

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Métallurgie.

Option : Métallurgie Physique.

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etude**

**En vue de l'obtention du diplôme de :**

**MASTER**

***Thème***

**Étude du comportement des fils de cuivre et des  
fils d'alliage d'aluminium déformés  
industriellement.**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup>. Amina OURABI**

**Proposé et dirigé par :**

**Pr. Mosbah ZIDANI**

**Promotion : Juin 2017**

## **Remerciements**

*Je remercie Dieu, le tout Puissant, pour tout.*

*Mes remerciements très particuliers s'adressent à mon directeur de thèse, monsieur Professeure **M.ZIDANI**, Professeure à l'université de Biskra.*

*Je remercie particulièrement le président de jury. Je tiens à remercier les membres de jury, qui ont accepté de juger mon travail: Mr. Messaoudi Salim, Maître de Conférences-B-, Mr.ATHEMANI Moussa, Maître de Conférences-B.*

*Je remercie amplement : M<sup>elle</sup> Fatima Zohra LEMMADI Maître de Conférences-B-, et Mr.Ibrahim GUESMI le responsable de laboratoire de DRX et Mme.Imane GASMIA, et Mme.Saida SEGHIROU La responsable de laboratoire de physique de Département des sciences de la matière de l'Université de Biskra.*

*Je remercie infiniment les responsables de notre Bibliothèque du Faculté science et de la Technologie.*

*Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicaces*

*A mes chers parents*

*A mes frères et sœur*

*A tous mes professeurs*

*A mes amies*

*Ourabi Amina.*

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Propriétés mécaniques de l'aluminium à température ambiante.	5
<b>Tableau I.2</b>	Effet des éléments d'alliages de l'aluminium.	7
<b>Tableau I.3</b>	Les différentes familles d'alliages d'aluminium.	7
<b>Tableau I.4</b>	Classement des alliages d'aluminium corroyés.	10
<b>Tableau I.5</b>	Principales propriétés physiques et mécaniques des divers cuivres industriels non alliés.	14
<b>Tableau I.6</b>	Classification des fils suivant leurs diamètres	22
<b>Chapitre II : Etude expérimentales</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Composition chimique d'aluminium AGS.	37
<b>Tableau II.2</b>	Différents taux de déformation mesurés des alliages aluminium.	38
<b>Tableau II.3</b>	Différents taux de déformation des fils de cuivre.	38
<b>Tableau II.4</b>	Résultats des mesures de la microdureté des fils d'aluminium déformé et recuit à 250°C en fonction de taux de déformation.	47
<b>Tableau II.5</b>	Les mesures de microdureté des fils de cuivre tréfilé et recuit à 250 °C en fonction de taux de déformation.	56

### Liste des figures

	<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
<b>Figure I.1</b>	L'aluminium non allié.	3
<b>Figure I.2</b>	Maille élémentaire « cubique à face centrée » de l'aluminium	4
<b>Figure I.3</b>	Coupe pseudo binaire Al-Mg <sub>2</sub> Si de l'alliage Al-Mg-Si.	11
<b>Figure I.4</b>	Cuivre natif (CC).	12
<b>Figure I.5</b>	Premières tréfileuses apparues en Europe	18
<b>Figure I.6</b>	Schéma de principe d'une filière.	20
<b>Figure I.7</b>	Schéma principe de tréfilage.	20
<b>Figure I.8</b>	Machine de tréfilage multi-passes	21
<b>Figure I.9</b>	Schéma d'un banc à tréfiler	21
<b>Figure I.10</b>	Schématisation des zones de tréfilage. Définitions géométriques	22
<b>Figure I.11</b>	Schéma d'une filière de tréfilage	23
<b>Figure I.12</b>	Fil et filière pendant la déformation	23
<b>Figure I.13</b>	Différentes formes de filières.	24
<b>Figure I.14</b>	Lubrifiants utilisés en tréfilage	25
<b>Figure I.15</b>	Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe)	26
<b>Figure I.16</b>	Machine de tréfilage à humide.	27
<b>Figure I.17</b>	Machine tréfileuse Multiple contenue à glissement horizontal.	27
<b>Figure I.18</b>	Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées.	28
<b>Figure I.19</b>	Ecoulement de métal dans une filière	30
<b>Figure I.20</b>	Mécanisme de recristallisation [H. Tsukahara, 1995].	34
<b>Figure I.21</b>	Macles de recuit (c) interfaces cohérences et (i) incohérence	35
<b>Figure I.22</b>	Evolution de grain lors de la recristallisation secondaire	35

## Liste des figures

<b>Chapitre II : Etude expérimentale</b>		
<b>Figure II.1</b>	Les échantillons d'aluminium type AGS	37
<b>Figure II.2</b>	Les échantillons de cuivre type ETP.	38
<b>Figure II.3</b>	Four de traitement thermique Naberfherm	39
<b>Figure II.4</b>	Polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260	40
<b>Figure II.5</b>	Microscope optique de type Hund.	41
<b>Figure II.6</b>	Microduremètre Vickers de type 402MVD Z	42
<b>Figure II.7</b>	Rajustement des lignes de mire à l'aide des barillets.	42
<b>Figure II.8</b>	Diffractomètre des rayons X (l'université de Biskra)	43
<b>Figure II.9</b>	Le volume irradié	43
<b>Figure II.10</b>	Microstructure des fils d'aluminium par MO de : a) fil machine et b) fil tréfilé $\epsilon_3=86.58\%$ .	44
<b>Figure II.11</b>	Evolution de La microdureté des fils d'aluminium déformé en fonction de taux de déformation.	45
<b>Figure II.12</b>	Microstructures par MO de fil d'aluminium de : fil machine et fil fortement déformé à 86.58%, recuit à 250°C.	46
<b>Figure II.13</b>	Les mesures de la microdureté des fils AGS tréfilé et recuit à 250°C en fonction de temps de maintien.	48
<b>Figure II.14</b>	Les mesures de la microdureté des fils d'aluminium AGS tréfilés et recuit à 250°C en fonction du taux de déformation.	48
<b>Figure II.15</b>	Diffractogramme de rayons X du fil machine d'aluminium, a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 10 min.	50
<b>Figure II.16</b>	Diffractogramme de rayons X du fil d'aluminium déformé $\epsilon$ (86.58%) a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 10 min.	51

## Liste des figures

---

<b>Figure II.17</b>	Diffractionogramme de rayons X du fil d'aluminium : a) fil machine non recuit, b) fil machine recuit à 10 min, c) fil 86.58% non recuit, d) fil 86.58% recuit à 10 min.	52
<b>Figure II.18</b>	Microstructure des fils de cuivre déformé par MO de : a) fil machine, b) fil tréfilé à 54% et c) à 84%.	53
<b>Figure II.19</b>	Les mesures de la microdureté des fils de cuivre ETP non recuit en fonction de taux de déformation ; a) histogramme, b) courbe.	54
<b>Figure II.20</b>	Les microstructures des fils de cuivre de type ETP tréfilé et recuit à 250°C.	55
<b>Figure II.21</b>	les mesures de la microdureté des fils de cuivre ETP de l'état non recuit et recuit à 250 °C en fonction de temps de maintien.	57
<b>Figure II.22</b>	Diffractionogramme de rayons X du fil machine de cuivre a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 60 min.	58
<b>Figure II.23</b>	Diffractionogramme de rayons X du de cuivre déformé $\epsilon\%$ (84) a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 60 min.	59
<b>Figure II.24</b>	Diffractionogramme de rayons X du fil de cuivre : a) fil machine non recuit) fil machine recuit à 60 min, c) fil 84% non recuit, d) fil 84% recuit à 60 min.	60

# Sommaire

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale.

## Chapitre I : Étude bibliographique

### Partie I : Les alliages de cuivre et d'aluminium.

I.Introduction .....	2
I.1.Généralité sur L'aluminium .....	2
I.1.1.Les propriétés d'aluminium .....	3
I.1.1.1.Propriétés atomiques .....	3
I.1.1.2.Structure cristallines .....	3
I.1.1.3.Masse volumique .....	4
I.1.1.4.Point de fusion .....	4
I.1.1.5.Propriétés chimiques .....	4
I.1.1.6.Conductivité électrique et thermique .....	4
I.1.1.7.Propriétés mécaniques .....	5
I.1.1.7.1.Propriétés élastiques .....	5
I.1.1.8.Résistance à la corrosion .....	6
I.1.2.Les alliages d'aluminium .....	6
I.1.2.1.Classification des alliages d'aluminium .....	7
I.1.2.1.1.Les alliages sans durcissement structural .....	8
I.1.2.1.2.Les alliages à durcissement structurale .....	9
I.1.2.2.Les alliage d'aluminium qui utilisé dans la fabrication des câbles électriques .....	10



## Sommaire

---

I.2.Généralité sur Les alliages de cuivre .....	11
I.2.1.Les principales qualités du cuivre sont .....	12
I.2.2.Structure chimique de cuivre .....	13
I.2.3.Propriétés physiques et mécaniques de cuivre .....	13
I.2.4.Durabilité du cuivre .....	15
I.2.5.Propriétés électroniques .....	15
I.2.6.Résistance mécanique du cuivre .....	16
I.2.7.Le cuivre et ses alliages .....	16
I.2.8.Cuivres industriels non alliés .....	16
 <b>Partie II : Le procédé de tréfilage industriel à froid.</b>	
II.1.Introduction .....	18
II.2.La définition de tréfilage .....	18
II.3.Le principe de tréfilage .....	19
II.4.Les éléments clés de tréfilage .....	22
II.5.Paramètre de tréfilage.....	25
II.6.Outils et équipements industriels du tréfilage .....	25
II.7.Les machine de tréfilages .....	26
II.8.Les grandeur mécanique de tréfilage.....	27
II.9.La préparation de surface .....	28
II.10.Le revêtement de surface .....	29
II.11.Opération de tréfilage .....	29
II.12.La finition : Nettoyage et traitements thermiques .....	30

## Sommaire

---

### Partie III : Traitement thermique de tréfilage.

III.1.Introduction .....	31
III.2.Définition de traitement thermique .....	31
III.3.Principaux types de traitements thermiques .....	32
1-Traitements thermiques d'homogénéisation .....	32
2- Les traitements d'adoucissement par recuit .....	32
2.1.Le traitement de restauration.....	33
2.2.Le traitement de recristallisation.....	33
2.2.1.Recristallisation primaire (germination et croissance normale).....	34
III.4.Traitements thermiques à durcissement structurale .....	36

## Chapitre II : Étude expérimentale

### Partie I : Choix de matériaux et techniques expérimentales.

I.1.Introduction .....	37
I.2.Choix de matériau .....	37
I.2.1.Fil d'alliage d'aluminium.....	37
I.2.2.Fil de cuivre.....	38
I.3.Traitements thermiques .....	39
I.4.Préparation des échantillons pour l'analyse micrographique.....	39
I.5.Technique d'analyses .....	41
I.5.1.Analyse micrographique (MO).....	41
I.5.2. Analyse de la micro dureté .....	41
I.5.2.1.Principe de Mesure.....	41
I.5.3.Analyse par diffraction des rayons X.....	43

## Sommaire

---

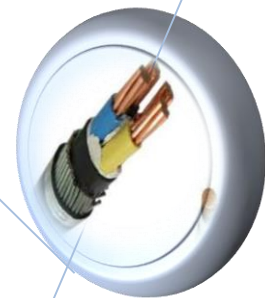
### Partie II : Interprétation des résultats.

II.1.Introduction .....	44
II.2.Etude du fil d'aluminium.....	44
II.2.1.Etat initial .....	44
II.2.1.1.Caractérisation microstructurale .....	44
II.2.1.2.Evolution de la microdureté .....	45
II.2.2.Etat de recuit.....	46
II.2.2.1.Caractérisation microstructurale .....	46
II.2.2.2.Evolution de la microdureté dans l'état recuit .....	47
II.2.2.3.Etude par diffraction des rayons X .....	49
II.3.Etude du fil de cuivre .....	53
II.3.1.Etat initial .....	53
II.3.1.1.Caractérisation microstructurale .....	53
II.3.1.2.Evolution de la microdureté de l'état tréfilé .....	53
II.3.2.Etat recuit .....	55
II.3.2.1.Caractérisation microstructurale .....	55
II.3.2.2.Evolution de la microdureté de l'état recuit .....	56
II.3.2.3.Etude par diffraction des rayons X .....	57

### Conclusion générale.

### Perspectives.

### Reference bibliographique.



# **CHAPITER I:** **ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUE**



### Introduction générale

Les câbles électriques en cuivre et en aluminium destinés au transport de l'énergie électrique nécessitent un compromis entre leurs caractéristiques mécaniques et électriques. Les caractéristiques électriques, mécaniques et cristallographiques du cuivre et de l'aluminium sont proches les unes des autres et le choix entre les deux, fait intervenir des facteurs économiques, techniques et même politiques. Les propriétés mécaniques et électriques de ces alliages résultent par les traitements thermiques après la déformation plastique par tréfilage qui joue un rôle très important pour l'amélioration de ses propriétés.

Dans ce travail de recherche nous nous intéressons aux alliages d'aluminium de type AGS et des fils cuivre de type ETP qui est largement utilisés par l'entreprise ENICAB.

**L'objectif** de notre travail est l'étude de l'effet de traitement thermique par recuit à une température isotherme à 250°C sur l'évolution microstructurale et mécaniques des fils d'aluminium de type AGS et des fils de cuivre de type ETP tréfilés industriellement à froid.

Dans ce contexte, le présent mémoire est divisé en deux chapitres :

**Le premier chapitre** : est divisé en trois parties. La première partie présente une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium et de cuivre, la deuxième partie sur le procédé de mise en forme par tréfilage industriel et une troisième partie sur les traitements thermiques et leurs effets sur les matériaux.

**Le deuxième chapitre** : divisé en deux parties, la première partie présente les matériaux étudiés et les techniques expérimentales de préparation et de caractérisation des échantillons, La deuxième partie est destinée à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus. Enfin, pour conclure cette étude, les principaux résultats ainsi que les perspectives sont présentés.

**Partie I : Les alliages de cuivre et d'aluminium.****I. Introduction**

Les matériaux en général et les métaux en particulier jouent un rôle important pour tout développement industriel ou progrès technologique.

Les matériaux sont déterminants dans toutes les mutations technologiques, dans la plupart des cas les métaux sont utilisés sous forme d'alliages dont les propriétés mécaniques, dépendent de la microstructure déterminée par les caractéristiques des grains et des particules [1].

**I.1.Généralité sur L'aluminium**

L'élément aluminium a été découvert en 1825. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre [2]. La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte –Claire sous la forme de lingot .Cette pièce avait été obtenue par voie chimique .En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charls Martin Hall (USA) [1]. Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Certains alliages possèdent des caractéristiques mécaniques qui répondent très bien aux besoins du domaine aéronautique, comme par exemple l'alliage 2024 utilisé dans les structures des avions et le revêtement de leur fuselage [2].

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéliev [3,4], Sa production industrielle n'a commencé qu'au début du 20ème siècle. Il est classé comme le métal le plus utilisé après le fer et les aciers [1].Il constitue de ce fait 80% du poids des avions actuels. Il est très utilisé aussi dans le transport (25%) (Terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobile), le bâtiment (20%), l'emballage (20%). On l'utilise aussi dans la construction électrique et la construction mécanique (10%) [4]. L'aluminium industriel contient généralement 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99.99%).

Ces impuretés ont différents effets sur les propriétés électriques et mécaniques. Les propriétés d'aluminium peuvent être améliorées en ajoutant des éléments d'additions tels que le Mg, Si, Mn, C ... [3].

L'aluminium est un métal blanc argenté très malléable, [1] (**Fig. I.1**). Il est extrait de la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Il peut également être extrait d'autres minéraux : néphéline, leucite, sillimanite, andalousite, muscovite. [5] ; L'aluminium doit cette à un ensemble des propriétés dans bien des circonstances, en font un matériau irremplaçable ; Parmi celles-ci, citons ce qui suit :



**Figure I.1** : L'aluminium non allié.

### I.1.1. Les propriétés d'aluminium

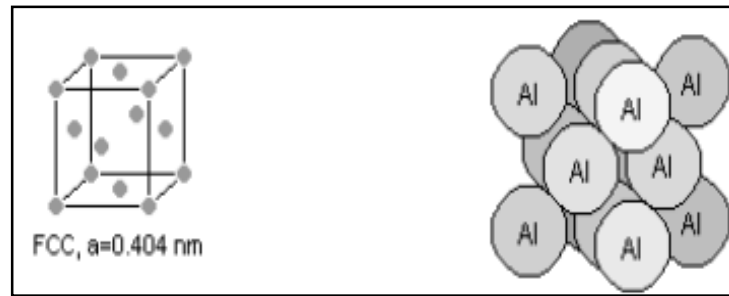
#### I.1.1.1. Propriétés atomiques

- Symbole chimique...Al.
- Numéro atomique : 13 ;
- Masse atomique : 26, 98 ;
- Principal isotope : A127 stable, comprenant 14 neutrons et 13 protons ;
- Valence dans les composés chimiques : 3 [6].

#### I.1.1.2. Structure cristallines

L'aluminium a une structure cubique à faces centrées (CFC) avec les caractéristiques suivantes :

- Rayon atomique .....1.4286 Å°.
- Constante réticulaire :  $4,049596 \times 10^{-10}$  m à 25 °C.
- Diamètre atomique :  $2,86 \times 10^{-10}$  m.
- Volume atomique :  $9,999 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/mo. (**Fig. I.2**) [6].



**Figure I.2 :** Maille élémentaire

« cubique à face centrée » de l'aluminium [5].

### I.1.1.3.Masse volumique

Parmi les métaux usuels, L'aluminium est léger et de plus présente des caractéristiques mécaniques très élevées [8]. A titre de comparaison, il est trois fois plus légères que le cuivre qui lui possède une masse volumique de  $8940 \text{ kg.m}^{-3}$  [6]. La masse volumique de l'aluminium, calculée à partir des paramètres cristallins, est à  $25^\circ\text{C}$  :

$2699 \text{ kg/m}^3$  pour un titre de 99,95 % [7], ou  $2700 \text{ kg.m}^{-3}$  [6].

### I.1.1.4.Point de fusion

La température de fusion est de  $660^\circ\text{C}$  pour un aluminium de pureté titrée à 99,996 % l'intervalle de fusion est de  $664\text{-}657^\circ\text{C}$  pour un aluminium de pureté titrée de 99,00 à 99,50 % [7].

### I.1.1.5.Propriétés chimiques

L'aluminium se recouvre rapidement d'une couche d'alumine de faible épaisseur ( $\approx 1\mu\text{m}$ ) qui le rend stable chimiquement. Il résiste à l'action des graisses, huiles, hydrocarbures, alcools, acide nitrique ....

Il est attaqué par les acides chlorhydrique et fluorhydrique, la soude, la potasse, le mercure. Au contact du cuivre, du fer, du plomb et en milieu humide corrosif, l'aluminium est altéré par corrosion électrique, cela veut dire il faut garder l'aluminium en milieu sec [9].

### I.1.1.6.Conductivité électrique et thermique

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus pour les lignes à haute tension. A l'instar du cuivre, l'aluminium, en plus d'une bonne conductivité électrique procure



également un fort pouvoir caloporteur ce qui explique par exemple sa présence dans les dispositifs de refroidissements [8].

### I.1.1.7. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées [10]. Comme le montre le (Tab.I.1), ce qui limite l'usage de l'aluminium pur dans l'industrie [11] :

**Tableau I.1** : Propriétés mécaniques de l'aluminium à température ambiante [11].

Pureté (%)	Limite d'élasticité $Re_{0,2\%}$ (Mpa)	Limite à la rupture $R_m$ (Mpa)	Dureté Brinell
99.99	10	45	12-16
99.8	20	60	19
99.6	30	70	18-25

#### I.1.1.7.1. Propriétés élastiques

##### \* Module d'élasticité :

Il est égal à 66,6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et d'additions. Pour l'aluminium commercialement pur, la valeur de 69 GPa est généralement admise. Pour les alliages, le module est généralement compris entre 69 et 72 GPa ; il est particulièrement sensible à la teneur en silicium et passe de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18 %.

##### \* Module de torsion :

Il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99,9 % et à 26 GPa pour l'aluminium commercial.

##### \* Coefficient de Poisson :

Il varie de 0,33 à 0,35. Avec une valeur probable de 0,34 [7, 9].

### I.1.1.8. Résistance à la corrosion

Sa tenue à la corrosion liée à l'existence à sa surface d'un film passif d'oxyde ou d'hydroxyde d'aluminium protecteur et stable sur une large gamme de pH compris entre 4 et 9 [6].

