

---

**Université ABBES LAGHROUR Khenchela**



جامعة عباس لغرور خنشلة  
Faculté des Sciences et Technologie  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Département de Génie Mécanique  
قسم الهندسة الميكانيكية



# Mémoire

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Génie Mécanique Productique Spécialisé**

### Thème

---

## ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE SUR LES ACIERS CEMENTE

---

**Présenté par : BAHRI Azzouz**

BOURICHE Samir

Devant le jury

- Dr. TOUATI Sofiane      Encadrant
- Dr. ABOUDI Abdelaziz      Président
- Dr. CHERMIME Brahim      Examineur

---

**Année universitaire : 2021-2022**

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

و

الحمد لله

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu que nous a donné  
La santé la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements sont destinés à Dr TOUATI Sofiane,  
Notre encadreur, pour son aide, ces critiques constructives ses  
explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses  
orientations tout au long de travail et pour avoir apporté tant de  
soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les  
enseignants tout au long de l'étude.

Merci

# Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père et à ma mère : Que Dieu ait pitié d'eux et les place dans ses vastes paradis.

À ma femme et partenaire de vie.

A mes filles, Amina, Zainab et Jana.

A mon cher frère et sa famille

A mes sœurs et leurs enfants, surtout Khalil

Sans oublier mes camarades de classe. Surtout Zakaria (Berdouk et Khallout).

A tous ceux que je connais.

**BAHRIA**

# Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père, que Dieu lui fasse miséricorde

A ma mère, que Dieu la guérise

A ma femme et partenaire de vie

A mes frères et sœurs.

À mes collègues.

A tous ceux que je connais.

**BOURICHE.S**

## ملخص

في هذا العمل قمنا بتوضيح ووصف طريقة الكيمياء الحرارية لمعالجة السطوح بواسطة الكربنة للمعدن المنخفض الكربوني.

كما قمنا بتوضيح العناصر التي تتحكم في تنظيمها، والهدف من عملية الكربنة هو زيادة الصلادة، المتانة وإزالة الاجهادات الداخلية الناتجة عن عمليات التشغيل، أما العملية الميكانيكية فهي نتائج متوازية لما سبق من التغيرات في المعدن، ولإظهار تأثيراتها عملنا على إجراء سلسلة من التجارب الميكانيكية (الصلادة، الصدمة) للمعدن الصلب قبل وبعد عملية الكربنة.

## *Résumé*

Dans cette étude nous avons procédé à décrire le rôle de traitement thermo chimie dans le traitement de surface a faible teneur en carbone par cémentation. Nous clarifions aussi les éléments qui contrôlent l'organisation, le but du processus de cémentation est l'augmentation des propriétés de résistance, la durabilité et l'élimination de contraintes internes résultantes des opérations. Parallèlement nous procédons à une série d'essais mécaniques (dureté et résilience) pour voir les effets de changement dans le métal, et de montrer l'impact des traitements sur l'acier considéré avant et après de cémentation.

## *Abstract*

In this study we proceed to describe the role of thermo chemistry in the surface treatment carburizing low carbon steel. We also clarify the elements that control the organization, the purpose of the cementation process is the increase in resistance, durability and the elimination of internal stresses resulting operations. Meanwhile we conduct a series of mechanical tests (hardness and resilience) to see the effects of changes in the metal, and to show the impact of treatment on steel considered before and after cementation.

# SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale .....	1
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Les propriétés mécanique .....	2
I.2.1 La Rigidité .....	3
I.2.2 L'Elasticité.....	3
I.2.3 La résistance maximale (Résistance à la traction $R_m$ ) .....	4
I.2.4 Limite d'élasticité.....	4
I.2.5 La Plasticité .....	5
I.2.6 La Ductilité .....	6
I.2.7 La fragilité .....	6
I.2.8 La ténacité.....	6
I.3 Caractérisation mécanique des matériaux.....	7
I.3.1 Les sollicitations mécaniques .....	7
I.3.1.1 La Traction .....	7
I.3.1.2 La Compression .....	7
I.3.1.3 Le Cisaillement.....	8
I.3.1.4 La Torsion.....	8
I.3.1.5 La flexion.....	8
I.3.2 La notion de contrainte .....	8
I.3.3 Classification des essais mécaniques.....	9
I.3.3.1 Essai de traction.....	9
I.3.3.2 Essai de compression.....	11
I.3.3.3 Essai de résilience.....	13
I.3.3.4 L'essai de fatigue.....	15
I.3.3.5 Essai de dureté .....	17
Essai de dureté Brinell .....	17
Essai de dureté Vickers .....	18
Essai de dureté Rockwell .....	19
LES ACIERS .....	21

I.4 Introduction.....	21
I.4.1 Définition des aciers .....	21
I.4.2 Les différentes familles d’aciers .....	21
I.4.2.1 Les aciers d’usage général .....	21
I.4.2.2 Aciers à outils .....	21
I.4.2.3 Aciers des traitements thermiques .....	22
I.4.2.4 Aciers inoxydables : .....	23
Conclusion .....	25
Référence .....	26

## **CHAPITRE II : LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES**

II.1 Introduction :.....	27
II.2 La cémentation.....	27
II.3 Techniques de cémentation :.....	27
II.4 Profondeur de cémentation : .....	28
II.5 Traitement thermique de l'acier après cémentation .....	28
II.6 Aciers pour cémentation : .....	29
II.7 Le diagramme d’équilibre fer-carbone .....	29
II.8 Les alliages fer-carbone .....	30
II.9 La constitution des aciers au carbone .....	30
Conclusion .....	33
Référence .....	34

## **CHAPITRE III : PREPARATION DES EXPERIENCES**

III.1 Introduction :.....	35
III.2 Objectifs :.....	35
III.3 Environnement expérimental :.....	35
III.3.1 Matériau d’étude :.....	35
III.3.2 Préparation des échantillons pour le traitement : .....	36
III.3.2.1 La phase de Découpage : .....	36
III.3.2.2 La phase de Rectification :.....	37
III.3.3 Technique de traitement thermochimique et thermique : .....	37
III.3.3.1 La phase de Cémentation :.....	38
III.3.3.2 La phase de la trempe : .....	38
III.3.3.3 La phase du revenu : .....	39
III.3.4 Préparation des échantillons après traitement :.....	39

III.3.4.1 La phase de Découpage :	39
III.3.4.2 La phase de Polissage :	39
III.3.4.3 La phase d'Attaque chimique :	40
III.3.4.4 Analyse et mesurage des couches cimentées par microscope optique :	41
III.3.5 Caractérisation des couches cimentées par dureté :	41
III.3.6 Caractérisation des couches cimentées par analyse chimique :	42
Conclusion :	43
Références.....	44

## **CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION**

IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Matériau étudié (acier XC20) .....	45
IV.3 Le pourcentage de carbone des échantillons.....	45
IV.4 Mesure de la dureté des échantillons .....	46
IV.4.1 Essai de dureté (état brut) .....	46
IV.4.2 Essai de dureté (état cimenté de 04 h).....	46
IV.4.3 Essai de dureté (état cimenté de 06 h).....	46
IV.4.4 Essai de dureté (état cimenté de 08 h).....	47
IV.5 La Profondeur de la couche superficielle cimentée .....	47
IV.5.1 Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 4 heures .....	48
IV.5.2 Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 6 heures .....	48
IV.5.3 Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 8 heures .....	48
IV.6 Caractérisation métallographique de la couche superficielle des aciers.....	49
IV.6.1 La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état Brute .....	49
IV.6.2 La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état initial.....	49
IV.6.3 Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes à l'état final.....	50
IV.7 Résultats expérimentaux d'essai résilience.....	50
Conclusion .....	53
Conclusion Générale .....	54

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : La Limite D'élasticité Pour L'acier .....	5
Figure I.2 : La Limite D'élasticité Reh Et Rel .....	6
Figure I.3 : L'allure Du Comportement D'un Acier Dans Un Essai De Traction .....	6
Figure I.4 : Expérience De Traction Simple Pour Un Matériau Ecrouissable .....	7
Figure I.5: Eprouvette Employée Pour Caractériser La Propagation Des Fissures De Fatigue.....	7
Figure I.6 : Eprouvettes De Traction .....	8
Figure I.7: Essais De Compression .....	8
Figure I.8: Essai De Cisaillement .....	9
Figure I.9 : Déformations En Torsion.....	9
Figure I.10 : Essai De Flexion .....	9
Figure I.11: Machine De Traction .....	10
Figure I.12 : Eprouvette De Traction .....	10
Figure I.13 : Courbe De Traction Conventionnelle .....	11
Figure I.14: Courbe De Traction Rationnelle .....	12
Figure I.15: Eprouvette De Traction Cylindrique Et Son Evolution En Cours D'essai. ....	12
Figure I.16 : Machine D'essai De Compression .....	13
Figure I.17 : Schématisation De Détermination De La Résilience .....	14
Figure I.18: Schématisation De La Machine De Résilience .....	15
Figure I.19: Eprouvettes De Résilience Avec Entaille En V Et Entaille En U.....	15
Figure I.20 : Calcul De L'énergie Dissipée Dans Un Choc.....	16
Figure I.21: La Machine D'essai De Fatigue En Flexion Rotative.....	17
Figure I.22 : Eprouvette En Acier De Structure Et Toroïdale Pour Essai De Fatigue.....	18
Figure I.23 : Principe De L'essai De Brinell .....	18
Figure I.24 : Principe De L'essai Vickers.....	19
Figure I.25 : Géométrie Du Pénétrateur Vickers .....	19
Figure I.26 : Principe De L'essai Rockwell Avec Cône.....	20
Figure I.27 : Principe De L'essai Rockwell Avec Bille.....	20
Figure I.28 : Procédé De Traitement Thermique .....	24
Figure II.1 : Le diagramme de phase fer-carbone .....	30
Figure II.2 : Micrographie représentant de la ferrite $\alpha$ .....	31
Figure II.3 : Micrographie représentant de l'austénite.....	31
Figure II.4: Micrographie représentant de cémentite.....	31
Figure II.5: Micrographie représentant de perlite. ....	32
Figure III.1 : Spectromètre à émission optique SPECTROMAX.....	35

Figure III.2 : Préparation des éprouvettes .....	36
Figure III.3 : Machine fraisage et tournage.....	36
Figure III.4: Rectifieuse plane. ....	37
Figure III.5: Chaine de traitement thermique SOLO. ....	37
Figure III.6: La machine de tronçonnage Mecatome T260. ....	39
Figure III.7 : Papier abrasif.....	40
Figure III.8: Machine de polissage automatique.....	40
Figure III.9 : La solution d'attaque chimique .....	40
Figure III.10: Equipement de microscope optique Leika .....	41
Figure III.11: Appareil de Micro- dureté .....	41
Figure IV.1 : influence du temps de maintien sur le pourcentage de carbone .....	46
Figure IV.2 : Influence du temps de maintien sur dureté.....	47
Figure IV.3 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 4H. ....	48
Figure IV.4 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 6H. ....	48
Figure IV.5 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 8H. ....	49
Figure IV.6 : Microstructure de la couche d'éprouvettes Brute. ....	49
Figure IV.7 : Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état initial. ....	50
Figure IV.8 : Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état final .....	50
Figure IV.9 : Forme et dimensions d'éprouvette d'essai avant et après cémentation .....	51
Figure IV.10 : L'emplacement de l'éprouvette sur la machine.....	51
Figure IV.11 : Influence du temps de maintien sur la résilience .....	52
Figure IV.12 : Les éprouvettes après les essais de résiliences.....	52

## **LISTE DES TABLEAU**

Tableau I.1 : Les principales propriétés mécaniques. ....	4
Tableau I.2 : Les éprouvettes d'essai de compression .....	13
Tableau I.3: Dimensions des éprouvettes de résiliences type V et U . ....	15
Tableau I.4 : Description de la machine d'essais de fatigue .....	17
Tableau I.5 : Le calcul de la dureté pour les différentes échelles de dureté Rockwell. ....	21
Tableau II.1 : Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation.....	29
Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier XC20. ....	35
Tableau III.2: Paramètres de traitement thermochimique.....	38
Tableau IV.1 : Pourcentage du carbone à l'état brut.....	45
Tableau IV.2 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 4 H .....	45
Tableau IV.3 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 6 H .....	45
Tableau IV.4 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 8 H .....	45
Tableau IV.5 : Essai de dureté (état brut) .....	46
Tableau IV.6 : Essai de dureté (état cimenté 04 h) .....	46
Tableau IV.7 : Essai de dureté (état cimenté 06 h) .....	47
Tableau IV.8 : Essai de dureté (état cimenté 06 h) .....	47
Tableau IV.9 : La résistance de choc de l'acier XC 20 brute .....	51
Tableau IV.10 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 4 heures .....	51
Tableau IV.11 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 6 heures .....	51
Tableau IV.12 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 6 heures .....	51

## Introduction Générale

La bonne connaissance du matériau utilisé est indispensable pour la réalisation d'une structure satisfaisante qui donne, la production des pièces saines et des profilés à normes respectés, et de plus en plus apte à répondre aux intentions dimensionnelles. La sensibilité à la surcharge de cette couche est très importante par suite de son intégrité relativement limitée. Le critère de fatigue intégrant les effets de durcissement superficiel et de contraintes résiduelles stabilisées constitue un outil de prédiction satisfaisant de la tenue en fatigue des couches cémentées.

La détermination expérimentale de ces caractéristiques mécaniques des aciers cémentés, 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 cémentés et de mener une analyse des résultats expérimentaux pour deux types d'éprouvettes :

- Eprouvettes avant cémentation
- Eprouvettes après cémentation

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

- **Partie I :**

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

- **Chapitre 1 :** Les propriétés et les caractéristiques mécanique des métaux tel que les essais mécanique et les différents types d'aciers.
- **Chapitre 2 :** Les traitements thermo-chimiques, la cémentation, les techniques et les aciers utilisés pour la cémentation
- **Partie II :** Cette deuxième partie, concerne l'expérimentation (essai de dureté, résilience...), elle est composée de deux chapitres.
- **Chapitre 3 :** Préparation et des expériences
- **Chapitre 4 :** Résultats, comparaison et analyses.

