

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abderrahmane Mira - Béjaïa**

**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



## **Projet de Fin d'Étude**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique**

### **Thème**

---

**Effet d'écrouissage par vieillissement thermique des aciers  
S355JR et 35CrMo4 sur les propriétés de dureté et résilience**

---

**Préparé par :**

**MECELLEM Abderrahim**

**ABDOUNE Younes**

**MERADJI Yacine**

**Dirigé par :**

**Dr. Djamel AMARI**

**Université de Béjaïa**

**Examiné par :**

**Pr KHELFAOUI Youcef    Président**

**Université de Béjaïa**

**Dr. YOUNES Racim    Examineur**

**Université de Béjaïa**

*Année universitaire : 2020/2021*

# REMERCIEMENT

*Nous remercions tout d'abord « Dieu » qui nous a donné la force et le courage pour l'achèvement de ce travail.*

*Nous voudrions remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnés dans la réalisation de ce travail.*

*Merci de nous avoir aidés à construire notre avenir.*

*Un merci tout particulier à notre encadreur Monsieur **AMARI Djamel** d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a déployés, pour son aide précieuse, conseiller, encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période, et pour le temps qu'il nous a consacré.*

*Nous remercions également les membres de jury Pr **KHELFAOUI Youcef** et Dr. **YOUNES Racim DJERMOUNE** qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.*

*Nos remerciements vont également aux :*

*-A monsieur **TAOUINT Lounis**, ingénieur à l'ENMTP*

*- A monsieur **YOUSFI Rachid** le responsable de hall technologie.*

*- A monsieur **ATTOUB Noureddine** T.S de LABO.*

*- A monsieur **OUADFEL Abdelah** T.S de LABO.*

*- A monsieur **BELLAGHE Jugurtha**.*

*- Ma chère mère et mon père, pour ses conseils, son soutien et ses encouragements tout au long de mes études. Ses qualités humaines m'ont permis de terminer ce travail.*

*-toute ma famille et mes amis qui étaient avec moi en tout temps m'ont conseillée et encouragée.*

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*A ma chère grand-mère,*

*A mes sœurs Hassiba, Tinhinane et Meryame*

*A mes frères Allaoua, Larbi et Md Tahar*

*A mon cher oncle Moustapha*

*A mon cher ami jugu,*

*A mon cher ami Fateh,*

*A tous mes camarades de la promo **GENIE MECANIQUE 2020/2021**,*

*A tous mes amis(e) de loin et de pris,*

*A l'équipage (**MENDIL Lyes, ZIANE Bilal, ZEGGAGH Anis, YEMMEL Massinissa, REKKAD Sami, BOULHRAOUAT Tarik, FELKAYE Yacine ...**)*

*Principalement à mon ami **MERADJI Yacine** et mon ami **ABDOUNE Younes***

**ABDERRAHIM**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail a :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*A mes sœurs (Naima et Ichrak),*

*A mes frères (Youcef),*

*A tous mes camarades de la promo **GENIE MECANIQUE 2020/2021,***

*A tous mes amis(e) de loin et de pris,*

*A l'équipage (**BELDJOUDI Farah, MENDIL Lyes, ZIANE Bilal, ZEGGAGH Anis, YEMMEL Massinissa, REKKAD Sami, BOULHRAOUAT Tarik, FELKAYE Yacine ...**)*

*Principalement à mon ami **MERADJI Yacine** et mon ami **MECELLEM Abderrahim***

**YOUNES**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail a :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père décédé que dieu l'accueil dans son vaste paradis,*

*A mes sœurs (Yamina et Sarah),*

*A mes chers oncles*

*A mon cher ami EL-yazid,*

*A tous mes camarades de la promo **GENIE MECANIQUE 2020/2021,***

*A tous mes amis(e) de loin et de pris,*

*A l'équipage (**MENDIL Lyes, ZIANE Bilal, ZEGGAGH Anis, YEMMEL Massinissa, REKKAD Sami, BOULHRAOUAT Tarik, FELKAYE Yacine, DAHMANI Kociela, AOULI Djebar, BENKHERFELLA Fayçal, BELDJOUDI Farah, Jugurtha BELLAGHE ...**)*

*Principalement à mon ami **ABDOUNE Younes** et mon ami **MECELLEM Abderrahim***

**YACINE**

## Sommaire

Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	ix
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Les aciers, étude bibliographique.....</b>	<b>2</b>
<b>I.1. Définitions des aciers .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Désignation conventionnelle et composition chimique .....</b>	<b>2</b>
I.2.1. L'acier 35CrMo4 .....	2
I.2.2. L'acier S355JR .....	3
<b>I.3. Caractéristique mécanique .....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Caractéristique mécanique de l'acier S355JR .....	4
I.3.2. Caractéristique mécanique de l'acier 35CrMo4 .....	5
<b>I.4. Traitement thermique.....</b>	<b>6</b>
I.4.1. Le recuit.....	6
I.4.2. La trempe.....	7
I.4.3. Le Revenu.....	7
<b>I.5. La dureté.....</b>	<b>12</b>
I.5.1. La dureté Vickers (HV).....	12
I.5.2. La dureté Brinell (HB) .....	13
I.5.3. La dureté Rockwell .....	14
I.5.4. Dureté et caractéristique mécanique .....	15
<b>I.6. La résilience .....</b>	<b>16</b>
<b>I.7. Écrouissage.....</b>	<b>17</b>
I.7.1. Définition.....	17
I.7.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques .....	18
I.7.3. Courbe et coefficient d'écrouissage .....	18
<b>Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales .....</b>	<b>21</b>
<b>II.1. Matériaux étudiés.....</b>	<b>21</b>
II.1.1. La composition chimique 35CrMo4.....	21
II.1.2. La composition chimique S355JR .....	22
<b>II.2. Préparation des échantillons.....</b>	<b>22</b>
II.2.1. Les deux matériaux à l'état de livraison .....	22
II.2.2. Les différentes étapes d'usinage des échantillons .....	22
<b>II.3. Traitement thermique .....</b>	<b>28</b>
II.3.1. Austénitisation.....	28

---

II.3.2. Revenu de vieillissement .....	29
<b>II.4. Observation microscopique des échantillons .....</b>	<b>30</b>
II.4.1. Polissage.....	30
II.4.2. Attaque chimique.....	31
II.4.3. Microscopie optique .....	31
<b>II.5. Essais mécaniques.....</b>	<b>32</b>
II.5.1. Essai de dureté Vickers HV .....	33
II.5.2. Essai de résilience.....	34
<b>Chapitre III : Résultats et discussions .....</b>	<b>37</b>
<b>III.1. Observation microscopique à l'état brut.....</b>	<b>37</b>
III.1.1. Acier 35CrMo4 .....	37
III.1.2. Acier S355JR .....	37
<b>III.2. Observation microscopique à l'état revenu de l'acier 35CrMo4.....</b>	<b>38</b>
<b>III.3. Observation microscopique à l'état revenu de l'acier S355JR .....</b>	<b>40</b>
<b>III.4. Essais de dureté Vickers .....</b>	<b>42</b>
<b>III.5. Résultats dureté Vickers.....</b>	<b>43</b>
<b>III.6. Essai de résilience .....</b>	<b>47</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>51</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>52</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>54</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Cycle complet (Trempe-Revenu) .....	8
<b>Figure I.2</b> : Mécanismes de contournement d'un précipité par formation de boucle (a) par montée (b) par changement de plan de glissement. ....	11
<b>Figure I.3</b> : Essai Vickers. ....	13
<b>Figure I.4</b> : Essai Brinell HB. ....	14
<b>Figure I.5</b> : Essai Rockwell.....	15
<b>Figure I.6</b> : Les normes AFNOR pour les essais de dureté HV, HB et HRC.....	16
<b>Figure I.7</b> : Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écroutissage d'un fil d'acier à 0,06 % C. ....	18
<b>Figure I.8</b> : Phénomène d'écroutissage sur une courbe rationnelle de traction.....	19
<b>Figure I.9</b> : Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques. ....	20
<b>Figure II.1</b> : Scie alternative .....	23
<b>Figure II.2</b> : Macro-tronçonneuse. ....	23
<b>Figure II.3</b> : Éprouvettes de résilience de forme parallélépipède. ....	24
<b>Figure II.6</b> : Éprouvettes de forme cubique pour la dureté. ....	24
<b>Figure II.7</b> : fraiseuse à trois axes.....	25
<b>Figure II.8</b> : éprouvette de dureté de forme cubique après fraisage. ....	26
<b>Figure II.9</b> : Eprouvette de résilience sans entaille V après fraisage. ....	27
<b>Figure II.10</b> : Touret moulé .....	27
<b>Figure II.11</b> : Outil de rainurage en taille V. ....	28
<b>Figure II.12</b> : Eprouvettes de résilience avec entaille V. ....	28
<b>Figure II.13</b> : (A) Four à moufle (B) boîtier de commande de four. ....	29
<b>Figure II.14</b> : Éprouvettes de résilience après le traitement thermique. ....	30
<b>Figure II.15</b> : Polisseuse utilisée.....	30
<b>Figure II.16</b> : Microscope optique .....	32
<b>Figure II.17</b> : Microstructure de l'acier S355JR. ....	32
<b>Figure II.18</b> : Machines d'essais de dureté ZwickRoell .....	33
<b>Figure II.19</b> : Empreinte effectué sur l'acier S355JR. ....	34
<b>Figure II.20</b> : Eprouvette de résilience normalisé .....	35
<b>Figure II.21</b> : Le mouton de Charpy .....	35
<b>Figure II.22</b> : Machine de résilience utilisée à l'ENMTP .....	36
<b>Figure III.1</b> : Microstructure optique de nuance d'acier 35CrMo4. ....	37

<b>Figure III.2</b> : Microstructure optique de nuance d'acier S355JR. ....	38
<b>Figure III.3</b> : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 3h). ....	38
<b>Figure III.4</b> : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 6h). ....	39
<b>Figure III.5</b> : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 9h). ....	39
<b>Figure III.6</b> : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 3h). ....	40
<b>Figure III.7</b> : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 6h). ....	41
<b>Figure III.8</b> : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 9h). ....	41
<b>Figure III.9</b> : Essai de dureté Vickers pour l'acier 35CrMo4. ....	42
<b>Figure III.10</b> : Essai de micro-dureté Vickers pour l'acier S355JR. ....	43
<b>Figure III.11</b> : Diagramme de la dureté Vickers HV de l'acier 35CrMo4. ....	44
<b>Figure III.12</b> : Diagramme de la dureté Vickers (HV) de l'acier S355JR. ....	46
<b>Figure III.13</b> : Histogramme comparative des résultats de la résilience de l'acier S355JR et l'acier 35CrMo4. ....	48
<b>Figure III.14</b> : facies de ruptures d'acier S355JR. ....	50
<b>Figure III.15</b> : facies de ruptures d'acier 35CrMo4. ....	50

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Composition chimique 35CrMo4.....	2
<b>Tableau I.2</b> : Composition chimique S355JR.....	3
<b>Tableau I.3</b> : Caractéristiques mécaniques de l'acier S355JR.....	4
<b>Tableau I.4</b> : Caractéristique mécanique de l'acier 35CrMo4 selon la norme AFNOR.....	5
<b>Tableau II.1</b> : Composition chimique 35CrMo4 .....	21
<b>Tableau II.2</b> : Composition chimique S355JR .....	22
<b>Tableau III.1</b> : Résultats de l'essai de dureté Vickers HV avec une charge de 50 g pour l'acier 35CrMo4.....	43
<b>Tableau III.2</b> : Résultats de l'essai de dureté Vickers HV avec une charge de 50 g pour l'acier S355JR.....	45
<b>Tableau III.3</b> : Résultats des essais résilience de l'acier 35CrMo4 avant et après traitement thermique.....	47
<b>Tableau III.4</b> : Résultats des essais résilience de l'acier S355JR avant et après traitement thermique.....	48

## **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 thermiques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers et permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Les propriétés mécaniques des aciers sont étroitement liées à leur microstructure, à leur composition chimique et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs coûts relativement faibles présentent un grand intérêt pour les industriels.

L'application des aciers dans l'industrie est très diverse. On les retrouve dans la mécanique, aéronautiques, automobiles, structures métalliques, etc.

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

Notre travail a porté sur deux nuances d'aciers ; un acier faiblement allié de type 35CrMo4 et un acier au carbone de type S335JR, très utilisés dans la construction et l'industrie mécanique comme les vilebrequins et les ponts des camions.

L'objectif de ce travail est de réaliser des traitements thermiques de vieillissement par des revenus, après austénitisation et trempe, à une température de 180°C pendant des temps de maintien 3h, 6h et 9h. Voir le changement des phases après décomposition de la martensite et de la formation des précipités par vieillissement thermique. L'influence du durcissement microstructural due à la formation des précipités sur les propriétés mécaniques de dureté et de résilience sera discutée.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une bibliographie sur les deux nuances d'aciers, 35CrMo4 et S355JR, 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 à la discussion des différents résultats que nous avons obtenus.

Enfin, on a terminé notre travail par une conclusion générale.

## Chapitre I : Les aciers, étude bibliographique

### I.1. Définitions 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 et soufre, considérés comme des impuretés et nocifs pour l'acier. L'acier peut également contenir d'autres éléments tel que le silicium, le manganèse, le chrome, le nickel, etc.) introduits volontairement ou non, en vue de modifier sa composition chimique et par suite ses caractéristiques mécanique [1].

On appelle acier, un matériau contenant en masse une teneur en carbone inférieure à 2% et sépare l'acier de la fonte [2].

### I.2. Désignation conventionnelle et composition chimique

#### I.2.1. L'acier 35CrMo4

L'acier 35CrMo4 fait partie de la famille des aciers faiblement allié au chrome-molybdène contenant 0,35% de carbone et 1% de chrome dont lesquels aucun des éléments alliés n'a une teneur supérieure à 5%.

Le 35CrMo4 est classé comme un acier de construction à traitement thermique, caractérisé par une résistance à chaud élevée [3].