Comme pour l'aluminium non allié, elle est bonne grâce à la formation de la couche protectrice d'oxyde  $Al_2O_3$  et elle peut être améliorée (plus épaisse) par anodisation. Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres. Par contre, ils sont sensibles à la corrosion galvanique et des précautions sont à prendre en particulier avec le fer. Les risques de corrosion inter granulaire et de corrosion sous tension existent dans les alliages des séries 2000 et 7000 [3].

### I.1.2. Les alliages d'aluminium

Les faibles propriétés mécaniques de l'aluminium non allié font qu'il ne présente pratiquement aucun intérêt industriel [5]. L'addition d'autres métaux pour former des alliages permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques et permet l'utilisation de ces alliages en tant que matériaux de structure [11]. Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents, les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement allié et des phases intermétalliques  $Al_2Cu$ , (phase  $\theta$ ),  $Mg_2Si$ ,  $Al_2CuMg$  (phase S),  $Al_6CuMg_4$  (phase T),  $Al_3Mg_2$  [12].

Cependant, on peut considérer que ces alliages comportent :

- 1) **Une addition principale** : déterminante pour les propriétés de résistance.
- 2) **Des additions secondaires** : en quantité plus faible qui ont une action spécifique [13].

**Tableau I.2** : Effet des éléments d'alliages de l'aluminium [13].

Éléments	Effets
<b>Cu</b>	Augmente la résistance mécanique.
<b>Mn</b>	Augmente la résistance mécanique et modifie la granulométrie.
<b>Mg et Si</b>	Augmentent la résistance à la corrosion atmosphérique.
<b>Zn</b>	Augmente la résistance mécanique.

### I.1.2.1. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium se répartissent en huit familles dont la désignation, à quatre chiffres, dépend de l'élément d'alliage principal (**Tab .II.3**) [6] :

**Tableau I.3** : Les différentes familles d'alliages d'aluminium [6].

Familles	Systèmes
1xxx	aluminium non allié, peu d'élément d'alliage
2xxx	Al-Cu et Al-Cu-Mg
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si (alliage de fonderie)
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu
8xxx	autres éléments

Les familles d'alliages d'aluminium corroyés se divisent elles-mêmes en deux catégories distinctes [6] :

**I.1.2.1.1. Les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant) [4]**

Correspondant aux séries 1000 ; 3000 et 5000 et 8xxx sont des alliages **sans durcissement structural** ou à **durcissement par écrouissage**. Le durcissement par écrouissage est réalisé par déformation plastique du matériau. Les conséquences sur les propriétés mécaniques sont une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté accompagnée d'une perte de ductilité. Ces alliages sont désignés par la lettre H suivie de deux chiffres. Le premier chiffre correspond aux différentes étapes thermomécaniques appliquées lors du cycle d'élaboration :

- H1x : écrouissage seul
- H2x : écrouissage et recuit partiel
- H3x : écrouissage et stabilisation par un traitement thermique [6,14].

Les propriétés générales de ces alliages d'aluminium non alliés sont les suivant :

- Une très bonne aptitude à la déformation plastique.
- Une résistance mécanique relativement faible.
- Un excellent comportement en corrosion.
- Une bonne aptitude au soudage, au brasage et à l'anodisation [15].

**\* Série 1000 (alliage non allié) :**

Les alliages d'aluminium non alliés de la série 1xxx sont des alliages à durcissement par écrouissage présentant une teneur en aluminium d'au moins 99% massique. Les propriétés de ces nuances dépendent de différents paramètres tels que les teneurs en impuretés (ex : fer et silicium), les niveaux d'écrouissage et l'adoucissement engendré par les traitements de recuit. Les propriétés générales de ces alliages d'aluminium non alliés sont les suivantes :

- Une très bonne aptitude à la déformation plastique, et faible intervalle de fusion.
- Une résistance mécanique relativement faible, (la résistance à la traction varie entre 69 à 186 N/mm<sup>2</sup>).
- Un excellent comportement en corrosion, et bonne conductibilité électrique c'est pour ça utilisé en raison.

- Une bonne aptitude au soudage, au brasage et à l'anodisation [6].

**\* Série 3000 (alliage Al-Mn) :**

Ces alliages sont à base d'aluminium et de manganèse. Se caractérisent par :

- Une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de Magnésium.
- Une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage,
- Une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation [10].

**\*Série 5000 (Al-Mg) :**

A ce groupe appartiennent les alliages avec une teneur en magnésium de 0.2 à 7.2 % et une teneur en Mn de 0.2 à 0.8 % .Ces alliages sont caractérisés par une résistance (stabilité) élevée contre l'eau salée, et une combinaison intéressante de résistance, de ductilité et d'usinabilité. Utilisé dans les applications qui requièrent. Le durcissement des alliages de la série 5000 se fait par solution solide [Cur06] [16,4].

### **I.1.2.1.2.Les alliages à durcissement structurale (alliages trempant)**

Pour les alliages à durcissement structural, les propriétés mécaniques sont obtenues par traitement thermique : mise en solution, trempe, maturation et/ou revenu. Ces traitements sont caractérisés par cinq états métallurgiques différents :

- Etat O : état recuit qui traduit la meilleure formabilité,
- Etat T4 : mis en solution et mûri,
- Etat T6 : mis en solution puis revenu,
- Etat T1 : refroidi après transformation à chaud et mûri,
- Etat T5 : refroidi après transformation à chaud et revenu [16].

Correspondant aux séries 2000, 4000,6000 et 7000. Pour les alliages trempant, la principale méthode de durcissement correspond à traitement thermique ; appelé **traitement à durcissement structurale** .Le processus de durcissement structurale permet d'améliorer

nettement les propriétés mécanique des alliages d'aluminium en conduisant à la formation de précipités durcissant (**Tab.I.4**) [14].

**Tableau I.4** : Classement des alliages d'aluminium corroyés [14].

	Alliages trempant Ou à durcissement structurale Ou à traitement thermique	Alliages non trempant Ou à durcissement par écrouissage ou à sans traitement thermique
<b>Série</b>	2000 4000 6000 7000	1000 3000 5000

### I.1.2.2. Les alliages d'aluminium qui utilisé dans la fabrication des câbles électriques

Les alliages de cette série sont susceptibles de durcissement par traitement thermique. La résistance à la traction varie de 125 à 400 N/mm<sup>2</sup>. Ils sont des alliages aluminium-magnésium-silicium [17]. Les éléments d'addition de ces alliages de la série 6000 se divisent en deux familles :

- Les éléments participant au durcissement de l'alliage

(Il s'agit du Magnésium et du silicium).

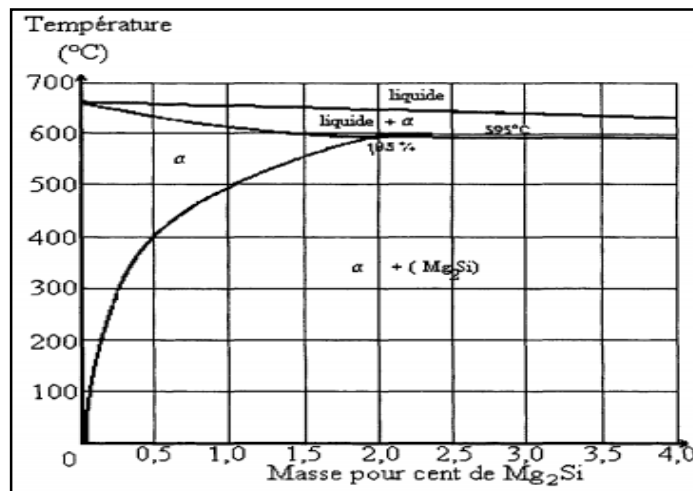
- Les éléments secondaires qui permettent d'améliorer certaines propriétés physiques (les principaux sont le fer, le manganèse et le chrome) [18].

Le durcissement structural des alliages de la série 6000 est lié à la formation du composé Mg<sub>2</sub>Si. Quand le magnésium et le silicium se combinent en Mg<sub>2</sub>Si le rapport massique Mg/Si est égal à 1,73. Pour la plupart de ces alliages, ce rapport est respecté. On

rencontre parfois un excès de silicium qui améliore les propriétés mécaniques. Ceci se fait au détriment de la résistance à la corrosion [16].

Alliages Al-Mg-Si de la série 6000 Ils présentent les caractéristiques générales ci-dessous :

- Des caractéristiques mécaniques moyennes, inférieures à celles des alliages des séries 2000 et 7000, mais suffisantes pour les applications prévues,
- Une très bonne aptitude à la transformation à chaud : ce sont les alliages de filage par excellence car ils permettent d'obtenir, dans de très bonnes conditions économiques, des profilés de forme pouvant être très complexe,
- Un bon comportement aux agents atmosphériques et une bonne aptitude au soudage et aux traitements de surface,
- Une bonne tenue aux basses températures mais une tenue à chaud limitée au-delà de 150 °C [6].



**Figure I.3 :** Coupe pseudo binaire Al-Mg<sub>2</sub>Si de l'alliage Al-Mg-Si [18].

## I.2. Généralité sur Les alliages de cuivre

Le cuivre est le métal le plus ancien connu par l'homme, il a découvert et utilisé depuis plus de 10 mille ans. C'est le plus vieux métal au monde, c'est le deuxième métal non-ferreux employé industriellement, derrière l'aluminium, pour ses propriétés remarquables [19,6].

Le cuivre occupe une place importante dans le transport de l'énergie électrique, à cause de sa bonne conductibilité électrique et thermique. Associées à une conductibilité élevée donc

la caractéristique principale du cuivre est sa qualité de bons conducteurs de l'électricité associée à une conductibilité élevée [20].

Le cuivre est un métal rouge à cassure rose (**Fig.I.4**), et un élément chimique du 1<sup>er</sup> groupe de la classification de Mendéliev [13], le cuivre pur et très malléable et ductile, et un métal de transition du groupe IB comme l'or et l'argent sont [21] :

- Numéro atomique .....29.
- Masse atomique .....63.546 g/mol.
- Le point de fusion.....1083 °C.
- La densité du cuivre à 20°C est de 8.94 g/cm<sup>3</sup>
- La résistivité électrique du cuivre est .....0.0178 ohm\*mm<sup>2</sup>/m.
- Conductibilité thermique.....  $\lambda = 385 \text{ W. m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Capacité thermique massique à 20°C.....  $c = 385 \text{ J. kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Le coefficient de dilatation linéaire (de 20 °C à 300 C°) est de  $17,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Masse volumique : 8 900 kg.m<sup>-3</sup> [22,6].



**Figure I.4** : Cuivre natif (CC).

### I.2.1. Les principales qualités du cuivre sont

Une très bonne conductibilité électrique et thermique, une résistance convenable à l'usure. Ils sont cependant sensibles à la corrosion et sont chers. **Ses domaines d'application** exploitent directement ces propriétés puisqu'on utilise presque la moitié de la production de Mondiale de cuivre pour du matériel électrique, (conducteur, transformateur, moteurs, électriques...).



Le reste de la production est principalement utilisé pour les tuyaux à eau, la plomberie, les pompes et les vannes... Associé à l'étain ou à l'aluminium, il possède de bonnes propriétés de surface (Résistance à l'usure et au frottement) On utilise comme palier de guidage, comme pignon... [23].

### **I.2.2. Structure chimique de cuivre**

Dans l'air et froid, le cuivre ne s'oxyde pas ; dans l'air humide et chargé en CO<sub>2</sub>, il se recouvre d'une couche imperméable : le vert-de gris (carbonate de cuivre). L'étamage permet une protection contre l'oxydation. Le cuivre est faiblement attaqué et l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique concentré. Il est attaqué par l'acide nitrique et l'ammoniac [9].

### **I.2.3. Propriétés physiques et mécaniques de cuivre**

Les principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre sont résumées dans le (Tab.I.5)

Le cuivre Cu-ETP est un matériau diamagnétique de structure cristalline cubique à faces centrées (c.f.c.) ; Son paramètre de maille est égal à 3,608Å à 18°C. Il a une température de fusion de 1084°C, une masse volumique variant entre 8,89.103 et 8,92.103 kg/m<sup>3</sup> à 20°C (Selon la teneur en oxygène) et une résistivité électrique variant entre 1,724 à 1,682 μΩ.cm à 20°C. Les propriétés essentielles de ce matériau sont ses conductivités électrique (C) 1 et thermique, qui sont particulièrement élevées (Respectivement de l'ordre de 101% IACS et de 391 W/ (m.K) à 20°C) ; Cette dernière est très influencée par la teneur en oxygène. Le coefficient de dilatation linéaire (De 20°C à 300°C) est de 17,6.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, c'est-à-dire 50% plus important que l'acier. Les propriétés mécaniques dépendent surtout de l'érouissage et de la pureté du matériau [24].

**Tableau I.5 :** Principales propriétés physiques et mécaniques des divers cuivres industriels non alliés [24].

<b>Élément</b> <b>Cu (M = 63,54, Z = 29)</b>			
<b>Propriétés physiques</b>			
Enthalpie de fusion	211850 J/kg		
Température de fusion	1065°C à 1083°C		
Coefficient de dilatation (en $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	de -190°C à 16°C		14 ,1
	de 25° C à 100°C		16,8
	de 20°C à 200°C		17,3
	de 20°C à 300°C		17.7
Capacité thermique massique (en J/(Kg.K))	20°C		386
	100°C		393
	200°C		403
	900°C		528
Conductivité thermique (en W/(m.K))	(état recuit)	20°C	100 à 102,5
		100°C	76
Conductivité électrique (%IACS)	(état recuit)	20°C	100 à 102,5
		100°C	76
	(état écroui)	200°C	58
		20°C	97
Résistivité électrique $\rho$ (en $\mu\Omega.\text{cm}$ )	(état recuit)	20°C	1,724 à 1,682
		100°C	2.27
	(état écroui)	200°C	2.95
		20°C	1.74

Propriétés mécaniques					
Etat de livraison	Symbole AFNOR	R <sub>p0.2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	Allongement (A %)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	230	45	50
¼ dur	H11	190	270	25	80
½ dur	H12	250	300	14	100
<sup>4</sup> / <sub>4</sub> dur	H14	320	350	6	110

L'état de recuit signifie 0% d'érouissage : état AFNOR O  
 ¼ dur : 10% d'érouissage : état AFNOR H11  
 ½ dur : 25% d'érouissage : état AFNOR H12  
 4/4 dur : 50% d'érouissage : état AFNOR H14  
 R<sub>p0.2</sub> limite élastique à 0,2% d'allongement  
 R<sub>m</sub> résistance mécanique

#### I.2.4. Durabilité du cuivre

La première qualité du cuivre, en dehors de son aspect, est sa grande résistance à la corrosion. Par ailleurs, il ne nécessite aucun entretien. Le cuivre ne se dégrade pas avec le temps, il garde son aspect et ses propriétés. Cette grande longévité du cuivre (Facilement un siècle pour les toitures et les canalisations) combinée à son abondance et à sa grande recyclabilité en fait un matériau très intéressant sur le plan économique chaque fois que le choix du matériau de construction s'inscrit dans une démarche qui intègre le cycle de vie [25].

#### I.2.5. Propriétés électroniques

L'oxyde de cuivre Cu<sub>2</sub>O, qui est un important semi-conducteur de type *p*, a fait l'objet de recherches intensives car il possède une bande interdite de transition optique directe de 2.2 eV. Cette propriété fait de lui un matériau attractif pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ou chimique. Récemment il a été montré que le Cu<sub>2</sub>O est une photo catalyseur efficace pour la production d'hydrogène à partir de l'eau, sous irradiation visible. Il est caractérisé aussi par une grande stabilité vis-à-vis de la photo corrosion [21].

### I.2.6. Résistance mécanique du cuivre

Les tubes de cuivre ont une résistance mécanique très élevée, d'au moins 200 N/mm<sup>2</sup> pour les tubes recuits et de plus de 300 N/mm<sup>2</sup> pour les tubes écrouis. Ces caractéristiques permettent d'éviter aux tubes toute déformation et leur donnent une grande résistance aux chocs. Le cuivre est un métal très malléable. Cette caractéristique confère au tube la faculté de se façonner très facilement et par conséquent très rapidement. Le travail du professionnel s'en trouve allégé et pourra trouver une grande liberté dans la manière d'exécuter les tracés grâce à cette grande facilité de mettre en œuvre le métal, et en particulier de réaliser les cintrages [25].

### I.2.7. Le cuivre et ses alliages [23]

Noms	Désignation	R (MPa)	Remarques
<b>Laitons</b>	Cu Zn20 Cu Zn23 Al4	200-260 500	Bonnes qualités de frottement - mise en œuvre aisée excellentes caractéristiques mécaniques - fonderie
<b>Cupro-aluminiums</b>	Cu Al11 Ni5 Fe5 Cu Al9	740-800 500	Excellente résistance à la corrosion - inoxydable à haute $\theta^\circ$ utilisé en construction navale
<b>Cupro-nickels</b>	Cu Ni10 Fe1 Mn	300-350	Utilisé en construction navale
<b>Bronzes</b>	Cu Sn 5 Cu Sn7 Pb6 Zn4	340-390 220	Très bonne tenue aux frottements aptitude à l'étanchéité - excellentes propriétés de fonderie

### I.2.8. Cuivres industriels non alliés

Les cuivres industriels non alliés peuvent, en général, être classés en trois grandes catégories qui sont, d'après la nomenclature française, **Cu-a**, **Cu-b** et **Cu-c**

♦ Le cuivre **Cu-a** contenant de l'oxygène, existe sous forme de trois nuances normalisées dépendant du procédé d'affinage : **Cu-a1**, **Cu-a2** et **Cu-a3**. Le cuivre **Cu-a1**, obtenu par affinage électrolytique, contient une teneur en cuivre supérieure ou égale à 99,90% en masse.

C'est le cuivre le plus pur chargé en oxygène et aussi le plus couramment utilisé. Il a de hautes conductivités électrique et thermique et est destiné à des usages électriques ou

thermiques.

Il est difficilement soudable et ne peut être utilisé sous vide. Les deux autres nuances (**Cu-a2** :  $\text{Cu} \geq 99,90\%$  et **Cu-a3** :  $\text{Cu} \geq 99,85\%$ ) sont obtenues par affinage thermique, seule la première étant de Conductivité électrique garantie. Ces cuivres sont cependant moins utilisés que le cuivre **Cu-a1**, en raison de présence d'un taux d'impuretés plus élevé.

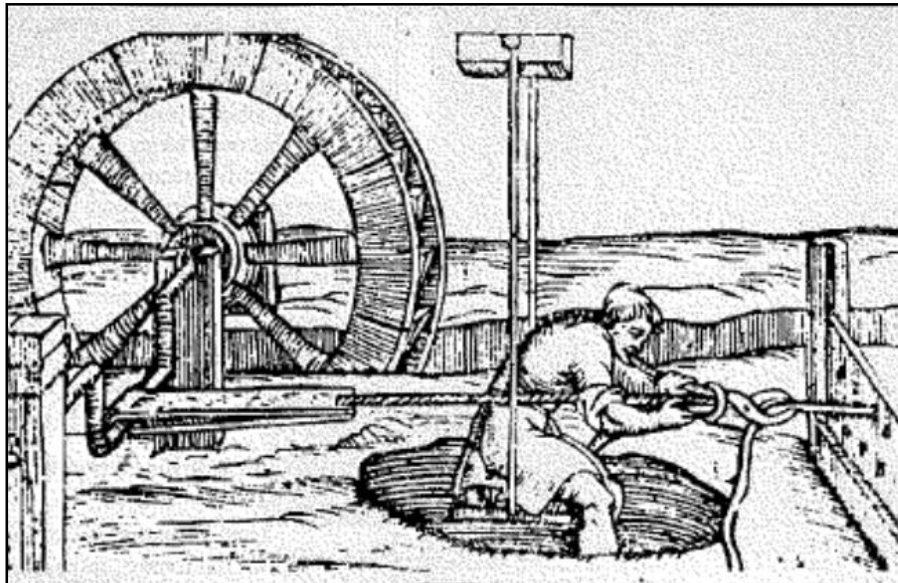
♦ Le cuivre **Cu-b**, exempt d'oxygène et désoxydé au phosphore, contient au moins 99,90% en masse de cuivre et entre 0,013% et 0,050% (**Cu-b1**) ou entre 0,004% et 0,012% (**Cu-b2**) de phosphore. Ce cuivre présente de bonnes caractéristiques mécaniques (bonne soudabilité, meilleure tenue mécanique à température moyenne), mais sa conductivité électrique est limitée par rapport au cuivre Cu-a.

