

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

**OURTI ABDERRAHMANE**

**FENGAL MASSINISSA**

## Thème

---

**Influence de l'effet de traitement de revenus sur les propriétés**

**de dureté-résilience de deux nuances d'acier**

**25CD4 et 23CD4.**

---

Soutenu le 26/06/2019 devant le jury composé de:

Mr. **Y.KHELFAOUI**

Président

Mr. **D.AMARI**

Rapporteur

Mr. **R.YOUNES**

Examineur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019**

# Remerciements

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

*Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.*

*Nos vifs remerciements vont à Mr. D. AMARI, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.*

*Mr. Y. KHELFAOUI en tant que Président de jury et Mr. R. YOUNES, en tant que examinateur.*

*Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia et l'équipe d'ENMTP de Bejaia surtout Mr. L. TAJWINT.*

*Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de Nos sincère gratitude.*

*Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail  
À mes chers parents,*

*À mes frères,  
(djemel, sofiane, yanis, adem)*

*À mon collègue massinissa,*

*Ainsi qu'à toute sa famille,*

*À l'équipage (mezyane, aymen, fouad, souad, tarik, mounir, sara,  
boussaad, massi, mouloud, rachid, yaser .....etc)*

*Et tous mes amis et tous les membres de notre association TUSNA D  
YIDLES et aux autres associations de RU iryahen.*

*A.ourti (lyes)*

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

---

I .Introduction générale	
Chapitre I : Bibliographie	
I.1 Définition des aciers.....	3
I.2 Classification des nuances d'aciers.....	3
I.2.1 Aciers non alliés.....	3
I.2.2 Aciers alliés.....	3
I.2.2.1 Les aciers faiblement alliés.....	3
I.2.2.2 Les aciers fortement alliés.....	4
I.2.3 Les aciers inoxydables.....	5
I.3 Désignation conventionnelle et composition chimique.....	6
I.4 Caractéristiques mécanique.....	6
I.4.1 Dureté.....	8
I.4.1.1 Principe de l'essai.....	8
I.4.1.2 Types d'essai.....	8
I.4.2 La résilience.....	9
I.4.2.1 Le principe de l'essai.....	9
I.4.2.2 La rupture des aciers.....	10
I.4.2.3 Faciès de ruptures.....	10
I.5 Les aciers faiblement alliés et l'influence des éléments d'alliages dans l'aciers.....	11
I.5.1 Influence des éléments d'élaboration.....	11
I.5.2 Influence des éléments d'addition.....	11
I.5.3 Diagramme métastable fer-carbone.....	12
I.6 Les traitements thermique.....	14
I.6.1 Austénitisation.....	15
I.6.2 La trempe .....	15
I.6.3 Revenu.....	17
I.6.4 Recuits.....	18
I.6.5 Phénomène lies au traitement thermique.....	19
I.6.6 Influence de la vitesse de refroidissement.....	19

# SOMMAIRE

---

I.6.7 Trempabilité.....	20
.I.6.8 Procédés des traitements thermiques .....	23
I.6.9 Fours utilisé.....	24
Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales	
II.1 Matériaux étudiés.....	25
II.1.1 Composition chimique.....	25
II.2 Préparation des échantillons et des éprouvettes.....	26
II 2.1 Eprouvette de résilience.....	26
II 2.2 Echantillon de dureté.....	27
II 2.3 Observation microscopique.....	29
II.3 Traitement thermique.....	30
II.3.1 Exécution des traitements thermiques.....	30
II.4 L'essai de résilience.....	31
II.4.1 définition de la résilience.....	31
II.4.2 Exécution de l'essai.....	31
II.4.3 Machine d'essai.....	32
II.5 Essai de dureté (Rockwell).....	33
II.5.1 Exécution de l'essai de dureté Rockwell cône de diamant (HRC ou HRA).....	33
II.5.2 machine d'essai.....	34
Chapitre III : Résultats et discussions	
III. Résultats et discussion.....	36
III.1 Essais de résilience.....	36
III.2 Essais de dureté.....	38
III.3 Observation microscopique.....	42

# **LISTE DES FIGURES**

# LISTE DES FIGURES

---

Figure I.1 : Diagramme fer-carbone.....	12
Figure I.2 : Procédée de trempe.....	15
Figure I.3 : Procédé de revenu.....	16
Figure I.4 : Eprouvette Jominy.....	19
Figure I.5 : Essai Jominy de l'éprouvette Jominy.....	20
Figure I.6 : Courbe Jominy d'aciers.....	20
Figure I.7 : Courbes limites normalisées.....	21
Figure I.8 : Le procédé de traitement thermique.....	22
Figure II.1 : photos des scies électriques. A: ENMTP, B : Hall de Technologie.....	26
Figure II.2 : éprouvette de résilience standardisée en mm.....	26
Figure II.3 : fraiseuse réglé à 45° pour éprouvette de Charpy V.....	27
Figure II.4 : Opération de fraisage à 45° pour un entaille V.....	27
Figure II.5 : fraisage. A : photo d'une fraise, B : échantillon usiné de 1 cm <sup>2</sup> .....	28
Figure II.6 : photo d'une polisseuse.....	28
Figure II.7 : photo microscope optique.....	29
Figure II.8 : Four électrique des traitements thermiques utilisé.....	30
Figure II.9 : Tapure de trempe de nuance d'acier 35CrMo4.....	30
Figure II.10 : machine de résilience. A : le mouton de Charpy, B : machine résilience Utilisé de l'ENMTP.....	32
Figure II.11 : facies de ruptures. A : 35CrMo4, B : 25CrMo4.....	32
Figure II.12 : duromètre de Frank modèle 38500.....	34
Fig. III.1 : Histogramme représentant les résultats de la résilience pour les deux Nuances d'aciers 25CrMo4 et 25CrMo4.....	37
Figure III.2 : 35CrMo4 rupture fragile, faciès vif et brillant.....	38
Figure III.3 : 25CrMo4 rupture ductile, faciès en relief sombre.....	38
Figure III.4 : Histogramme représente les résultats de dureté pour l'acier 25CrMo4.....	41

# LISTE DES FIGURES

---

**Figure III.5 :** Histogramme représente les résultats de dureté pour l'acier 35CrMo4...42

**Figure III.6:** microstructure optique de nuances d'aciers 25CrMo4. A, B, C, G=100X,

G=500X, G=1000X.....43

**Figure III.7:** microstructure optique de nuances d'aciers 35CrMo4. A, B, C, G=100X,

G=500X, G=1000X.....44

# Liste des tableaux

# LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau I.1</b> : éléments d'alliages dans les aciers .....	4
<b>Tableau I.2</b> : La composition chimique de l'acier 25CrMo4 et 35CrMo4 .....	5
<b>Tableau I.3</b> : Les Caractéristique mécanique de l'acier 35CD4 selon la norme AFNOR....	6
<b>Tableau I.4</b> : Les caractéristiques mécaniques réalisables sur barres à l'état traité de L'acier 25CrMo4 .....	6
<b>Tableau II.1</b> : Composition chimique des deux nuances.....	25
<b>Tableau III.1</b> : Résultats des essais de résilience en fonction de la température.....	36
<b>Tableau III.2</b> : Résultats des essais de dureté pour les deux nuances d'aciers.....	39

**INTRODUCTION  
GENERALE**

## I. Introduction générale :

De tous les alliages métalliques, les aciers sont les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers et permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs coûts relativement faibles présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

L'application de l'acier dans l'industrie est très diverse. Il s'applique dans la mécanique, aéronautiques, automobiles, ... etc.

Tous les aciers sont utilisés dans l'industrie après traitement thermiques. Leur état brut de coulée n'offre pas les propriétés et caractéristique souhaitées dans l'industrie.

Notre travail a porté sur deux nuances d'aciers très utilisées dans l'industrie mécanique comme vilebrequins ou un pont des camions de SONACOM de ROUIBA.

L'objectif est de réaliser des traitements thermique (trempe-revenu) sur les deux nuance d'acier, livrées par le halle de technologie de l'université de Bejaia, et de voir leurs influences sur les propriétés de dureté et de résilience.

La dureté et la résilience sont parmi les propriétés essentielles des aciers sur lesquelles, le choix des nuances d'aciers est basé.

Ces caractéristiques remarquables ont orienté les industriels à choisir les aciers de construction pour la production des pièces ou des structures devront supporter des contraintes mécaniques élevées ou des effets thermiques importants.

Notre mémoire est structuré en trois chapitre :

Le premier chapitre est consacré à une bibliographie sur les deux nuances d'aciers, **25CrMo4** et **35CrMo4**, leurs propriétés et leurs utilités dans l'industrie mécanique.

L'ensemble des techniques expérimentales et préparations des échantillons sont présenté dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre est dédié aux différents résultats et discussion que nous avons obtenus.

En fin, ont terminé notre travail par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**BIBLIOGRAPHIE**

## I.1 Définition des aciers

L'acier est essentiellement un alliage fer-carbone. On ne le trouve pas à l'état naturel mais il résulte de transformation de minerai de fer extrait des mines. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent dans sa composition la présence en très faible proportion d'autres éléments (phosphore, soufre) considérés comme des impuretés. Mais l'acier peut également contenir d'autres éléments (silicium, manganèse, chrome, nickel, tungstène, etc....) introduits volontairement en vue de modifier sa composition chimique et par suite ses caractéristiques mécaniques. [1]

On appelle acier, un matériau contenant en masse une teneur en carbone est généralement inférieure à 2% ; Cette valeur de 2% est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte. [2]

## I.2 Classification des nuances d'aciers

La norme NF EN 10020 définit le terme acier et établit une classification en aciers non alliés, aciers alliés et aciers inoxydables d'après leur composition chimique. [2]

### I.2.1 Aciers non alliés

Ce sont des alliages de teneur en carbone inférieur à 2% (limite pratique 1.4 à 1.5%) dans lesquels les teneurs des autres éléments sont inférieures à des limites fixées par la norme NF A 02-005. [2]

Exemple : acier en carbone, S235JR, E24, XC10, XC35.

### I.2.2 Aciers alliés

Ce sont des aciers dans lesquels on a introduit, en cours d'élaboration, un ou plusieurs éléments chimiques, dans le but d'améliorer certaines de leurs propriétés comme dureté et résilience. [4]

#### I.2.2.1 Les aciers faiblement alliés [3]

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

❖ Le nombre égal à la teneur moyenne en carbone en centièmes pour cent (100fois à la teneur en %)

- ❖ La lettre Z.
- ❖ La teneur moyenne C exprimée en centièmes pourcent.
- ❖ La série des symboles normalisée des éléments alliés rangées par teneurs décroissantes.
- ❖ Les teneurs pour cent d'une partie des éléments rangée dans le même ordre et sans coefficient multiplicateur.

**Exemple 1 :**

Z6CrNi4Mo 15604 : Acier fortement allié au chrome-nickel-cuivre-molybdène de teneurs moyennes 0.06% en C, 15% en Cr, 4% en Ni. (NF A35-581)

**Exemple 2 :**

Z8CrNi18-08 : acier fortement allié au Cr et Ni à 0.08%C, 18%Cr, 8%Ni.

**1.2.2.2 Les aciers faiblement alliés [3]**

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

- ❖ Le nombre égal à la teneur moyenne en carbone en centièmes pour cent (100fois à la teneur en %)
- ❖ Une série de symboles normalisés correspondant aux éléments alliés rangés par teneurs décroissantes, ne sont énumérés que les éléments nécessaires pour éviter toute ambiguïté.
- ❖ Un (ou deux) nombres indiquant la teneur des (ou des deux) éléments principaux est obtenue en multipliant la teneur en % :
  - ❖ Par 4 pour Cr, Co, Mn, Ni et Si.
  - ❖ Par 10 pour tous les autres (à l'exception de B et N à multiplier par 1000 et 100).

**Exemple 1 :**

35CrMo4 : Acier faiblement allié au chrome-molybdène de teneurs moyennes 0.35% en C et 1% en Cr. (NF A 35-551).

**Exemple 2 :**

42CD4 : acier faiblement allié au Cr et Mo à 0.42% C, 1%Cr, Mo<1%.4

Tableau I.1: éléments d'alliages dans les aciers.

%(m) des éléments massiques d'addition	Acier non allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
<b>Al</b>	<0.3	-	>0.3
<b>B</b>	-	-	>0
<b>Co</b>	<0.2	0.2 à 0.3	>0.3
<b>Cr</b>	<0.3	0.3 à 0.5	>0.5
<b>Cu</b>	<0.4		>0.4
<b>Mn+Si</b>	<1.5	1.5 à 3	>3
<b>Mo</b>	<0.05	0.05 à 0.1	>0.1
<b>Ni</b>	<0.3	0.3 à 0.5	>0.5
<b>Pb</b>	<0.4		>0.4
<b>V</b>	<0.05	0.05 à 0.1	>0.1
<b>W</b>	<0.2	0.2 à 0.3	>0.3

### I.2.3 Les aciers inoxydables [5]

Les aciers inoxydables sont des groupes de métaux à base de fer contenant au moins 10% de chrome (métaux d'alliage).

L'oxyde de chrome "CrO" crée une barrière invisible ("film passif") à l'oxygène et l'humidité. Ainsi le chrome protège le fer contre la plupart des corrosions ou des rouilles rouges ; d'où le terme acier "inoxydable".

La couche est trop fine pour être visible, ce qui signifie que le métal reste brillant. Il est imperméable à l'eau et l'air, protégeant ainsi le métal en-dessous. Lorsque la surface est rayée, la couche se reforme spontanément.