La composition chimique, selon la norme AFNOR 35-552 est donnée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau I.1 : Composition chimique 35CrMo4*

	<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Mo%</b>
<b>min</b>	0.30	0.1	0.6	-	-	0.9	0.15
<b>max</b>	0.37	0.4	0.9	< 0.025	< 0.035	1.2	0.30

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.
- **S** : il fragilise les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doit pas dépasser 0,035%.
- **P** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

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

**C** : 0,35% ; **Cr** : 1% ; **Mo** : 0,20%

### I.2.2. L'acier S355JR

L'acier S355JR est un acier de construction non-allié laminé à chaud avec une limite d'élasticité minimale spécifiée à température ambiante de 355 MPa et une énergie de rupture à +20°C de 27J (JR). Cet acier est désigné par [4] :

- **S** : Acier de construction.
- **355** : Limite d'élasticité minimale en MPa.
- **JR** : Energie de rupture a température ambiant.

La composition chimique, selon la norme AFNOR NF A 35-573/4 est donnée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau I.2 : Composition chimique S355JR*

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>S%</b>	<b>Ph%</b>	<b>Fer%</b>
0,19-0,24	0.25	0.85	0.015	0.015	Bas

Le rôle des éléments chimique du tableau ci- dessus :

- **C** : il augmente la dureté de l'acier et il diminue sa résilience.
- **Si** : il augmente la limite d'élasticité.

- **Mn** : renforce la fragilité aux températures élevées.
- **S** : il fragilise les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doit pas dépasser 0,035%.
- **Ph** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

### I.3. Caractéristique mécanique

#### I.3.1. Caractéristique mécanique de l'acier S355JR

L'acier S355JR, anciennement appelé acier A60, a une énergie de rupture (résilience) minimale garantie de 27J à température ambiante. Ces aciers de construction, leurs dénominations comportent la lettre qui désigne leur usage [5] :

- la lettre **S** (Structure) pour un usage général de construction métallique
- la lettre **E** (Engaine) pour construction mécanique.

Cette lettre est suivie de la limite élastique ( $R_e$ ) exprimée en méga-pascal (MPa). Cette limite élastique est une donnée caractérisant ses propriétés mécaniques puisque c'est cela qui importe quand on choisit un acier de construction. Les constructions exigeant toujours une certaine rigidité, les aciers sont toujours choisis avec une limite élastique minimale. Plus cette limite élastique est élevée, moins l'acier est déformable. Exemple :

L'acier S355JR. Ce dernier est un acier de construction destiné à un usage général avec une limite élastique minimale de 355MPa. Le S335JR est la nuance la plus courante [6].

**Tableau I.3** : Caractéristiques mécaniques de l'acier S355JR

Norme EN	Dureté HB	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_e$ (N/mm)	A%
S355JR	130-185	510-680	355	22

- $R_m$  : Résistance à la rupture en N/mm<sup>2</sup>.
- $R_e$  : La limite élastique en N/mm<sup>2</sup>.
- A% : Allongement après rupture%.

### I.3.2. Caractéristique mécanique de l'acier 35CrMo4

L'acier de construction faiblement allié au chrome-molybdène (35CrMo4) a une bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux charges mécaniques.

C'est un acier très employé en mécanique, de par ses très bonnes qualités de mise en œuvre et sa bonne ténacité, on trouve cet acier dans les boulons, arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins [7].

Du fait de l'érouissage généré par les différentes opérations de transformation à froid, les caractéristiques mécaniques du métal étiré ou tourné galeté, diffèrent de celles du produit laminé. Augmentation de la résistance à la rupture ( $R_m$ ), augmentation de la limite d'élasticité ( $R_{p0,2}$ ). Diminution de l'allongement ( $A\%$ ), diminution de la résilience ( $K$ ).

Masse volumique :

$$m = 7,85 \frac{Kg}{Dm^3} \quad (I.1)$$

Les caractéristiques mécaniques de l'acier 35CrMo4 selon la norme AFNOR sont données dans le Tableau I.4 ci-dessous :

**Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques de l'acier 35CrMo4 selon la norme AFNOR**

Traitement de référence	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	A% (après rupture)
H 860°C R 180°C	90	105-130	10
H 860°C R 180°C	135	160-195	5

- $R_m$  : Résistance à la rupture en N/mm<sup>2</sup>.
- $R_e$  : La limite élastique en N/mm<sup>2</sup>.
- A% : Allongement après rupture%.
- H 860° : Austénitisé à 860°C.
- R 180° : Revenu à 180°C.

## **I.4. Traitement thermique**

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité [8].

### **I.4.1. Le recuit**

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes [9].

#### **I.4.1.1. Types élémentaires de recuits**

- Le recuit d'adoucissement.
- Recuit de normalisation.
- Le recuit de détente.
- Recuit de régénération.

#### **I.4.1.2. Processus**

Le recuit est un terme générique et peut être classé en fonction de la température. Il est appliqué pour diverses raisons :

- Pour adoucir un métal afin de faciliter sa rectification
- Pour libérer les contraintes internes induites par certains processus antérieurs (souvent afin de permettre un traitement ultérieur sans fracturation)
- Pour corriger une structure à gros grains
- Pour amener des éléments d'alliage dans une solution

Il peut s'effectuer sous vide ou dans une atmosphère réductrice (une finition brillante est requise), dans l'air (les pièces seront ultérieurement rectifiées) ou dans une atmosphère endothermique/neutre (sans décarburation, mais avec une finition non brillante) [6].

#### I.4.2. La trempe

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite [10].

Une trempe se compose de trois phases principales :

- **Chauffage**

Destiné à amener l'acier à l'état austénitique.

- Acier hypoeutectoïde (de 0 à 0,85% de carbone) Température de chauffage ( $Ac_3 + 50^\circ C$ ). La ligne  $Ac_3$  va de  $721^\circ C$  à  $906^\circ C$ , le chauffage d'un acier hypoeutectoïde dépend donc de sa teneur en carbone.
- Acier eutectoïde (0,85 % de carbone)
- Température de chauffage ( $Ac_1 + 50^\circ C$ ) soit environ  $780^\circ C$ .
- Acier hypereutectoïde (de 0,85 à 1,7% de carbone) Température de chauffage ( $Ac_1 + 50^\circ C$ ) soit environ  $780^\circ C$ .

- **Maintien à température d'austénisation**

Dépend des dimensions et des formes de la pièce et des types d'aciers, 15 min pour les aciers ordinaires, 30 min pour les aciers alliés, en particulier pour ceux contenant des carbures.

- **Refroidissement (air, eau ou huile)**

C'est lui qui conditionne la structure finale. De lui dépend l'apparition de nouveaux constituants tels que : (dans l'ordre croissant de dureté) troostite, bainite, martensite.

La trempe s'effectue par immersion dans l'eau, par pulvérisation d'eau ou par soufflage d'air. Le fluide le plus utilisé est l'eau froide ( $T = 50^\circ C$ ) ou de l'huile. Dans certains cas assez rares, il est possible d'utiliser d'autres fluides comme des liquides à base de glycol pour minimiser la formation des contraintes internes.

#### I.4.3. Le Revenu

La trempe est un traitement énergétique qui permet à l'acier d'acquérir des propriétés  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $H$  élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité (A%) et la résilience

(K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé. L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre  $R_m$ ,  $R_e$ , d'une part et  $A\%$ ,  $K$  d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal. Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en : Un réchauffage à une température  $T_R < A_c1$ . Un maintien de durée  $t_R$  à  $T_R$ , un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement. Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de  $T_R$  et  $t_R$  permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre [11].

#### I.4.3.1. Revenu de la martensite

Les réactions au cours de revenu varient avec le temps et surtout avec la température [3]. Selon ce facteur, on envisage quatre étapes :

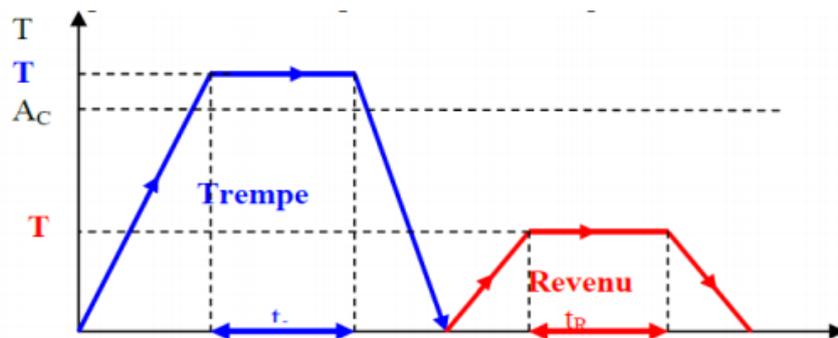


Figure I.1 : Cycle complet (Trempe-Revenu)

- **Premier stade :** a 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.

- **Deuxième stade** : à partir de 130°C environ jusqu'à 250 à 300°C. Il y a précipitation du carbure  $[\text{Fe}_2\text{C}_2]$ , puis pour certains aciers du carbure  $[\text{Fe}_5\text{C}_2]$ . La martensite se transforme en ferrite.
- **Troisième stade** : entre 300 et 400°C il y a formation de cémentite  $[\text{Fe}_3\text{C}]$  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.
- **Quatrième stade** : une nouvelle étape apparaît à des températures supérieures à 450°C, si l'acier contient des éléments carburières (Mo, Cr, ...) en quantité suffisante. La cémentite échange son carbone avec les éléments carburières.

#### I.4.3.2. Les types de revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- **Revenu de relaxation ou de détente**

Il s'effectue entre 180°C et 220°C-250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite--martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [11].

- **Revenu de structure ou classique**

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et  $A_{c1}$ . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [11].

- **Revenu de durcissement**

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [11].

### I.4.3.3. Le durcissement obtenu en bloquant les dislocations

La déformation des alliages met en jeu un défaut de structure : les dislocations [12].

Le durcissement est obtenu si on arrive à « ralentir » ou à « bloquer » ces dislocations. Quatre modes de durcissement peuvent être envisagés :

Ne pas avoir de dislocation dans l'alliage. Or les dislocations sont des défauts thermodynamiquement stables et naturels de la matière cristallisée. Ce mode de durcissement « exotique » ne peut donc se rencontrer qu'exceptionnellement comme dans les trichites (monocristaux parfaits).

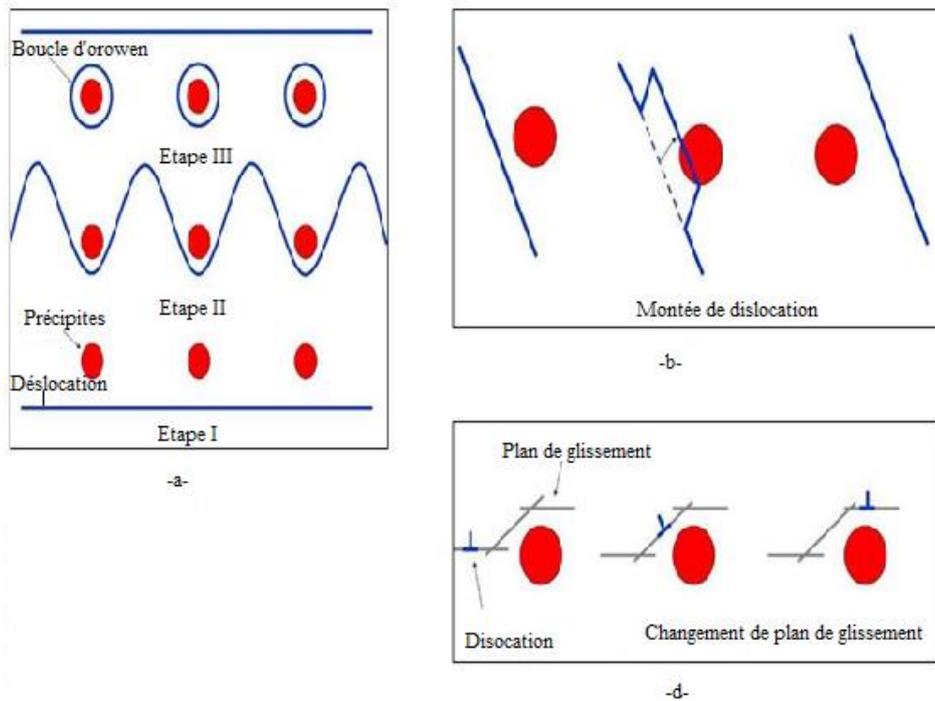
Multiplier le nombre de dislocations afin qu'elles interagissent et se bloquent mutuellement : c'est le principe de l'écroutissage.

Freiner le mouvement par distorsion du réseau cristallin. On obtient ce durcissement par effet de solution solide, ou par l'introduction de fins précipités cohérents. Dans ce cas, la dislocation doit couper les précipités.

Freiner les dislocations en créant des obstacles que les dislocations doivent contourner :

En se déformant jusqu'à former des boucles qui restent ancrées sur les précipités (boucles ou mécanisme d'Orowan).

- En contournant les précipités, en « montant ».
- En contournant les précipités, en changeant de plan de glissement.



**Figure I.2** : Mécanismes de contournement d'un précipité par formation de boucle (a) par montée (b) par changement de plan de glissement.

#### I.4.3.4. Influence de la taille des précipités

La cohérence des précipités avec la matrice est, entre autres, fonction de la taille des précipités. Plus ceux-ci sont gros, moins ils sont cohérents. Lors du traitement thermique, on observe une distribution de la taille des précipités ainsi qu'une distribution de l'orientation des dislocations. Si bien que le mécanisme de cisaillement et les trois mécanismes de contournement doivent être pris en compte si on veut modéliser le durcissement structural [12].

#### I.4.3.5. Précipitation et durcissement structural

Le traitement de précipitation consiste à faire subir à l'alliage trois traitements successifs. On pratique en premier lieu un traitement de mise en solution qui a pour objectif de mettre en solution le maximum d'éléments d'alliage à la température considérée pour le traitement. Ensuite, on réalise une trempe généralement à l'eau qui permet de conserver à température ambiante, une solution solide sursaturée. Enfin, on complète le traitement par un vieillissement à une température assez basse (160°C – 200°C) qui a pour objectif la formation contrôlée de précipités de taille submicronique. Ces précipités vont constituer des obstacles au mouvement des dislocations et ainsi durcir le matériau. En fonction de la température et de la durée du traitement, les précipités vont prendre différentes formes métastables pour aboutir finalement à une forme stable [12].

