

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi-Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Matière



MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Physique des matériaux**

Thème

Effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et électriques d'un fil d'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid

Présenté par :

❖ **Zaineb MENASRIA**

❖ **Hadjer GHALLEB**

Devant le jury :

Souheila ZOUAI	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Président
Hichem FARH	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Rapporteur
Hamza BOUGROURA	M.C.B	Université Larbi Tébessi	Examineur

Date de soutenance : **26/06/2018**



Déclaration sur l'honneur de non-Plagiat
(À joindre obligatoirement au mémoire; Remplie et signée)

Nous soussignions

Nom, prénom: **GHELAB HADJER & MENASRIA ZAINEB**

N° de carte d'étudiant: (1) **2014/34022058** (2) **2014/34021672**

Régulièrement inscrits (es) en **Master au Département Sciences de la Matière**

Année universitaire: **2018/2019**

Domaine: **Sciences de la matière**

Filière: **Physique**

Spécialité: **Physique des matériaux.**

Intitulé du mémoire: **Effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et électriques d'un fil d'alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid.**

Attestons que notre mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Nous certifions également que nous n'avons ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article, ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé:

Les étudiants seront convoqués devant le conseil de discipline. les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont:

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent.
- L'exclusion d'une année du master.
- L'exclusion définitive.



Fait à Tébessa, le:

Signature des étudiants (es):

(1):

(2):

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher père Mahmoud Menasria : aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et pour mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis mon éducation et ma formation.

A ma mère l'aimable et l'honorable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Merci mes très chers parents de me donner l'espoir et le courage le long de mon trajet d'étude et de m'offrir un avenir prospère.

A mon prof encadreur, Farh Hichem

A Ma petite famille Safouwa, Sana, Fatima, Chaima, et mon frères Houssem

Je le dédie aussi avec un grand amour à mes chers amis et tous mes collègues de physique Matériaux, promotion 2019.

*A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de mon travail.
Mes remerciements.*

Menasria zaineb

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher père Ghellab Ali : aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et pour mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis mon éducation et ma formation.

A ma mère l'aimable et l'honorable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Merci mes très chers parents de me donner l'espoir et le courage le long de mon trajet d'étude et de m'offrir un avenir prospère.

A mon prof encadreur, Farh Hichem

A Ma petite famille Sara, Faten et ma frère Ismail.

Je le dédie aussi avec un grand amour à mes chers amis et tous mes collègues de physique Matériaux, promotion 2019.

*A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de mon travail.
Mes remerciements.*

Ghellab Hadjer

Remerciement

En premier lieu, nous remercions Allah le Tout-Puissant pour nous avoir donné le potentiel d'apprendre les lois de notre univers et de les exploiter pour notre bien-être.

- ❖ *nous remercions énormément **Dr. Hichem FARH** maître de conférences A au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tebessi de Tébessa de nous avoir guidé et soutenu le long de ce travail avec beaucoup de patience et d'indulgence, et nous espérons pouvoir un jour devenir aussi de formidables et s maîtres à nos futurs élèves.*
- ❖ *Nous remercions **dr. Souheila ZOUAI** maître de conférences A au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tebessi de Tébessa de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance et également **Dr. Hamza BOUGROURA** maître de conférences B au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tebessi de Tébessa d'avoir accepté d'examiner notre travail.*
- ❖ *Un grand merci aux membres du Laboratoire des Composants Actifs et Matériaux de l'Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi.*
- ❖ *Un grand merci à toutes les personnes que nous avons consultées pour la compréhension de ce travail.*
- ❖ *Merci à mes amies et collègues pour leurs encouragements.*
- ❖ *Et enfin merci et pardon à tous ceux que nous ne pouvons citer qui nous ont aidés de près ou de loin.*

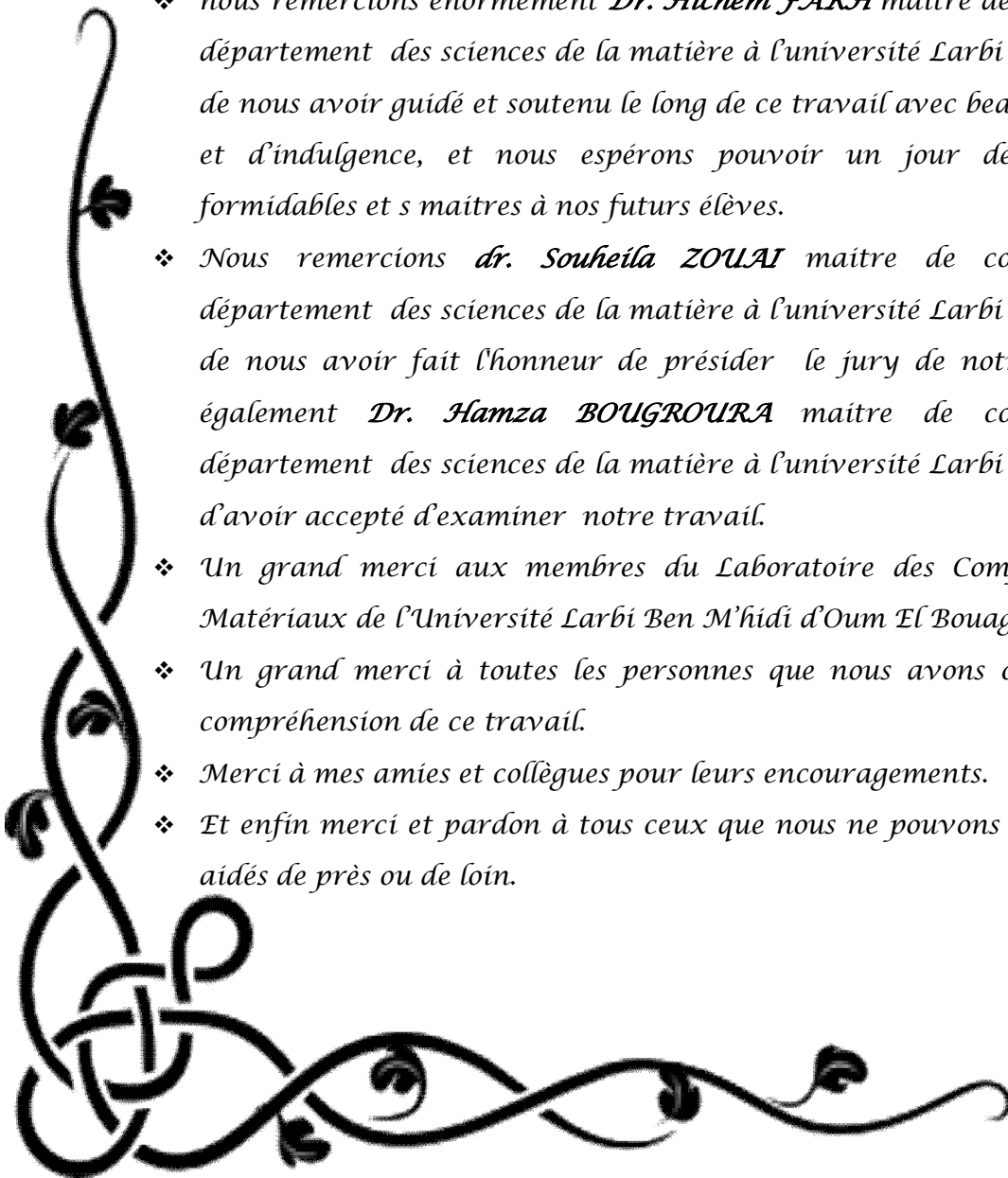


Table des matières

Remerciements	i
Liste des figures	Vii
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur l'aluminium et ses alliages	3
1.1 Généralités sur l'aluminium et ses alliages	3
1.1.1 Historique	3
1.2 L'Aluminium	3
1.3 Désignation des différents alliages d'aluminium	3
1.4 Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium	4
1.5 Les changements d'état liquide à l'état solide des alliages d'aluminium	5
1.5.1 Au refroidissement	5
1.5.2 Au cours d'un chauffage	5
1.6 Classification des alliages d'aluminium	6
1.6.1 Alliages sans durcissement structural	6
1.6.2 Alliages à durcissement structural	7
1.6.2.1 Alliage Al-Mg-Si, Série 6000	7
1.7 Traitements thermiques des alliages d'aluminium	8
1.7.1 Durcissement structural	8
1.7.1.1 La mise en solution	9
1.7.1.2 La trempe	9
1.7.2 Traitement de vieillissement	10
1.7.3 Traitements d'homogénéisation	11
1.7.4 Traitement d'adoucissement	11
1.8 Applications des alliages d'Aluminium	11
1.8.1 Domaine de transport	13
1.8.2 Domaine d'alimentation	13
1.8.3 Domaine de l'énergie électrique	13

Chapitre 2 : Procèdes de mise en forme par tréfilage à froid	14
2.1 Mise en forme de l'aluminium	14
2.1.1 La mise en forme à froid	14
2.1.2 La mise en forme à chaud	14
2.2 La métallurgie de mise en forme	14
2.2.1 Filage.....	14
2.2.1.1 Le filage direct	15
2.2.1.2 Le filage inverse	15
2.2.2 Forgeage	16
2.2.2.1 Forgeage à froid	17
2.2.2.2 Forgeage à chaud	17
2.2.3 Laminage	17
2.2.3.1 Laminage à froid et Laminage à chaud	18
2.2.4 Tréfilage	19
2.3. Processus technologique du tréfilage du l'aluminium	19
2.3.1 Introduction	19
2.3.2 Outils et équipements industriels du tréfilage	22
2.3.3 La machine de tréfilage.....	22
2.3.3.1 Machine simple ou machine mono-passe	22
2.3.3.2 Machine multiple ou machine multi-passe	23
2.3.4 Conditionnement du fil tréfilé	25
2.3.5 Le lubrifiant	25
2.3.6 La filière	26
2.3.7 Mécanisme de la déformation plastique	28
2.3.8 Déformation par glissement	29
2.3.9 Déformation par maclage	30
Chapitre 3 : Matériaux et Méthodes Expérimentales	31
3.1 Choix de matériau	31
3.2 Traitements thermiques	32
3.3 Préparation métallographique	33
3.3.1 Enrobage	33
3.3.2 Gamme de polissage	34
3.3.3 Solution d'attaque chimique.....	35
3.4 Techniques de caractérisation	35

3.4.1 Microscope électronique à balayage (MEB)	35
3.4.2 Analyse de la microdureté.....	36
3.4.2.1 Principe de mesure	36
3.4.3 Mesure de résistivité électrique	38
3.4.4 Analyse par diffraction des rayons X (pics).....	39
Chapitre 4 : Résultats et discussions	41
4.1 Caractérisation des fils tréfilés non homogénéisé	41
4.1.1 Caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB)	41
4.1.2 Analyse de la microdureté	42
4.1.3 Essai de la résistivité électrique	43
4.1.4 Analyse par diffraction des rayons X	44
4.2. Caractérisation des fils tréfilés et homogénéisée à 500°C	47
4.2.1 Analyse de la microdureté	47
4.2.2 Essai de la résistivité électrique.....	48
Conclusion Générale	50
Références	51
Annexe	53
Résumé	55
Abstract	56
ملخص	57

Liste des figures

1.1	Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C0	9
1.2	Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structure	11
1.3	Câble électrique en aluminium (série 6000)	13
2.1	Schéma du filage direct.	15
2.2	Schéma du filage inverse.	16
2.3	Matrices d'outillages pour forgeage de sécateurs. XXe siècle	16
2.4	Exemple d'une pièce forgée à chaud	17
2.5	Schéma de principe de laminage	18
2.6	Principe de Tréfilage	21
2.7	Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées	22
2.8	Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe)	23
2.9	Schéma d'un machine à tréfilé multi-passe	24
2.10	Machine de tréfileuses d'aluminium AGS (ENICAB Biskra).	24
2.11	Schéma d'une méthode de lubrification	26
2.12	boite à savon (ENICAB Biskra)	26
2.13	Schéma d'une filière de tréfilage	27
2.14	Schéma représentant les contraintes normale σ et de cession τ	28
2.15	Système glissement dans une maille élémentaire c.f.c.	29
2.16	Représentation schématique d'une macule mécanique	30
3.1	Déférentes passes au niveau de la machine d'aluminium AGS(ENICAB Biskra).	31
3.2	Composition chimique du fil machine d'aluminium	32
3.3	Four programmable pour traitement thermique	33
3.4	Echantillons coupés et enrobés.	34
3.5	Polisseuse mécanique de type polisseuse (FORCIPOL 2)	34
3.6	Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un échantillon	36
3.7	Microscope Electronique à Balayage Jeol JSM 6360LV	36

3.8	micro-duremètre Vickers du type AFFRI.....	38
3.9	Principe de la mesure de microdureté Vickers.....	38
3.10	Dispositif d'un Machine resistomat type 2303	39
3.11	Diffractomètre de type EQUINOX 100	40
3.12	Diffraction de rayon X par des plans d'atomes (A-A'et B-B').....	41
4.1	Micrographies obtenues par MEB des échantillons du fil machine (a) et fil tréfilé ($\epsilon_3 = 86,81\%$) (b).	41
4.2	Variation de la microdureté Vickers du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid en fonction du taux de déformation	43
4.3	Variation de la résistivité électrique du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid en fonction du taux de déformation	44
4.4	Spectre de diffraction des rayons X ,Fil machine	45
4.5	Spectre de diffraction des rayons X, Fil tréfilé à 86,81%.	46
4.6	diagramme de diffraction des RX, Fil tréfilé à 86,81%.	47
4.7	Variation de la microdureté Vickers du fil d'aluminium tréfilé, homogénéisée à 500°C en fonction du taux de déformation.....	48
4.8	Variation de la résistivité électrique du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid, homogénéisée à 500°C en fonction du taux de déformation	49

Liste des tableaux

1.1	Désignation des séries principales des alliages d'aluminium.....	4
1.2	Propriétés physiques de l'aluminium	5
1.3	certaines données importantes pour la solidification	6
1.4	classifications des alliages d'aluminium	7
3.1	Différents taux de déformation (ϵ) des fils d'aluminium	31
3.2	Composition chimique de fil machine.....	32
4.1	Résultats des mesures de la microdureté des fils de l'alliage AlMgSi tréfilés à froid....	42
4.2	Résultats des mesures de la résistivité électrique des fils de l'alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid	43

Introduction Générale

1. Introduction générale

L'aluminium et ses alliages jouent un rôle très important dans le domaine de l'industrie des pièces mécanique après le fer. En effet, ces alliages faisant un candidat idéal dans une grande variété d'applications grâce à leurs exceptionnelles propriétés mécaniques tel que la faible densité qui possède une résistance notable à la déformation.

L'importance industrielle des alliages d'aluminium est mise en valeur par l'utilisation au domaine des conducteurs électriques dans les lignes électriques. Parmi ces conducteurs réussis on trouve les alliages d'Aluminium AGS (ancien terme désigne l'alliage Al-Mg-Si) qui étaient des conducteurs légers et pouvaient avoir des tailles (section) plus grandes.

Actuellement l'industrie des fils métalliques de cuivre et d'aluminium a connu une très grande évolution quant à leur utilisation dans les domaines de l'industrie, les applications domestiques, dans la distribution de l'énergie électrique et les transports. Cela est dû aux pertinentes caractéristiques électriques (conductivité, résistivité, fiabilité des contacts électrique...) et mécaniques (résistance à la rupture, ductilité...).

Ce travail sera mené sur les fils d'alliage d'aluminium de type Al-Mg-Si, le plus utilisé par l'entreprise ENICAB de Biskra-Algérie, destiné pour la fabrication des câbles électrique. Notre objectif était focalisé sur l'observation et la compréhension de l'évolution de la microstructure des fils d'aluminium au cours de la déformation par tréfilage à froid, ainsi que l'effet des taux de déformation et des traitements thermique sur la microstructure et le comportement mécanique de ces fils.

Notre étude expérimentale est basée sur la microscopie électronique à balayage, les mesures de la microdureté, les mesures de la résistivité électrique et la diffraction des rayons X.

La présente de ce mémoire comporte une introduction générale et quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique concernant l'aluminium et ses alliages et en particulier les alliages de la série 6000(Al-Mg-Si), leurs applications et les différents traitements thermiques appliqués à ces alliages.

Le deuxième chapitre est consacré à un rappel sur les procédés de mise en forme des métaux par déformation plastique et en particulier le principe de tréfilage de fil d'aluminium Al-Mg-Si.

Le troisième chapitre décrit l'alliage étudié, ainsi qu'à la description des techniques expérimentales utilisées.

Le quatrième chapitre englobe les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations. Enfin, nous terminons par une conclusion et par les références bibliographiques qui ont été un support de base de notre travail.

Généralités sur l'aluminium et ses alliages

Chapitre 1 : Généralités sur l'aluminium et ses alliages.....	3
1.1 Généralités sur l'aluminium et ses alliages	3
1.1.1 Historique	3
1.2 L'Aluminium	3
1.3 Désignation des différents alliages d'aluminium	3
1.4 Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium	4
1.5 Les changements d'état liquide à l'état solide des alliages d'aluminium	5
1.5.1 Au refroidissement	5
1.5.2 Au cours d'un chauffage	5
1.6 Classification des alliages d'aluminium	6
1.6.1 Alliages sans durcissement structural	6
1.6.2 Alliages à durcissement structural	7
1.6.2.1 Alliage Al-Mg-Si, Série 6000	7
1.7 Traitements thermiques des alliages d'aluminium	8
1.7.1 Durcissement structural	8
1.7.1.1 La mise en solution	9
1.7.1.2 La trempe	9
1.7.2 Traitement de vieillissement.....	10
1.7.3 Traitements d'homogénéisation.....	11
1.7.4 Traitement d'adoucissement	11
1.8 Applications des alliages d'Aluminium	11
1.8.1 Domaine de transport	13
1.8.2 Domaine d'alimentation	13
1.8.3 Domaine de l'énergie électrique	13

1.1. Généralités sur l'aluminium et ses alliages

1.1.1. Historique

Une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte –Claire La première apparition de l'aluminium était 1854 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 Charles Martin Hall (USA) [1].

