



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et  
de la vie  
Département des Sciences de la Matière  
E

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière  
Filière de physique  
Spécialité physique des Matériaux  
Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

Fatima bouhaf kherkhachi

Souad ben zaf

Le : 21-6-2021

Synthèse des études antérieures sur les propriétés des fils tréfilés en  
alliage d'aluminium AGS destinés au câblage électrique : Effet du  
traitement thermique

## Jury :

M <sup>me</sup> Nadia LAHRAKI	M.A.« A »	Université Med Khider-Biskra	Président
Dr. Ghania BENCHABANE	M.C.« B »	Université Med Khider-Biskra	Rapporteur
M <sup>me</sup> Amel NACER	M.A.« A »	Université Med Khider-Biskra	Examineur

# REMERCIEMENTS

*Je remercie "ALLAH" que m'a aidé à achever et cette mémoire.*

*Je remercie mon encadreur Dr" BENCHABANE GHANIA" pour son aide et pour m'avoir dirigé durant ce travail.*

*Je voudrais associer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

*A tous un grand merci*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à:*

*A ma mère et mon père pour leurs affections et amours*

*A mes frères et mes sœurs*

*A ma soeur Imen ,qui m'a soutenu dans mon cheminement académique.*

*A tous mes Amis sans exception.*

*Fatima bouhaf-k-*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à:*

*L'être qui m' est le cher an monde,à celle a ou donnè pour que je sois ce que je suis  
aujourd'hui,ma mère.*

*Celui que à qui à fait tous on possible pour me voir réussir dans ma vie,mon père.*

*A ma soeur louiza.*

*A mon frère sadam,*

*A tous la famille et les amis.*

*Achaque personne m'a aide à preparer ce mémoire*

*A la famille de la physique*

*Souad ben zaf*

# Sommaire

Table des matières	
Remerciement.....	i
Dédicaces.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	v
Introduction générale.....	1

## **Chapitre I : Généralités sur les alliages D'aluminium AGS**

1. Introduction.....	4
2. Présentation générale d'aluminium.....	4
3. Les alliages à base d'aluminium.....	6
3.1 . Les séries principales et la désignation numérique.....	6
3.2 Les Alliages Al–Mg–Si.....	7
4. Propriétés électrique et mécaniques des alliages Al-Mg-Si.....	8
5. Durcissement structural dans les alliages Al-Mg-Si.....	10
5.1. La séquence de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si.....	11
5.2. Mécanisme de durcissement structural dans les alliages d'aluminium.....	12
6. Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	14
6.1. Les différentes étapes d'un traitement thermique :.....	14
6.1.1. Mise en solution.....	14
6.1.2. Trempe.....	15
6.1.3. Maturation.....	15

## **Chapitre II: Déformation et tréfilage l'alliage de l'Aluminium**

1. Introduction.....	19
2. Mécanisme de la Déformation plastique.....	19
2.1. Déformation par glissement .....	20
2.2. Déformation par maclage .....	21
3. Définition de tréfilage.....	22
3.1. Principe de tréfilage.....	23
4. Outils et équipement industriels de tréfilage.....	24
4.1. Lubrifiant.....	26
4.2.Outil de mise en forme : la Filière.....	28
5. machines de tréfilage .....	29
5.1. La machina simple.....	29
5.2. Les machines multiples .....	29
5.2.1. Les machines continues ou à passage direct.....	29
5.2.2. Les machine à accumulation .....	30
5.2.3. Les machine à glissement.....	30
6. Matériaux mis en forme .....	30
6.1. Classification des fils.....	30

## **Chapitre III :Résultats et Interprétation**

1. Introduction.....	33
2. Techniques de caractérisation .....	33
2.1. Diffraction des rayons X .....	33
2.2. Micro dureté .....	33
2.3. Essai detracton .....	34
2.4. Mesure de résistivité électrique.....	36
3. Synthèse des travaux réalisés sur les fils tréfilés en alliage AGS .....	37

3.1. Caractérisation du fil machine en alliage d'aluminium AGS à l'état initial.....	37
3.1.1. Composition chimique du fil machine .....	37
3.1.2. Propriétés structurales par diffraction des rayonsX.....	37
3.1.2. Propriétés électriques .....	38
3.1.2. Propriétés mécaniques.....	39
3.2. Caractérisation des fils machine tréfilés avant reven.....	40
3.2.1. Propriétés structurales par diffraction des rayons X.....	40
3.2.2. Propriétés électriques .....	41
3.2.3. Propriétés mécaniques.....	42
3.3. Caractérisation des fils tréfilés en alliage AGS après revenu.....	43
3.3.1. Propriétés structurales par diffraction des rayonsX.....	43
3.3.2 Propriétés mécaniques et électriques.....	45
Conclusion : .....	52
Références bibliographiques .....	53

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié.....	5
<b>Tableau I.2</b> : Désignation numérique et phases principales des alliages à base d'aluminium.....	6
<b>Tableau I.3</b> :Caractéristiques comparées des matériaux utilisés.....	9
<b>Tableau I.4</b> : Caractéristiques des câbles en alliage d'aluminium 6101.....	10
<b>Tableau II.1</b> : Principaux systèmes de glissement observés.....	21
<b>Tableau II.2</b> : Classification des fils suivant leurs diamètres.....	29
<b>Tableau III.1</b> : Composition chimique du fil machine.....	36
<b>Tableau III.2</b> : résistance linéique du fil machine.....	37
<b>Tableau III.3</b> : Résistivités et <i>conductivités</i> électriques du fil machine.....	37
<b>Tableau III.4</b> : Caractéristiques mécaniques du fil machine.....	38
<b>Tableau III.5</b> : Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage 6101.....	38
<b>Tableau III.6</b> : Résistance linéique de fil tréfilé avant revenu.....	40
<b>Tableau III.7</b> : Résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu.....	41
<b>Tableau III.8</b> : L'évolution des caractéristiques électriques des fils en alliage AGS en fonction du taux de déformation ( $\epsilon$ %)......	41
<b>Tableau III.9</b> : Caractéristiques mécaniques de fil tréfilé en alliage AGS avant revenu.....	42
<b>Tableau III.10</b> : L'évolution des caractéristiques mécaniques des fils en fonction du taux de déformation ( $\epsilon$ %)......	43
<b>Tableau III.11</b> : Résistance linéique de fil tréfilé en alliage AGS après revenu à 160°C.....	45
<b>Tableau III.12</b> : Résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé en alliage AGS après revenu à 160°C.....	46
<b>Tableau III.13</b> : Caractéristiques mécaniques des fils tréfilés en alliage AGS après revenu à 160°C.....	47
<b>Tableau III.14</b> : Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C.....	48
<b>Tableau III.15</b> : Evolution des propriétés des fils machine et des fils tréfilés en alliage AGS après le traitement de revenu à T=170°C.....	49
<b>Tableau III.16</b> : Résultats des tests mécaniques obtenus après tréfilage et revenu.....	50
<b>Tableau III.17</b> : Résultats des propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés et recuits à 400°C	51

# Liste des figures

<b>Figure II.1:</b> câble électrique en aluminium (série 6000). Câble électrique en alliage d'aluminium...	8
<b>Figure I.2 :</b> conducteur aérien en almelec.....	9
<b>Figure I.3 :</b> Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg <sub>2</sub> Si, coupe pseudo binaire.....	11
<b>Figure I.4:</b> influence du vieillissement sur la proportion des différents.....	13
<b>Figure I.5 :</b> Interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement).....	13
<b>Figure I.6 :</b> Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisailables.....	14
<b>Figure . II .1:</b> Schéma représentant les contraintes normale $\sigma$ et de cisssion $\tau$ .....	19
<b>Figure II.2:</b> Système glissement dans une maille élémentaire c.f.c.....	21
<b>Figure II.3:</b> Représentation schématique d'une macle mécanique.....	22
<b>Figure II.4 :</b> ligne de tréfilage.....	23
<b>Figure II.5 :</b> Schéma de principe de tréfilage.....	24
<b>Figure II.6:</b> Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe).....	25
<b>Figure II .7 :</b> Machine de tréfileuses d'aluminium AGS (ENICAB Biskra).....	26
<b>Figure II.8 :</b> Schéma d'une méthode de lubrification .....	27
<b>Figure II.9 :</b> boite à savon (ENICAB Biskra).....	28
<b>Figure II.10 :</b> schéma d'une filière de tréfilage.....	29
<b>Figure III.1:</b> Représentation schématique de l'essai de Vickers.....	34
<b>Figure III.2:</b> La machine de traction Zwick/Roell (Z 100).....	35
<b>Figure III.3:</b> Spectre de rayon X du fil machine d'alliage d'aluminium.....	38
<b>Figure III.4:</b> Comparaison entre les Spectre de rayon X du fil machine et du.....	41
<b>Figure III.5:</b> Diffraction de RX du fil machine traité à 170°C pendant 10 min, 4h et 20h.....	45
<b>Figure III.6:</b> Diffraction de RX du fil déformé à 87% et traité à 170°C pendant 10 min, 4h et 20h.....	46



# Introduction générale

## Introduction générale

Des conducteurs en aluminium et en alliages d'aluminium sont utilisés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique de grande puissance. En fait, l'aluminium est souvent employé lorsque des paramètres techniques condamnent l'utilisation du cuivre. En effet, plus léger que le cuivre, l'aluminium est souvent utilisé à la place de celui-ci dès que la contrainte du poids devient primordiale [1].

Les lignes électriques aériennes à hautes tension sont construites avec un alliage d'aluminium AGS (Al-Mg-Si) appelé Almélec, qui a une contrainte à la rupture en traction plus importante que l'aluminium, avec une résistivité électrique acceptable. Cette contrainte à la rupture permet de réaliser des câbles homogènes constitués uniquement de fils en almélec sans âme d'acier, pouvant supporter des surcharges.

Les alliages d'aluminium AGS sont utilisés par Entreprise des Industries du câble de Biskra (ENICAB) dans l'industrie des câbles électriques.

Les fils électriques fins sont obtenus suite au tréfilage à froid du fil machine (diamètre 9,55 mm) qui introduit un fort écrouissage du matériau. Le tréfilage peut être réalisé en une ou plusieurs étapes. Ce procédé de mise en forme a pour effet de modifier fortement la micro structure du fil machine et ainsi de modifier ses propriétés d'usage, en particulier ses propriétés mécaniques et électriques. Après la dernière étape de tréfilage, un revenu final est réalisé à basse température afin d'obtenir les propriétés d'usage qui doivent respecter des normes bien précises. La température et de la durée du revenu influencent la résistance mécanique et la résistivité électrique du matériel.

L'alliage d'aluminium AGS est un alliage à durcissement structural. Le traitement de durcissement structural a pour but l'augmentation des propriétés mécaniques de l'alliage par formation de précipités durcissant au cours de la trempe et du revenu. Les mécanismes de durcissement structural impliquent un ralentissement du mouvement des dislocations par ces précipités.

Le but de ce travail est de faire une synthèse sur les travaux de recherche réalisés antérieurement sur l'effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés d'alliage AGS afin de déduire les conditions optimales de l'utilisation de ces fils pour le transport de l'énergie électrique.

Ces travaux étudiés ont utilisés différentes techniques de caractérisation telle que l'essai de traction, la mesure de la résistance électrique, la micro dureté Vickers et la diffraction des rayons X, Sur le fil machine ainsi que des fils tréfilés d'aluminium AGS. Ils ont effectué des

traitements thermiques de revenus à différentes températures pour atteindre les propriétés finales du fil électrique [1-6]

Le mémoire est divisé en trois chapitres ;

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium, On focalise sur la série 6000 composé principalement de l'aluminium, de magnésium et des silicium (Al-Mg-Si) et leurs domaines d'applications.

- ✓ Le deuxième chapitre concerne la mise en forme des matériaux par déformation plastique et en particulier le principe de tréfilage industriel à froid des fils d'aluminium AGS.
- ✓ Le troisième chapitre concerne l'illustration des résultats et les interprétations associées.

Enfin, une conclusion générale pour résumer la totalité des résultats obtenus.