## I.5. La dureté

C'est l'essai le plus simple pour apprécier la limite élastique d'un matériau. L'essai consiste à appliquer sur le matériau un pénétrateur (bille, pyramide...) avec une certaine force et à mesurer les dimensions de l'empreinte laissée par le pénétrateur. Selon Ashby, la dureté réelle  $H=F/S$  (où F est la force appliquée et S la surface de l'empreinte d'un pénétrateur pyramidal) est égal à 3 fois la limite élastique. En fait on ne mesure jamais la dureté réelle mais une valeur approchée qui dépend de la technique utilisée ; des abaques permettent de passer d'une technique à l'autre. Bien que la dureté représente une pression, elle n'est jamais exprimée en MPa mais par un nombre sans unité qui dépendra de la technique employée [13] :

On distinguera :

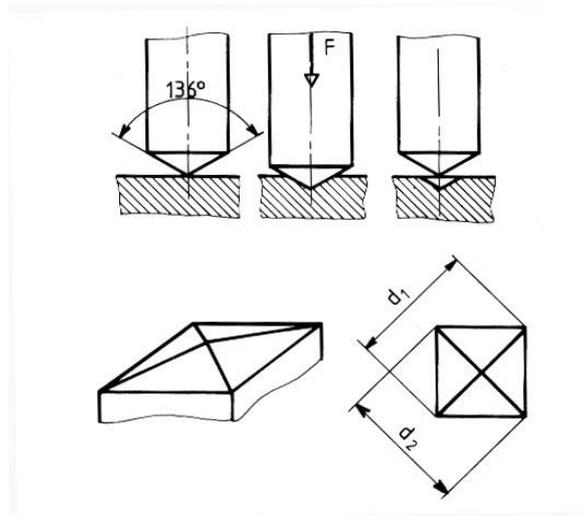
- la dureté Vickers (HV)
- la dureté Brinell (HB)
- la dureté Rockwell (HR)

On peut aussi réaliser des empreintes de micro-dureté à l'aide d'un microscope optique et d'une pointe diamant, sous très faible charge, les dimensions de l'empreinte étant de l'ordre du micron :

- Micro-dureté Vickers (empreinte carrée)
- Micro-dureté Knoop (empreinte en losange)

### I.5.1. La dureté Vickers (HV)

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de  $136^\circ$ , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur [11].



**Figure I.3 : Essai Vickers.**

On utilise un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet 136°.

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (I.2)$$

F est compris entre 49 et 981 N (soit une charge de 5 à 100 kg, la charge normale étant de 30kg)

Perlite : HV = 150 – 200

Martensite : HV > 400

### **I.5.2. La dureté Brinell (HB)**

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène. Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre  $d$  [11].

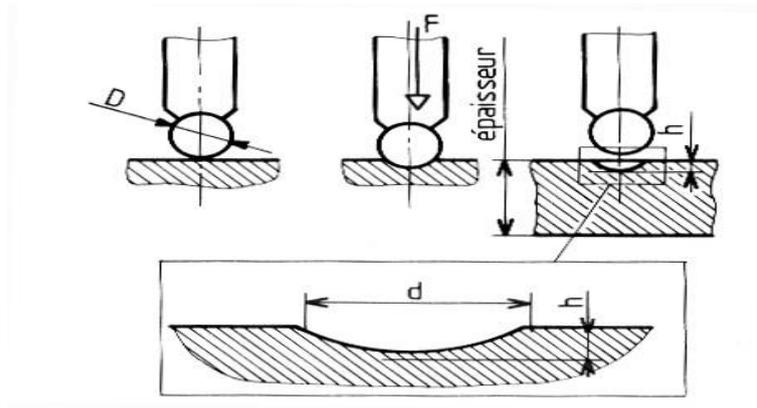


Figure I.4 : Essai Brinell HB.

On utilise un pénétrateur en forme de bille en acier ou en carbure de W

$$HB = \frac{0,204F}{\left[ \pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right]} \quad (I.3)$$

- D : diamètre de la bille
- d : diamètre de l'empreinte
- F : force appliquée
- $F=9,81KD^2$

**Acier** : K = 30 ; **Al** : K = 2,5 à 10 et **Cu** : K= 5 à 30

### I.5.3. La dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère ou bien sphérique pour le critère est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2mm. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588mm ou 3,175mm .L'essai se déroule en trois phases [11].

- On applique le pénétrateur (cône ou bille) avec une force  $F_0$



Les normes AFNOR donnent pour les aciers non alliés et faiblement alliés une correspondance entre les diverses duretés et la résistance à la traction :

RM (MPa)	HV	HB	HRC
280	80	76	
350	100	95	
410	120	114	
470	140	133	
530	160	152	
580	180	171	
650	200	190	
710	220	209	
770	240	228	20.3
830	260	247	24
890	280	266	27.1
960	300	280	29.2
1020	320	304	32.2
1090	340	323	34.4
1160	360	342	36.6
1220	380	361	38.8
1290	400	380	40.8
1360	420	399	42.7
1430	440	418	44.5
1500	460	432	46.1
1570	480	450	47.7
1650	500	466	49.1
1720	520	483	50.5
1790	540	500	51.7
1870	560	517	53
1940	580	535	54.1
2020	600	552	55.2
2100	620	569	56.3
2180	640	586	57.3

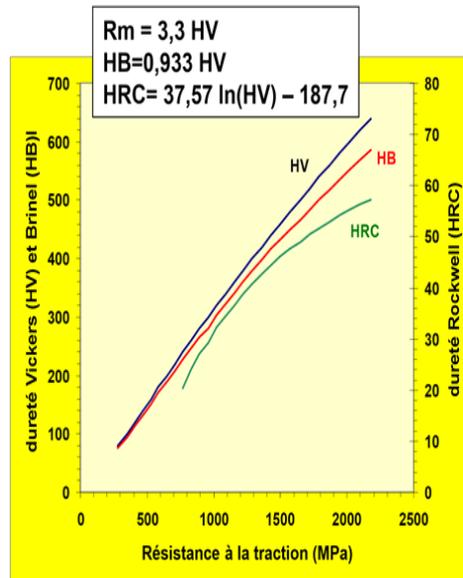


Figure I.6 : Les normes AFNOR pour les essais de dureté HV, HB et HRC.

### I.6. La résilience

La résilience qui a pour symbole **K**, est l'aptitude que possède un matériau à résister plus ou moins bien aux chocs. Il s'agit pour le métallurgiste de déterminer la résistance aux chocs de certaines pièces ou de certains matériaux.

La résistance aux chocs est une des caractéristiques primordiales pour le choix d'un matériau notamment dans la construction.

Lors de l'essai, une force de poids P va tomber d'une certaine hauteur H, à ce moment on va enregistrer au niveau de l'éprouvette (e) un certain travail que l'on va noter.

Lorsque l'éprouvette sera cassée, on aura enregistré un travail résiduel  $W_r$ , ce qui va nous permettre de déterminer le travail nécessaire pour briser l'éprouvette. ( $W_n$ ).

C'est donc ainsi que l'on va déduire la résilience [14].

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Travail nécessaire(énergie absorbée)}}{\text{section au droit de l'entaille}} \quad (\text{I.5})$$

$$K = \left( \frac{Wn}{s} \right) (\text{J/cm}^2) \quad (\text{I.6})$$

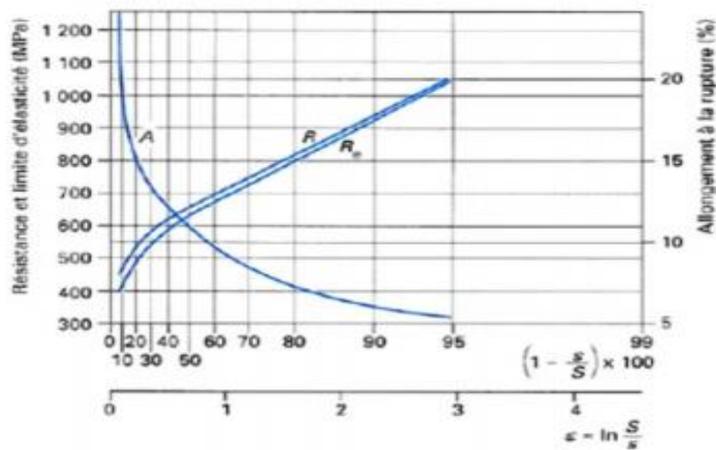
L'essai de résilience (encore appelé essai de flexion par chocs) consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette qui sera préalablement entaillée en son milieu, afin de faciliter la rupture de la pièce. Cette éprouvette, repose sur des appuis. Au moment où le couteau frappe l'éprouvette on va déterminer l'énergie absorbée qui sera exprimée en Joules.

C'est cette énergie qui caractérise la résistance aux chocs des matériaux. Les éprouvettes que l'on va utiliser pour effectuer les essais sont des éprouvettes normalisées, c'est à dire que leurs caractéristiques sont indiquées par une norme. Pour réaliser l'essai, il est nécessaire de faire une entaille normalisée sur celle-ci. Les entailles peuvent être soit en U ou en V [14].

## **I.7. Écrouissage**

### **I.7.1. Définition**

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne ; ces évolutions de propriétés et de microstructure, appelées écrouissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécaniques du matériau. En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques de nombreux alliages métalliques. De façon plus générale, c'est l'écrouissage qui confère aux alliages métalliques leurs propriétés essentielles de ténacité et en général, elle dépend des mêmes paramètres que l'écrouissage qui la précède car elle est gouvernée par les mêmes microstructures de déformation [15].



**Figure I.7 :** Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écouissage d'un fil d'acier à 0,06 % C.

### I.7.2. Influence de l'écouissage sur les caractéristiques mécaniques

L'écouissage a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. Les effets de ce phénomène se traduisent par l'amélioration des caractéristiques telles que [11] :

- Sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite.
- Sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.
- L'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement.

### I.7.3. Courbe et coefficient d'écouissage

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes (avant l'apparition de la striction), le phénomène d'écouissage peut être évalué sur la courbe rationnelle détraction. Sur une courbe de traction classique, la charge à la rupture est une grandeur conventionnelle puisqu'elle ne tient compte que de la section initiale  $S_0$  [16].

$$R_m = \frac{\delta_{\max}}{S_0} \quad (\text{I.7})$$

Cela empêche de tenir compte dans les calculs de plasticité car la section est variable dans le temps. A cet effet, on définit une contrainte vraie  $\delta_v$

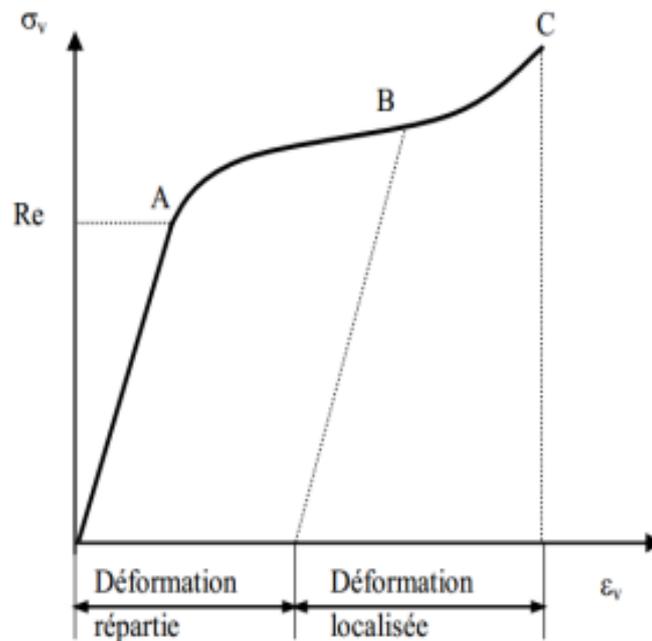
Qui correspond à la charge appliquée rapportée à la section instantanée  $s=s(t)$

$$\delta_v = \frac{F}{S} \quad (\text{I.8})$$

Une portion parabolique AB de cette Courbe peut être mise sous une certaine forme empirique qui relie la contrainte vraie  $\delta_v$  L'expression la plus utilisée est celle de Lüdiuk.

$$\delta_v = \delta_0 + K.(\varepsilon_v)^n \quad (\text{I.9})$$

- $\delta_0$  et k sont des constantes du matériau
- Et n est le coefficient d'écroutissage



*Figure I.8 : Phénomène d'écroutissage sur une courbe rationnelle de traction.*

Le coefficient d'écroutissage caractérise la déformation rationnelle répartie (homogène) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général on a :

- $0,1 < n < 0,2$
- Si  $n = 0,1$  : le matériau a une faible consolidation.

- Si  $n = 0,4$ : le matériau a une forte consolidation.
- Si  $n = 0$ : Le matériau ne subit aucune consolidation.

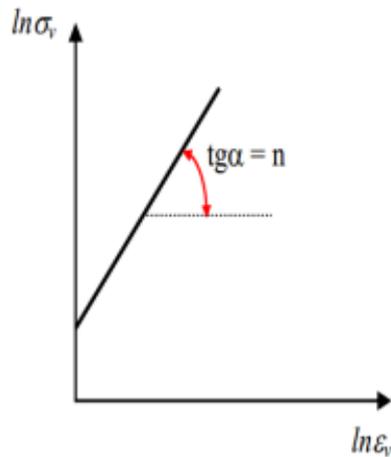
C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique.

Remarque :

Pour mettre en évidence le coefficient d'érouissage, il est commode de tracer la courbe rationnelle en coordonnées logarithmiques :

$$\ln(\sigma_v) = \ln(K) + n \ln(\varepsilon) \quad (\text{I.10})$$

Représente une droite de pente  $n$ .



**Figure I.9 :** Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.

## Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales

### II.1. Matériaux étudiés

Les matériaux sur lesquels est portée notre étude un acier faiblement allié au chrome molybdène de nuance 35CrMo4 et un autre acier de construction S335JR.

Ces aciers fournis au niveau du hall de technologie du département de génie mécanique de l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa sont livrés sous forme des tubes cylindriques de diamètre de 50 mm.