Ces derniers sont très résistants à la corrosion dans divers milieux :

- ❖ Dans des conditions atmosphériques défavorables tel que : le dioxyde de carbone, l'humidité, les champs électriques, le soufre, le sel et les composés de chlorure.
- ❖ Dans les substances chimiques produites naturellement ou artificiellement (acide ou base HCL, H2So4).
- ❖ Dans conditions extrêmes telles que les températures et PH.

### I.3 Désignation conventionnelle et composition chimique

Les aciers de nuance **35CrMo4** et **25CrMo4** font parties de la famille des aciers faiblement alliés au chrome-molybdène dans lesquels aucun des éléments alliés n'a une teneur supérieure à 5%, ces aciers sont désignés par [6]:

**35** → % en carbone multiplié par 100

**CrMo** → Symboles métallurgiques des éléments d'addition rangés en ordre de pourcentage décroissant.

**4** → % des éléments d'addition dans leur ordre d'inscription, le chiffre indique le pourcentage multiplié par 4 ici dans le cas de 35CrMo4 1% de chrome. [7]

Le 35CrMo4 est classé comme un acier de construction a traitement thermique, trempant ordinaire, caractérisé par une résistance à chaud élevée. [8]

La composition chimique, selon la norme AFNOR (NF A 356551) est donnée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I.2** : La composition chimique de l'acier 25CrMo4 et 35CrMo4 donnée par la norme AFNOR (NF A 356511/557).

Composition chimique						
Alliage	C	Mn	Si	Cr	Mo	P et S
25CrMo4	0.22 à	0.60 à	0.01 à	0.85 à	0.15 à 0.30	< 0.035
	0.29	0.90	0.40	1.15		
35CrMo4	0.33 à	0.60 à	0.10 à	0.85 à	0.15 à 0.30	<0.035
	0.39	0.90	0.40	0.15		

Les teneurs moyennes de l'acier 35CrMo4 en élément C, Cr et Mo sont les suivantes :

C : 0.35%      Cr : 1.00%      Mo : 0.20%.

### I.4 Caractéristiques mécanique [7]

Les Caractéristique mécanique de l'acier 35CrMo4 selon la norme AFNOR est donnée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I. 3** : Les Caractéristique mécanique de l'acier 35CD4 selon la norme AFNOR.

35CrMo4				
Traitement de référence	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A$ % (après rupture)	KCU (J/cm <sup>2</sup> )
H 850°C R 200°C	90	105-130	10	50
H 850°C R 200°C	135	160-195	5	30

$R_e$  : La limite élastique en N/mm<sup>2</sup>

$R_m$  : Résistance à la rupture en N/mm<sup>2</sup>

$A\%$  : Allongement après rupture %

KCU : Résilience en J/cm<sup>2</sup> pour éprouvette entaillé en u

H 850°C : Austénitisé à 850°C

R 200°C : Revenu à 250°C.

❖ Les caractéristiques mécaniques réalisables sur barres à l'état traité de l'acier 25CrMo4 donnée par la norme NF A 35-552 sont : [7]

**Tableau I.4** : Les caractéristiques mécaniques réalisables sur barres à l'état traité de l'acier 25CrMo4 selon la norme NF A 35-552.

Diamètre d (mm)	$R_{e0.2}$ (N/mm) Min	R (N/mm)	A % Min	KCU (J/cm <sup>2</sup> ) Min
d < 16 mm	700	880-1080	12	70
16 < d < 40 mm	600	780-930	14	70
40 < d < 100 mm	530	690-840	15	70
100 < d < 160 mm	490	630-780	15	70

$R_e$  : la limite élastique en (N/mm<sup>2</sup>)

$R_m$  : résistance à la rupture en (N/mm<sup>2</sup>)

$A\%$  : allongement après rupture %

KCU : résilience en J/cm<sup>2</sup> pour éprouvette entaillé en u.

### 1.4.1 Dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre matériau plus dur que lui. Plusieurs types d'essais de dureté sont couramment utilisés, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme du pénétrateur et la valeur de la charge appliquée.

#### 1.4.1.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à enfoncer, avec une force donnée, dans la surface de la pièce, un pénétrateur (bille, cône, pyramide) et lire la résistance à cette pénétration qui donne les valeurs de la dureté.

#### 1.4.1.2 Types d'essai

##### ❖ Essai brinell NF A 03-152 :

- **Le principe**

- Le pénétrateur est une bille d'acier dur trempé de diamètre  $D$ . On mesure le diamètre  $d$  de l'empreinte obtenue sous une charge  $F$  [kgf].

- La dureté brinell est le quotient de cette charge par l'aire de l'empreinte.

- **Domaine d'application**

L'essai Brinell convient pour tous les métaux dont la dureté est inférieure à 400 unités ; Au-delà, la bille risque d'être déformée.

##### ❖ Essai Vickers NF A 03-154 :

- **Le principe :**

- Le pénétrateur est en forme de pyramide droite à base carré d'angle au sommet égale à  $136^\circ$ . On mesure la diagonale  $d$  de l'empreinte obtenue sous une charge  $F$ .

- La dureté Vickers est le quotient de charge  $P = F/S$  (en  $\text{kgf/mm}^2$ ).

- **Domaine d'application**

L'essai Vickers convient pour tous les métaux, de toutes dureté, mais il est particulièrement utilisé pour la mesure de la dureté de pièces très minces ou de couches minces (cémentées, nitrurées) de pièces traitées.

❖ **Essai RockwellNF A 03-153 :**

• **Le principe**

Le pénétrateur est un cône d'angle au sommet égal à 120° (terminé par une calotte sphérique de rayon égale à 0.2 mm), ou une bille de diamètre D. Il est imprimé dans le métal d'abord sous une charge F0. On déduit la dureté Rockwell de l'accroissement de profondeur de pénétration, mesuré entre la troisième et la première opération.

• **Domaine d'application**

-L'essai Rockwell (cône), s'applique pour : les métaux trempés à cœur, les métaux très durs ( $20 < HR < 70$ ) ou les couches cémentées et trempées ayant au moins 0.7 mm d'épaisseur. Pour une couche plus mince, la déformation du métal plus tendre fausse le résultat.

- L'essai Rockwell (bille) s'applique pour les aciers non trempés et certains alliages cuivreux.

#### I.4.2 La résilience[9]

La résilience est l'énergie exprimée en joules par  $\text{cm}^2$ , nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette.

##### I.4.2.1 Le principe de l'essai

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en V ou en U. On détermine alors l'énergie W absorbée par cette éprouvette après rupture.

❖ **Résilience (KC) =  $\frac{\text{énergie absorbée à la repture } W \text{ (joules)}}{\text{section au droite de l'netaille } (\text{cm}^2)}$**

**L'énergie absorbée :  $w = (mgh_0 - mgh_1)$ .**

**m** : la masse du marteau(g).

**g** : la gravité qui est égale à **9.81 (m/s<sup>2</sup>)**.

**hoet h<sub>1</sub>** : la différence de hauteur (cm).

### 1.4.2.2 La rupture des aciers

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties. Sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit plus au moins à grande vitesse par propagation des fissures existant dans le matériau.

La rupture d'une pièce nécessite de formuler un diagnostic sur les causes et les mécanismes mis en jeu.

Un type de rupture entraîne un faciès caractéristique, et par référence avec des faciès-types, on pourra analyser une cassure. [8].

L'essai de résilience nous indique aussi, mise à part l'énergie absorbée, le faciès de rupture des éprouvettes :

### 1.4.2.3 Faciès de ruptures

❖ Matériau ductile : L'éprouvette présente :

- Un resserrement de la zone de striction.
- Une zone centrale présentant des cupules, marquant un arrachement de la matière.
- Une zone périphérique présentant une perte de  $45^\circ$  à l'axe de tractions, correspondant à un cisaillement.

❖ Matériau fragile :

- L'éprouvette ne présente pas de resserrement.
- La surface de rupture est perpendiculaire à l'axe de traction.

#### a) Rupture fragile

La rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).

#### b) rupture ductile

La rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusions.

Dans ce mode de rupture, la déformation plastique est en général importante (grande consommation d'énergie).

Il y a déformation plastique autour des inclusions, formations ou microcavité, suivi d'un de ces dernier, allongement dans le sens de la déformation .par cisaillement et striction, provoquant ainsi la rupture finale de l'éprouvette.

Ceci conduit à la naissance de microreliefs appelés cupules qui ont des formes allongées dans la direction de la déformation. [8]

## **I.5 Les aciers faiblement alliés et l'influence des éléments d'alliages dans l'acier [10]**

Avant d'étudier l'influence des éléments Cr et Mo, nous jugeons utile d'étudier les effets des éléments d'élaboration.

Tous les aciers industriels contiennent, outre le carbone, d'autres éléments qui sont, soit des résiduels non éliminés au cours de l'élaboration du métal, soit des éléments résultant d'addition fais volontaire.

Les éléments présents dans les aciers 35CrMo4 et 25CrMo4 considéré comme des aciers de construction faiblement alliés sont : le carbone, le manganèse, le silicium, le chrome et le molybdène. Seuls les deux derniers sont considérés comme éléments d'addition. Les éléments C, Mn, et le Si sont obtenus lors de l'élaboration de l'alliage de base après un ajustement convenable de la composition.

### **I.5.1 Influence des éléments d'élaboration [3, 11,12]**

#### **❖ Influence du carbone (C)**

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

#### **❖ Influence du manganèse (Mn)**

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

#### **❖ Influence du silicium (Si)**

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

### **I.5.2 Influence des éléments d'addition [3, 11,12]**

#### **❖ Influence du chrome (Cr)**

- Le chrome accroît beaucoup la pénétration à la trempe.
- Le chrome a une grande affinité pour le carbone avec lequel il donne des carbures plus durs que la cémentite, mais sans augmenter la fragilité.
- Le chrome augmente la résistance à l'adoucissement lors du revenu.

**❖ Influence du molybdène (Mo)**

- Accroît fortement la trempabilité davantage que le chrome et trois fois plus que le nickel.
- Le molybdène élève la température de grossissement de l'austénite.
- Augmente la résistance à la corrosion.
- Forme des particules résistantes à l'abrasion.

**I.5.3 Diagramme fer-carbone**

La figure (fig. I.04) représente le diagramme d'équilibre fer-carbone. Il traduit la composition de phases et la structure des aciers à différentes températures.

**1. LES PHASES DU SYSTEME FER-CARBONE****a) La ferrite  $\alpha$** 

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer (solubilité maximale à 0.02% en masse à 727°C°).

**b) La ferrite  $\delta$** 

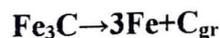
Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer (solubilité maximale à 0.1% en masse à 1487°C°).

**c) L'austénite  $\gamma$** 

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\gamma$ .

**d) La cémentite (Carbure de fer  $Fe_3C$ )**

Sa composition correspond à une teneur de 6.67% en masse de carbone. Ce carbure est un composé interstitiel à maille orthorhombique. La cémentite est un carbure métastable, qui a tendance à se décomposer en fer et graphite.

**e) Le carbone pur (graphite)  $C_{gr}$** 

Le graphite est la forme stable de la phase riche en carbone.

2. Points de transformation

- $A_1$  : température d'équilibre définissant la limite inférieure du domaine d'existence de l'austénite.

- $Ac_1$  : température à laquelle l'austénite commence à se former au cours du chauffage.

- $Ac_3$  : température à laquelle la ferrite achève de se transformer en austénite au cours du chauffage.

- $Ac_{cm}$  : température à laquelle la cémentite d'un acier hyper eutectoïde achève de se dissoudre au cours du chauffage.

- $Ar_1$  : température à laquelle l'austénite achève de se transformer en ferrite  $\alpha$  ou en ferrite  $\delta$  et cémentite au cours du refroidissement.

- $Ar_3$  : température à laquelle la ferrite commence à se former au cours du refroidissement.

- $Ar_{cm}$  : température à laquelle cémentite commence à se former au cours du refroidissement d'un acier hyper eutectoïde.