- [1] Hamdi, I. Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000) Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra. (2014).
- [2] HADID, M. D. Etude et caractérisation de la microstructure et la texture d'un fil d'aluminium (tréfilé/recuit) Thèse de Doctoral, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA). (2017).
- [3] BESSAIS, L. Etude et caractérisation de la réaction de recristallisation des fils d'aluminium tréfilés industriellement à ENI CAB. BISKRA Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA). (2017).
- [4] Merouchi ,B.Optimisation de revenu des fils en alliage d'aluminium tréfilés pour les câbles électriques, Memoire de master, SPA Alger. (2016).
- [5] Laverroux, M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. Revue de Métallurgie.(1993), 90(10), 1293-1302.
- [6] Laadjal,D. Alliage d'aluminium évolution de la microstructure et propriétés mécanique Mémoire de master, Université badjimokhtar Annaba. (2018).

Chapitre I :  
Généralités sur les alliages  
D'aluminium AGS

## 1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons parler sur l'aluminium et ses alliages. On focalise sur la série 6000 contenant le magnésium et le silicium (Al-Mg-Si) et leurs domaines d'applications.

Ces alliages sont détenus par corroyage, renfermant des éléments d'addition en faibles quantité susceptibles aux traitements thermiques, d'où leur dénomination alliages à durcissement structural. Leurs propriétés sont largement déterminées par l'existence et la prédominance de la phase Mg<sub>2</sub>Si.

## 2. Présentation générale d'aluminium

La production industrielle de l'aluminium n'a commencé qu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Il est classé comme le métal le plus utilisé après le fer et les aciers.

L'aluminium est un élément du troisième groupe de la classification de Mendéléiev dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26,28 g/mol et la température de fusion 660°C, il se cristallise dans le système cubique à faces centrées avec un paramètre de maille 0,404 nm. Sa masse volumique est 2,7 Kg /dm<sup>3</sup>, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de  $23.10^{-6}K^{-1}$ , son module de Young de 66000 Mpa.

L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très réduites et insuffisantes pour son utilisation dans un nombre d'applications structurales, il est léger, ductile et il résiste à la corrosion. Il présente une très bonne conductivité thermique et électrique.

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%). La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et à la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. 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 et Cu.

A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde  $Al_2O_3$  (alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal. Par contre, ce film d'alumine n'a qu'une résistance chimique limitée. Elle résiste cependant bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique. Par contre, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par anodisation: il s'agit d'un traitement qui permet d'obtenir une couche épaisse d' $Al_2O_3$  mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. Cette anodisation a également un but décoratif, car une coloration est possible par des colorants spéciaux avant le colmatage.

Les principales propriétés physiques de l'aluminium sont résumées dans le Tableau (I.1) [2].

**Tableau I.1** : Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié

<i>Propriété</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>	<i>Remarque</i>
Numéro atomique		13	
Masse volumique $\rho$	$Kg \cdot m^{-3}$	2 698	
Point de fusion	$^{\circ}C$	660.45	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Point d'ébullition	$^{\circ}C$	2 056	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Pression de vapeur	Pa	$3.7 \cdot 10^{-3}$	à $927^{\circ}C$
Energie interne massique $u$	$J \cdot kg^{-1}$	$3.98 \cdot 10^5$	
Capacité thermique massique $C_p$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	897	à $25^{\circ}C$
Conductivité thermique $\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	237	à $27^{\circ}C$
Coefficient de dilatation linéique $\alpha_L$	$10^{-5} K^{-1}$	23.1	à $25^{\circ}C$
Résistivité électrique $\rho$	$10^{-9} \Omega \cdot m$	26.548	à $25^{\circ}C$
Susceptibilité magnétique $K$		$0.6 \cdot 10^{-5}$	à $25^{\circ}C$
Module d'élasticité longitudinal $E$	MPa	69 000	
Coefficient de poisson $\nu$		0.33	

### 3. Les alliages à base d'aluminium

#### 3.1 . Les séries principales et la désignation numérique

Conformément aux directives de l'Aluminium Association (Washington DC, USA), les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres[3]. Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal. Le second chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent, il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage. Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000, dont ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium (Tableau I. 2). Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale.

**Tableau I.2** Désignation numérique et phases principales des alliages à base D'aluminium[4].

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1XXX	99% d'Al au minimum	-
2000	2XXX	Cuivre (Cu).	$Al_2Cu$ , $Al_2Cu/Mg$
3000	3XXX	Manganèse (Mn).	$Al_6Mn$
4000	4XXX	Silicium (Si).	-
5000	5XXX	Magnésium (Mg).	$Al_3Mg_2$
6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si).	$Mg_2Si$
7000	7XXX	Zinc (Zn).	$MgZn_2$
8000	8XXX	Autres éléments.	-

Egalement, les alliages d'aluminium destinés à être corroyés peuvent être classés en deux familles en fonction du type de transformation ou de traitement qui permettra d'obtenir les caractéristiques mécaniques et de résistance à la corrosion [5] :

- Les alliages à durcissement structural, (Séries : 2000, 4000, 6000 et 7000).



- Les alliages écrouis qui obtiendront leurs caractéristiques mécaniques par écrouissage, donc par déformation à froid. (Séries : 1000, 3000 et 5000).

Il est à noter que la norme européenne indique que cet ensemble de 4 chiffres doit être précédé pour les alliages destinés à être corroyés par le préfixe EN (EN 573-1), suivi par les lettres A (pour aluminium) et W (pour les produits corroyés) et en plus un tiret « - ». Voici un exemple : EN AW-4007. Il est important de noter que la notation complète est rarement utilisée.

### 3.2 Les Alliages Al–Mg–Si

Les alliages d'aluminium les plus distingués sont ceux qui forment à l'état d'équilibre une solution solide faiblement alliée ou des phases intermétalliques, d'où leur dénomination alliages à solution solide Série 6000 qui fait partie de la catégorie des alliages corroyés à durcissement structural. Ces alliages sont généralement livrés après homogénéisation, trempe et vieillissement naturel. Les alliages Al-Mg-Si-(Cu) sont largement utilisés comme des alliages structuraux de moyenne résistance qui allient les avantages suivants : une bonne formabilité, une bonne soudabilité et une résistance remarquable à la corrosion (passivation à la corrosion sous tension) [3]. Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium et le silicium. Cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Elle est très utilisée pour les profilés. Ils ont une de très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être améliorées par addition de silicium qui formera avec le Mg, le précipité durcissant  $Mg_2Si$ . Ils présentent une bonne résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien Ils sont classé en deux groupes [6] :

- ✚ Un groupe dont les compositions est plus riche en magnésium et silicium tel que les alliages 6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...).
- ✚ Une deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles [7]. Il faut également noter l'existence du 6101 anciennement appelé Amelec. Cet alliage a été énormément utilisé pour ces aptitudes de conducteur électrique. Il a notamment été utilisé

pour la fabrication de lignes moyenne et haute tension en France.

#### 4. Propriétés électrique et mécaniques des alliages Al-Mg-Si

L'aluminium utilisé dans la fabrication des conducteurs électriques est de la nuance 1370, les deux derniers chiffres indiquent la teneur maximale en impuretés. Ce type contient au moins 99,70 % d'aluminium. La conductivité électrique de l'aluminium dépend principalement des teneurs en impuretés, qui ont un effet fort sur la conductivité électrique, sont limités à des teneurs très basses. Cette nuance a un besoin d'un contrôle spécial de ces impuretés pour les applications électriques.

Les impuretés telles que le fer, le silicium et d'autres éléments ont un effet sur les propriétés mécaniques du fil machine, comme la charge à la rupture. On peut obtenir un durcissement supplémentaire en abaissant la température de laminage de façon à accroître la prise d'écrouissage à cette étape de la gamme de fabrication. De la sorte, la charge à la rupture du fil peut être augmentée de 70 MPa à 120 MPa. L'écrouissage au cours de tréfilage contribue de façon importante à la résistance mécanique des fils. La ductilité et la conductivité électrique baissent pendant le tréfilage. Il est possible d'appliquer des traitements thermiques pour améliorer l'allongement et la conductivité électrique du matériau [8].



**Figure I .1:** câble électrique en aluminium (série 6000). Câble électrique en alliage d'aluminium

L'appellation commerciale des alliages Al-Mg-Si, utilisés pour les conducteurs de lignes aériennes est « almélec ». Ils contiennent des faibles additions de magnésium et de silicium afin d'améliorer certaines propriétés mécaniques.

L'addition de ces éléments d'alliages permet d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques électriques et mécaniques aux utilisations envisagées. Le but final c'est d'augmenter la résistance mécanique et diminuer la résistivité électrique [9].

Les lignes aériennes de haute tension sont construites avec l'alliage de type 6101 (selon la norme EN 50183) qui a une charge à la rupture en traction de 320 MPa et une résistivité électrique de  $3,26 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , bien que notablement supérieure à celle de l'aluminium. La contrainte à la rupture permet de réaliser des câbles homogènes constitués uniquement de fils

en almelec, pouvant supporter, en plaine, des surcharges légères de givre [10].



**Figure I.2** :conducteur aérien en almelec.

**Tableau I.3:**Caractéristiques comparées des matériaux utilisés[10].

Caractéristiques	Cuivre	Almelec	Aluminium	Acier
Résistivitéà20°C (10 <sup>-8</sup> .m)	1.72	3.26	2.82	~ 15
Massevolumique (Kg.m <sup>-3</sup> )	8890	2700	2700	7800
Charge àlarupture (MPa)	380 à 450	320 à 380	150 à 190	1410 à 1450
Moduled'élasticité (MPa)	105000	60000	60000	185000
Coefficient de dilation (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	17	23	23	11.5

**Tableau I.4** : Caractéristiques des câbles en alliage d'aluminium 6101 [10].

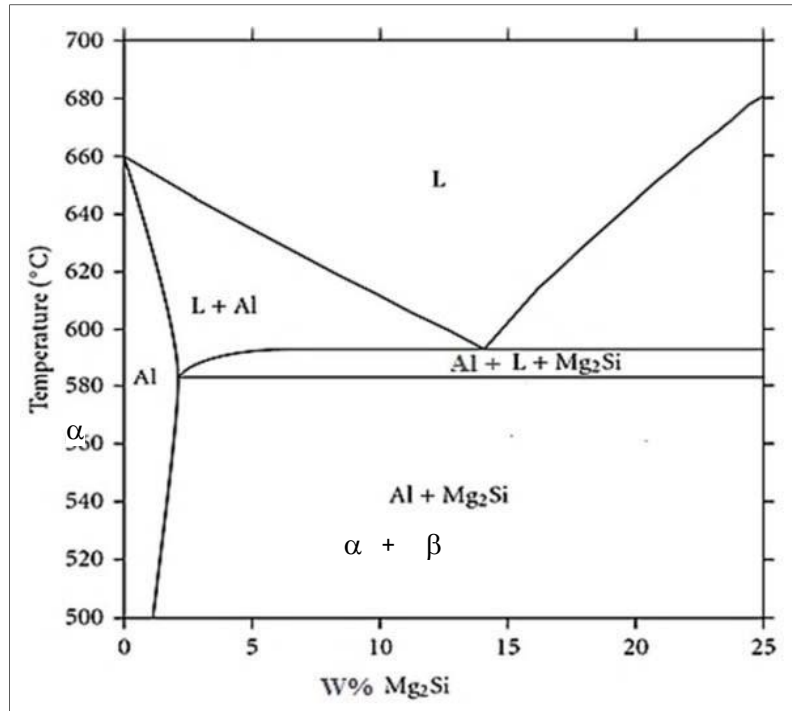
Designation	Section (mm <sup>2</sup> )	Composition		Diamètre extérieur (mm)	Charge de rupture assignée (daN)	Résistance électrique linéique à 20 °C	Masse linéique sans graisse (kg/km)
		Nombre de fil	Diamètre de fil				
Aster 34.4	34.36	7	2.5	7.5	1175	0.958	94
Aster 54.6	54.55	7	3.15	9.45	1175	0.603	149
Aster 75.5	75.54	19	2.25	11.25	2455	0.438	208
Aster 148	148.01	19	3.15	15.75	4810	0.224	407
Aster 228	227.83	37	2.8	19.6	7405	0.146	627
Aster 288	288.34	37	3.15	22.05	9370	0.115	794
Aster 366	366.22	37	3.55	24.85	11535	0.0905	1009
Aster 570	570.22	61	3.45	31.05	18530	0.0583	1574
Aster 1144	1143.51	91	4.0	44	36020	0.0292	3164
Aster 1600	1595.93	127	4.0	52	50270	0.0206	4425

### 5. Durcissement structural dans les alliages Al-Mg-Si

La série 6XXX contient des additions de magnésium et de silicium et parfois un peu de cuivre, de chrome ou de manganèse. Les alliages sont fait pour à obtenue les plus grands niveaux de résistance par la précipitation de la phase Mg<sub>2</sub>Si [11].