#### II.1.1. La composition chimique 35CrMo4

D'après la norme AFNOR NF A35-355 la composition chimique en % de l'acier 35CrMo4 est désignée comme suit [17] :

*Tableau II.1 : Composition chimique 35CrMo4*

	<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Mo%</b>
<b>min</b>	0.30	0.1	0.6	-	-	0.9	0.15
<b>max</b>	0.37	0.4	0.9	< 0.025	< 0.035	1.2	0.30

Le rôle de chaque élément chimique du tableau ci- dessus est :

- **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.
- **S** : ils fragilisent les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doit pas dépasser 0,035%.
- **P** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

### II.1.2. La composition chimique S355JR

Selon la norme AFNOR l'acier S355 est un acier de construction mécanique de classe mi-dure à 0,25% de carbone en moyenne qui rassemble les composants chimiques suivants [4] :

*Tableau II.2 : Composition chimique S355JR*

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>S%</b>	<b>Ph%</b>	<b>Fer%</b>
0.19-0.25	0.25	0.85	0.015	0.015	Bas

Le rôle des éléments chimique du tableau ci- dessus :

- **C** : il augmente la dureté de l'acier et il diminue sa résilience.
- **Si** : il augmente la limite d'élasticité.
- **Mn** : renforce la fragilité aux températures élevées.
- **S** : ils fragilisent les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doit pas dépasser 0,035%.
- **Ph** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

## II.2. Préparation des échantillons

### II.2.1. Les deux matériaux à l'état de livraison

Le matériau qui nous a été fourni au niveau du hall de technologie c'est un tube cylindrique qui a les démentions suivantes : longueur  $L = 400$  mm et un diamètre  $\varnothing = 55$  mm.

### II.2.2. Les différentes étapes d'usinage des échantillons

#### II.2.2.1. Découpage avec une scie alternative

Le découpage des deux tubes a été réalisé à l'aide d'une scie alternative avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement, et ce afin de garder les caractéristiques mécaniques du matériau.

Par la suite, nous avons obtenu des brutes de longueur  $L = 60$  mm, et de diamètre de 55 mm.



*Figure II.1 : Scie alternative*

### **II.2.2.2. Découpage avec une micro-tronçonneuse**

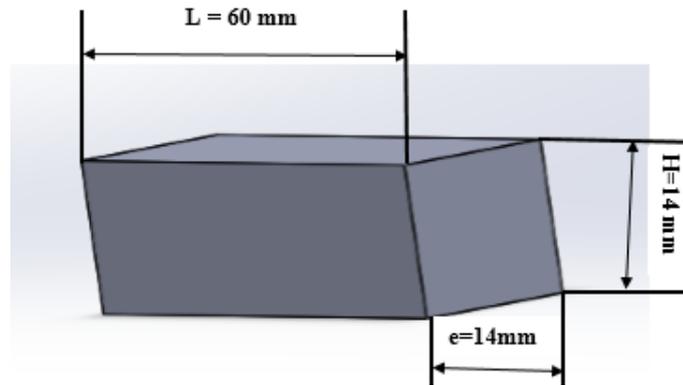
Pour le découpage on a utilisé une micro-tronçonneuse pour préparer les échantillons. Le découpage se fait avec refroidissement afin éviter la déformation de la structure due à l'échauffement pendant la coupe.



*Figure II.2 : Macro-tronçonneuse.*

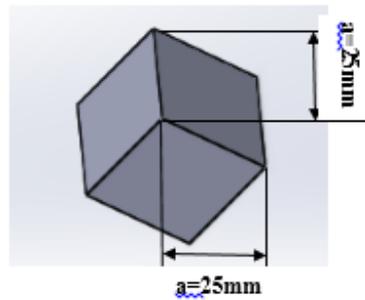
Les éprouvettes obtenues après cette opération sont de forme ont les dimensions suivantes :

- 1- Éprouvettes de résilience de forme parallélépipède :



*Figure II.3 : Éprouvettes de résilience de forme parallélépipède.*

2- Éprouvettes de forme cubique pour la dureté dont les dimensions sont les suivantes :



*Figure II.4 : Éprouvettes de forme cubique pour la dureté.*

### II.2.2.3. Surfaçage des échantillons

Afin d'obtenir des éprouvettes avec un bon état de surface, et des dimensions correspondant aux normes, on a opté pour l'opération de fraisage au niveau de l'atelier du Hall de technologie.

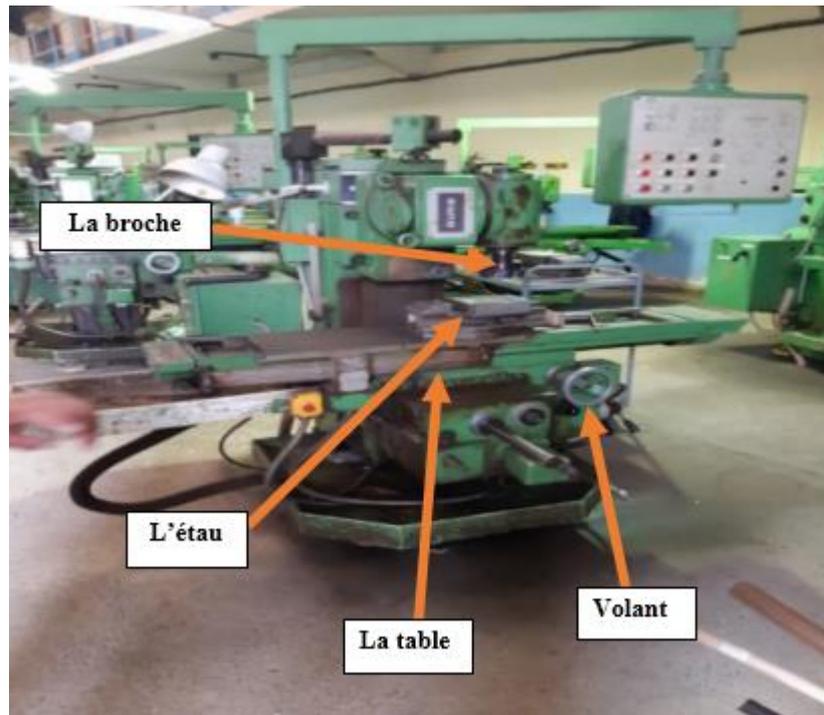


Figure II.5 : fraiseuse à trois axes.

La pièce à usiner est serrée dans l'étai. L'étai est positionné par l'intermédiaire de rainures en T puis serré sur la table. La table peut se déplacer suivant les axes X, Y et Z soit manuellement (à l'aide des volants) soit automatiquement (avec des moteurs électriques). Un cône de broche est fixé sur la fraise, l'ensemble est mis en position sur la broche et serré par une visse. La broche est entraînée en rotation par un moteur électrique indépendant.

Les paramètres de coupe sont les suivants :

- P : profondeur de passe en mm
- $V_c$  : vitesse de coupe en 80 m/min.
- $F_z$  : avance par dent en mm/tr/dent
- F (finitions)=0.04 mm/dent
- F (ébauche)=0.02 mm/dent
- N : vitesse de rotation de la broche

• **Application numérique**

La vitesse de rotation de la broche N :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (\text{II.1})$$

$$N = \frac{100 \times 80}{3,14 \times 5,5} \quad (\text{II.2})$$

$$N = 463 \text{ tr/min} \quad (\text{II.3})$$

La vitesse d'avance

$$F_z (\text{ébauche}) = N \times F \times Z$$

$$F_z (\text{ébauche}) = 463 \times 0,2 \times 6$$

$$F_z (\text{ébauche}) = 556 \text{ mm/min}$$

$$F_z (\text{finition}) = 463 \times 0,4 \times 6$$

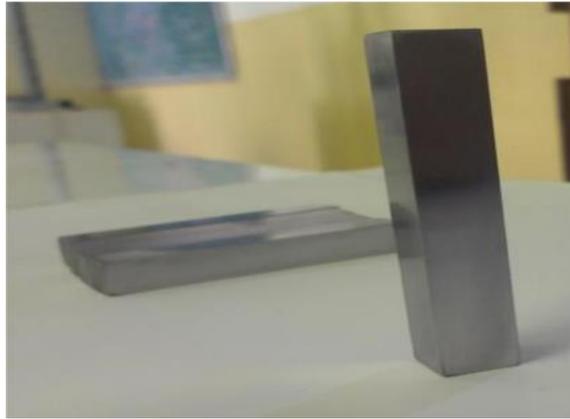
$$F_z (\text{finition}) = 1112 \text{ mm/min}$$

La profondeur de passe  $P = 0.05 \text{ mm}$

À la fin, nous avons obtenu des échantillons de dureté sous la forme de cube ( $L=a=e=20 \text{ mm}$ ) et des éprouvettes de résilience normalisées ( $L=55 \text{ mm}$ ,  $e=10 \text{ mm}$  et  $a=10 \text{ mm}$ ) voir la figure II.5



*Figure II.6 : éprouvette de dureté de forme cubique après fraisage.*



*Figure II.7 : Eprouvette de résilience sans entaille V après fraisage.*

#### **II.2.2.4. Réalisation d'entaille V**

Pour la réalisation d'entaille sous forme V, nous avons opté pour la fabrication d'un outil adéquat à l'usinage de l'entaille sur les éprouvettes normalisées de résilience. Dans notre travail nous avons utilisé un acier de type [ARS] acier rapide supérieur à l'aide d'un touret à meuler est une machine fixe qui met en rotation une ou deux roues abrasives. Cet outil est utilisé pour meuler, polir et affûter les pièces métalliques, selon le type de roue qui est montée.



*Figure II.8 : Touret moulé*

Pour faire une entaille sous la forme V l'outil doit être avec un angle de  $45^\circ$



*Figure II.9 : Outil de rainurage en taille V.*

Avec l'aide d'une fraiseuse et l'outil de rainurage réalisé, on usiné des entailles en V, d'une profondeur de 2 mm et un angle de  $45^\circ$ , sur nos éprouvettes de résilience.



*Figure II.10 : Eprouvettes de résilience avec entaille V.*

### **II.3. Traitement thermique**

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques, durant notre précipitation, nous effectuons deux types de traitement thermique pour chacun des deux aciers (S355JR, 35CrMo4).

#### **II.3.1. Austénitisation**

Il consiste à chauffer l'acier à une température dite d'austénitisation qui permet la mise en solution de l'ensemble des éléments chimiques et d'homogénéiser la structure.

- Aciers 35CrMo4 d'une teneur en carbone de 0.35 %, d'après le diagramme fer carbone la température d'austénitisation ( $AC1 + 50^\circ C$ ,  $T_1 = 880^\circ C$ )

- Aciers S355JR d'une teneur en carbone de 0.25 %, d'après le diagramme fer carbone, la température d'austénitisation ( $AC1 + 50^{\circ}C$ ,  $T_2 = 860^{\circ}C$ )
- Nous avons pris le temps de maintien à température d'austénitisation de 35 min.

La trempe s'effectue par immersion rapide dans l'eau, le fluide le plus utilisé est l'eau froide  $T < 40^{\circ}C$ , alors les grains n'ont pas le temps de se réarranger pour reprendre leur structure à basse température.



**Figure II.11 :** (A) Four à moufle (B) boîtier de commande de four.

### II.3.2. Revenu de vieillissement

Le revenu se pratique après une trempe, pour réduire les contraintes internes créées durant celle-ci. Le revenu doit être fait dans les 4 heures après le traitement thermique.

La méthode consiste à chauffer les éprouvettes à une température inférieure à celle d'austénitisation, la température est déterminée en fonction du type de l'acier entre  $160^{\circ}C$  et  $200^{\circ}C$  pour six éprouvettes de chaque acier on pratique un revenu a trois temps de maintiens différents 3h ,6h, 9h, et les refroidir très lentement à l'air pur.



*Figure II.12 : Éprouvettes de résilience après le traitement thermique.*

#### **II.4. Observation microscopique des échantillons**

Pour mettre en évidence la microstructure des deux nuances d'aciers S355JR et 35CrMo4. À l'état de livraison, trempé et traitement de revenu nous avons passé par les étapes suivantes :

##### **II.4.1. Polissage**

La microscopie métallographique nécessite une préparation des échantillons à observer, cette préparation consiste à rendre la surface de l'échantillon plane, bien dégraissée et sans déformation gênante à l'aide d'une polisseuse alimentée sous une tension de 220 V.

La vitesse de rotation du disque varie de (150 tr/mn à 300 tr/mn).

Pour l'opération de polissage, nous avons utilisé un papier verre de différentes de grains (180, 220, 280, 400, 600, 800 ; 1000, 1200, 1500,2000).



*Figure II.13 : Polisseuse utilisée*

#### **II.4.2. Attaque chimique**

L'attaque métallographique est une technique consistant à déterminer la microstructure d'un métal en l'observant avec un microscope optique, cette technique nous permet de révéler la nature de la structure, la répartition des phases, la taille des grains et leurs formes, la nature et la teneur des inclusions etc. On utilise fréquemment des acides forts ou des procédés électrochimiques qui agissent sur les différentes phases ou les propriétés optiques d'un matériau au niveau des joints de grains, des phases ou des surfaces des grains. L'examen au microscope est alors possible avec éventuellement l'utilisation complémentaire de filtres optiques. La préparation préalable à l'attaque doit être adaptée à l'analyse souhaitée. Dans notre cas les deux aciers (S355JR et 35CrMo4) sont immergés dans le Nital qui est un réactif préparé à base de 5 ml de l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$  dilué dans 95 ml de l'éthanol pendant 3s à 10s.