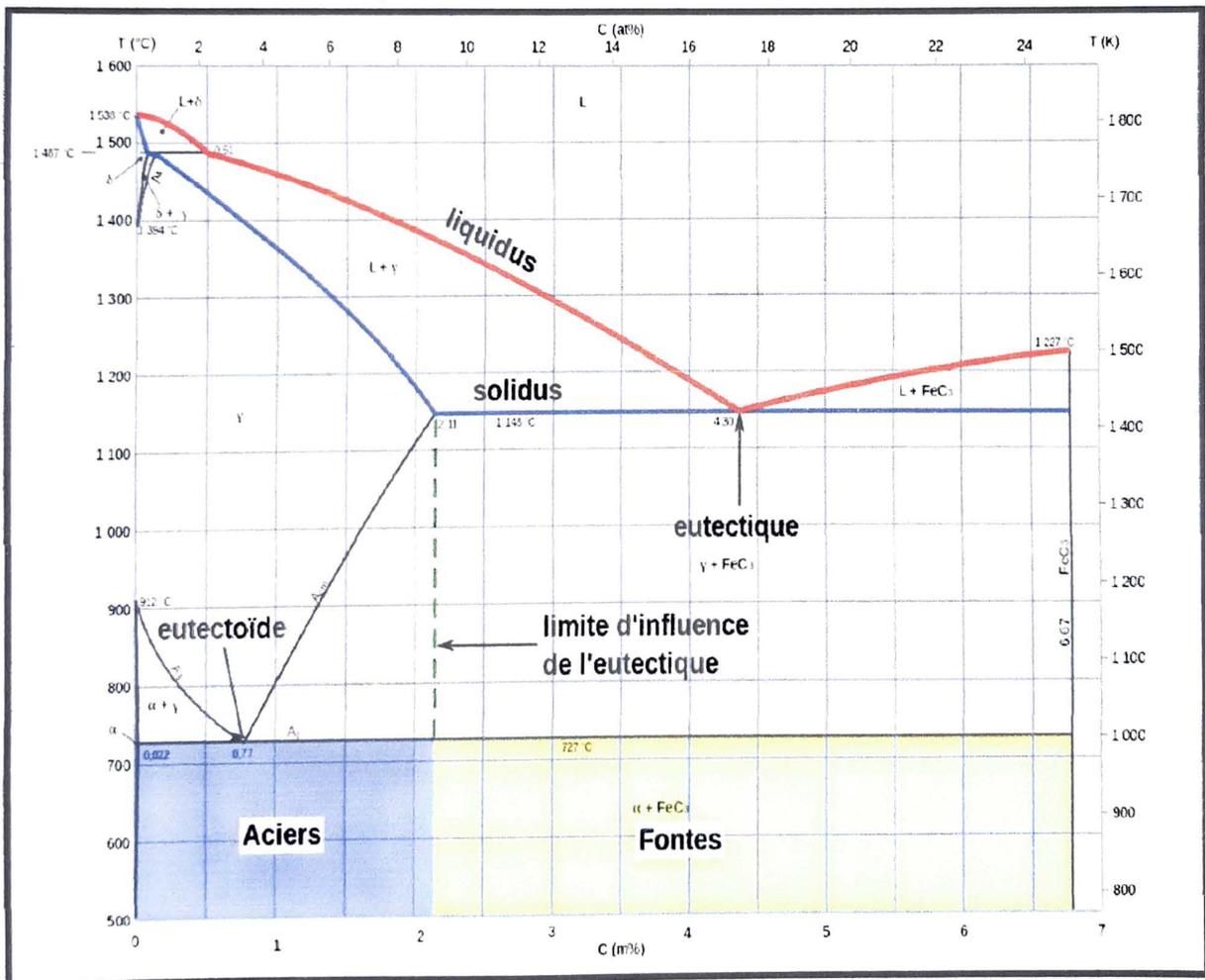


Figure I.1 : Diagramme métastable fer-carbone

## 1.6 Les traitements thermique [13]

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement, qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme.

❖ Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée.

❖ Les buts principalement recherchés étant l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité.

❖ Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique généralement un traitement thermique approprié.

❖ Techniquement, un traitement thermique est défini par la variation de la température du métal en fonction du temps. (Cycle thermique).

D'une façon générale un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique d'un alliage, mais il peut apporter des modifications relatives aux trois points de vue suivants :

❖ Constitution (état du carbone et forme allotropique du fer).

❖ Structure (gros grain et répartition des constituants).

❖ Etat mécanique (différences de température aux divers points de la pièce provoquent des irrégularités de dilatation qui peuvent créer des contraintes propres et causer des déformations externes).

On se propose d'améliorer le métal en agissant sur sa constitution et sa structure. Tout en évitant de détruire l'état d'équilibre mécanique.

Les paramètres des traitements thermiques dépendent :

❖ Produit traité (composition chimique, forme volume des pièces, état structural... etc.).

❖ De la qualité du produit qu'on veut obtenir en vue de l'application (Propriétés, structures).

On distingue les trois étapes de traitement thermique suivant:

- Trempe.
- Revenu.
- Recuits.

### I.6.1 Austénitisation

L'austénitisation dit homogénéisation a pour le but de ramener l'acier au repaire « 0 » dans le cas des aciers faiblement alliés

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques en austénite et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

La bainite se forme dans l'intervalle  $B_s$ - $M_s$  avec  $B_s = 525^\circ\text{C}$  et  $M_s = 340^\circ\text{C}$ .

La bainite inférieure commence à précipiter à partir de 400°C environ.

Les éléments présents déplacent le diagramme vers la droite, Ils retardant la germination de la ferrite et de la cémentite.

Le chrome et le molybdène pour par leur nature carburigène, retardant la transformation perlitique et changent la cinétique de la transformation bainitique.

### I.6.2 La trempe [14]

La trempe est un traitement thermique qui a pour but d'améliorer des propriétés mécaniques du métal en lui augmentant sa résistance à la rupture pour les aciers de construction qui subiront après trempe, un revenu à haute température.

- Augmentation de la limite élastique : pour aciers à ressorts.
- Augmentation de la dureté : pièces de frottement et outils.
- Diminution de la résilience (aciers demis durs, durs...).
- Augmentation de la résilience : aciers doux de construction et aciers Auto-Trempants.

La trempe a pour but aussi de régénérer le métal surchauffé. La trempe comprend :

**a) Chauffage :** A une température supérieure au point de transformation  $A_3$  (dite température de trempe) correspondant à un état austénitique (provoquer la transformation du fer  $\alpha$  en fer  $\delta$ ).

- La durée de mise en température est suffisamment prolongée pour que l'homogénéité thermique soit réalisée jusqu'au cœur de la pièce.

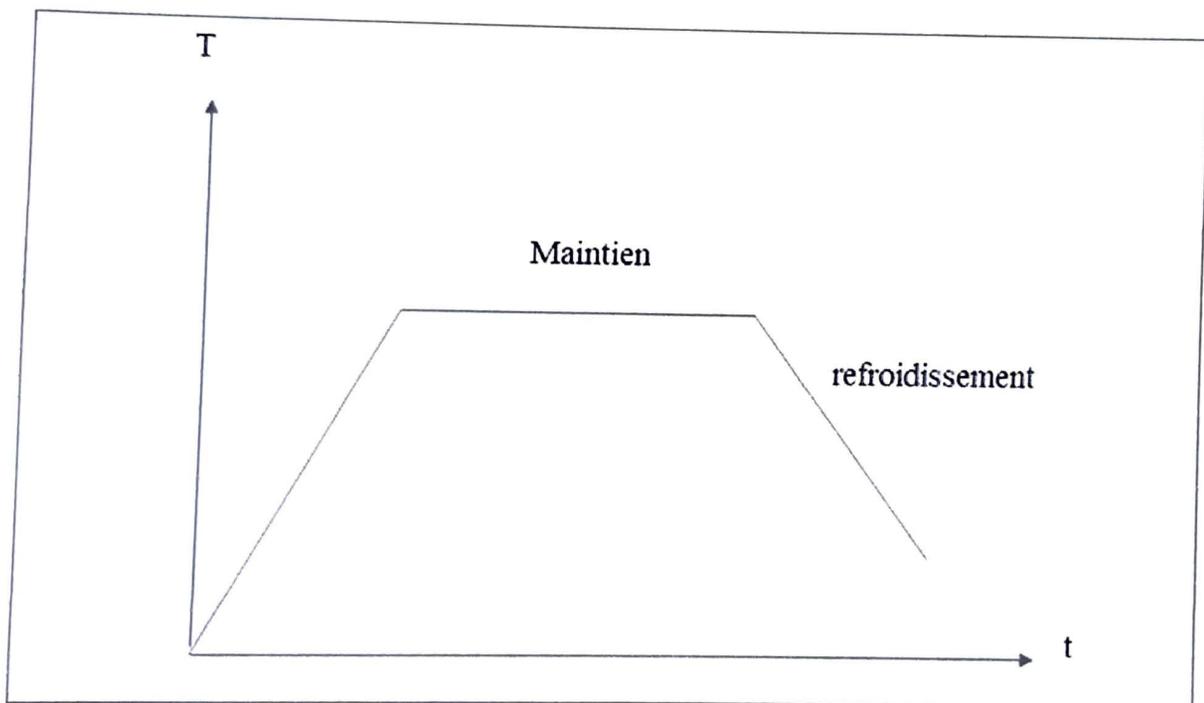
**b) Le maintien en température :** Pour réaliser plus ou moins complètement la mise en solution des carbures dans le fer  $\delta$  et l'homogénéisation de l'austénite.

L'ensemble de ces deux phases est dit « austénitisation ».

c) **Le refroidissement** : On veille à ce que le refroidissement soit suffisamment rapide afin d'éviter la transformation de l'austénite en constituants d'équilibre ferrite et perlite) et d'obtenir plutôt une structure martensitique, la vitesse de refroidissement est fonction de la composition chimique de l'acier des conditions d'austénitisation, ... etc.).

Les milieux de trempe les plus utilisés sont :

- ✓ L'huile.
- ✓ L'eau.
- ✓ Les brouillards (courant d'air, contenant des gouttelettes d'eau en suspension).
- ✓ Les bains fluidisés (courant gazeux).
- ✓ L'air et les gaz.



**Figure I.2** : Procédée de trempe

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante, il est maximal lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée. La viscosité de l'huile, diminue quand sa température augmente, ce phénomène provoque une augmentation du pouvoir refroidissant, il est donc nécessaire de contrôler en permanence la température du bain.

Enfin l'utilisation de la trempe à l'huile impose la mise en œuvre des moyens de prévention et de lutte contre les incendies, après trempe à l'huile il est nécessaire de dégraisser les pièces.

### I.6.3 Revenu

L'acier trempé est souvent très dur qu'il n'est nécessaire généralement trop fragile pour pouvoir être mis en service, alors la trempe est habituellement suivie d'un revenu qui consiste en un chauffage au-dessous de  $A_{c1}$ . Avec un maintien de durée suffisante, suivi d'un refroidissement relativement rapide.

La température de revenu est choisie en fonction de la composition chimique et plus particulièrement en fonction des propriétés chimiques exigées par le lieu d'emploi du matériau.

Le revenu a pour but de diminuer les effets de trempe. Il supprime les tensions internes, en partie responsables de la fragilité de l'acier trempé, en diminuant très peu la dureté.

#### ❖ Revenu de la martensite [8]

Les réactions au cours de revenu varient avec le temps et surtout avec la température. Selon ce facteur, on a envisagé quatre étapes.

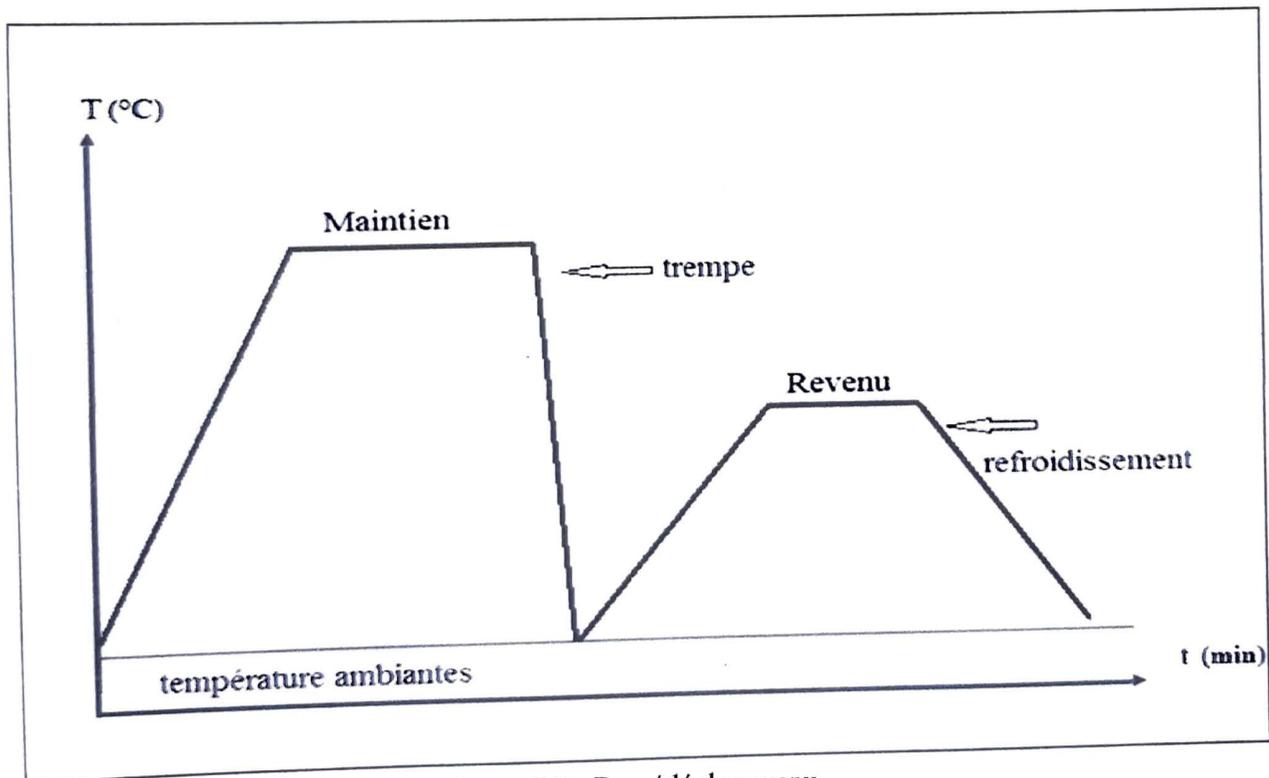


Figure I.3 : Procédé de revenu

a) **Premier stade** : à des températures comprises entre l'ambiante et 100 à 150°C. Le carbone a tendance à quitter les réseaux quadratiques de la martensite, sursaturée en carbone.

Cette migration cesse pour une teneur de martensite en carbone d'environ 0.25% C. pendant ce stade se produit une relaxation des contraintes qui engendre une baisse de la résistance à la traction et une remontée sensiblement de la limite d'élasticité.

b) **Deuxième stade** : à partir de 130°C environ jusqu'à 250 à 300°C. Il y a précipitation du carbure  $[Fe_2C_2]$ , puis pour certains aciers du carbure  $[Fe_5C_2]$ .

