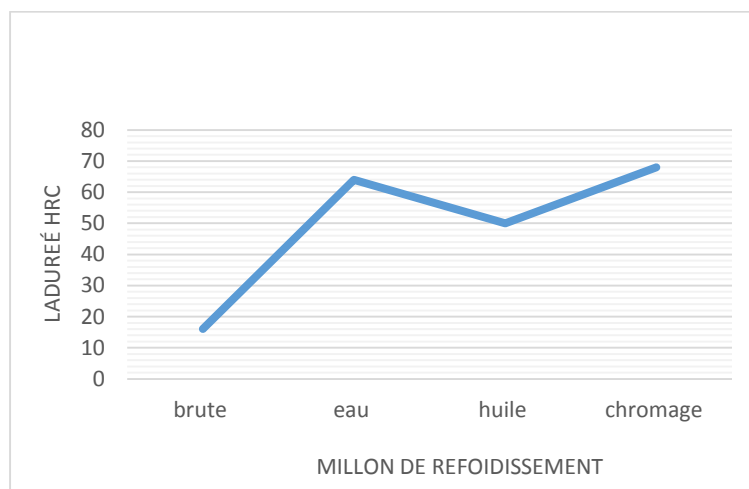
**Tableau .IV.1.** Mesure de la dureté

La variation de la dureté en fonction de million de refroidissements (tableau .IV.1) nous remarquons un durcissement au début temps de maintien 20min

- Dans l'huile nous avons une diminution liée à la disparition des contraintes de trempe et la présence de la phase bainite.

- Dans l'eau nous avons le meilleur durcissement, cette augmentation liée à la présence de la phase martensite qui est le responsable de durcissement.

-Après ce temps la dureté est diminuée à (50HRC), cette diminution est due à disparition de la contrainte de trempe et la diminution des quantités de cémentite.



**Figure. IV.4** Les variations de la dureté en fonction des millions de refroidissement

#### 4. Essai de traction :

Les essai de traction représentent la résistance à la rupture de chaque échantillon, on remarque que le échantillon trempée dans l'eau salée est le matériau le plus résistant à la rupture avec une valeur de 700Mpa suivi par les échantillon trempée dans l'huile avec une valeur de 550Mpa par rapport aux les échantillon brute .

	<b>RR (MPA)</b>	<b>RE (MPA)</b>	<b>E (MPA)</b>
BRUTE	290	185	190000
HUILE	650	550	200000
EAU	1000	700	210000

**Tableau .IV.2.** la résistance à la rupture de chaque échantillon

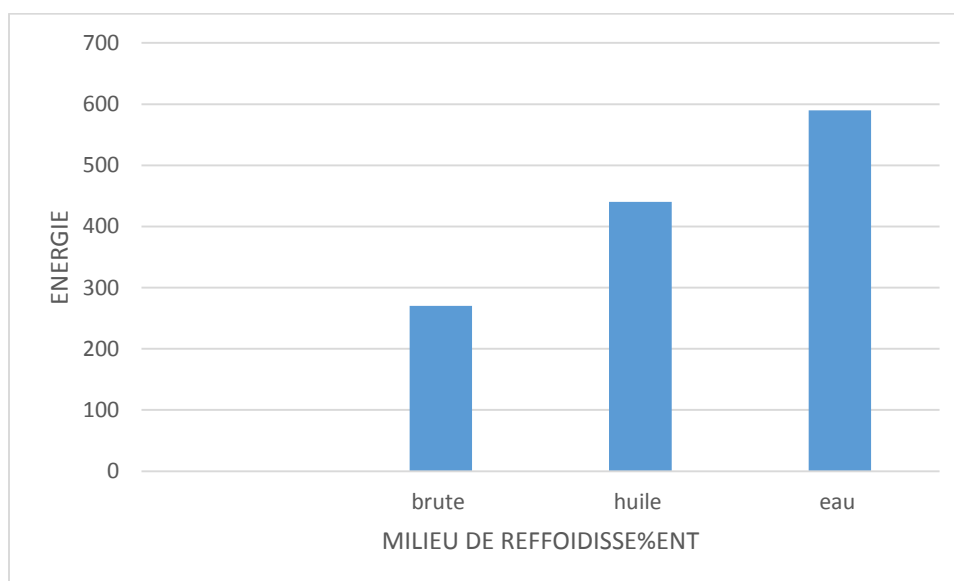
l'essai de traction est uniquement réalisé sur éprouvette avant trempe et malheureusement cet essai n'est pas exécuter pour celles après trempe,. Le matériau de base ; destiné à la trempe possède généralement une limite élastique relativement for et son comportement à la rupture est de type mi- fragile, après traitement par trempe. Si le matériau est entièrement traitée peut être considéré comme un matériau résultant de l'association d'une couche superficielle fragile reposant sur un cœur ductile.