#### **II.4.3. Microscopie optique**

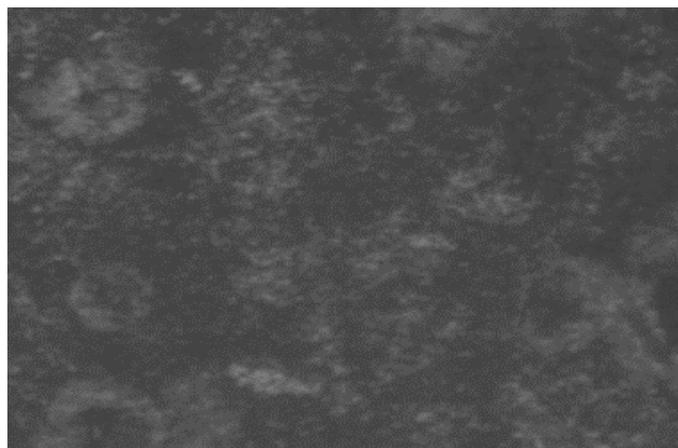
La microscopie optique est une méthode d'observation des métaux qui consiste à examiner par réflexion au microscope une surface polie et généralement attaquée

Elle a pour but principale la mise en évidence de la structure de l'échantillon et de l'inclusion non métallique.

Nos examens de microscopie optique ont été réalisés à l'aide d'un microscope optique et une caméra CCD, et l'ensemble est relié à un ordinateur.



*Figure II.14 : Microscope optique*



*Figure II.15 : Microstructure de l'acier S355JR.*

## II.5. Essais mécaniques

Nous avons usiné des échantillons et à partir de ces trois états d'acier utilisés dans notre étude à savoir :

- Aciers de référence (35CrMo4 et S355JR)
- Acier (35CrMo4 et S355JR) trempé : l'acier de référence est chauffé à une température de (860°C, 880°C). Le temps de maintien d'une durée de 35 minutes, suivi d'un refroidissement à l'eau.

- Le traitement thermique de trempe est suivi d'un traitement de revenu à 180°C avec un refroidissement à l'air. Avec différents temps de maintien (3h, 6h, 9h).

### II.5.1. Essai de dureté Vickers HV

La mesure de dureté Vickers se fait avec un Pénétrateur en forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° sur lequel on a appliqué une force de 50g. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté des deux matériaux S355JR et 35CrMo4.

L'empreinte a la forme d'un carré. Nous avons mesuré les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique qui est relié à un ordinateur. On obtient la valeur  $d$  en calculant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . On utilise le diamètre ( $d$ ) pour calculer la dureté HV suivant la formule : (II.4)



Figure II.16 : Machines d'essais de dureté ZwickRoell

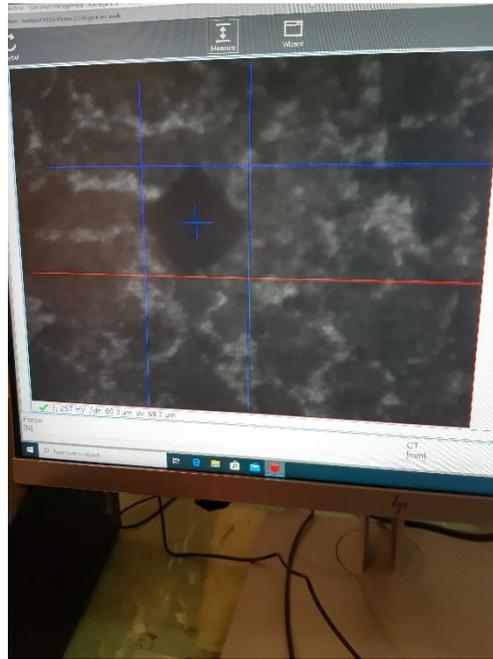


Figure II.17 : Empreinte effectuée sur l'acier S355JR.

## II.5.2. Essai de résilience

La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm<sup>2</sup>, nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette.

### II.5.2.1. 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.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Travail nécessaire(énergie absorbée)}}{\text{section au droit de l'entaille}} \quad (\text{II.5})$$

- **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<sub>0</sub> et h<sub>1</sub>** : la différence de hauteur (cm).

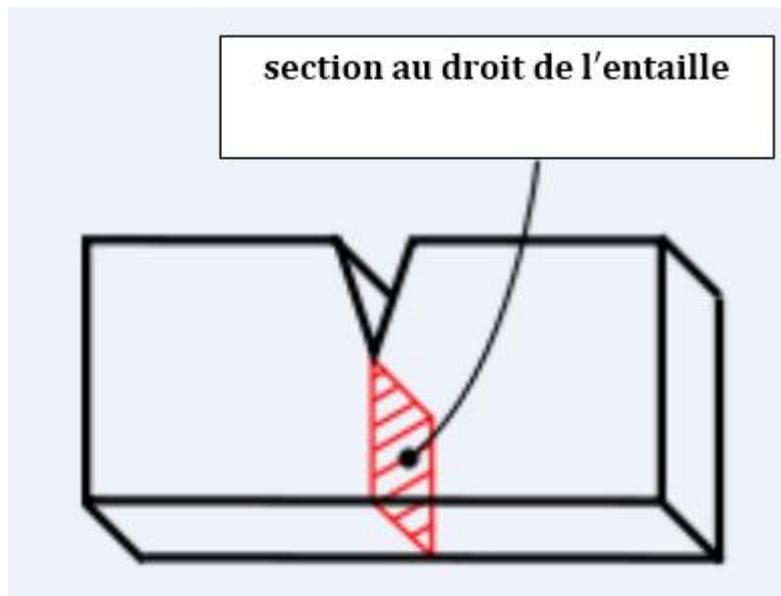


Figure II.18 : Eprouvette de résilience normalisé

### II.5.2.2. Machine d'essai

Les essais de résilience ont été effectués au laboratoire de l'ENMTP de Bejaia, sur mouton pendule Charpy de marque CONTROLAB de type (PW30/15).

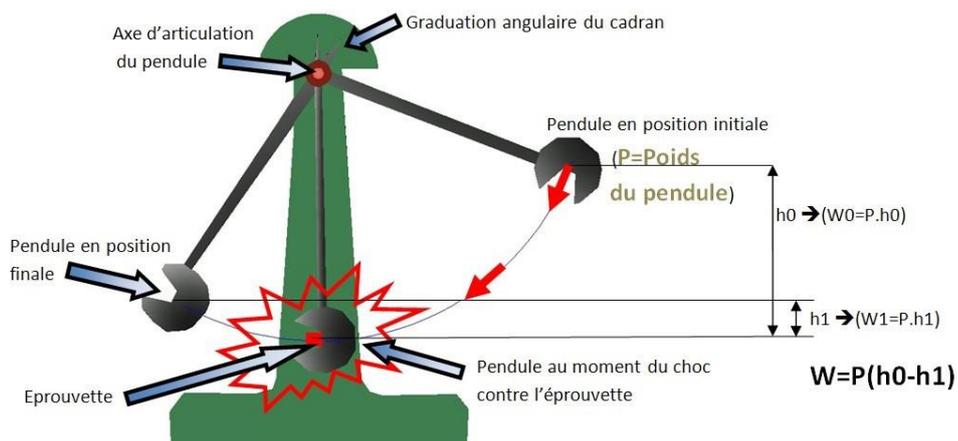


Figure II.19 : Le mouton de Charpy



*Figure II.20 : Machine de résilience utilisée à l'ENMTP*

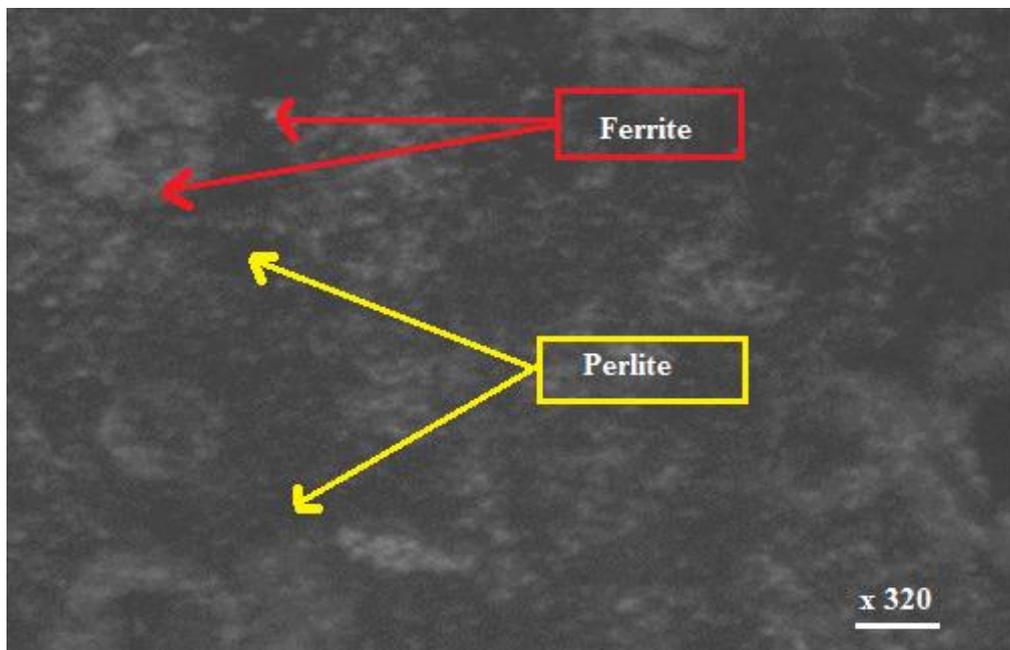
## Chapitre III : Résultats et discussions

### III.1. Observation microscopique à l'état brut

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 caméra CCD et relié à un ordinateur.

#### III.1.1. Acier 35CrMo4

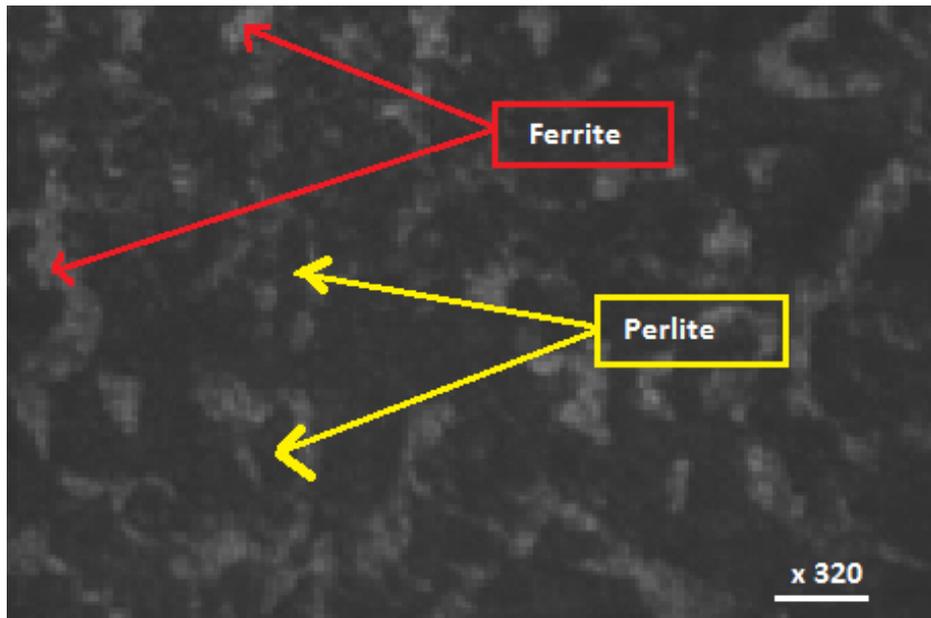
L'observation au microscope optique des échantillons 35CrMo4, nous a révélé les microstructures suivantes.



*Figure III.1 : Microstructure optique de nuance d'acier 35CrMo4.*

#### III.1.2. Acier S355JR

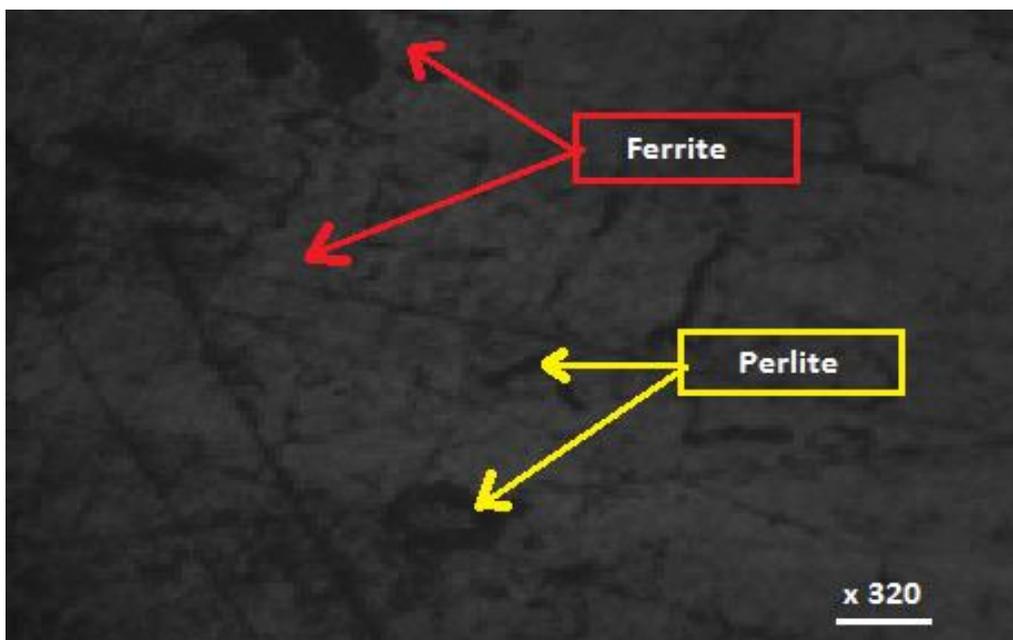
L'observation au microscope optique des échantillons S355JR, nous a révélé les microstructures suivantes.