1.2. Aluminium

L'aluminium est le troisième élément le plus abondant juste après le silicium et l'oxygène. 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 [2].

L'aluminium est un métal semi-précieux peut être obtenu presque pur ($Al > 99,99\%$) par raffinage électrolytique suivant le procédé à trois couches en électrolyse ignée. Bien entendu la méthode de la zone fondue permet d'atteindre une pureté encore plus grande, meilleure que $99,999\%$. Est un métal blanc argenté très malléable, de masse volumique 2.7g/cm^3 , ses températures diffusion et d'ébullition sont 660°C et 2270°C respectivement.

La bauxite est le minéral le plus utilisé pour l'obtention de l'alumine, qui est une matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium, elle est formée par l'altération rapide des roches granitique en climat chaud et humide. Cependant la séparation de l'aluminium du minéral est un procédé délicat. Le procédé utilisé dans l'industrie (Hall Héroult) est un procédé de purification électrolytique. L'aluminium se prête facilement aux traitements de surface et à toutes modalités de soudage. Au chauffage il présente une aptitude au grossissement du grain, ce qui altère sa plasticité.

L'aluminium s'avère comme un bon conducteur d'électricité non magnétique, il résiste bien naturellement à la corrosion atmosphérique grâce à la formation d'une fine couche superficielle d'alumine Al_2O_3 qui le protège contre les ravages de l'air, de la température de l'humidité et des attaques chimiques l'alumine est un composé très dur, mais à température ambiante l'alumine devient insoluble dans tous ses composés chimiques courant set mauvais conducteurs d'électricités.

1.3. Désignation des différents alliages d'aluminium

La désignation des alliages d'aluminium s'effectue suivant un système de 4 chiffres [3]. Le premier chiffre désigne à la série de l'élément principale alliant en présence et les autres chiffres indiquent la composition (Tableau 1.1).

Série	Désignation	Elément d'addition principale	Phases principale présent dans l'alliage
1000	1xxx	99% d'aluminium	-
2000	2xxx	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu, Al ₂ Cu/Mg
3000	3xxx	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
4000	4xxx	Silicium (Si)	-
5000	5xxx	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
6000	6xxx	Magnésium(Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
7000	7xxx	Zinc (Zn)	MgZn ₂
8000	8xxx	Lithium (Li) et autre	-

Tableau 1.1 Désignation des séries principales des alliages d'aluminium [4].

1.4. Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium

Au cours des 60 dernières années, les alliages d'aluminium ont pris une place importante dans certains domaines et occupent la deuxième place parmi les métaux utilisés, après les matériaux en acier et en Ti, C'est surtout dans le domaine de transport. Leur principale application est dans les domaines de bâtiment et de la construction de machines. Depuis de nombreuses années également, l'aluminium est utilisé dans l'industrie de l'emballage. Souvent aussi, on choisit l'aluminium en raison de certaines propriétés, comme la neutralité magnétique et l'incombustibilité. On distingue entre l'aluminium de grande pureté, l'aluminium pur et les alliages d'aluminium à base de manganèse, de silicium, de cuivre ou de zinc, dont la principale fonction est d'augmenter la résistance mécanique. On note la densité nettement plus faible, le point de fusion très bas, mais également la chaleur de fusion élevée et le point de fusion très élevée de l'oxyde d'aluminium. L'aluminium ne présente pas de couleur incandescente au point de fusion. Ces caractéristiques conjuguées avec un coefficient de dilatation élevé et une bonne conductibilité thermique ne font que le soudage de matériaux.

Propriété	Unité	Valeur
Paramètre de maille (à 298.15°K)	Å	4.05
Point de fusion	C °	660.45
Point d'ébullition	C °	2056
Pression de vapeur	Pa	0.0037
Energie interne massique μ	J kg ⁻¹	398000
Capacité thermique massique C_p (à 298.15° K)	J kg ⁻¹ K ⁻¹	897
Conductivité thermique λ (à 298.15K)	W m ⁻¹ K ⁻¹	237
Résistivité électrique ρ (à 298.15 K)	10 ⁻⁹ Ω m	26.548

Tableau 1.2 : Propriétés physiques de l'aluminium [5].

1. 5. Les changements d'état liquide à l'état solide des alliages d'aluminium

1.5.1. Au refroidissement

Les éléments d'alliage en solution solide peuvent précipiter généralement sous forme de composé intermétalliques (ou de solution solide très pauvre en Al- cas de Si et Zn-) au cours d'un refroidissement. Il faut que cette précipitation faisant intervenir la diffusion d'élément d'alliage en solution de substitution puisse être gênée voire empêchées par un refroidissement rapide qui conduit alors à une structure métastable.

1.5.2. Au cours d'un chauffage

A partir d'un état proche de l'équilibre :

Elément d'alliage	Te température de réaction eutectique	Solubilité de A dans M à Te	Solubilité de A dans M à T s
Cuivre	548 C°	5.65 %	0.1%
Manganèse	659C°	1.82%	0.1%
Silicium	577C°	1.56%	0.02%
Magnésium	451C°	14.9%	0.4%
Zinc	382C°	82.8%	1%

Tableau 1.3 certaines données importantes pour la solidification [6].

Selon l'évolution de la solubilité des éléments d'alliage, les précipitées pourront se mettre en solution. La phase riche en élément d'alliage qui participe à la constitution de l'eutectique ne peut pas être remise en solution à l'état solide ; elle ne concourt donc pas au durcissement optimum par re-précipitation. Celui-ci sera obtenu, dans ces conditions, en n'ajoutant que les quantités d'éléments d'alliage susceptibles d'être remises en solution à l'état solide c'est-à-dire celles qui correspondent généralement aux solubilités aux températures des réactions eutectiques. Encore sera-t-il nécessaire de limiter la température de mise en solution des précipités pour éviter un début de fusion dans les plages fusible du pseudo-eutectique (début de fusion dénommé (brulure) qui rend le métal quasiment inutilisable). Le tableau 1.3 rappelle certaines de ces données.

✓ A partir d'un état métastable :

Dans cette état on peut résulter ici d'un refroidissement rapide qui aurait empêché toute précipitation ; l'alliage est donc à l'état de solution solide sursaturé à la température ambiante.

Cette solution peut évoluer, l'élément d'alliage en sursaturation diffusant vers les défauts du réseau, essentiellement vers les dislocations. Ce processus est plus ou moins rapide selon la température ; des différences importantes apparaissent pour de faible variation de la température ambiante. Néanmoins ce durcissement s'établit assez lentement, comme il peut demander quelques jours avec certains alliages de la série 2XXX ; quelques semaines avec certains alliages de la série 6XXX et quelques mois dans le cas des alliages de la série 7XXX.

Un réchauffage à des températures variables selon les alliages mais généralement comprises entre 100 et 200°C pour des durées de l'ordre de 5 à 24 heures, provoque la précipitation de la phase durcissant. A plus haute température les précipités coalescent.

1.6. Classification des alliages d'aluminium

Dans l'état d'équilibre tous les alliages d'aluminium forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques telles que : Al_2Cu (phase θ) et Mg_2Si (phase β). Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg, AlCu-Mg-Si, Al-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium déformés plastiquement [7]

1.6.1. Alliages sans durcissement structural

Pour moduler les propriétés mécaniques dans ces alliages, ils existent des différents mécanismes tels que :

✓ Le durcissement par écrouissage correspond à une modification de structure provoquée par une déformation plastique [8], donc par déformation à froid, tels que la

déformation par laminage, l'étirage, le tréfilage. La restauration des propriétés initiales des alliages peut être obtenue suite aux traitements thermiques appropriés.

- ✓ Le durcissement par addition en solution : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.
- ✓ Le durcissement par l'effet de phase dispersée : lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite.

1.6.2. Alliages à durcissement structural

Le durcissement structural obtenu par un processus comportant :

- ✓ La mise en solution des éléments durcissant.
- ✓ La trempe, c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- ✓ Vieillissement à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

	Alliages à durcissement structural	Alliages sans durcissement structural
Série	2000	1000
	4000	3000
	6000	5000
	7000	

Tableau 1.4 : classifications des alliages d'aluminium [9].

1.6.2.1. Alliages Al-Mg-Si, Série 6000

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. Les alliages Al-Mg-Si sont des alliages à solution solide type Al-Mg₂Si, série 6000 faisant partie de la catégorie des alliages à durcissement structural. Les

éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si), cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Ces alliages sont généralement livrés après homogénéisation, trempe et vieillissement naturel. La famille des alliages Al-Mg Si-Cu est formée lorsque le cuivre est ajouté à la série 6000, ou réciproquement, quand le silicium est ajouté aux alliages Al-Cu-Mg de la série 2000. 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) [10]. Cette famille d'alliage a une grande importance dans l'industrie. Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage et laminage). 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 (soudure à l'arc ou brasage). on peut les classer en deux groupes :

- ✓ Un groupe dont les compositions sont plus riches 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. [11]

1.7. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Dans la métallurgie des alliages d'aluminium, la tendance est de mettre au point ou de définir des traitements thermiques vraiment spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage bien déterminé. Donc les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs.

1.7.1. Durcissement structural

Une série de traitements thermiques peuvent être améliorées la dureté de certains alliages d'aluminium. Cette série de traitements constitue un processus nommé «durcissement structural». Il provoque de très fines particules appelées précipités, d'une deuxième phase répartie uniformément dans la matrice initiale [12]. Le durcissement structural se réalise à l'aide de trois traitements thermiques :

- ✓ La mise en solution.
- ✓ La trempe.
- ✓ Le vieillissement (revenu).

1.7.1.1. La mise en solution

Cette série de traitements consiste à chauffer l'alliage jusqu'à une température T_0 située dans le domaine monophasé (phase α) [12], et maintenir cette température jusqu'à ce que la phase β soit entièrement dissoute, on obtient ainsi un alliage constitué uniquement de la phase α de composition C_0 (figure 1.1). Cette étape permet de dissoudre toutes les phases ayant pu précipiter antérieurement dans l'alliage, ce qui contribue aussi à diminuer la dureté.

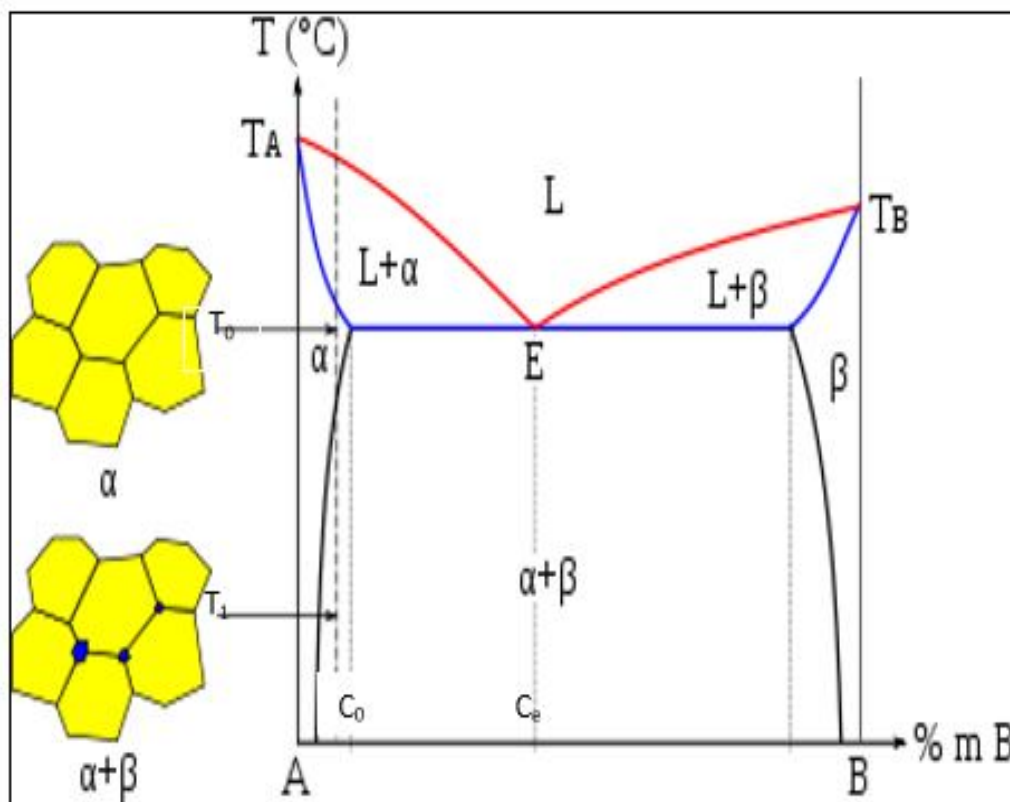


Figure 1.1 Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C_0 [13].

1.7.1.2. La trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide de la solution solide obtenue dans la première étape, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile. Son but est 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. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [14].

Généralement, pour éviter ces types de précipitation qui sont préjudiciables aux propriétés mécaniques ou à la résistance à la corrosion, la solution solide formée durant le traitement thermique de la solution doit être trempée assez rapidement pour produire une solution sursaturée à température ambiante avec les conditions optimales pour les précipitations de durcissement.

1.7.2. Traitement de vieillissement

Cette série de traitement thermique désigne à l'évolution des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant. Bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus spécifiquement une dégradation et/ou une perte de matière par réaction (se produit en surface de la pièce considérée) chimique du matériau avec son environnement. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact. Il y a deux types sont :

➤ Vieillessement naturel (Maturation)

Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années. Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante. Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique

➤ Vieillessement artificiel (Revenu)

Cette méthode consiste à un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel, et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C dans le cas de la série 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné.

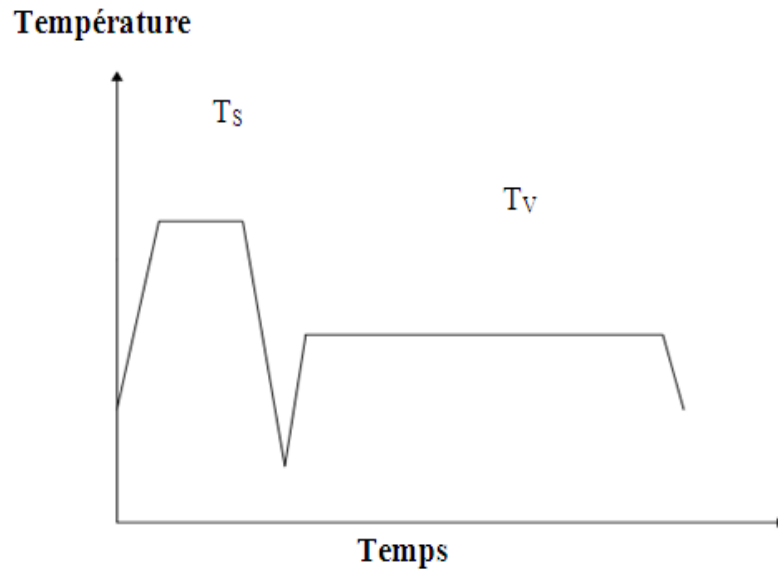


Figure 1.2 : Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structure.

(T_S : la température minimale de mise en solution et T_V : la température de vieillissement.)

1.7.3 .Traitements d'homogénéisation

Le traitement d'homogénéisation comporte à chauffer le matériau à une température de 450°C à 500°C pour l'aluminium et 450°C à 590°C pour les alliages d'aluminium [15], et à le maintenir pour une certaine période de temps (généralement quelques heures). Ce traitement a pour but de dissoudre les phases présentes au sein de l'alliage, de sorte à réaliser une homogénéisation de celui-ci sous une seule et même phase.

1.7.4. Traitement d'adoucissement

On note parmi ces traitements thermiques le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, et le traitement de recuit de précipitation dans le cas de matériaux trempés. Ce dernier traitement consiste en un chauffage assez prolongé à température élevée afin d'obtenir un adoucissement de l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage. Les traitements d'adoucissement ont pour but d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempé structurale.

1.8 .Applications des alliages d'Aluminium

Les applications de l'aluminium et ses alliages sont dans tous les domaines que ce soit industriel ou dans l'usage quotidien : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale (Superstructures et équipements), dans les bâtiments (toitures, façade, aménagements

intérieur), dans l'industrie électrique (câble et appareillage) pour la fabrication des appareils ménagers, emballage, la décoration.

L'aluminium est peu utilisé à l'état brut sauf miroiterie du fait de sa faible résistance mécanique. En effet l'addition contrôlée des éléments d'alliages tels que, le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse, le titane, le chrome, le zinc et le cobalt améliore les propriétés mécaniques. Même si les aciers sont les matériaux les plus utilisés dans l'industrie automobile, les besoins récents de véhicules dont le degré de sécurité et de confort est très élevé pour une consommation en carburant réduite font des alliages d'aluminium des candidats naturels. En effet, ils peuvent posséder des caractéristiques mécaniques excellentes pour une masse plus faible. Le marché de l'automobile représente donc pour les fabricants d'aluminium un marché important, dont les potentialités est plus grandes encore [16].