# **CHAPITRE I**

## **ETUDE**

### **BIBLIOGRAPHIQUE**

# SOMMAIRE

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1	Introduction.....	1
I.2	Les propriétés mécanique .....	1
I.2.1	La Rigidité .....	2
I.2.2	L'Elasticité.....	2
I.2.3	La résistance maximale (Résistance à la traction $R_m$ ) .....	3
I.2.4	Limite d'élasticité.....	3
I.2.5	La Plasticité .....	4
I.2.6	La Ductilité .....	5
I.2.7	La fragilité .....	5
I.2.8	La ténacité.....	5
I.3	Caractérisation mécanique des matériaux.....	6
I.3.1	Les sollicitations mécaniques .....	6
I.3.1.1	La Traction.....	6
I.3.1.2	La Compression .....	6
I.3.1.3	Le Cisaillement.....	7
I.3.1.4	La Torsion.....	7
I.3.1.5	La flexion.....	7
I.3.2	La notion de contrainte .....	7
I.3.3	Classification des essais mécaniques.....	8
I.3.3.1	Essai de traction.....	8
I.3.3.2	Essai de compression.....	10
I.3.3.3	Essai de résilience.....	12
I.3.3.4	L'essai de fatigue.....	14
I.3.3.5	Essai de dureté.....	16
	Essai de dureté Brinell .....	16
	Essai de dureté Vickers .....	17
	Essai de dureté Rockwell .....	18
	LES ACIERS .....	20
I.4	Introduction.....	20
I.4.1	Définition des aciers .....	20
I.4.2	Les différentes familles d'aciers .....	20
I.4.2.1	Les aciers d'usage général .....	20
I.4.2.2	Aciers à outils .....	20

I.4.2.3 Aciers des traitements thermiques .....	21
I.4.2.4 Aciers inoxydables : .....	22
Conclusion .....	24
Référence .....	25

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : La Limite D'élasticité Pour L'acier .....	3
Figure I.2 : La Limite D'élasticité Reh Et Rel .....	4
Figure I.3 : L'allure Du Comportement D'un Acier Dans Un Essai De Traction .....	4
Figure I.4 : Expérience De Traction Simple Pour Un Matériau Ecrouissable .....	5
Figure I.5: Eprouvette Employée Pour Caractériser La Propagation Des Fissures De Fatigue.....	5
Figure I.6 : Eprouvettes De Traction .....	6
Figure I.7: Essais De Compression .....	6
Figure I.8: Essai De Cisaillement .....	7
Figure I.9 : Déformations En Torsion .....	7
Figure I.10 : Essai De Flexion .....	7
Figure I.11: Machine De Traction.....	8
Figure I.12 : Eprouvette De Traction .....	8
Figure I.13 : Courbe De Traction Conventionnelle .....	9
Figure I.14: Courbe De Traction Rationnelle .....	10
Figure I.15: Eprouvette De Traction Cylindrique Et Son Evolution En Cours D'essai. ....	10
Figure I.16 : Machine D'essai De Compression .....	11
Figure I.17 : Schématisation De Détermination De La Résilience .....	12
Figure I.18: Schématisation De La Machine De Résilience .....	13
Figure I.19: Eprouvettes De Résilience Avec Entaille En V Et Entaille En U.....	13
Figure I.20 : Calcul De L'énergie Dissipée Dans Un Choc.....	14
Figure I.21: La Machine D'essai De Fatigue En Flexion Rotative.....	15
Figure I.22 : Eprouvette En Acier De Structure Et Toroïdale Pour Essai De Fatigue.....	16
Figure I.23 : Principe De L'essai De Brinell .....	16
Figure I.24 : Principe De L'essai Vickers .....	17
Figure I.25 : Géométrie Du Pénétrateur Vickers .....	17
Figure I.26 : Principe De L'essai Rockwell Avec Cône.....	18
Figure I.27 : Principe De L'essai Rockwell Avec Bille.....	18
Figure I.28 : Procédé De Traitement Thermique .....	22

## **LISTE DES TABLEAU**

Tableau I.1 : Les principales propriétés mécaniques. ....	2
Tableau I.2 : Les éprouvettes d'essai de compression .....	11
Tableau I.3: Dimensions des éprouvettes de résiliences type V et U . ....	13
Tableau I.4 : Description de la machine d'essais de fatigue .....	15
Tableau I.5 : Le calcul de la dureté pour les différentes échelles de dureté Rockwell. ....	19

## I.1 Introduction

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

Le premier chapitre portera donc sur les propriétés mécaniques et les caractérisations mécaniques usuelles indispensables pour les calculs de structures et de dimensionnement des pièces mécaniques en vue de prédire leur aptitude de résistances aux différentes sollicitations mécaniques imposées en service. Donc, on s'y adresse, à décrire les techniques expérimentales associées permettant la caractérisation mécanique des matériaux : soient leur résistance à la déformation évaluée par les essais de traction et de dureté ainsi que leur résistance au choc mécanique évaluer par un essai de résilience.[1]

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine des révolutions dans l'histoire de technologies inventées. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante croissance. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- Les matériaux de structure, qui seront l'objet de ce mémoire et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et/ou thermiques.
- Les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

## I.2 Les propriétés mécanique

Une propriété mécanique est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques.

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Afin que l'objet technique remplisse sa fonction globale et résiste aux différentes contraintes qu'il subit, il est important de sélectionner les matériaux adéquats.

Le tableau suivant présente les principales propriétés mécaniques.[2]

<b>Propriété mécanique</b>	<b>Description</b>	<b>Exemples de matériaux</b>
<b>Ductilité</b>	Capacité de s'étirer sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme	Le cuivre, L'or
<b>Dureté</b>	Capacité de résister à la pénétration et aux rayures	L'acier, La porcelaine
<b>Élasticité</b>	Capacité de se déformer, puis de reprendre sa forme initiale	Le caoutchouc, Le polychloroprène
<b>Fragilité</b>	Capacité de se casser facilement	Le verre, La porcelaine
<b>Résilience</b>	Capacité de résister aux chocs	La fonte, La mélamine
<b>Rigidité</b>	Capacité de résister à la déformation	Le béton armé, Le contreplaqué

**Tableau I.1** : Les principales propriétés mécaniques.[2]

Tous les matériaux ont une limite à pouvoir se déformer ou à résister à la déformation. Lorsque les contraintes appliquées sont trop grandes, elles entraînent une déformation permanente ou une rupture du matériau. Par exemple, le caoutchouc a une bonne élasticité, mais s'il est étiré avec une trop grande force, il risque de rompre au lieu de reprendre sa forme initiale.

### **I.2.1 La Rigidité**

La **rigidité** est la capacité d'un matériau à résister à la déformation lorsqu'il est soumis à des contraintes.

On retrouve des matériaux d'une bonne rigidité dans tous les types de matériaux. Par exemple, le noyer (bois), le plexiglas (plastique) et le contreplaqué (matériau composite) sont rigides. Ces matériaux conservent leur forme, c'est-à-dire qu'ils ne plient pas, ne s'étirent pas et ne se courbent pas. Cela en fait de bons choix pour des structures qui supportent des charges élevées comme les bâtiments, les maisons et les ponts.[2]

### **I.2.2 L'Élasticité**

L'**élasticité** est la capacité d'un matériau à se déformer, puis à reprendre sa forme initiale après avoir subi une déformation.

Plusieurs matières plastiques et certains matériaux composites ont une bonne élasticité après une déformation, il est possible de redonner sa forme initiale à certains matériaux à condition d'appliquer une contrainte.

### I.2.3 La résistance maximale (Résistance à la traction $R_m$ )

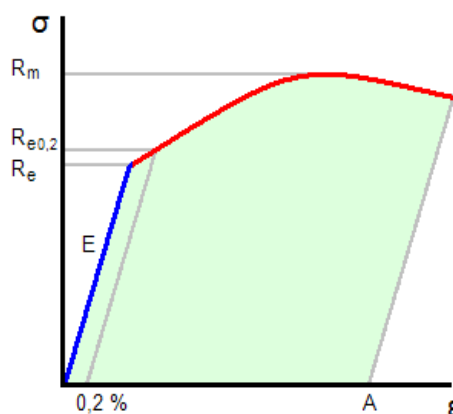
La résistance à la traction  $R_m$  est la contrainte de traction mécanique maximale que l'éprouvette peut supporter.

Elle se calcule à partir de la force de traction maximale approchée  $F_m$  et de la surface de section transverse de l'éprouvette  $S_0$  au début de l'essai de traction est indiquée en MPa ou N/mm<sup>2</sup>:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{MPa}) \quad [01]$$

### I.2.4 Limite d'élasticité

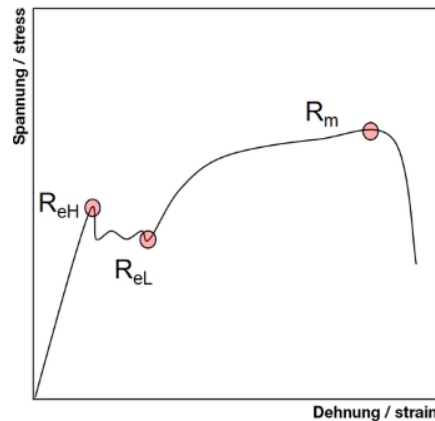
La limite d'élasticité  $R_e$  signifie la fin du comportement élastique du matériau et le début du comportement plastique. Cela signifie que lorsque la limite d'élasticité est dépassée, le matériau est déformé de manière irréversible, c'est-à-dire qu'il est déformé de manière permanente. La limite d'élasticité est indiquée en MPa (**Meg pascal**) ou N/mm<sup>2</sup>. (Figure I.1)[3]



**Figure I.1** : La limite d'élasticité pour l'acier

Une limite d'élasticité supérieure  $R_{eH}$  et inférieure  $R_{eL}$  peuvent être fréquemment déterminées. (Figure I.2)

La limite d'élasticité supérieure  $R_{eH}$  est la contrainte jusqu'à laquelle aucune déformation plastique permanente ne se produit sur un matériau soumis à une contrainte de traction. Bien que le matériau se déforme, il reprend sa forme initiale une fois la contrainte de traction supprimée. Lorsque cette dernière a été dépassée, la déformation de l'éprouvette devient permanente; lors de l'essai de traction, l'éprouvette est allongée.



**Figure I.2 :** La limite d'élasticité  $R_{eH}$  et  $R_{eL}$

Le rapport des limites d'élasticité peut être calculé à partir de la limite d'élasticité  $R_e$  et la résistance à la traction  $R_m$ .

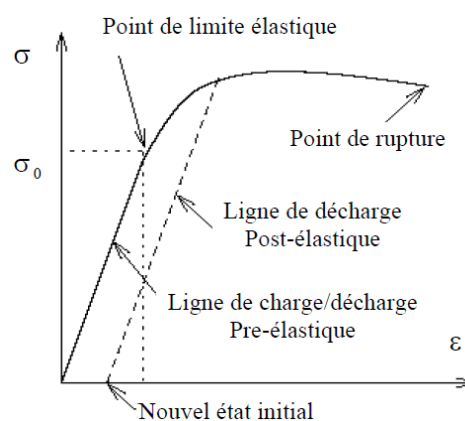
$$\text{le rapport des limites d'élasticité} = \frac{R_e}{R_m} \quad [02]$$

### I.2.5 La Plasticité

C'est le matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement élastique sous charges modérées et plastique sous charges excessives.

La figure I.3 Montre l'allure du comportement d'un acier dans un essai de traction sur une éprouvette, dans un plan déformation-contrainte. On y constate clairement deux comportements :

- Tant qu'on reste en dessous du point de limite élastique, le comportement reste élastique.
- Par contre, si le chargement dépasse la limite élastique, et si on décharge ensuite l'éprouvette, on constate qu'on revient à un autre état et le matériau perd son état initial.[4]



**Figure I.3 :** l'allure du comportement d'un acier dans un essai de traction

L'essai de traction sur une éprouvette d'un matériau ayant un comportement élasto-plastique avec écrouissage (Figure I.4) permet de mettre en évidence la non-linéarité et le phénomène d'irréversibilité caractérisant le comportement plastique. La déformation totale est la somme des déformations élastique et plastique.

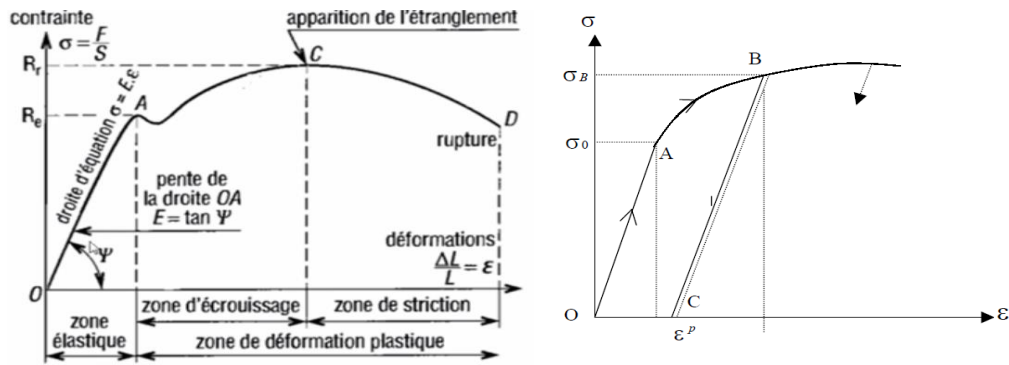


Figure I.4 : Expérience de traction simple pour un matériau écrouissable [5]

### I.2.6 La Ductilité

La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer, ou plutôt à s'étirer, sans rompre et en conservant sa nouvelle forme.

La plupart des métaux et alliages ont une excellente ductilité, comme le cuivre et l'aluminium. C'est ce qui le rend apte à fabriquer des fils ou des câbles.

### I.2.7 La fragilité

La fragilité est la capacité d'un matériau à se casser lorsqu'il est soumis à des contraintes.

Les céramiques telles que le verre ou la porcelaine sont des matériaux qui ont une bonne fragilité. Lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques, les céramiques se fissurent ou se cassent avant d'être déformées. Généralement, les matériaux qui sont fragiles ne sont ni ductiles ni malléables, mais ils peuvent être rigides.

### I.2.8 La ténacité

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure. On peut aussi définir la ténacité comme étant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de rompre. Pour déterminer la ténacité, l'échantillon utilisé doit donc avoir été déjà fissuré. (Figure I.5) [6]

$$K_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad [03]$$

Où  $a$  et  $\rho$  sont la longueur d'entaille et le rayon de courbure en fond d'entaille.

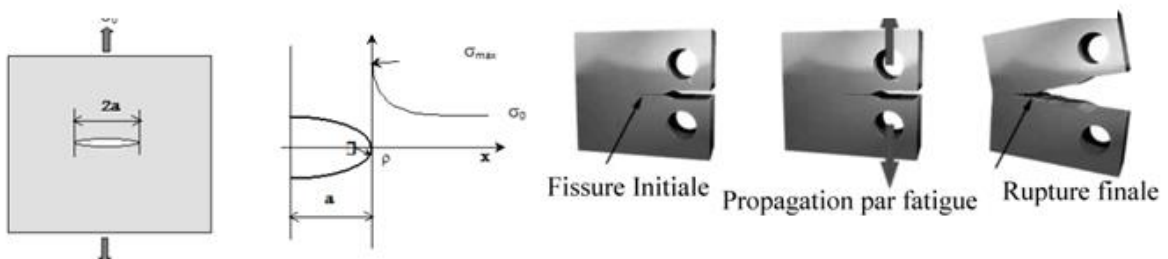


Figure I.5: Eproutette employée pour caractériser la propagation des fissures de fatigue.

## I.3 Caractérisation mécanique des matériaux

### I.3.1 Les sollicitations mécaniques

La résistance mécanique, au sens large, est souvent la performance qui guide le choix d'un matériau. Mais il s'agit de savoir à quelles sollicitations celui-ci sera soumis et quelle grandeur, parmi les nombreuses propriétés mécaniques, sera la plus pertinente pour effectuer ce choix.

La mécanique des solides sépare des sollicitations élémentaires, à partir desquelles on définira des grandeurs mécaniques spécifiques : [3]

#### I.3.1.1 La Traction

Le plus simple et le plus courant pour déterminer le comportement mécanique d'un matériau. Deux forces appliquées dans des sens opposés. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte déformation. (Figure I.6)

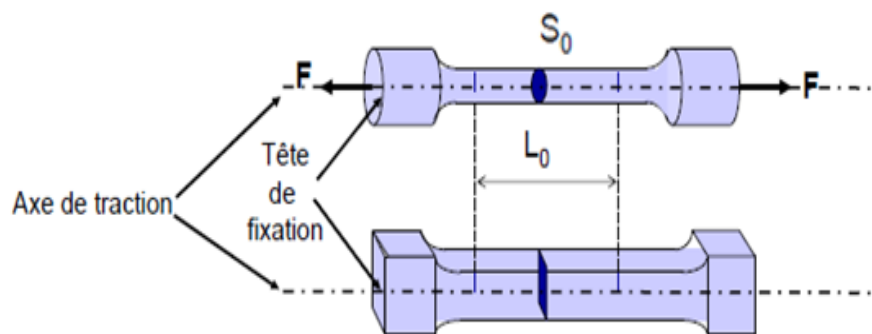
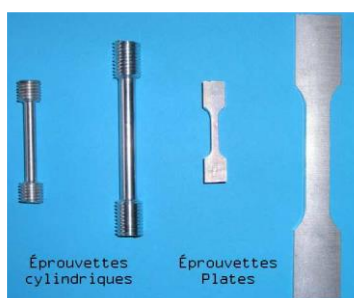


Figure I.6 : Epreuves de traction

#### I.3.1.2 La Compression

Deux forces appliquées l'une vers l'autre, Utilisé pour déterminer les contraintes de rupture des matériaux fragiles (béton, céramique..). Une éprouvette cylindrique soumise à deux forces axiales opposées (Figure I.7)

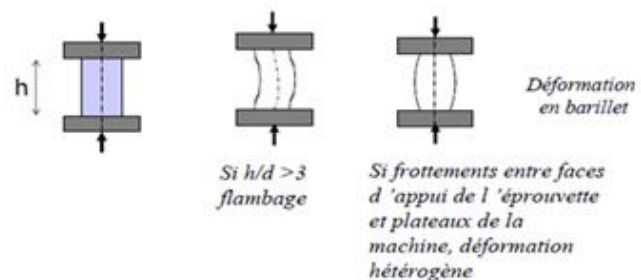
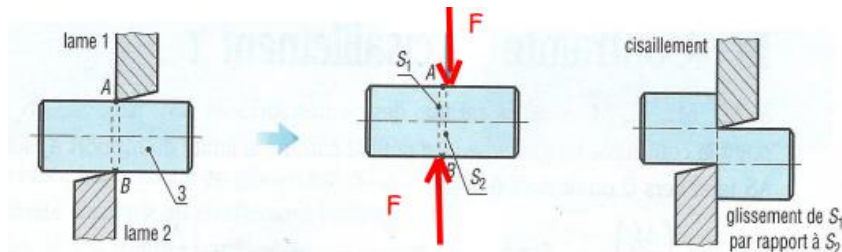


Figure I.7: Essais de compression

### I.3.1.3 Le Cisaillement

Deux forces parallèles et de sens opposés appliquées de façon légèrement décalée l'une par rapport à l'autre.