### **5. Essai de résilience**

La mesure de l'énergie de rupture absorbée varie en fonction de la dureté. A haute dureté, l'énergie de rupture est relativement élevée, ce qui correspond à une rupture de type ductile. Lorsque la dureté baisse, la valeur de l'énergie de rupture chute considérablement ce qui correspond à une rupture de type fragile. L'apparence de la surface de défaillance révèle la nature de la rupture et peut faciliter la détermination de la zone de transition ductile-fragile. Une rupture ductile produit une surface fibreuse (mate), tandis qu'une rupture fragile engendre une surface brillante. Ces deux types de caractéristiques sont présents dans la transition ductile-fragile

	TRAVAIL (J) KU	ÉNERGIE (J/CM2) KCU
BRUTE	<b>108</b>	<b>271</b>
HUILE	<b>220</b>	<b>440</b>
EAU	<b>290</b>	<b>590</b>

**Tableau .IV.3** La mesure de l'énergie de rupture absorbée varie en fonction de la dureté



**Figure VI.5** l'évolution des valeurs moyennes de la résilience

La figure (VI.5) représentée sous forme d'histogrammes, l'évolution des valeurs moyennes de la résilience Kc est le résultat de deux essais de résilience à température ambiante. Pour les éprouvettes entaillées en U on remarque que les échantillons trempée à l'eau salée est plus résistant que les échantillon trempée huile , et les échantillons brute qui est moins résistant.

## 6. Chromage dur

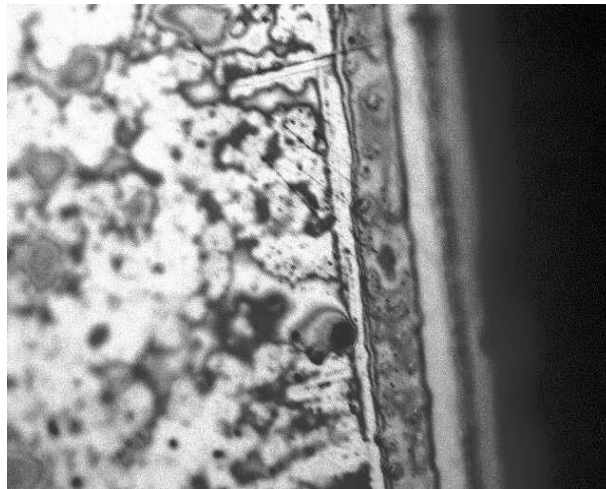
Ce type de finition permet de **diminuer le coût de la pièce** si celle-ci n'exige pas de rectification. Les épaisseurs de **chrome** varient de quelques microns à plusieurs dixièmes de millimètre. Les pièces ne sont traitées en **chromage dur** que sur les **parties fonctionnelles**.

Le reste de la pièce est protégée par des épargnes de masquage.

La dureté du **Chrome Dur** est de 750 Wickers, ce qui permet d'augmenter la longévité des pièces.