Les alliages d'aluminium ont une importance spéciale pour les panneaux externes d'automobile, où la haute résistance et la résistance de bosselure sont exigées et pour les amortisseurs, où la bonne résistance et le choc d'absorption sont nécessaires. Il a été resurgi des recherches intéressantes sur les alliages d'aluminium dans les récentes années, peut-être dû aux grandes demandes de l'utilisation des matériaux légers dans l'industrie d'automobile.

La bonne formabilité est une exigence importante. Les alliages Al-Mg-Si sont largement utilisés pour la résistance moyenne des applications structurales et dans les sections architecturales. Et ils sont la plupart du temps employés dans les produits expulsés d'aluminium en Europe de l'ouest, aussi bien que pour la construction des moteurs des véhicules [17].

Les alliages Al-Mg-Si, de durcissement par précipitation, ont été choisis pour la fabrication des panneaux de revêtements.

Les alliages AA6111, développée par Alcan en 1983, ont été choisis pour des applications à des panneaux de revêtements dans les usines de l'Amérique du nord parce qu'ils ont une combinaison de bonne formabilité et du potentiel élevé de renforcement. Récemment, les alliages de la série 6XXX sont aussi considérés pour des applications aérospatiales.

Les alliages industriels peuvent être mis en forme selon deux techniques, le corroyage et la fonderie, d'où deux grandes catégories doivent être distinguées [18] : alliages corroyés et alliages de fonderie.

Les alliages industriels sont obtenus par introduction d'éléments d'addition rentrant en solution solide et formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages de plus en plus complexes. Cependant on peut considérer que ces alliages comportent une addition

principale déterminante pour les propriétés de résistance mécanique (résistance à la traction, ...etc.) et des additions secondaires en teneurs plus faibles qui ont une action spécifique.

1.8.1. Domaine de transport

L'aluminium et ses alliages peut être utilisé dans le domaine de transport, dans le sens de la construction des automobiles, des véhicules ferroviaires (les trains, les tramways, les métros), ainsi que l'aéronautique (les avions).

L'aluminium ne rouille pas dans la petite voiture, le poids de la structure de l'aluminium peut être jusqu'à 45 % inférieurs à la structure en acier, et aujourd'hui, 50 % des moteurs hors-bords sont fait d'aluminium. Car il réduit les émissions de carburant et le bruit, les vibrations et la résistance à la corrosion de la consommation, et absorbe aussi le choc de l'accident. Une coque en aluminium peut tenir plus de 30 ans sans donner le moindre signe de fatigue, demande peu d'entretien que ces matériaux sont le résultat de son utilisation dans le domaine de la marine [19], [20].

1.8.2. Domaine d'alimentation

Dans le domaine de l'alimentation l'aluminium a un grand champ d'utilisation, par exemple il est utilisé dans la construction des boîtes de conservation, les papiers aluminium, canettes, barquettes, ustensiles de cuisine. Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets néfastes pour le système nerveux. Il a été reporté que des personnes aient développé une encéphalopathie (forme de démence) [19], [21].

1.8.3. Domaine de l'énergie électrique

L'aluminium est particulièrement bien adapté à cet usage en raison de sa conductivité électrique élevée, une densité et une bonne résistance à la corrosion de base [22]. Les lignes aériennes et des câbles d'alimentation de la distribution et la transmission de l'énergie électrique, des câbles électriques à usage industriel



Figure 1.3 : Câble électrique en aluminium (série 6000).

Chapitre 2

Procèdes de mise en forme par tréfilage à froid

Chapitre 2 : Procèdes de mise en forme par tréfilage à froid	14
2.1 Mise en forme de l'aluminium	14
2.1.1 La mise en forme à froid	14
2.1.2 La mise en forme à chaud	14
2.2 La métallurgie de mise en forme	14
2.2.1 Filage.....	14
2.2.1.1 Le filage direct	15
2.2.1.2 Le filage inverse	15
2.2.2 Forgeage	16
2.2.2.1 Forgeage à froid	17
2.2.2.2 Forgeage à chaud	17
2.2.3 Laminage	17
2.2.3.1 Laminage à froid et Laminage à chaud	18
2.2.4 Tréfilage	19
2.3. Processus technologique du tréfilage du l'aluminium	19
2.3.1 Introduction	19
2.3.2 Outils et équipements industriels du tréfilage.....	22
2.3.3 La machine de tréfilage.....	22
2.3.3.1 Machine simple ou machine mono-passe	22
2.3.3.2 Machine multiple ou machine multi-passe	23
2.3.4 Conditionnement du fil tréfilé	25
2.3.5 Le lubrifiant	25
2.3.6 La filière	26
2.3.7 Mécanisme de la déformation plastique	28
2.3.8 Déformation par glissement.....	29
2.3.9 Déformation par maclage	30

2.1. Mise en forme de l'aluminium

2.1.1. La mise en forme à froid

La mise en forme à chaud concerne en général, le matériau qui n'est pas réchauffé volontairement, ni avant, ni pendant l'opération de mise en forme, cependant la déformation plastique peut engendrer un échauffement important, pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés, notamment en usinage, de tels cas relèvent en fait de la déformation à chaud.

De point de vue physique, on considère qu'il existe deux grandes classes de mécanismes microscopiques intervenant dans la déformation plastique des métaux :

Les mécanismes athermiques, qui ne font pas intervenir l'agitation thermique, des atomes sont en général prédominants pour $T \leq 0,2$ ou $0,3 T_f$ (T et T_f : températures absolues de déformation et de fusion du métal respectivement) :

Les mécanismes activés thermiquement exigent au contraire l'intervention de l'agitation thermique ; ils sont donc surtout efficaces aux températures élevées ($T \geq 0,5$)

2.1.2. La mise en forme à chaud

Par contre, les opérations de déformation plastique effectuée à une température absolue $T > 0,5T_f$ (ou T_f désigne la température de fusion du matériau).

Soit par exemple : [23].

Tungstène : $T > 1711^\circ\text{C}$;

Fer : $T > 631^\circ\text{C}$;

Cuivre : $T > 393^\circ\text{C}$;

Aluminium : $T > 350^\circ\text{C}$;

Plomb : $T > 27^\circ\text{C}$.

2. 2. La métallurgie de La mise en forme

Spécialement traite les problèmes de déformation plastique à froid divers types d'assemblage (soudure, collage, etc.). Elle aborde aussi les questions relevant de la tribologie (frottement et lubrification, usure) ou de la thermique (auto-échauffement, transferts de chaleur métal/outil). Qui sont d'une importance considérable dans l'analyse de la plupart des procédés. [23]

Nous présenterons quelques procédés de mise en forme par déformation plastique à froid.

2.2.1. Filage

Le filage consiste à placer du métal solide chauffé à la température dite de filage dans un outillage appelé généralement conteneur et de la faire ressortir par un orifice (d'une filière en

général) plus petit en exerçant une poussée. À partir d'un certain effort, il y a écoulement plastique à travers la filière. Cette dernière peut avoir des formes variées. [23].

2.2. 1.1. Le filage direct

La billette (cylindre plein de métal) de métal préalablement chauffée est placée dans le conteneur. Un poinçon exerce une poussée. Le métal est d'abord plaqué contre la filière et file à travers la filière en prenant sa forme définitive (Figure 2.1).

2.2. 1.2. Le filage inverse

Dans le cas du filage inverse, la filière est placée à l'extrémité d'un poinçon. La billette chauffée est placée dans le conteneur. L'on plaque une tête sur le conteneur. C'est donc l'ensemble, billette, conteneur et tête qui avance vers la filière. Le métal file à l'intérieur du Poinçon (Figure 2.2).

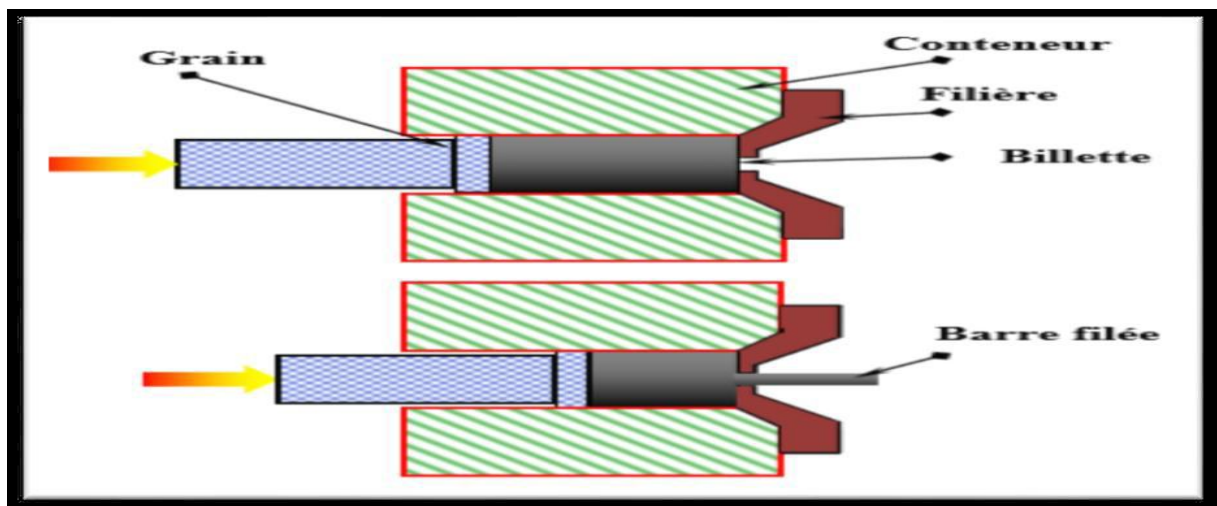
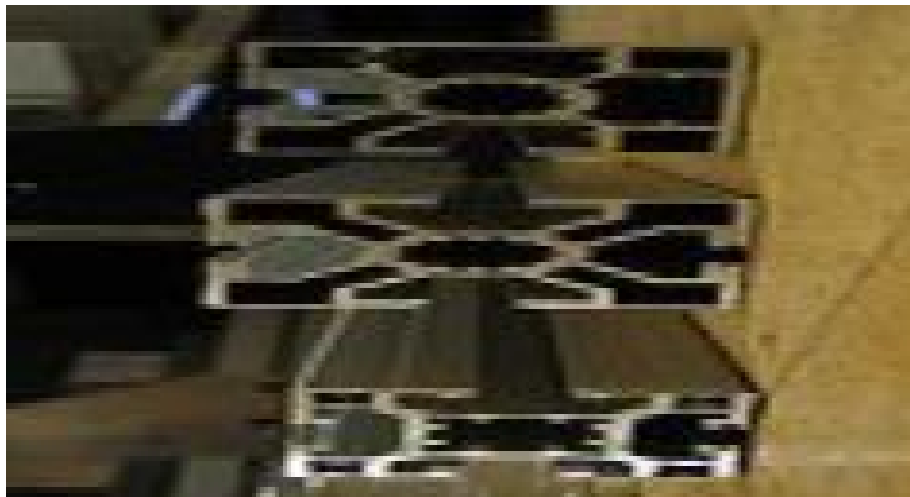


Figure 2.1 : Schéma du filage direct.

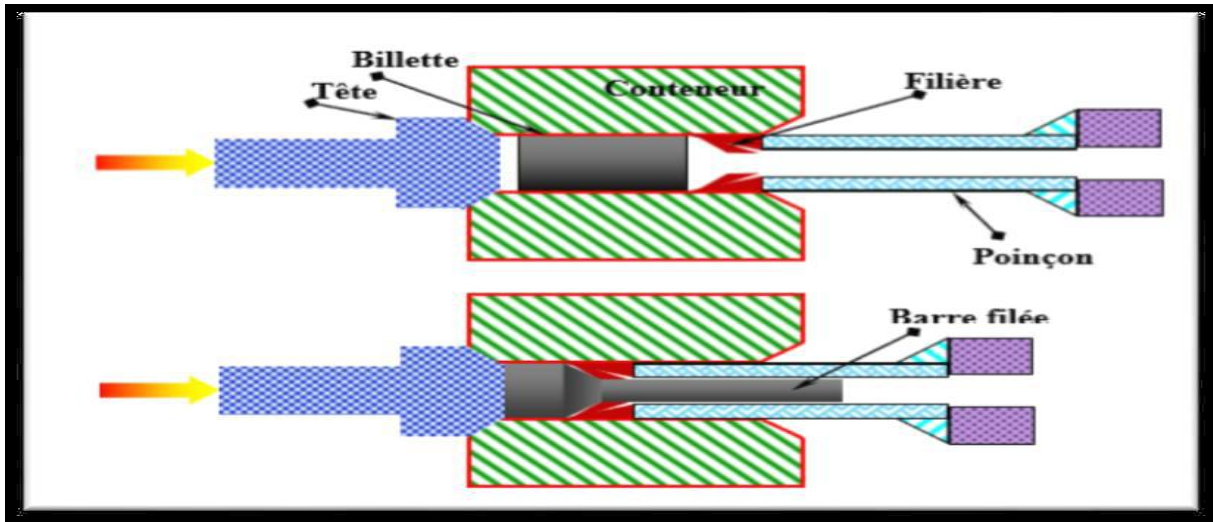


Figure 2.2 : Schéma du filage inverse.

2.2.2. Forgeage

Le forgeage est le procédé le plus ancien de la mise en forme qui a survécu à ce jour. Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue.

Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau ou marteau-pilon) et un support (Enclume ou matrice). La forge ne permet pas d'obtenir les mêmes marges de tolérance que l'usinage, ce qui la réserve aux pièces requérant une forte résistance mais une faible précision (boulonnerie, Outillage). Le forgeage se révèle inutilisable pour obtenir directement les pièces mécaniques ayant besoin d'une forte précision dimensionnelle.



Figure 2.3 : Matrices d'outillage pour forgeage de sécateurs. XXe siècle

2.2.2. 1. Forgeage à froid

Le forgeage à froid est le procédé par lequel on obtient la déformation d'une pièce sans chauffage préalable. Il dérive de réalisations de pièces, généralement creuses sur des machines utilisant des lopins comme produit de départ. Les machines à forger à froid sont extrêmement robustes, du fait que le lopin n'a pas la malléabilité que lui aurait donnée un chauffage. Ce forgeage, imposent un usage orienté Pour la très grande fabrication en série, dans le domaine de l'automobile, de la visserie, et de la quincaillerie en général.

2.2.2. 2. Forgeage à chaud

Le procédé de forgeage à chaud consiste à chauffer à haute température ($T \geq 0.6T_f$) un demi-produit, appelé lopin, que l'on viendra écraser entre deux matrices dans lesquelles est reproduisent le négatif de la forme à obtenir. Afin de permettre un remplissage suffisant des matrices et une limitation des efforts de compression, un volume supplémentaire sera usiné dans les matrices permettant ainsi la formation d'une bavure.



Figure2.4 : Exemple d'une pièce forgée à chaud

2.2.3. Laminage

La tôle d'aluminium est happée par les cylindres ceux-ci sont rugueux et vont plus vite que le métal à l'entrée de l'emprise. Il se crée donc des forces de frottement qui entraînent l'aluminium par ses deux faces et le forcent à passer entre les cylindres. L'effort appliqué est supérieur à la résistance à la déformation du métal, ses grains s'allongent, son épaisseur diminue et il s'écrouit, sa résistance à la déformation augmente, sa limite d'élasticité aussi.

Pour l'aluminium et ses alliages, qui ne connaissent pas de transformation allotropique l'effet des passes de laminage sur l'érouissage est additif. Une réduction produit le même état métallurgique. Qu'elle soit réalisée en une ou plusieurs fois avec un laminoir puissant ou plus ancien. Pas identique, lorsque l'érouissage atteint une valeur critique, propre à chaque alliage, apparait le risque de criques et de casse de la bande diminué l'épaisseur par simple laminage.

La résistance à la déformation et la limite d'élasticité diminuent. Le risque de craque s'annule et les opérations de laminage peuvent reprendre les taches susceptibles d'apparaître pendant le recuit doivent être évitées par un bon essorage des bandes. Le métal est alors maintenu à une température bien définie pendant un temps déterminé pour permettre la recristallisation totale ou partielle. Le choix et la propreté des lubrifiants, le contrôle de taux d'oxygéné et d'humidité dans les lourds (figure2.5). [24].