♦ Le cuivre **Cu-c**, exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, **Cu-c1** (cuivre pur) qui comprend 99,95 % de cuivre et **Cu-c2** (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. C'est l'équivalent des cuivres de marque OFHC (Oxygen Free High Conductivity) d'origine américaine. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques(ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité) [24].

## Partie II : Le procédé de tréfilage industriel à froid.

### II.1.Introduction

La mise en forme par déformation plastique se réalise à froid ou à chaud. Elle est étroitement liée au type de cristallisation de l'alliage [26] ; Et le tréfilage est l'un des procédés de mise en forme à froid les plus utilisés dans le milieu industriel [27] (**Fig. I.5**).



**Figure I.5** : Premières tréfileuses apparues en Europe [27].

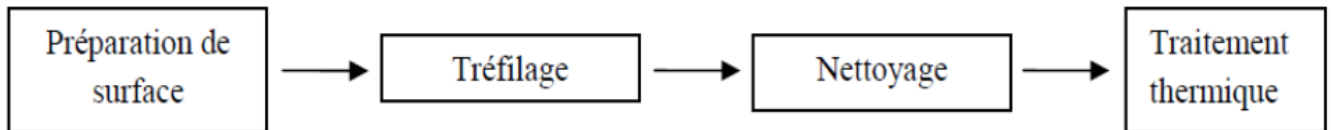
### II.2.La définition de tréfilage

Est une technique de mise en forme des métaux connu sous le nom de tréfilage est de plus en plus important dans le domaine industriel. Il est appliqué sur plusieurs métaux et alliages comme le cuivre, l'aluminium (fils électrique) et les aciers en particulier les aciers doux. Qui consiste à déformer un métal par traction pour le transformer en fils. Pour cela, on fait passer dans une filière de forme et de dimensions déterminées, le métal qui se déforme plastiquement, et en le faisant passer dans des filières de plus en plus étroites, il est possible de lui imposer un allongement total très supérieure à celui obtenu par traction simple sans passage dans une filière. Les filières sont en aciers où en chrome et pour les fils fins en diamant. Les applications des produits mis en œuvre par cette technique (qui peuvent être utilisés en l'état, assemblés ou transformés) sont nombreuses : clôtures, armatures pour béton, électrode de soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatiques [28-30].

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires :

### II.3.Le principe de tréfilage

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique [29] ;



Le principe de tréfilage est basé sur l'utilisation de plasticité du matériau dans le but de réduire la section fil en forçant son passage à travers des orifices successifs calibrés ,de diamètres décroissants, et qu'on appelle « **les filières** » (**Fig.I.6**) ,Ces filières sont généralement, constituées d'un insert en diamant-naturel ou poly cristallin-ou en carbure de tungstène [27]. Dans certains cas, pour limiter l'usure des filières et leur échauffement au passage du fil, des noyaux en diamant peuvent être utilisés et Une monture en acier ou en aluminium vient enserrer le noyau pour lui permettre de résister aux fortes pressions appliquées au cours du tréfilage [31]. De ce fait, le matériau s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file (**Fig.I.7**).

Le fil est astreint à passer à travers les filières par deux procédés différents : on lui impose un déplacement en lui appliquant une poussée sur la face arrière B(Back) ,c'est l'extrusion ;ou on le tire en lui appliquant une force de traction sur la face avant F(Front) , Le fil, les filières , et les cabestans sont complètement immergés (ou arrosés) dans un bain d'émulsion (huile/eau ou huile) qui joue le rôle de lubrifiant et d'échangeur thermique (**Fig.I.8**) [32,33] , c'est le tréfilage (**Fig. I.9**).

On peut définir l'aptitude au tréfilage du fil machine par la réduction de section ( $\varepsilon\%$ ) c'est le taux de déformation par tréfilage est défini par la relation suivant :

$$\varepsilon(\%) = \frac{D_i^2 - D_f^2}{D_i^2} \times 100 \dots \dots \dots \text{Eq.I.1}$$

Ou bien :

$$\varepsilon(\%) = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \dots \dots \dots \text{Eq.I.2}$$

Ou bien :  $\ln\left(\frac{S_o}{S}\right) = \ln\left(\frac{D_o}{D}\right)^2 \dots \dots \dots \text{Eq.I.3}$

Au-delà de laquelle le fil se rompt, ou par sa ténacité (A%) qui diminue jusqu'à ce qu'il devient très difficile de pour suivre la déformation :

$$A(\%) = \frac{S_i - S_f}{S_f} \times 100 \dots \dots \dots \text{Eq.I.4}$$

Où  $D_i$  et  $D_f$  sont respectivement les diamètres initiale et finale du fil, et  $S_i$  et  $S_f$  sont la section de fil avant et après le filage respectivement [19, 31].

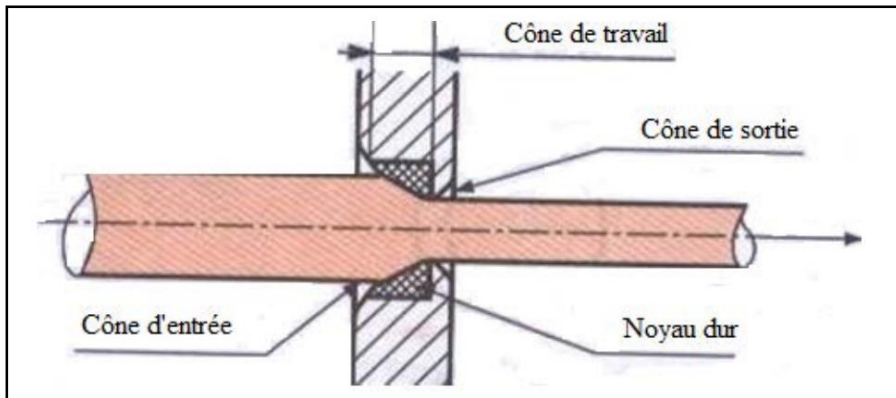


Figure I.6 : Schéma de principe d'une filière [29].

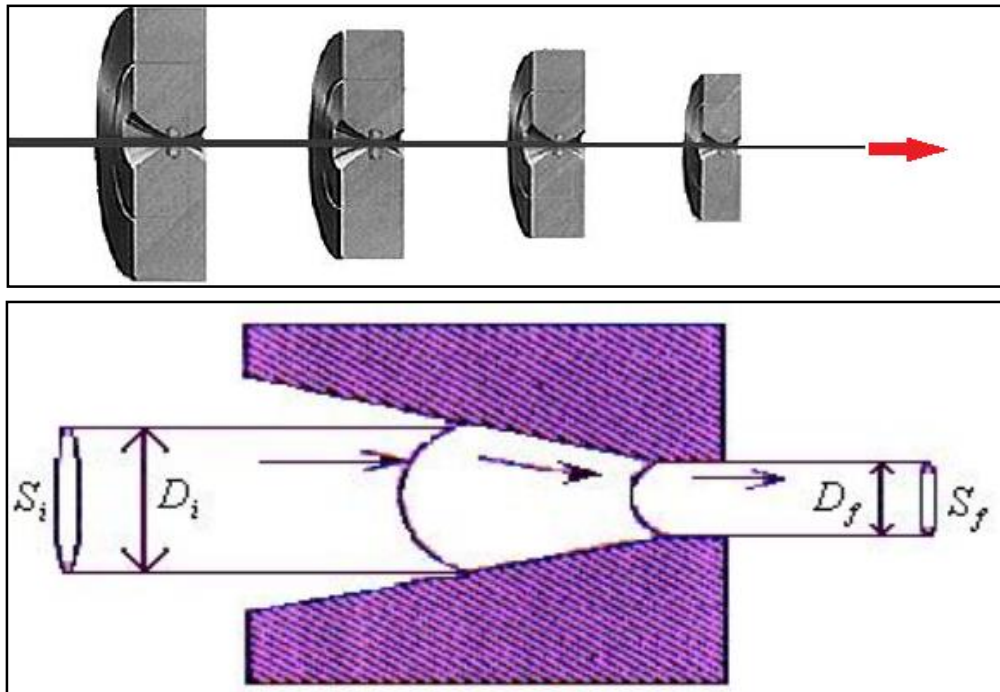


Figure I.7 : Schéma principe de tréfilage [34].



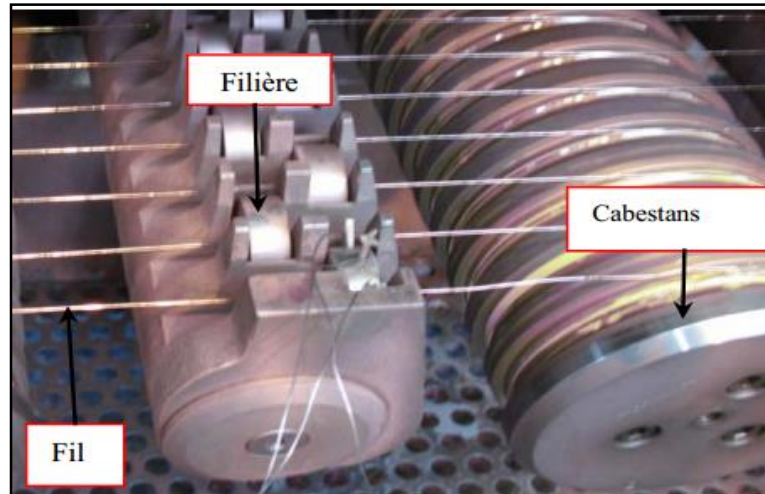


Figure I.8 : Machine de tréfilage multi-passes [32].

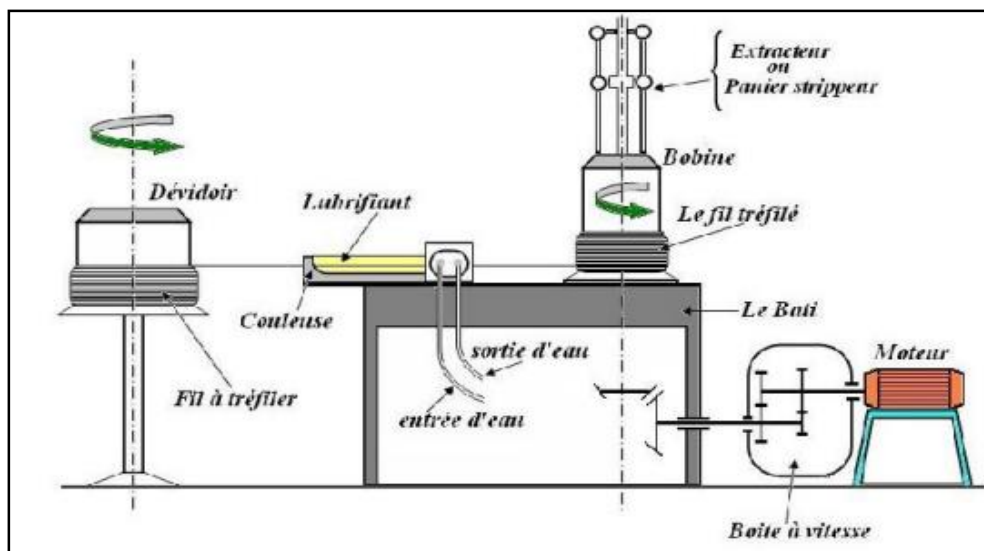
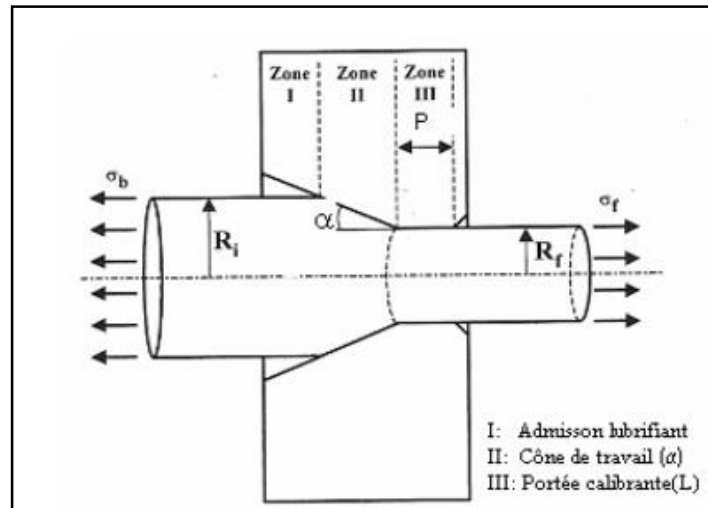


Figure I.9 : Schéma d'un banc à tréfiler [19].

-La qualité du tréfilage dépend de plusieurs paramètres extrinsèques au matériau à tréfiler, nous citons entre autres : le demi angle du cône de travail,  $\alpha$ , le taux de réduction

[19]. 
$$r = 1 - \frac{R_f^2}{R_i^2} \text{ (} R_f^2 \text{ et le rayon de sortie , } R_i^2 \text{ et le rayon de entrie ) , la portée$$

calibrante  $P$ , le coefficient de frottement à l'interface fil - filière  $\mu$ , la contre traction  $\sigma_b$  due au cabestan de tirage précédent et la contrainte de tréfilage  $\sigma_f$ . (Fig. I.10) [33].



**Figure I.10** : Schématisation des zones de tréfilage. Définitions géométriques [33].

#### II.4. Les éléments clés de tréfilage

Les trois éléments-clés du tréfilage sont le fil, la filière et le lubrifiant.

Le fil de départ, ou fil-machine provient du laminage à chaud [13] ; et a subi une préparation de surface : il a ainsi été décapé et revêtu pour accentuer sa rugosité de surface et améliorer sa tréfilabilité [19]. Peuvent en général, être classés en quatre catégories suivant leur diamètre (**Tab.I.6**) [27].

**Tableau I.6** : Classification des fils suivant leurs diamètres [27].

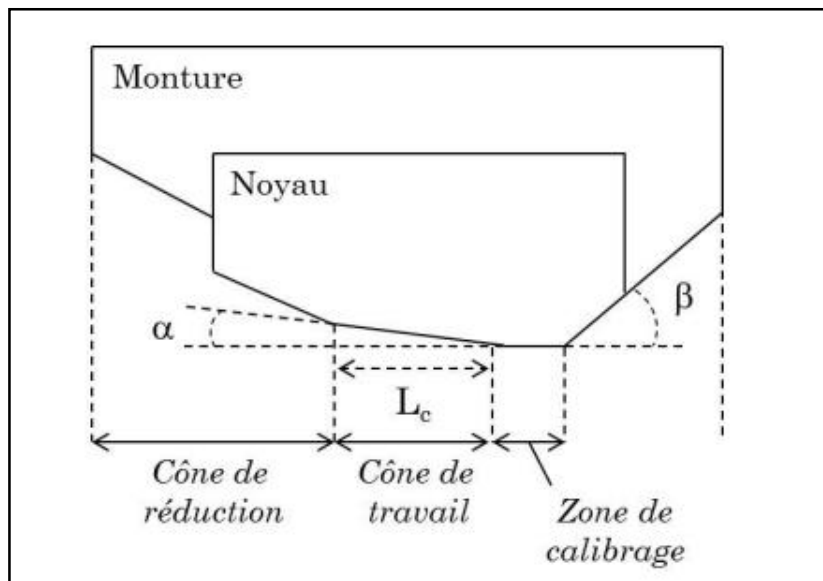
Dénomination	Diamètre en (mm)
Fil machine	Cuivre 8-Aluminium 9.5
Gros fil	1.63 à 5
Fil intermédiaire	0.40 à 1.63
Fil fin	0.10 à 0.40
Fil ultrafin	Inférieur à 0.10

2-La filière assure la réduction, [13] De plus, la filière est un bloc en général

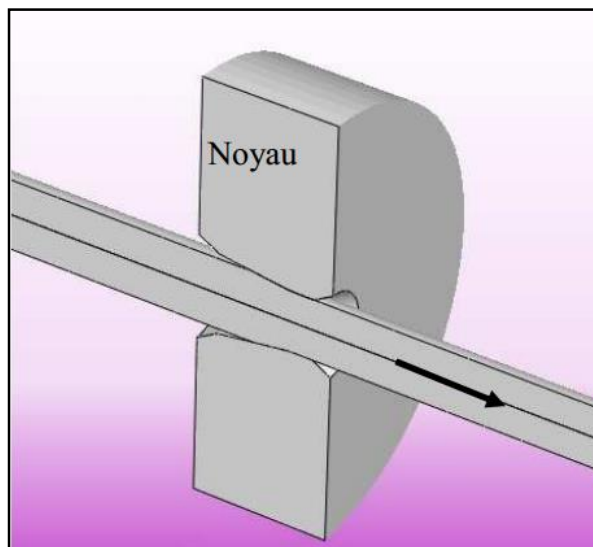
Cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme que

l'on désire du produit à tréfiler, elle est composée de quatre parties (**Fig.I.11**)

- Le cône d'entrée qui contribue à entrainer le lubrifiant dans la filière.
- Le cône de travail partie essentielle, de demi-angle  $\alpha$  dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil.
- La portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil.
- Le cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant [34, 28].



**Figure I.11** : Schéma d'une filière de tréfilage [31].



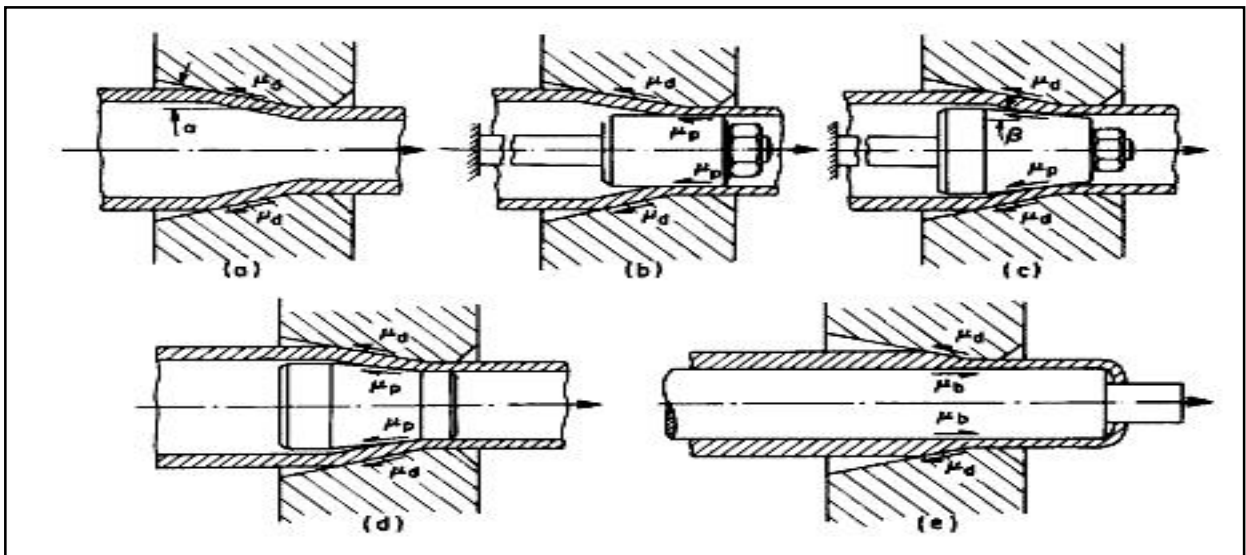
**Figure I.12** : Fil et filière pendant la déformation [27].

-La forme de la partie active de la filière composée du cône de travail (ou cône d'étirage) peut varier suivant :

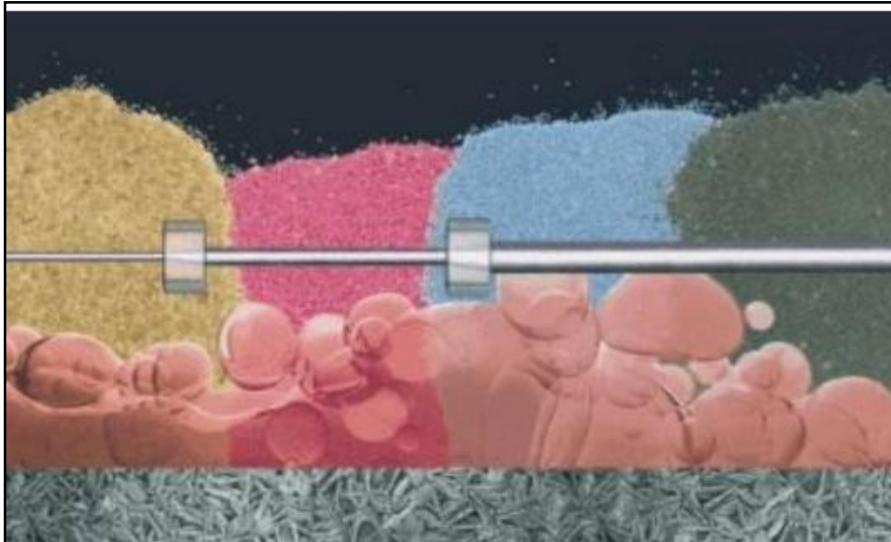
- La nature et l'état de matériau.
- Le taux de réduction de section.
- La recherche de minimum de perte d'énergie par frottement sur les parois.
- La progressivité régulière de la déformation.
- La minimum d'usure recherchée dans la zone de calibrage du fil.
- Le type de lubrifiant [19 ,35].