Le diagramme d'équilibre de la figure I.3 est une coupe de diagramme ternaire Al Mg-Si pour un rapport atomique Mg/Si = 2. Le composé Mg<sub>2</sub>Si peut être considéré comme un composé simple. Le durcissement est dû à la précipitation de phases transitoires de Mg<sub>2</sub>Si [10].

La température de cet eutectique appelé pseudo binaire est de 595 °C. La composition du liquide eutectique est de 8,15 % poids Mg et de 4,75 % poids Si en équilibre, avec une solution solide d'aluminium contenant 1,13 % poids Mg et 0,67 % poids Si (pour un total d'environ 1,85 % poids Mg<sub>2</sub>Si)[7].



**Figure I.3 :**Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg<sub>2</sub>Si, coupe pseudo binaire[7].

Les alliages aluminium-magnésium-silicium de la série 6000, à durcissement structural, ont un poids industriel important, en particulier dans le domaine des produits obtenus par filage : 80 % des alliages d'aluminium utilisés dans le monde pour la fabrication des profilés filés appartiennent à cette série [12].

### 5.1.La séquence de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si

On obtient le durcissement par précipitation (structural) grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés, c'est-à-dire grâce à des traitements thermiques dont le but final est l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice. Les propriétés mécaniques des alliages ainsi traités dépendent de la répartition des précipités et de leur taille. Les dislocations qui doivent franchir les précipités permettent la déformation macroscopique du matériau. Le type de franchissement est fonction de l'interface entre le précipité et la matrice : Dans le cas de précipités cohérents ou semi cohérents, ce qui est souvent le cas pour des précipités de petite taille, ils peuvent être cisailés. Le durcissement est obtenu à la fois par des effets élastiques et des effets chimiques [13].

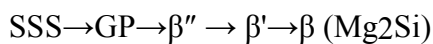
Dans le cas de précipités incohérents ou de grande taille, il est plus favorable pour les dislocations de contourner les précipités. C'est le mécanisme d'Orowan. Le durcissement est

ici fonction de la distance inter-précipitée. Il existe une transition entre les deux régimes qui correspond au pic de dureté obtenu pendant un recuit isotherme.

Le mécanisme de durcissement de l'alliage par précipitation entraîne la formation d'amas cohérents d'atomes de soluté, c'est-à-dire que les atomes de soluté rassemblés dans un amas doivent toujours avoir la même structure cristalline que la phase du solvant. Ceci crée alors beaucoup de distorsions, car les paramètres cristallins des précipités peuvent être légèrement différents de ceux de la matrice du métal. Conséquemment, la présence de ces particules de précipités procure une plus grande résistance en obstruant et en retardant le mouvement des dislocations [14].

## 5.2. Mécanisme de durcissement structural dans les alliages d'aluminium

La séquence générale de ces alliages est la suivante [18-19] :



➤ (SSS): solution solide sur saturée de l'amatrice  $\alpha$ -aluminium.

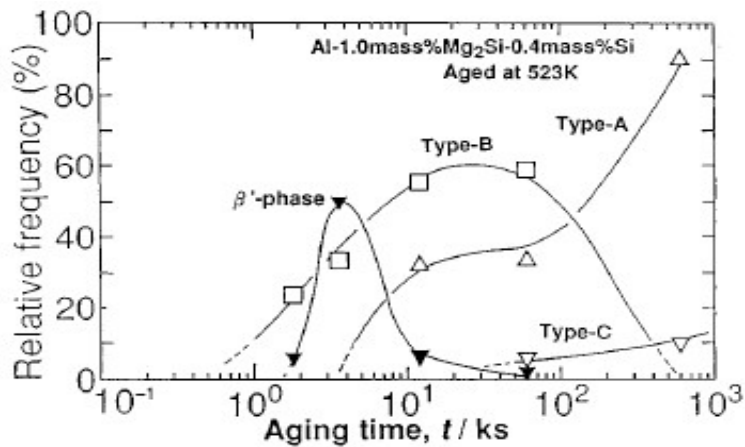
➤ GP: zones Guiner Preston apparemment de forme sphériques avec des structures inconnues.

➤  $\beta''$ : Précipités sous forme d'aiguilles allongés le long des directions  $\langle 100 \rangle_{Al}$  ayant des structures monocliniques, où différentes valeurs de paramètres de réseau cristallin ont été rapportés [15-16].

➤  $\beta'$ : Précipités sous forme de bâtonnets allongés le long de la direction  $\langle 100 \rangle_{Al}$  ayant une structure cristalline hexagonale [17].

$\beta$ : Phase d'équilibre  $\beta$  (Mg<sub>2</sub>Si) sous forme de petites plaquettes sur les plans {100} de la matrice  $\alpha$ -aluminium et ayant une structure CFC [18].

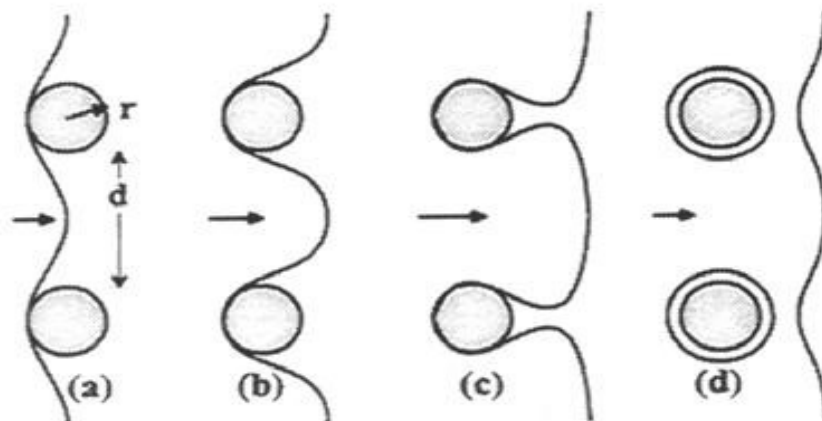
La Figure I.4. Montre l'influence du temps de vieillissement sur la proportion des différents précipités. Les précipités de type C apparaissent de façon hétérogène en cas de sur vieillissement. Les précipités  $\beta'$  et ceux de type B précipitent au même stade de vieillissement mais les précipités  $\beta'$  se dissolvent plus rapidement. L'augmentation de la fréquence des précipités de type A est accompagnée de la dissolution des précipités métastables de type B. Ces séquences de précipitation supplémentaires semblent se produire en cas d'excès de silicium au sein du matériau.



**Figure I.4:** influence du vieillissement sur la proportion des différents précipités [19].

Le durcissement par la solution solide que provoque la solution figée, immédiatement après la trempe, augmente avec la concentration de l'élément en solution. Les petites particules qui se forment provoquent un mécanisme de durcissement

- Contournement des précipités
- Lorsque les particules sont plus dures que la matrice (solution solide résiduelle ou Al presque pur), les dislocations ne peuvent pas pénétrer les précipités. Elles sont obligées de les contourner (mécanisme d'Orowan fig. I.5).

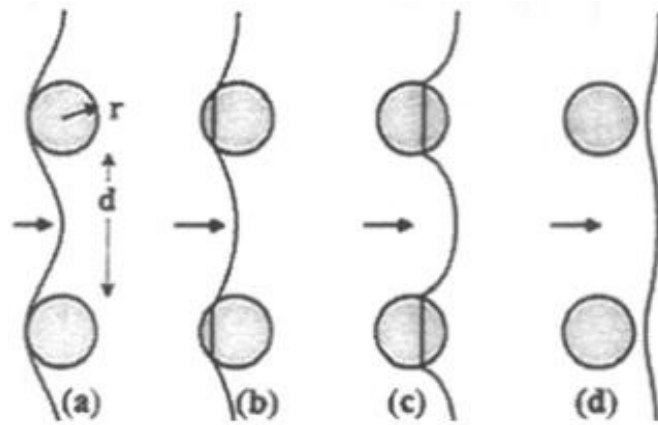


**Figure I.5 :**Interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement) [20].

- Cisaillement des précipités

Les zones GP naissant au début de la précipitation sont encore très petites et leur cohérence avec le réseau de la matrice permet un glissement sans déviation, sur un seul plan

cristallographique. Elles cèdent au cisaillement (fig. I.6) mais, leur résistance augmente avec leur taille et la progression de la transformation en particules tetragonales ( $\theta''$ ) et semi cohérentes ( $\theta'$ ). Le durcissement s'accroît jusqu'à ce que le contournement devienne  $\tau_c = \tau_p$ . C'est dans cet état que le durcissement est optimal. En effet, le revenu prolongé provoque une coalescence des zones GP et  $\theta'$ , et l'apparition d'autres phases avec des grains plus grossiers. Bien que cela fasse augmenter leur résistance, l'agrandissement de la séparation  $d$  facilite le contournement et adoucit le métal (survieillissement) [21].



**Figure I.6 :** Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisillables [21].

## 6. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les traitements thermiques ont pour but d'améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques d'un matériau.

Après une trempe les alliages d'aluminium (alliage de durcissement strural) ont la capacité de durcir naturellement. 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.

### 6.1. Les différentes étapes d'un traitement thermique :

#### 6.1.1. Mise en solution



La mise en solution tire avantage de la réaction du durcissement par précipitation tout en s'assurant d'avoir une solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (e.g. Cu, Mg, Si, Zn) dans la matrice. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez longue dans le but d'obtenir une solution solide homogène. Le tout permettant de bénéficier de la réaction du durcissement par précipitation [22]. Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450° C à 500° C pour l'aluminium et de 450° C à 500° C pour les alliages d'aluminium [23].

### 6.1.2. Trempe

Malgré sa très courte durée, la trempe est l'une des opérations les plus cruciales. effectuées lors d'un traitement thermique. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile ou dans des métaux en fusion à différents intervalles. Son but est tout d'abord de supprimer la formation de la phase à l'équilibre  $Mg_2Si$  pendant le refroidissement et de préserver la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide ( $\sim 260$  °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce [24]. La trempe consiste en un refroidissement suffisamment rapide de cette solution solide pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. L'état résultant est métastable : c'est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes

### 6.1.3. Maturation

Durant une période de maturation à température ambiante (ou vieillissement naturel), cette solution solide se décompose pour former les zones GP. Cette étape dure généralement plusieurs jours, et conduit à une augmentation notable de la dureté de l'alliage. Les lacunes apparues au moment de la trempe favorisent la cinétique d'apparition des zones GP.

### 6.1.4. Revenu

Un traitement thermique ultérieur à température modérée (100°C, 200°C), dit traitement de revenu ou vieillissement artificiel, conduit à un maximum de durcissement par apparition de phases métastables ( $\eta'$  dans le système Al-Zn-Mg) réparties de manière homogène dans les grains, de taille comprise typiquement entre 15 et 60 Å

## Références bibliographiques

- [1] MEROUCHI, B. Optimisation du revenu des fils en alliage d'aluminium tréfilés utilisés pour câbles électriques. Diplôme de master en génie mécanique. *Université-blida* (2015).
- [2] Thompson, G. E. Pôros anodique alumina: fabrication, caractérisation and applications. *Thin solide films*, (1997). 297(1-2), 192-201.
- [3] Abid, T. Etude calorimétrique et dilatométrique d'un alliage Al-Mg-Si. mémoire de Magister en Physique (2007).
- [4] LAUGHLIN, W. M. D. A differential scanning calorimetry study of aluminium alloy.6111 with différent pro-aging traitements. *Journal of Matériels science letters*19,(2000). J201-203.
- [5] Bayarassou, M. Effet des traitements de vieillissement sur l'évolution de la structure et les propriétés mécaniques des fils en alliages d'aluminium (AGS) tréfilés à L'ENICAB (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA) (2018).
- [6] Colombie, M. Albert, D. *Matériaux industriels: Matériaux métalliques*. Dunod (2000).
- [7] de Haas, M. J. Grain boundary phenomena and failure of aluminium alloys. Université Library Groningen (2001).
- [8] Bsen , B. 50183: 'Conductors for Overhead Lines—Aluminium magnésium-silicon alloy wires'. British Standards. (2000).
- [9] Chia , E.C. and, Schoerner. R. J, Method for manufacturing an aluminium alloy electrical conducator ,US-Patent,(1980). 12 No. 4, 234, 359.
- [10] Bousquet , J. L. Delomel JC. I, Loreau. B, Albert. D , " Compact Hlgh-Conductivity Conducators for Over-head Liens " (EuroWire - March) (1998).
- [11] Barralis, J. Mander, G. Précis de métallurgie, communications actives 5eme édition (Paris 1975). pp.11-14.
- [12] Cahn, R.W, Haasen. P, *Physical Metallurgy*, Tome III , North Holland. (1996) .p 2167,2172.
- [13] Hill, T. I/TEXTES. Bulletin de la Société d'Emulation du Bourbonnais).( 1990). (65), 194-204.
- [14] Massardier. C. V, Epicier. T, *Mater. Sci. Forum*, (2002). 396-402. 851- 856.
- [15] X Wang, W. J. Poole, Esmaeili. S, Lloyd. Embryo, D. J, *Met. .J. D. t. Mater .Trans*, 34(A) (2003).2913-2918.
- [16] Esmaeili, S, Lloyd, D. J, & Poole, W. J. Modling of précipitation Hardenne for the naturally aged Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111. *Acta Matéria*lisa ,(2003).51(12), 3467-3481.