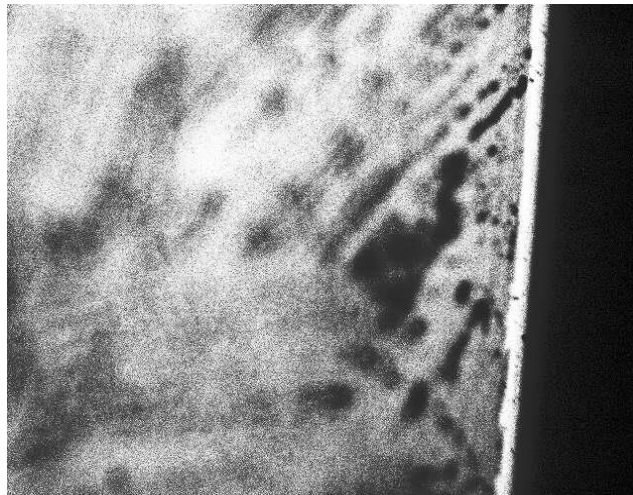
Le **chromage dur** est une bonne alternative à moindre coût par rapport à l'usinage de nouvelles pièces.

Le **chrome Dur** peut être utilisé pour le rattrapage de pièces usées et également pour des pièces neuves sous-cotées (erreur d'usinage).



**Figure VI.6** L'épaisseur de la couche pour  $75a=0.05\text{mm}$





**FigureVI .7** L'épaisseur de la couche pour  $75a=0.02\text{mm}$

on remarque que couche de chrome augmenter avec l'augmentation de le courant électrique quelle que soit l'épaisseur

### **7. méthode de la masse perde**

Cette méthode est utilisée pour étudier le comportement des échantillons dans milieu agressif (eau du robinet et eau distillée) Il consiste à évaluer le taux de corrosion des échantillons plongée dans un milieu agressif dépende de (5.10.20.30j)

Le taux de corrosion exprime en ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{j}$ ) est calculée à partir de la formule

$$T = \frac{\Delta m}{S t}$$

Ou :

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

$m_1$  : masse de l'échantillon avant test (g)

$m_2$  : masse de l'échantillon après test (g)

s : la surface totale de l'échantillon

t : temps de l'expérience en heures

on pesé en premier cas chaque échantillon on noter sa masse après on positionner chaque échantillon dans une solution de manière à ce qu'il soit entouré de toute part d'un volume à peu près égal en relevé le temps et la date de début de chaque teste la dure d'immersion a été fixe a (5.10...20.et 30 jours).

- **La masse perde (eau robinet)**

(g)	jour	5j	10	20j	30j	
<b>La masse brute</b>		48.0000	47.9600	47.9500	47.9200	47.8000
<b><math>\Delta m</math></b>			0.04	0.05	0.08	0.2
<b>Après chromage</b>		50.0000	50.0000	50.0000	49.8500	49.7000
<b><math>\Delta m</math></b>			0.0000	0.0000	0.15	0.3

**Tableau .IV.4 La masse perde (eau robinet)**

- **La masse perde (eau salée)**

(g) \ jour		5j	10j	20j	30j	
<b>La masse brute</b>		48.000	47.9900	47.9800	47.9600	47.9500
<b><math>\Delta m</math></b>			0.01	0.02	0.04	0.05
<b>Après chromage</b>		50.000	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
<b><math>\Delta m</math></b>			0.0000	00.0000	00.0000	00.0000

**Tableau .IV5 La masse perde (eau salée)**



## Conclusion générale

A travers ce travail, les procédés de projection thermique font maintenant partie de la panoplie des techniques de traitement de surface et traitement thermique préconisées par les bureaux d'études. On a pu montrer que la projection thermique est d'une importance primordiale dans la réalisation des revêtements, la récupération et la rénovation des pièces mécaniques usées. Notre travail avait pour objectif de mettre en évidence l'influence des dépôts de chromage réalisés par le procédé arc électrique sur un acier de construction mécanique, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et de déterminer les propriétés mécaniques par l'essai de traction, détermination de la résilience et de la dureté. Les différentes analyses microstructurales et structurales basées sur l'observation métallographique, en moyennant : le microscope optique également effectuées.