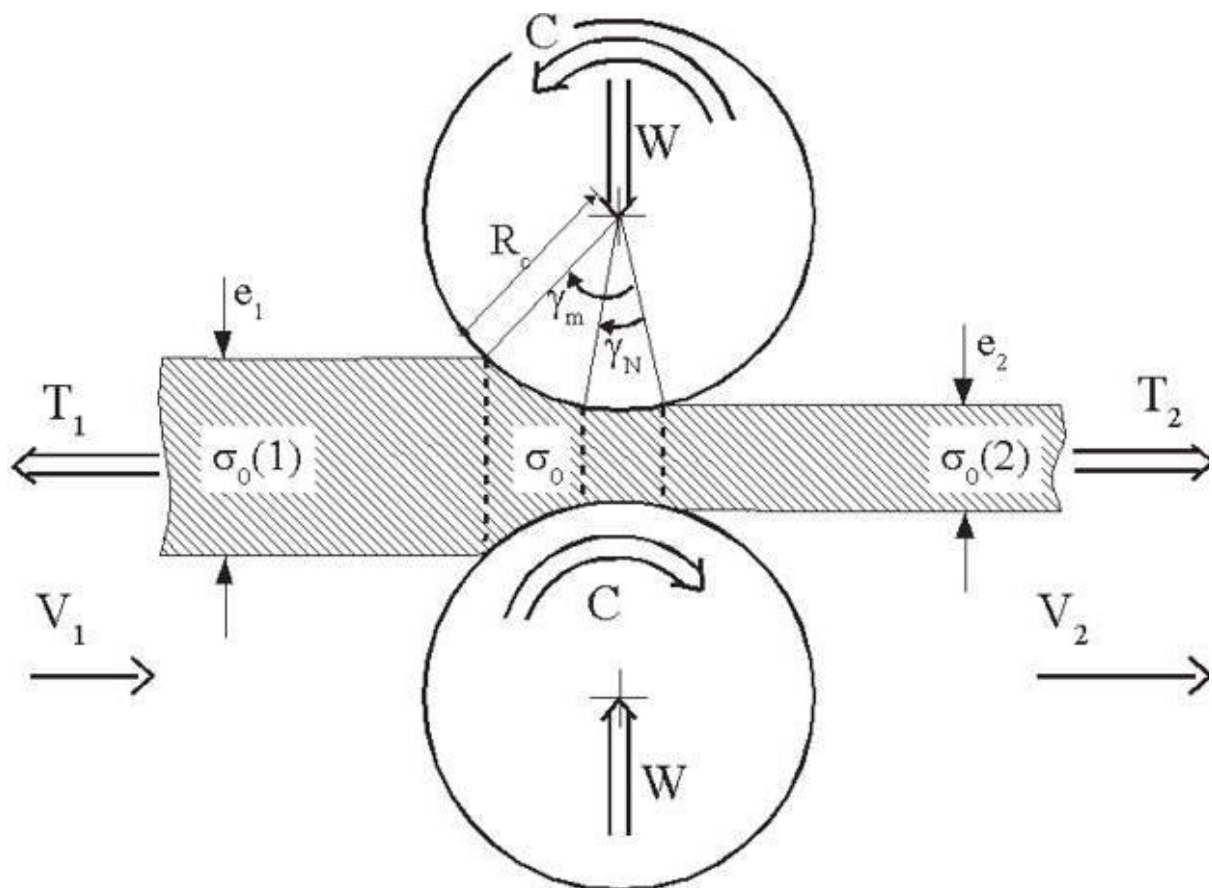


Figure2.5 : Schéma de principe de laminage [25].

2.2.3.1. Laminage à froid et Laminage à chaud

Deux raisons capitales peut s'imposer au minage à chaud : la première est que la

La résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du Produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface. Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand. Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise. Le laminage à froid est réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage. Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-réaction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

2.2.4. Tréfilage

Le tréfilage est une technique de déformation, son principe est basé sur la diminution de la section d'une barre ou un fil métallique par tirage mécanique sur une machine à tréfiler (Tréfileuse). Cette méthode utilise donc l'aptitude à la déformation plastique du métal. Les usines spécialisées dans le tréfilage sont nommées des tréfileries. Le fil machine, sous forme de bobine, est posé sur un dévidoir. Il est enroulé sur un ou des cabestans, qui, par frottement, exercent une traction sur le fil. Le fil passe dans une filière, qui impose au fil une déformation par réduction de section. La filière est abondamment lubrifiée, pour assurer le maintien d'un bon état de surface du fil métallique et pour assurer le refroidissement et contrer l'échauffement provoqué par l'écrouissage du métal.

Dans notre travail on spécifie au le tréfilage

2. 3. Processus technologique du tréfilage du l'aluminium

2.3.1. Introduction

Le tréfilage est une opération de mise en forme à froid 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 [26] .cette déformation ce fait par glissement suivant certains plans et directions de glissement grâce au déplacement de dislocations. Après cette opération, une partie de ces dislocations reste piégée à l'intérieur des grains .dans ce cas, la structure et les propriétés du métal sont modifiées. Le tréfilage au but 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. Cette technique est caractérisée par différents paramètres, à savoir la vitesse et la géométrie des filières et les conditions de frottement, la température de tréfilage, 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.

Dans les applications industrielles, les matériaux le plus utilisés sont : l'acier, le cuivre, l'aluminium et le tungstène. Les applications des produits mise en œuvre par cette technique, qui peuvent être utilisés en soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatiques [27].

Le cuivre et l'aluminium en général peuvent être en transformés en fil par tréfilage. La modification du fil au moment de son passage dans la filière a pour conséquence une modification générale de la plupart de ses propriétés ; ce qui constitue un fait capital pour l'industrie du tréfilage. Si le fil s'écroutit cela veut dire :

Sa limite d'élasticité croit plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.

- ✓ Sa résistance à la traction augmente et sensible tendre vers une valeur limite
- ✓ L'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement

Pour faire l'application des fils avec résistance à la traction, de limite d'élasticité et l'allongement définis en fonction de l'utilisation, donc ces caractéristiques sont exploitées en tréfilage.

L'augmentation du taux de déformation au cours de la déformation à froid par tréfilage de fil du cuivre ou d'aluminium provoque le durcissement du fil.

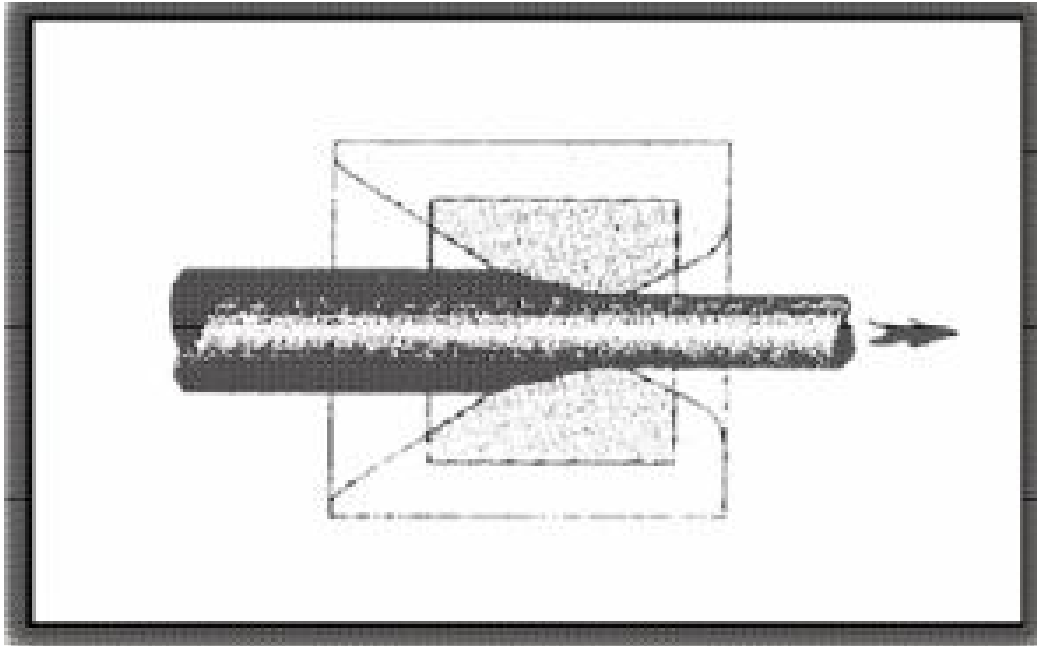


Figure 2.6. Principe de Tréfilage [28]

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



Les trois éléments du tréfilage sont le fil, la filière et le lubrifiant :

- ✓ Le fil de départ, ou fil-machine provient du laminage à chaud.
- ✓ La filière assure la réduction, se compose d'un noyau en carbure de tungstène ou diamant et d'une monture en acier,
- ✓ 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.

Nous rappelons les définitions des grandeurs mécaniques utilisées pour décrire le tréfilage (figure 2.7).

- l'allongement du fil Λ :

$$\Lambda = \frac{L_s}{L_e} = \left(\frac{R_e}{R_s} \right)^2 \dots\dots\dots 2.1$$

- la réduction du fil :

$$R = 1 - \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^2 \dots\dots\dots 2.2$$

- la déformation

$$\varepsilon = \ln \lambda = 2 \ln \left(\frac{R_e}{R_s} \right) \dots\dots\dots 2.3$$

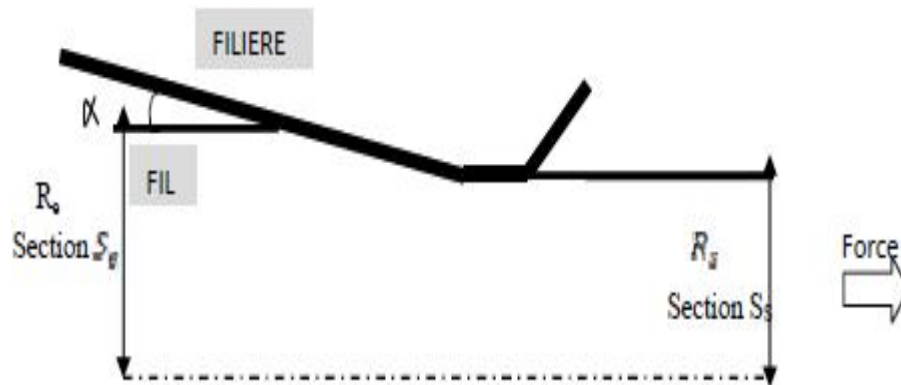


Figure 2.7. Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées [28]

2.3.2. Outils et équipements industriels de tréfilage

Trois éléments comportent l'ensemble du matériel de tréfilage :

- Un dispositif de dévidage du fil.
- Une machine à tréfiler.
- Un dispositif de récupération du fil écroui.

2.3.3. La machine de tréfilage

Les deux principaux types de tréfileuses sont :

- ✓ Les machines mono-passes.
- ✓ Les machines multiples (tréfileuses continues, tréfileuses à accumulation, tréfileuses à glissement).

2.3.3.1. Machine simple ou machine mono-passe.

Une réduction de section de 35 % au maximum. A chacun des blocs sont associés un ensemble de dévidage et un dispositif de réception.

On distingue :

- ✓ Les blocs simples, à axe de bobine vertical
- ✓ Les bancs de couche, à axe de bobine horizontal (figure 2.8). [29].

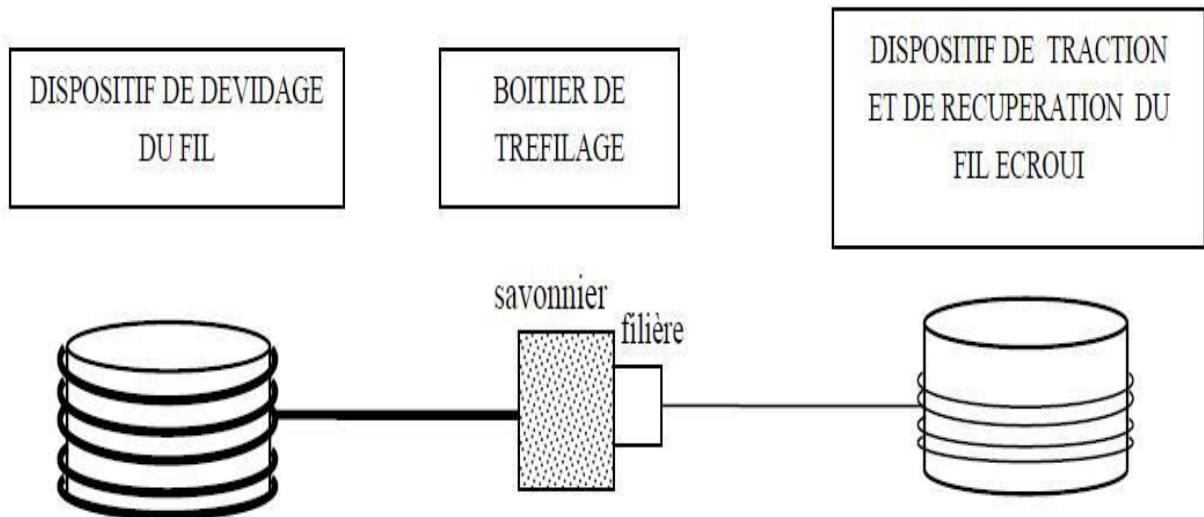


Figure 2.8 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe) [30].

2.3.3.2. Machine multiple ou machine multi-passe.

Des réductions de section importantes sont par des réductions successives effectuées sur le même appareil. Dans ce cas, le fil passe d'une bobine à une autre en traversant une filière, et il subit à chaque fois une réduction de section et un accroissement de vitesse (loi de conservation du débit matière).

(La figure 2.9.) représente un modèle de tréfileuse composée des éléments suivants :

- ✓ Le dévidoir : permettant le déroulement consomme de fil.
- ✓ La boîte à savon : permettant le logement de la porte filière et le logement du lubrifiant.
- ✓ La porte de filière : pour positionne la filière et le longuement du lubrifiant.
- ✓ La bobine : permettant d'enlever la couronne de fil de la bobine.
- ✓ La filière (passe) : constituée d'un noyau en carbure métallique fritté (souvent du carbure de tungstène). Le noyau est ensuite fritté un corps cylindrique en acier appelé (monture).

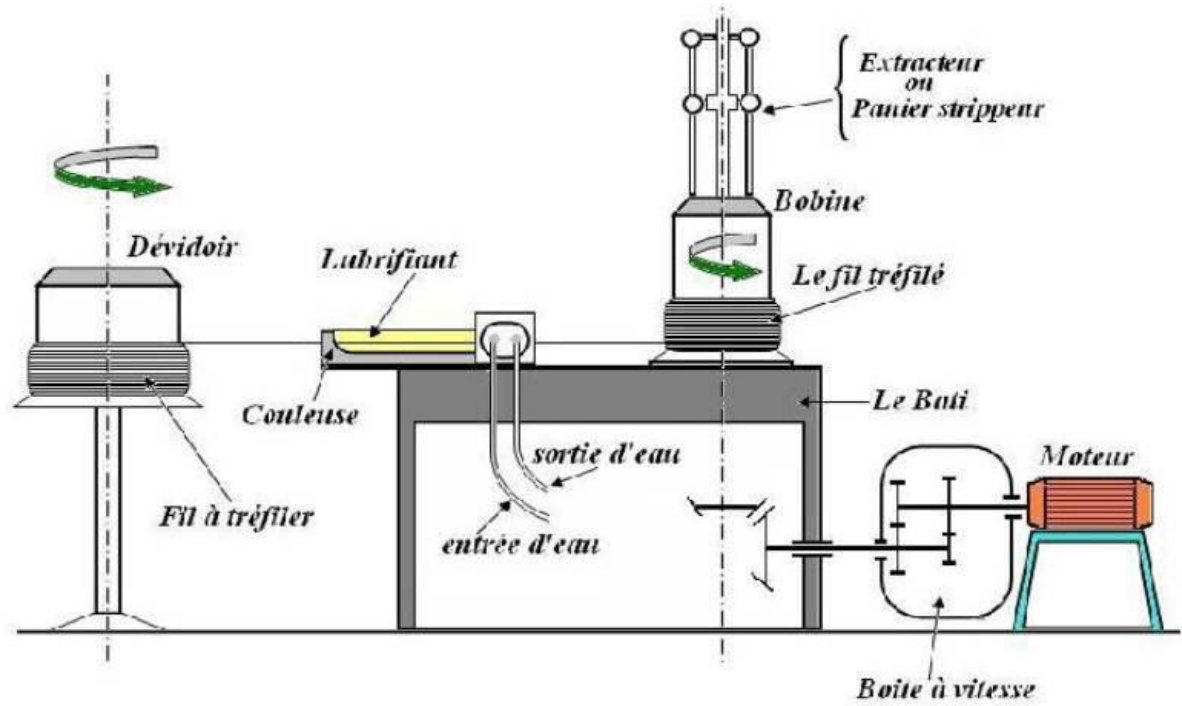


Figure2.9 : Schéma d'une machine à tréfilé multi-passe [29].



Figure2.10 : Machine de tréfileuses d'aluminium AGS (ENICAB Biskra).

2.3.4. Conditionnement du fil tréfilé

Après l'application de tréfilage, le fil peut être conditionné de deux façons différentes :

- ✓ Enroulé sur une bobine à flasque par couches successives de spires jointives, ou non.
- ✓ Dépose « en rosace » sur une bobine fixe à axe vertical disposée sur un support qui tourne lentement, et dont l'axe est excentré par rapport à celui de la bobine.

On a deux avantages à ce procédé :

- ✓ Il n'est pas nécessaire d'arrêter la machine lors du changement de bobine.
- ✓ Les bobines ne sont pas compactes et la prise de température est plus rapide lors des traitements de recuit en four statique.

2.3.5. Le lubrifiant

On peut dire que 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 d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses diminuer les forces d'étirage, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil le rôle de lubrifiant (graisse, huile minérale) des différents type est de former un film mince suffisamment épais sur le fil de manière à éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface. il permet aussi de réduction successive, mais donne un aspect terne au fil. Suivant les applications ultérieures du fil. D'ordre général on peut dire que le lubrifiant a donc pour rôle de :

- Limiter l'effort à exercer pour obtenir la déformation du métal.
- Assurer un régime de lubrification stable.
- Eviter l'apparition de défauts en surface du fil.
- Un bon lubrifiant de tréfilage doit donc posséder comme propriétés :
- Une viscosité suffisante.
- Une bonne résistance à la mise en pression.
- Une bonne résistance à la température.
- Une bonne résistance au cisaillement.
- Une bonne stabilité chimique dans le temps.