- [17] Lassance, N, & Vérins, F. Volatility Modelling in Option Pricing and its Impact on Payoff Replication Performance (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université Catholique de Louvain) (2015).
- [18] Develay, R, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, vol. M440, (1992). pp. 2-26.
- [19] Edwards, G. A, Stiller, K, Dunlop, G. L, Couper, M. J. The précipitation séquence in Al–Mg–Si alloys. Acta materialis, (1998). 46(11), 3893-3904.
- [20] Vargel, C. L'aluminium et la mer. Matériaux , Techniques.(1986) ,74(5-6), 233-245.
- [21] Hufnagel, W. Ed. Aluminium Zentrale Düsseldorf, Aluminium Verlag Düsseldorf . (1983).
- [22] Vyazovkin, S. Dollimore. D, Chem. J. Inf. Comput (1996). Sci, 36 .42-55.
- [23] Dupeux, M. Aide mémoire science des matériaux, Dunod, (Paris 1975). pp.105-148.
- [24] [dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6660/1/memoire.pdf](http://dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6660/1/memoire.pdf)

Chapitre II  
Déformation et tréfilage l'alliage de  
l'Aluminium

## 1. Introduction

Le procédé de mise en forme à froid connu sous le nom de tréfilage est de plus en plus important dans le domaine industriel, est appliqué sur plusieurs métaux et alliages comme le cuivre, l'aluminium (fils électrique) et les aciers en particulier les aciers doux.

## 2. Mécanisme de la Déformation plastique

La déformation plastique des métaux apparaît donc comme résultant de glissements irréversibles de certains plans cristallographiques les uns par rapport aux autres.

La contrainte appliquée ( $F/S_0$ ) n'est plus une contrainte de traction pure. L'état de contrainte plus complexe qui est présent consiste d'une part en une contrainte de traction (ou normale)  $\sigma$  qui agit perpendiculairement au plan de glissement, d'autre part, en une contrainte de cisson  $\tau$  qui agit parallèlement à ce plan.

(La figure. II.1) illustre la déformation d'une éprouvette de monocristal à laquelle est appliquée une contrainte de traction : le glissement se produit dans plusieurs plans et directions équivalents et les plus favorablement orientés, à divers endroits le long de l'éprouvette.

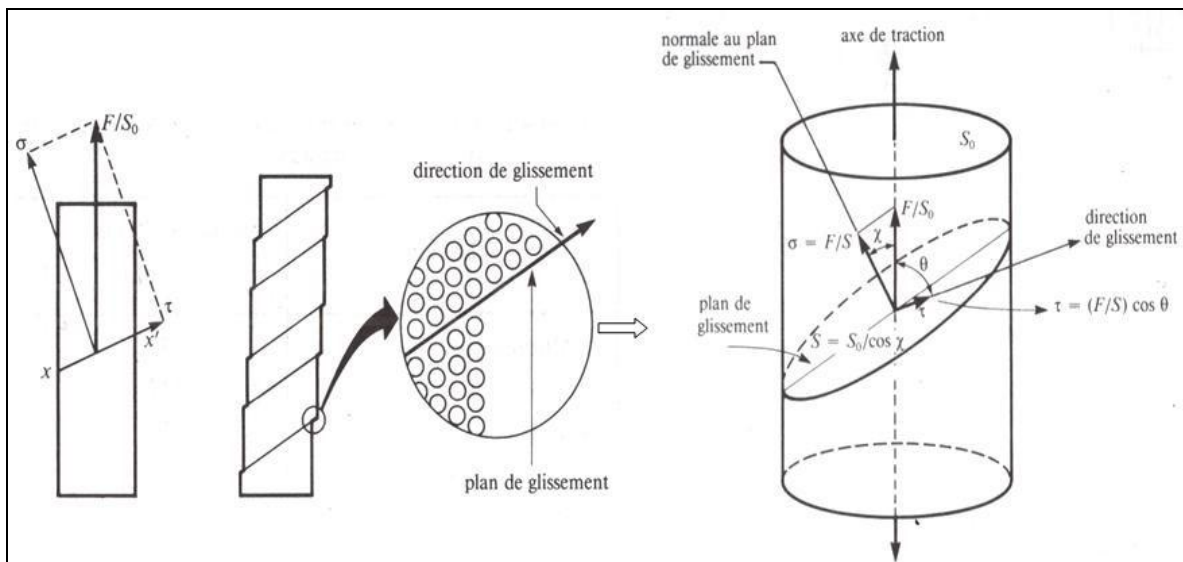


Figure. II .1: Schéma représentant les contraintes normale  $\sigma$  et de cisson  $\tau$ .

Un raisonnement géométrique simple permet de trouver que cette cission est déterminée par la relation :

$$\tau = \left(\frac{F}{S_0}\right) \cos \theta \cdot \cos \chi \dots\dots\dots(II.1).$$

Cette équation est connue sous le nom de loi de Schmid, et l'expression ( $\cos \theta \cdot \cos \chi$ ) est appelée facteur de Schmid.

Où  $S_0$  est la section droite de l'éprouvette,  $\chi$  l'angle formé par la normale au plan de glissement et l'axe de traction, et  $\theta$  l'angle formé par la direction de glissement et l'axe de traction.

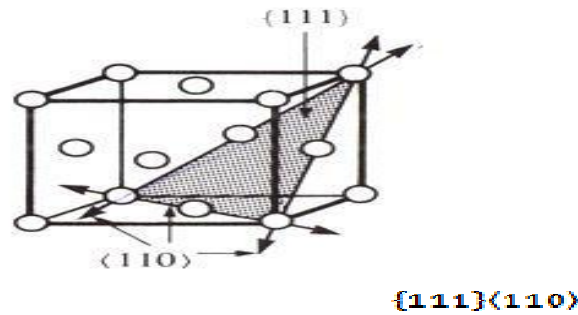
### 2.1. Déformation par glissement

Les dislocations ne se déplacent pas avec la même facilité dans tous les plans cristallographiques d'atomes ni dans toutes les directions cristallographiques. Il existe généralement un plan plus occasion que les autres. Ce plan est le plan de glissement.

Prenons comme exemple la structure cristalline cubique à face centrées (c.f.c), comme l'aluminium, dont une maille élémentaire est représentée à la (Figure. II.2) En fait, les plans de glissement se révèlent presque toujours être les plans de plus

forte densité atomique, et les directions de glissement sont les directions cristallographiques les plus denses, comme l'indique les flèches à la figure(II.2) . Ainsi,  $\{111\}\langle 110 \rangle$  représente l'ensemble du plan de glissement et de la direction de glissement, soit le système de glissement pour la structure c.f.c. Le tableau II .1 donne les systèmes de glissement possibles des différentes structures [1].

Les métaux à structure cristalline c.f.c ou c.c possèdent un assez grande nombre de système de glissement (soit au moins 12). Ces métaux sont très ductiles, car une déformation plastique prononcée est généralement possible dans les divers systèmes.



**Figure .II.2:** Système glissement dans une maille élémentaire c.f.c

Toutes les dislocations dans un matériau ne sont pas mobiles. Des analyses microscopiques d'échantillons déformés montrent d'ailleurs que les glissements de dislocations se produisent généralement dans des plans bien déterminés de la maille cristalline. En fait, les plans de glissement se révèlent presque toujours être les plans de plus forte densité atomique, et les directions de glissement les directions cristallographiques les plus denses. Le tableau (II.1) présente quelques-uns des principaux systèmes de glissement observés.

**Tableau II.1:** Principaux systèmes de glissement observés [2.3].

Structure cristalline	Plans de glissement	Directions de glissement
cubique faces centrées (c.f.c.)	{111}	<110>
cubique centré (c.c.)	{110}, {112}, {123}	<111>
hexagonal compact (h.c.)	{0001}	<11-20>

## 2.2. Déformation par maillage

Le maillage, peut également jouer un rôle important dans la déformation plastique de certains matériaux (Figure. II.3) une partie du cristal est ainsi cisailée entre deux plans qui vont former les interfaces avec la partie non déformée. Le taux de cisaillement induit est donné par la géométrie du système de maillage (plan et direction cristallographiques).

Le glissement et le maclage sont les deux principaux mécanismes permettant d'accommoder la déformation plastique, alors que le glissement produit des déplacements qui sont des entiers multiples de la distance interatomique, lors du maclage les atomes se déplacent de moins d'une distance interatomique.

L'importance du maclage sur la déformation totale est particulièrement marquée dans les matériaux où le nombre de systèmes de glissement est réduit, comme ceux de structure hexagonale compacte.

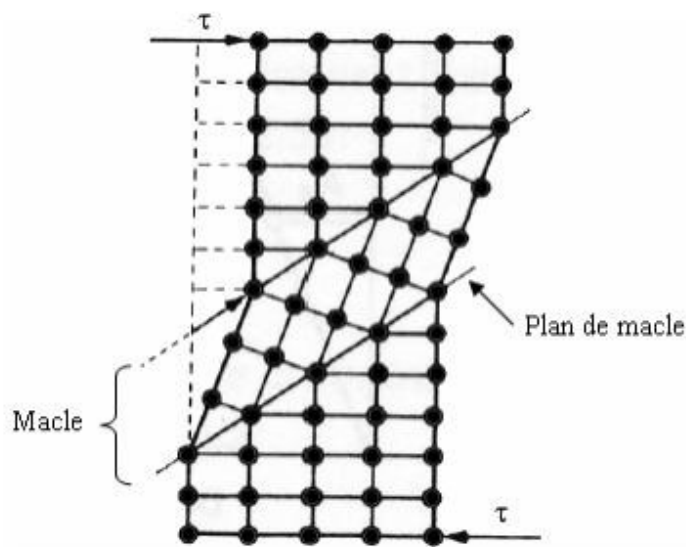


Figure.II.3: Représentation schématique d'une maclure mécanique.

### 3. Définition de tréfilage

Le tréfilage est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, par déformation plastique, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'effet combiné d'application d'un effort de traction et d'un effort radial de compression et en présence d'un lubrifiant, cette déformation s'obtient par glissement suivant certains plans et direction de glissement grâce au déplacement de dislocation. Après déformation, une partie de ces dislocations reste piégée à l'intérieur des grains. Dans ce cas, la structure est dite écrouis et les propriétés du métal sont modifiées. Le tréfilage a pour effet de durcir le métal et de diminuer ses possibilités de déformation ultérieure. Voilà pourquoi on est amené à recuire le métal soit



pour poursuivre le tréfilage à froid, soit pour redonner aux produits finis des propriétés de plasticité suffisante [4].

La technique du tréfilage, en tant que procédé de mise en forme d'un matériau donné, est caractérisée par différents paramètres, à savoir la vitesse et température de tréfilage, la géométrie des filières et les conditions de frottement, mais également par la structure et les propriétés du matériau qui déterminent sa capacité à subir une déformation élevée en tréfilage.

Les applications des produits mise en œuvre par cette technique, qui peut être utilisés en soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatiques....ets [5].



**Figure. II.4 :** ligne de tréfilage.

### 3.1. Principe de tréfilage

Dans une opération de tréfilage, un fil de diamètre  $D_i$  préalablement appointé est tiré à travers une filière ayant un diamètre de col  $D_f$  inférieur à  $D_i$  au cours de laquelle la contrainte de traction se superpose avec la compression latérale par l'inclinaison des parois et le frottement, on dit que le fil à la sortie de la filière est tréfilé (Figure II.5) [6].