La durée de vie d'une filière est conditionnée par de nombreux facteurs : la nuance du métal, la préparation de surface du fil (qui va "accrocher" le lubrifiant), l'état de surface du fil machine (rugosité) nature et forme de la filière (angles de raccordement), le refroidissement, le lubrifiant et la vitesse de tréfilage [13].

3- Le lubrifiant joue le rôle de troisième corps : produit liquide ou pulvérulent suivant le procédé choisi, il s'intercale, sous forme d'un film mince, entre les deux antagonistes. [30] ; Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil [13] (**Fig. I.13**).



**Figure I.13** : Différentes formes de filières : a) Filière à tube de forage ; b) Filière avec cheville cylindrique fixe ; c) Filière avec cheville conique fixe ; d) Filière avec cheville flottante ; e) filière en bar (mandrin) [13].



**Figure I.14** : Lubrifiants utilisés en tréfilage [34].

### II.5. Paramètre de tréfilage

Vu que le tréfilage est un procédé de mise en forme par déformation plastique, il est caractérisé par un certain nombre de paramètres, à savoir en premier lieu la nature, la structure, et la qualité du matériau à tréfiler ; ensuite la vitesse et la température de tréfilage ; la géométrie des filières, et la condition de frottements [19].

### II.6. Outils et équipements industriels du tréfilage

L'ensemble du matériel de tréfilage comporte trois éléments :

- un dispositif de dévidage du fil,
- une machine à tréfiler,
- un dispositif de récupération du fil écroui.

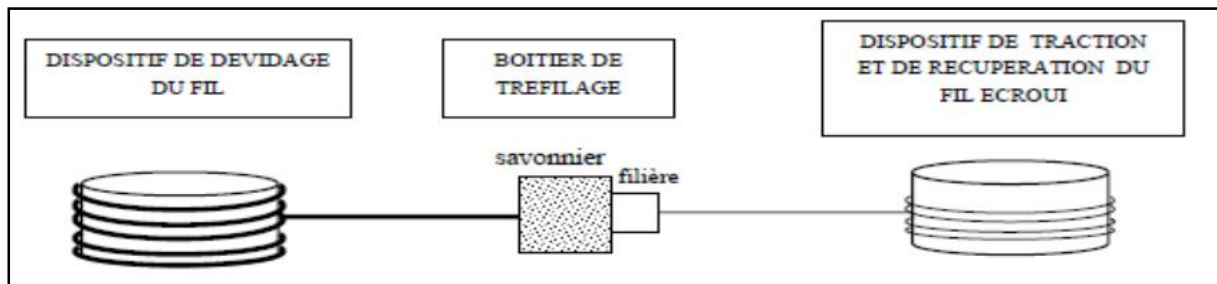
Parmi tous les dispositifs, nous distinguons :

- **les machines de tréfilage à sec**, qui permettent d'obtenir des fils jusqu'à 1 mm et utilisent des savons comme lubrifiants. Ce sont ces dispositifs qui nous intéressent particulièrement dans cette étude.
- **les machines de tréfilage humide**, qui sont particulièrement adaptées pour l'obtention de fils plus fins.

La lubrification est mise en œuvre par immersion ou aspersion d'huile minérale [30, 34].

## II.7. Les machines de tréfilages

**1-La machine simple** C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception (**Fig.I.15**). Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant (appelé également savonnier) et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant [30,28].



**Figure I.15** : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe) [30].

### 2-Les machines multiples :

Elles permettent des réductions de section importantes grâce à un enchaînement de filières. Il existe trois types de machines multiples :

- **les machines continues ou à passage direct** : Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répandus. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. En effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil. Ce type de machine est particulièrement utilisé pour le tréfilage des aciers inoxydables, car ceux-ci ne nécessitent pas un refroidissement entre passes aussi poussé que d'autres types d'aciers.

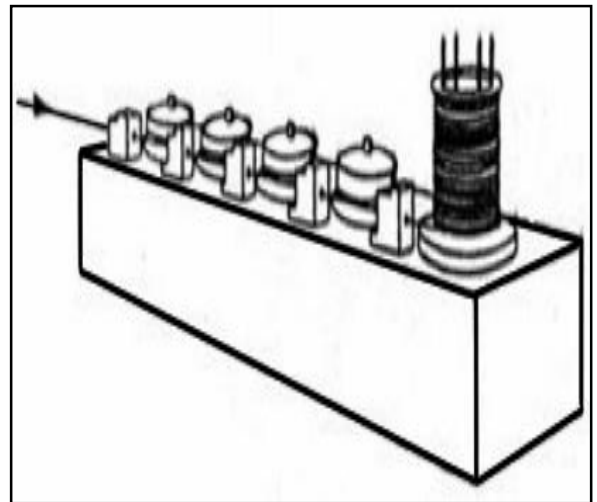
- **Les machines à accumulation** : Il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Les passes sont calculées pour que chaque filière débite plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante d'où une accumulation du fil sur la bobine. Cette dernière favorise le refroidissement du fil, problématique du point de vue métallurgique pour les aciers au carbone, et permet de ne pas interrompre la production de bobines aval en cas de problème sur les bobines amont.



- **Les machines à glissement** : Dans ces machines dédiées au tréfilage humide (**Fig.I.16**), il n'y a ni équilibrage des vitesses, ni accumulation de fil. Le glissement du fil sur les bobines compense les différences de vitesses. Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche", c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 5,5mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes. Le fil peut ensuite être tréfilé en "reprise" à sec sur des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fils très propres [28, 30].



**Figure I.16** : machine de tréfilage à humide



**Figure I.17** : machine tréfileuse Multiple contenue à glissement Horizontal.

## II.8. Les grandeurs mécaniques de tréfilage

Nous rappelons les définitions des grandeurs mécaniques utilisées pour décrire le tréfilage :

- l'allongement du fil  $\lambda$  :

La conservation du volume, entre l'entrée et la sortie de filière, au cours de la déformation plastique permet d'écrire que  $S_e \cdot L_e = S_s \cdot L_s$ . Nous avons alors :

$$\lambda = \frac{L_s}{L_e} = \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2 \dots \dots \dots \text{Eq.I.5.}$$

Avec  $L_e$ ,  $L_s$  : les longueurs initiales et finales de fil.

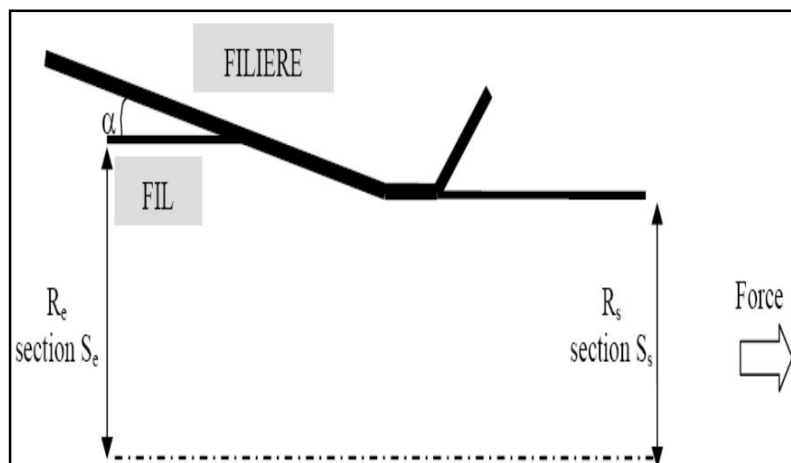
- La réduction du fil :

$$r = 1 - \left(\frac{R_s}{R_e}\right)^2 \dots \dots \dots \text{Eq.I. 6.}$$

- La déformation :

$$\varepsilon = \ln \lambda = 2 \ln\left(\frac{R_e}{R_s}\right) \dots \dots \dots \text{Eq.I. 7.}$$

$R_e$  : Rayon d'entrée ;  $R_s$  : Rayon de sortie [28].



**Figure I.18** : Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées [13].

## II.9. La préparation de surface

Le matériau de départ utilisé pour le tréfilage est appelé fil-machine, il provient du laminage à chaud de billettes produites par coulée continue et se présente sous forme de couronnes, refroidies à l'air. La surface du fil est souvent recouverte d'une couche d'oxydes métalliques, dont l'épaisseur est fonction de la température de sortie du fil. A cause de son caractère abrasif, de sa dureté et de son absence de ductilité, cette couche doit être éliminée avant le tréfilage. Différents procédés de nettoyage de surface peuvent être employés :



**-Décapage chimique :**

Décapage chimique qui va permettre, d'une part la dissolution de cet oxyde, mais également son élimination par voie mécanique suite au dégagement d'hydrogène à la surface du fil.

**- Décapage mécanique :**

Décapage mécanique en sollicitant le fil par cambrage en faisant appel à la fragilité de cet oxyde. Souvent, cette technique n'est pas suffisante pour éliminer les résidus de calamine ou la calamine secondaire, et elle est gênée par un raclement suivie par un brossage, un grenailage, ou un polissage avec des bandes abrasives.

**II.10.Le revêtement de surface**

L'utilisation d'un lubrifiant est capitale au cours du procédé pour limiter le frottement et l'usure et assurer un régime de lubrification stable. Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil.

D'une manière générale, deux grandes classes de traitements de surfaces se distinguent est :

-Les réactifs, qui, par réaction à l'interface métal/dépôt, produisent une modification de la couche superficielle du fil. Il s'agit de traitements tels que la phosphatation ou l'oxalation. Ces traitements de conversion possèdent l'avantage d'être particulièrement adhérents, mais leur inconvénient est qu'ils sont polluants. Ils sont généralement mis en œuvre avant le tréfilage des aciers au carbone.

-Les non réactifs qui sont souvent des dépôts salins .Ces revêtements sont formés par condensation ce qui explique qu'ils soient moins adhérents que les traitements de conversion. Ils s'éliminent toutefois mieux après tréfilage. Ils sont utilisés pour le tréfilage des aciers inoxydables [30, 13].

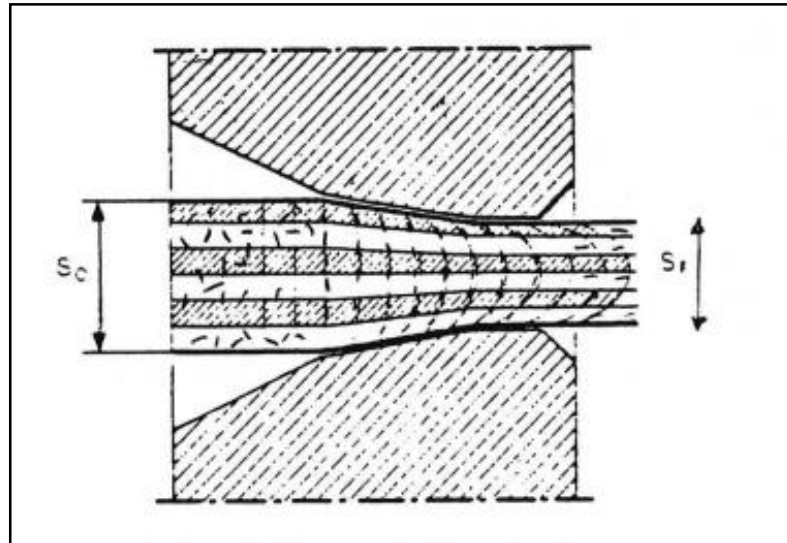
**II.11.Opération de tréfilage**

Le fil ainsi préparé est apte au tréfilage à froide .il passe dans des filières que sont des troncs des cônes et des réduise sa section .Il se produit un glissement des couches concentriques les unes par rapport aux autres et un allongement du fil.

La force de traction est créée par enroulement du fil sur un tambour.

Pendant son passage la filière le fil est lubrifié par un savon sodique.

(Fig. I.19) [35].



**Figure I.19 :** Ecoulement de métal dans une filière. [35]

### **II.12.La finition : Nettoyage et traitements thermiques**

Après le tréfilage, le fil comporte un film superficiel de lubrifiant et de revêtement dont il faut se débarrasser avant de procéder à un traitement thermique (pour éviter la diffusion d'éléments polluants). Deux sortes de nettoyage peuvent être envisagés, par action mécanique ou chimique (lessives alcalines, solutions acides), au trempé ou au défilé (suivant les sections des fils tréfilés) [34]. En dernière étape, les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au retréfilage ou aux déformations ultérieures, pour supprimer l'effet de l'érouissage et adoucir le fil (recuit) ou encore pour communiquer au fil des caractéristiques particulières (trempe). Les fours de recuit peuvent être de types statiques (couronnes, bobines) ou au défilé (fours pouvant atteindre 20m de longueur) [13, 34].

**Partie III : Traitement thermique de tréfilage.****III.1.Introduction**

Les modifications microstructurales induits par la déformation à froid qu'est le tréfilage, modifient les propriétés physiques et mécaniques des métaux. Mais, on peut généralement restaurer les propriétés et la microstructure que possédait le métal avant la déformation, au moyen d'un recuit : l'agitation thermique des atomes due à l'énergie absorbée au cours de ce recuit d'activer les phénomènes de retour à l'état initial « restauration », et augmenter la vitesse de ceux-ci, cela permet en effet un retour vers l'état équilibre. Ce retour, plus ou moins complet, s'effectue essentiellement selon trois processus : **La restauration**, **la recristallisation**, et **le grossissement (coalescence) des grains** ou encore **recristallisation secondaire** [19].

**III.2.Définition de traitement thermique**

Les traitements thermiques permettent de contrôler la microstructure des alliages et par le fait même ses propriétés. L'objectif de ces séries d'opérations de chauffage et de refroidissement est l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux. Lorsque ces traitements sont appliqués aux alliages d'aluminium, leur utilisation est fréquemment restreinte à des opérations spécifiques visant à augmenter la résistance ainsi que la dureté par le durcissement par précipitation ou durcissement structural.

Le type de traitement thermique qui augmente la résistance des alliages d'aluminium se fait généralement en trois étapes :

- ❖ Mise en solution : dissolution des phases solubles. (solution annealing) généralement entre 750 et 1 000 ° C selon l'alliage ; La mise en solution a également comme objectif dans les alliages Al-Si de modifier la structure de la phase de silicium [17,36].
- ❖ Trempe : super saturation des phases par un refroidissement rapide.

Le rôle d'une trempe est généralement, à l'inverse des recuits, de permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique [36].

- ❖ Vieillessement : après le traitement de mise en solution et la trempe, le durcissement par précipitation est achevé par un vieillissement naturel (température ambiante) ou

par un vieillissement artificiel (température donnée). Le vieillissement a pour principal but d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage après trempe [17].

### III.3.Principaux types de traitements thermiques

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

#### 1- Traitements thermiques d'homogénéisation :

Les traitements dits d'homogénéisation consistent à maintenir à une température assez élevée (le plus souvent entre 450 et 610°C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h) les Plaques ou billettes coulées, afin de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus. Ces traitements ont pris depuis ces dernières années une ampleur considérable, si bien qu'à l'heure actuelle ils sont extrêmement répandus et tendent à se généraliser non seulement dans le cas des alliages d'aluminium mais également dans le cas de l'aluminium non allié.

Les effets de l'homogénéisation peuvent être plus ou moins complexes suivant l'alliage auquel ils s'appliquent et également suivant les conditions de coulée de cet alliage. D'une façon générale, plusieurs types d'évolution aisément observables dans les alliages d'aluminium peuvent être retenus à savoir :

- La dissolution de phases intermétalliques en excès ;
- Le nivellement des concentrations dans la solution solide ;
- La coalescence de phases intermétalliques déjà présentes ;
- La précipitation de nouvelles phases intermétalliques [36].

#### 2- Les traitements d'adoucissement par recuit :

Ils ont pour but principal d'adoucir et de régénérer la plasticité d'un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux pour l'aluminium. Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ;

- Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

**2.1. Le traitement de restauration** est effectué entre 200 à 300 C° pendant 1 à 8 heures, permettant le réarrangement des dislocations et une diminution de la densité des dislocations dans le métal en conservant la structure de grains d'origine. Elles se regroupent en parois ou sous-joints de grains par le mécanisme de (montée). La restauration favorise l'état d'équilibre et est facilitée par une augmentation de la température puisqu'elle est basée sur la diffusion à l'état solide. [36,9]

**2.2. Le traitement de recristallisation** est effectué entre 300 à 400 C° pendant 0,5 à 3 heures et refroidissement lent (10 C°/heure) permettant d'éliminer la microstructure écrouie obtenue suite au travail à froid (laminage, étirage etc.) [20]. La recristallisation est caractérisée par le développement de nouveaux grains au dépend d'une matrice se trouvant dans un état structural moins parfait .les conditions de chauffage et de maintien en température sont déterminées en fonction de la composition de l'alliage et du taux d'écrouissage qui passe de  $10^{10}$  à  $10^{13}$  cm/cm<sup>3</sup> à l'état écroui  $10^7$  cm/cm<sup>3</sup> [37 ,9].

L'énergie motrice de cette transformation structurale est l'énergie de l'écrouissage [5]. Les impuretés et l'élément d'addition ont pour effet d'augmenter la température de recristallisation tout en diminuant la mobilité des nouveaux joints de grains [37]. Ces nouveaux grains croissent à partir de ce qu'il est convenu d'appeler des germes. Un certain nombre de grains se développent en « mangeant » la matrice écrouie au sein de laquelle ils baignent. Cette croissance se poursuit jusqu'à ce que ces nouveaux grains arrivent au contacte les uns des autres. La recristallisation proprement dite est alors achevée.

L'apparition et le développement de nouveaux grains qui occupent bientôt tout le volume de l'échantillon ; les défauts ont alors presque totalement disparu, l'orientation cristallographique a changé en chaque point alors que la restauration avait pratiquement conservé l'orientation locale d'écrouissage [29].

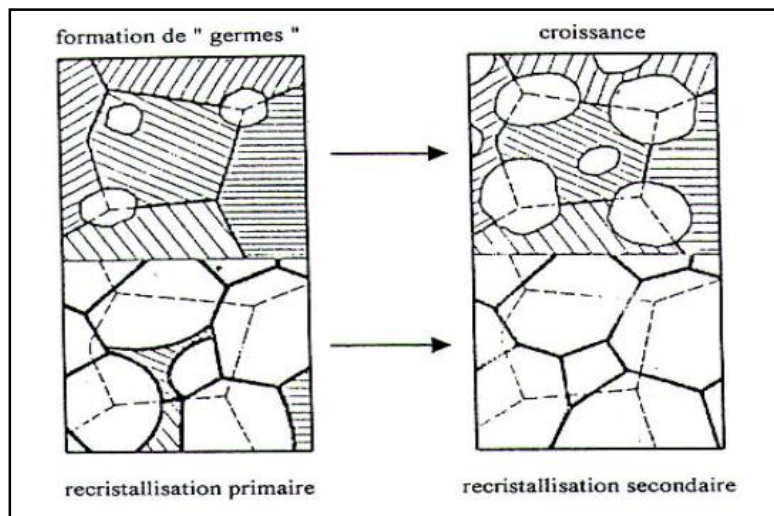
Pour un même taux de déformation, la température de recristallisation est d'autant plus basse que le temps de recuit est long.

Cette transformation est accompagnée d'une diminution importante de  $R_m$  ,  $R_e$  , HV et d'une augmentation de A% et K. La recristallisation est précédée par la formation de nouveaux grains par germination et croissance dans un métal écroui.

En conséquence, plus le taux d'écroutissage est important, plus la dimension des cristaux formés à la suite du recuit est faible.

La recristallisation s'effectue en 3 étapes :

- Germination
- Croissance.
- Coalescence [37].