En pratique, selon les tréfileuses, le lubrifiant est soit une huile minérale, soit une graisse soluble,

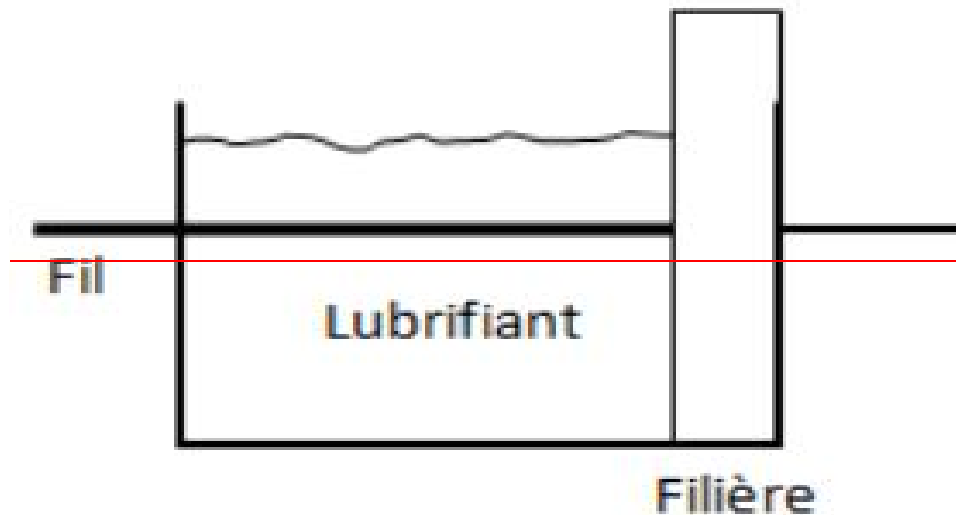


Figure 2.11 : Schéma d'une méthode de lubrification

Dans le tréfilage à sec, on utilise « savons secs métalliques ». 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 épais et homogène pour éviter toute interaction directe entre la filière et le fil. (Figure 2.12).



Figure 2.12 : boîte à savon (ENICAB Biskra).

2.3.6. La filière

La filière contient l'élément fondamental de la technique de tréfilage elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, il est en carbure de tungstène ou en diamant qui va assurer la réduction du diamètre du fil et une frette en acier qui maintient le noyau et lui permet de

résister aux fortes pressions développées au cours du tréfilage, elle se compose de plusieurs parties (figure 2.13).

- ✓ Un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant.
- ✓ Un cône de travail, de demi-angle dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil ;
- ✓ Une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil.
- ✓ Un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet

L'évacuation du lubrifiant.

Le tréfilage dans les gros fils se fait avec des filières en carbure de tungstène allié ou cobalt. Des filières diamant (de géométrie différente) ce sont les fils plus fins, qui sont les plus utilisées sauf dans le cas du cuivre qui se tréfille 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.

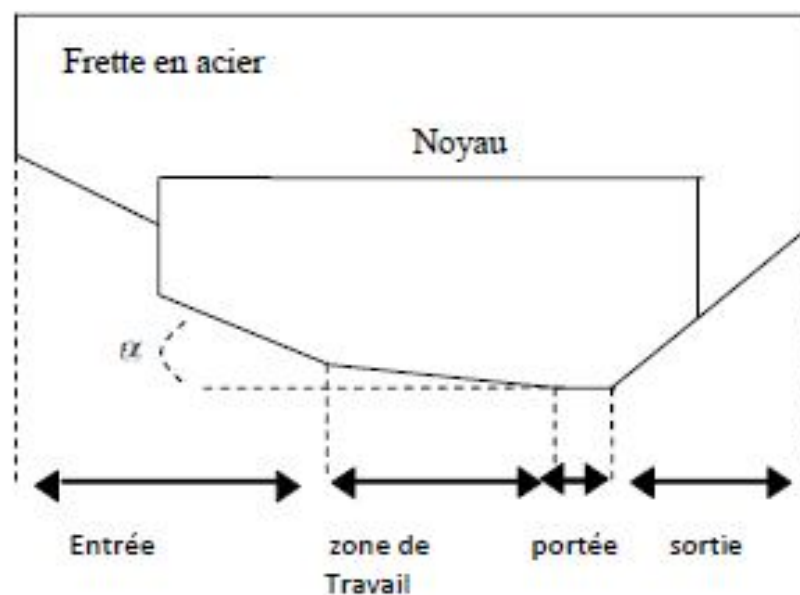


Figure 2.13. Schéma d'une filière de tréfilage [28]

2. 3.7. Mécanisme de la déformation plastique

La déformation plastique des métaux apparait se fait à partir de glissements irréversibles de certains plans cristallographiques les uns par rapport aux autres.

L'état de contrainte plus complexe qui est consisté d'une part, en une contrainte de cession τ qui agit parallèlement à ce plan, d'autre part en une contrainte de traction (ou normale) σ qui agit perpendiculairement au plan de glissement. La contrainte appliquée (F/S_0) n'est plus une contrainte de traction pure.

(La figure 2.14). 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.

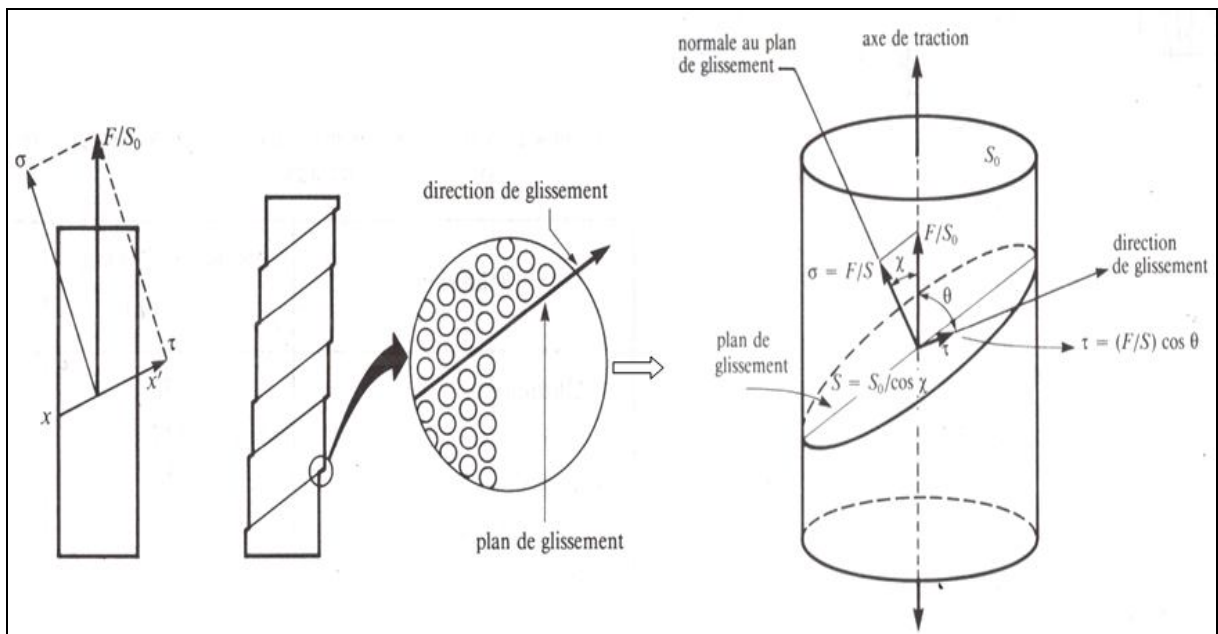


Figure 2.14 : Schéma représentant les contraintes normale σ et de cession τ .

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

$$\tau = \left(\frac{F}{S_0}\right) \cos \theta \cdot \cos \chi \quad \text{--- (II.4)}$$

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

Ou

- ✓ S_0 : est la section droite de l'éprouvette
- ✓ χ : l'angle formé par la normale au plan de glissement et l'axe de traction

- ✓ θ : l'angle formé par la direction de glissement et l'axe de traction.

2.3.8. Déformation par glissement

Il existe généralement un plan plus propice que les autres. Ce plan est le plan de glissement figure (figure 2.15)

Les dislocations ne se déplacent pas avec la même facilité dans tous les plans cristallographiques d'atomes ni dans toutes les directions cristallographiques.

Par exemple, en prenant la structure cristalline cubique à face centrées (c.f.c), comme l'aluminium, dont une maille élémentaire est représentée à la (figure 1.18) En fait, les plans de plus forte densité atomique ce sont les plans de glissement, et les directions de glissement sont présentent les directions cristallographiques les plus denses, comme l'indique les flèches à(la figure 2.15). Ainsi, $\{111\}\langle 110 \rangle$ représente la direction de glissement et l'ensemble du plan de glissement, soit le système de glissement pour la structure c.f.c. Le tableau 1 donne les systèmes de glissement possibles des différentes structures. [31]

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.

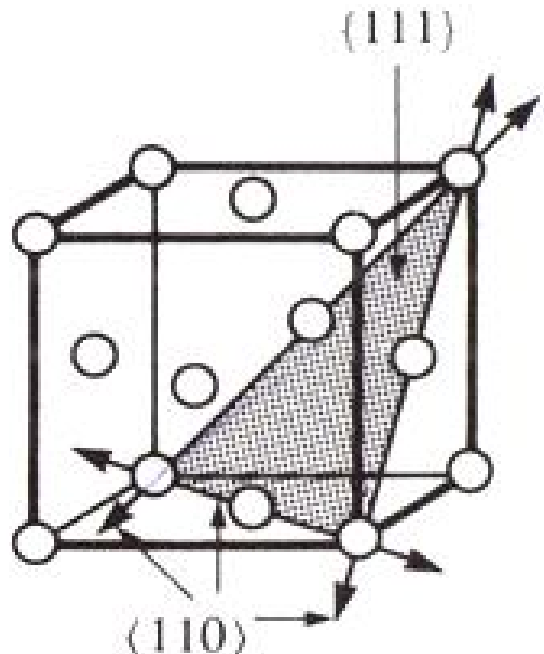


Figure 2.15 : Système glissement $\{111\}\langle 110 \rangle$ dans une maille élémentaire c.f.c.

2.3.9. Déformation par maclage

Le maclage est plus important dans la déformation plastique de certains matériaux (Figure 2.16).une partie du cristal est ainsi cisailée entre deux plans qui vont former les interfaces avec la partie non déformée. la géométrie du système de maclage (plan et direction cristallographiques de maclage) donne le taux de cisaillement par 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.

Le maclage est très important sur la déformation totale ,il est particulièrement marquée dans les matériaux ou le nombre de systèmes de glissement est réduit, comme ceux de structure hexagonale compacte.

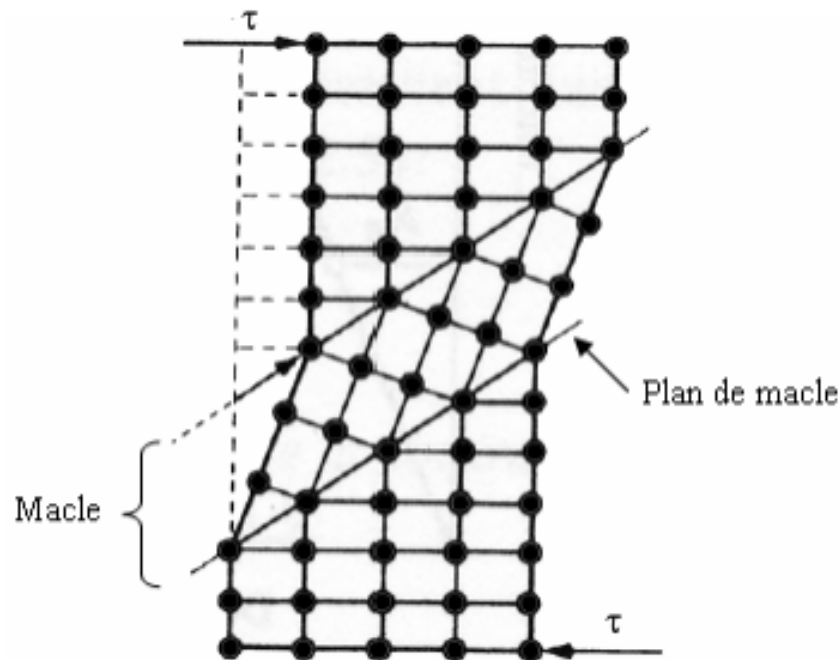


Figure 2.16 : Représentation schématique d'une maclage mécanique.

Chapitre 3

Matériaux et Méthodes Expérimentales

Chapitre 3 : Matériaux et Méthodes Expérimentales	31
3.1 Choix de matériau	31
3.2 Traitements thermiques	32
3.3 Préparation métallographique	33
3.3.1 Enrobage	33
3.3.2 Gamme de polissage	34
3.3.3 Solution d'attaque chimique.....	35
3.4 Techniques de caractérisation	35
3.4.1 Microscope électronique à balayage (MEB)	35
3.4.2 Analyse de la microdureté.....	36
3.4.2.1 Principe de mesure	36
3.4.3 Mesure de résistivité électrique	38
3.4.4 Analyse par diffraction des rayons X (pics).....	39

3.1. Choix de matériau

La source du matériau étudié est la société MIDAL CABLES (BAHRAIN), il est en alliage Al–Mg–Si (série 6101) sous forme de bottes de fil de 9.5 mm de diamètre.

Pour faire l'étude, plusieurs taux de déformation sont mesurés (Tableau 3.1). Les différents taux de réduction (ϵ) sont calculés à partir de l'équation suivante :

$$\epsilon = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) \cdot 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

Où S_0 est la section initiale du fil (fil machine) et S est la section final du fil (fil tréfilé).

Des différentes passes au niveau de la machine d'aluminium qui sont présentés dans (la figure3.1).

Tableau 3.1 : Différents taux de déformation (ϵ) des fils d'aluminium.

diamètres des fils \varnothing (mm)		Taux de déformation ϵ (%)
Fil-machine	9,5	0
1 ^{ere} passe	8,43	21,26
2 ^{eme} passe	5,29	68,99
3 ^{eme} passe	3,45	86,81

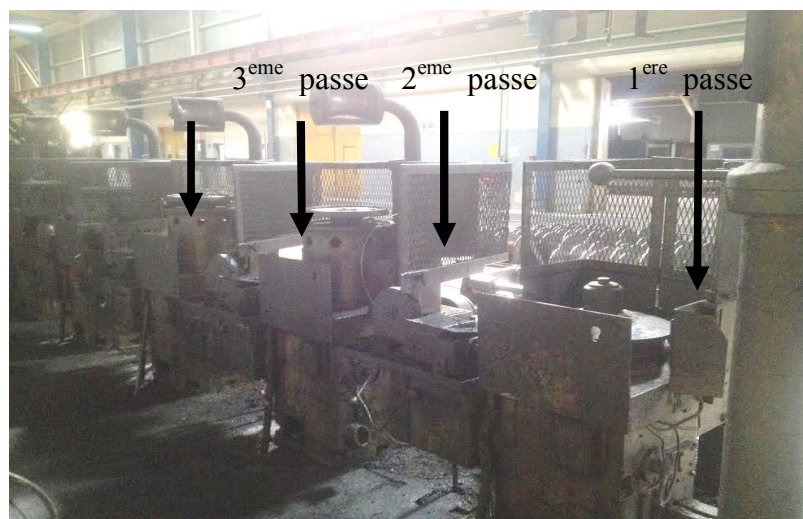


Figure 3.1 : Différentes passes au niveau de la machine d'aluminium AGS (ENICAB Biskra).

(Le Tableau 3.2) est donnée La composition chimique de cet alliage (fil machine). On remarque que cet alliage n'est pas stable du point du vue mécanique lors de son vieillissement naturel.

Alliage AGS	Éléments d'impureté wt. %						
	Mg	Si	Cu	Fe	Pub	V	Zn
Al (97,34 %)	1,34	0,51	0,27	0,21	0,20	0,05	0,08

Tableau 3.2 : Composition chimique de fil machine (*ENICAB Biskra*). [32]

Notre analyse supplémentaire de la composition chimique du fil machine a été effectuée par EDX au laboratoire LSGM de l'USTHB .on note que les principaux éléments qui sont présentés dans le tableau 2.

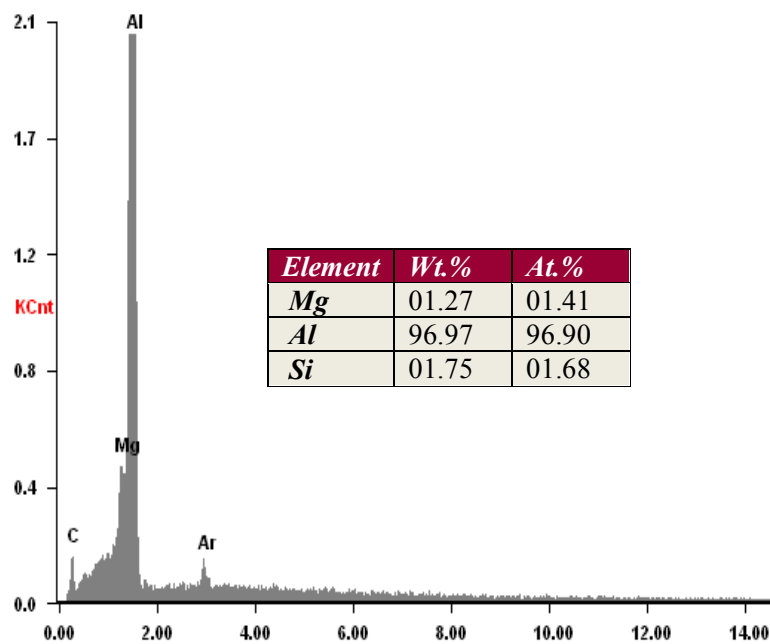


Figure 3.2 : Composition chimique du fil machine d'aluminium. [32]

3.2. Traitements thermiques

La déformation à froid (tréfilage) induites les modifications microstructurales, modifient les propriétés physiques et mécaniques des métaux.