On peut définir l'aptitude au tréfilage du fil machine par la réduction de section ( $\epsilon\%$ ) ou par son allongement ( $A\%$ ) qui diminue jusqu'à ce qu'il devient très difficile de pour suivre la déformation, on définit ( $\epsilon\%$ ) et ( $A\%$ ) :

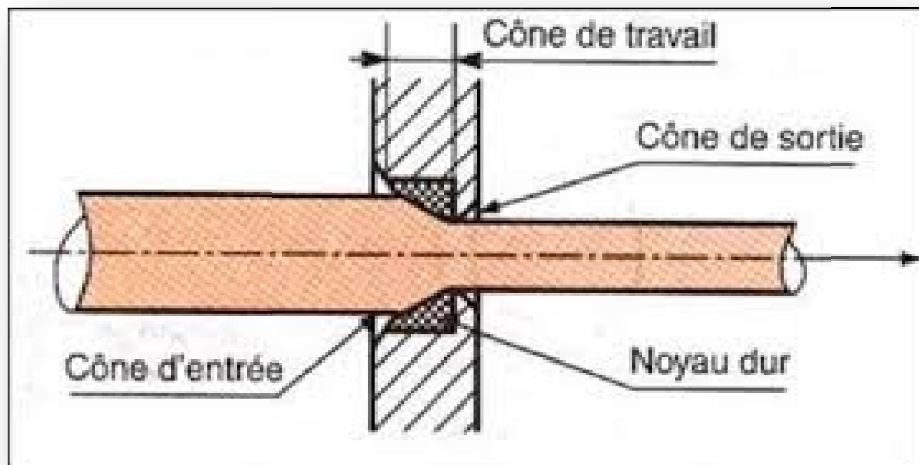
$$\epsilon\% = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \dots\dots\dots \text{II.1}$$

$$A\% = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \dots\dots\dots \text{II.2}$$

Avec :

$S_i$  : Section de fil avant le tréfilage.

$S_f$  : Section de fil après le tréfilage.



**Figure .II.5 :** Schéma de principe de tréfilage.

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 ; par action chimique (décapage), mécanique (décalaminage) ou action combinée des deux [7].

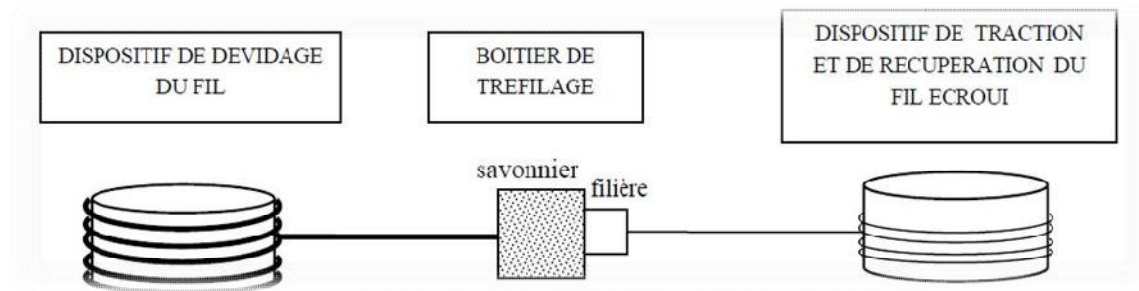
#### 4. Outils et équipement industriels de tréfilage

L'ensemble du matériel de tréfilage comporte trois éléments, schématisés (figure II.6)

- Un dispositif de dévidage du fil,
- Une tréfileuse ou multi passes,

- Un dispositif de récupération du fil écroui,

Dans une machine de tréfilage multi passe, le fil est tracté, entre chaque filière, par des cônes (cabestans) qui transmettent la force nécessaire au tréfilage par frottement.



**Figure II.6:**Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe)

Le fil provision, à l'entrée de la tréfileuse (Figure II.7) passe par un outil (filière). A la sortie d'une filière le fil est enroulé autour du cabestan afin de le tracer. Quand l'effort de traction nécessaire au passage dans l'outil est atteint, le fil se tend et se déplace à la même vitesse que celle du cabestan, en absence de glissement.



**Figure II .7 :** Machine de tréfileuses d'aluminium AGS (ENICAB Biskra).

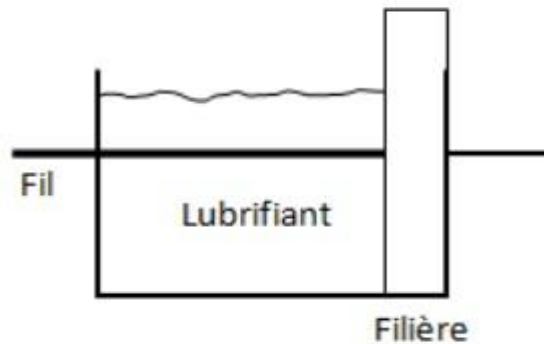
#### 4.1. Lubrifiant

Il joue un rôle essentiel étant donné les pressions très élevées que subit le fil lors de sa réduction. Ses fonctions sont :

- De limiter les frottements entre le fil et la filière et ainsi diminuer les contraintes lors du tréfilage
- D'améliorer l'état de surface du fil.
- D'évacuer les éventuels déchets à l'entrée de la filière.

- De refroidir la filière pour éviter sa déformation thermique et réduire son usure pour parvenir à satisfaire toutes ces conditions, il doit posséder une bonne résistance à la température et à la pression ainsi qu'une stabilité chimique dans le temps.

Le fil, les filières, et les cabestans sont complètement immergé (ou arrosés) dans un bain d'huile (Figure II.8) ou d'émulsion d'huile qui joue le rôle de lubrifiant et échangeur thermique.



**Figure II.8 :** Schéma d'une méthode de lubrification .

Dans le cas du tréfilage à sec, ce sont des « savons secs métalliques » qui sont utilisés. Issus d'une réaction de saponification, les lubrifiants industriels sont en fait des mélanges complexes de matières grasses, de charges minérales, d'additifs variés et de produits réactionnels. Un bon lubrifiant est un savon qui favorise la formation d'un film superficiel suffisamment épaisse homogène pour éviter toute interaction directe entre la filière et le fil (FigureII.9).



**Figure : II.9 :** boîte à savon (ENICAB Biskra).

#### 4.2.Outil de mise en forme : la Filière

Elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, qui assure la réduction du diamètre du fil et une monture en acier qui maintient le noyau et lui permet de résister aux fortes pressions développées au cours du tréfilage Figure (II.10.a)

La surface intérieure est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrices généralement rectilignes :

- Le cône d'entrée, permettant l'entraînement du lubrifiant ;
- Le cône de travail, partie essentielle dans laquelle le métal subit sa déformation par compression, et caractérisé par un angle au sommet  $2\alpha$  ; Figure(II.10.b)
- La portée cylindrique, dont la longueur est comprise entre  $1/3$  et  $1/2$  du diamètre à obtenir, elle guide le fil après avoir été déformé ;
  - Un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant.
- Le plus souvent le tréfilage des gros fils se fait avec des filières en carbure de tungstène allié au cobalt .Pour les fils plus fins, ce sont des filières diamant (de géométrie différente) qui sont plutôt utilisées sauf dans le cas du cuivre qui se tréfile avec ce type de filière même pour les diamètres importants. La durée de vie de ces filières est plus importante que celle des filières en carbure, mais leur coût est nettement plus élevé. Le matériau de filière se dégrade au cours l'opération du tréfilage et l'endommagement peut provenir d'une usure par fatigue ou d'une usure abrasive liée à une mauvaise lubrification .la durée de vie d'une filière est conditionnée par de nombreux facteurs : la nuance du métal, la préparation de surface du fil, état de surface du fil machine (rugosité), nature et forme de la filière, le refroidissement, le lubrifiant et la vitesse de tréfilage



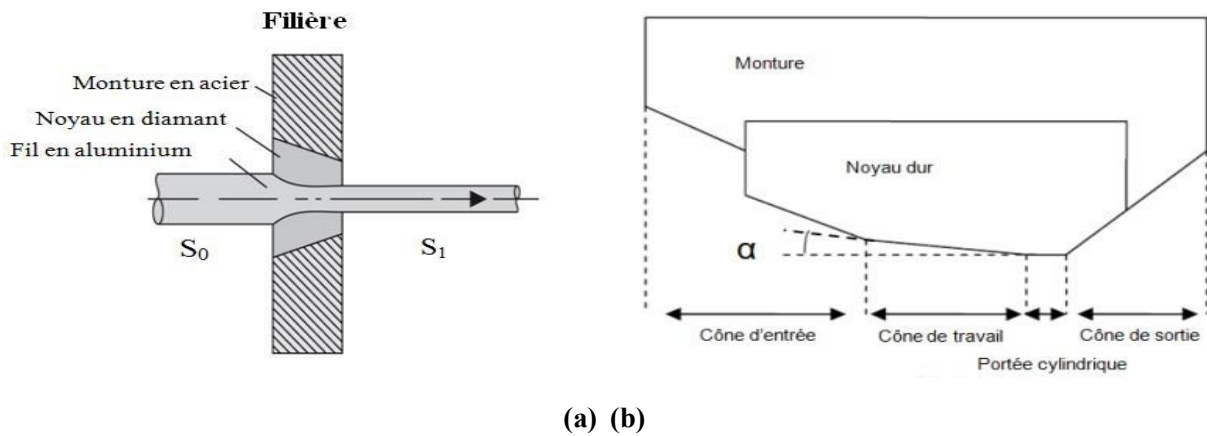


Figure II.10 : schéma d'une filière de tréfilage.

## 5. machines de tréfilage

### 5.1. La machina 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.

### 5.2. Les machines multiples

Elles permettent des réductions de section importantes grâce à un enchaînement de filières. Il existe trois types de machines multiples [8].

#### 5.2.1. 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[7].

### 5.2.2. Les machine 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.

### 5.2.3. Les machine à glissement

Dans ces machines dédiées au tréfilage humide, 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.

## 6. Matériaux mis en forme

### 6.1. Classification des fils

Les fils métalliques peuvent, en général, être classés en quatre catégorie suivant leur diamètre (tableau II.2 ) [9].

**Tableau: II.2** : Classification des fils suivant leurs diamètres .

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



### Références bibliographiques

- [1] Chenal, B. Écrouissage d'alliages d'aluminium. Ed. Techniques Ingénieur (1999). .M230. P1 .
- [2] ABDELATIF, B. Comportement des fils métalliques lors d'un essai de fluage (Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider) (2014).
- [3] Richeton, T. Dynamique et complexité de la déformation plastique: étude par émission acoustique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG) (2006).
- [4] Laverroux, M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. Revue de Métallurgie) (1993), 90(10), 1293-1302.
- [5] Simonnet, G. Tréfilage de l'acier M645. Traité des matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur (1996), 2-11.
- [6] Maurice, C et Driver. J.H. Acta Métal (1993). V41, P41, P1653 .
- [7] Levrau, C. Thèse de doctorat, Ecole des mines de paris (2006).
- [8] Callister, W. D. Science et génie des matériaux (2001).
- [9] Ning, YU. LE ROY, J. P. Tréfilage des fils cuivreux ultra-fins. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques) (1995), (M646), M646-1.

# Chapitre III

## Résultats et Interprétation

## 1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble de techniques expérimentales d'investigation utilisées par les travaux antérieurs pour la caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés d'alliage AGS et de faire une synthèse sur les travaux de recherche réalisés sur l'effet des traitements thermiques sur leurs propriétés mécaniques et électriques.

## 2. Techniques de caractérisation

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre, sont obtenus par différentes techniques expérimentales telles que la diffraction des rayons X, la mesure de micro dureté, essai de traction et la mesure de résistivité électrique.

### 2.1. 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.

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 [1].

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin(\theta) \dots\dots\dots (III.1)$$

### 2.2. Micro dureté

Elle permet la mesure de la dureté des matériaux sans les endommager. La dureté d'un métal est définie comme la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible.

La micro dureté Vickers consiste à enfoncer un pénétrateur en diamant de forme pyramidale droite à base carrée et d'angle au sommet de  $136^\circ$  comme montré par la figure (III.1).

La machine d'essai est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et un microscope métallographique. Par la mesure des deux diagonales de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge, on peut avoir les valeurs de la micro-dureté [2].