- La microstructure du dépôt en acier au chrome (Xc100) présente quelques duretés par contre la microstructure de l'acier (xc100) ne chromée,
- La microstructure du dépôt en molybdène présente quelques porosités et quelques lamelles. Les essais mécaniques ont montré que l'évaluation de l'allongement relatif en fonction de la charge pendant les essais de traction sur les différents dépôts et le substrat à montrer que l'acier trempée à l'eau présente des meilleures propriétés mécaniques à celle des autres milieu de refroidissement :
- Une résistance maximale élevée.
- Une résistance à la rupture élevée.
- Un allongement relatif supérieur. L'évolution des valeurs moyennes de la résilience Kc à température ambiante est le résultat de deux essais de résilience sur chaque milieu :
- A une température ambiante les dépôts (X6CrNi18-8, et molybdène) ne résistent pas aux chocs, par contre le substrat résiste au choc.
- A basse température les matériaux ductile devient fragile.

Les mesures de dureté HRC effectuées sous une charge de 150Kgf sur des surfaces polies ont révélé que :

- Le substrat qui est un acier trempée à l'eau présente une dureté supérieure à celle de l'autre milieu.



## Références bibliographiques

- [1] G .MURRY, Aciers. Généralités, technique d'ingénierie, M 300
- [2] Michel Dupeux. Aide-mémoire Science Des matériaux 2e édition. Dunod, Paris, 2004, 2008
- [3] W.D. CALLISTER, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.
- [4] Michel Colombie .MATÉRIAUX MÉTALLIQUES . 2e édition Dunod, Paris, 2001.
- [5] J-barralis et G-maeder (précis de métallurgie ; élaboration, structure, propriétés et normalisation) édition Nathan 1983.
- [6] C. CHAUSSIN et G. HILLY <<métallurgie : alliages métalliques>> Tome I 2eme édition, DUNOD 1976
- [7] ANDRE ROOS et BERNARD MILET <<précis de métallurgie appliquée >>3eme édition 1982 .
- [8] R. LÉVÊQUE, technique de l'ingénieur ; Traitements thermiques dans la masse des Aciers à outils. M1134.
- [9] R. LÉVÊQUE, technique de l'ingénieur ; l'acier à outils. M330.
- [10] M. MASSIN, Métallurgie Pratique pour Mécaniciens, tome 1, Pyc édition 1982.
- [11] S. BENSAAIDA, TRAITEMENTS THERMIQUES, CLASSIFICATION ET DESIGNATION DES ACIERS ET FONTES  
[www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf](http://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf)
- [12] C. CHAUSSIN "Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques".  
Manuel's pratiques Dunod, 1981
- [13] Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement –  
Direction de la pollution et des risques, Le « rejet zéro » en traitement de surface – Faisabilité technico-économique, 1998
- [14] Patrick BENABEN , technique de l'ingénieur, Chromage. M1615.
- [15] MARTINS (A.) et CARPENI (G.). – J. Chim. Phys (1963).

- [16] Ikhlass MARZOUK TRIFI. These Etude de l'élimination du chrome (VI) par adsorption sur l'alumine activée et par dialyse ionique croisée, Paris 2012.
- [17] P. Hoare, James ,Electrochemical mystery story: a scientific approach to chromium plating (1989).
- [18] Guy Murry , Aide-mémoire Métallurgie, Dunod, Paris, 2004, 2010
- [19] CH.Harkati (1998), Thèse de magistère, Université de Constantine.
- [20] Etude des traitements de surface et technique de mesure du revêtement 1996.
- [21] R.F. MEHL et C.WELLS, Constitution of High Purity Iron-Carbon Alloys, Technical Publication n° 798, A.I.M.E. Iron and Steel Division, 125 (1937); Metals Technology, join 1937.
- [22] P. KOISTINEN et R.E. MARBURGER, Acta Met, (1959) /
- [23] A.CHALA, thèse de magistère, Constantine (1994)
- [24] C.Bouchy et F.Gobin « Métallurgie »,1-Métallurgie structurale, Armond Collin(1971)
- [25] M.Aouragh thèse de magister à université d'Annaba (2007).
- [26] Guy Murry, Transformations dans les aciers, Normalisation (AFNOR), Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 115, Centre français d'exploitation 2002.
- [27] A.Kumar Sinha, Butter worth publishers, Ferrous Physical Metallurgy Ch 6 Martensite, (1989)
- [28] J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILIBERT et J.TALBOT, « Métallurgie générale » p231-239, (1984).
- [29] I.Lakhtine (métallugraphie et traitements thermiques des métaux) Edition Mir,Moscou 1982.
- [30] [www.groupe-thermi-lyon.com](http://www.groupe-thermi-lyon.com)
- [31] Cours de perfectionnement au BP-dessin et BTS-BE, Automobiles Peugeot, Sochaux.
- [32] Wikipédia, L'encyclopédie Libre, <http://www.fr.wikipedia.org/wiki/chrome>.
- [32] P. Morisset (1988), Chromage dur et décoratif, Centre technique des industries mécaniques, p976.