**Figure I.20 :** Mécanisme de recristallisation [H. Tsukahara, 1995] [29].

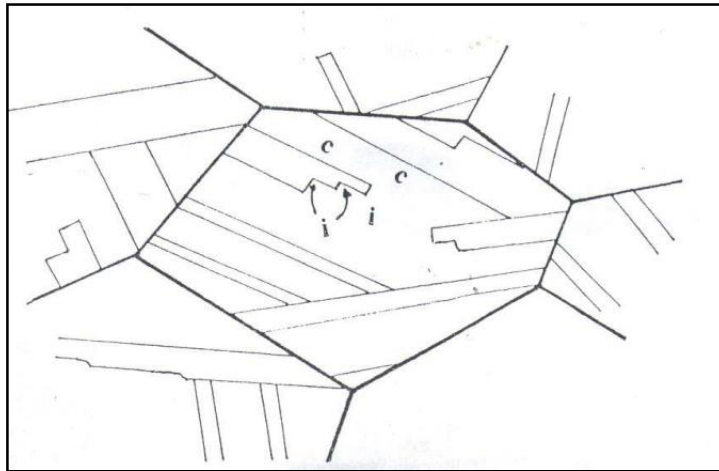
### 2.2.1. Recristallisation primaire (germination et croissance normale)

La recristallisation primaire résulte de la formation et de la croissance des germes en de nouveaux cristaux aux dépens d'une matrice qui dans un état structural moins parfait. Les germes apparaissent avec une orientation différente de celle de la matrice .ou ils sont nés ; Les sites préférentiels de nucléation des nouveaux grains se situent donc dans des zones de forte déformation. Ils croissent progressivement aux dépens des anciens grains déformés jusqu'à ce qu'ils arrivent en contact les uns avec les autres et à ce stade, la recristallisation primaire proprement dite est achevée et on entre dans le stade appelé croissance des grains [37,9].

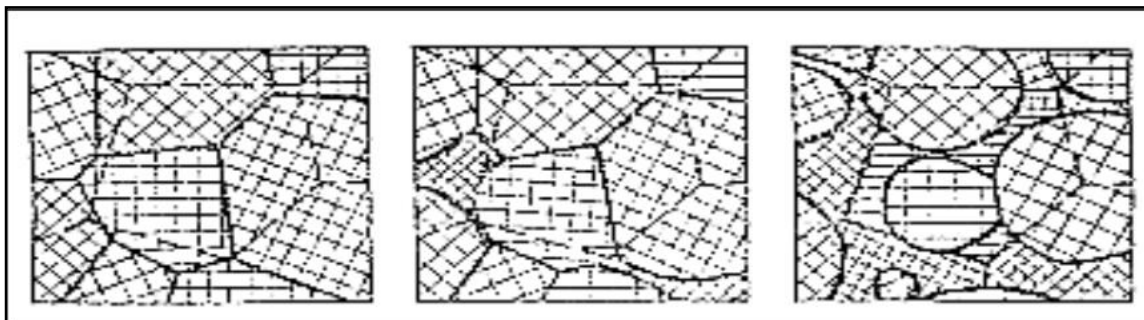
La force motrice de recristallisation primaire n'existe plus, cependant le métal recristallisé possède donc un excès d'énergie sous forme de joints de grains, la force motrice est alors l'énergie interfaciale des joints.

La croissance des grains se fait dans la direction ou la désorientation est plus faible. Pour qu'un germe consume la structure qui l'entoure, il doit avoir une dimension suffisante et une certaine différence d'orientation par rapport au voisinage.

Dans les métaux CFC de faible énergie de défauts d'empilement (cuivre et ses alliages, aciers inoxydables austénitiques), il apparaît de nombreuses macles, dites macles de recuit. Sur une coupe métallique, elles apparaissent sous la forme de lamelles, qui peuvent traverser tout le grain (Figure III.2) et elles sont limitées par des joints cohérents qui coïncident avec le plan de macles. Leur origine s'explique par la faible mobilité des joints de macles [37].



**Figure I.21** : Macles de recuit (c) interfaces cohérentes et (i) incohérence [37].



**Figure I.22** : Evolution de grain lors de la recristallisation secondaire [37].

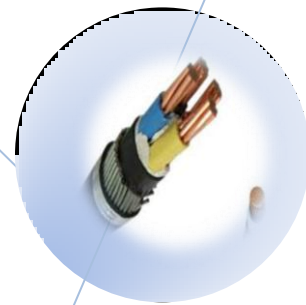
-Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation [29].

### III.3.3. Traitements thermiques à durcissement structural

Les alliages à durcissement structural, encore appelés alliages à traitement thermique ou alliages trempant, ont la capacité de durcir naturellement après une trempe. Cette propriété leur est conférée par les éléments d'alliages solubles à l'état solide dans la matrice d'aluminium, et dont la solubilité décroît avec la température. Par la maîtrise de la précipitation des éléments d'alliage, les propriétés mécaniques résultantes peuvent être optimisées [38].

Pour les alliages Al-Mg-Si, la trempe consiste en un refroidissement rapide qui s'effectue après la mise en solution du magnésium et du silicium et qui permet ainsi d'obtenir un phénomène de durcissement structural. Afin que cette précipitation soit la plus fine possible, il faut adapter la méthode de refroidissement à la composition de l'alliage et à la géométrie de la pièce à tremper et veiller à ce que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe. Cependant, l'obtention d'une fine précipitation dépend d'autres paramètres [18].





## **CHAPITER II :** **ÉTUDES EXPÉRIMENTALES**





## Partie I : Choix des matériaux et techniques expérimentales.

## I.1.Introduction

Cette partie est consacrée pour présenter les alliages étudiés et leurs compositions chimiques, les traitements thermiques appliqués, les résultats de différentes microstructures, microdureté des fils tréfilés et recuit des alliages de cuivre et d'aluminium.

## I.2.Choix de matériau

## I.2.1.Fil d'alliage d'aluminium

Pour réaliser cette étude nous avons opté pour l'alliage d'aluminium type (AGS) (Al-Mg-Si). (Fig.II.1) utilisé par l'entreprise de fabrication des câbles électriques (ENICAB) de Biskra. La composition chimique de cet alliage (fil machine) est donnée dans le Tableau II.1 :

Tableau II.1 : Composition chimique d'aluminium AGS.

Eléments	Al	Mg	Si	Cu	Fe
at %	98.45	0.653	0.595	0.014	0.215



Figure II.1 : Les échantillons d'aluminium type AGS.

Pour réaliser cette étude plusieurs taux de déformation sont mesurés (Tab.II.2). Le taux de déformations est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\left[ \frac{S-s}{S} \right] \times 100 \dots \dots \dots (\text{Eq.II.1})$$

S : section avant déformation ; s : section après déformation.

**Tableau II.2 :** Différents taux de déformation mesurés des alliages aluminium.

Diamètre (mm)	Taux de déformation (%)
Fil machine =7.00	0
$\varnothing_1=5.24$	$\varepsilon_1=67.56$
$\varnothing_2=3.40$	$\varepsilon_2=86.58$
$\varnothing_3=3.30$	$\varepsilon_3=87.13$

**I.2.2.Fil de cuivre**

Dans notre étude, on a opté pour le fil machine en cuivre **ETP de pureté (99.28 %)** utilisé à ENICAB, et de diamètre initial égal à 8.00 mm (**Fig.II.2**).

**Figure II.2 :** Les échantillons de cuivre type ETP.

On a choisi trois fils de divers diamètres qui représentent deux déformations différentes dans le tableau II.3, calculés à partir l'équation (**Eq.I.1**).

**Tableau II.3 :** Différents taux de déformation des fils de cuivre.

Diamètre du fil (mm)	Taux de déformation (%)
Fil machine = 8.00	0.00
$\varnothing_1=5.00$	$\varepsilon_1=54$
$\varnothing_2=2.00$	$\varepsilon_2=84$

### I.3. Traitements thermiques

Les traitements thermiques ont été réalisés dans un four de marque Nabertherm (**Fig.II.3**). La température de recuit appliquée pour tous les échantillons d'aluminium et de cuivre est de 250°C, pour un temps de maintien varié de 10 minutes, 30 minutes et 60 minutes pour les fils de cuivre et de 10 min et 60 minutes pour les alliages d'aluminium puis ils sont refroidis à l'air libre.



**Figure II.3** : Four de traitement thermique Nabertherm.

### I.4. Préparation des échantillons pour l'analyse micrographique

L'analyse micrographique a pour but de mettre en évidence la structure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies et attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite différentes étapes [19] :

- Prélèvement des échantillons de l'entreprise ENICAB Biskra
- Découpage des fils de différentes sections, en petits cylindres d' hauteur 2.5 cm.
- Enrobage des échantillons à froid dans des résines époxydes, durcissant à froid (durcissement à l'air dans des moules en plastiques) pour faciliter le polissage manuel de petits échantillons.
- Polissage mécanique des échantillons enrobés sur une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260 (**Fig.II.4**) avec des papiers abrasifs de différentes granulométries et attaqués chimiquement (Le but attaque chimique pour rendre les grains, les joints de grains, et autres composants de la microstructure visibles par un microscope optique).



**Figure II.4 :** Polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260.

**-Pour l'aluminium :**

Les papiers du 240 au 4200, en suite sur tissus feutré avec addition du

Lubrifiant et de la patte diamantée de 6 microns. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et enfin séchés. Les échantillons puis attaqués chimiquement par le réactif chimique suivant (Keller) :

-Acide fluorhydrique : 5 ml.

-Acide nitrique : 20 ml.

-Acide chlorhydrique 20 ml

-Eau distillée : 40 ml.

La durée d'attaque est 3 minutes.

**-Pour le cuivre :**

-Les polissages ont été effectués avec des papiers abrasifs de différentes granulométries, de plus en plus fins (120, 320, 600, 1000, 1200, 2400, 4000). Puis un polissage de finition sur tissu feutré avec l'addition du lubrifiant et de la pâte diamantée de granulométrie 1  $\mu\text{m}$  . Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés à l'air froid comprimé. Les échantillons sont attaqués chimiquement à l'aide d'un réactif l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) concentré (50 %), avec un temps d'attaque de 1 à 2 secondes.

### I.5. Technique d'analyses

Les techniques de caractérisation utilisées pour suivre l'évolution des changements survenus à l'échantillon, sont :

#### I.5.1. Analyse micrographique (MO)

Le microscope optique est utilisé dans le but d'examiner la structure de nos échantillons .L'examen est effectué dans le laboratoire de Batna par un microscope optique de type Hund à différents grossissements, allant de 50 à 1000, et équipé d'un appareil photo numérique (Fig.II.5) Cette technique nous à permet de mettre en évidence l'évolution et les changements survenus à la microstructure lors de tréfilage et après le traitement de revenu.



Figure II.5 : Microscope optique de type Hund.

#### I.5.2. Analyse de la micro dureté

La deuxième méthode utilisée pour suivre l'évolution de la microdureté vickers (Hv) de fil durant les traitements thermiques. (Fig.II.6)

##### I.5.2.1.Principe de Mesure

La microdureté de Vickers est définie par :

$$H_v = \frac{F}{S} \dots \dots \dots \text{(Eq.II.2)}$$

Où **F** est la charge appliquée en kgf, et **S** la surface de l’empreinte en mm<sup>2</sup>. La valeur **S** s’obtient à partir de la mesure de la diagonale **d** en mm [29]. (Fig.II.7)

Soit : 
$$S = \frac{d^2}{2 \cos 22} \dots\dots\dots(\text{Eq.II.3})$$

$$H_{V= \frac{1.8544F}{d^2}} \dots\dots\dots(\text{Eq.II.4})$$

Lors de notre étude la charge appliquée de 100 g, Une moyenne de mesure et calculé à partir d’un seul essai sur la coupe longitudinale de chaque échantillon pour les deux états tréfilé et recuit de cuivre et d’aluminium dans Le laboratoire du chimie Biskra.



Figure II.6 : Microduremètre Vickers de type 402MVD Z

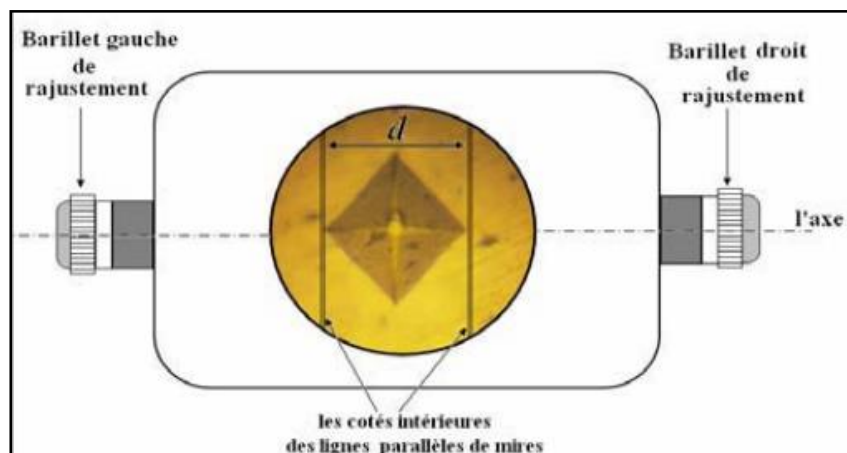


Figure II.7 : Rajustement des lignes de mire à l’aide des barillets [29].



### I.5.3. Analyse par diffraction des rayons X

La technique d'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutit à l'obtention d'un Diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction (**Fig.II.8**).

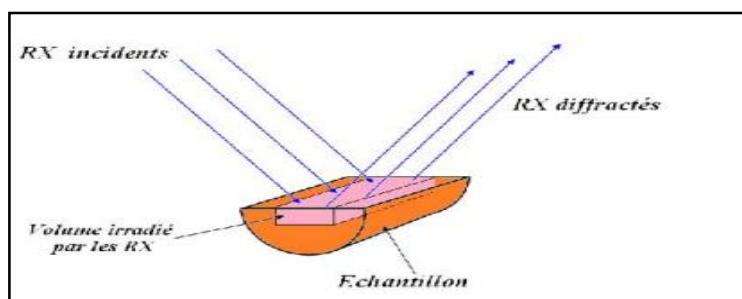
La loi de Bragg définit la relation entre la longueur d'onde du faisceau incident ( $\lambda$ ), le paramètre réticulaire repéré par les indices de Miller ( $d_{hkl}$ ) et l'angle de diffraction ( $\theta$ ), l'entier naturel  $n$  représentant l'ordre de diffraction (**Fig.II.9**).

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin(\theta) \dots \dots \dots \text{(Eq.II.5)}$$

L'évaluation des spectres de DRX est effectuée par le logiciel X'pertHighscore.



**Figure II.8 :** Diffractomètre des rayons X (l'université de Biskra).



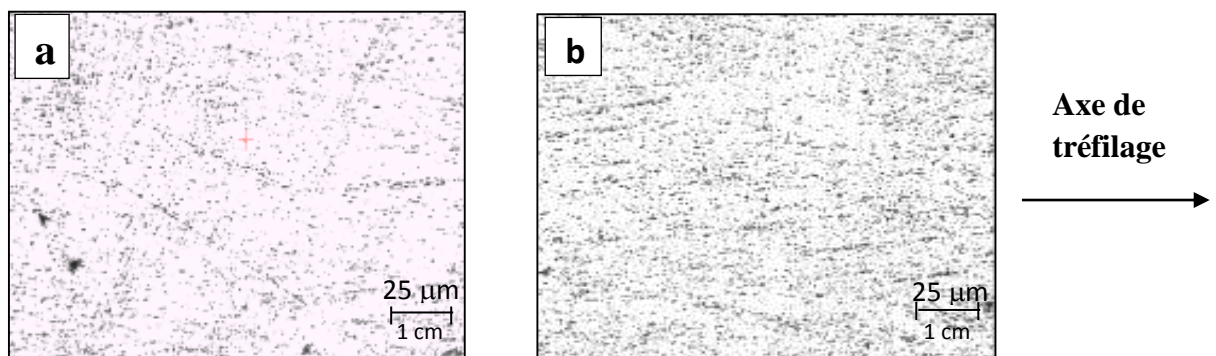
**Figure II.9 :** Le volume irradié [33].

**Partie II : Interprétation des résultats.****II.1.Introduction**

Le but de ce travail est d'étudier l'évolution de la microstructure et microdureté d'un alliage d'aluminium de type AGS, et fil de cuivre de type ETP en fonction de la déformation et du temps de recuit. Pour cette raison les fils obtenus par tréfilage à froid subissent un traitement de recuit à la température de 250°C pendant différents temps de maintien (10,30 et 60 minutes) pour les alliages de cuivre et de 10 et 60 minutes pour les alliages d'aluminium. Les méthodes de caractérisation utilisées dans le cadre de ce travail afin d'étudier l'évolution de la microstructure et pour mesurer la microdureté sont : La microscope optique, DRX et la microduremètre.

**II.2.Etude du fil d'aluminium****II.2.1.Etat initial****II.2.1.1 .Caractérisation microstructurale**

La microstructure de l'état initial (fil machine) et fil tréfilé à 86.58% est présentée dans la Figure II.10. La comparaison entre la microstructure d'aluminium de fil machine et fil tréfilé montre il n'a pas un grand changement dans la structure.



**Figure II.10** : Microstructure des fils d'aluminium par MO de : a) fil machine et b) fil tréfilé à 86.58%.

## II.2.1.2. Evolution de la microdureté

Les résultats de la microdureté des fils tréfilé sont illustrés dans la Figure II.11. On remarque une forte augmentation de la microdureté avec l'augmentation du taux de déformation ci durcissement de l'érouissage de matériau lors de la déformation interprété par l'augmentation de nombre de dislocation (L'augmentation d'énergie stockée) dans les grains déformés.

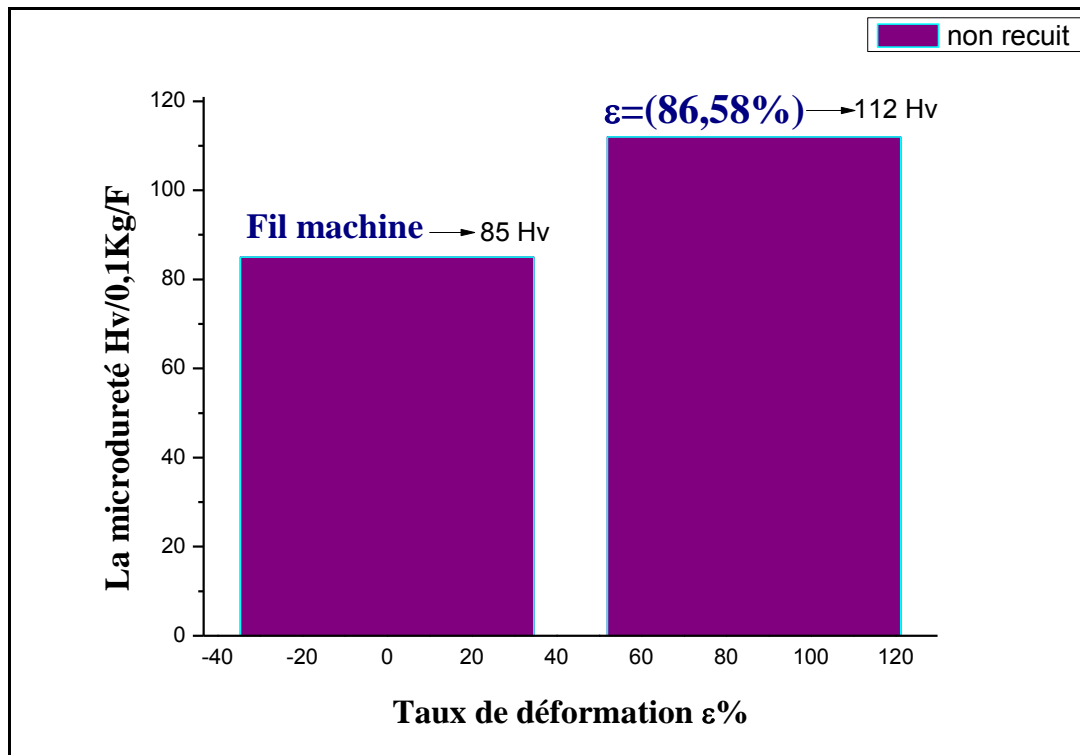


Figure II.11 : Evolution de La microdureté des fils d'aluminium déformé en fonction de taux de déformation.

II.2.2.Etat de recuit

II.2.2.1.Caractérisation microstructurale

La Figure II.12 présent les microstructures des fils AGS : fil machine et fil déformé à  $\epsilon=86.58\%$  et recuit à 250 °C en différents de temps de maintien : 10 min et 60 min. On a constaté relativement grossissement de grain observé pour le fil machine, par contre pour le fil déformé on a constaté affinement des grains. Les mauvaises résolutions dus à la difficulté de révélation des microstructures (l'attaque chimique n'est pas reussite).