La martensite se transforme en ferrite.

c) **Troisième stade** : entre 300 et 450°C il y a formation de cémentite  $[Fe_3C]$  sous forme de plaquettes et disparition des autres carbures. La structure est donc constituée de ferrite et de cémentite pendant ce stade les caractéristiques de résistance de la martensite décroissent sensiblement tandis que les caractéristiques de ductilité s'améliorent généralement.

d) **Quatrième stade** : une nouvelle étape apparaît à des températures supérieures à 450°C, si l'acier contient des éléments carburigènes (Mo, Cr, ...) en quantité suffisante. La cémentite échange son carbone avec les éléments carburigènes :

La cémentite se dissout et des carbures alliés précipitent ( $Mo_2C$ , ...). On dit qu'il y a durcissement secondaire.

Au-delà de 550°C. On assiste à la coalescence de ces précipités accompagnée d'un adoucissement.

#### I.6.4 Recuits [14]

Le recuit est un traitement thermique qui consiste en un chauffage des Pièces à une température supérieure au point de transformation  $A_1$ , suivi d'un refroidissement lent. De vitesses inférieures à la vitesse critique de la trempe.

Il a pour but :

- ❖ Supprimer les effets de la trempe : « recuit d'adoucissement ».
- Régénérer le métal surchauffé, en lui donnant une texture à grains fin caractérisant une amélioration des propriétés mécaniques : « recuit de régénération ».
- ❖ Supprimer l'écroutissage résultant d'un travail mécanique à froid où les tensions internes provoqués par un forgeage inégalement réparti dans les différentes parties de la pièce et exécuté à trop basse température « recuit de normalisation ».

Comme tous les traitements thermiques. Un recuit comporte :

- Un chauffage.
- Un maintien à la température voulu.
- Un refroidissement.

### **1.6.5 Phénomène liés au traitement thermique**

Les traitements thermiques peuvent entraîner divers incidents par fois indésirables dont les plus connus sont :

❖ **Surchauffe** : un chauffage effectué à de très hautes températures ou pendant des durées prolongées engendre un grossissement exagéré des grains, appelé surchauffe.

Ce phénomène est généralement accompagné d'une dégradation des propriétés mécaniques.

❖ **Contraintes propres** provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement. Entre les divers points de la pièce.

❖ **Tapures (fissures)** : elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut ; on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccords brusques etc.

❖ **Déformation et gauchissements** : concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène.

❖ Au début, seul les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite. Ce qui provoque des contraintes de traction sur le cœur de la pièce qui est encore plastique, puis les couches internes se transforment à leur tour. La dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides donc peu plastiques un effort de traction de cœur étant en état de compression.

### **1.6.6 Influence de la vitesse de refroidissement [15]**

L'augmentation de la vitesse de refroidissement conduit à des structures de plus en plus fines. Donc le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse, pour assurer l'obtention de la martensite sans produire de défauts tels que tapures ou déformations.

### I.6.7 Trempabilité [10]

La trempabilité caractérise l'aptitude d'un acier à former de la martensite aux différents points d'une pièce en se refroidissant à partir d'une température correspondant à l'état austénitique.

Elle se définit par la connaissance de la dureté en divers points d'une pièce d'acier pour des conditions de trempé (température de chauffage milieu de refroidissement) déterminées.

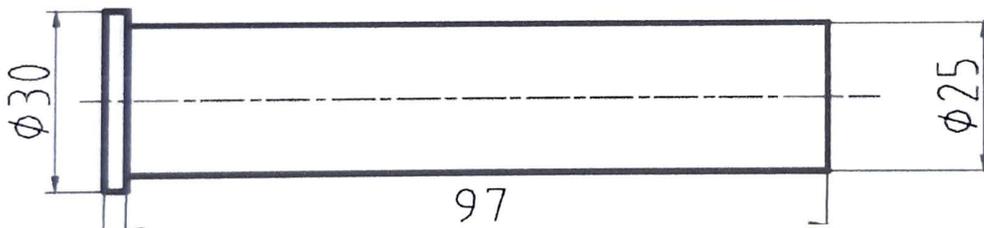
Eventuellement, la trempabilité d'un acier peut être légèrement améliorée par l'élévation de la température de trempé ou par l'accroissement du temps de maintien (le grain grossit, l'homogénéité s'améliore. La dissolution des carbures est plus complète).

#### ❖ Essai de Jominy

Pour déterminer la trempabilité d'un acier, on utilise une technique commode qui est l'essai Jominy. Cette méthode consiste à :

- Austénitiser dans des conditions convenables une « éprouvette Jominy »

Normalisée de **25mm** de diamètre et d'une longueur de **100mm** (figure I.4).



**Figure I.4 :** Eprouvette Jominy.

- Tremper la base inférieure de cette éprouvette, tenue à l'aide d'un support approprié, par un jet d'eau courante de température comprise entre 15 et 25°C jusqu'à son refroidissement total par conduction (**Figure I.5**).

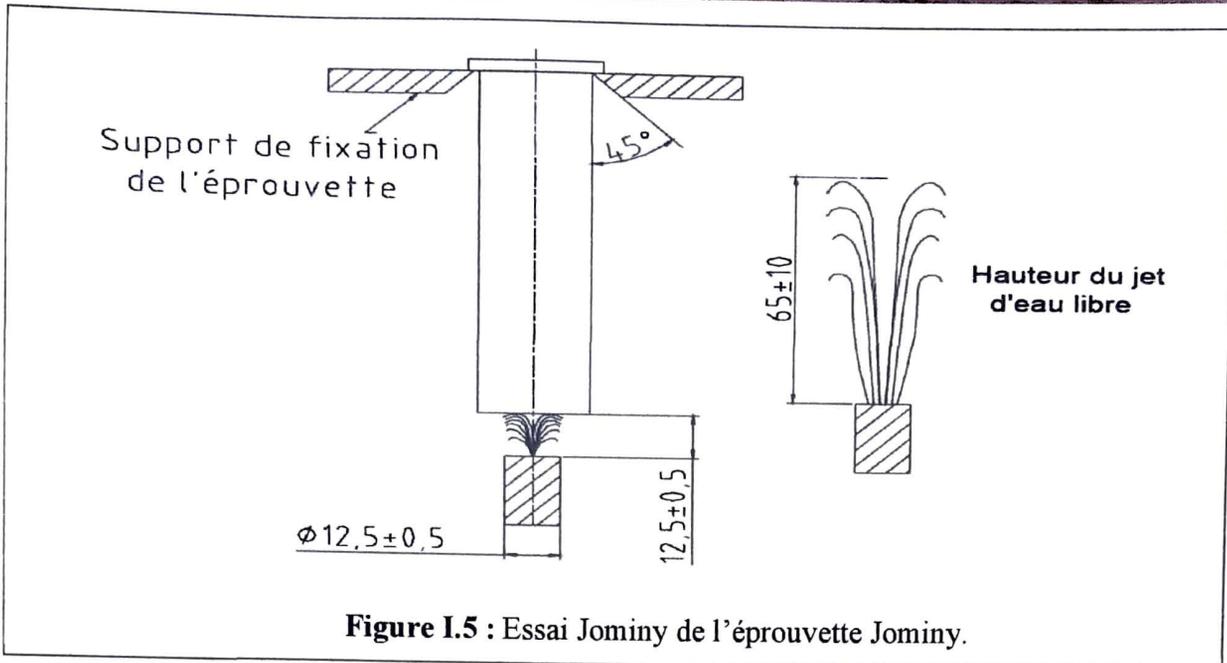


Figure I.5 : Essai Jominy de l'éprouvette Jominy.

- Mesurer la variation de la dureté sur un méplat de la génératrice de l'éprouvette à partir de son extrémité trempée selon les distances suivantes : 1,5, 3, 5, 7, 9, 10, 13,15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70... prises à partir de son extrémité trempée par le jet.

Ces distances seront désignées J1, J3, J5, J7, J9... etc.

- La courbe de la dureté H (HRC, HV) en fonction de la distance d (mm) entre la base refroidie et le point de relèvement de la mesure de dureté. Cette courbe qui porte le nom de courbe Jominy, permet de déterminer la trempabilité de l'acier (Figure I.6).

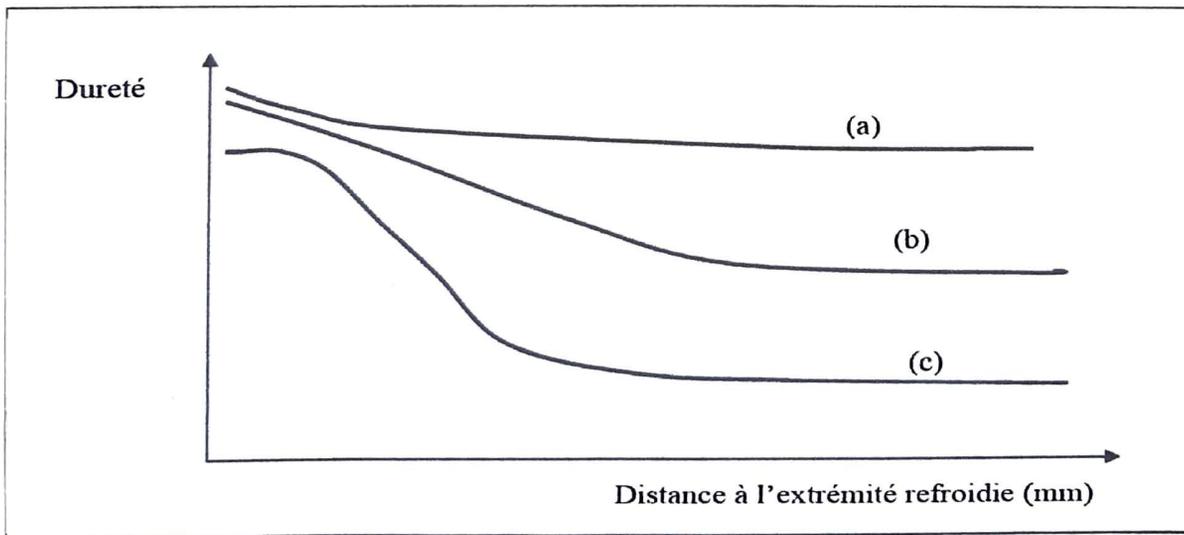


Figure I.6 : Courbe Jominy d'aciers.

- (a) : Acier à bonne trempabilité,
- (b) : Acier à moyenne trempabilité,
- (c) : Acier à mauvaise trempabilité.

On lit en effet la dureté en chaque point de l'éprouvette correspond à la vitesse de refroidissement qu'il a subie. Chaque coulée d'une nuance d'acier normalisé compte sa courbe Jominy propre. Elle doit être comprise entre deux courbes limites normalisées relatives à la nuance qui tolèrent une dispersion due d'une part à la composition chimique du prélèvement et d'autre part à la coulée (Figure I.7)

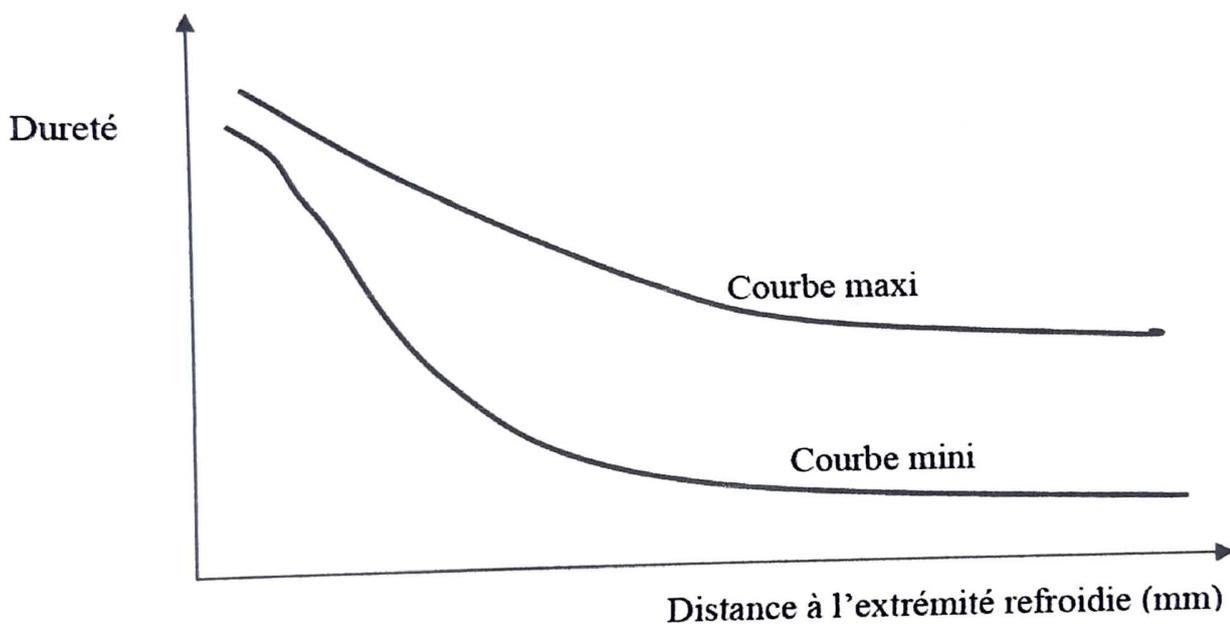


Figure I.7 : Courbes limites normalisées.

La trempabilité d'un acier est considérée :

- Bonne lorsque la courbe Jominy ne subit que de très peu de variation tout en faiblement au nickel et notamment les aciers autotrepants.
- Mauvaise lorsque la nuance durcit uniquement en surface et subit une chute rapide de dureté à partir des couches sous-jacentes (figure I.6 b). Dans ce cas de figure, qui couvre les aciers pour traitements thermiques non alliés, la trempabilité est mal définie.
- Moyenne lorsque la courbe Jominy présente une variation de la dureté (Figure I.6 c).