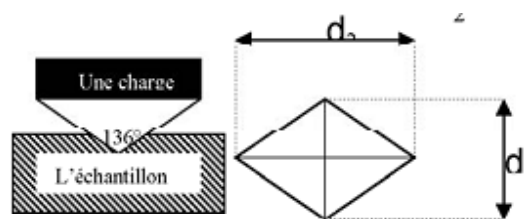


Figure. III.1: Représentation schématique de l'essai de Vickers.

La micro dureté Vickers HV est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,854(F/d^2) \dots \dots \dots (III.2)$$

Avec :

**d (µm) : la moyenne des diagonales de l'empreinte carrée;**

**F (N) : la force appliquée.**

### 2.3. Essai de traction

L'essai de traction est le procédé expérimental le largement plus utilisé dans l'étude du comportement mécanique des métaux et alliages. Il consiste à appliquer à une éprouvette, un effort de traction et à mesurer l'allongement correspondant, ou bien à imposer un allongement et à mesurer l'effort de traction.

Dans une machine d'essai de traction, les éprouvettes sont solidement maintenues par leur tête entre les mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre,

exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette de telle manière que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités.

La vitesse de traction doit être bien déterminée au préalable, pour cela il faut consulter les normes relatives à l'exécution de l'essai de traction.

Les essais de traction présentés dans ce chapitre sont réalisés par une machine de type **Zwick/Roell (Z 100)** au laboratoire de l'entreprise EN.I.C.A.B de Biskra, la machine est connectée à un micro-ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données. Les éprouvettes sont des fils tréfilés [2].



**Figure III.2:** La machine de traction Zwick/Roell (Z 100).

Des appareils adaptés à la machine, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et l'allongement correspondant de l'éprouvette.

Les différents domaines de la courbe de traction sont :

- La phase élastique.
- La phase plastique.
- La phase de striction.
- La rupture.

Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles.

Les principales valeurs caractéristiques de traction que nous pouvons en déduire sont donc :

**a) Limite élastique  $R_e$**

C'est l'effort de la limite élastique  $F_e$  divisé par la section initial  $S_0$  de l'éprouvette

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \dots\dots\dots(III.3)$$

**b) Résistance à la rupture  $R_r$**

C'est le quotient de l'effort de rupture  $F_r$  divisé par la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette.

$$R_r = \frac{F_r}{S_0} \dots\dots\dots(III.4)$$

**c) Allongement à la rupture  $A\%$**

L'allongement maximum de rupture  $L_r$  est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture  $L_u$  et avant l'essai  $L_0$ .

$$L_r = L_u - L_0 \dots\dots\dots (III.5)$$

D'où

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \dots\dots\dots (III.6)$$

**2.4. Mesure de résistivité électrique**

Les mesures de résistivité électrique présentées dans ce chapitre ont été faites sur un pont de marque Résistoma de type 2303. Ces techniques dépendent dans une certaine mesure de la géométrie de l'échantillon.

Pour les fils, on utilise pour déterminer la résistance une source de courant stable fournissant un courant régulier connu et deux sondes mesurant la chute de tension entre les deux

points dont l'espace est exactement connu (110 cm) . Grâce à cela, cette résistance peut être convertie en résistivité.

La résistivité électrique est calculée par l'équation suivante :

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = R \cdot S / L \left( \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \dots\dots\dots \text{(III.7)}$$

R : résistance électrique ( $\Omega$ )

S : section du fil électrique ( $\text{mm}^2$ )

L : longueur du fil électrique (cm).

Si la température de l'atmosphère (ambiante) est différente à la température de référence  $20^{\circ}\text{C}$ , on multiplie par un facteur de correction de température K spécifique pour l'alliage Al-Mg-Si [3].

### 3. Synthèse des travaux réalisés sur les fils tréfilés en alliage AGS

#### 3.1. Caractérisation du fil machine en alliage d'aluminium AGS à l'état initial

##### 3.1.1. Composition chimique du fil machine

L'analyse chimique du fil machine d'alliage d'aluminium  $\varnothing = 9.5\text{mm}$  est représenté sur le tableau( III.1) [4].

**Tableau .III.1:** Composition chimique du fil machine [4].

élément	AL	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr	V	GA
Fil machine	98.42	0.672	0.601	0.247	0.021	0.002	0.001	0.007	0.001	0.009	0.011

Les valeurs correspondent bien à un alliage d'AL-Si-Mg de la série 6000, plus précisément la série 6101 [4].

##### 3.1.2. Propriétés structurales par diffraction des rayonsX

Hadid a réalisé une étude structurales par diffraction des rayonsX des fils machine d'alliage d'aluminium ,Le spectre de diffraction des rayons X de ce fil est représenté sur la figure III.3Selon les fiches ASTM, les pics enregistrés correspondent à la structure de la matrice  $\alpha$  - aluminium (C.F.C.).

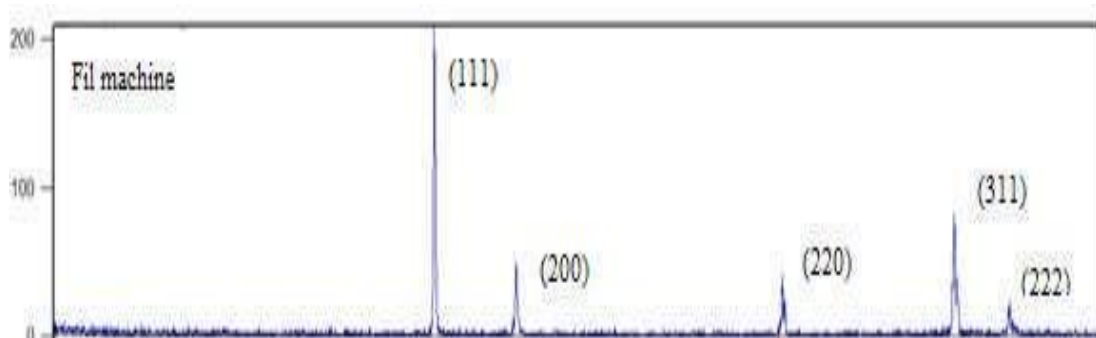


Figure III.3: Spectre de rayon X du fil machine d'alliage d'aluminium [2].

### 3.1.2. Propriétés électriques

Merouchi a mesuré les propriétés électriques des fils machine d'alliage d'aluminium AGS dont les résultats sont les suivants:

La valeur de la résistance électrique linéique en  $\Omega/\text{Km}$  est représentée sur le tableau (III.2)

Tableau .III.2: résistance linéique du fil machine .

Elément	Diamètre (mm)	Résistance électrique linéique $R_L$ ( $\Omega/\text{km}$ )
Fil machine	9,36	0.44

Les résultats correspondant aux résistivités  $\rho$  et conductivités  $\sigma$  sont données dans le tableau (III.3) [4].

Tableau III.3 : Résistivités et conductivités électriques du fil machine.



Elément	Diamètre (mm)	S (m <sup>2</sup> ).10 <sup>-6</sup>	$\rho$ ( $\Omega$ .m).10 <sup>-6</sup>	$\sigma$ ( $\Omega$ .m) <sup>-1</sup> .10 <sup>-6</sup>
Fil machine	9,36	68.77	0.0302	33.33

### 3.1.2. Propriétés mécaniques

Merouchi a déterminé les propriétés mécaniques des fils machine d'alliage d'aluminium AGS. Les résultats sont les suivants:

#### a) Essai de traction

Le tableau( III.4), donne les caractéristiques mécaniques du fil machine déterminés à partir de la courbe de traction [4] .

**Tableau III.4:**Caractéristiques mécaniques du fil machine .

Elément	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	Re0.2(MPa)	Rm(MPa)
Fil machine	207,61	12.5	1466,24	68,812	9,36	174.38	213.08

Ces résultats montrent que le fil machine est ductile et de faible résistance mécanique ce qui permet de faciliter la production des fils fins par tréfilage. En comparaison avec des données bibliographiques concernant le même alliage 6101 à l'état T4 les valeurs de A %, est plus faible, et R<sub>m</sub> est plus élevé, comme le montre le tableau (III.5).

**Tableau III.5:** Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage 6101 [5].

Etat thermique	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>100</sub> (%)
T4	150-175	23
T6	220	15

## b) La dureté

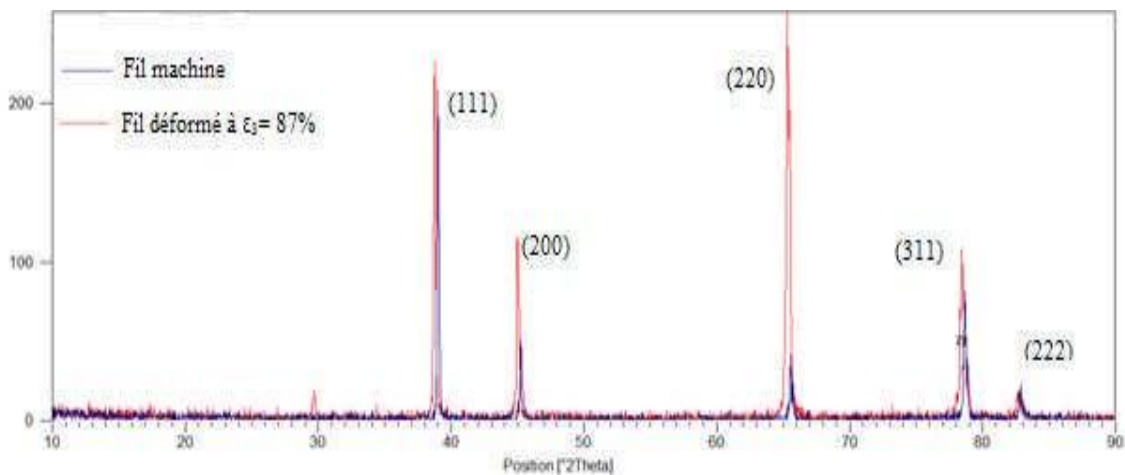
L'essai de dureté effectué sur un échantillon de fil machine, a donné une valeur moyenne de 54 HB [4].

### 3.2. Caractérisation des fils machine tréfilés avant revenu

#### 3.2.1. Propriétés structurales par diffraction des rayons X

Hadid a réalisé une étude structurale par diffraction des rayons X sur fil machine d'alliage d'aluminium AGS tréfilé avant revenu.

La figure III.4, regroupe les spectres du fil machine avant déformation et le fil tréfilé à froid déformé à 87%. On doit noter que parmi les conséquences immédiates de la déformation, la variation notable dans l'intensité des pics des spectres de diffraction. Hadid a remarqué que presque tout les pics tendent de manière générale à augmenter d'intensité tels que (111), (200), (220) et (311), par contre l'intensité d'autres pics (222) tend à diminuer (figure III.4) ; cela peut être expliquer par la tendance des domaines diffractant ( les grains ou les cristallites) à s'orienter dans une direction privilégiée, et à former une certaine texture de tréfilage.



**Figure III.4:** Comparaison entre les Spectre de rayon X du fil machine et du fil déformé à  $\epsilon = 87\%$  [2].

Les pics enregistrés après la diffraction des rayons X, du matériau étudié à l'état de réception et après la déformation, correspondent à la structure de la matrice  $\alpha$ -aluminium.

### 3.2.2. Propriétés électriques

Merouchi a déterminé les propriétés électriques des fils d'alliage d'aluminium AGS tréfilés avant revenu. Les résultats sont les suivants:

Le fil tréfilé possède un taux de réduction de 85%. La valeur de la résistance électrique linéique en  $\Omega/\text{Km}$  est donnée sur le tableau ( III.6) [4].

**Tableau III.6:** Résistance linéique de fil tréfilé avant revenu

Elément	D (mm)	résistance électrique linéique ( $\Omega/\text{km}$ )
fil tréfilé avant revenu	3,552	3.4837

Les valeurs calculées correspondant aux résistivités  $\rho$  et conductivités électriques  $\sigma$  calculée du fil tréfilé avant revenu sont données dans le tableau( III.7) [4].

**Tableau III.7:** Résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu

Elément	D (mm)	S ( $\text{m}^2$ ). $10^{-6}$	$\rho$ ( $\Omega.\text{m}$ ). $10^{-6}$	$\sigma$ ( $\Omega.\text{m}$ ) $^{-1}.$ $10^{-6}$
Fil tréfilé avant revenue	3,552	9.904	0.0345	28.98

En comparant avec le fil machine on constate une augmentation de la résistivité électrique et une diminution de la conductivité électrique après tréfilage. La matière subit un écrouissage très important qui influence fortement la microstructure finale. La multiplication des dislocations entraînées par la déformation plastique est un obstacle au déplacement des électrons de conduction ce qui augmente la résistance électrique du matériau.