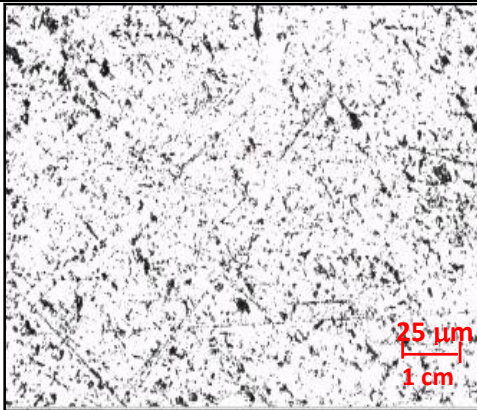
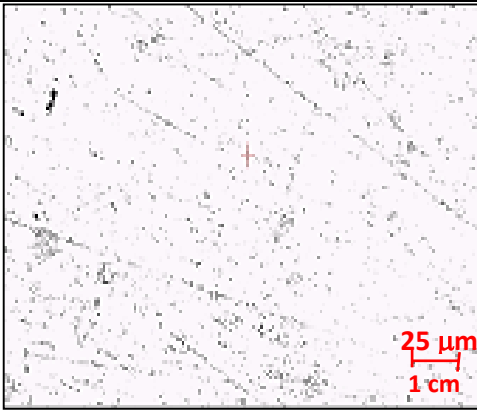
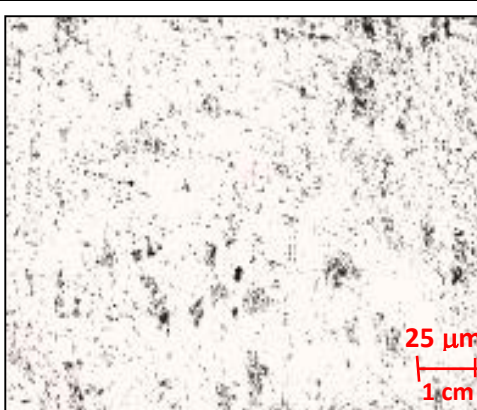
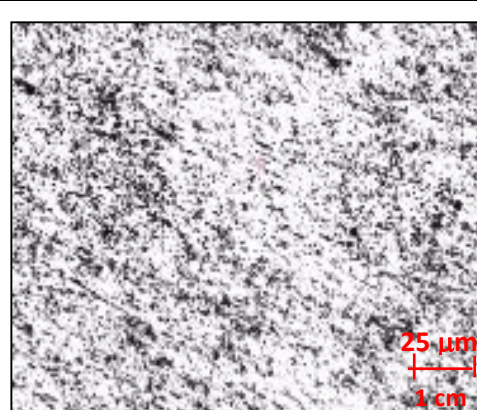
Etat de fil	Fil machine	$\epsilon= 86.58\%$
Recuit à 10 min	 <p>25 <math>\mu\text{m}</math> 1 cm</p>	 <p>25 <math>\mu\text{m}</math> 1 cm</p>
Recuit à 60 min	 <p>25 <math>\mu\text{m}</math> 1 cm</p>	 <p>25 <math>\mu\text{m}</math> 1 cm</p>

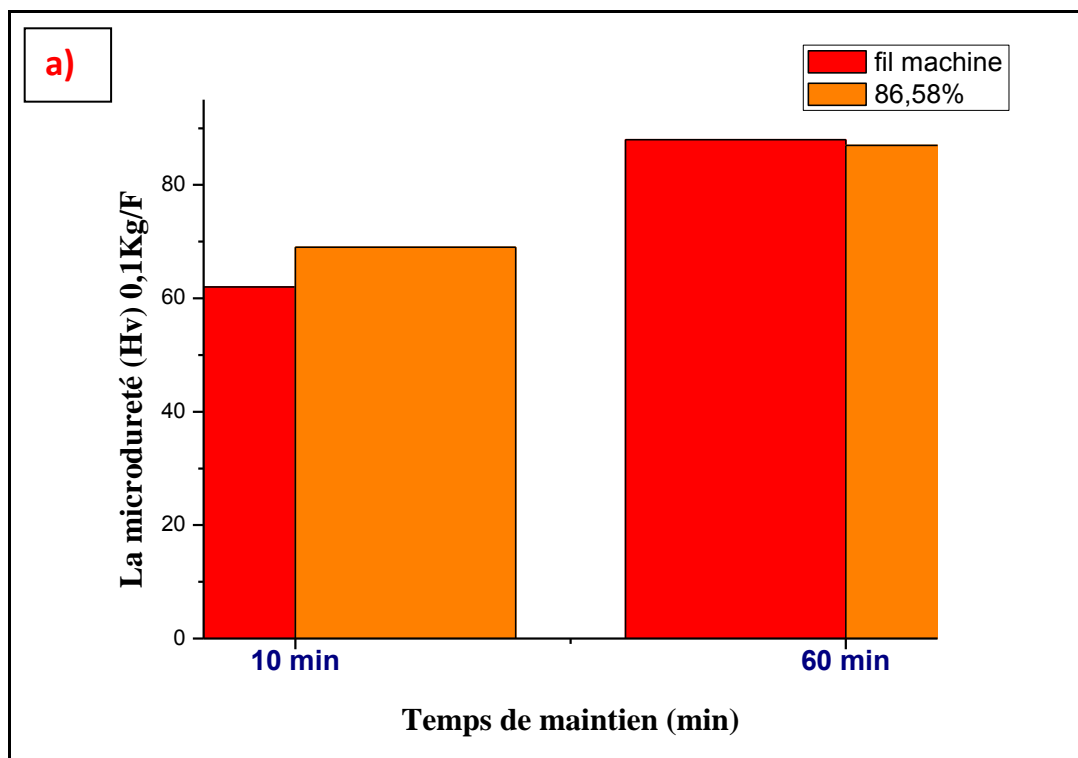
Figure II.12 : Microstructures par MO de fil AGS : fil machine et fil fortement déformé à 86.58%, recuit à 250°C.

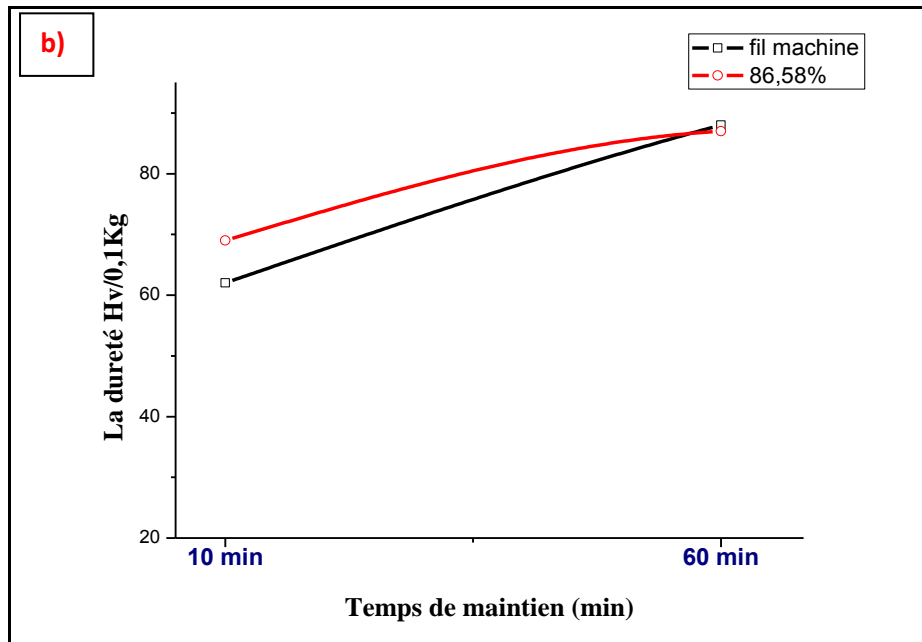
II.2.2.2. Evolution de la microdureté dans l'état recuit

Les résultats de la microdureté de fil machine et des fils fortement déformé à (86.58%) tréfilé et recuit à 250°C sont illustrés dans le tableau II.4. On note en générale que la microdureté croit avec le taux de déformation. On a constaté qu' à 10 minute de recuit à 250°C il n'y a pas de changement notable de microdureté par a port à l'état déformé (Fig.II.13.a et b).

**Tableau II.4 :** Résultats des mesures de la microdureté des fils d'aluminium déformé et recuit à 250°C en fonction de taux de déformation.

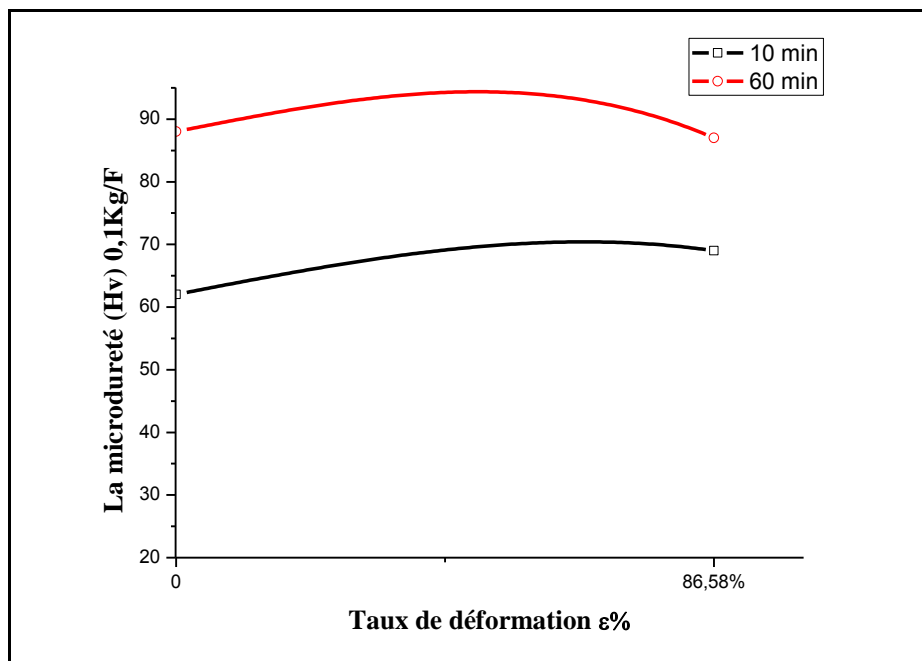
La microdureté (Hv)	Fil machine	$\epsilon_3= 86.58\%$
Etat déformé	85	112
Recuit à 10 min	62	69
Recuit à 60 min	88	87





**Figure II.13 :** Les mesures de la microdureté des fils d'aluminium tréfilé et recuit à 250°C en fonction de temps de maintien. a) histogramme, b) courbe.

-La courbe dans la Figure II.14 présente les mesures de la microdureté des fils d'aluminium tréfilé et recuit à 250°C en fonction de taux de déformation, il montre que la dureté augmenté après 60 minutes de recuit, cette augmentation du au changement structurale (taille de grain, précipitation lors de recuit).



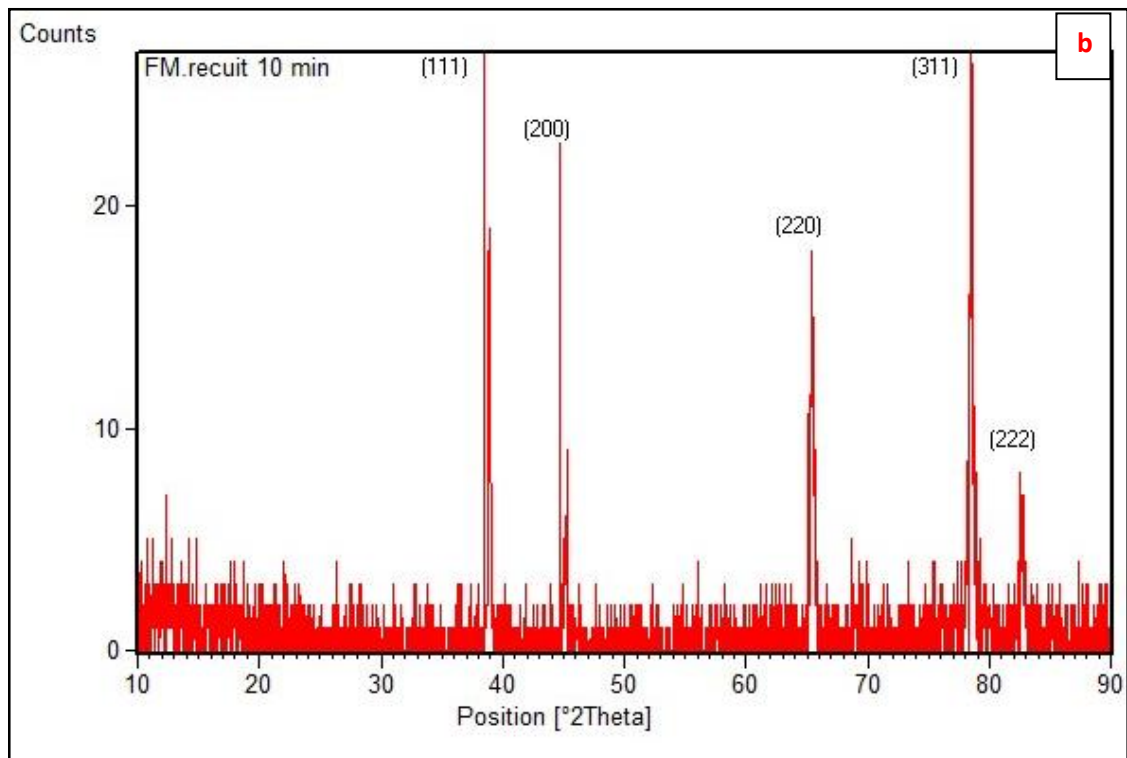
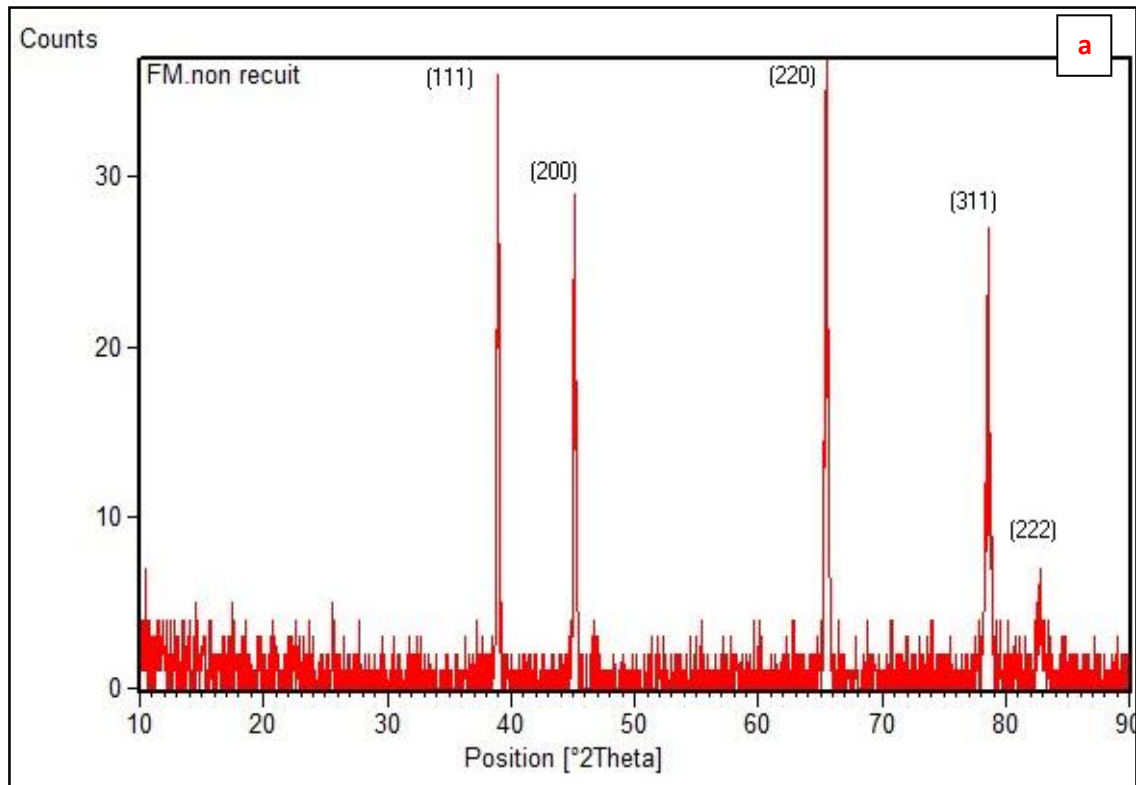
**Figure II.14 :** Les mesures de la microdureté des fils d'aluminium AGS tréfilés et recuit à 250°C en fonction du taux de déformation.

### II.2.2.3. Etude par diffraction des rayons X

La Figure II.15 représente les Diffractogramme de rayons X des fils d'aluminium : fil machine tréfilé (**Fig.II.15.a**) et fil machine tréfilé et recuit à 250°C en 10 min (**Fig.II.15.b**) obtenu par les analyses de programme HighScore .On observe dans cette Diffractogramme apparition de cinq pics en déférent l'ongle  $2\theta$  et l'intensité (I%) comme suivant :

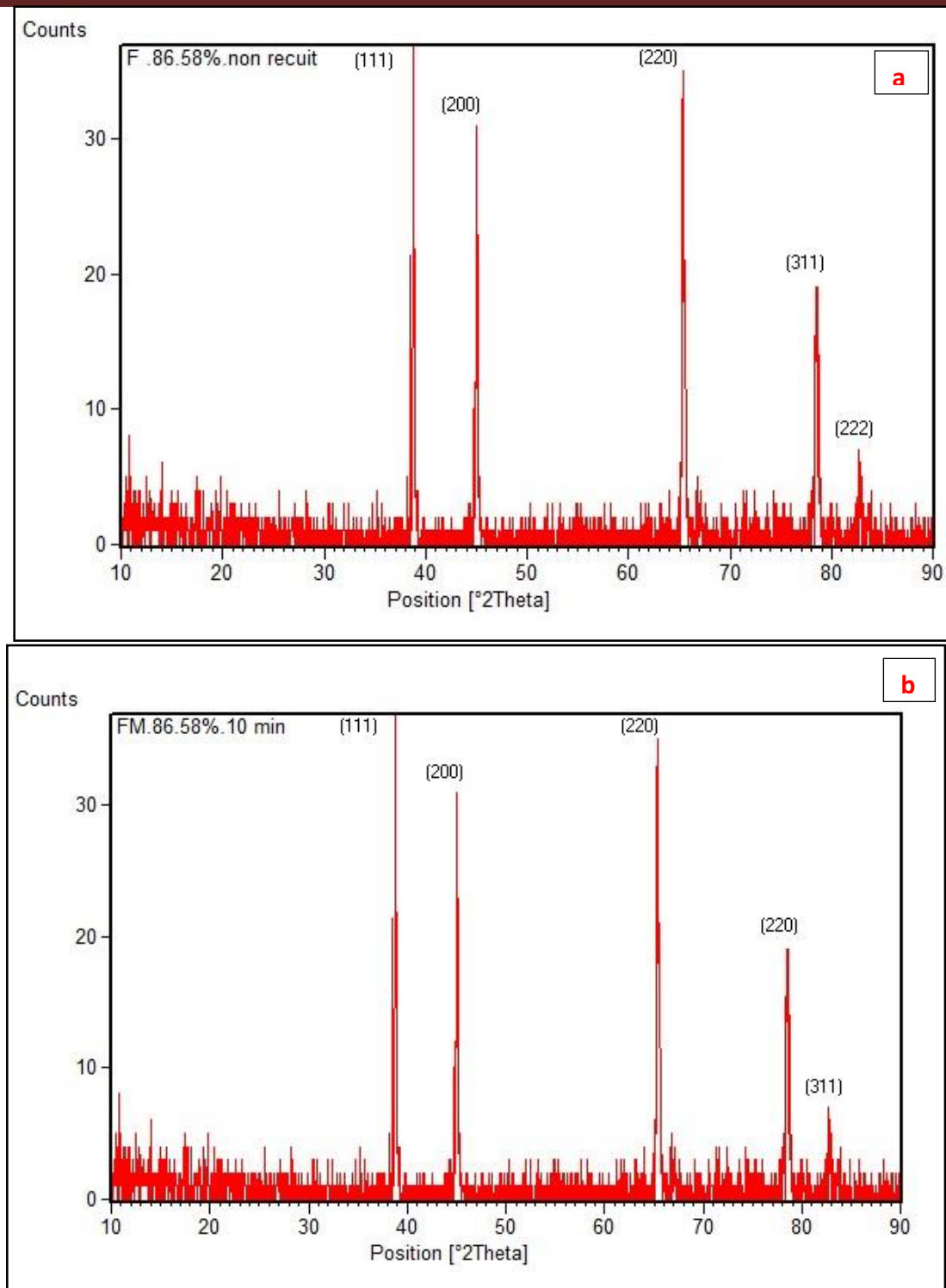
Le pic	L'angle $2\theta$
{111}	38.47°
{200}	44.47°
{220}	65.135°
{311}	78.230°
{222}	82.438

On observe les même pics dans les Diffractogramme de rayon X de fil machine déformé et le fil recuit à 250°C en 10 min, mais la différence c'est dans l'intensité des pics, il y a changement de l'intensité entre les pics de fil machine déformé et fil recuit à 250°C en 10 min, causé par le procédé de déformation par tréfilage, et on remarque qu'il n'y a pas de décalage des pics ( $2\theta$ ). (**Fig.II.16**) et Fig II.17.