En applique ses traitements thermiques dans un four à résistance électrique (Figure 3.3). Les échantillons des alliages étudiés (Fil machine, $\epsilon_1 = 21,66\%$, $\epsilon_2 = 68,99\%$, $\epsilon_3 = 86,81\%$) ont

subi un traitement thermique de recuit à 500°C pendant des temps du maintien allant jusqu'à deux heures, suivie d'une trempe à l'air libre de la salle à la température ambiante



Figure 3.3 : Four programmable pour traitement thermique.

3.3. Préparation métallographique

Les échantillons sont découpés sous forme de coupes longitudinales de 2 cm de longueur. Pour éviter l'échauffement des échantillons, le découpage se fait à vitesse lente et sous une coulée d'eau froide.

3.3.1. Enrobage

Il permet de faciliter le polissage manuel de petits échantillons (Figure 3.4). La température d'enrobage ne présente aucun risque de modification structurale de la surface des échantillons en alliage AGS. La manipulation des échantillons prélevés a nécessité leur enrobage à froid dans des résines époxydes, durcissant à froid (durcissement à l'air dans des moules plastiques).



Figure 3.4 : Echantillons coupés et enrobés.

3.3.2. Gamme de polissage

Pour faire l'observation au microscope optique, les échantillons enrobés sont polis mécaniquement sur une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260 (Figure 3.5). Avec des papiers abrasifs en carbure de silicium, du grade 100 jusqu'au grade 2000, en suite sur tissus feutré avec addition du lubrifiant et des pattes diamantée de granulométrie 6 μm et 3 μm . Suivi d'un nettoyage à l'eau distillée et séché à l'air.



Figure 3.5: Polisseuse mécanique de type polisseuse (FORCIPOL 2)

3.3.3. Solution d'attaque chimique

Pour observer la structure d'un échantillon, il doit être préalablement attaqué chimiquement. La structure est alors révélée grâce à la formation d'une couche d'oxyde Al_2O_3 d'épaisseur variable ou par la réflexion de la lumière variable selon le relief de surface obtenu.

Plusieurs essais d'attaque chimiques ont été utilisés sur nos échantillons polis, mais les résultats les plus efficaces sont obtenus en utilisant le réactif de Keller.

Les échantillons puis attaqués chimiquement par le réactif chimique suivant (Keller). Après chaque attaque chimique les échantillons sont nettoyés de tout résidu à l'aide de l'eau distillée puis séchés à l'air comprimé.

La solution utilisée se constitue de 10 ml d'acide nitrique HNO_3 , de 10ml d'acide fluorhydrique HF , 15 ml Acide chlorhydrique HCL et elle est complétée d'eau distillée jusqu'à un volume total de 100ml. Le temps d'attaque pour révéler les grains ne dépasse pas trois minutes.

3.4. Techniques de caractérisation

3.4.1. Microscope électronique à balayage (MEB)

Les principes de fonctionnement et de formation de l'image de microscope électronique à balayage (MEB) sont entièrement différents de ceux du MO.

La microscope électronique à balayage est une technique de microscopie basée sur le principe des interaction électron-matière .il consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident [32].

Le fonctionnement d'un MEB présente dans (la Figure 3.6).

L'observation de la surface s'effectue par bombardement de la surface avec un faisceau d'électrons formé dans un canon, un point sur une surface réémet plusieurs signaux caractéristiques.

Dans notre cas nous avons utilisé un microscope électronique à balayage Jeol JSM 6360LV (Figure 3.7).

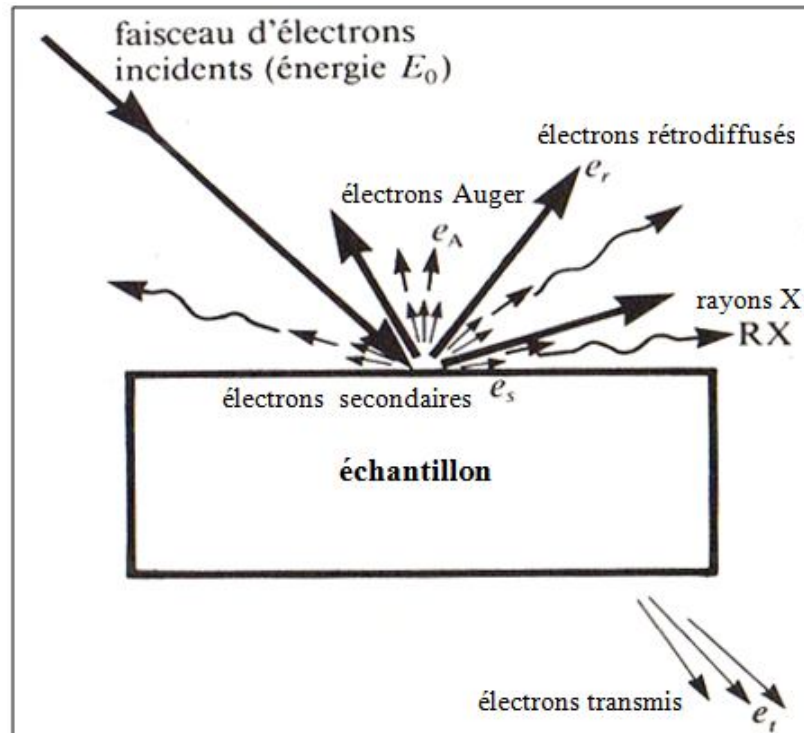


Figure 3.6: Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un échantillon [32].



Figure 3.7 : Microscope Electronique à Balayage Jeol JSM 6360LV

3.4.2. Analyse de la microdureté

3.4.2.1. Principe de mesure

Cette méthode est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution des propriétés mécaniques des fils après chaque étape de tréfilage. La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la

déformation. La détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un pénétrateur est nécessaire pour la mesure de micro dureté, sous l'action d'une charge appliquée. Le rapport de la force appliquée F à la surface en cours S de l'empreinte donne la dureté H ($H=F/S$)

Nous avons utilisé un micro-duremètre Vickers du type AFFRI (Figure 3.8). Une moyenne de mesure et calculé à partir de quatre essais sur la coupe longitudinale de chaque échantillons pour les deux états (tréfilés et tréfilés puis homogénéisé).

Au terme de chaque étape découpage, des mesures de microdureté ont été réalisées sur des échantillons "polis miroir". Les essais ont été réalisés en appliquant une charge de 300g avec un temps d'application de 5 s.

Dans cette étude, afin de suivre l'évolution de la microdureté des fils tréfilés et tréfilés puis homogénéisé, les mesures de microdureté de Vickers ont été un complément de caractérisation important.

Pour chaque échantillon, la valeur de la microdureté correspondant représente la moyenne de quatre mesures prises.



Figure.3.8 : micro-duremètre Vickers du type AFFRI

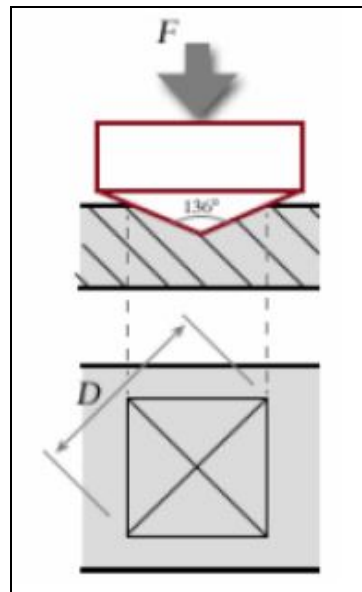


Figure 3.9 : Principe de la mesure de microdureté Vickers.

3.4.3. Mesure de résistivité électrique

Les mesures de résistivité électrique ont été faites sur un pont de marque Résistoma de type 2303 (Figure 3.10). Ces techniques dépendent dans une certaine mesure de la géométrie de l'échantillon.

Pour 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'espacement est exactement connu (110 cm) . Grâce à cela, cette résistance peut être convertie en résistivité.

La résistivité électrique est calculée par la formule :

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = R \cdot S / L \left(\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

R : résistivité électrique (Ω)

S : section du fil électrique (mm^2)

L : longueur du fil électrique, 110 cm

La température de l'atmosphère (ambiante) est différente à la température de référence 20°C en multipliant les valeurs données par un facteur de correction de température K spécifique pour l'alliage Al-Mg-Si (AGS), Ces mesure en été réalisé au laboratoire d'analyse physique de l'entreprise ENICAB de Biskra.

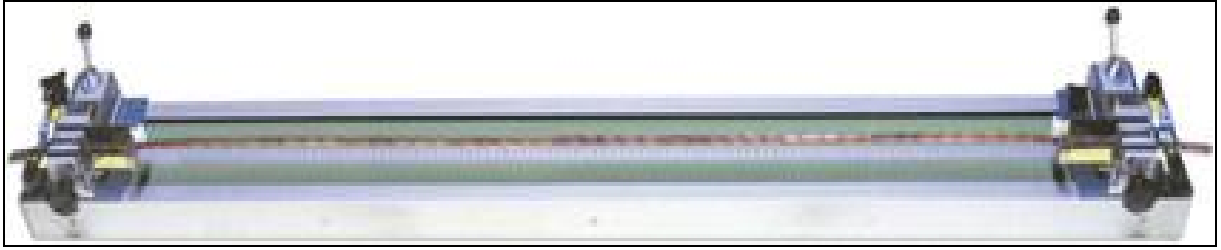


Figure 3.10 : Dispositif d'un Machine resistomat type 2303

3.4.4. Analyse par diffraction des rayons X (pics)

Les rayons X font partie des rayonnements électromagnétiques ayant une grande énergie et une faible longueur d'onde, qui est de l'ordre des espacements atomiques dans un solide. Une grande partie des connaissances en matière d'arrangements atomiques et moléculaires des solides provient d'études effectuées par diffraction des rayons X (DRX). (Figure 3.11).





Figure 3.11 : Diffractomètre de type EQUINOX 100

La figure 3.12 contient deux plans atomiques parallèles A-A' et B-B' qui ont les mêmes indices de Miller, h, k et l et qui sont séparés par l'espacement d_{hkl} . La distance d_{hkl} est mesurable par diffraction de rayons X (DRX) grâce à la loi de Bragg.

$$n\lambda = d_{hkl} \sin\theta + d_{hkl} \sin\theta = 2d_{hkl} \sin\theta \dots\dots\dots (3.3)$$

n est l'ordre de réflexion, qui peut être n'importe quel nombre entier (1, 2, 3...) à condition que $\sin\theta$ ne dépasse pas l'unité et λ longueur d'onde du rayon X.

Dans notre étude, nous avons utilisé un diffractomètre de type EQUINOX 100. L'intervalle angulaire qu'il permet de mesurer s'étend de 10° à 120° sur l'échelle 2θ

Le rayonnement X monochromatique est produit par une anticathode en cuivre (Cu). Le filtre est constitué de nickel (Ni) et ne laisse passer que la raie K_α ($\lambda_{Cu(\alpha)} = 1,54060 \text{ \AA}$).

La partie irradiée de l'échantillon est rectangulaire, les rayons X tombent sur la section longitudinale du fil d'aluminium.

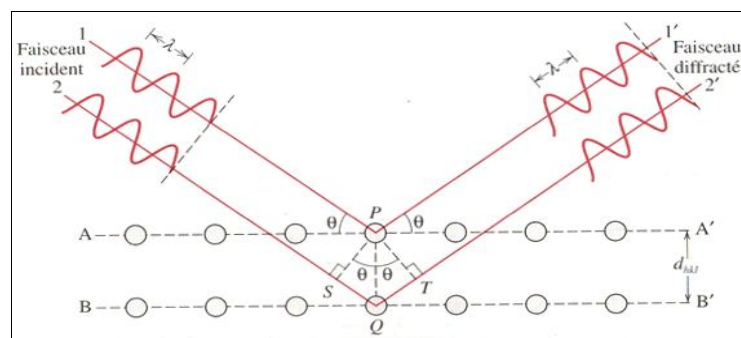


Figure 3.12 : Diffraction de rayon X par des plans d'atomes (A-A' et B-B'). [32]

Chapitre 4

Résultats et discussions

Chapitre 4 : Résultats et discussions	41
4.1 Caractérisation des fils tréfilés non homogénéisé	41
4.1.1 Caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB)	41
4.1.2 Analyse de la microdureté	42
4.1.3 Essai de la résistivité électrique	43
4.1.4 Analyse par diffraction des rayons X	44
4.2. Caractérisation des fils tréfilés et homogénéisée à 500°C	47
4.2.1 Analyse de la microdureté	47
4.2.2 Essai de la résistivité électrique.....	48

4.1. Caractérisation des fils tréfilés non homogénéisé

4.1.1. Caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB)

La figure 1 présente la micrographie obtenue par le microscope électronique à balayage des échantillons de fil machine et de fil tréfilés à froid ($\epsilon_3=86,81\%$). Dans le cas du fil machine (Figure 4.1), on observe une microstructure texturée, ce qui explique que le fil machine a déjà subi un pré tréfilage. A partir de la Figure 1.b. On observe une coexistence des précipités et des grandes particules intermétalliques (cavité), dispersés aléatoirement au niveau des joints des grains.

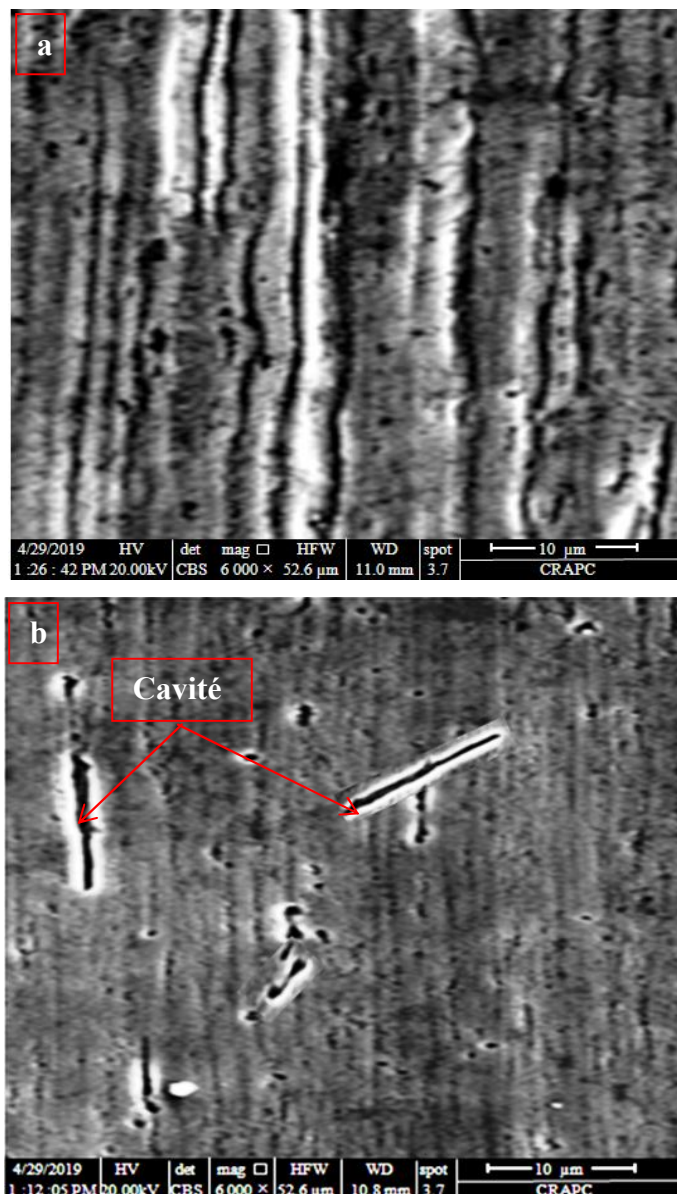


Figure 4.1 : Micrographies obtenues par MEB des échantillons du fil machine (a) et fil tréfilé ($\epsilon_3 = 86,81\%$) (b).

4.1.2. Analyse de la microdureté

La variation de la microdureté (HV) en fonction du différent taux de déformation est présentée dans (la figure 4.2). Cette dernière montre que la microdureté des fils de l'alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid augmente avec l'augmentation du taux de déformation jusqu'à atteindre une valeur maximale dans le cas de fortes réductions par tréfilage (ϵ_3 (86,81%)). Cette augmentation est probablement due aux formations d'un nombre important de dislocations par déformation plastique. Ce phénomène est appelé le durcissement par écrouissage. Ce résultat est en bon accord avec les travaux obtenus par d'autres auteurs [32], [33]

(Tableau 4.1) : Résultats des mesures de la microdureté des fils de l'alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid.