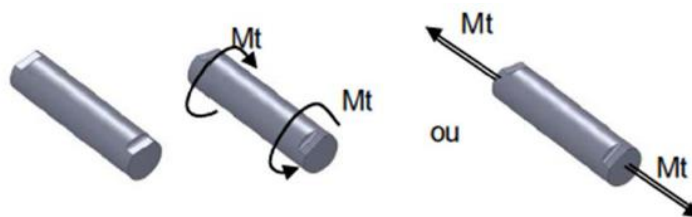
Une éprouvette est sollicitée au cisaillement si elle est soumise à des actions qui se réduisent à deux forces directement opposées, dans le même plan  $P$  perpendiculaire à la ligne moyenne. (Figure I.8)[6]



**Figure I.8:** Essai de cisaillement

### I.3.1.4 La Torsion

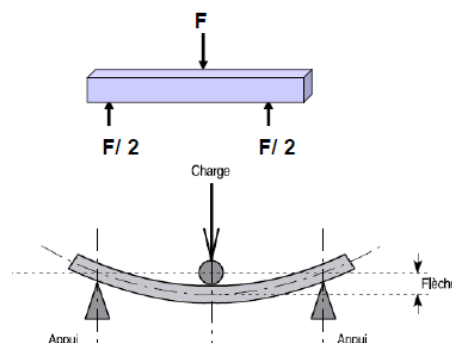
Une éprouvette est sollicitée à la torsion simple si elle est soumise à deux couples de moments opposés portés par la ligne moyenne. (Figure I.9)



**Figure I.9 :** Déformations en torsion

### I.3.1.5 La flexion

Une ou plusieurs forces parallèles et de sens opposés, appliquées à des endroits différents sur un objet. Même utilité que les essais de compression, il est peu utilisé pour les matériaux ductiles. (Figure I.10)[7]



**Figure I.10 :** Essai de flexion

## I.3.2 La notion de contrainte

Une contrainte est un effort par unité de surface qui s'exerce dans le matériau. S'exprime en MPa ou  $N/mm^2$ .

### I.3.3 Classification des essais mécaniques

#### I.3.3.1 Essai de traction

##### Principe

L'essai est réalisé sur une machine de traction (Figure I.11), en appliquant lentement et progressivement un effort de traction croissant, dont l'intensité varie de 0 jusqu'à  $F$ , sur une éprouvette maintenue solidement entre les mâchoires de la machine. Des appareils adaptés à la machine permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge (à l'aide d'un dynamomètre) et l'allongement de l'éprouvette (à l'aide d'un extensomètre).

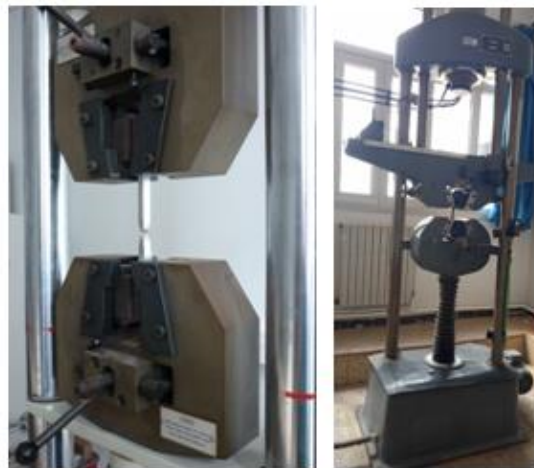


Figure I.11: machine de traction

##### Éprouvette

Les éprouvettes de l'essai de traction sont de forme généralement cylindrique ou plat, elles sont soigneusement polies et calibrées (Figure I.12).

La longueur de la partie calibrée  $l_0$  doit être proportionnelle à la section  $S_0$  selon l'expression suivante :

$$l_0 = 5.65\sqrt{S_0} \quad [mm] \quad [5]$$

où ( $l_0$ ) : longueur initiale entre repères en mm, et ( $S_0$ ): Section initiale de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>.

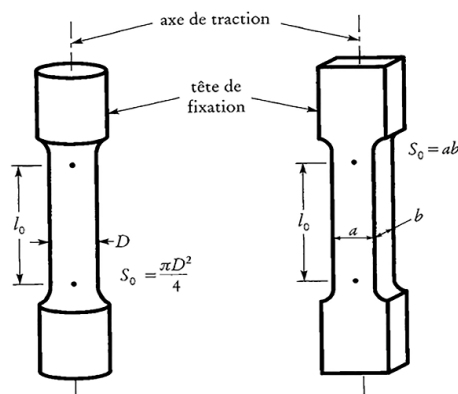


Figure I.12 : Eprouvette de traction

### Diagrammes du l'essai de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force  $F$  et l'allongement  $\Delta l$ , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte  $\sigma$ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette (contrainte conventionnelle). [3]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [N/mm^2] \quad [6]$$

De même la déformation  $\varepsilon$  se réfère à la longueur initiale  $L_0$  de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation conventionnelle). (Figure I.13)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [7]$$

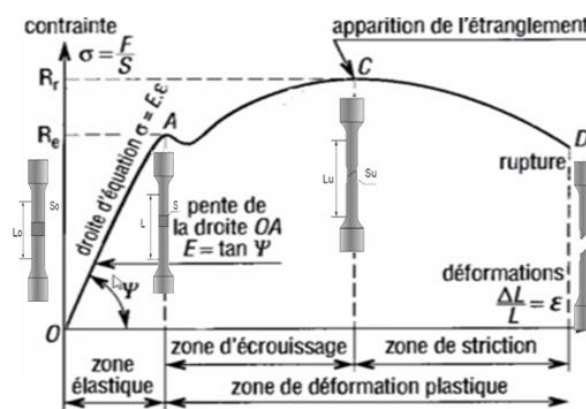


Figure I.13 : Courbe de traction conventionnelle

Cette courbe contient diverses régions :

- **OA : Domaine élastique** à déformation réversible; le point A marque la limite du domaine élastique (ou résistance élastique à la traction).

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [N/mm^2] \quad [8]$$

- **AC : Domaine plastique** de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie ; le point C il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [N/mm^2] \quad [9]$$

- **CD : Domaine de striction** ou de déformation plastique localisée. **D** : point de rupture de l'éprouvette ou la charge ultime. Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure  $L_u$  et  $S_u$  respectivement

L'allongement relatif total ou  $A\%$  de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} \% \quad [10]$$

Où  $L_u$  est la longueur de l'éprouvette après rupture.

La **striction** est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue, section de rupture (Figure I.14).

Le coefficient de striction  $Z\%$  traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_u - S_0}{S_0} \% \quad [11]$$

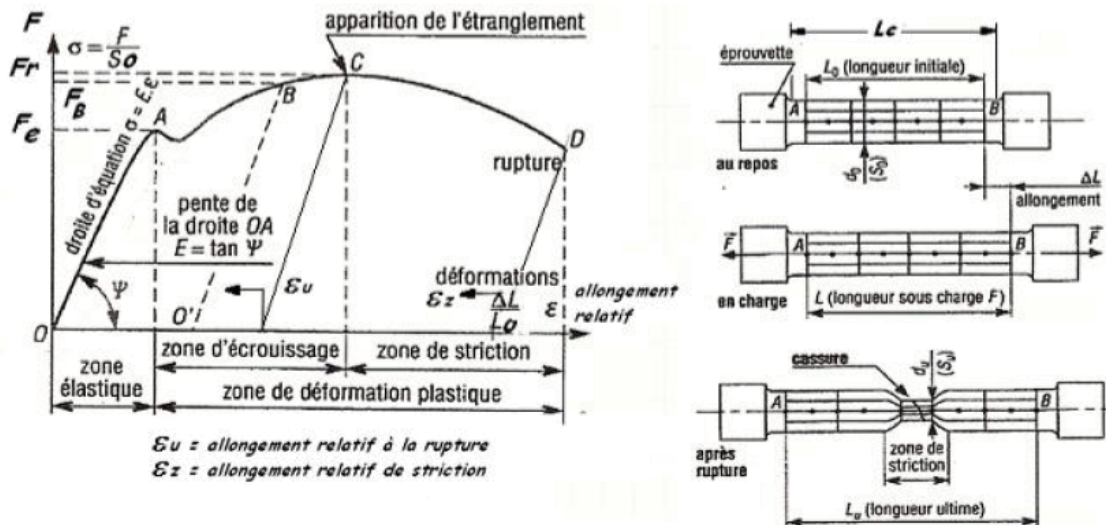


Figure I.14: Courbe de traction rationnelle

Sur cette courbe on distingue généralement les domaines suivants :

- **OA : Domaine élastique** ou linéaire (droite d'équation)  $\sigma = E \cdot \epsilon$  (E module d'Young). Entre ces deux points le matériau est élastique : c'est à dire que l'allongement est réversible.
- **AB : Domaine d'écrouissage** ou la Limite élastique conventionnelle  $R_{e0.2}$ ; le point B est à la charge maximale est acquise au début de la striction.
- **ACD : Domaine de plasticité** ou d'irréversibilité. Le point C correspond à l'effort maximal (passage à la striction)
- **CD Domaine d'endommagement** ou striction et le point D correspond à la rupture.

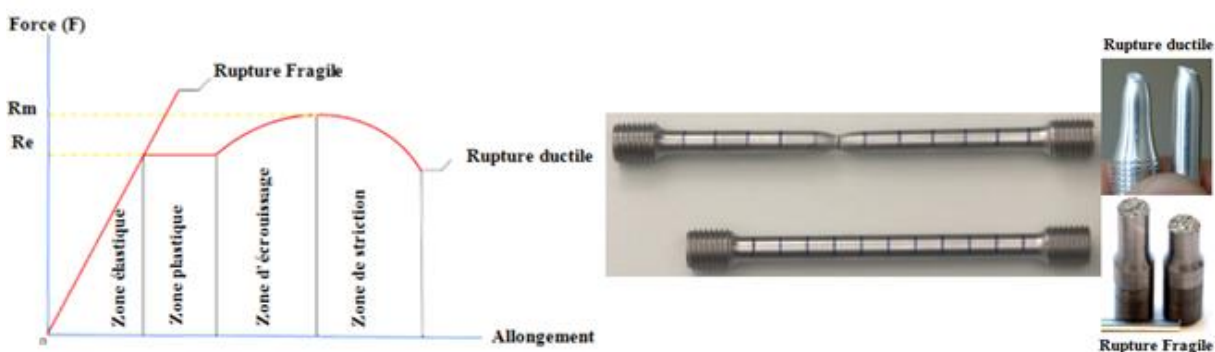


Figure I.15: Epreuve de traction cylindrique et son évolution en cours d'essai.

### I.3.3.2 Essai de compression

#### • Principe

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et les déformations au cours de l'essai.

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.[3]

- **La machine d'essai**

La machine d'essai est du type à vitesse de compression constante, elle est constituée de (Figure I.16):

- Un plateau fixe
- Un plateau mobile
- Un mécanisme d'entraînement de mouvement uniforme en vitesse contrôlée
- Un indicateur d'effort
- Indicateur de déformation



Figure I.16 : Machine d'essai de compression

- **Eprouvette de l'essai**

L'éprouvette doit être constituée d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités des éprouvettes doivent être parallèles et perpendiculaires à la direction de l'application de l'effort. (Tableau I.2)

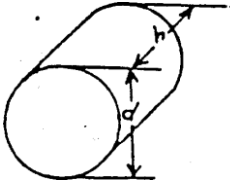
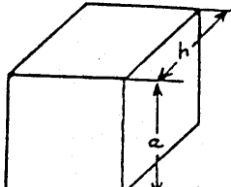
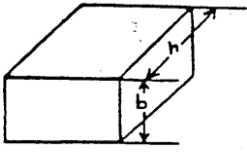
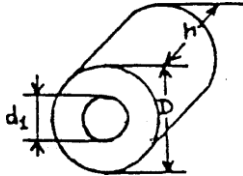
Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
			
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5 \sqrt{D^2 + d_1^2}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h = 1,5 \sqrt{D^2 + d_1^2}$

Tableau I.2 : Les éprouvettes d'essai de compression

### I.3.3.3 Essai de résilience

On peut définir la résilience comme étant le rapport de l'énergie cinétique absorbée nécessaire pour provoquer la rupture d'un matériau, à la surface de la section brisée. La résilience, qui s'exprime en joules par  $\text{cm}^2$  ( $\text{j}/\text{cm}^2$ ). Caractérise la résistance au choc.

#### • Principe de l'essai

Un marteau de masse  $m$  est fixé à l'extrémité d'un pendule, (Figure I.17). Le pendule peut tourner autour d'un axe horizontal dans un plan vertical. L'éprouvette est placée sur un support, au point le plus bas de la trajectoire du marteau. Pour effectuer le test, étendez le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale  $P$ , puis relâchez-le quand le pendule vient frapper l'éprouvette. L'essai est réalisé sur une machine appelée mouton pendule rotatif.

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. L'énergie obtenue, en négligeant les frottements, est définie par la lettre  $K$  en ( $\text{Joules}/\text{cm}^2$ ).

$$K = m \cdot g \cdot (h_0 - h_1) \quad (\text{J}/\text{cm}^2) \quad [12]$$

$m$  = masse du mouton-pendule [kg]

$g$  = Accélération de la pesanteur. [ $\text{m s}^{-2}$ ] (9.8066)

$h$  = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

$h_1$  = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]

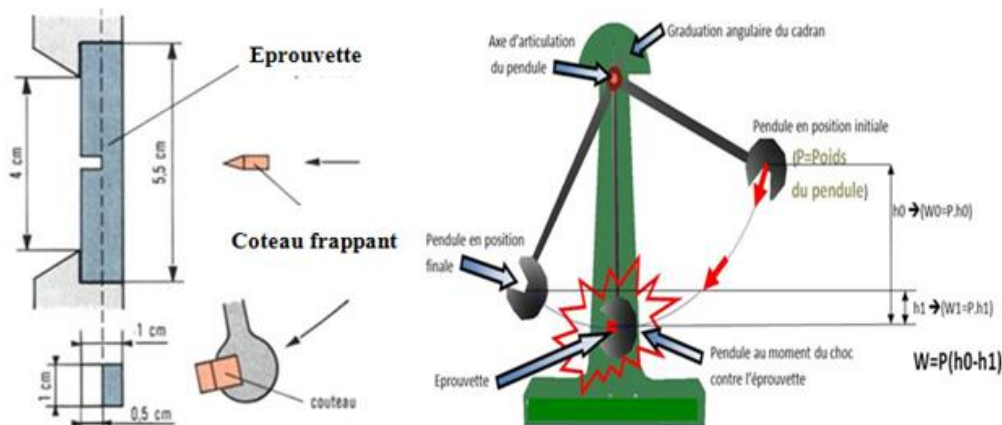


Figure I.17 : Schématisation de détermination de la résilience

#### • Machine de l'essai

Le mouton Pendule Charpy permettant de réaliser des essais de résilience avec une capacité disponible qui peut atteindre 750 Joules. Pour but de déterminer l'énergie absorbée lors de la fracture d'un l'échantillon entaillé. Le pendule se compose d'une partie (appelée base) en fonte et de deux support pour l'éprouvette, un pendule avec un bras, un système de levage électrique et un mécanisme de détente. Un affichage numérique permet de lire l'énergie absorbée par l'éprouvette. La sécurité est assurée par un carter de protection. (Figure I.18)

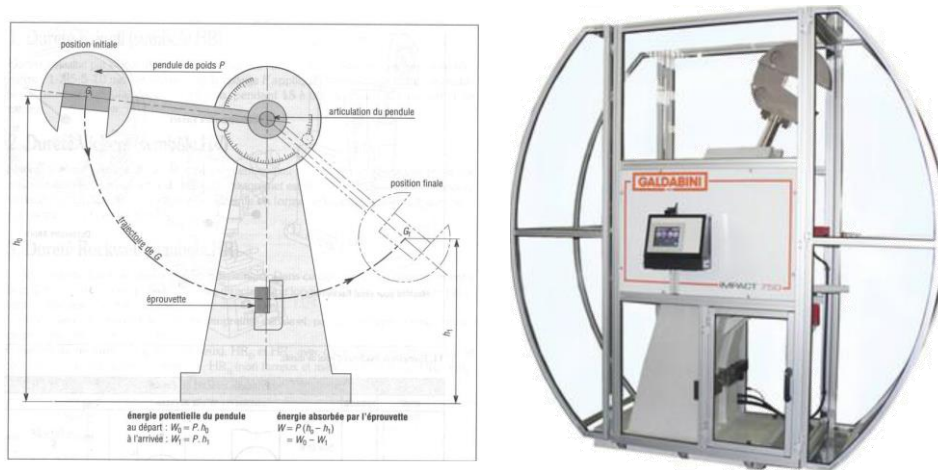


Figure I.18: Schématisation de la machine de résilience

• L'éprouvette de l'essai:

L'éprouvette de résilience est un barreau entaillé par usinage en son milieu. Il existe également deux types d'éprouvettes une avec entaille en forme U [7], et l'autre avec entaille en forme V. Les dimensions des deux types d'éprouvettes sont indiquées dans le tableau I.3. La figure I.19 représente les dessins des deux types d'éprouvettes. La valeur de la résilience du matériau est donnée selon le type d'éprouvette utilisée. Pour l'éprouvette avec entaille en V, la résilience est désignée en **KCV** et pour l'éprouvette en U est désignée en **KCU**.