### I.6.8 Procédés des traitements thermiques [16]

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure I.8).

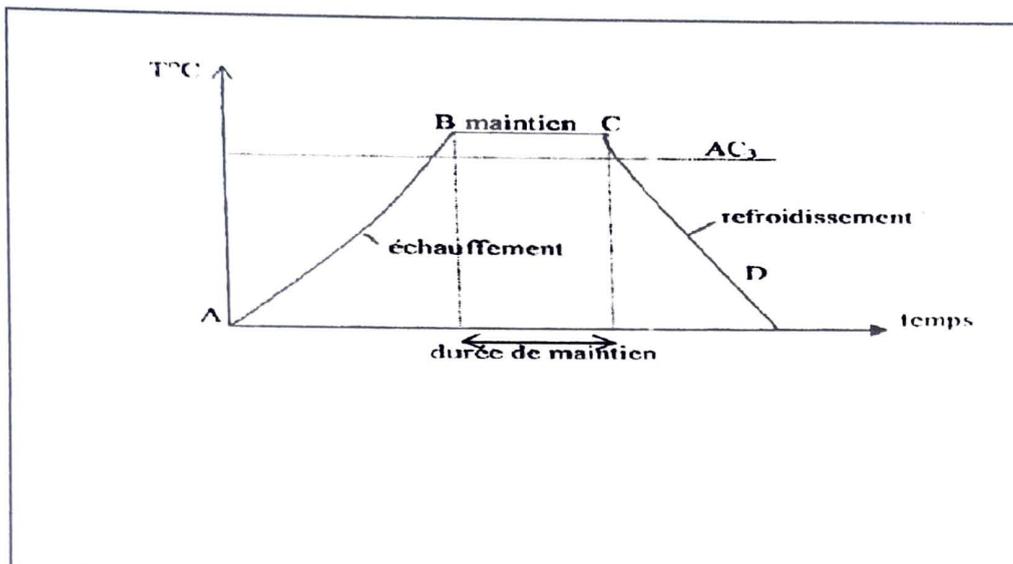


Figure I.8 : Le procédé de traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de Transformation (par exemple :  $AC_3$ ).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
  - lente (dans le four, à l'air).
  - Assez rapide (dans l'huile).
  - Très rapide (dans l'eau).

Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces :

#### 1) Par transmission de la chaleur

❖ Par conductibilité : La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en

❖ **Par convection** : Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.

❖ **Par rayonnement** : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

## 2) **Par production de la chaleur dans la pièce :**

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction)

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées.

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

### **I.6.9 Fours utilisés**

#### ❖ **Fours électriques**

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu forme une résistance entre celles.

**Chapitre II**  
**Matériaux et**  
**techniques**  
**expérimentales**

## II.1 Matériaux étudiés

Les matériaux sur lesquels est portée notre étude sont des aciers faiblement alliés au chrome molybdène de nuance **25CrMo4** et **35CrMo4**.

Ces aciers fournis au niveau du halle de technologie du département de génie mécanique de l'université ABDERAHMANE Mira de Bejaia sont livrés sous forme de cylindres de diamètre 5 cm.

### II.1.1 Composition chimique

D'après la norme AFNOR NF A35-551, la composition chimique (en %) des deux aciers étudiés est comme suit :

**Tableau II.1** : Composition chimique des deux nuances.

Nuance	C	Cr	Mo	Mn	Si	P et S	fe
25CrMo4	0.22 à 0.29	0.85 à 1.15	1.15 à 0.3	0.6 à 0.9	0.01 à 0.4	<0.035	bal
35CrMo4	0.33 à 0.39	0.85 à 1.15	1.15 à 0.3	0.6 à 0.9	0.01 à 0.4	<0.035	bal

#### ❖ Le rôle des éléments chimiques du tableau ci-dessus

**C** : il augmente la dureté de l'acier et il diminue sa résilience.

**Cr** : le chrome augmente la pénétration à la trempe au cœur de l'acier.

**Mo** : il a le même rôle que le chrome pour la trempabilité, il augmente aussi la résistance à la corrosion.

**Mn** : renforce la fragilité aux températures élevées.

**Si** : il augmente la limite d'élasticité.

**S** : ils fragilisent les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doivent pas dépasser 0,035%.

**P** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

## II.2 Préparation des échantillons et des éprouvettes

### II 2.1 Eprouvette de résilience

Dans le but d'effectuer les traitements thermiques nécessaires aux deux nuances d'aciers 25CrMo4 et 35CrMo4 de diamètre de 50 mm et de longueur de 3 m ont été découpés en cylindre de 55mm de longueur à l'aide d'une scie Au niveau de halle de technologie à l'université de Bejaia et l'ENMTP de Bejaia.

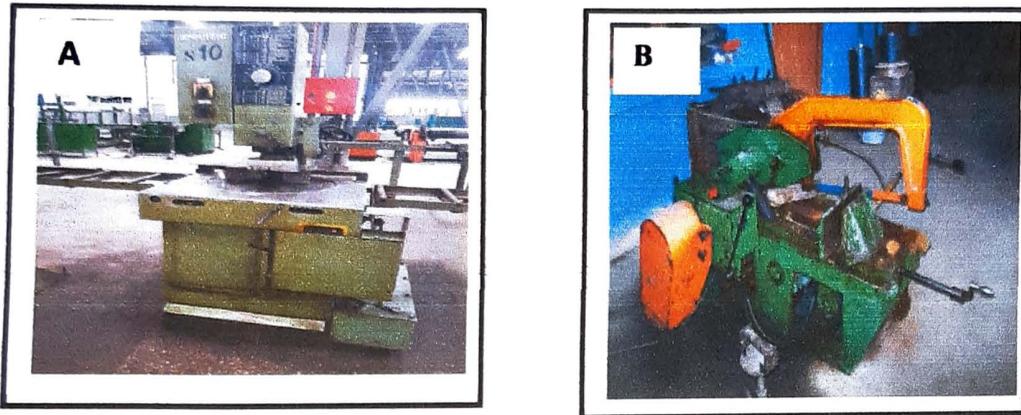


Figure II.1 : photos des scies électriques. A: ENMTP, B : Hall de Technologie

#### ❖ Elaboration de l'éprouvette

C'est un barreau usiné de section carrée, 10 mm de côté et dont la longueur est 55mm. On a élaboré 11 éprouvette de chaque nuance (11 de 25CD4 et 11 de 35CD4).

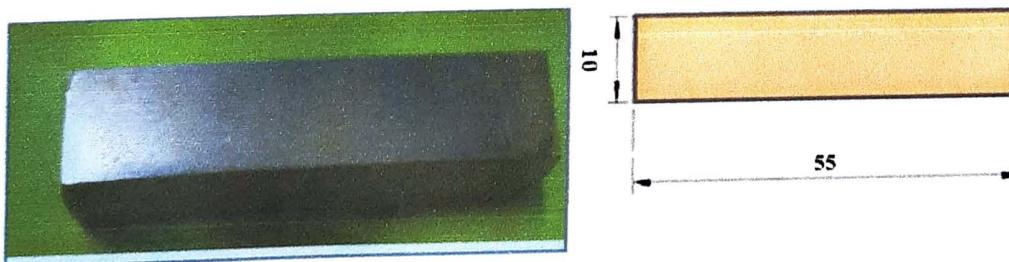


Figure II.2 : éprouvette de résilience standardisée en mm.



Figure II.3 : fraiseuse réglé à  $45^\circ$  pour éprouvette de Charpy V.

#### ❖ Elaboration de l'entaille

L'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de  $45^\circ$ .

On précise par le symbole **KCv** l'essai de résilience en V.

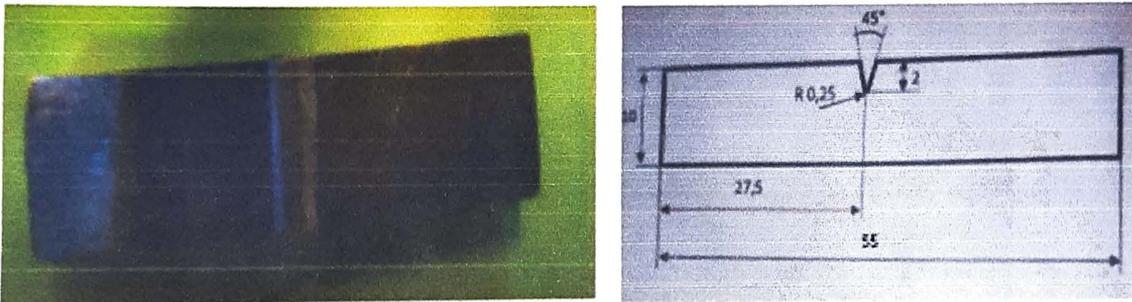


Figure II.4 : Opération de fraisage à  $45^\circ$  pour une entaille V.

## II 2.2 Echantillon de dureté

Les essais de dureté et l'observation microscopique :

Des échantillons de  $1 \text{ cm}^2$  des deux nuances d'aciers ont été préparés pour les essais de dureté.

#### ❖ Fraisage

Le fraisage consiste à usiner les cylindres obtenus au découpage pour obtenir des surfaces de  $1 \text{ cm}^2$ .

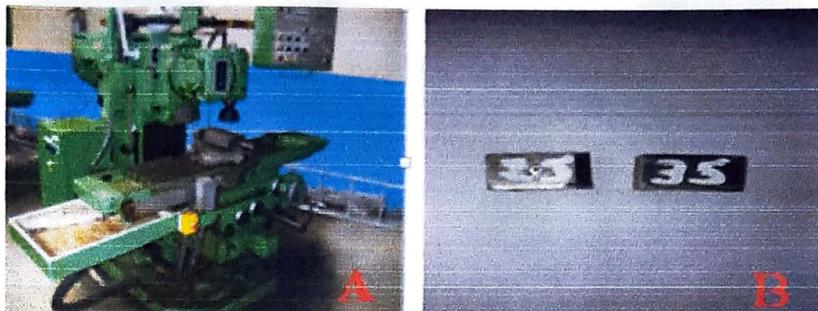


Figure II.5 : fraisage. A : photo d'une fraise, B : échantillon usiné de  $1\text{cm}^2$ .

#### ❖ Polissage mécanique

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon plane brillante et sans rayures ; des papiers abrasifs (p : 100, 360, 600, 800, 1000, 1500, et 2000) ont été utilisés de granulométrie décroissante, sous rinçage à l'eau pour éviter l'échauffement des échantillons.



Figure II.6 : photo d'une polisseuse.

**II 2.3 Observation microscopique**

Pour mettre évidence la microstructure des deux nuances d'aciers **25CrMo4** et **35CrMo4** à l'état de livraison, nous avons préparé un réactif qui s'attaque chimique en Nital (5% de  $\text{HNO}_3$ , 95% de  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), pendant 15 s.

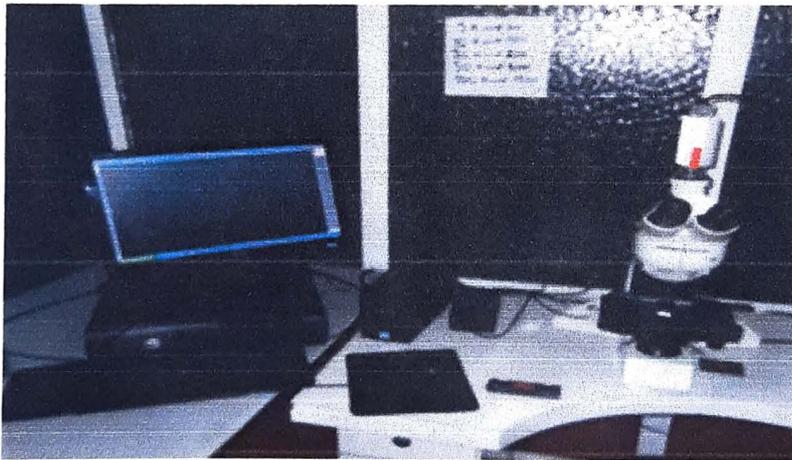
Les observations de différentes microstructures sont réalisées avec un microscope optique.

**❖ Microscopie optique**

La microscopie optique est une méthode chimique d'observation des métaux qui consiste à examiner par réflexion au microscope une surface polie et généralement attaquée.

Elle a pour but principale la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques.

Nos examens de microscopie optique ont été réalisés à l'aide d'un microscope optique et une caméra CCD, et l'ensemble est relie a un ordinateur au niveau de l'laboratoire de physique de l'Université de tizi ouzou.



**Figure II.7 :** photo microscope optique.

### II.3 Traitement thermique

Les traitements thermiques ont été effectués au H.T du département de génie mécanique à l'université A. MIRA de Bejaia.

Les traitements thermiques ont pour but de conférer à l'acier les propriétés convenable pour sa mise en œuvre.

#### II.3.1 Exécution des traitements thermiques

Les traitements thermiques que nous avons utilisés sont : une austénitisation à 860°C pendant 30 min, puis une trempe à l'eau.

Après trempe, ces échantillons ont subit des traitements de revenu à différents températures : 250°C, 350°C, 450°C, 550°C, et cela pendant un temps de maintien de 1h.



Figure II.8 : Four électrique des traitements thermiques utilisé.