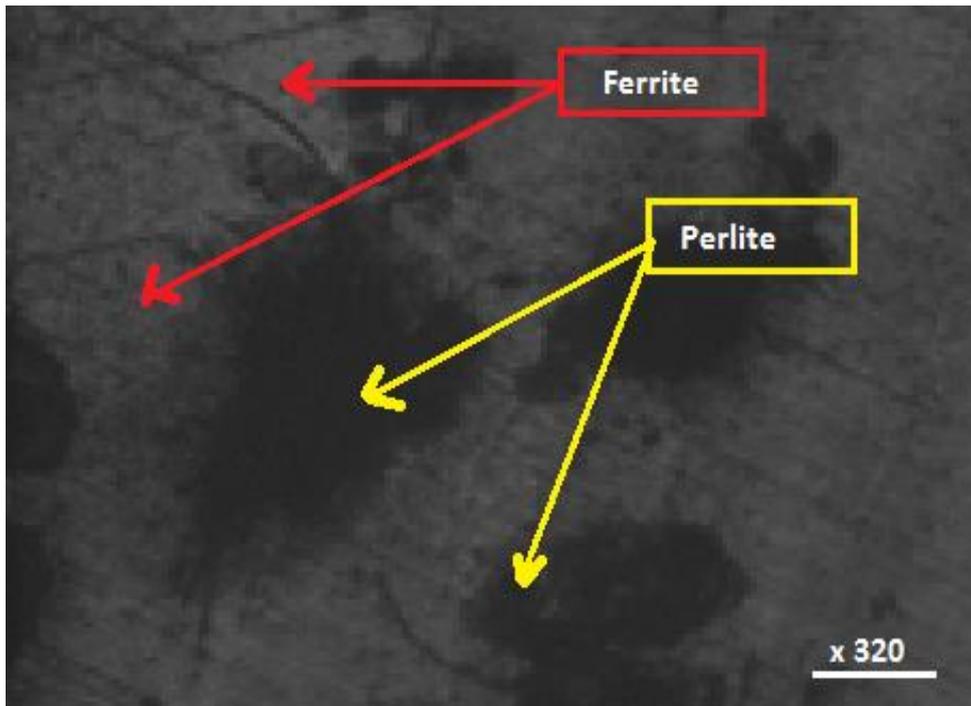
*Figure III.2 : Microstructure optique de nuance d'acier S355JR.*

Les microstructures (**Figure III.1** et **Figure III.2**) 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, répartie d'une manière homogène.

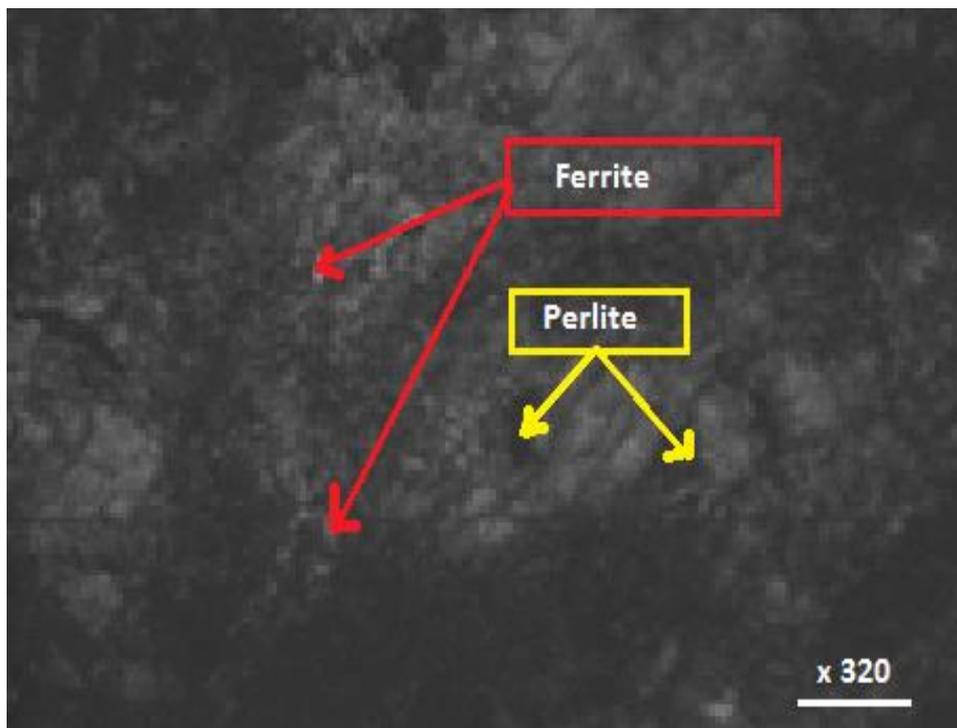
### III.2. Observation microscopique à l'état revenu de l'acier 35CrMo4



*Figure III.3 : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 3h).*



*Figure III.4 : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 6h).*

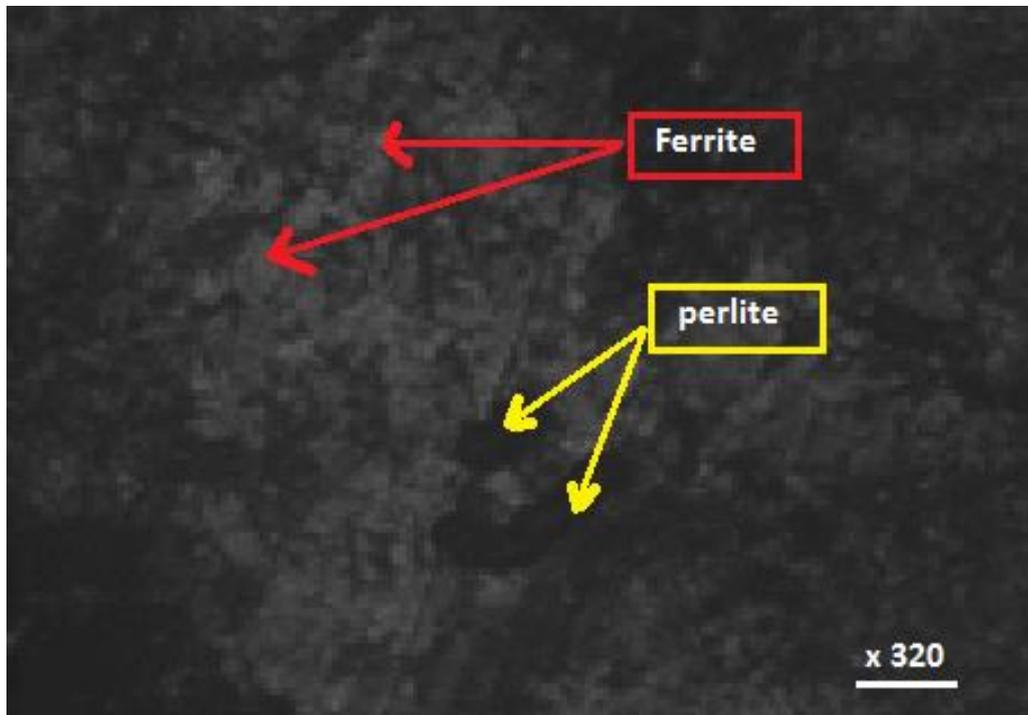


*Figure III.5 : Microstructure de l'acier 35CrMo4 (revenu 9h).*

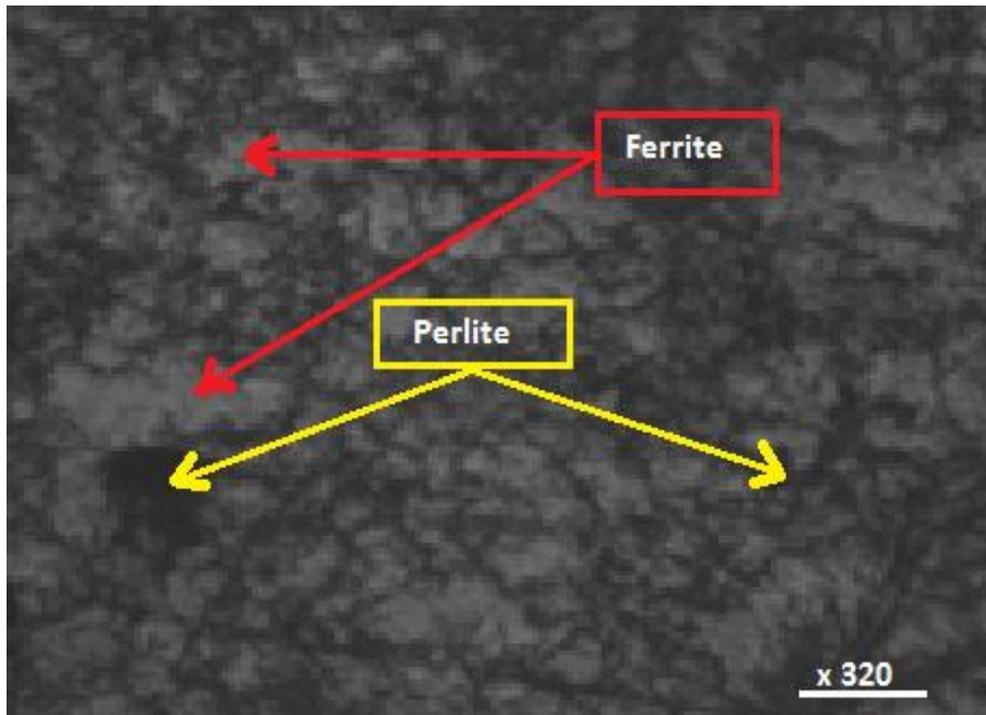
D'après ces images, nous remarquons la présence d'une structure ferrito-perlitique fine et homogène avec des plages sombre due probablement à la formation des précipités. Ces précipités

peuvent être de natures différentes, de type carbure ou de type manganèse ( $\text{Fe}_2,4\text{C}$  ou  $\text{FeMn}$ ). Ces précipités nécessitent des moyens de caractérisation tel que le MEB-EDS et la DRX.

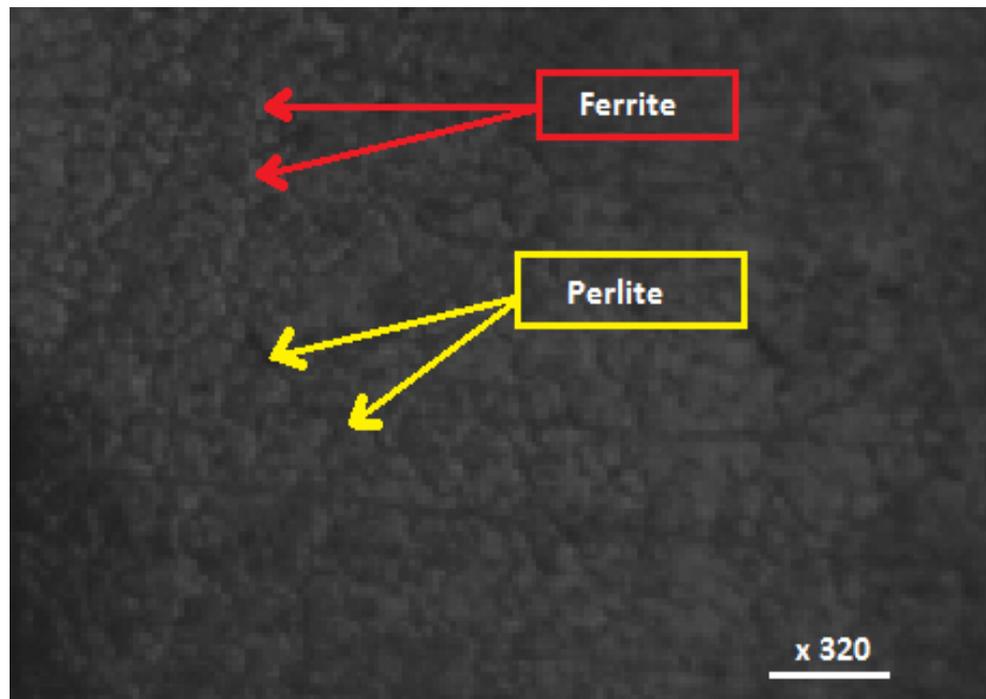
### III.3. Observation microscopique à l'état revenu de l'acier S355JR



*Figure III.6 : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 3h).*



*Figure III.7 : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 6h).*



*Figure III.8 : Microstructure de l'acier S355JR (revenu 9h).*

Pour l'acier S355JR, on remarque aussi la présence d'une structure ferrito-perlitique homogène avec des plages sombre due probablement à la formation des précipités. Ces précipités

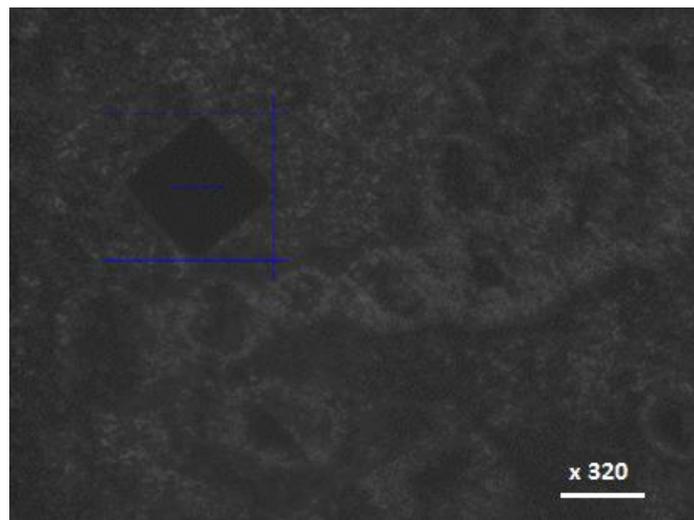
peuvent être de natures différentes, de type carbure ou de type manganèse. Ces précipités nécessitent des moyens de caractérisation telle que le MEB-EDS et la DRX.

#### III.4. Essais de dureté Vickers

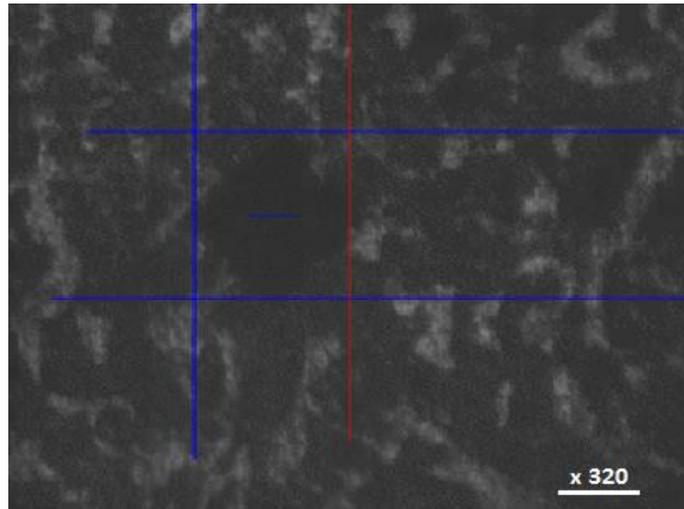
Dans le but de mettre en évidence l'influence des traitements thermique sur la structure des aciers 35CrMo4 et A60, nous avons suivi l'évolution de la dureté HV en utilisant une série de d'essais sur six échantillons de chaque nuance pour trois états différents :

- Etat de livraison.
- Trempe a eau après une austénitisation à 860°C pendant 30 min.
- Revenu des échantillons à différentes temps de maintien 3h, 6h et 9h.