Etat de fil	Nombre d'essais	Taux de déformation ϵ (%)			
		ϵ_0 (Fil machine)	ϵ_1 (21,66%)	ϵ_2 (68,99%)	ϵ_3 (86,81%)
Non recuit	1	69,8	78,4	96,2	113,6
	2	71,6	79,7	98,6	113,2
	3	72,2	77,8	96,5	115,3
	4	70,8	78,5	98,3	114
Microdureté (HV)		71.1	78,6	97,4	114,02

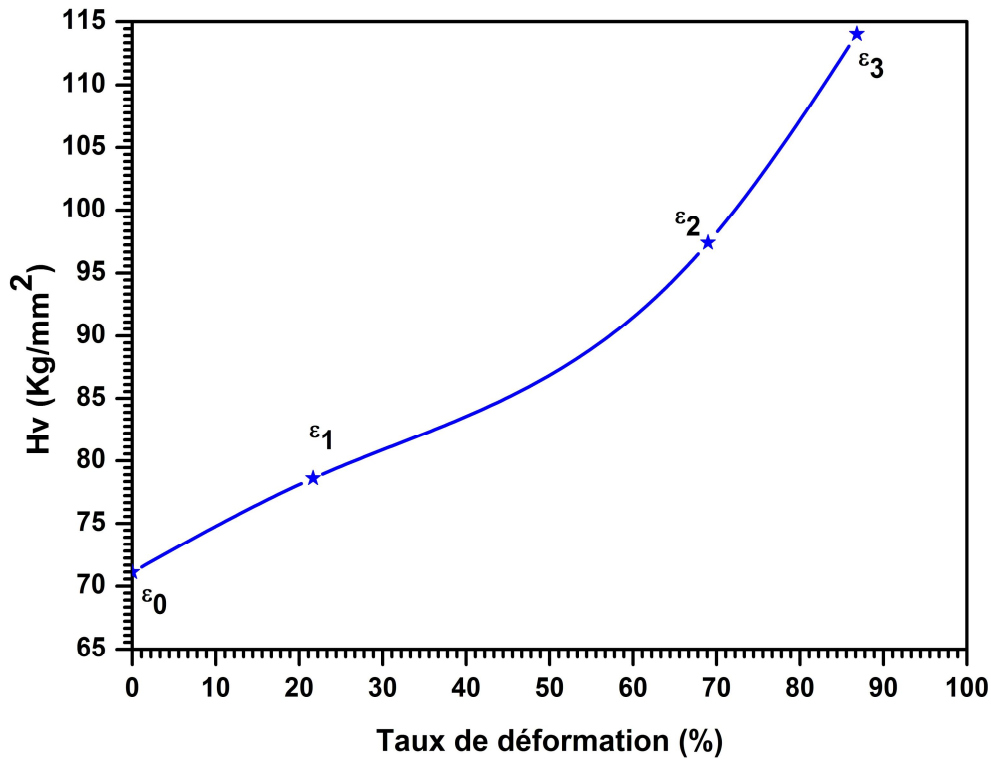


Figure 4. 2 : Variation de la microdureté Vickers du fil électrique d’aluminium tréfilé à froid en fonction du taux de déformation

4.1.3. Essai de la résistivité électrique

Etat de fil	Fil machine	ε ₁ (21,66%)	ε ₂ (68,99%)	ε ₃ (86,81%)
Résistivité électrique Ωmm ² /m	0,03298	0,03412	0,03501	0,03577

Tableau 4.2 : Résultats des mesures de la résistivité électrique des fils de l’alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid.

(La figure 4.3) présente la variation de la résistivité électrique du fil électrique de l’alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid en fonction du différent taux de déformation. On observe que la résistivité électrique des fils électriques tréfilés non homogénéisée augmente avec l’augmentation du taux de déformation. [34], [35] Il est bien connu que dans la température ambiante, la résistivité d’alliages polycristallins est décrite comme suit : $\rho = \rho_T + \rho_I + \rho_R$. Ces trois termes de la résistivité électrique présentent les catégories de mécanismes de diffusion qui sont : Phonons (ρ_T), impuretés (ρ_I) et les défauts liés à la microstructure (ρ_R).

Dans notre étude, l’alliage Al-Mg-Si a subi une déformation à froid par tréfilage, ce qui perturbe l’ordre du réseau cristallin et influe sur la résistivité électrique, ce qui explique leur augmentation. [34], [35].

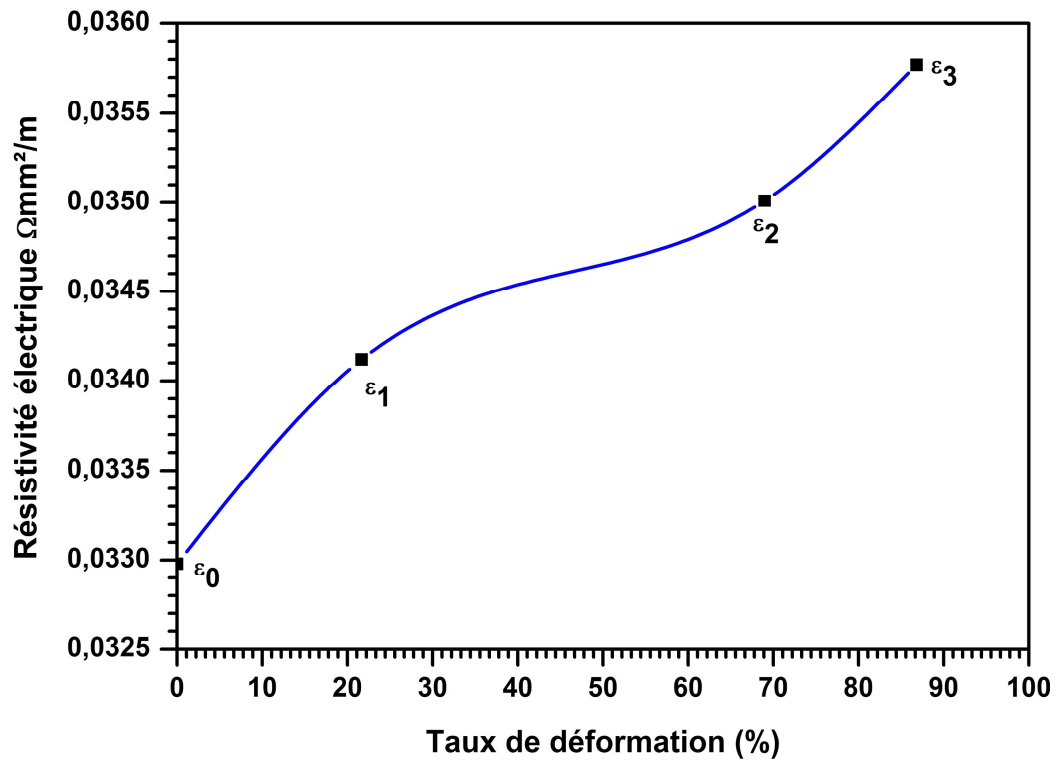


Figure 4.3 : Variation de la résistivité électrique du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid en fonction du taux de déformation

4.1.4. Analyse par diffraction des rayons X

L'utilisation de la technique de diffraction des rayons X (DRX) est très performante pour la détermination de la structure des cristaux. Cette méthode est sensible à toute perturbation de la périodicité du réseau cristallin. Généralement tous les domaines de la métallurgie ont recours à l'une ou l'autre des techniques de caractérisation par rayons X.

Les alliages d'aluminium Al-Mg-Si durcis par la précipitation des phases métastables tel que β'' (Mg_5Si_6) et des phases stables comme la phase β (Mg_2Si) [36].

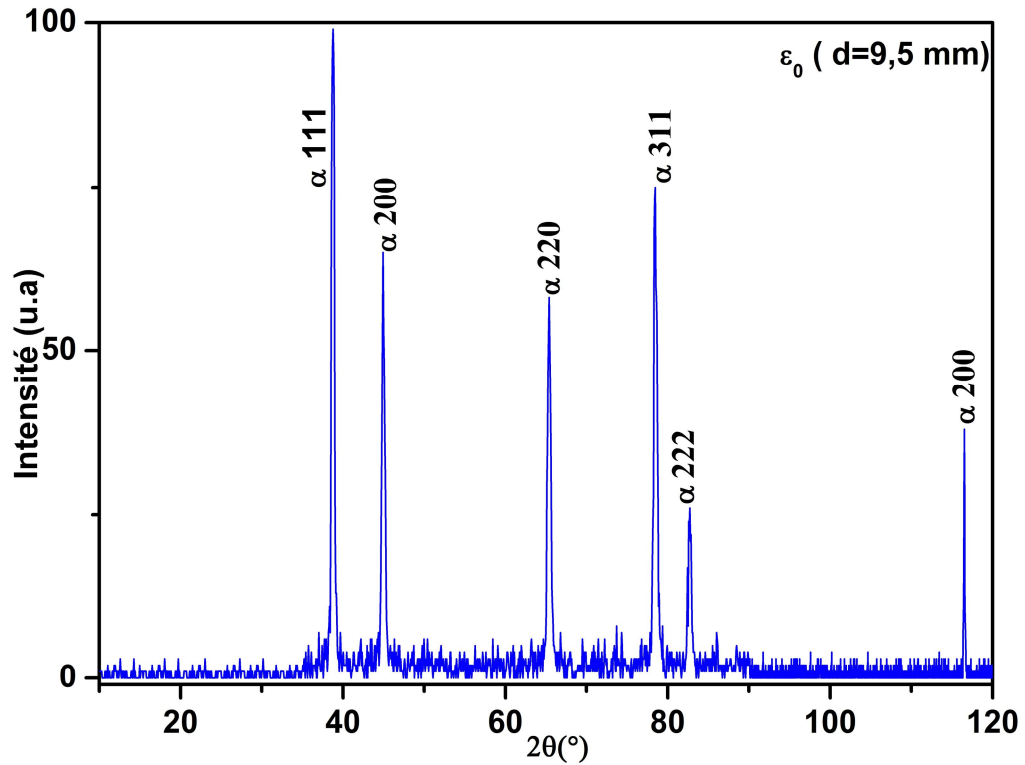


Figure 4.4 : Spectre de diffraction des rayons X, Fil machine.

Le spectre de diffraction des rayons X de l'alliage Al-Mg-Si étudié à l'état de réception est représenté sur (la figure 4.4), selon la fiche ASTM de l'aluminium, les pics correspondant à la structure cubique à face centré CFC de la matrice mère de l'aluminium. Le pic le plus intense est (111) de la matrice de α -aluminium, Ceci montre que les grains ont une orientation privilégiée.

Dans le cas du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid avec un taux de déformation de 86,81% (Figure 4.5), on observe l'apparition d'un nouveau pic à $2\theta = 29.14^\circ$, ce pic est probablement due à la phase métastable Mg_4Si_6 [36], Ce qui explique la présence d'un élément intermétallique ou une dispersoid dans une solution solide d'aluminium.

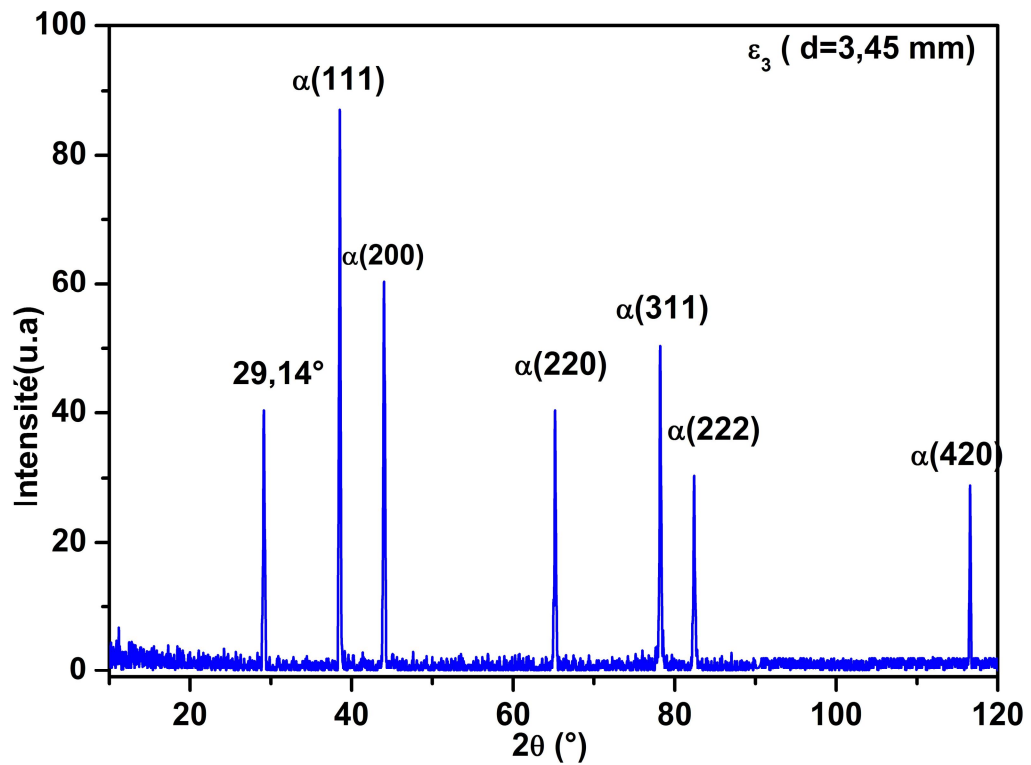


Figure 4.5 : Spectre de diffraction des rayons X, Fil tréfilé à 86,81%.

(La figure 4.6). Présente le décalage des pics dans les spectres de diffraction des RX de fil machine et fil tréfilé à 86,81%. On observe un déplacement des pic vers des nouvelles positions dans le cas du fil tréfilé à 86,81% par rapport à celui obtenue dans le fil machine, comme le pic (200) initialement localisé par l'angle deux thêtas $2\theta = 44,9368^\circ$ se déplace dans une nouvelle position $2\theta = 44,0112^\circ$. Ce déplacement peut être lié à l'apparition des contraintes internes, qui a été provoquées par la déformation plastique de tréfilage à froid.

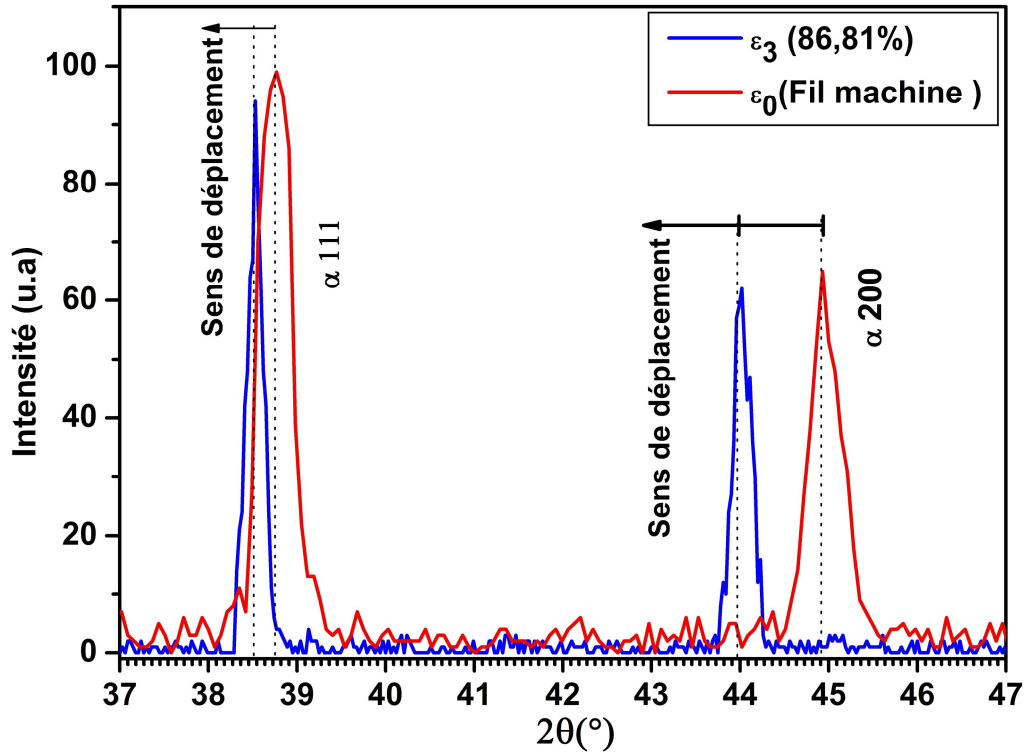


Figure 4.6 : diagramme de diffraction des RX, Fil tréfilé à 86,81%.