Dimension en mm	Eprouvette en V	Eprouvette en U
Longueur	55	55
Hauteur	10	10
Largeur	10	10
Hauteur éprouvette a fond d'entaille	2	5
Angle à fond d'entaille	0.25	1
Angle de l'entaille	45°	Bords parallèles

Tableau I.3: Dimensions des éprouvettes de résiliences type V et U [8].

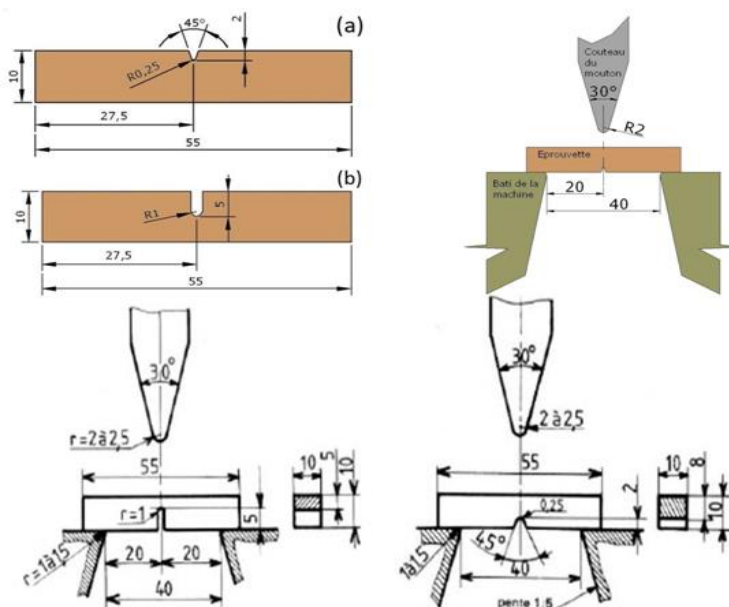


Figure I.19: Eprouvettes de résilience avec entaille en V et entaille en U.

- **Caractéristique obtenue**

La résistance au choc est définie comme étant l'énergie absorbée **W** ou de rupture rapportée à la surface de la coupe droite de l'éprouvette **S** dans la zone entaillée. On la note **K<sub>cv</sub>** ou **K<sub>cu</sub>** en J/cm<sup>2</sup>. Elle est exprimée par la relation [13] pour les deux types d'éprouvettes (en V et en U). (Figure I.20)

$$Kc = \frac{W}{S} \quad (\text{J/cm}^2) \quad [13]$$

Avec :

$$W = M \cdot g \cdot H = M \cdot g \cdot (h_0 - h_1) \quad (\text{J}) \quad [14]$$

Alors La résilience est égale à :

$$K_{CU}, K_{CV} = \frac{M \cdot g \cdot (h_0 - h_1)}{S} \quad (\text{J/cm}^2) \quad [15]$$

**W** : Energie (travail de rupture) en Joules

**S** : La section à fond d'entaille en cm<sup>2</sup>.

**M** : masse du mouton-pendule [kg]

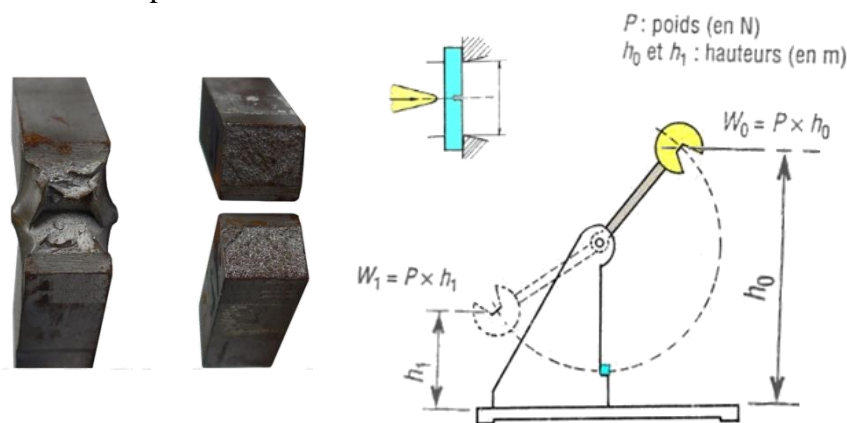
**g** : Accélération de la pesanteur. [m s<sup>-2</sup>] (9.8066)

**H = h<sub>0</sub> - h<sub>1</sub>** Différence de hauteur de remonté du mouton entre la remonté à vide et la remonté après bris de l'éprouvette.

**h<sub>0</sub>** : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

**h<sub>1</sub>** : hauteur du mouton-pendule à sa  
d'arrivée [m]

position



**Figure I.20** : Calcul de l'énergie dissipée dans un choc.

### I.3.3.4 L'essai de fatigue

- **Le Principe**

Desserrer le mandrin de l'arbre de transmission (8). Puis, faire introduire l'extrémité gauche de l'éprouvette à travers le trou du mandrin. Insérer l'éprouvette désirée (8) aux mandrins (6) et assure que ses axes sont pivotés.

Après, insérer l'extrémité droite de l'éprouvette dans le mandrin, et serrer bien le mandrin. Mettre le nombre de cycle au tableau de commande (02) à zéro. Charger le support de charge par la charge désirée. Connecter la machine à l'alimentation électrique par le générateur et allumer la machine. La fin de course arrête automatiquement la machine lorsque la pièce est cassée.

• **Machine d'essai**

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue ; selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), (Figure I.21) et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.). Le tableau 4 montre la description de la machine d'essais de fatigue.



**Figure I.21:** La machine d'essai de fatigue en flexion rotative

Repère	Désignation	Repère	Désignation
01	Châssis	06	mandrin
02	Tableau de commande	07	Palier lisse
03	Compteur	08	Eprouvette
04	Moteur électrique	09	La charge applique
05	Arbre de transmission	10	Poids de la charge

**Tableau I.4 :** Description de la machine d'essais de fatigue

• **Eprouvette de l'essai**

Le choix de l'éprouvette d'essai dépend de l'essai que l'on veut effectuer et de la machine dont on dispose. Les éprouvettes, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable, entaillées ou lisses. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable (Figure I.22).



**Figure I.22 :** Eprouvette en acier de structure et toroïdale pour essai de fatigue

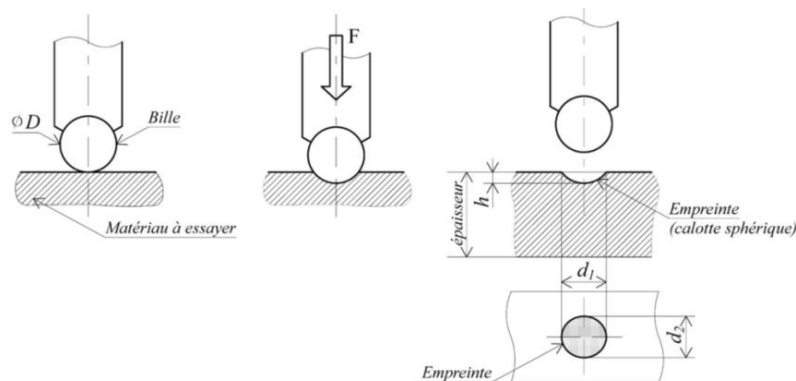
### I.3.3.5 Essai de dureté

#### • Principe

Les essais consistent à enfoncer un pénétrateur dans le matériau. La charge est constante pendant un temps donné et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est mou, ce test de dureté permet de caractériser les matériaux et de déterminer s'ils sont adaptés à leur utilisation. La dureté est un nombre qui par convention est donnée sans unité.

#### Essai de dureté Brinell

Il consiste à enfoncer dans la pièce à essayer une bille, généralement en acier (HBS) ou en carbure de tungstène (HBW), de diamètre **D** sous une charge constante **F**. On mesure ensuite le diamètre **d** de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté Brinell, notée **HB**, (Figure I.23)



**Figure I.23 :** Principe de l'essai de Brinell

**D** : diamètre de la bille (mm)

**d** : diamètre de l'empreinte (mm).

**h**: profondeur de l'empreinte (mm).

**F** : charge de l'essai (daN).

L'empreinte de la bille produit sur le matériau une calotte sphérique de diamètre **d** qui sera mesuré.

On

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{0.102xF}{S} \quad [16]$$

$$HB = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [17]$$

Avec  $P$ , La charge appliquée ( $P = F/g = 0,102 F$ ).

$D$  : Diamètre de la bille en mm (les plus utilisées: 10, 5 et 1mm)

$d$  : Diamètre de l'empreinte  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  en mm.

$h$  = profondeur de l'empreinte  $h = \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$  en mm.

$g$  : Accélérations de la pesanteur  $9.81$  en  $ms^{-2}$

$$S = \pi \cdot D \cdot h = \pi \cdot D \cdot \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad [18]$$

### Essai de dureté Vickers

Le principe de l'essai Vickers est le même que celui de l'essai Brinell, seule la forme du pénétrateur change.

L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite en diamant, à base carrée, d'angle au sommet égal à  $136^\circ$ , sous une charge  $F$  bien déterminée, et à mesurer sur l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  (Figures. I.24, I.25). La mesure est effectuée à l'aide d'un système optique approprié.

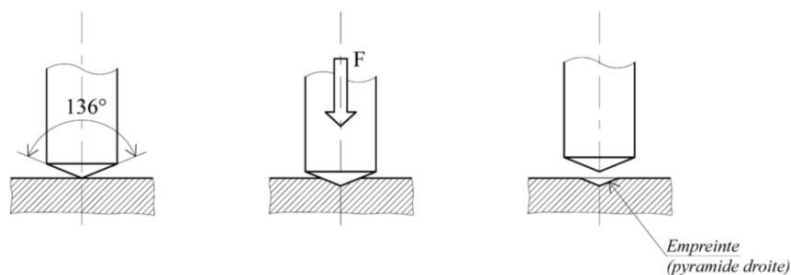


Figure I.24 : Principe de l'essai Vickers

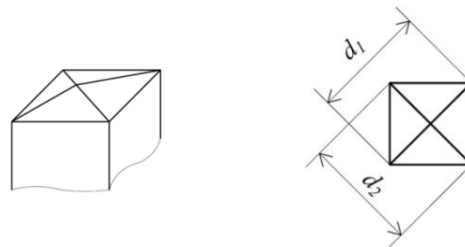


Figure I.25 : Géométrie du Pénétrateur Vickers

La dureté Vickers HV est un nombre proportionnel au rapport  $F/S$ , où  $S$  est la surface de l'empreinte considérée comme pyramide droite en déduit

$$HV = 0.102 \times \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad [19]$$

Soit :

$$HV = 1.8544 \times \frac{F}{d^2} \quad [20]$$

$$d = \text{diagonale de l'empreinte} = d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad [21] \quad (\text{Figure I.25})$$

### Essai de dureté Rockwell

Il consiste à imprimer en deux temps une charge et une surcharge dans la couche superficielle de la pièce à l'aide d'un pénétrateur de forme conique ou sphérique (cône en diamant ou bille en acier) (Figure I.26, I.27).

L'essai Rockwell consiste à mesurer à l'aide d'un comparateur fixé sur le pénétrateur l'accroissement rémanent  $h$  de la profondeur.

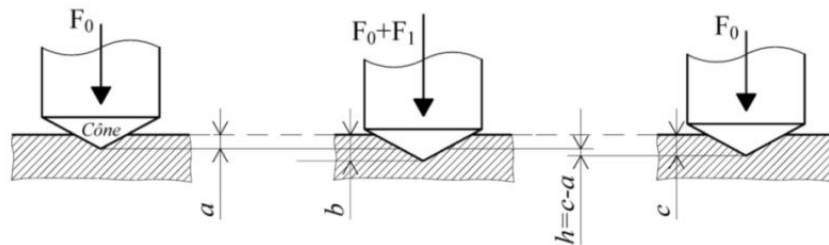


Figure I.26 : Principe de l'essai Rockwell avec cône.

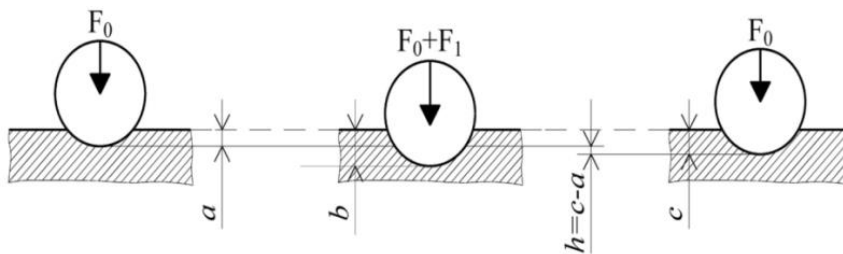


Figure I.27 : Principe de l'essai Rockwell avec bille.

L'essai se déroule comme suit :

- Le pénétrateur, étant perpendiculaire à la surface à essayer, est soumis à une charge initiale  $F_0$  (généralement de 10 kgf) entraînant une pénétration  $a$  qui servira d'origine de mesure.
- Par la suite on ajoute au pénétrateur une surcharge  $F_1$  appliquée progressivement et sans chocs, (généralement égale à 50, 90 ou 140 kgf) qui entraîne un accroissement de la pénétration jusqu'à  $b$ .
- On enlève la surcharge  $F_1$  pour revenir à la charge initiale  $F_0$ . La pénétration décroît sous l'effet du retour élastique et se stabilise à une valeur finalement  $c$ .

L'indicateur d'enfoncement, qui est un comparateur aux microns, donne alors la valeur de l'accroissement rémanent  $h$  qui est la différence entre la pénétration  $c$  sous  $F_0$  à la fin de l'essai et la pénétration  $a$  sous  $F_0$  mais au début de l'essai. La formule utilisée étant : avec  $h=c-a$  exprimé en

mm. Le tableau I.5 montre le calcul de la dureté pour les différentes échelles de dureté Rockwell.

Les deux échelles de dureté Rockwell les plus utilisées sont :

- Echelle de dureté Rockwell C

- Echelle de dureté Rockwell B

HRA HRC HRD	Dureté Rockwell= $100 - \frac{h}{0.002}$
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	Dureté Rockwell= $130 - \frac{h}{0.002}$
HRN HRT	Dureté Rockwell= $100 - \frac{h}{0.001}$

**Tableau I.5** : Le calcul de la dureté pour les différentes échelles de dureté Rockwell.

## **LES ACIERS**

### **I.4 Introduction**

L'acier est un matériau de grand intérêt industriel en raison de sa polyvalence. La métallurgie, l'industrie des machines, l'industrie de la construction utilisent toutes l'acier comme matériau de base. La grande variété de ses nuances et la possibilité de traitement thermomécanique des propriétés mécaniques de ces aciers lui permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage et donc à la composition de l'alliage et au traitement thermique appliqué. Enfin, leur faible coût présente un grand intérêt pour leur utilisation. Les éléments d'alliage jouent un rôle majeur dans les différentes phases de transformation de l'acier. Par conséquent, l'étude de leur rôle, de leurs effets et des conditions dans lesquelles ils se produisent est une étape importante dans la compréhension des différentes propriétés des alliages. Ces éléments influent sur les différentes propriétés en modifiant les transformations, leur cinétique, et par conséquent, les microstructures obtenues.