Les résultats obtenus par les essais de la micro-dureté sont présentés ci- dessous :



*Figure III.9 : Essai de dureté Vickers pour l'acier 35CrMo4.*



*Figure III.10 : Essai de micro-dureté Vickers pour l'acier S355JR.*

### III.5. Résultats dureté Vickers

Les résultats présentés dans ces deux Tableau III.1 et Tableau III.2 sont des résultats obtenus lors de l'essai de dureté HV pour l'acier 35CrMo4 et l'acier A60 trempé à la température de 860°C et 880°C suivis du traitement de revenu à des différents temps de maintiens ( $t_1=3h$ ,  $t_2=6h$ ,  $t_2=9h$ ) à une température 180°C.

*Tableau III.1 : Résultats de l'essai de dureté Vickers HV avec une charge de 50 g pour l'acier 35CrMo4.*

Essais		1	2	3	La Moyenne
		Aciers			
Aciers de Référence		HV = 308	HV = 303	HV = 307	HV = 306
Aciers trempés		HV = 650	HV = 635	HV = 620	HV = 635
Duretés Vickers (HV)	3h	HV = 565	HV = 588	HV = 563	HV = 573
	6h	HV = 451	HV = 450	HV = 429	HV = 433.33
	9h	HV = 503	HV = 565	HV = 564	HV = 544

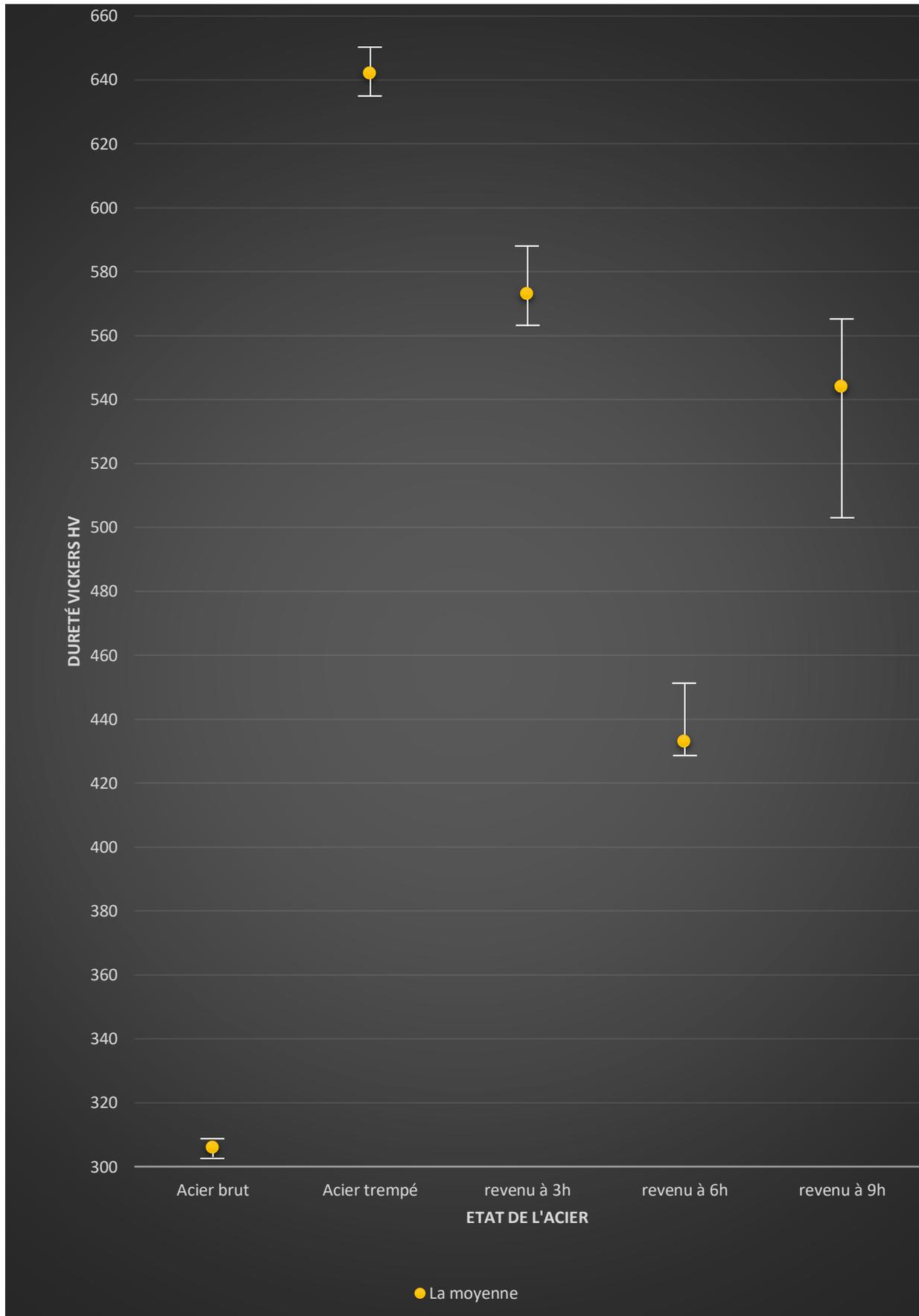


Figure III.11 : Diagramme de la dureté Vickers HV de l'acier 35CrMo4.

Les résultats sont présentés dans le Tableau III.1 et la **Figure III.9** l'acier de référence subissant un traitement de revenu à une température 180°C après un traitement de trempe à une température 860°C.

Nous remarquons la dureté HV pour l'acier 35CrMo4 augmente pour des revenus de 3h, 6h et 9h par rapport à l'état de référence. Cette augmentation est du probablement à la formation de précipités de type carbures ou de manganèse. Ces précipités provoquent un durcissement microstructural de l'acier qui est connu sous l'appellation de l'écrouissage. Cet écrouissage est bénéfique dans certain cas comme dans l'augmentation de la limite élastique de l'acier. Il peut être indésirable dans certains cas comme la diminution de la résistance à la corrosion. Voir ces précipités nécessite des tests plus poussés à savoir l'utilisation du Microscope électronique à Balayage (MEB-EDS) et la diffraction des rayons X (DRX).

**Tableau III.2 : Résultats de l'essai de dureté Vickers HV avec une charge de 50 g pour l'acier S355JR.**

Essais		1	2	3	La Moyenne
Aciers					
Aciers de référence		HV = 105	HV = 101	HV = 103	HV = 103
Aciers trempés		HV = 525	HV = 565	HV = 580	HV = 565.33
Duretés Vickers (HV)	3h	HV = 477	462	HV = 427	HV = 455.33
	6h	HV = 282	HV = 262	HV = 314	HV = 286
	9h	HV = 287	HV = 271	HV = 270	HV = 276

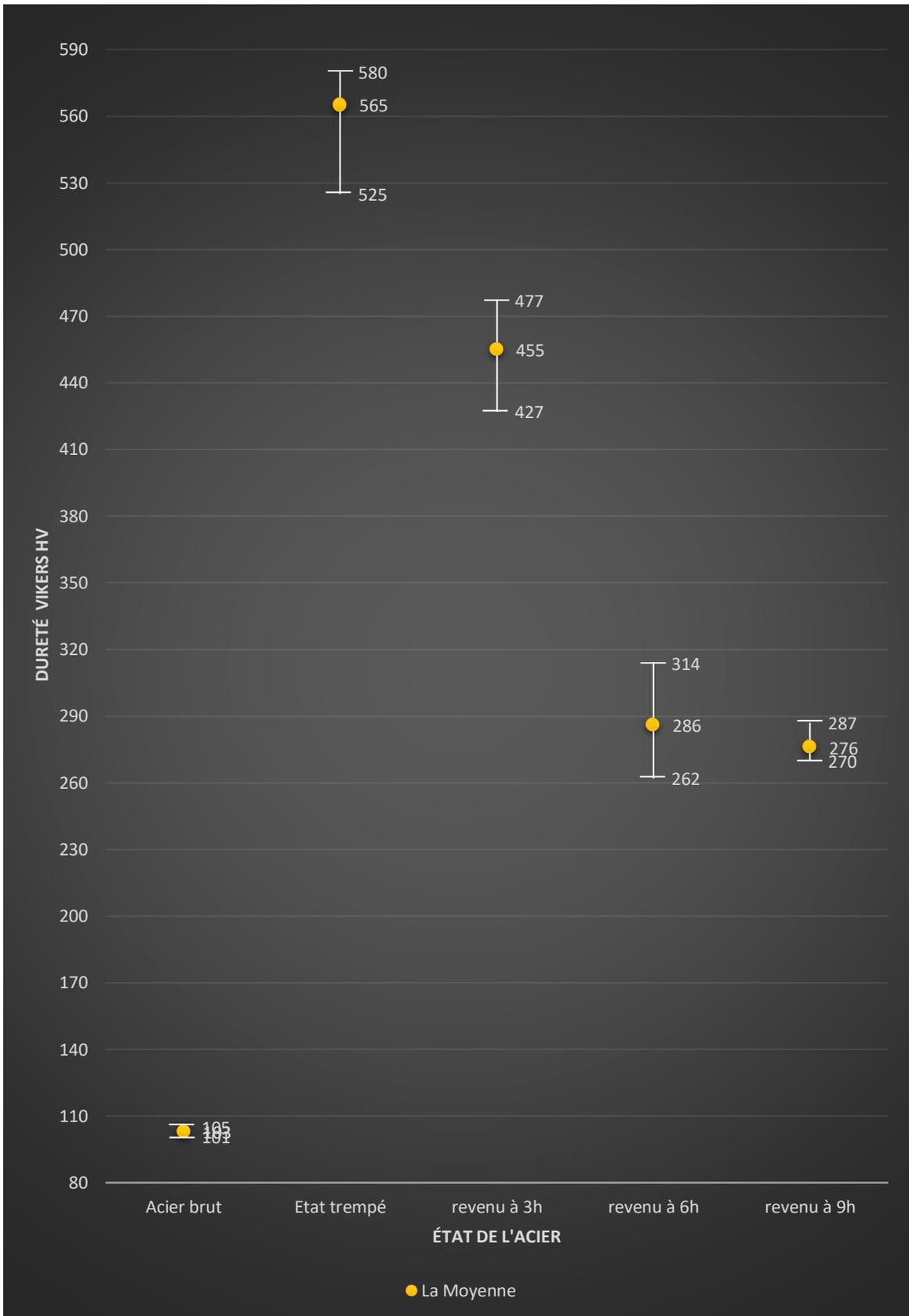


Figure III.12 : Diagramme de la dureté Vickers (HV) de l'acier S355JR.

Les résultats sont présentés dans le Tableau III.2 et la **Figure III.12** l'acier de référence subissant un traitement de revenu à une température 180°C après un traitement de trempe à une température 880°C.

Pour l'acier S355JR, nous remarquons une augmentation de dureté HV pour le revenu 3h, cette augmentation est probablement due à des précipités de type carbure est manganèse. Ces précipités provoquent un durcissement microstructural de l'acier qui est connu sous l'appellation de l'écrouissage. Et pour les deux revenus 6h et 9h nous remarquons une augmentation légère de dureté HV. Cette augmentation légère apparemment à cause de sa faible teneur de carbure et le manganèse.

### III.6. Essai de résilience

Le Tableau III.3 ci-dessous présente les résultats obtenus lors de l'essai de résilience pour l'acier 35CrMo4 avant et après traitement thermique.

*Tableau III.3 : Résultats des essais résilience de l'acier 35CrMo4 avant et après traitement thermique.*

Acier	Essais	Énergie absorbée en (J)	Section (cm <sup>2</sup> )	Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	Moyenne	La diminution de Kcv%
35CrMo	1 <sup>er</sup> essai	120	0.81	148.14	163.97	/
	2 <sup>e</sup> essai	125	0.78	160.25		
	3 <sup>e</sup> essai	145	0.79	183.54		
	Revenu à 3h	14	0.84	16.66	16.66	89.83%
	Revenu à 6h	7	0.96	7.29	7.29	95.65%
	Revenu à 9h	24	0.76	31.57	31.57	80.74%

Le Tableau III.4 ci-dessous présente les résultats obtenus lors de l'essai de résilience de l'acier S355JR avec un traitement thermique.

Tableau III.4 : Résultats des essais résilience de l'acier S355JR avant et après traitement thermique.