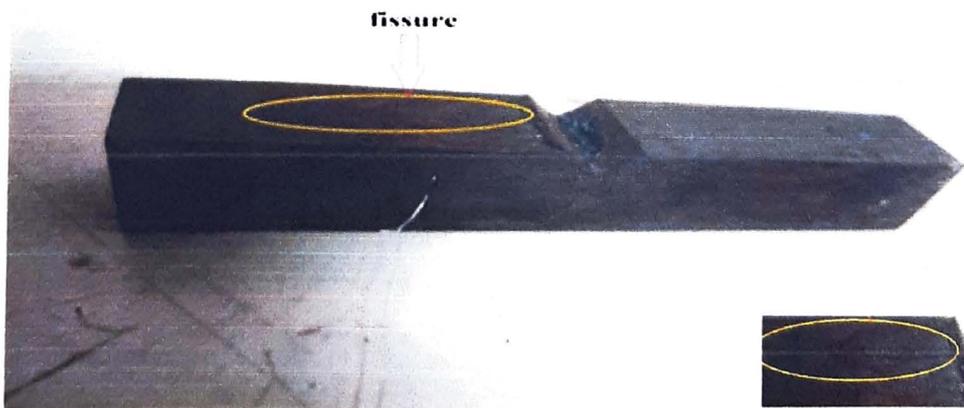


Figure II.9 : Tapure de trempe de nuance d'acier 35CrMo4.

❖ **Essai RockwellNF A 03-153 :**

• **Le principe**

Le pénétrateur est un cône d'angle au sommet égal à  $120^\circ$  (terminé par une calotte sphérique de rayon égale à 0.2 mm), ou une bille de diamètre D. Il est imprimé dans le métal d'abord sous une charge  $F_0$ . On déduit la dureté Rockwell de l'accroissement de profondeur de pénétration, mesuré entre la troisième et la première opération.

• **Domaine d'application**

-L'essai Rockwell (cône), s'applique pour : les métaux trempés à cœur, les métaux très durs ( $20 < HR < 70$ ) ou les couches cémentées et trempées ayant au moins 0.7 mm d'épaisseur. Pour une couche plus mince, la déformation du métal plus tendre fausse le résultat.

- L'essai Rockwell (bille) s'applique pour les aciers non trempés et certains alliages cuivreux.

#### I.4.2 La résilience[9]

La résilience est l'énergie exprimée en joules par  $cm^2$ , nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette.

##### I.4.2.1 Le principe de l'essai

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en V ou en U. On détermine alors l'énergie  $W$  absorbée par cette éprouvette après rupture.

❖ **Résilience (KC) =  $\frac{\text{énergie absorbée à la rupture } W \text{ (joules)}}{\text{section au droite de l'entaille } (cm^2)}$**

L'énergie absorbée :  $w = (mgh_0 - mgh_1)$ .

$m$  : la masse du marteau(g).

$g$  : la gravité qui est égale à **9.81 (m/s<sup>2</sup>)**.

$h_0$  et  $h_1$  : la différence de hauteur (cm).

II.4.3 Machine d'essai

Les essais de résilience ont été effectués au laboratoire de l'ENMTP de Bejaia, sur le mouton pendule Charpy de marque CONTROLAB de type (PW 30 /15).

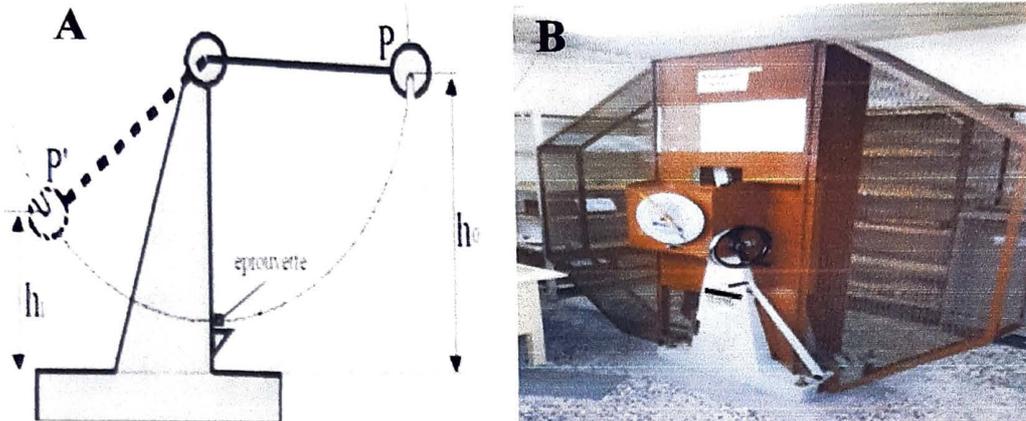


Figure II.10 : machine de résilience. A : le mouton de Charpy, B : machine résilience utilisé de l'ENMTP.

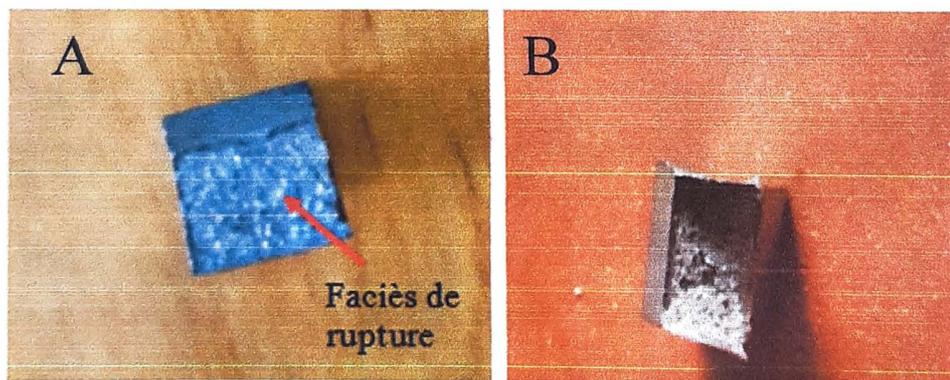


Figure II.11 : faciès de ruptures. A : 35CrMo4, B : 25CrMo4.

## II.5 Essai de dureté (Rockwell)

L'essai consiste à imprimer, en deux temps dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur normalisé et à mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration au moyen d'un comparateur. Deux pénétrateurs sont utilisés :

- Cône de diamant dont l'angle au sommet est de  $120^\circ$ .
- Bille d'acier trempé de diamètre 1/8 ou 1/16 de pouce.
- 1/8 pouce = 0.32 mm , 1/16 pouce = 0.16 mm.

**Remarque :** 1 pouce = 2.59 mm.

### II.5.1 Exécution de l'essai de dureté Rockwell cône de diamant (HRC ou HRA)

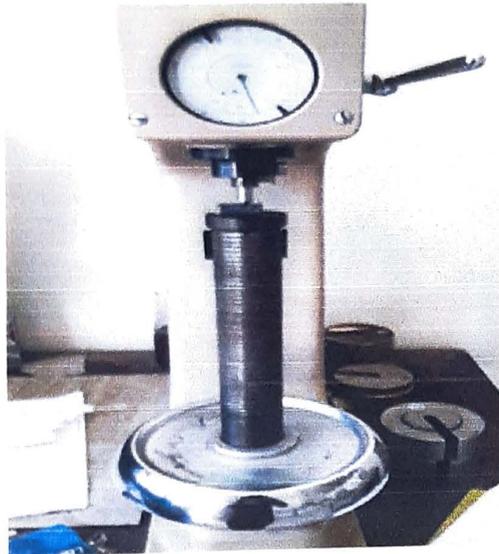
- On utilise le pénétrateur de type normalisé (cône).
- On utilise comme corps pénétrant (pénétrateur) une pointe de diamant légèrement arrondie dont l'angle au sommet est de  $120^\circ$ .
- Le diamant est monté sur la pièce, l'ensemble porte le nom de cône brasle.
- L'effort exercé varie avec la dureté du métal essayé. Il ne dépasse pas 588N (60 kgf).

Le même pénétrateur est utilisé pour deux charges différentes :

- HRC avec une charge de 150 kgf.
- HRA avec une charge de 60 kgf.
- L'échelle de dureté HRC ou HRA est graduée de 0 à 100 unités. La dureté se lit directement sur le comparateur.
- On a fait 3 essayes de dureté pour chaque éprouvette des de nuances d'acier (25CrMo4 et 35CrMo4), avant et après le traitement thermique.

**II.5.2 machine d'essai**

Ce duromètre offre la possibilité de mesurer 3 types de duretés : Brinell, Vickers et Rockwell.



**Figure II.12 : duromètre de Frank modèle 38500**

# **CHAPITRE III**

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### III. Résultats et discussion

#### III.1 Essais de résilience

Après avoir désigné la gamme des températures de revenus (250°C, 350°C, 450°C et 550°C, nous avons étudié l'influence de ces traitements thermiques sur la résilience KCV, après une austénitisation à 860°C. Pour cela, nous avons exécuté des essais de résilience sur plusieurs éprouvettes entaillées en V en fonction de ces températures de revenu. Les résultats obtenus après différents essais sont résumés dans les tableaux III.1 ci-dessous.

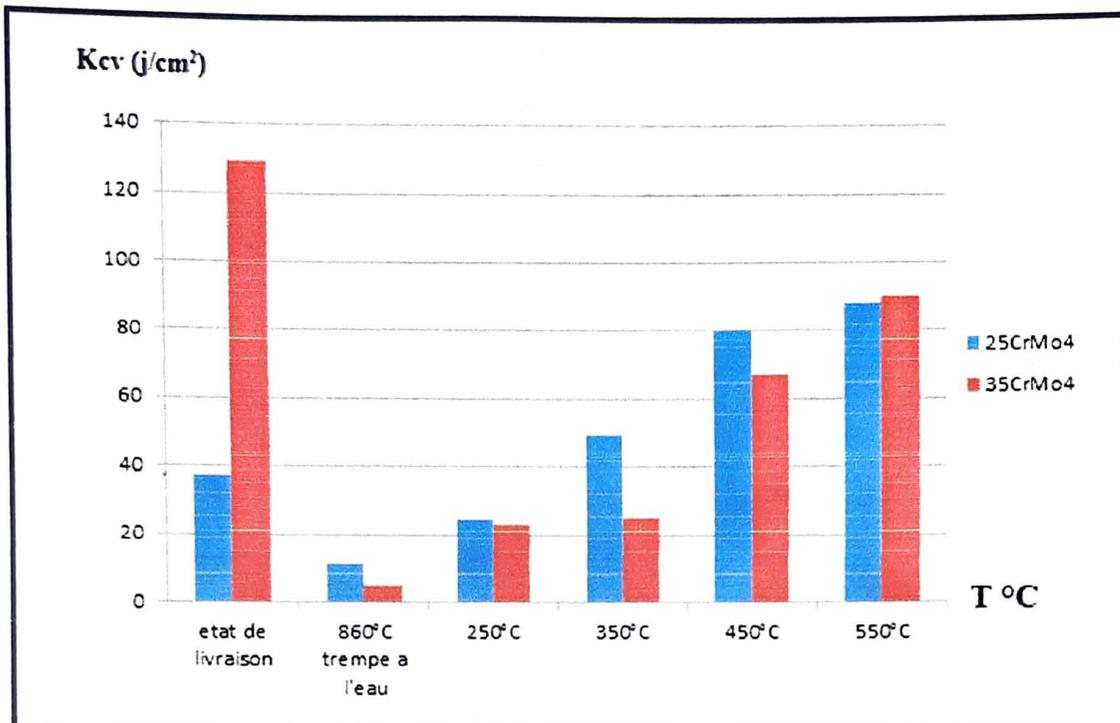
**Tableau III.1** : Résultats des essais de résilience en fonction de la température.

Température (°C)	Austénitisation à 860°C, suivi d'une trempe à l'eau	250	350	450	550	Etat de livraison
KCV (j/cm <sup>2</sup> ) 25CrMo4	11,25	24,375	49,375	80	88,12	37,5
KCV (j/cm <sup>2</sup> ) 35CrMo4	5	23,125	25	67,5	90	129,37

L'examen du tableau, montre que l'acier 25CrMo4, après austénitisation à 860°C, a une résilience de 11.25 j/cm<sup>2</sup>. Par contre pour l'acier 35CrMo4 est de 5 J/cm<sup>2</sup>. Cette différence importante au niveau de la résilience pour les deux nuances d'acier est due à la teneur en carbone pour l'acier 35CrMo4 qui est de 0.35%, largement supérieur à celle de la nuance 25CrM04 qui avoisine 0.25%. Cette teneur en carbone (0.35%) rend l'acier 35CrMo4 dure et fragile par rapport à l'acier 25CrMo4. Cette faible résilience que présente l'acier 35CrMo4 signifie aussi que ce dernier n'absorbe pas beaucoup d'énergie pour résister aux chocs.

Nous remarquons aussi que cette résilience augmente en fonction de la température de revenu pour atteindre une valeur de 88.12 j/cm<sup>2</sup> pour l'acier 25CrMo4, correspondante à la température de revenue de 550°C. Cette augmentation de la résilience et donc de l'énergie absorbée, après rupture de l'éprouvette, signifie que l'éprouvette résiste mieux aux chocs. Cette résistance est due à la diminution des contraintes résiduelles au niveau de la microstructure des éprouvettes après les traitements de revenu.

Pour l'acier 35CrMo4, sa résilience augmente aussi à partir de  $5\text{J}/\text{cm}^2$ , après temps à l'eau, pour atteindre une valeur maximale de  $90\text{J}/\text{cm}^2$ , pour une température de revenu de  $550^\circ\text{C}$ . Ce comportement est similaire à celui de l'acier 25CrMo4.



**Figure III.1 :** Histogramme représentant les résultats de la résilience pour les deux nuances d'aciers 25CrMo4 et 25CrMo4.

A l'état de livraison, après l'essai de résilience des deux nuance d'acier, d'après les images microscopique ci-dessous en remarque que :

- ❖ la nuance 35CrMo4 après la rupture montre une morphologie de grains vifs et brillants ce qui indique que ce dernier est tenace et présente un faciès de rupture fragile.
- ❖ La nuance 25CrMo4 après la rupture montre des reliefs sombres ce qui indique que ce dernier est moins tenace et présente un faciès de rupture ductile.