- [33] H.Moissan, Compt.Rend.116, p 1225 (1893).
- [34] T.YA.Kosolapova, G.V.Samsonov, Zh Prilk KHim.32, p 1505 (1959).
- [35] I.E.Campbell, C.F.Powell, D.H.Nowicki and B.W.Gonser, Electrochem. Soc. 96, p318 (1949).
- [36] D.Music, U.Kreissig, R.Mertens et J.M.Schneider (2004), Electronic structure and mechanical properties of Cr C, Elsevier.
- [37] S.C. Kwon, M. Kim, S.U. Park, D.Y. Kim, D. Kim, K.S. Nam et Y. Choi (2003),
- [38] BADÉ (Y.). –Cuivrage M 1 605, traité Matériaux métalliques, janv. 1982.
- [39] BADÉ (Y.). – Nickelage M 1 610, traité Matériaux métalliques, oct. 1983.
- [40] PRIOUX (D.). – Revêtements électrolytiques localisés au tampon, traité Matériaux métalliques, M 1 592, avril 1989.
- [41] DURUT (F.). – Influence de la température de dépôt sur les revêtements de chrome électrolytique. DEA, INPG/EMSE, sept. 1995.
- [42] JONES (A.R.). – Microcracks in hard chromium electrodeposits, Interfinish 88, Recueil des Conférences (AFTS), Paris.
- [43] MORISSET (P.). – Chromage dur et décoratif, Guide 4 E éd., Publications CETIM (1993).
- [44] SNAVELY (C.A.). – Trans. Electrochem. Soc.,92, 537 (1947).
- [42] D. Handolt. Traité des matériaux 12. Corrosion et chimie des surfaces. Edition: Presses polytechnique et universitaire Romandes. Lausanne (1993)
- [43] D. Eghfel, R. Rhamnia, Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs, OPU Alger (2002)
- [44] P. Bachmann, P. Tissot, Précis de génie de chimie. GEORG (1981)
- [45] N. Azzouz, Cours de corrosion, Ecole Normale Supérieure de Jijel (2003)
- [46] O.Belahssen, thèse : Etude comparative du comportement chimique et tribologique des aciers nitrurés, Université Mohamed Khider – Biskra, 19/12/2013



## Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet du chromage sur les caractéristiques mécaniques et structurales d'un acier faiblement allié de type (XC100) traité thermiquement (trempe ; revenu et recuit) et suivi par un traitement de surface (polissage électrolytique puis un chromage dur). Pour réaliser ce travail en suis la technique de cratérisation structurale et mécanique sont réalisés, à savoir des observations métallographiques par microscope optique ; essais de traction, essais de résilience et des mesures de la dureté.

---

## Summary

The objective of this work is the study of the effect of chromium plating on the mechanical and structural characteristics of a low-alloy steel of the type (XC100) heat-treated (tempering, tempering and annealing) and followed by a surface treatment ( electrolytic polishing then a hard chromium plating). To carry out this work I am the technique of structural and mechanical cratering are realized, namely metallographic observations by optical microscope; .tensile tests, resilience tests and hardness measurements

---

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الطلاء بالكروم على الخصائص الميكانيكية والهيكلية للقطعة الفولاذية ذلك بمعالجتها حراريا (الصلابة والمرونة والتقوية) وتليها المعالجة السطحية (تلميع كهربائيا ثم طلاء الكروم الصلب). لتنفيذ هذا العمل اتبعنا تقنية التكسير الهيكلي والميكانيكي، وذلك بواسطة المجهر الضوئي؛ اختبارات الشد، واختبارات الصمود وقياسات الصلابة.