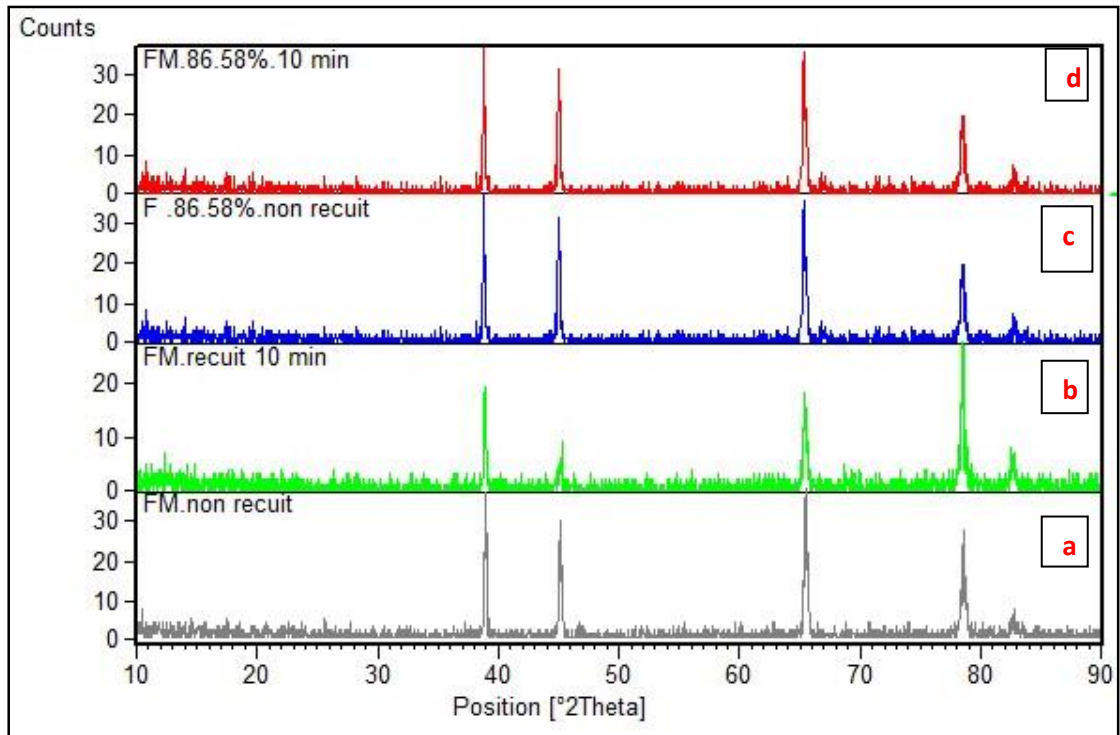


**Figure II.15 :** Diffractogramme de rayons X du fil machine d'aluminium ,a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 10 min.





**Figure II.16 :** Diffractogramme de rayons X du fil d'aluminium déformé  $\epsilon$  (86.58%)  
a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 10 min.



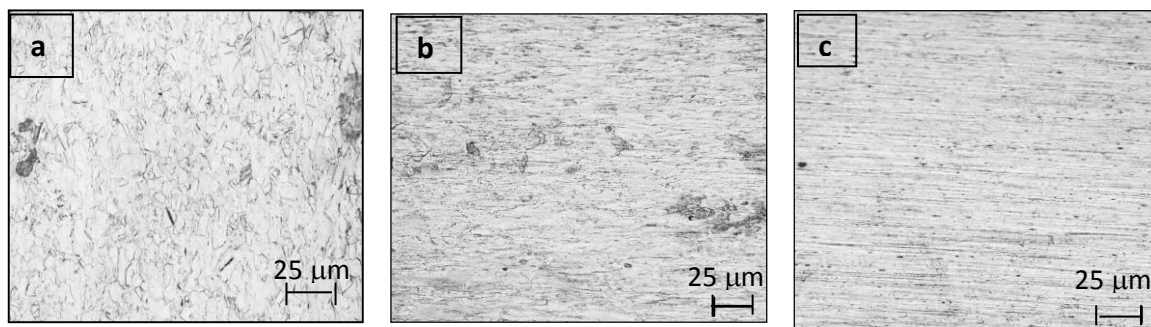
**Figure II.17 :** Diffractogramme de rayons X du fil d'aluminium : a)fil machine non recuit, b) fil machine recuit à 10 min ,c)fil 86.58% non recuit ,d) fil 86.58% recuit à 10 min.

### II.3. Etude de fil cuivre

#### II.3.1. Etat initial

##### II.3.1.1. Caractérisation microstructurale

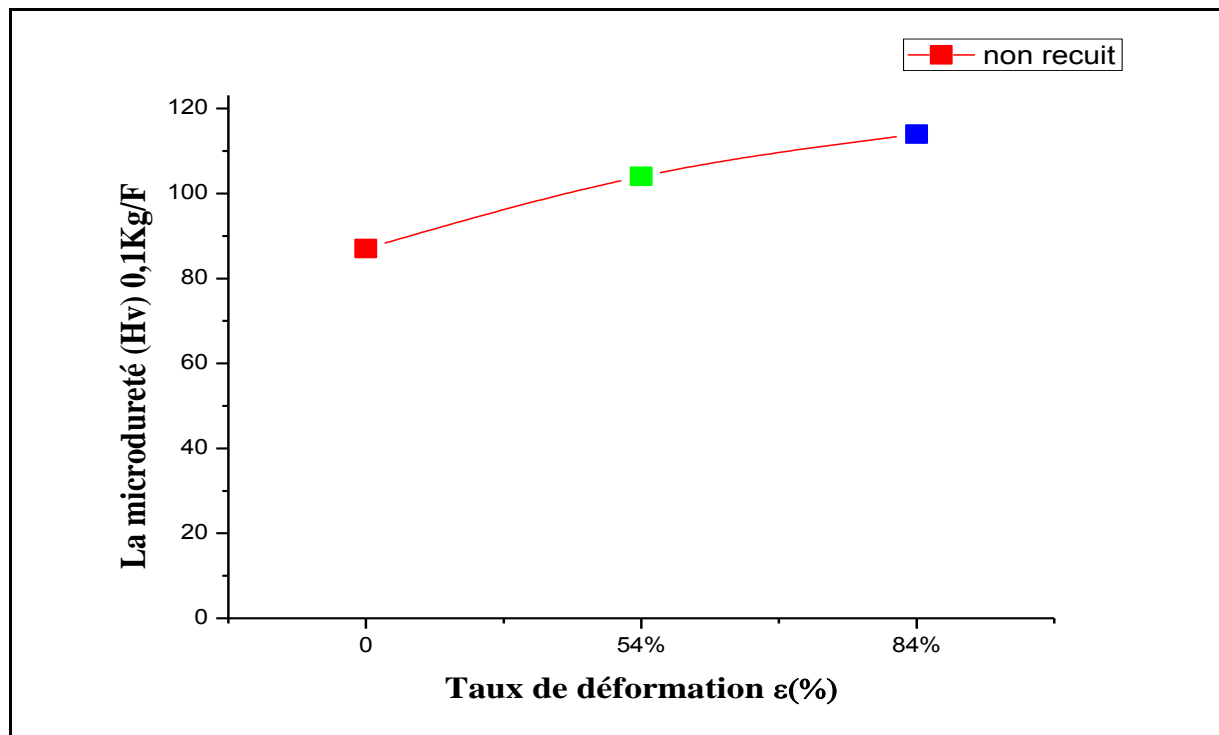
Pour étudier l'effet de taux de déformation sur la taille des grains des fils de cuivre tréfilés et recuits, on a pris deux fils différents déformés. Le premier taux de réduction ( $\varepsilon_1=54\%$ ) et le deuxième de forte déformation ( $\varepsilon_2=84\%$ ). L'analyse métallographique des fils tréfilés montre une microstructure de grains allongés suivant l'axe du tréfilage, avec l'augmentation de la déformation. (Fig. II.18)



**Figure II.18** : Microstructure des fils cuivre déformé par MO de : a) fil machine, b) fil tréfilé à 54% et c) à 84%.

##### II.3.1.2. Evolution de la microdureté de l'état tréfilé

A partir des mesures de la microdureté des fils de cuivre étudiés. On observe une augmentation de la microdureté en fonction du taux de déformation à cause de l'effet de tréfilage à froid sur le matériau, c'est la déformation à froid qui conduit à un durcissement plastique traduit par une structure allongée suivant l'axe de tréfilage (Fig. II.19).



**Figure II.19 :** Les mesures de la microdureté des fils de cuivre ETP non recuit en fonction de taux de déformation .

II.3.2. Etat recuit

II.3.2.1. Caractérisation microstructurale

La Figure II.20 montre la différence entre la microstructure des fils recuit à 250 °C en fonction de taux de déformation et de temps de maintien, on remarque recristallisation des grains déformé notamment pour le fil déformé à 54% à partir de 30 min de recuit à 250°C.

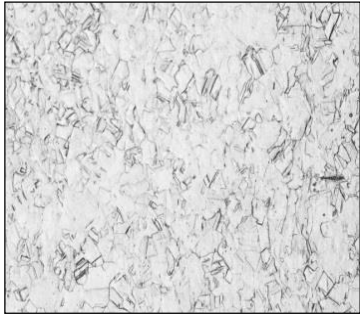

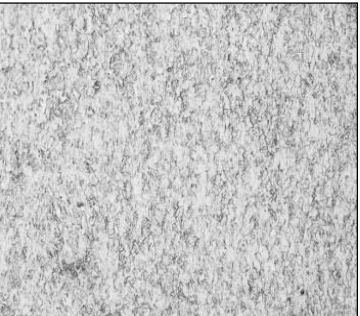

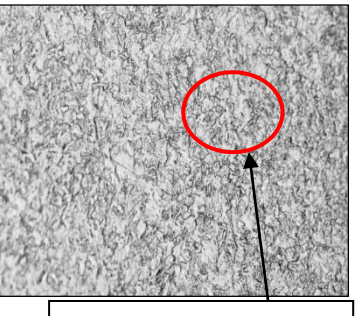
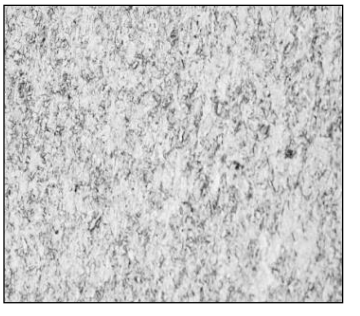
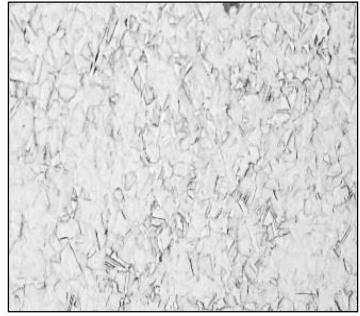

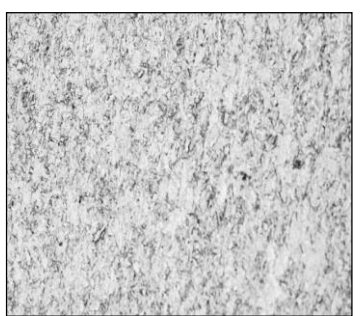
	Fil machine	$\epsilon_1 = 54\%$	$\epsilon_2 = 84\%$
Recuit à 10 min			
Recuit à 30 min		 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; color: red; font-weight: bold;">Grain recristalisée</div>	
Recuit à 60 min			

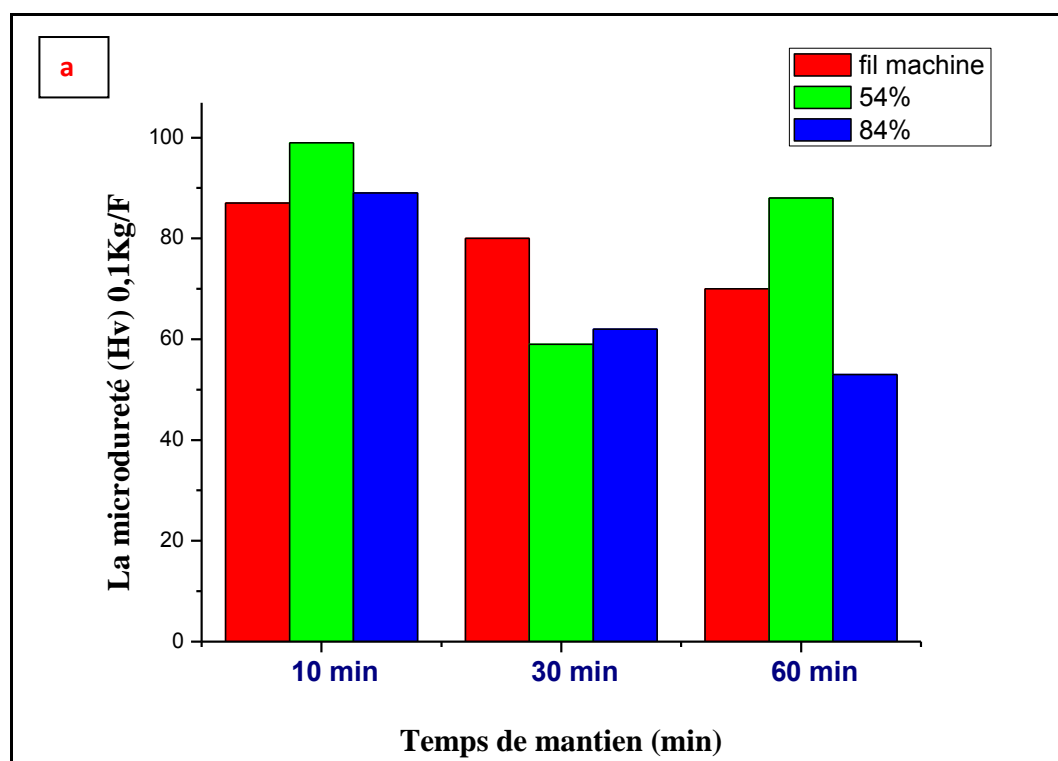
Figure II.20 : Les microstructures des fils de cuivre de type ETP tréfilé et recuit à 250°C.

II.3.2.2. Evolution de la microdureté de l'état recuit

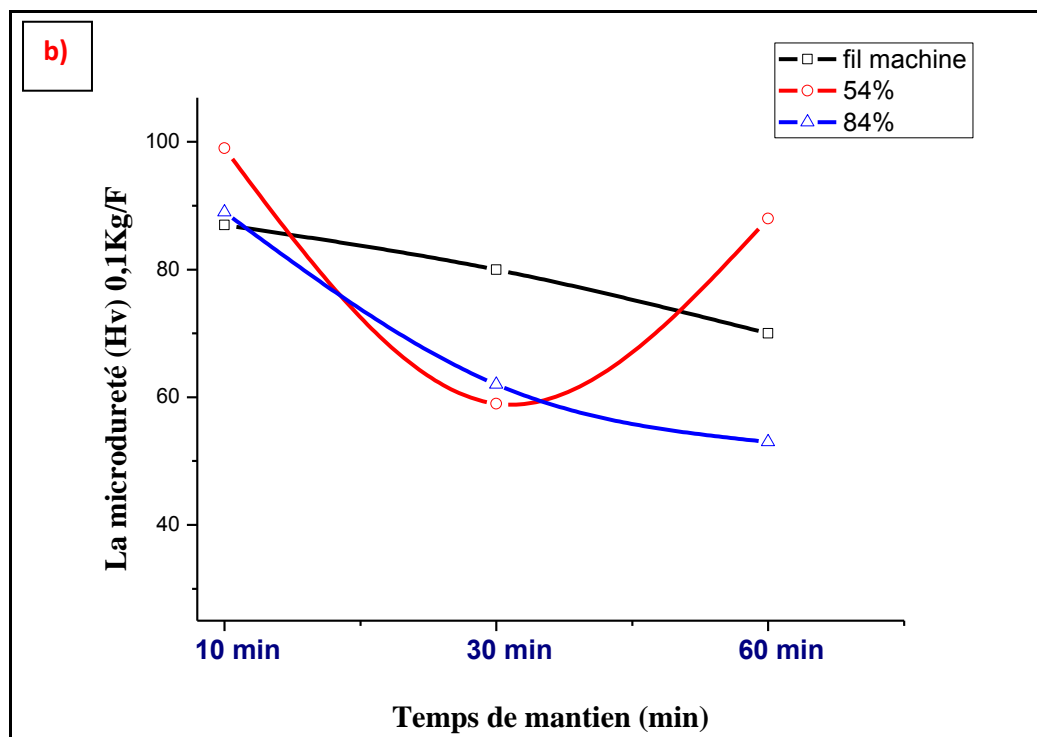
A partir de tableau II.5, qui présente les mesures de microdureté des fils de cuivre tréfilé et recuit à 250 °C pendant des temps de maintien 10 min ,30 min et 60 min. On observe une diminution de la microdureté pour tous les fils en fonction de l'augmentation de temps de recuit (**Fig.II.21 a et b**). Cette diminution à cause de l'élimination de la contrainte interne causée par l'effet de recuit.

**Tableau II.5 :** Les mesures de microdureté des fils de cuivre tréfilé et recuit à 250 °C en fonction de taux de déformation.

La microdureté (Hv) 0.1Kg/F	Fil machine	$\epsilon_1=54\%$	$\epsilon_2=84\%$
Etat tréfilé	87 Hv	104 Hv	114 Hv
Recuit à 10 min	87 Hv	99 Hv	89 Hv
Recuit à 30 min	80 Hv	59 Hv	62 Hv
Recuit à 60 min	70 Hv	88 Hv	53 Hv







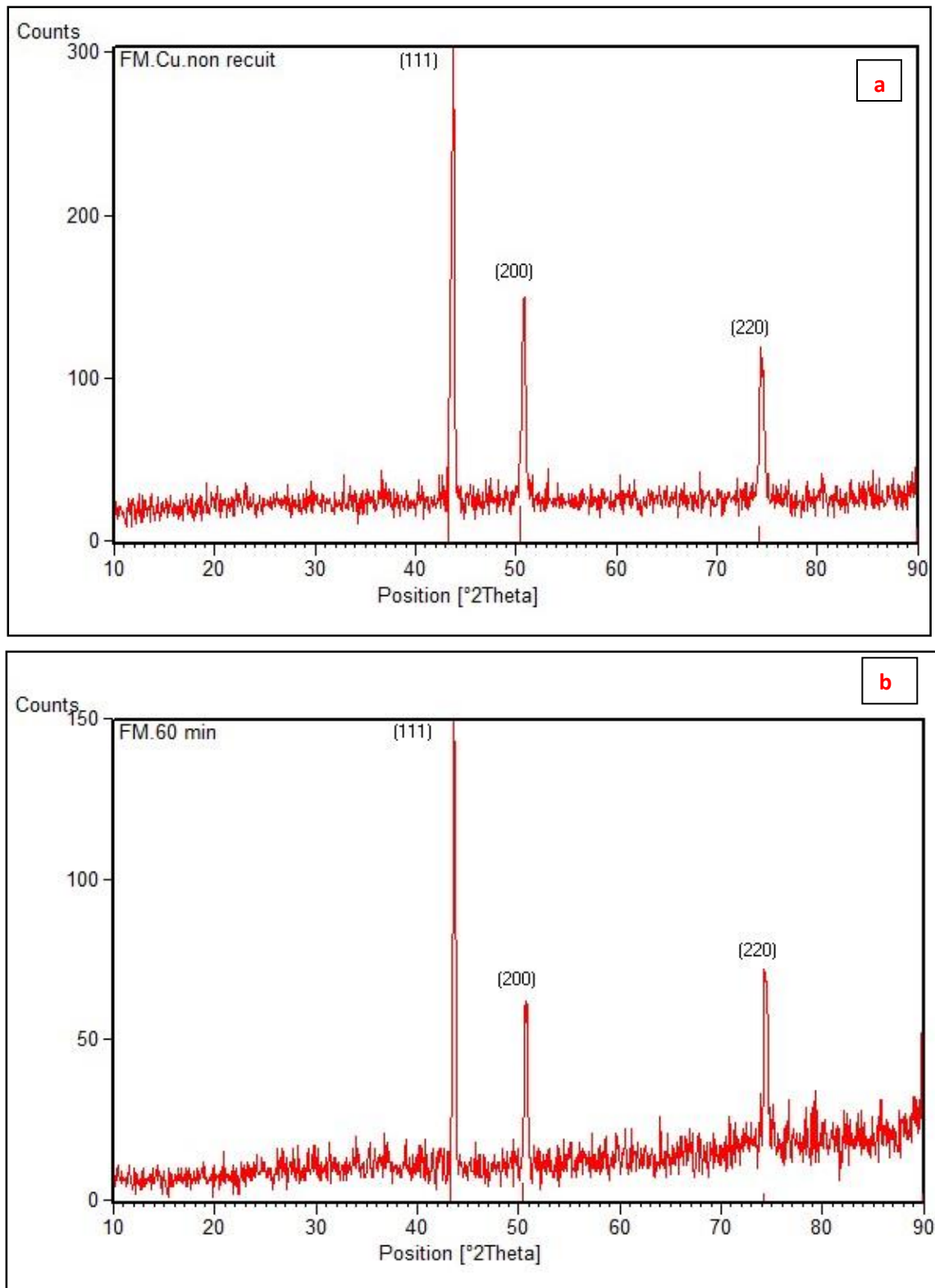
**Figure II.21 :** Les mesures de la microdureté des fils de cuivre ETP recuit à 250°C en fonction de temps de maintien.a) histogramme, b) courbe.