Cette différence au niveau de la morphologie du faciès de rupture est du au fait que l'acier 35CrMo4 est plus dure que l'acier 25CrMo4, et ceci est visible sur les résultats de la résilience (tableau III.1). L'acier 35CrMo4 présente une faible énergie absorbée par rapport à la nuance 25CrMo4.

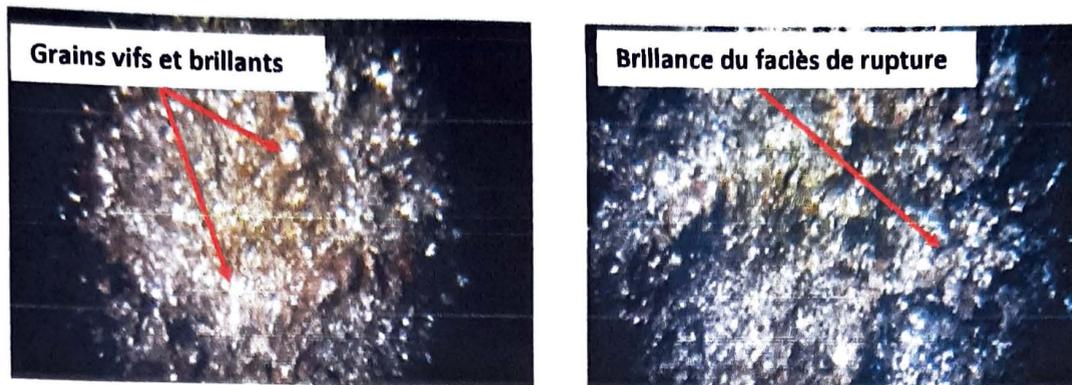


Figure III.2 : 35CrMo4 rupture fragile, faciès vif et brillant.

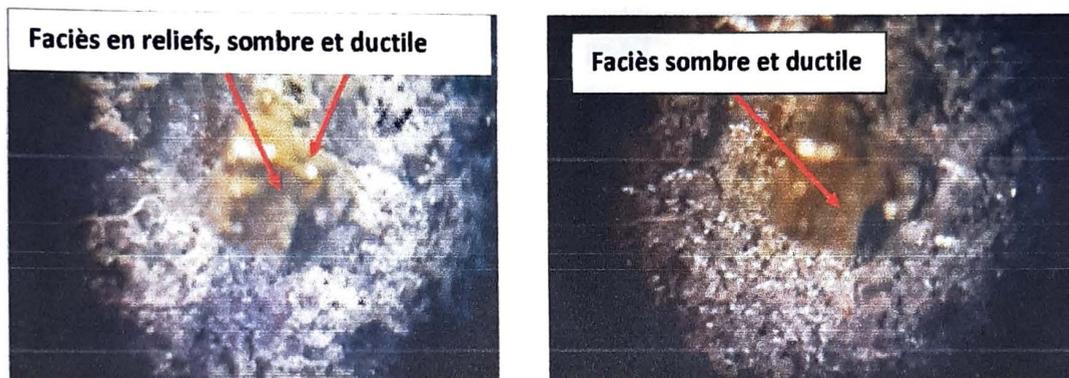


Figure III.3 : 25CrMo4 rupture ductile, faciès en relief sombre.

### III.2 Essais de dureté

Dans la but de mettre en évidence l'influence des traitements thermiques sur la structure des aciers 25CrMo4 et 35Cr Mo4, nous avons suivi l'évaluation de la dureté HRA en utilisant une série d'essai sur 6 échantillons de chaque nuance pour 3 états différents.

- ❖ Etat de livraison.
- ❖ Trempe à eau après une austénitisation à 860°C pendant 30 minutes.
- ❖ Revenu des échantillons à différentes températures 250°C, 350°C, 450°C et 550°C.

L'ensemble des résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.3 ci-dessous.

**Tableau III.2** : Résultats des essais de dureté pour les deux nuances d'aciers.

	Austénitisation à 860°C suivi d'une trempe à eau	250°C	350°C	450°C	550°C	Etat livraison
dureté HRA 35CrMo4	76,33	54,33	71	67	64,66	57,66
dureté HRA 25CrMo4	77	64	68	58,66	53,66	50,66

D'après les résultats mentionnés dans les tableaux ci-dessus on remarque que :

La dureté de notre acier 25CrMo4, à l'état de livraison est de 50,66 HRA. Cette dureté enregistre une valeur maximale après trempe à l'eau qui est de 77 HRA. Cette valeur maximale est due à la formation de martensite après trempe à l'eau. Nous remarquons aussi que la dureté de l'acier 35CrMo4 est plus dure que l'acier 25CrMo4. Cette dureté est due au pourcentage de carbone présent dans l'acier 35CrMo4.

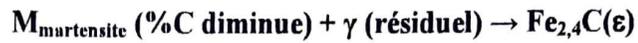
Notons aussi que l'acier 35CrMo4 enregistre une dureté (54,33 HRA), relativement faible par rapport à l'acier 25CrMo4 après revenu à 250°C. Cela est du probablement à la présence de lacunes, de porosité ou inclusions.

Les traitements de revenu ont une influence majeure sur la dureté de l'acier. En effet, à la température de revenu de 250 °C, la dureté de l'acier 25CrMo4 est de 64 HRA. Cette dernière augmente pour atteindre une valeur maximale de 68 HRA pour une température de revenu de 350°C. A partir de cette valeur maximale, nous remarquons une diminution de dureté HRA pour atteindre une valeur de 53,66 à la température de revenu 550°C.

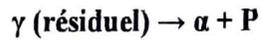
Nous remarquons aussi que l'acier 35CrMo4, enregistre le même comportement en dureté en fonction des températures de revenus. En effet, l'acier 35CrMo4 affiche une dureté maximale de 76,33 HRA après trempe à l'eau qui est due à la formation d'une microstructure martensitique très dure. En fonction des températures de revenus, cette dureté augmente de 54,33 HRA à température de revenu de 250°C pour atteindre une valeur maximale de 71 HRA à température de revenu de 350°C, puis elle diminue pour atteindre une valeur de 64,66 HRA pour la température de 550°C.

Ce comportement en dureté est connu sous le nom fragilité au revenu. En effet les aciers présentent cette caractéristique à des températures de revenu inférieur à 600°. Il s'agit de la précipitation d'un carbure de fer  $\epsilon$ , de composition chimique  $Fe_{2,4}C$ . Ce carbure se forme après décomposition de la martensite en fonction de la température de revenu. Les trois étapes qui se produisent au cours du revenu sont identifiées comme suit [17] :

- **Étape 1** : appauvrissement en carbone de la phase martensitique et précipitation des premiers carbures, appelés carbures de transitions. Cette précipitation du carbure  $\epsilon$  fait augmenté la dureté pour le 25CrMo4 de 64 à 68 HRA et de 54,33 jusqu'à 71 HRA pour l'acier 35CrMo4 (tableau III.2).



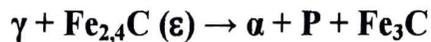
- **Étape 2** : transformation de l'austénite résiduelle instable en ferrite et en cémentite.



- **Étape 3** : perte de la tétragonalité de la martensite et transformation progressive des carbures de transitions en cémentite.



A la fin nous aurons la microstructure d'équilibre ferrito-perlitique comme suit :



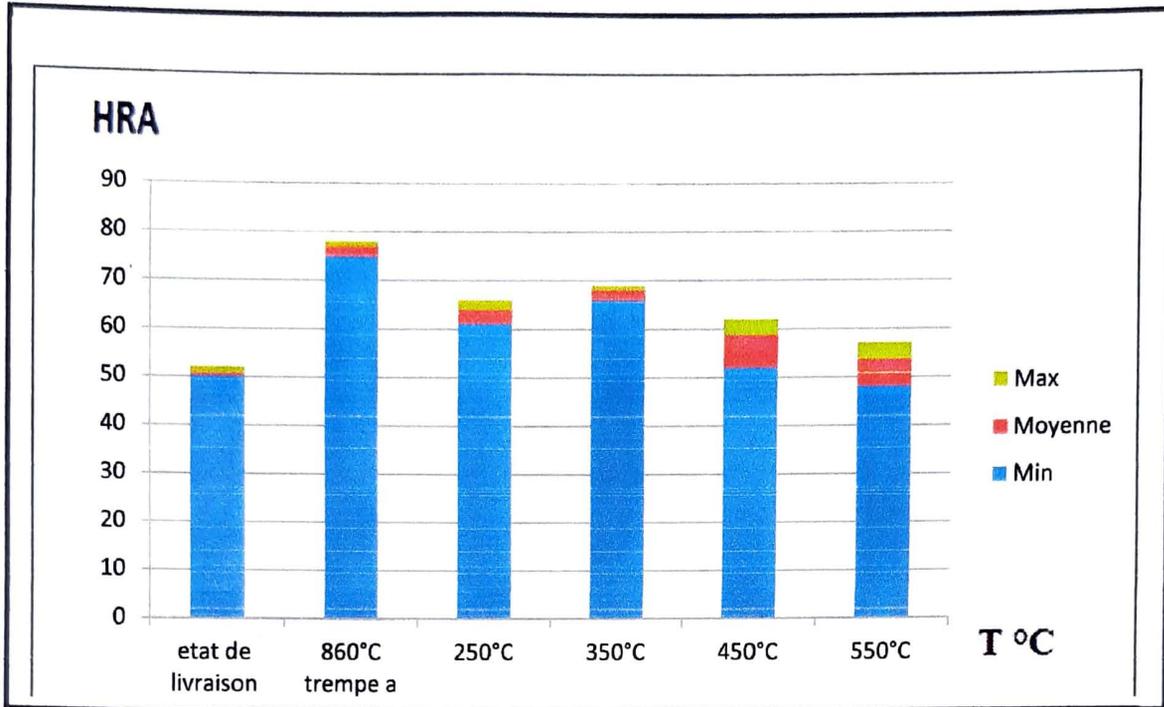


Figure III.4 : Histogramme représente les résultats de dureté pour l'acier 25CrMo4.