#### **I.4.1 Définition des aciers**

Les aciers sont essentiellement composés de fer qui peut avoir différentes structures cristallographiques. A ce fer, s'ajoutent du carbone et d'autres éléments, sous forme d'atomes en solution solide ou de composés (précipités, inclusions). La microstructure finale d'un acier dépend donc de la nature et de la teneur de tous ces éléments ainsi que du procédé de fabrication.

Un acier est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est  $\leq 2$  %. Les considère les quatre familles suivantes :[9]

#### **I.4.2 Les différentes familles d'aciers**

Il existe trois grandes familles d'aciers : les aciers non-alliés, les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés.

##### **I.4.2.1 Les aciers d'usage général**

La première famille des aciers non-alliés regroupe les aciers d'usage général utilisés dans le BTP et les aciers non-alliés spéciaux utilisés plutôt dans les outils, les moules ou les pièces mécaniques soudables, malléables ou forgeables.

##### **I.4.2.2 Aciers à outils**

Sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, outils de coupe, cisailles, marteaux, burins...etc. Les caractéristiques d'utilisation des aciers à outils sont semblables à celles des aciers alliés, mais elles exigent l'amélioration d'un certain nombre de propriétés : la dureté, la trempabilité ; la tenue à chaud, la ténacité, la résistance et la résistance aux chocs thermiques.[10]

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés à plus de 0,5 % C. Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.
- Une forte résistance mécanique.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

➤ **Aciers à outils de la classe 1**

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Avec une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65 HRC).

➤ **Aciers à outils de la classe 2**

Ce sont les aciers à outils alliés pour travail à froid. De même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C.

➤ **Aciers à outils de la classe 3**

Ce sont des aciers à outils pour travail à chaud. Dans cette catégorie d'aciers, on peut distinguer deux classes principales :

- Les aciers au Cr-W-Mo-V.
- Les aciers au Ni-Cr-Mo.

➤ **Aciers à outils de la classe 4**

Cette classe contient les aciers à coupe rapide. Les aciers à coupe rapide ou simplement les aciers rapides sont caractérisés par :

- Une bonne tenue à chaud.
- Une bonne dureté.
- Une résistance mécanique et une tenue à l'usure élevée.
- La propriété de garder la structure martensitique à chaud à 600°C.[11]

### **I.4.2.3 Aciers des traitements thermiques**

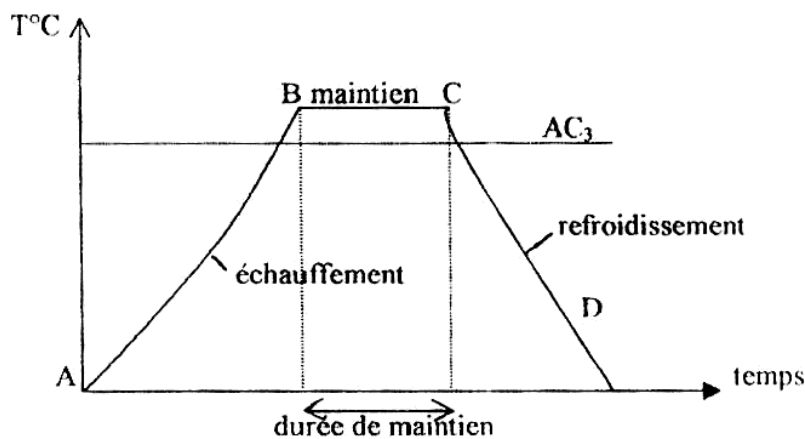
Les aciers alliés ou non alliés de traitements thermiques sont définis en fonction de leur composition. La composition chimique de ces aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.

**1. Aciers non alliés :** Ces aciers sont, en fait, intermédiaires entre les aciers d'usage général de type A et les aciers fins de type XC; on peut leur faire subir un traitement thermique mais les caractéristiques mécaniques obtenues peuvent être assez variables d'un lot à l'autre et même à l'intérieur d'un même lot.

**2. Aciers alliés :** On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

- **Aciers faiblement alliés :** Ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.
- **Aciers fortement alliés :** Dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5%.

Les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure. I.29).[12]



**Figure I.28 :** Procédé de traitement thermique

#### I.4.2.4 Aciers inoxydables :

L'acier inoxydable est une des trois grandes familles d'aciers qui présente une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (Déformation irréversible). C'est un acier fortement allié, ses applications sont multiples: chimie, nucléaire, mais aussi couteaux et équipements ménager, contiennent au moins 12% de chrome.

Les éléments d'addition (chrome, aluminium, silicium) se dissolvent dans le fer et forment, pendant l'échauffement de l'acier, des couches protectrices d'oxydes tels que  $(Cr, Fe)_2O_3$ ,  $(Al, Fe)_2O_3$ . Au fur et à mesure que la teneur des éléments d'addition est élevée, plus la tenue à la corrosion s'élève en température :

- Avec (5 à 8) % Cr, on peut atteindre  $T = (700 \text{ à } 750)^\circ\text{C}$ .
- Avec (15 à 17) % Cr, on peut atteindre  $T = (950 \text{ à } 1000)^\circ\text{C}$
- Avec 25 % Cr et 5 % Al, on peut atteindre  $T = 1300^\circ\text{C}$ .

Les aciers à haute tenue à la corrosion peuvent être classés en deux groupes principaux : les aciers alliés au chrome qui, après refroidissement à l'air obtiennent une structure martensitique ou ferritique et les aciers alliés au chrome-nickel à structure austénitique.[12]

➤ **Aciers inoxydables au chrome**

L'addition à l'acier entre 12 et 14% de chrome.

➤ **Aciers inoxydables au chrome-nickel**

Ce sont des aciers austénitiques, additionnés généralement de chrome, nickel ou de manganèse.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une définition pour l'ensemble des aciers, présenté leurs Propriétés mécaniques et enfin cité les différents essais mécaniques.

**Référence**

- [1]. UVED université virtuelle environnement & développement durable, Le comportement mécanique des solides. [http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteA/co/A\\_3\\_C\\_1.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteA/co/A_3_C_1.html)
- [2]. A.U. 2014/2015, TLILI A., Chapitre 4 : Les essais mécaniques, p 26
- [3]. SAHOUR Mounir, M. CHAGOUR Hichem, M. ARHAB Ali, Caractérisation d'un matériau à haute résistance (42 CD 4) Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de licence Année: 2017-2018
- [4]. BOUDJELLAL.T& HACHEROUF .A, (Amélioration Des Caractéristiques Mécaniques D'un Aciers par des Différents Techniques) Mémoire de fin d'étude, En vue de l'obtention du diplôme de: MASTER En Génie Mécanique, Option : Génie des Matériaux, année 2019/2020
- [5]. KERBOUA Youcef, université des frères Mentouri de Constantine, faculté des sciences de la technologie, département de génie mécanique, Fascicule de TP: Essai de traction, 2ème année licence : Génie mécanique et aéronautique, 2015-2016
- [6]. Ecole-de-technologie-superieure/entretien-rehabilitation-et-gestion-des-routes/7-classification-des-aciers-et-des-fontes.
- [7]. BENSAADA Said, traitements thermiques, Classification et désignation des aciers et fontes.
- [8]. E. Callisterwd, Propriétés Mécaniques Des Matériaux, Science Et Génie Des Matériaux.
- [9]. L.Colombier, les aciers à outils et leur traitement thermique, 1971, Pycedition, Paris.
- [10]. M. Colombie, Matériaux industriels, matériaux métallique ; Dunod, Paris 2000.
- [11]. Fédération Française de l'Acier, Comment fabrique-t-on l'Acier, juillet 2012.
- [12]. R. L'eveque. Traitement superficiels des aciers à outils, Techniques de l'Ingénieur,1993, M1135, Paris, France.

**CHAPITRE II**  
**LES TRAITEMENTS**  
**THERMOCHEMISTIQUES**

## CHAPITRE II : LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES

II.1	Introduction :.....	27
II.2	La cémentation.....	27
II.3	Techniques de cémentation :.....	27
II.4	Profondeur de cémentation :.....	28
II.5	Traitement thermique de l'acier après cémentation.....	28
II.6	Aciers pour cémentation :.....	29
II.7	Le diagramme d'équilibre fer-carbone.....	29
II.8	Les alliages fer-carbone.....	30
II.9	La constitution des aciers au carbone.....	30
	Conclusion.....	33
	Référence.....	34

## LISTE DES FIGURES

Figure II.1 : Le diagramme de phase fer-carbone .....	30
Figure II.2 : Micrographie représentant de la ferrite $\alpha$ .....	31
Figure II.3 : Micrographie représentant de l'austénite. ....	31
Figure II.4: Micrographie représentant de cémentite. ....	31
Figure II.5: Micrographie représentant de perlite. ....	32

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau II.1 : Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation.....	29
---	----

## II.1 Introduction :

Les technologies de traitements des matériaux métalliques relèvent d'une somme de connaissances allant de l'identification des comportements des pièces mécaniques et des matériaux qui les constituent à la compréhension des mécanismes qui les gouvernent et des effets bénéfiques qu'ils apportent. Les professionnels ont besoin de comprendre, choisir, mettre en œuvre et évaluer les procédés de Traitements Thermiques et de Traitements de surface.

Ce chapitre explique les processus généraux de cémentation et les mécanismes de mise en œuvre sur le plan théorique et pratique.

Il existe de nombreux types de traitements thermochimiques ayant pour but d'améliorer la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage, à la corrosion...etc, on se limitera à décrire quelques traitements à savoir la cémentation par le carbone.

## II.2 La cémentation

La cémentation est le procédé le plus ancien de la saturation de la surface de l'acier par le carbone. Elle est utilisée afin d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à une température supérieure à  $AC_3$ , le plus souvent entre 850°C et 1000°C [1].

Le traitement se décompose en deux phases distinctes :

- Enrichissement de la surface en carbone à haute température (généralement 900 à 980°C).  
On distingue trois types de cémentation suivant l'état du milieu cémentant : cémentation solide, cémentation liquide, cémentation gazeuse.
- Trempe de la pièce afin d'obtenir une structure martensitique en surface (< 900 HV) et une structure plus douce (bainite) à cœur. La trempe est réalisée soit directement :
  - Après cémentation (trempe directe)
  - Soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur.
- Un éventuel revenu de détente (entre 180°C et 200°C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600HV à 760HV.

## II.3 Techniques de cémentation :

On distingue trois types de cémentation suivant l'état du milieu cémentant : cémentation solide, cémentation liquide, cémentation gazeuse [2].

### a. Cémentation solides :

Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon et de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 à 950°C).

Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum  $BaCO_3$ .

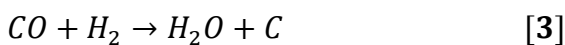
### **b. Cémentation liquide :**

Le milieu liquide est un bain de sels en fusion riche en produits carburants, dans lequel on immerge les pièces. Ce procédé fortement développé pour des raisons essentielles sont liées à l'environnement et aux conditions de travail et principalement à la nature cyanurée de ces bains.

Des formulations sans cyanure ont été développées pour s'affranchir de cet aspect mais l'efficacité relative de ces formules et les contraintes des bains de sels même exempts de cyanures n'ont pas permis de maintenir la place de cette technique par rapport aux procédés gazeux.

### **c. Cémentation gazeuse :**

Le traitement est réalisé dans un four étanche dans lequel on maintient une atmosphère contrôlée constituée d'un gaz support auquel on ajoute si nécessaire, pour atteindre le potentiel carbone souhaité, un gaz d'enrichissement en carbone, les réactions principales de cémentation gazeuse sont:



Les proportions de CO et H<sub>2</sub> varient selon le mode d'élaboration de l'atmosphère.

## **II.4 Profondeur de cémentation :**

La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface.

Généralement la profondeur maximum de pénétration est de 2 mm, donc il est exigé que les différentes opérations d'usinage doivent être réalisées avant le traitement de cémentation, c'est à dire, les pièces à cimenter sont fournies après l'usinage qui doit prévoir alors une surépaisseur de rectification de 0,05 à 0,1 mm, ou après finition. La couche traitée peut être caractérisée par le profil de micro-dureté qui permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée " profondeur conventionnelle de cémentation". Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550HV, [3].

## **II.5 Traitement thermique de l'acier après cémentation**

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 également de :

- Corriger la structure et affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée, qui augmente pendant le long séjour à une température de cémentation élevée.
- Obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques du cœur.
- Eliminer le réseau de carbone dans la couche cémentée qui peut apparaître par suite de la sursaturation en carbone. [4]

## II.6 Aciers pour cémentation :

Ce sont des aciers à grain fin et à basse teneur en carbone. Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation se classent en six familles indiquées dans le tableau II.1 : .[5]

Types d'aciers	Nuances
Aciers au carbone	C10-C12-C18
Aciers au manganèse-chrome	16MoCr5-20MoCr5
Aciers au chrome-molybdène	18CrMo4
Aciers au nickel-chrome	10NiCr6-16NiCr6-20NiCr6-14NiCr11
Aciers au nickel-chrome-molybdène	20NiCrMo2-18NiCrMo6
Aciers au bore.	21Bo3-20MoBo5-19NiCrMoBo2

**Tableau II.1** : Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation

## II.7 Le diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme fer-carbone figure 2 décrit les différents états du mélange fer et carbone selon la proportion de fer et de carbone dans le mélange. Au-dessus de 2,11% de carbone on parle de fontes, en dessous de cette concentration on parle d'acier. Ce diagramme permet de visualiser la forme d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone.

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. La structure du fer pur dépend de la température :

En dessous de 721°C et au-dessus de 1394°C, le fer (fer  $\alpha$ ) a une structure cristalline cubique centré (structure cristalline à température ambiante). Il est doux, très malléable.

Entre 723°C et 910°C jusqu'à 1394°C, le fer (fer  $\gamma$ ) a une structure cristalline cubique à faces centrées. On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

- Les aciers hypoeutectoïdes (de 0,008 à 0,8 % de carbone) qui sont les plus doux, ils sont composés de ferrite et de perlite.

- Les aciers eutectoïde (0,8% de carbone), ils sont composés de perlite (structure lamellaire).
- Les aciers hypereutectoïdes (de 0,8 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs, ils sont composés de perlite et de cémentite.

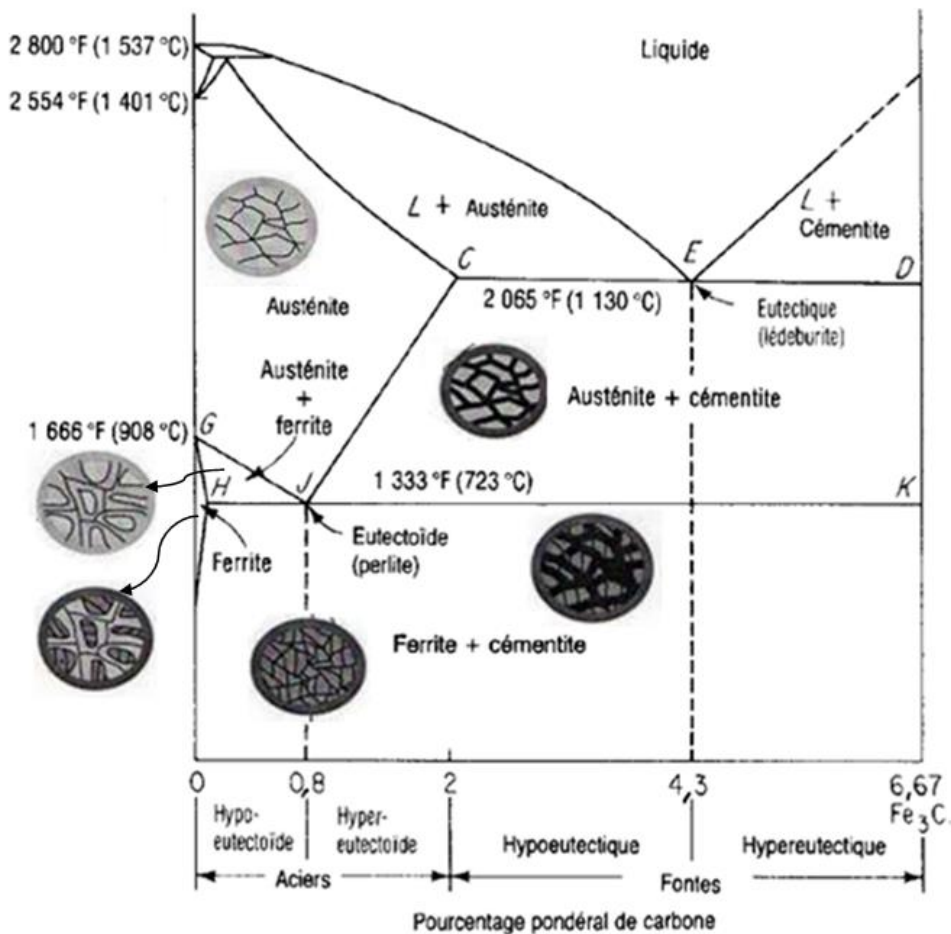


Figure II.1 : Le diagramme de phase fer-carbone

## II.8 Les alliages fer-carbone

On rencontre deux types d'alliages fer-carbone :

- ceux qui contiennent du carbone à l'état libre sous forme de graphite (fonte);
- ceux où l'on trouve le carbone dissous dans un composé intermétallique appelé carbure de fer ou cémentite,  $\text{Fe}_3\text{C}$  (acier).