Aussi, Hadid a réalisé dans son travail une étude de comportement des fils tréfilés en alliage AGS .Le tableau suivant présente l'évolution de la résistivité des fils en fonction de la déformation [2].

**Tableau III.8:**L'évolution des caractéristiques électriques des fils en alliage AGS en fonction du taux de déformation ( $\epsilon$  %).

Diamètres des fils $\varnothing$ (mm)		Taux de déformation $\epsilon$ (%)	Résistivité électrique ( $\Omega$ .mm <sup>2</sup> /m)
Fil- Machine	9,5	0	0,03271
1 <sup>ère</sup> passe	8,43	21	0,03362
5 <sup>ème</sup> passe	5,29	69	0,03494
9 <sup>ème</sup> passe	3,45	87	0,03508

### 3.2.3. Propriétés mécaniques

Merouchi Benali a réalisé dans leur travail une étude sur les propriétés mécaniques des fils d'alliage d'aluminium AGS tréfilés avant revenu [4].

Les résultats sont donnés dans le tableau ( III.9) [4].

**Tableau III.9:** Caractéristiques mécaniques de fil tréfilé en alliage AGS avant revenu

Elément	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	Re <sub>0.02</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)
Fil machine	300.675	05	303.818	9.904	3.552	292.81	306.76

On constate que la résistance mécanique a augmenté après le tréfilage ce qui est normal car le tréfilage entraîne une déformation plastique qui est accompagnée d'une multiplication des dislocations. Ces dernières entraînent le durcissement du matériau : R<sub>m</sub> passe de 213 à 306MPa et la diminution de la ductilité puisque A% passe de 12.5 pour le fil machine à 5%.

En revanche, Hadid a réalisé dans sur travail une étude de comportement des fils tréfilés en alliage AGS. Le tableau ci-dessous présente l'évolution des propriétés mécaniques des fils en fonction de ladéformation [2].

**Tableau III.10:**L'évolution des caractéristiques mécaniques des fils en fonction du taux de déformation ( $\epsilon$  %).

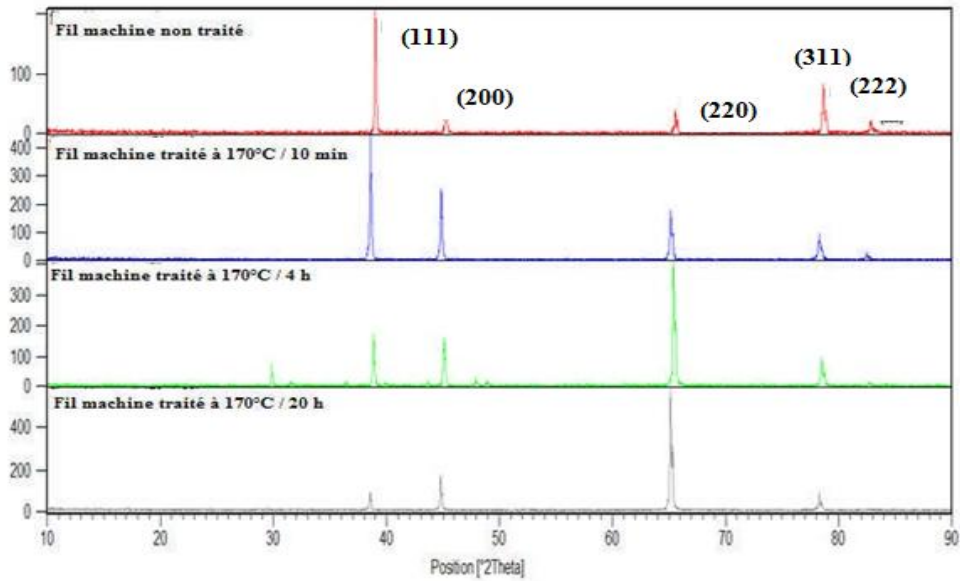
Diamètres des fils $\phi$ (mm)		Taux de déformation $\epsilon$ (%)	Charge à la rupture $R_m$ (MPa)	Microdureté (HV)	Allongement A(%)
Fil-machine	9,5	0	235	71	15
1 <sup>ere</sup> passe	8,43	21	304	89	9
5 <sup>eme</sup> passe	5,29	69	320	97	6
9 <sup>eme</sup> passe	3,45	87	362	111	4

### 3.3. Caractérisation des fils tréfilés en alliage AGS après revenu

#### 3.3.1. Propriétés structurales par diffraction des rayonsX

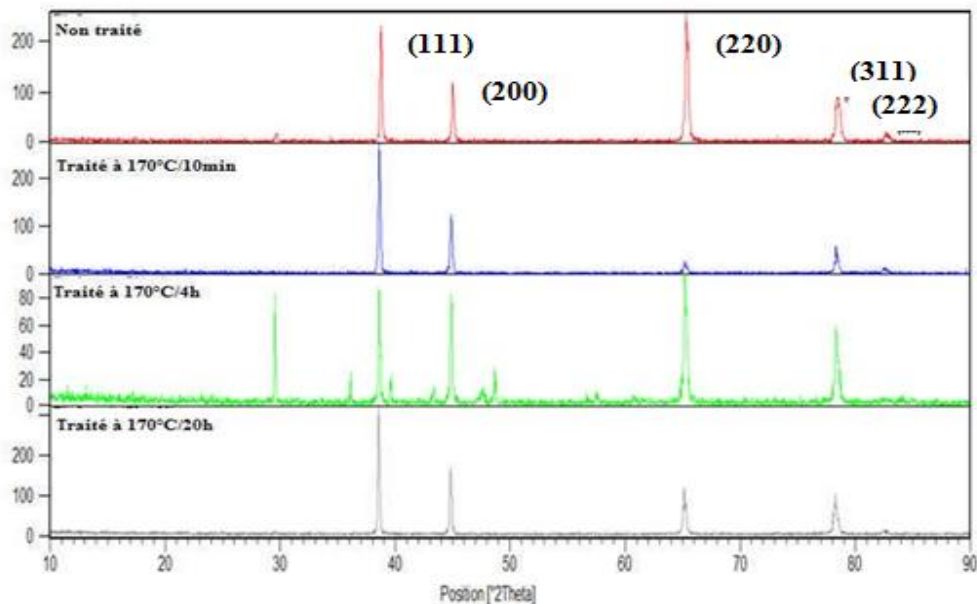
Hadid a réalisé un traitement de revenu sur le fil machine à 170 °C pendant plusieurs temps de maintien (10 min, 4 h et 20 h).

La figure.III.5 regroupe les spectres DRX du fil machine avant et après revenu pendant plusieurs temps de maintien,(10 min, 4h et 20 h). On doit noter que parmi les conséquences immédiates du prolongement du temps de revenu, la variation notable dans l'intensité des pics. Il a remarqué que tous les pics tendent de manière générale à augmenter d'intensité puis ils diminuent. De même, il a observé qu'après 4heures de revenu à 170°C, l'apparition de plusieurs nouveaux pics dans plusieurs positions, tel que la position environ  $2\theta = 40.72^\circ$  qui correspond le pic (220) du précipité  $Mg_2Si$ , selon les fichiers ASTM. Cela signifie la formation des précipités au cours du traitement de revenu [2].



**Figure .III.5:** Diffraction de RX du fil machine traité à 170°C pendant 10 min, 4h et 20h[2].

Sur la figure (III.6), on trouve les spectres du fil déformé en alliage AGS à 87%, avant et après revenu pendant plusieurs temps de maintien (10 min, 4 h et 20 h). Il a remarqué que les deux pics (111) et (200) atteignent le maximum après 20 heures de revenu. Par contre les intensités des autres pics diminuent en fonction du temps de maintien.



**Figure .III.6:** Diffraction de RX du fil déformé à 87% et traité à 170°C pendant 10 min, 4h et 20h.

### 3.3.2 Propriétés mécaniques et électriques

#### a) Traitement de revenu à 160°C

Merouchi a réalisé un traitement de revenu sur le fil tréfilé d'alliage d'aluminium AGS à 160°C pendant plusieurs temps différents : 01h, 02h, 03h, 04h, 05h, 06h, et 07h.

Les valeurs des résistances électriques linéiques des fils tréfilés sont représentées sur le tableau III.11, pour les sept temps de revenu utilisés La résistance  $R_L$  prescrit (pour les  $D=3.55 \text{ mm}$ ) =  $3.30 \text{ } \Omega\text{Km}$ .

**Tableau III.11:** Résistance linéique de fil tréfilé en alliage AGS après revenu à 160°C.

Elément	Temps de revenu(h)	D (mm)	résistance électrique linéique ( $\Omega/\text{km}$ )
01	01 heures	3.551	3.4342
02	02 heures	3,552	3.3901
03	03 heures	3.551	3.3614
04	04 heures	3,549	3.3409
05	05 heures	3.549	3.3249
06	06 heures	3,550	3.3085= $R_L$ prescrit
07	07 heures	3.55	3.2901

Les résultants correspondants aux résistivités  $\rho$  et conductivités  $\sigma$  électriques du fil tréfilé après revenu à 160°C sont donnés dans les tableaux (III.12).

**Tableaux III.12:** Résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé en alliage AGS après revenu à 160°C

Elément	Temps de revenu (h)	D (mm)	S ( $10^{-6}m^2$ )	$\rho$ ( $\Omega.m$ ). $10^{-6}$	$\sigma$ ( $\Omega.m$ ) $^{-1}$ . $10^6$
01	01 heures	3.551	9.898	0.0339	29.49
02	02 heures	3,552	9.904	0.0335	29.85
03	03 heures	3.551	9.898	0.0332	30.12
04	04 heures	3,549	9.887	0.0330	30.30
05	05 heures	3.549	9.887	0.0328	30.48
06	06 heures	3,550	9.892	0.0327	30.58
07	07 heures	3.55	9.892	0.0326	30.67

Le tableau montre une diminution de la résistivité (augmentation de conductivité électrique) lorsque le temps de revenu augmente. Ceci est lié à la diminution du nombre des défauts créés par le tréfilage, au cours du traitement thermique.

Le tableau suivant représente les caractéristiques mécaniques des fils tréfilés après revenu, 01, 02, 03, 04, 05,06 et07h à 160°C [4].



**Tableau III.13:** Caractéristiques mécaniques des fils tréfilés en alliage AGS après revenu à 160° C [4].

Elément	Revenu(h)	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	Re0.02(MPa)	Rm(MPa)
1	01 heures	325.129	9.6	328,641	9.898	3.551	313.19	332.02
2	02 heures	332.713	9.1	336,451	9.904	3,552	323.10	339.71
3	03 heures	333.654	8.8	336,109	9.898	3.551	323.29	339.57
4	04 heures	334.557	7	337,482	9.887	3,549	330.73	341.33
5	05 heures	336.430	9.0	339,836	9.887	3.549	332.71	343.72
6	06 heures	335.395	9.0	339,181	9.892	3,550	333.60	342.88
7	07 heures	335.232	8.0	338,613	9.892	3.55	328.54	342.74

- $R_m$  augmente avec le temps de revenu jusqu'à 04 h correspondant à une diminution de l'allongement A%.
- Augmentation de la résistance mécanique, limite élastique et la contrainte à la rupture, ce qui est dû au durcissement structural de l'alliage au cours du revenu. Un traitement de 07 h et plus entraîne une diminution de la résistance mécanique ce qui ne convient pas à cette application.

#### b) Traitement de revenu à 190°C

Encore, Merouchi a réalisé un traitement de revenu sur le fil tréfilé d'alliage d'aluminium AGS à 190°C pendant 1, 2, et 3 h.

Le tableau (III.14) donne les résultats de la résistivité, conductivité électrique et des caractéristique mécanique en traction des fils tréfilés après revenu à 190°C

pendant 1, 2, et 3 h, on constate que  $R_m$  et  $\rho$  diminue après une heure de revenu (en dessous de la valeur du prescrit) [4]. Pour 2h et 3h, bien que la valeur de  $\rho$  est convenable,  $R_m$  et  $R_r$  sont inférieure au prescrit.