Aciers	Essais	Énergie absorbée en (J)	Section (cm <sup>2</sup> )	Résilience (k <sub>cv</sub> ) en (J/cm <sup>2</sup> )	La moyenne	La diminution de K <sub>cv</sub> (%)
S355JR	1 <sup>e</sup> essai	20	0.84	23.8	21.66	
	2 <sup>e</sup> essai	15	0.78	19.23		
	3 <sup>e</sup> essai	18	0.82	21.95		
	Revenu à 3h	18	0.86	20.93	20.93	3.53%
	Revenu à 6h	14	0.87	16.09	16.09	27.85%
	Revenu à 9h	19	0.92	20.65	20.65	4.88%

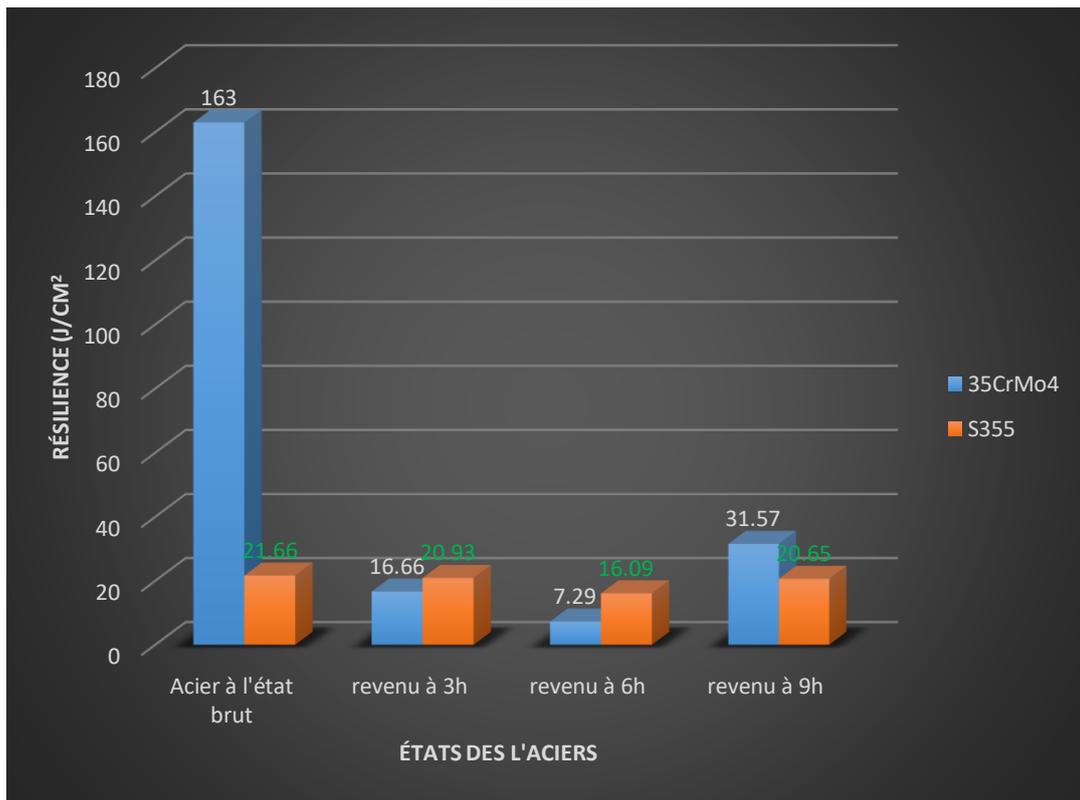
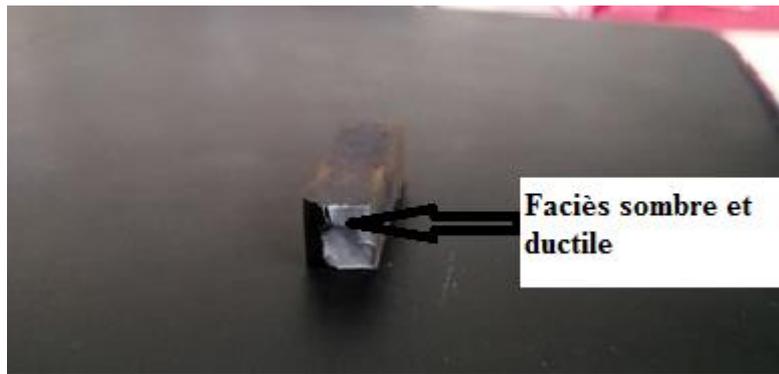


Figure III.13 : Histogramme comparative des résultats de la résilience de l'acier S355JR et l'acier 35CrMo4.

Les résultats que nous avons obtenus d'après les essais de résiliences avant et après le traitement thermique (Tableau III.3 et le Tableau III.4), montre l'influence des traitements de revenu sur les caractéristiques mécaniques. Ce qui confirme que :

- La résilience ( $K_{cv}$ ) pour l'acier 35CrMo4 présente une grande diminution pour des revenus de 3h, 6h et 9h. cette diminution est probablement due à la formation de précipités de type carbures ou de manganèse, La décroissance est très marquée : par exemple, la valeur de la résilience de l'acier 35CrMo4 à l'état brut passe de  $163.97 \text{ J/cm}^2$  à la valeur égal à  $16.66 \text{ J/cm}^2$  revenu 3h qui donne un pourcentage de diminution de résilience  $k_{cv}$  89.83% pour 6h de revenu la valeur de la résilience de l'acier 35CrMo4 à l'état brut passe de  $163.97 \text{ J/cm}^2$  à la valeur égal à  $7.29 \text{ J/cm}^2$ , cela nous donne un pourcentage de diminution de résilience égal à 95.65%. Pour 9h de revenu la valeur de la résilience de l'acier 35CrMo4 à l'état brut passe de  $163.97 \text{ J/cm}^2$  à la valeur égal à  $31.57 \text{ J/cm}^2$  qui donne une diminution de 80.74%.
- Pour l'acier S355JR, la résilience diminue légèrement pour 3h, 6h et 9h de revenu par exemple, la valeur de la résilience à l'état brut passe de  $21.66 \text{ J/cm}^2$  à la valeur égale à  $20.93 \text{ J/cm}^2$  revenu 3h qui nous donne un pourcentage de diminution de résilience égal à 3.53%. Pour 6h de revenu la valeur de la résilience de l'acier S355JR à l'état brut passe de  $21.66 \text{ J/cm}^2$  a la valeur égale à  $16.09 \text{ J/cm}^2$ , cela nous donne un pourcentage de diminution de résilience égal à 27.85%. Pour 9h de revenu la valeur de la résilience de l'acier S355JR à l'état brut passe de  $21.66 \text{ J/cm}^2$  à la valeur égal à  $20.65 \text{ J/cm}^2$  qui donne une diminution de résilience égale à 4.88%. Cette diminution de résilience est due au durcissement de la microstructure par précipitation, connue par le phénomène d'écrouissage.

Le faciès de rupture des éprouvettes de résilience est très clair et brillant avec des aspérités dans les échantillons traités à 3h, 6h et 9h pour l'acier 35CrMo4. En revanche, pour les éprouvettes de résilience de l'acier S355JR, le faciès de rupture est de couleur sombre, sans aspérités pour les mêmes temps de traitement.



*Figure III.14 : facies de ruptures d'acier S355JR.*



*Figure III.15 : facies de ruptures d'acier 35CrMo4.*

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur une caractérisation de la microstructure et propriétés mécaniques de dureté et de résilience des aciers de construction S355JR et 35CrMo4 après traitement de vieillissement.

A l'état brut de livraison les deux aciers S355JR et 35CrMo4 présentent une hétérogénéité de microstructure donnant lieu à de faibles propriétés mécaniques en dureté Vickers HV et de résilience.

Dans le but d'étudier l'effet de l'écrouissage sur les propriétés mécaniques dureté et résilience.

Après un traitement d'austénitisation à 880°C pour l'acier S355JR et à 860°C pour l'acier 35CrMo4, suivie d'une trempe à l'eau, des traitements de vieillissement à une température de 180°C à des différents temps de maintien de 3h, 6h et 9h ont été effectués.

L'observation métallographique des échantillons et les résultats des essais mécaniques de dureté et de résilience, sous l'influence du durcissement microstructural par vieillissement thermique, nous a conduit à tirer les points suivants :

- La dureté de l'acier 35CrMo4 s'est avérée plus importante que celle du S355JR, cette différence est due à la teneur en carbone pour l'acier 35MoCr4 qui est de 0,35%, largement supérieur à celle de la nuance S355JR ;
- Le traitement thermique de vieillissement permet l'évolution des caractéristiques mécaniques à savoir la diminution de la résilience et l'augmentation de la dureté ;
- La diminution remarquable de la résilience est due à la formation de précipités qui a causé un écrouissage de la microstructure des deux échantillons ;
- L'écrouissage joue un rôle bénéfique, comme l'augmentation de la limite élastique des aciers et présente aussi des inconvénients, comme la faible résistance à la corrosion.

En fin, nous espérons que ce modeste travail apportera une aide aux futurs étudiants sur la caractérisation des aciers et sur les phénomènes que génèrent les traitements thermiques et changements microstructuraux lors de l'utilisation de ces aciers.

## Annexes

Annexe A : Tableau représentant les résultats de la dureté Vickers de l'acier S355JR.

Temps	Etat de livraison			860° pendant 30 min Trempe à l'eau			Revenu								
							3h			6h			9h		
Essais	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dureté en HV de l'acier S355JR	105	101	103	525	565	580	477	462	427	282	262	314	287	271	270

Annexe B : Tableau représentant les résultats de la dureté Vickers de l'acier 35CrMo4.

Temps	Etat de livraison			860° pendant 30 min Trempe à l'eau			Revenu à 180°C								
							3h			6h			9h		
Essais	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dureté en HV de l'acier 35CrMo4	308	303	307	650	635	620	565	588	563	451	450	429	503	565	564

**Annexe C : Tableau résumant les résultats de résilience en fonction des temps de traitement pour l'acier S355JR**

Temps	Etat de livraison			Revenu à 180°C		
				3h	6h	9h
L'énergie en (J)	W1	W2	W3	W1	W1	W1
Acier S355JR	20	15	18	18	14	19

**Annexe D : Tableau résumant les résultats de résilience en fonction des temps de traitement pour l'acier 35CrMo4**

Temps	Etat de livraison			Revenu à 180°C		
				3h	6h	9h
L'énergie en (J)	W1	W2	W3	W1	W1	W1
Acier 35CrMo4	120	125	145	14	7	24

## Références bibliographiques

- [1] G. Murry, « Aciers. généralités », *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, n° M300, p. M300-1, 1993.
- [2] D. SEMIN, « Exécution des structures métalliques: la norme EN 1090-2 Révision et compléments », n° ref. article : c2572. Editions T.I., 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/construction-metallique-42230210/execuion-des-structures-metalliques-la-norme-en-1090-2-c2572/>
- [3] J. Barralis et G. Maeder, *Précis de métallurgie: élaboration, structures-propriétés et normalisation*, 6. éd. Paris: Afnor [u.a.], 1993.
- [4] D. Pigneaux, « Effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés en aciers », Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine-Metz, 2002.
- [5] Maciej Skorzępo, « Types d'acier », févr. 01, 2021. <https://www.expondo.fr/inspirations/types-dacier/>.
- [6] Frédéric Crespel, « Aciers de construction ». <http://www.aciersspeciaux.fr/aciers-de-construction/>.
- [7] S. BENSADA, *Traitements thermiques des aciers et fontes*. OMNISCRIPTEUM, 2018.
- [8] JC-GIROUD, « Fiches pratiques lubrifiants industriels », *Traitements thermiques des aciers*, 24 février 2018. <http://leslubrifiants.com/2018/02/24/traitements-thermiques-des-aciers/> (consulté le 18 août 2021).
- [9] A. Constant, G. Henry, et J.-C. Charbonnier, *Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers*, Nouv. éd. ref. et augm. Ivry-sur-Seine: Pyc éd, 1992.
- [10] Arfaoui Ali, Chaker Med Amir, « Traitements Thermiques et thermochimiques », *Technologie Pro*, 2010. <https://www.technologiepro.com/cours-materiaux-metalliques-2/chapitre-6-traitements-thermiques-thermochimiques.pdf> (consulté le 28 août 2021).
- [11] A. BERBITI, « Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains », Université BADJI Mokhtar - Annaba, 2017.
- [12] E. Hersent, « Modélisation intégrée de la précipitation pour le soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium à durcissement structural », Thèse de Doctorat, 2010. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2010EMSE0564/document>
- [13] I. Lakhtine, « Métallographie et traitements thermiques des métaux. 3 ème Ed », *Editions Mir*, p. 55-57, 1982.
- [14] X. Régal, « Caractérisation du comportement en traction du béton sous fortes sollicitations: essais de flexion trois points aux barres de Hopkinson », Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 2016.
- [15] B. CHENAL et J. DRIVER, « Écrouissage d'alliages d'aluminium », *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, n° M230, p. M230-1, 1999.
- [16] G. Pomey et M. Grumbach, « Quelques corrélations entre les coefficients d'anisotropie et d'écrouissage et les essais d'emboutissage », *Rev. Met. Paris*, vol. 61, n° 10, p. 885-900, oct. 1964, doi: 10.1051/metal/196461100885.
- [17] E. C. Bain et H. W. Paxton, *Les éléments d'addition dans l'acier: trad. par C. Leymonie. Pref. de P. Lacombe*. Dunod, 1968.

# **CHAPITRE I**

## **Les aciers, Étude bibliographique**

# **CHAPITRE II**

## **Matériaux Et techniques Expérimentales**

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussions**

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## **RESUME**

Dans le but d'étudier l'influence des phénomènes d'écrouissage de la microstructure des deux nuance d'acier 35CrMo4 et l'acier S355JR sur les propriétés mécaniques de dureté et de résilience, nous avons réalisé des traitement de vieillissement par des revenus à 180°C à des temps de maintiens de 3h, 6h et 9h suivi d'un refroidissement à l'aire.

L'observation métallographique des échantillons et les résultats des essais mécaniques de dureté et de résilience, sous l'influence du durcissement microstructural par vieillissement thermique, nous avons constaté que le traitement thermique de vieillissement permet l'évolution des caractéristiques mécaniques à savoir la diminution de la résilience et l'augmentation de la dureté, la diminution remarquable de la résilience est due à la formation de précipités qui a causé un écrouissage de la microstructure des deux échantillons.

Mots clés : Ecrouissage, Dureté, Résilience, Traitement thermique.

## **ABSTRACT**

In order to study the influence of the phenomena of hardening of the microstructure of the two steel grades 35CrMo4 and steel S355JR on the mechanical properties of hardness and resilience, we carried out aging treatments by tempering at 180 ° C at holding times of 3h, 6h and 9h followed by cooling in the air.

The metallographic observation of the samples and the results of the mechanical tests of hardness and resilience, under the influence of microstructural hardening by thermal aging, we noted that the thermal aging treatment allows the evolution of the mechanical characteristics, namely the reduction of the resilience and the increase in hardness, the remarkable decrease in resilience is due to the formation of precipitates which caused a hardening of the microstructure of the two samples.

Keywords : work hardening, hardness, resilience, heat treatment.