Dans l'acier ou la fonte blanche, on trouve le carbone sous forme de cémentite. Dans la fonte grise, il y a cohabitation des deux formes de carbone (graphite et cémentite). [6]

## II.9 La constitution des aciers au carbone

Trois solutions solides de base constituent les aciers au carbone.

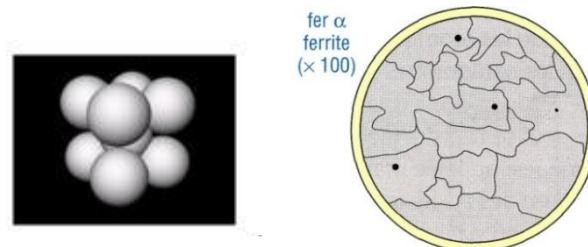
### a- La ferrite $\alpha$

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\alpha$ , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ( $\text{HB} \approx 80$ ), peu tenace ( $\text{R} \approx 300 \text{ MPa}$ ), mais très ductile ( $\text{A} \approx 35\%$ ).

Les dimensions réduites de ces espaces limitent de façon très importante le nombre d'atomes de carbone insérés. Le pourcentage maximal de carbone dissous dans la ferrite est de :

- 0,006 % à 20 °C;
- 0,020 % à 723 °C.

Comme sa teneur de carbone est négligeable, on peut considérer la ferrite comme du fer  $\alpha$ . [7]



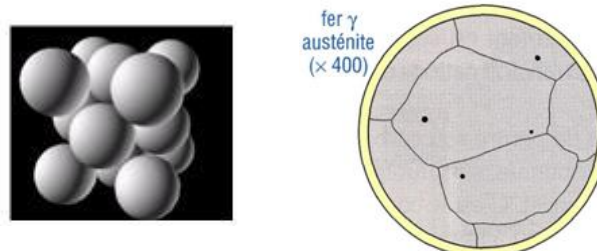
**Figure II.2 :** Micrographie représentant de la ferrite  $\alpha$

### b- La ferrite $\delta$

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer  $\delta$ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

### c- L'austénite $\gamma$

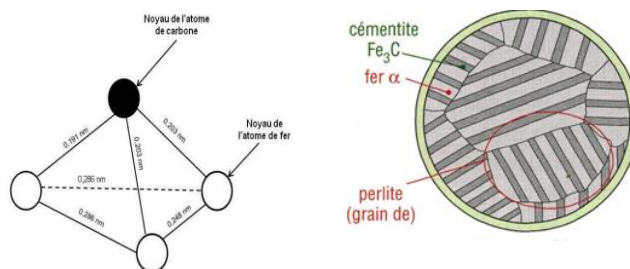
Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer  $\gamma$ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint  $\approx 2\%$  C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.



**Figure II.3 :** Micrographie représentant de l'austénite.

### d- La cémentite (Carbone de fer $\text{Fe}_3\text{C}$ )

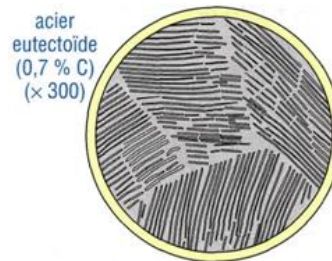
La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile. [8]



**Figure II.4:** Micrographie représentant de cémentite.

**e- La perlite**

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ( $HB \approx 200$ ), résistante ( $R_m \approx 850 \text{ MPa}$ ) et assez ductile ( $A\% \approx 10$ ).



**Figure II.5:** Micrographie représentant de perlite.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons défini ce qu'est un traitement thermochimique, et nous avons été essentiellement intéressés par la cémentation qui est une méthode de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une couche à haute teneur en carbone.

**Référence**

- [1]. M.M. BCHAUPINIL, L.SERAPLIR, R.TRIWT: 'Analogies et différence entre les Traitements de carbonituration et de cémentation', Aciers spéciaux №13, 1975.
- [2]. R. L'EVEQUE. Traitement superficiels des aciers à outils, Techniques de l'Ingénieur, 1993, M1135, Paris, France.
- [3]. H. HERNS, H. Fr. HINZ and I. M. Hucklenbroich: 'Progress in tool steel', Proceeding of The 4th international Conference on tooling, 1996, University Bochum.
- [4]. Technique de l'ingénieur M1226.
- [5]. SCEI-concours.fr/tipe/TIPE\_2009/sujets\_2009/SI\_PT\_2009(dossier\_principal).
- [6]. Technique de l'ingénieur M 1222.
- [7]. P. LEFLOCH, O.FANCOIS : Etude de cas (traitement thermochimique) ; 1985/1986.
- [8]. J. BARALLIS et G. MAEDER : Extrait de précise de métallurgie ; 2003/2004.

**CHAPITRE III**  
**PREPARATION DES**  
**EXPERIENCES**

# SOMMAIRE

## CHAPITRE III : PREPARATION DES EXPERIENCES

III.1 Introduction :.....	35
III.2 Objectifs :.....	35
III.3 Environnement expérimental :.....	35
III.3.1 Matériau d'étude : .....	35
III.3.2 Préparation des échantillons pour le traitement : .....	36
III.3.2.1 La phase de Découpage : .....	36
III.3.2.2 La phase de Rectification :.....	37
III.3.3 Technique de traitement thermo-chimique et thermique : .....	37
III.3.3.1 La phase de Cémentation :.....	38
III.3.3.2 La phase de la trempe : .....	38
III.3.3.3 La phase du revenu : .....	39
III.3.4 Préparation des échantillons après traitement :.....	39
III.3.4.1 La phase de Découpage : .....	39
III.3.4.2 La phase de Polissage : .....	39
III.3.4.3 La phase d'Attaque chimique :.....	40
III.3.4.4 Analyse et mesurage des couches cémentées par microscope optique : .....	41
III.3.5 Caractérisation des couches cémentées par dureté :.....	41
III.3.6 Caractérisation des couches cémentées par analyse chimique : .....	42
Conclusion :.....	43
Références .....	44

## LISTE DES FIGURES

Figure III.1 : Spectromètre à émission optique SPECTROMAX. ....	35
Figure III.2 : Préparation des éprouvettes.....	36
Figure III.3 : Machine fraisage et tournage .....	36
Figure III.4: Rectifieuse plane.....	37
Figure III.5: Chaine de traitement thermique SOLO.....	37
Figure III.6: La machine de tronçonnage Mecatome T260. ....	39
Figure III.7 : Papier abrasif.....	40
Figure III.8: Machine de polissage automatique.....	40
Figure III.9 : La solution d'attaque chimique .....	40
Figure III.10: Equipement de microscope optique Leika .....	41
Figure III.11: Appareil de Micro- dureté.....	41

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier XC20.....	35
Tableau III.2: Paramètres de traitement thermochimique. ....	38

### III.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, une synthèse des références a montré l'influence du traitement thermo-chimique sur la couche superficielle de l'acier XC20 et ses propriétés mécaniques et physico-chimiques.

Des méthodes expérimentales ont été utilisées pour valider notre étude bibliographique et pour mieux mesurer la qualité du phénomène. Enfin, la microstructure de l'acier XC20 a été étudiée par spectroscopie d'émission optique à étincelles pour voir sa transformation.

### III.2 Objectifs :

Le but de cette étude était d'une part d'étudier l'effet des paramètres de cémentation (débit de carbone, température et temps de maintien) sur la micro-dureté, la microstructure, l'épaisseur de surface traitée et sur les forces de choc (résilience).

### III.3 Environnement expérimental :

L'environnement expérimental renferme tous les facteurs maintenus constants pendant les essais, il est composé principalement de :

#### III.3.1 Matériau d'étude :

Le matériau objet de cette étude est un acier faible au carbone dont la composition chimique est reportée dans le tableau III.1 qui a été réalisée grâce à l'utilisation d'une spectrométrie d'émission optique à source étincelle couplée à un ordinateur (Figure III.1), afin de déterminer les pourcentages de chaque élément contenu dans l'échantillon de l'acier XC20.



**Figure III.1 :** Spectromètre à émission optique SPECTROMAX.

Element	C	Mn	Si	S	Cu	AL	Ti	Ni	Cr	Mo	Pb	W	Co	V	N	Fe
%	0.20	0.50	0.30	0.010	0.08	0.010	0.002	0.03	0.03	0.006	0.005	0.030	0.02	0.003	0.004	Bal

**Tableau III.1 :** Composition chimique de l'acier XC20.

### III.3.2 Préparation des échantillons pour le traitement :

#### III.3.2.1 La phase de Découpage :

Les éprouvettes que nous avons utilisées dans notre étude pour faire nos essais sont issues de barreau cylindrique, de 20 mm de diamètre et 20 mm de longueur pour l'essai dureté à l'aide d'une machine de tournage parallèle. et autre rectangulaire de 55x10x10 avec entaille en U pour l'essai de résilience Figure III.2 à l'aide d'une machine de fraisage. Figure III.3. Le découpage se fait en présence d'eau pour éviter une hausse de température, nous évitons ainsi en conséquence le changement de la structure.[2]

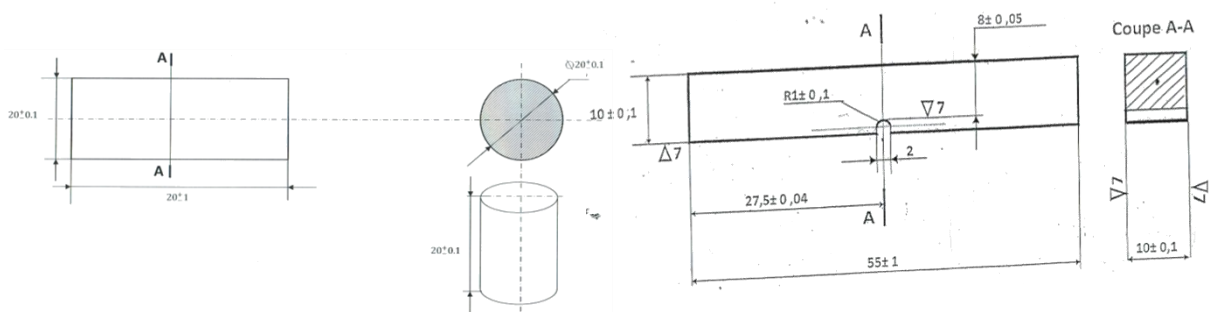


Figure III.2 : Préparation des éprouvettes



Figure III.3 : Machine fraisage et tournage

### III.3.2.2 La phase de Rectification :

Comme étape finale grâce à la rectifieuse représentée sur la Figure III.4, on soumet la surface inférieure du cylindre obtenu par taillage aux mêmes conditions (meulage similaire).



Figure III.4: Rectifieuse plane.

### III.3.3 Technique de traitement thermochimique et thermique :

Le traitement thermique des éprouvettes a été réalisé sur une ligne composée d'un four de cémentation, d'un four de trempe, d'un bain de trempe à l'huile et d'un système de lavage. La ligne est contrôlée par le logiciel Axron Swiss Process Control. Les éprouvettes sont d'abord préparées sur un support de pots en acier inoxydable suspendu. Ensuite, les éprouvettes sont introduites dans le four à cloche (type 11-CG, SOLO-Swiss, Suisse à (Figure III.5). Les éprouvettes ont été traitées par le traitement de carburation gazeuse selon les facteurs suivants : débit de carbone (A), température (B) et temps de maintien (C) où chaque facteur a trois niveaux [1]



Figure III.5: Chaîne de traitement thermique SOLO.

Ces fours sont avec des atmosphères de traitement isothermes paramétrables jusqu'à environ 950°C. Nos éprouvettes primaires rectifiés et numérotés ont été chauffés à différentes températures

pendant des temps de maintien de 4, 6 et 8 heures à différents flux de carbone, comme indiqué dans le tableau III.2.

Température (°C)	Temps de maintien (heures)	Débit de Carbone %
920 C°	4, 6, et 8 heures	1.2

**Tableau III.2:** Paramètres de traitement thermochimique.

### III.3.3.1 La phase de Cémentation :

D'après notre expérience, la cémentation au gaz a été appliquée à notre acier (XC20) en tant que processus thermochimique, ce qui donne une surface dure, riche en carbone et résistante à l'usure. L'atmosphère du four était constituée d'un gaz vecteur de composition 39,36%  $H_2$ , 0,23%  $CO_2$ , 19,83% CO, 0,76%  $H_2O$ , riche en propane.  $C_3H_8$

Nous préparons d'abord notre four de cémentation, qui est un four de trempe ainsi qu'une source de ciment sous forme de gaz propane. Cela comprenait le chauffage du four à la température d'austénitisation recommandée pour chaque numéro de test et son maintien à cette température pour assurer une atmosphère isotherme.

Le robot s'oriente automatiquement ainsi que la charge (constituée des éprouvettes déterminés) vers le four commandé. Le four s'allume, se charge et s'éteint et la température diminue. La température monte et stagne à chaque essai, et le potentiel carbone de l'atmosphère isotherme commence à monter jusqu'au débit régulé à chaque essai. Le traitement a été maintenu pendant le temps de fonctionnement de l'essai pour enrichir la surface des éprouvettes en carbone. Après enrichissement, une étape de diffusion du carbone est nécessaire en réduisant le débit de gaz pendant le temps indiqué sur le schéma du cycle thermique fourni par le logiciel de la section contrôle. Il s'agit de répartir le carbone de manière équilibrée sur la surface de la pièce à traiter.[3]

### III.3.3.2 La phase de la trempe :

Après chauffage complet jusqu'à transformation de phase (de l'austénite à la martensite). Les procédés thermochimiques actuels sont conçus pour effectuer des cycles de refroidissement rapides afin de maximiser la dureté des pièces. Après l'enrichissement des surfaces d'éprouvettes en carbone, une étape de diffusion est nécessaire pendant un heure pour s'assurer que le carbone est diffusé de manière uniforme sur la surface de la pièce. Cette étape est suivie d'un traitement de trempe à 830 °C pendant 20 minutes. Grâce au système de refroidissement installé sur le bac de trempe, les éprouvettes ont été immergées dans l'huile à 60 C° pendant 10 minutes sous agitation en atmosphère isotherme. La charge quitte automatiquement le bac de trempe à air. Enfin, les éprouvettes sont vidangées de la solution de trempe pendant 10 minutes, grâce à la ligne automatique, les éprouvettes seront lavées pour éliminer l'huile restante et les impuretés.[4]

### III.3.3.3 La phase du revenu :

Cette opération consiste en fait à produire une évolution structurale d'un état métastable vers un état proche de l'équilibre physico-chimique, dans le but de provoquer une précipitation du carbone pour optimiser le durcissement de la pièce. La détente réduit la contrainte de trempe interne mais n'affecte pas la dureté de surface de la pièce, dans notre cas nous l'avons fait automatiquement dans cette plage les éprouvettes ont été jeté dans une cuve d'huile à 60 °C pendant 10 minutes, après quoi, ils sont séchés dans une machine à sécher pendant 20 minutes. Enfin, les éprouvettes ont été recuites à une température de 180 °C pendant 2 heures.

### III.3.4 Préparation des échantillons après traitement :

Afin de mesurer la couche adhésive d'éprouvettes cylindriques, il était nécessaire de faire des préparations étape par étape.