### II.3.2.3. Etude par diffraction des rayons X

Les Diffractogramme de rayons X des fils de cuivre : fil machine tréfilé (**Fig.II.22.a**) et fil machine recuit à 250°C en 60 min (**Fig.II.22.b**) obtenir par les analyses de programme HighScore .On observe dans cette Diffractogramme apparition de trois pics en déférent l'angle  $2\theta$  et l'intensité (I%) comme suivant :

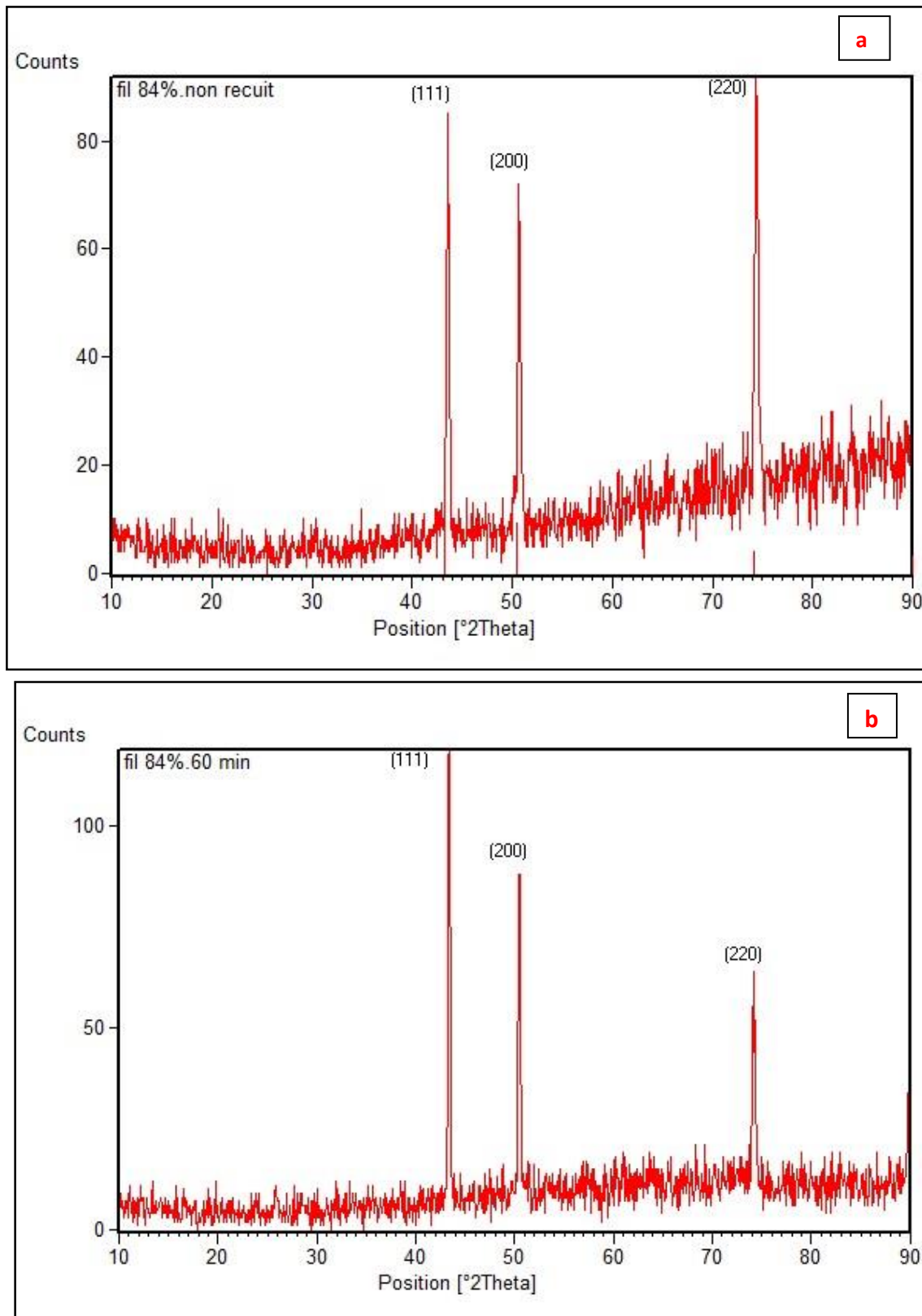
Le pic	L'angle $2\theta$
{111}	43.298°
{200}	50.434°
{220}	74.133°

On observe les même pics dans les Diffractogramme de rayon X de fil machine tréfilé et le fil recuit à 250°C en 60 min, il y a un changement de l'intensité entre les pics de fil machine tréfilé et recuit à 250°C en 60 min. Ce changement relativement par l'effet de l'érouissage causé par le procédé de déformation par tréfilage. (**Fig.II.24**). Et pour (**Fig.II.23**) représente le Diffractogramme de fil de cuivre fortement déformé 84% no recuit (**Fig.II.23.a**) et recuit à 60 min (**Fig.II.23.b**) on remarque même trois pics : {111}, {200}, {220} ,on remarque qu'il n'y a pas de décalage des pics ( $2\theta$ ) qui explique qu'il n'y a pas changement de phase lors de recuit .

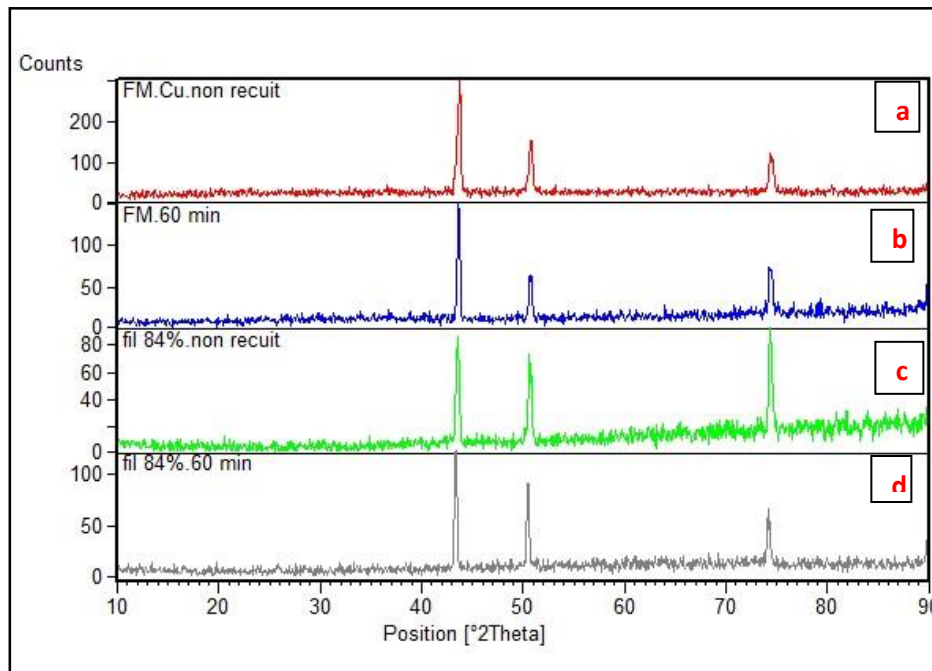


**Figure II.22 :** Diffractogramme de rayons X du fil machine de cuivre a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 60 min.





**Figure II.23 :** Diffractogramme de rayons X du de cuivre déformé  $\epsilon\%$ (84) a) non recuit, et (b) recuit à 250°C de temps de maintien 60 min.



**Figure II.24 :** Diffractogramme de rayons X du fil de cuivre :a)fil machine non recuit)b) fil machine recuit à 60 min,c)fil 84% non recuit,d) fil 84% recuit à 60 min.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Le présent travail avait pour objectif d'étudier l'évolution de la microstructure et microdureté en fonction de taux de déformation et du temps de recuit à 250°C lors de la déformation par tréfilage à froid à l'entreprise ENICAB de Biskra d'un fil d'aluminium de type AGS, et des fils de cuivre de type ETP destiné à la câblerie électrique et après un traitement de recuit à température isotherme .

L'étude des fils d'aluminium et cuivre tréfilés et recuit , nous a permis de déduire les conclusions suivantes:

1/Pour l'alliage d'aluminium :

- La comparaison entre la microstructure d'aluminium de fil machine et fil tréfilé montre il n'a pas un grande changement dans la structure.

-La microdureté des fils tréfilé montre une forte augmentation de la microdureté avec l'augmentation du taux de déformation.

- On a constaté un grossissement relativement des grains observés pour le fil machine, par contre pour le fil déformé on a constaté un affinement des grains après le recuit à 250 °C pendant 60 minute de maintien.

-On remarque un changement de l'intensité entre les pics de fil machine et fil tréfilé après recuits à 250°C pendant 10 minute.

2/ Pour le cuivre :

-L'analyse métallographique des fils tréfilés montre une microstructure de grains allongés suivant l'axe du tréfilage, avec l'augmentation de la déformation.

-On observe une augmentation de la microdureté en fonction du taux de déformation dans l'état tréfilé.

-La microstructure des fils recuit à 250 °C en fonction de taux de déformation et de temps de maintien, on remarque recristallisation des grains déformé notamment par le fil fortement déformé à partir de 30 min de recuit.

## **Conclusion générale**

---

-Pour la microdureté des fils de cuivre tréfilé et recuit à 250 °C pendant des temps de maintien 10 min ,30 min et 60 min on observe une diminution de la microdureté pour tous les fils en fonction de l'augmentation de temps de recuit.

-On observe les même pics de rayon X de fil machine et fil tréfilé recuit à 250°C pendant 60 min,

### **Perspectives**

Il sera intéressant dans les prochaines études d'essayer d'autres techniques à savoir :

Le MEB, MET, les essais mécaniques et électriques et le EBSD qui permet étudier la texture des fils tréfilés et recuits.

### Les Références bibliographiques

- [1] Fatima Zohra LEMMADI, "Caractérisations des alliages à base d'aluminium et étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains" thèses de doctorat, Université de Biskra (2014), pp : 1.
- [2] Jonathan IDRAC, "Comportement électrochimique d'alliages modèles Binaires (Aluminium – cuivre)", thèse de doctorat, Université de Toulouse (2005), pp : 23.
- [3] M<sup>elle</sup> Sara Mecheri, "Etude des réactions des transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles", thèse de Magister en physique, Université de Constantine (2007), pp : 1-4.
- [4] HAMDY Ines, "Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000)", thèse de doctorat, Université de Biskra (2014), pp : 24.
- [5] NEBBAR.M,GASMI.M, "Effet de seconde phase (perlite) sur le mécanisme de recristallisation du fil d'acier tréfilé à froid", t
- [6] LAURINO Adrien, "Intégration des alliages d'aluminium dans le câblage électrique automobile : procédés de mise en forme microstructure et durabilité", thèse de doctorat (2012), Université de Toulouse, pp : 43.
- [7] LAURINO Adrien, "Intégration des alliages d'aluminium dans le câblage électrique automobile : procédés de mise en forme, microstructure et durabilité", thèse de doctorat, Université de Toulouse (2012), pp : 43.
- [8] Elena Luminița DIN – ȘTIRBU, "Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage", thèse de doctorat (2005), Université de L'UNIVERSITE de PITESTI (Roumanie), pp : 9.
- [9]ATH MANE.A, OULD, ABDELKADER.E, "Effet des traitements thermomécaniques sur les propriétés mécaniques et électriques du câble électrique en Cuivre et Aluminium", Diplôme d'ingénieur D'état (2011), Université de Biskra, pp : 8.

## Références bibliographiques

---

- [10] ZAZI NACER, "Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium" thèse de doctorat, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (2011), pp : 10-12.
- [11] TARDELLI Joffrey, "Etude des comportement electrochimique des PHA ses intermetalliques des alliages d'aluminium 2214-T6 et 7050-T74 : approche multiechelle de materiaux polyphases", thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy (2012), pp :6,7.
- [12] FAR Dalel, " Etude du durcissement structural de l'alliage Al-4,6 %Cu-1 %Mg-0,7 %Si (% mass) ", thèse de magister, Université de Mentouri – Constantine (2012).
- [13] Toufik DJIMAOUI, " Effet des traitements thermiques sur l'évolution des propriétés mécaniques et électriques d'un fil d'aluminium de type AGS tréfilé à froid à l'ENICAB", thèse de master, Université de Biskra (2015),
- [14] BOULEMZAOU Khadidja, " Analyse thermique des alliages d'aluminium AlMgSi (Cu)", thèse de Magister, Université de Constantine (2012), pp : 23.
- [15] DEHRIB Sabrina, "Etude et caractérisation d'un matériaux composite poudre aluminium/alumine ( $Al_2O_3$ )", thèse de magister, Université de Tizi Ouzou (2015), pp :10.
- [16] Tat Thang PHAM, " Endommagement en surface des alliages d'aluminium en mise en forme à froid", thèse de doctorat, Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS (2015), pp :13.
- [17] CHAHDANE Anissa, "Effet de vieillissement naturel sur les propriétés mécaniques de deux toles AlMgSi", thèse de magister, Université de Constantine (2012), pp :11.
- [18] Guillaume W ANTE, " Influence des paramètres microstructuraux sur le comportement mécanique d'alliages d'aluminium 6005A et de leurs assemblages soudés", thèse de doctorat, Université de LILLE I (1999), pp :20,22.
- [19] Lahcene Fellah, "L'effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre ", thèse de doctorat, Université de Biskra (2015), pp : 55-56.

## Références bibliographiques

---

- [20] OUAOMAR, H, MOUHIB, N, SAADOUKI, B, LAHLOU, M, EL GHORBA, M, "Comportement mécanique et étude statique des fils de cuivre pour un câble électrique souterrain basse tension", International journal of innovation and scientific research (2015), pp :252.
- [21] ZALOUK Djedjiga, "Elaboration et caractérisation électrique et électrochimique des oxydes formés thermiquement sur quelques matériaux passivables (Titane, Aluminium, Acier inoxydable et Cuivre)", thèse de Magister (2010), Université de Boumerdes, pp : 28-29.
- [22] AMIROUCHE Lelila, "Etude du pouvoir de sorption du cuivre (II), du Zinc(II) et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiation micro-ondes", thèse de magister, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (2011), pp :22.
- [23] STSIPM, "Etude des produits et des outillages matériaux", 05/2008, pp : 1.
- [24] JAKANI Saad, "Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé", thèse de doctorat, Université de Paris Sud-ORSAY(2004), pp : 6-7.
- [25] LE 'Virginie, "Influence du cuivre sur les biomasses microbiennes dans les canalisations d'eau", Université de Paris-Sud11(2008), pp : 8-9.
- [26] ABDELLAOUI, A, "Etude de la texture cristallographique de fils d'acier perlitique en fonction des conditions de tréfilage influence sur les propriétés mécaniques", thèse de doctorat, Université de METZ (1995), pp :75
- [27] A. Imad, "Optimisation de la mise en forme par tréfilage : approche expérimentale, modélisation et simulation numérique", thèse de doctorat, Université de Lille 1(2009), pp : 6.
- [28] S.Bensaada. L.Bouzidi, "Effet des traitements thermochimiques sur les propriétés mécaniques et électriques du câble électrique (cuivre et aluminium)", thèse de doctorat, Université de Batna (2005), pp : 4.
- [29] Abdelatif Beribeche, "Comportement des fils métalliques lors d'un essai de fluage", thèse de doctorat, Université de Biskra (2014), pp : 5-6
- [30] FELDER Eric, "Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs", thèse de doctorat, Ecole nationale supérieures des mines de Paris (2006), pp : 1-2.

## Références bibliographiques

---

- [31] LAMONTAGNE Aude, "Etude des mécanismes physiques responsables des évolutions microstructurales des aciers perlitiques au cours du tréfilage et du vieillissement Post-tréfilage", Le grade de doctorat Lyon (2014), pp : 8-9.
- [32] G.VEGA ,A.HADDI,A.IMAD,"Comportement mécanique en grandes déformation :cas du tréfilage d'un cuivre "9 ièm Congrès de mécanique Semlalia,Marrakech.
- [33] GUILLAUME Vega,A.HADDI ,A.IMAD,"Modélisation numérique de mise en forme par tréfilage",18 ime Congrès Français de Mécanique, Grenoble,(2007),pp : 27-31.
- [34] Chenafi Messaoud, 'Etude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés d'alliage AGC'' , thèse de Master, Université de Biskra (2014), pp : 14.
- [35] Denise BERNAUDBUBLITZ ,Audré RAHAHIMEU, "Comportement en torsion des fils tréfilés contribution à la modélisation de l'influence des paramètres de fabrication des fils", Rapports des Laboratoires central des Ponts et chaussées ,série :ouvrages d'art .OA-4.Paris (1988).
- [36] Technique Ingénieur.
- [37] Said BENZAADA ,''R PHenomenes de recristallisation de précipitation et de dissolution discontinue dans les alliages Ni-1.4 at % In,Ni-6.2 at % In,Al-15 at % Zn,Al-30 mass% Zn ,Cu-4.6 at %In et Mg-8 mass% Al' 'Thèse de doctorat ,Université de Batna (2005),pp :
- [38] QUENTIN Puydt,"Comportement mécanique de soudures en alliage d'aluminium de la série 7xxx de la microstructure à la modélisation de la rupture' 'thèse de doctorat, Université de Grenoble (2006), pp : 15.
- [39] ZIDANI .M, T.DJIMAOUI , M.D.HADID ,''Effet du traitement thermique sur différents propriétés de l'alliage d'aluminium AGS tréfilé industriellement '' ,Revue Science des Matériaux Laboratoire LARHYSSISSN 2352-9954 (2016),pp : 34-41.



## Résumé

Le but de ce travail est d'étudier l'effet de recuit isotherme à 250°C sur l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques des fils de cuivre (ETP) et d'alliage d'aluminium (AGS) déformés par tréfilage à froid a l'entreprise ENICAB de Biskra destinés pour le transport d'énergie électrique. Une variété des techniques expérimentales de mesure et de caractérisation nous ont permis de mener à bien ce travail. Il s'agit de la microscopie optique, la diffraction des rayons X et les mesures de la microdureté

Mot clés : recuit, tréfilage, microdureté, microstructure, recristallisation

## Abstract

The aim of this work is to study the isothermal annealing effect 250°C on the evolution of the microstructure and the mechanical properties of copper wire (ETP) and aluminum alloy (AGS). deformed by drawing has the company ENICAB of Biskra intended for the transport of electric energy. A variety of experimental techniques of measurement and characterization has enabled us to carry out this work. These are optical microscopy, X-ray diffraction and micro hardness measurements.

Key words: annealing, drawing, micro hardness, microstructure, recrystallization.

## ملخص

الهدف من هذه العمل هو دراسة تأثير التلدين في درجة حرارة 250° C على البنية المجهرية و الخصائص الميكانيكية للسبائك النحاس من نوع (ETP) و سبائك الألمنيوم من نوع (AGS) المشوه عن طريق القلد البارد في شركة ENICAB المتخصصة في صناعة الكوابل الكهربائية في بسكرة. مجموعة متنوعة من التقنيات التجريبية سمحت لنا بقياس و توصيف هذا العمل جيدا. متمثلة في المجهر الضوئي، الأشعة السينية و جهاز قياس الصلادة .

الكلمات المفتاحية: التلدين، القلد، البنية المجهرية، الصلادة، التبلور.