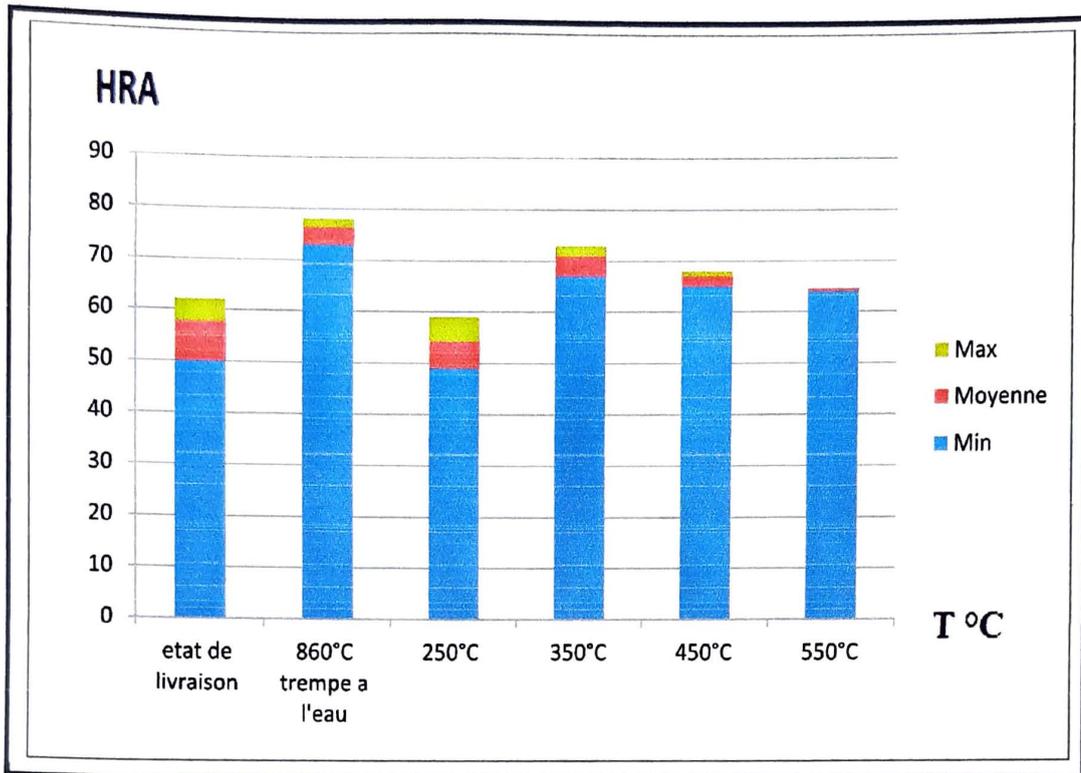


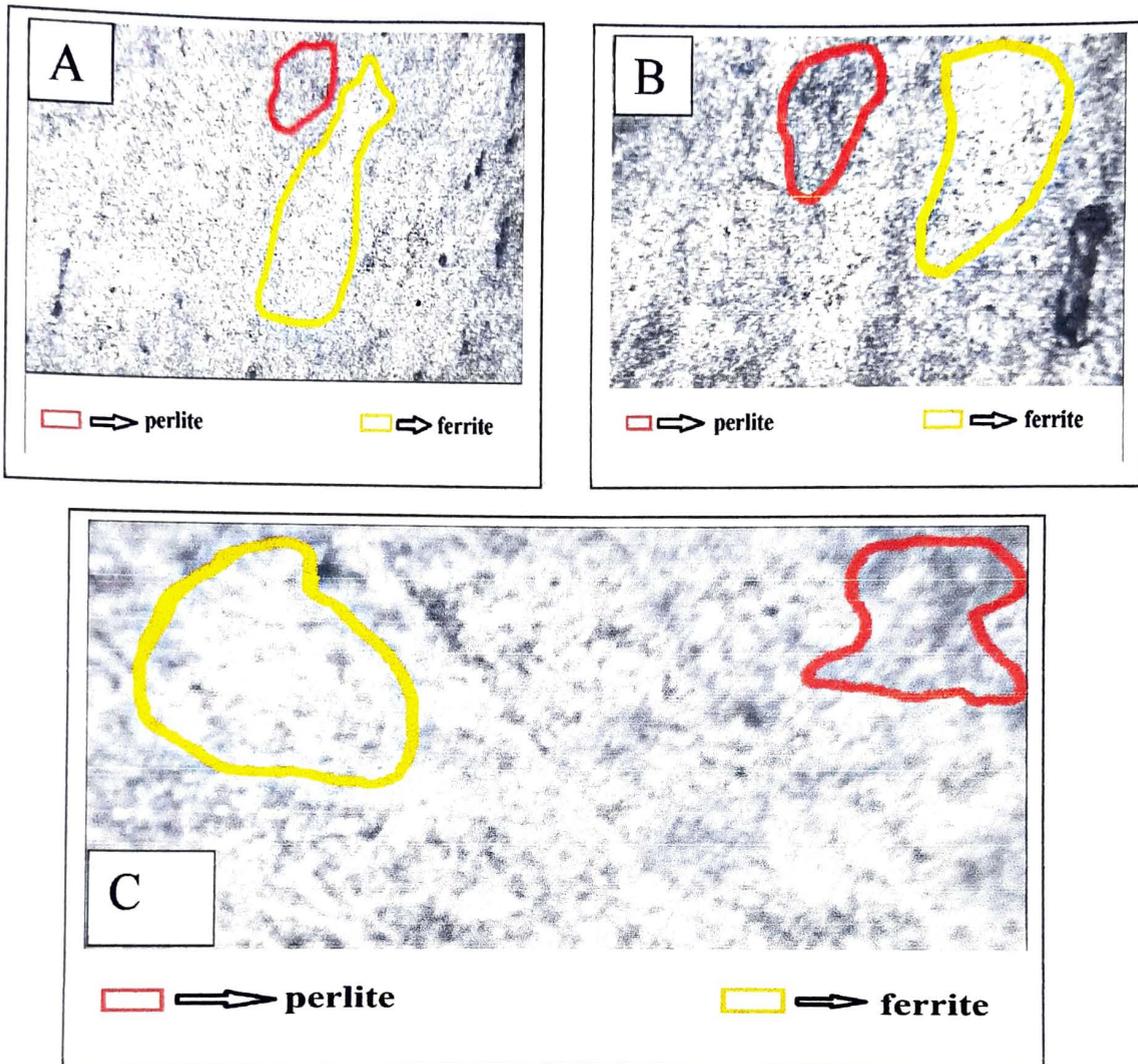
Figure III.5 : Histogramme représente les résultats de dureté pour l'acier 35CrMo4.

### III.3 Observation microscopique

Après le procédé de polissage et l'attaque chimique des échantillons au NITAL (95% d'éthanol et 5% d'acide nitrique), des prises de photos de microstructure ont été réalisées à l'aide d'un microscope optique muni d'une camera CCD et relié à un ordinateur.

Les microstructures (**figure III.6 et figure III.7**) pour les deux nuances d'aciers correspondent à l'état de livraison montrent la présence d'une phase ferritique en claire et d'une phase perlitique sombre.

Malheureusement on n'a pas pu effectuer des microstructures pour les différentes températures de revenus pour la non disponibilité du microscope optique ici au département et pour le nombre d'échantillons important. Signalons aussi qu'on n'a pas pu faire passer tous les échantillons à Tizi Ouzou à cause du nombre d'étudiants.



**Figure III.7:** microstructure optique de nuance d'acier 35CrMo4. A, B, C, G=100X, G=500X, G=1000X

**CONCLUSION  
GENERALE**

Dans le but d'étudier l'effet des traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques (dureté et résilience) de deux aciers de construction faiblement alliés de nuance 35CrMo4 et 25CrMo4, nous avons réalisé une gamme de traitements thermiques bien choisie. Notre travail consisté à austénitiser des échantillons à une température de 860°C suivi d'une trempe à l'eau. Après trempe, nos échantillons ont été revenus à différentes températures 250°C, à 350°C, 450°C et 550°C pendant 1h.

Par le biais des essais mécaniques nous avons cherché l'influence de cette gamme de traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques de dureté et de résilience.

La résilience du 25CrMo4 s'avère plus importante que celle du 35CrMo4. Cette différence est due à la teneur en carbone pour l'acier 35CrMo4 qui est de 0.35%, largement supérieur à celle de la nuance 25CrMo4 qui avoisine 0.25%. Cette teneur en carbone (0.35%) rend l'acier 35CrMo4 dur et fragile par rapport à l'acier 25CrMo4. Cette faible résilience que présente l'acier 35CrMo4 signifie aussi que ce dernier n'absorbe pas beaucoup d'énergie pour résister aux chocs.

Après revenu la résilience des deux nuances d'aciers augmente avec l'augmentation de la température de revenu.

À l'état de livraison les deux nuances d'acier montrent une morphologie de faciès de rupture différents, cela est dû à la dureté élevée du 35CrMo4 par rapport à la nuance 25CrMo4 qui est moins tenace.

La dureté de l'acier 35CrMo4 est plus importante que celle de l'acier 25CrMo4. Cette dureté est due au pourcentage de carbone présent dans l'acier 35CrMo4.

Au cours des revenus la dureté des deux nuances d'aciers diminue après dissipation du précipité appelé carbure de fer  $\epsilon$ , qui a pour effet d'augmenter la fragilité au revenu.

L'observation microscopique des deux nuances d'acier montre une structure similaire ferrito-perlitique à l'état de livraison.

# **BIBLIOGRAPIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] OTUA (Office technique Pour l'utilisation de l'acier), L'acier et sa mise en œuvre. Edition 1977.
- [2] G. CHAPUIS et QUOIX. Méthodes expérimentales d'études en métallurgie. Paris : Edité Par le centre d'édition et de documentation de l'école nationale supérieure de techniques avancées. 1978.
- [3] IBARRAIS et GMAEDER. Précis de métallurgie : Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition NATHAN. 1983.
- [4] J. DUROUX et R FAU CARD. Technologie générale et de construction. 10ème édition. Tome 1.
- [5] ACIERS INOXYDABLES [<http://www.lenntech.fr/français/acier-inoxydable.htm>], consulter le 21 mai 2019.
- [6] E.C BAIN H.W.P AKTON. Les éléments d'addition dans l'acier. 2ème paris : Edition DURNOD. 1986.
- [7] R.BUTON et M.PIVOT. FABRICATION MECANIQUE. tome 2.
- [8] J.BARRALIS et G.MAEDER. précis de métallurgie.
- [9] LOURI LAKEH'INE. Métallographie et traitements thermiques des métaux. Edition MIR, Moscou : 1977.
- [10] A.CONSTANT et G.HENRY et J.C.CHARBONNIER. Principes de base des traitements thermiques thermomécaniques et thermochimiques des aciers.
- [11] C. CHAUSSIN et G. HILLY. Métallurgie : Alliages métalliques. Tome 1, 10ème Edition. DUNOD : 1976.
- [12] A ROOS et B MILET .Précis de métallurgie appliquée. Troisième édition 1982.
- [13] C.CHAUSSIN et G.HILLY. Métallurgie alliage métalliques tome 1.
- [14] A.CAMPA. Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens tome 2.
- [15] A.CONSTANT et G.HENRY. Principes de base des traitements thermiques des aciers, édition PUY paris 1958 ; tom 1
- [16] S. BENZAADA. Traitements thermique, classification et désignation des aciers et fontes.
- [17] M. Hantcherli. Influence d'éléments d'addition sur les transformations

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] OTUA (Office technique Pour l'utilisation de l'acier), L'acier et sa mise en œuvre. Edition 1977.
- [2] G. CHAPUIS et QUOIX. Méthodes expérimentales d'études en métallurgie. Paris : Edité Par le centre d'édition et de documentation de l'école nationale supérieure de techniques avancées. 1978.
- [3] IBARRAIS et GMAEDER. Précis de métallurgie : Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition NATHAN. 1983.
- [4] J. DUROUX et R FAU CARD. Technologie générale et de construction. 10ème édition. Tome 1.
- [5] ACIERS INOXYDABLES [<http://www.lenntech.fr/français/acier-inoxydable.htm>], consulter le 21 mai 2019.
- [6] E.C BAIN H.W.P AKTON. Les éléments d'addition dans l'acier. 2ème paris : Edition DURNOD. 1986.
- [7] R.BUTON et M.PIVOT. FABRICATION MECANIQUE. tome 2.
- [8] J.BARRALIS et G.MAEDER. précis de métallurgie.
- [9] LOURI LAKEH'TNE. Métallographie et traitements thermiques des métaux. Edition MIR, Moscou : 1977.
- [10] A.CONSTANT et G.HENRY et J.C.CHARBONNIER. Principes de base des traitements thermiques thermomécaniques et thermochimiques des aciers.
- [11] C. CHAUSSIN et G. HILLY. Métallurgie : Alliages métalliques. Tome 1, 10ème Edition. DUNOD : 1976.
- [12] A ROOS et B MILET .Précis de métallurgie appliquée. Troisième édition 1982.
- [13] C.CHAUSSIN et G.HILLY. Métallurgie alliage métalliques tome 1.
- [14] A.CAMPA. Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens tome 2.
- [15] A.CONSTANT et G.HENRY. Principes de base des traitements thermiques des aciers, édition PUY paris 1958 ; tom 1
- [16] S. BENZAADA. Traitements thermique, classification et désignation des aciers et fontes.
- [17] M. Hantcherli. Influence d'éléments d'addition sur les transformations

de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Thèse doctorat, 2010, PP.34-38.

# ANNEXE

# Les annexes

**Annexe 1** – Tableau résultat de l'énergie absorbée en fonction de la température des deux nuances d'aciers.

Température (C°)	860°C (trempe à l'eau)			250°C			350°C			450°C			550°C		Etat de livraison	
	W1	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	
l'acier 25CrMo4	9	19	20	43	36	68	60	83	58	30	30					
l'acier 35CrMo4	4	9	28	13	27	56	52	70	74	95	112					

**Annexe 2** – tableau représente les résultats de la dureté en HRA de l'acier 25CrMo4.

Température (C°)	860°C (trempe à l'eau)			250°C			350°C			450°C			550°C			Etat de livraison		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
essais																		
Dureté en (HRA) de l'acier 25CD4	75	78	78	61	65	66	66	69	69	52	62	62	48	56	57	52	50	50

**Annexe 3** – tableau représente les résultats de la dureté en HRA de l'acier 35CrMo4

Température (C°)	860°C (trempe à l'eau)			250°C			350°C			450°C			550°C			Etat de livraison		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
essais																		
Dureté en (HRA) de l'acier 35CrMo4	78	73	78	49	55	59	67	73	73	68	68	65	64	65	65	50	63	60

# RESUME

Notre étude s'est portée sur deux nuances d'aciers faiblement alliée 35CrMo4 et 25CrMo4 utilisée dans l'industrie mécanique comme vilebrequins ou pont de camion.

Nous avons fait l'étude de la microstructure a l'état de livraison ont une structure ferrito-perlitique.

Dans le but d'étudier l'effet du traitement thermique sur les caractéristiques mécanique (dureté et résilience), nous avons fait subir a nous éprouvette une trempe a l'eau après une austénitisation a 860°C pendant 30min suivi de plusieurs revenus a différentes températures pendant 1h.

Après résilience des éprouvettes traités et non traités nous avons constaté une augmentation de la résilience  $KCv$  après revenu pour les deux nuances d'aciers ; à la fin nous avons démontrés l'existence de deux types de rupture le 35CrMo4 est fragile par contre le 25CrMo4 a une rupture ductile et sa suit au taux de carbone beaucoup plus importants présent dans le 35CrMo4.

Après plusieurs essais de dureté de type Rockwell conique (HRA) en constate que au cours des revenus la dureté des deux nuances d'aciers diminues après dissipation du précipité appelé carbure de fer  $\epsilon$ , qui a pour effet d'augmenter la fragilité au revenus.

## ملخص

ركزت دراستنا على درجتين من فولاذ السبائك المنخفضة 35CrMo4 و 25 CrMo4 المستخدمة في الصناعة الميكانيكية مثلا لرافعات أو رافعات الشاحنات.

لقد قمنا بدراسة البنية المهيجية في حالة التسليم التي تحتوي على بنية فيريريتية- لرية.

من أجل دراسة تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية (الصلابة والمرونة )، أخضعنا لاختبارنا إخماد بالماء بعد الأوستينيتية عند 860 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة متبوعة بعدة دخل مختلف درجات الحرارة لمدة 1س

بعد مرونة قطع الاختبار المعالجة وغير المعالجة، وجدنا زيادة في مرونة  $KCv$  بعد الدخل للصفين من الفولاذ؛ في النهاية، أظهرنا وجود نوعين من التمزق، 35CrMo4 هشة مقابل 25CrMo4 له تمزق مطيل ويتبع المحتوى العالي من الكربون الموجود في 35CrMo4.

بعد العديد من اختبارات الصلابة من نوع روكويل (HRA) المدبب، لوحظ أنه خلال الدخل، انخفضت صلابة الدرجتين الفولاذية بعد تبيد المادة المترسبة المسماة كربيد الحديد □، مما أدى إلى زيادة هشاشة الدخل.