#### III.3.4.1 La phase de Découpage :

La première étape après un traitement de cémentation permet d'obtenir de nouvelles éprouvettes, facilitant ainsi l'exploitation de la suite du travail. Ils sont facilement obtenus par découpe à l'aide d'un La machine de tronçonnage Mecatone T260. (Figure III6)



**Figure III.6:** La machine de tronçonnage Mecatome T260.

#### III.3.4.2 La phase de Polissage :

Après découpe de l'éprouvette. Utiliser une polisseuse automatique avec du papier verre de différente granulométries tel que P180, P220; P400; P600; P800; enfin P1200, l'éprouvette reste en contact pendant 2 à 5 minutes. Immédiatement après le polissage de l'éprouvette avec du papier de verre P1200, rincer avec de la pâte de diamant et de l'eau courante, et doit immédiatement polir finement avec du papier feutre qui se terminant lorsque la surface est en état miroir. [4]



**Figure III.7 :** Papier abrasif



**Figure III.8:** Machine de polissage automatique.

#### III.3.4.3 La phase d'Attaque chimique :

Une fois le polissage fin est terminé, nous procédons au bon nettoyage des pièces avec l'eau distillée et du coton et on met des gouttes d'alcool éthanol ( $C_2H_5OH$ ) pour éviter l'oxydation d'eau (la corrosion) puis on les sèche bien, lorsque on termine on les met dans une solution d'attaque (96% d'alcool éthanol  $C_2H_5OH$  + 4 % de nitrate  $HNO_3$ ) pendant (15 à 25 seconde max 1 minute) au cours de cette attaque une fine couche est formée sur la surface avec un certain épaisseur en fonction de la composition chimique de notre matériau (XC20). Finalement un lavage des pièces pour la deuxième fois et on remet des gouttes d'alcool éthylique, on les sèche pour la dernière fois sans les toucher.



**Figure III.9 :** La solution d'attaque chimique

#### III.3.4.4 Analyse et mesurage des couches cémentées par microscope optique :

L'analyse chimique des éprouvettes a été réalisée grâce à l'utilisation d'un microscope optique attaché aux lentilles d'objectif et aux oculaires qui peuvent agrandir les images de petits objets. Couplée à un ordinateur Figure III.10, L'examen métallographique des métaux et alliages a pour but de définir précisément leur structure. Les micrographies ont été capturées à l'aide de l'appareil photo numérique AxioCamMRc 5 attaché à un microscope inversé Leica DMI8 qui permet l'acquisition, le traitement et l'enregistrement de différentes images à l'aide de 5 objectifs ( $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 50$ ,  $\times 100$ ) et d'un grossissement total ( $\times 10000$ ).

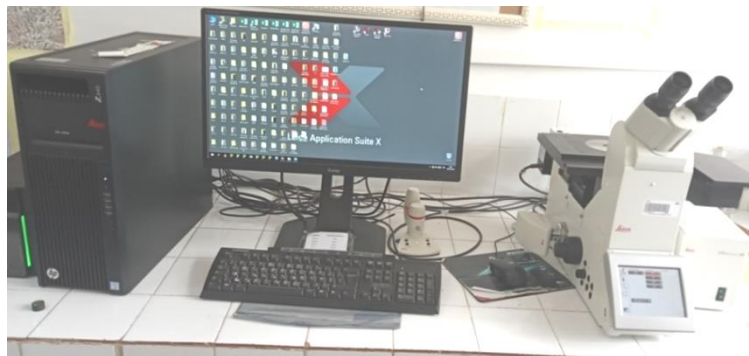


Figure III.10: Equipement de microscope optique Leica

#### III.3.5 Caractérisation des couches cémentées par dureté :

La dureté avec le symbole général H est l'un des moyens essentiels nécessaire au métallurgiste pour caractériser un traitement thermique. La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures.

Les mesures de micro-dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux, donnée en méga-pascal (MPa). Les mesures de micro-dureté Vickers ont été effectuées sous une charge d'essai de 0,5 kgf et un temps d'arrêt de 10s, à l'aide d'un appareil de micro-dureté Figure III.11, L'essai a été réalisé à température ambiante et les mesures de dureté ont été effectuées à cinq endroits différents sur chaque échantillon pour obtenir une valeur de dureté moyenne.



Figure III.11: Appareil de Micro-dureté

**III.3.6 Caractérisation des couches cémentées par analyse chimique :**

Afin de révéler les différentes compositions chimiques de la couche de ciment, La composition chimique des échantillons d'acier XC20 avant et après le traitement de cémentation a été réalisée par spectroscopie d'émission optique à étincelles (S-OES) à l'aide d'un analyseur de métaux SPECTROMAXx MX6M-BT de SPECTRO et elle est donnée en pourcentage de masse tout au long de ce travail. Les essais ont été mesurés sous une atmosphère d'argon à une pression de 3 bars pendant l'analyse chimique. Les valeurs indiquées correspondent à la moyenne d'au moins trois mesures individuelles. Les données reçues via le système de couplage spectromètre-ordinateur sont traitées par un logiciel et les résultats sont moyennés.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous décrivons le processus et les méthodes expérimentales, préparations des échantillons de l'acier XC20 et la présentation des équipements de mesures. Nous avons aussi définie la composition chimique et les conditions du traitement thermochimique.

**Références**

- [1]. Mebarki lahcene, Contribution à l'étude de précipitation du carbure dans les aciers fortement alliés (frittée), Mémoire magistère, université de Batna, année 2013/2014.
- [2]. GUELAI Noussaiba, BOUTARFIF Fatma, Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation, Mémoire Master, Université de Tébessa, année 2015/2016.
- [3]. TADJER Mohamed el Mokhtar, Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier cémenté, Mémoire Master, Université Annaba. Année 2019/2020.
- [4]. SAIM Ahmed & BOUZIANE Abdennour, étude et réalisation d'une machine de traction manuelle, Mémoire Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, Année 201/2018.

**CHAPITRE IV**

**RESULTATS**

**EXPERIMENTAUX ET**

**DISCUSSION**

## SOMMAIRE

### CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

IV.1	Introduction .....	45
IV.2	Matériau étudié (acier XC20).....	45
IV.3	Le pourcentage de carbone des échantillons .....	45
IV.4	Mesure de la dureté des échantillons .....	46
IV.4.1	Essai de dureté (état brut).....	46
IV.4.2	Essai de dureté (état cimenté de 04 h).....	46
IV.4.3	Essai de dureté (état cimenté de 06 h).....	46
IV.4.4	Essai de dureté (état cimenté de 08 h).....	47
IV.5	La Profondeur de la couche superficielle cimentée .....	47
IV.5.1	Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 4 heures .....	48
IV.5.2	Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 6 heures .....	48
IV.5.3	Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 8 heures .....	48
IV.6	Caractérisation métallographique de la couche superficielle des aciers.....	49
IV.6.1	La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état Brute .....	49
IV.6.2	La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état initial .....	49
IV.6.3	Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes à l'état final.....	50
IV.7	Résultats expérimentaux d'essai résilience.....	50
	Conclusion .....	53
	Conclusion Générale .....	54

## LISTE DES FIGURES

Figure IV.1 : influence du temps de maintien sur le pourcentage de carbone .....	46
Figure IV.2 : Influence du temps de maintien sur dureté.....	47
Figure IV.3 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 4H.....	48
Figure IV.4 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 6H.....	48
Figure IV.5 : Profondeur de la couche superficielle cimentée pendant 8H.....	49
Figure IV.6 : Microstructure de la couche d'éprouvettes Brute.....	49
Figure IV.7 : Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état initial.....	50
Figure IV.8 : Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état final.....	50
Figure IV.9 : Forme et dimensions d'éprouvette d'essai avant et après cémentation .....	51
Figure IV.10 : L'emplacement de l'éprouvette sur la machine.....	51
Figure IV.11 : Influence du temps de maintien sur la résilience .....	52
Figure IV.12 : Les éprouvettes après les essais de résiliences .....	52

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 : Pourcentage du carbone à l'état brut .....	45
Tableau IV.2 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 4 H.....	45
Tableau IV.3 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 6 H.....	45
Tableau IV.4 : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cimentée durant 8 H.....	45
Tableau IV.5 : Essai de dureté (état brut).....	46
Tableau IV.6 : Essai de dureté (état cimenté 04 h) .....	46
Tableau IV.7 : Essai de dureté (état cimenté 06 h) .....	47
Tableau IV.8 : Essai de dureté (état cimenté 06 h) .....	47
Tableau IV.9 : La résistance de choc de l'acier XC 20 brute.....	51
Tableau IV.10 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 4 heures.....	51
Tableau IV.11 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 6 heures.....	51
Tableau IV.12 : La résistance de choc de l'acier XC 20 cimenté pendant 6 heures.....	51

## IV.1 Introduction

L'expérience est complément essentiel à la théorie et représente l'argument de toutes les questions du comportement mécaniques des aciers avant et après cémentation.

Dans cette étape on a pu faire une série d'expérience (analyse chimique, Dureté et résilience). Les résultats sont enregistrés et commentés convenablement.

## IV.2 Matériau étudié (acier XC20)

Le matériau étudié dans ce travail est l'acier XC20 qui appartient à l'acier à faible teneur en carbone et a une teneur en carbone ( $C = 0,2\%$ ) pour le traitement thermique. Il a une très bonne résistance à l'usure. L'acier XC20 comporte des compositions chimiques de base généralement équilibrées pour lui conférer une solide propriété mécanique.

## IV.3 Le pourcentage de carbone des échantillons

Dans le tableau IV.1 présente la quantité de carbone en pourcentage a l'état brut de l'acier

**Tableau IV.1** : Pourcentage du carbone à l'état brut

Etat Brute			
Eprouvette	E1	E2	E3
% C	0.22	0.17	0.22

Dans le tableau IV.2 présente la quantité de carbone en pourcentage, après traitement thermochimique par cémentation pendant 04 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à  $920^{\circ}\text{C}$  et le débit de carbone a  $1.2\%$

**Tableau IV.2** : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cémentée durant 4 H

Cémentée durant 4 H			
Eprouvette	E1	E2	E3
% C	0.83	0.83	0.80

Dans le tableau IV.3 présente la quantité de carbone en pourcentage, après traitement thermochimique par cémentation pendant 06 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à  $920^{\circ}\text{C}$  et le débit de carbone a  $1.2\%$

**Tableau IV.3** : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cémentée durant 6 H

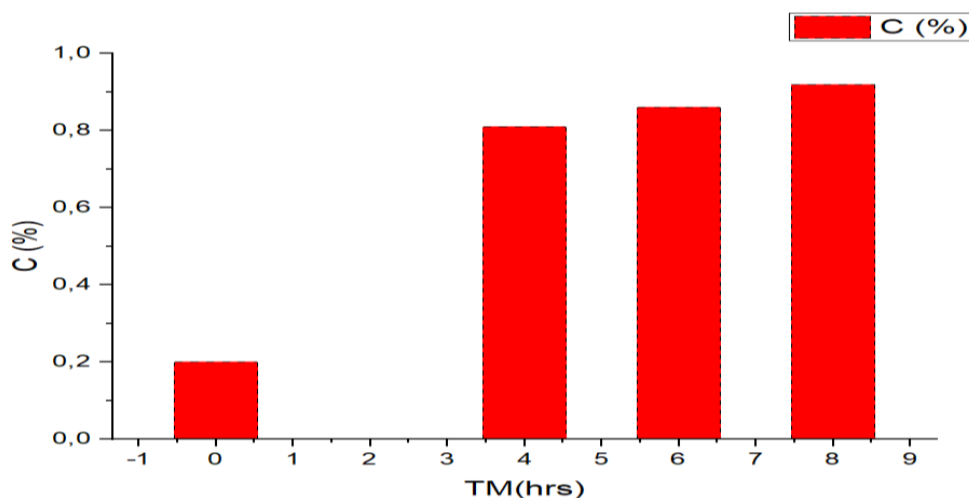
Cémentée durant 6H			
Eprouvette	E1	E2	E3
% C	0.85	0.87	0.88

Dans le tableau IV.4 présente la quantité de carbone en pourcentage, après traitement thermochimique par cémentation pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à  $920^{\circ}\text{C}$  et le débit de carbone a  $1.2\%$

**Tableau IV.4** : Pourcentage du carbone dans la couche superficielle cémentée durant 8 H

Cémentée durant 8H			
Eprouvette	E1	E2	E3
% C	0.933	0.94	0.90

Le traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, a donné une augmentation du pourcentage de carbone lors de l'augmentation du temps de maintien. Nous avons clarifié ces résultats par la figure IV.1.



**Figure IV.1** : influence du temps de maintien sur le pourcentage de carbone

#### IV.4 Mesure de la dureté des échantillons

##### IV.4.1 Essai de dureté (état brut)

Il consiste à enfoncer dans la pièce à essayer une bille, généralement en acier (HBS) ou en carbure de tungstène (HBW), de diamètre **D** sous une charge constante **F**. On mesure ensuite le diamètre **d** de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté Brinell, notée **HB**, est un nombre proportionnel au rapport **F/S**, où **S** la surface de l'empreinte en mm<sup>2</sup>.

Le tableau IV.5 montre les mesures de la dureté de nos échantillons à l'état brut

**Tableau IV.5** : Essai de dureté (état brut)

Essai Brinell	E1	E2	E3
Dureté	135 HB	133 HB	135 HB

##### IV.4.2 Essai de dureté (état cémenté de 04 h)

Le tableau IV.6 montre les mesures de la dureté de nos échantillons à l'état cémenté pendant 04 heures de temps de maintien.

**Tableau IV.6** : Essai de dureté (état cémenté 04 h)

Essai Rockwell	E1	E2	E3
Dureté	62 HRC	62 HRC	62 HRC

Le Tableau IV.6 montre le profil de dureté obtenue dans les éprouvettes E1, E2 et E3 après cémentation pendant 4 heures, on remarque que ces éprouvettes présentent une dureté élevée qui est de l'ordre de 62 HRC

##### IV.4.3 Essai de dureté (état cémenté de 06 h)

Le tableau IV.7 montre les mesures de la dureté de nos échantillons à l'état cémenté pendant 06 heures de temps de maintien.

**Tableau IV.7 :** Essai de dureté (état cimenté 06 h)

Essai Rockwell	E1	E2	E3
Dureté	63 HRC	63 HRC	63.3 HRC

Le Tableau IV.7 montre le profil de dureté obtenue dans l'éprouvettes E1, E2 et E3 après cémentation pendant 6 heures, on remarque que ces éprouvettes présente une dureté élevée que obtenue dans les éprouvettes pendant 4 heures, qui est de l'ordre de 63 HRC et 63.3 HRC.

#### IV.4.4 Essai de dureté (état cimenté de 08 h)

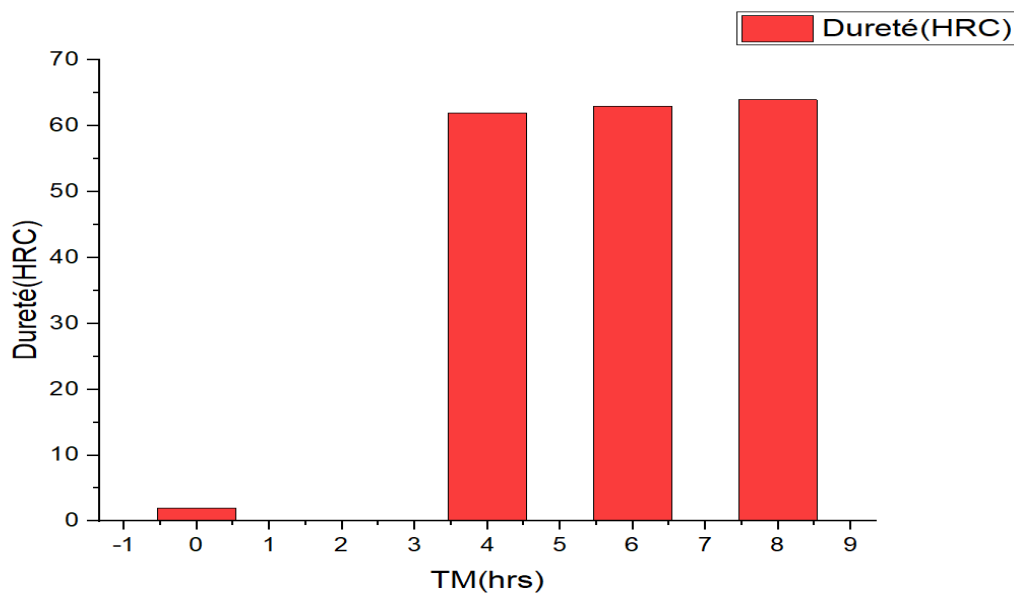
Le tableau IV.8 montre les mesure de la dureté de nos échantillons a l'état cimenté pendant 08 heures de temps de maintien.

**Tableau IV.8 :** Essai de dureté (état cimenté 06 h)

Essai Rockwell	E1	E2	E3
Dureté	64 HRC	64 HRC	64 HRC

Le Tableau IV.8 montre le profil de dureté obtenue dans l'éprouvettes E1, E2 et E3 après cémentation pendant 8 heures, on remarque que ces éprouvettes présentent une dureté plus élevée que obtenue dans les éprouvettes précédentes pendant 4 et 6 heures qui est de l'ordre de 64 HRC.