**Tableau III.14 :** Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C [4].

Temps(h)	S (mm) <sup>2</sup>	D (mm)	R <sub>L</sub> (Ω/km)	$\rho$ (Ω.m) 10 <sup>-6</sup>	$\sigma$ (Ω.m) <sup>-1</sup> 10 <sup>6</sup>	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>r</sub> (MPa)
1	9.375	3.455	3.44	0.0325	30.76	340.16	333.42
2	9.387	3.456	3.38	0.0317	31.45	326.85	320.37
3	9.936	3.454	3.32	0.0311	32.15	310.79	304.39

Le traitement thermique à 190°C permet d'atteindre les valeurs recommandées pendant une heure de revenu, mais ce temps est insuffisant pour homogénéiser la température de toutes les bobines dans un four industriel chargé, ce qui rend ce traitement inadapté en pratique [4].

### c) Traitement de revenu à 170°C.

Hadid a réalisé un traitement de revenu sur le fil machine et les fils tréfilés en alliage AGS à 170 °C pendant plusieurs temps de maintien (10 min, 4 h et 20 h).

Le tableau (III.15) présente l'ensemble des résultats obtenus par Hadid sur l'évolution des propriétés mécaniques et électriques de l'alliage 6101 en fonction des taux de tréfilage [2].

**Tableau III.15:** Evolution des propriétés des fils machine et des fils tréfilés en alliage AGS après le traitement de revenu à T=170°C [2].

Temps de maintien	Taux de déformation $\epsilon$ (%)	Charge à la rupture $R_m$ (Mpa)	Allongement (%)	Microdureté (HV)	Résistivité électrique $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )
10 minutes	0	239	10	69	0,032 67
	21	279	10	78	0,033 80
	69	305	7	82	0,034 96
	87	320	4	10 9	0,035 08
4 heures	0	256	14	77	0,032 70
	21	305	12	10 1	0,033 58
	69	337	9	11 4	0,034 79
	87	364	6	12 2	0,034 97

- Le traitement de revenu à T=170°C conduit à une augmentation des propriétés mécaniques de l'alliage 6101 pour ce qui concerne la résistance à la rupture et l'allongement à rupture.
- les résultats électriques montrent que plus on prolonge le temps de maintien, plus la résistivité diminue pour tous les taux de réduction. La formation des précipités métastables semi-cohérents  $\beta'$  ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) augmente l'incohérence des joints de grains et crée une mince zone pauvre en éléments d'alliages autour de ceux-ci (precipitate-free zones) (PFZ). Ces zones pauvres en solutés servent de court-circuit pour le passage d'électrons, ce qui a pour effet d'augmenter la conductivité et diminuer la résistivité du matériau de façon significative [2].

D'autre part, Laadjala a réalisé une déformation plastique suivie d'un traitement thermique de revenu à 170 °C pendant 04 heures sur le fil machine en alliage AGS. Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau ( III.16 ) suivant [6].

**Tableau. III.16 :** Résultats des tests mécaniques obtenus après tréfilage et revenu [6].

Diamètres des fils $\phi$ (mm)	Taux de déformation $\varepsilon$ (%)	la charge à la rupture $R_m$ (MPa)	La dureté (HB)	l'allongement A(%)
( $\phi=9.5$ mm)	0	215	73	11
( $\phi=3.15$ mm)	89	391	114	8
( $\phi=3.15$ mm)	89 + Revenu à 170 ° ; 04 heures	333.4	145	4.8

L'effet conjugué de la déformation plastique suivie d'un revenu a pour conséquence une augmentation de la dureté et de la résistance mécanique mais une diminution de l'allongement. Dans ce cas, durant la déformation plastique il y'a l'écrouissage. Durant le revenu il y'a deux phénomènes qui ont lieu en même temps: (i) l'atténuation des contraintes résiduelles induites par écrouissage (tendance vers une diminution de HB) mais il y'a également (ii) le phénomène de précipitation secondaire qui durcit la structure (tendance vers une augmentation de HB). Finalement c'est le phénomène du durcissement par précipitation qui l'emporte. Ce qui explique l'augmentation des caractéristiques de résistance (HB et  $R_m$ ) au détriment des caractéristiques de ductilité (A%) [6].

#### d) Traitement de revenu à 400°C

Bessais a réalisé des traitements thermiques à la température 400°C pendant différents temps de maintien 10, 30 et 60 minutes des fils tréfilés en alliage AGS.

Les valeurs des mesures mécaniques et électriques sont rassemblées dans le tableau suivant [3]

**Tableau III.17:** Résultats des propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés et recuits à 400°C [3].

Paramètres du four	$\varepsilon$ [%]	Diamètres mm	Température $T_a$ °c	La charge à la rupture Mpa	Allongement A%	Résistivité $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Conductivité $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$
<b>Recuit (10 min)</b>	00,00%	9,5	23,4	171,85	5,5	0,02961	33,77
	21,26%	8,43	23,4	163,30	8,0	0,03059	32,69
	68,99%	5,29	23,4	156,03	13,0	0,03032	32,98
	86,81%	3,45	23,4	123,51	7,5	0,02993	33,40
<b>Recuit (30 min)</b>	00,00%	9,5	23,1	112,99	17,5	0,02950	33,90
	21,26%	8,43	23,1	114,23	16,0	0,03001	33,31
	68,99%	5,29	23,1	117,08	15,5	0,03009	33,23
	86,81%	3,45	23,1	117,54	15,5	0,02997	33,37
<b>Recuit (60 min)</b>	00,00%	9,5	23	107,7	26	0,03015	33,16
	21,26%	8,43	23	108,05	19,25	0,02961	33,77
	68,99%	5,29	23	113,45	18,5	0,02962	33,76
	86,81%	3,45	23	113,81	22,75	0,02948	33,92

En résultat, la chute de la dureté, de la résistance mécanique et de la résistivité électrique et l'augmentation de l'allongement sont certainement due aux changements microstructuraux induits par les traitements thermiques appliqués, comme la recristallisation [3].

**Conclusion :**

En comparant les différentes propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés traités à haute température 400 °C et à basses températures : 160 °C, 170 °C et 190 °C, on peut conclure les points suivants:

Le traitement thermique qu'on a effectué à basse température à 170°C donne les meilleures propriétés mécaniques et électriques car :

- ✓ L'augmentation de la résistivité électrique et de la charge à la rupture.
- ✓ Au cours du traitement de revenu à 170°C, le câble de l'alliage d'aluminium doit posséder une bonne conduction électrique et résister aux contraintes mécaniques imposées en service.

**Références bibliographiques :**

- [1] Hamdi, I. Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000) Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [2] HADID, M. D. Etude et caractérisation de la microstructure et la texture d'un fil d'aluminium (tréfilé/recuit) Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA), (2017).
- [3] BESSAIS, L. Etude et caractérisation de la réaction de recristallisation des fils d'aluminium tréfilés industriellement à ENI CAB. BISKRA Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA), (2017).
- [4] Merouchi ,B.Optimisation de revenu des fils en alliage d'aluminium tréfilés pour les câbles électriques, Memoire de master, SPA Alger, (2016).
- [5] Laverroux, M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. Revue de Métallurgie, (1993). 90(10), 1293-1302.
- [6] Laadjal, D. □Alliage d'aluminium évolution de la microstructure et propriétés mécanique Mémoire de master, Universitébadjimokhtar □Annaba, (2018).

# Conclusion générale



### Conclusion générale

Le but de ce travail est de faire une synthèse sur les travaux de recherche réalisés antérieurement sur l'effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés d'alliage AGS afin de déduire les conditions optimales de l'utilisation de ces fils pour le transport de l'énergie électrique.

Dans ce travail, nous avons présenté quelques méthodes de caractérisations réalisées par sur études l'alliage AGS tel que : la diffraction des rayons X, la mesure de micro dureté, essai de traction et la mesure de résistivité électrique.

D'après ce qui a été obtenu comme synthèse sur les résultats des travaux déjà réalisés, on peut conclure les points suivants :

- Le tréfilage provoque le durcissement des fils, caractérisés par l'essai de traction qui a montré une augmentation de la résistance à la traction, de la contrainte à la rupture, et une diminution de l'allongement à la rupture.
- Le tréfilage augmente la dureté mais entraîne une chute de l'allongement par effet d'écrouissage.
- Le tréfilage augmente la résistivité électrique des fils tréfilés en alliage AGS. Cette modification des propriétés électriques est attribuée à l'écrouissage de l'alliage.
- Un traitement thermique de revenu à 160°C pendant 6 heures, après tréfilage des fils en alliage AGS, est nécessaire pour diminuer la résistivité électrique afin d'atteindre la valeur établie par le prescrit du fournisseur qui est 0.032  $\Omega.m$ .
- Ce traitement thermique permet en même temps l'amélioration des caractéristiques mécaniques en traction par modification de la microstructure, contribuent à un meilleur comportement en service des fils électriques.
- Le traitement thermique effectué à 190°C permet d'atteindre les valeurs recommandées pendant une heure de revenu, ce qui montre qu'on peut réduire le temps et avoir les mêmes caractéristiques en résistance mécanique et électrique.
- Les traitements thermiques appliqués aux fils tréfilés en alliage AGS à 400 °C abaissent la dureté, la résistance mécanique maximale et la résistivité électrique des fils au-dessous des valeurs de l'état initial, et augmente l'allongement au-dessus de la valeur initiale.
- Au cours du traitement de revenu à 170°C, il y a une formation de précipité  $Mg_2Si$ .
- La combinaison entre la déformation plastique et le traitement de revenu, donne au matériau

des propriétés mécaniques plus élevées, tel que la micro dureté, la charge à la rupture et l'allongement à la rupture.

- Plus en prolongeant le temps de maintien de revenu à 170°C, la résistivité électrique de l'alliage 6101 diminue.

A la lumière de ces résultats, on voit que le traitement thermique à 170°C donne les meilleures caractéristiques mécaniques et électriques pour des fins d'utilisation dans le secteur de câblage électrique.

## Résumé

L'objectif de ce travail est de faire une synthèse sur les travaux de recherche antérieures réalisés sur l'effet des traitements thermique sur les propriétés mécaniques et électrique des fils tréfilés d'alliage d'aluminium AGS (Al-Mg-Si) utilisés par l'Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB) dans l'industrie des câbles électriques. Le processus de tréfilage provoque une modification des propriétés mécaniques et électriques des ces fils. Les traitements de revenu des fils tréfilés conduit à une diminution de la résistance à la traction et une augmentation de l'allongement à la rupture et de la résistivité électrique. En comparant les résultats de ces travaux, nous avons conclu que le traitement thermique à 170°C donne les meilleures caractéristiques mécaniques et électriques pour l'utilisation de ces fils pour le transport et la distribution d'énergie électrique.

**Mots clés : résistivité électrique, essai de traction, tréfilage, traitement thermique, alliage AGS.**

## Abstract

The objective of this work is to synthesize the previous research work carried out on the affect of heat treatments on the mechanical and electrical properties of drawn wires of AGS aluminum alloy (Al-Mg-Si) used by the Biskra Cable Industries Company (ENICAB) in the electric cable industry. The wire drawing process causes a modification of the mechanical and electrical properties of these wires. Heat traitement of drawn wires leads to a decrease in tensile strength and an increase in elongation at break and in electrical resistivity. In this work, we concluded that the heat treatment at 170 °C gives the best mechanical and electrical characteristics for the use of these wires for the transport and distribution of electrical energy.

**Keywords: electrical resistivity, tensile test, wire drawing, heat treatment, AGS alloy.**

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تحليلية لأعمالالبحثالسابقة حول تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية الكهربائية ولأسلاك سبائك الألمنيوم AGS (Al-Mg-Si) المستخدمة من قبلشركة صناعة الكوابل الكهربائية بسكرة (ENICAB) في صناعة الكوابل الكهربائية. تؤدي عملية قلد الأسلاك إلى تغيير في الخواص الميكانيكية والكهربائية لهذه الأسلاك. أدت المعالجات الحرارية لهذه الأسلاك إلى انخفاض في مقاومة الشد وزيادة في الاستطالة عند الكسر و المقاومة الكهربائية. بمقارنة نتائج هذه الأعمال، توصلنا إلى أن المعالجة الحرارية عند 170 درجة مئوية تعطي أفضل الخصائص الميكانيكية والكهربائية لاستخدام هذه الأسلاك فيعملية نقل و توزيع الطاقة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية: المقاومة الكهربائية، إختبار الشد ، قلد الأسلاك ، المعالجة الحرارية ، سبائك AGS.**