Lors d'un traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, Nous avons remarqué que la dureté est proportionnelle avec le temps de maintien TM. Nous avons clarifié ces résultats par la figure IV.2.

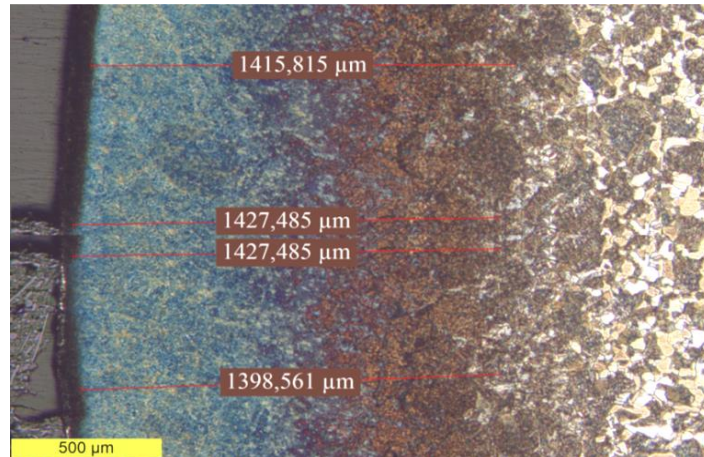
**Figure IV.2 :** Influence du temps de maintien sur dureté.

#### IV.5 La Profondeur de la couche superficielle cimentée

Le traitement thermochimique de cémentation modifie la structure de la couche superficielle des éprouvettes E1, E2, et E3 traitées. Donc, nous allons analyser les changements structuraux provoqués par le changement de temps de maintien après le traitement de cémentation, en utilisant un microscope optique, et on va examiner la microstructure des couches et des zones formées après la cémentation.

#### IV.5.1 Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 4 heures

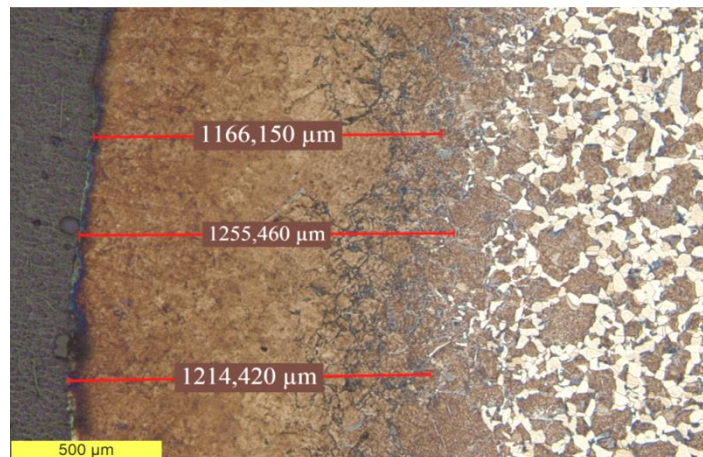
Dans la figure IV.3 nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 04 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920°C et le débit de carbone a 1.2%, nous avons obtenu une épaisseur allons jusqu'à 1214µm.



**Figure IV.3** : Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 4H.

#### IV.5.2 Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 6 heures

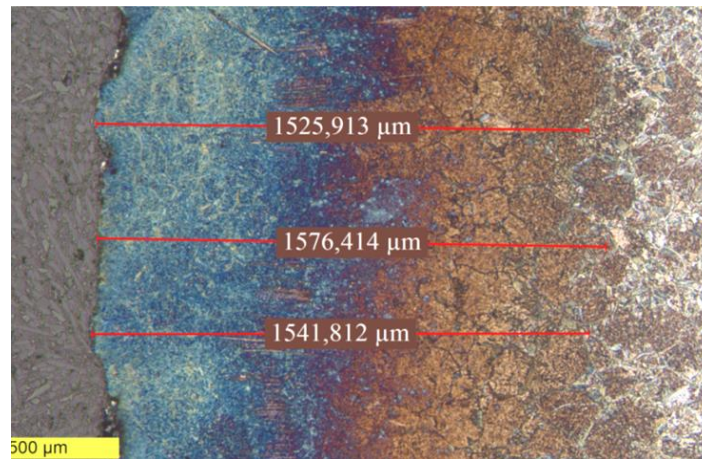
Dans la figure IV.4 nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 06 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920°C et le débit de carbone a 1.2%, nous avons obtenu une épaisseur allons jusqu'à 1400µm.



**Figure IV.4** : Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 6H.

#### IV.5.3 Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 8 heures

Dans figure IV.5 nous avons présenté les mesures de la couche superficielle durcie de nos échantillons après traitement thermochimique par cémentation pendant 08 heures, et fixer les deux autres paramètres tel que ; la température à 920°C et le débit de carbone à 1.2%, nous avons obtenu une épaisseur qui dépasse les 1500 µm.

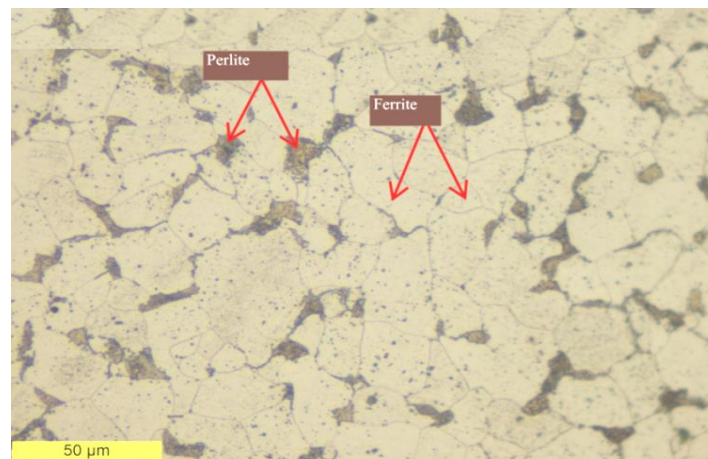


**Figure IV.5** : Profondeur de la couche superficielle cémentée pendant 8H.

## IV.6 Caractérisation métallographique de la couche superficielle des aciers

### IV.6.1 La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état Brute

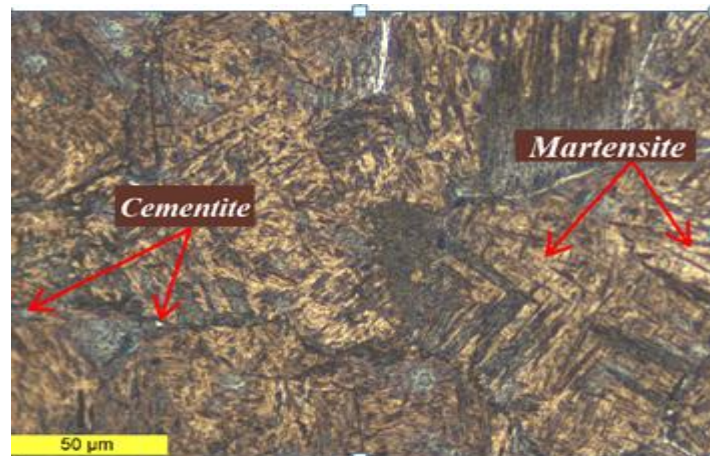
Eprouvette brute XC20 avec un teneur de carbone C=0.22%, les constituants pouvant être observés dans l'éprouvette brute sont les suivants : Perlite + Ferrite (figure IV.6)



**Figure IV.6** : Microstructure de la couche d'éprouvettes Brute.

### IV.6.2 La Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes a l'état initial

La figure IV.7 présente la microstructure de la couche superficielle cémentée après l'enrichissement de la couche superficielle en carbone, ce qui cause une transformation de l'austénite en martensite et finalement une formation de cémentite ( $Fe_3C$ ).



**Figure IV.7 :** Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état initial.

#### IV.6.3 Microstructure de la couche superficielle des éprouvettes à l'état final

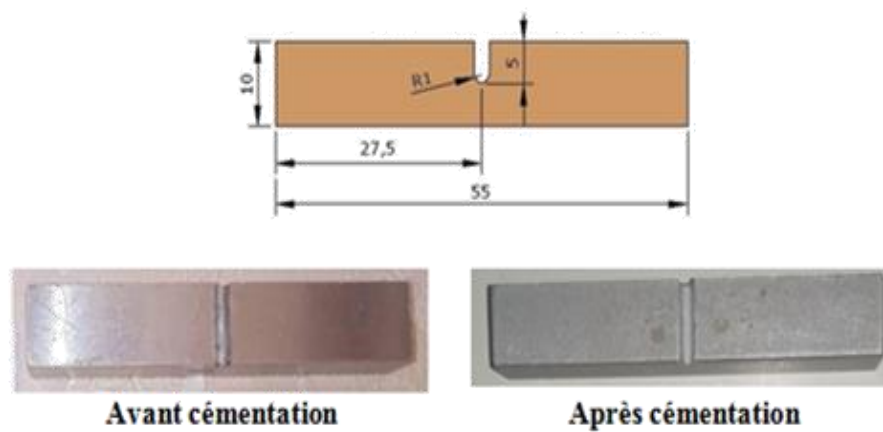
La figure IV.8 présente la microstructure de la couche superficielle cimentée après l'enrichissement de la couche superficielle en carbone, ce qui cause une épaisseur plus grand, et avec une transformation de l'austénite en martensite et finalement une formation de cémentite ( $Fe_3C$ ).



**Figure IV.8 :** Microstructure de la couche d'éprouvettes superficielle des éprouvettes cimentées a l'état final

#### IV.7 Résultats expérimentaux d'essai résilience

Les essais de résilience sont réalisés au niveau du laboratoire physique-chimique de l'entreprise construction mécanique kenchela (ECMK). L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture est très prononcé. La figure IV.9 montre les formes et dimensions géométriques de nos éprouvettes étudiées avant et après traitement par cémentation, ainsi L'emplacement de l'éprouvette sur la machine (figure IV.10)



**Figure IV.9** : Forme et dimensions d'éprouvette d'essai avant et après cémentation



**Figure IV.10** : L'emplacement de l'éprouvette sur la machine.

Dans les tableaux suivants nous avons présenté les mesures des valeurs des résiliences de nos échantillons avant et après traitement thermo-chimique par cémentation.

**Tableau IV.9** : La résistance de choc de l'acier XC 20 brute

Essai résilience	E1	E2	E3	E Moy
Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	180	179	181	180

**Tableau IV.10** : La résistance de choc de l'acier XC 20 cémenté pendant 4 heures

Essai résilience	E1	E2	E3	E Moy
Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	12	11.5	09	10.83

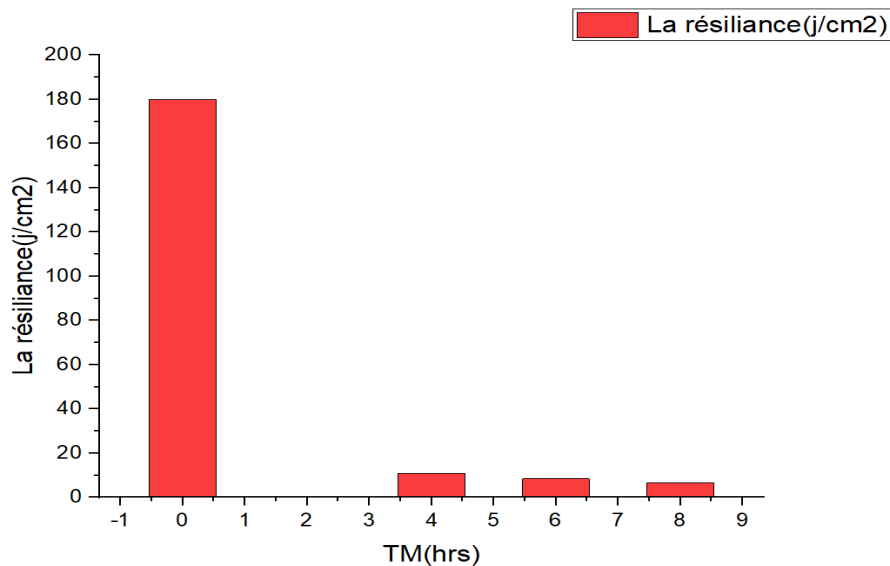
**Tableau IV.11** : La résistance de choc de l'acier XC 20 cémenté pendant 6 heures

Essai résilience	E1	E2	E3	E Moy
Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	08	7.3	10	8.4399

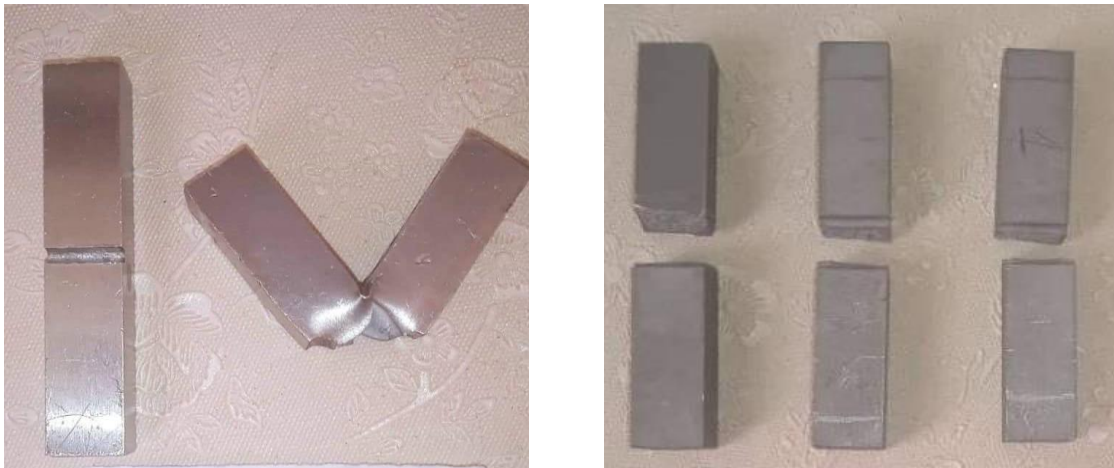
**Tableau IV.12** : La résistance de choc de l'acier XC 20 cémenté pendant 6 heures

Essai résilience	E3 <sub>1</sub>	E3 <sub>2</sub>	E3 <sub>3</sub>	E Moy
Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	06.25	06.25	7.5	6.66

Après des essais de choc sur nos échantillons, Nous avons remarqué que la résilience est inversement proportionnelle avec le temps de maintien TM, lors d'un traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur un acier XC20. Pendant 04,06 et 08 heures de temps de maintien, une diminution de la résilience de 180 j/cm<sup>2</sup> (état brut), de 10.83 j/cm<sup>2</sup> (état cémenté pendant 04 heures), de 8.43 j/cm<sup>2</sup> (état cémenté pendant 06 heures) et 6.66 j/cm<sup>2</sup>(état cémenté pendant 08 heures). Nous avons clarifié ces résultats par la figure IV.11.



**Figure IV.11** : Influence du temps de maintien sur la résilience



**Figure IV.12** : Les éprouvettes après les essais de résiliences

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentales que nous avons mesuré tel que ; la dureté, le pourcentage de carbone, l'épaisseur de la couche superficielle durcie et aussi comparer les structures des aciers qu'ont travaillé avec avant et après traitement par la cémentation gazeuse. Une étude comparative a été clarifiée pour voir l'influence du temps de maintien TM sur la résilience.

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous présentons les résultats des expériences qui ont été faites et savoir l'influence du temps de maintien du traitement thermochimique par la cémentation gazeuse, et voir leur influence sur les réponses tel que ; la micro-dureté, l'épaisseur de la couche durcie, le teneur en carbone, la microstructure et aussi sur la Contrainte la résilience lors des essais de choc. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- (1) Le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse réalisée sur les échantillons en Acier XC20, est proportionnel avec la dureté.
- (2) L'augmentation de temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse nous conduit à des valeurs de teneur en carbone dans la couche superficielle assez élevé jusqu'à 0.93%.
- (3) Une grande concordance entre le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse et la couche superficielle durcie, pour un maximum de TM on arrive à des valeurs importantes d'épaisseur allons jusqu'à 1548.04 $\mu$ m.
- (4) Le temps de maintien TM du traitement thermochimique par cémentation gazeuse est inversement proportionnel avec la résilience.
- (5) L'enrichissement de la couche superficielle en teneur en Carbone montre la transformation de l'austénite en martensite et enfin en cémentite ( $Fe_3C$ ), ce qui augmente l'épaisseur de la couche superficielle durcie.