4.2. Caractérisation des fils tréfilés et homogénéisés à 500°C

4.2.1. Analyse de la microdureté

La variation de la microdureté Vickers du fil de l'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid en fonction du différent taux de déformation et homogénéisé à 500° pendant 1 heure et 2 heures est représentée sur (la figure 4.7). On observe une diminution de la microdureté avec l'augmentation du temps de maintien de ce traitement thermique. Cette diminution est due au phénomène d'adoucissement provoqué par le traitement d'homogénéisation qui augmente la ductilité du fil de l'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid

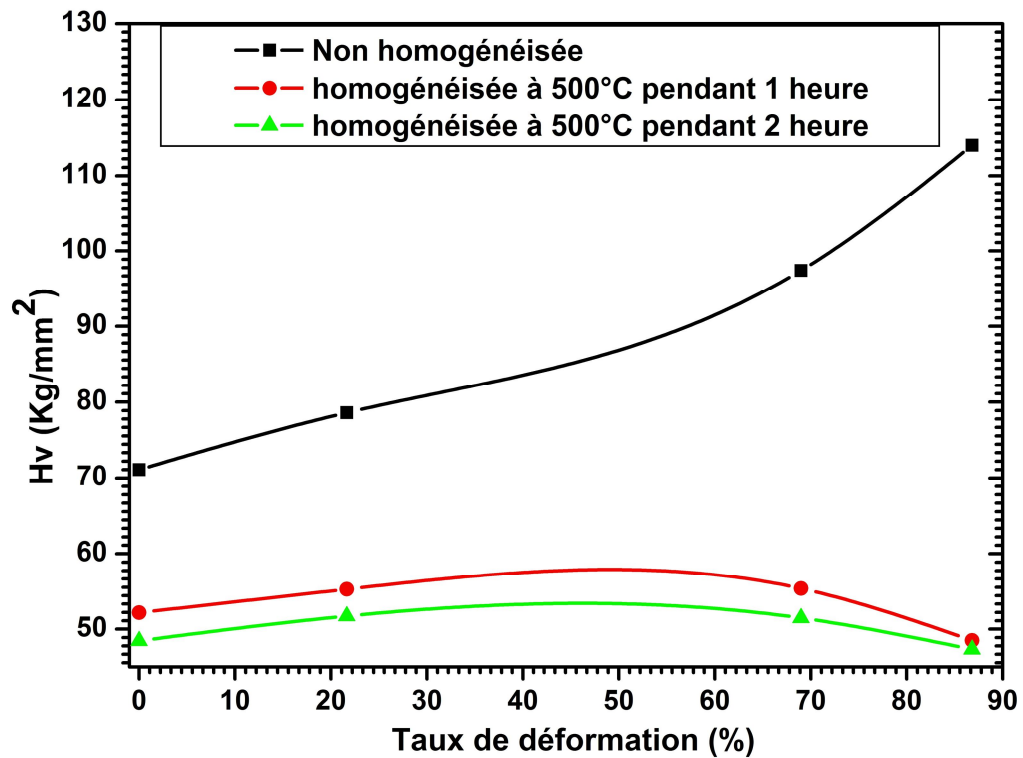


Figure 4.7 : Variation de la microdureté Vickers du fil d'aluminium tréfilé, homogénéisée à 500°C en fonction du taux de déformation

4.2.2. Essai de la résistivité électrique

(La figure 4.8). Présente la variation de la résistivité électrique du fil électrique de l'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid et homogénéisée à 500° pendant 1 heure et 2 heures en fonction du différent taux de déformation. On observe que la résistivité électrique des fils électriques tréfilés non homogénéisée augmente avec le taux de déformation. Dans le cas du fil de l'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid et homogénéisée à 500° pendant 1 heure et 2, on observe une diminution de la résistivité électrique. Ceci est probablement dû à l'accélération du mécanisme de recristallisation durant le traitement d'homogénéisation, qui s'accompagne par un adoucissement du fil de l'alliage Al-Mg-Si. Ceci est bon accord avec d'autres travaux de recherche [34], [37]

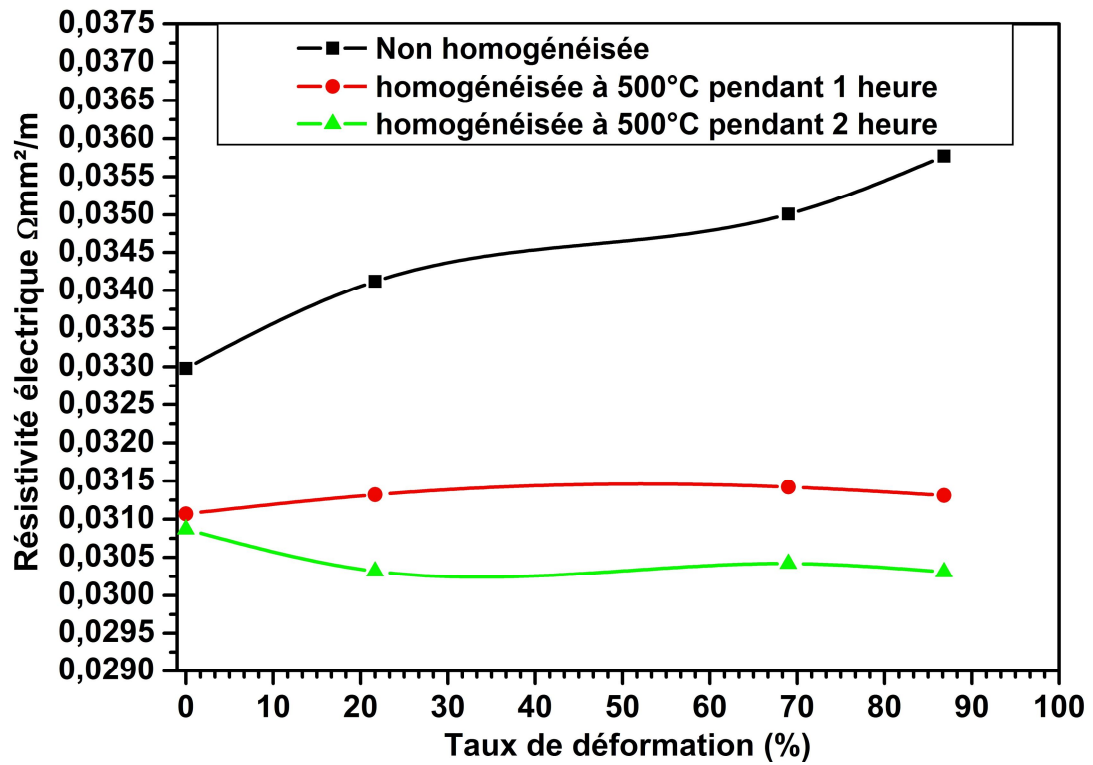


Figure 4.8 : Variation de la résistivité électrique du fil électrique d'aluminium tréfilé à froid, homogénéisée à 500°C en fonction du taux de déformation

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but de mieux comprendre l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et électrique d'un fil d'alliage Al-Mg-Si tréfilé à froid avec différents taux de déformation. Pour cela, plusieurs techniques expérimentales ont été mises en œuvre, pour compléter ce travail, on utilise essentiellement le microscope électrique à balayage (MEB), les mesures de micro dureté Vickers (Hv) et la diffraction des rayons X.

Les principaux résultats de ce travail sont appréciables et en bon accord avec les travaux de recherche trouvés par d'autres auteurs. Ces résultats peuvent se résumer de la manière suivante :

- ✚ L'observation par microscope électrique à balayage (MEB) montre une microstructure texturée et une coexistence des précipités et des grandes particules intermétalliques (cavité), dispersés aléatoirement au niveau des joints des grains.
- ✚ L'analyse de la microdureté (HV) montre que la microdureté des fils de l'alliage Al-Mg-Si tréfilés à froid augmente avec l'augmentation du taux de déformation.
- ✚ Le tréfilage augmente légèrement la résistivité électrique des fils tréfilés. Dans notre étude, l'alliage Al-Mg-Si a subi une déformation à froid par tréfilage, ce qui perturbe l'ordre du réseau cristallin et influe sur la résistivité électrique, ce qui explique leur augmentation
- ✚ Les Spectres de diffraction des rayons X obtenus à partir des alliages Al-Mg-Si montrent que les pics enregistrés correspondent à la structure de la matrice α -aluminium (CFC), ainsi que, l'apparition d'un nouveau correspond à la phase métastable Mg_4Si_6 .

Références

Références

- [1] K. Lim. Song and Y. Du and X. Fang, Archives of Metallurgies and Materials, 572 (2012) 457– 467
- [2] B. Barlus, Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2004)
- [3]The Aluminume Association ,1525Wilson Boulevard, Arlington,VA 2220 www.aluminum.org.Revised:April 2006
- [4]W.F.Miao and D.E.Laughlin, Met.Mater.Trans, 31 (2000) 361-371
- [5] G.Though. Thompson, (1997)192-201
- [6] G. Murry, livre de Métallugie des Alliages, 6 2004) 199-3
- [7] G.W. Lorimer, fizika 2 suppl, 2 (1970) 669-673
- [8] Y. Birol, Scripta Materialia, 2(2005) 169-173
- [9] www.alu.menzeken.com (Alliages d'aluminium) 2004
- [10] C. Cayron, Thèse de doctorat, École polytechnique Lausanne, (2000)
- [11] R . Develay, Doc. M 1290, 17(1991)188-193
- [12] R. Guemini. Mémoire de Magister, Université de Constantine, (1981)
- [13] K. Boulemzaoud. Mémoire de Magister, Université de Constantine, (2012)
- [14] S. Vyazovkin and D. Dollimore andJ. Chem et all,Sci, 36(1996) 42-55
- [15] I. Lakhtine, 2eme édition revue. Edition Mir , Métallographie et traitement thermiques des métaux ,6 (1986) 367 – 368
- [16] M. Dupeux, aide mémoire science des matériaux,14 (2004)105-148
- [17] L. Sagalowicz and G. Lapasset and G. Hug, Phil. Mag. Lett, 74 (1996) 57-66
- [18] A.Perovic and D.Weatherly and D.J.Loyed, Scrip Met, 79 (1999) 599-604
- [19] J.P Baïllon and J.M.Dorlot, troisième édition. Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal, (2000), 480-481
- [20] J.E. Hatch, ASM International,49 (1984)248- 319.
- [21] C.Vargel, Dunod,4 (1999), 501-502
- [22] S .Payan, Thèse science chimique Bordeaux ,Université de Bordeaux, (2001)
- [23]C.Messaoud,University de Biskra, ,39 (2014) 14-16
- [24] R. Charpigny and C. Demange and R. Develay et all, technique de l'ingénieure M650A, 29 (1987) 8- 9
- [25]G. Molimdar, Thèse INSA de Lyon, (1999)
- [26] M. Laverroxx, La revue de métallurgiecite, 2 (1993) 132-63
- [27] G. Simonnet, techniques Del'ingénieur, 118(1996) 628-638

-
- [28] Thèse de doctorat, Carole Levrau, Ecole des mines de paris ,(2006)
- [29] J. Bonzel, and E. Siebel, *Betonechnische Berichte*, 20 (1977) 153-158
- [30] C. Levrau, Thèse de doctorat, ENSMP (2006)
- [31] D. William and Jr. Callister, *Science et génie des matériaux*,13 (2002) 684-685
- [32] H. Farh and H. Belghith and T Ziar et all, *Diffusion Foundations*, 18 (2018) 14-18
- [33] M. Zidani and L. Bessais and H. Farh et all ,*Steel and Composite Structures*, 22 (2016) 745-752.
- [34] M. Zidani and L. Bessais and H. Farh et all ,*Steel and Composite Structures*, 22 (2016) 745-752.
- [35] M. Zidani and D. Hadid and T. Djimaoui and et all, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 24 (2016) 9-16
- [36] Lakhdar Bessais, Thèse doctorat, Université de Biskra, Algérie, (2017)
- [37] M. Zidani, T. Djimaoui, H. Farh et all, *Conference on the APPORT of the Simulation in technological innovation*, 24 (2017) 73-75

Annexe

Fiche A.S.T.M de l'aluminium

Name and formula

Reference code:	00-004-0787
Mineral name:	Aluminum, syn
PDF index name:	Aluminum
Empirical formula:	Al
Chemical formula:	Al

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	4,0494
b (Å):	4,0494
c (Å):	4,0494
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	90,0000
Calculated density (g/cm ³):	2,70
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	66,40
Z:	4,00
RIR:	3,62

Subfiles and Quality

Subfiles:	Inorganic Mineral Alloy, metal or intermetallic Common Phase Educational pattern Explosive Forensic NBS pattern Pigment/Dye
Quality:	Star (S)

Comments

Color:	Light gray metallic
General comments:	Mineral species of doubtful validity, <i>Am. Mineral.</i> , 65 205 (1980).
Sample preparation:	The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA.
Analysis:	The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference).
Additional pattern:	See ICSD 64700 (PDF 01-085-1327).
Temperature:	Pattern taken at 25 C.

References

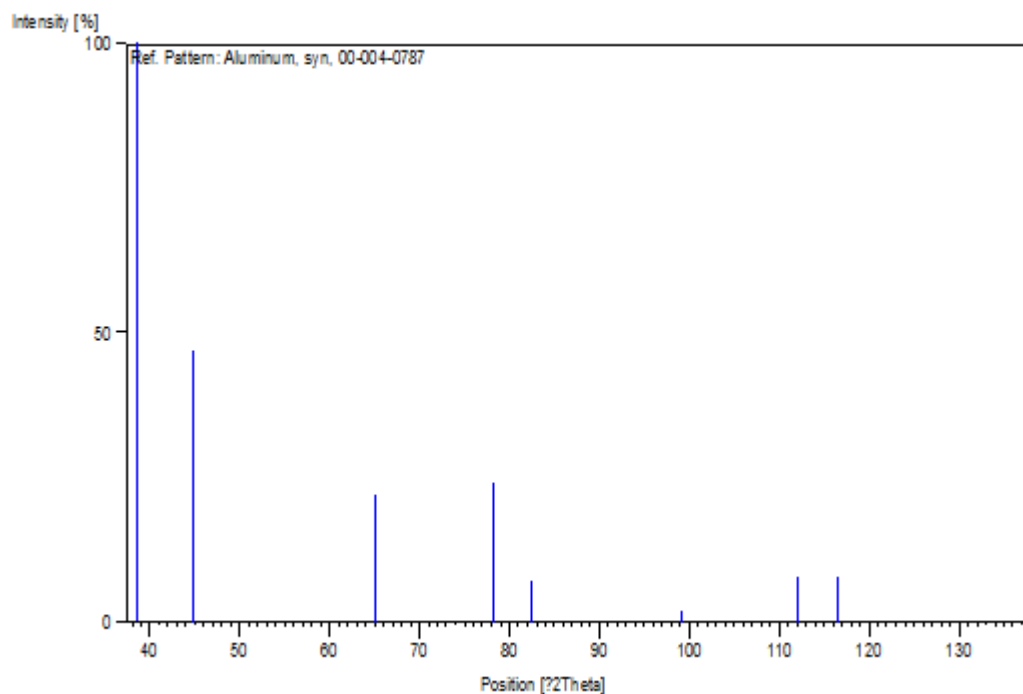
Primary reference:

Swanson, Tatge., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 11, (1953)*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2,33800	38,473	100,0
2	2	0	0	2,02400	44,740	47,0
3	2	2	0	1,43100	65,135	22,0
4	3	1	1	1,22100	78,230	24,0
5	2	2	2	1,16900	82,438	7,0
6	4	0	0	1,01240	99,081	2,0
7	3	3	1	0,92890	112,046	8,0
8	4	2	0	0,90550	116,574	8,0
9	4	2	2	0,82660	137,463	8,0

Stick Pattern



Résumé

Ce mémoire présente une étude sur les fils d'un alliage d'aluminium Al-Mg-Si, faisant partie de la catégorie des alliages à durcissement structural, déformé à froid par tréfilage avec différent taux. Ce type d'alliage est utilisé par l'entreprise ENICAB de Biskra-Algérie pour la fabrication des câbles électrique. Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence des traitements thermiques sur la microdureté d'un alliage d'aluminium de la série 6000, ainsi que, l'effet combinée du taux de déformation à froid par tréfilage et la température d'homogénéisation sur les propriétés mécanique et électrique. A cet égard, différentes techniques expérimentales ont été utilisées, à savoir, la diffraction des rayons X, microscopies électronique à balayage, la microdureté Hv et les mesures de la résistivité électrique.

La Caractérisation par électronique à balayage permet de déterminer la présence des textures, des précipités et des cavités.

Les résultats de la microdureté et la résistivité électrique montrent une augmentation importante de la dureté et la résistivité électrique avec l'augmentation du taux de déformation.

L'analyse par diffraction des rayons X montre un décalage des pics vers les bas angles dans le cas de l'alliage fortement déformé.

Mots Clés: Texture, Précipitation, Déformation par Tréfilage, Alliage Al-Mg-Si, résistivité électrique.

Abstract

This memoir presents a study on the aluminum alloy Al-Mg-Si wires, Which belong to the category of structural hardening alloys, cold deformed by drawing wire with different levels. This type of alloy is used by the company ENICAB of Biskra-Algeria for the manufacture of electric cables. This work aims to study the influence of heat treatments on the microhardness of the aluminum alloy series 6000, as well as the combined effect of cold deformation level by drawing wire and the homogenization temperature on the mechanical and electrical properties. In this regard, deferent experimental techniques were used, namely, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, micro hardness Hv and electrical resistivity measurements.

Scanning electron characterization makes it possible to determine the presence of textures, precipitates and cavities.

The results of microhardness and electrical resistivity show a significant increase in hardness and electrical resistivity with the increasing of deformation level.

X-ray diffraction analysis shows a shift of the peaks towards the low angles in the case of the strongly deformed alloy.

Mots Clés: Texture, Précipitation, Wire drawing deformation, Al-Mg-Si alloy, electrical resistivity.

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة عن أسلاك سبائك الألومنيوم Al-Mg-Si ، التي تنتمي إلى فئة السبائك ذات التصليد البنيوي. المسحوبة على البارد بمعدلات تشوه مختلفة. يتم استخدام هذا النوع من السبائك من قبل شركة ENICAB في بسكرة-الجزائر لتصنيع الأسلاك الكهربائية. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير المعالجات الحرارية على الصلادة لسبائك ألومنيوم السلسلة 6000 ، بالإضافة إلى التأثير المشترك لمعدل التشوه على البارد من خلال سحب الأسلاك ودرجة حرارة التجانس على الخصائص الميكانيكية والكهربائية. في هذا الصدد ، تم استخدام تقنيات تجريبية مختلفة ، وهي حيود الأشعة السينية (XRD) ، المجهر الإلكتروني الماسح ، قياس الصلادة (Hv) وقياسات المقاومة الكهربائية.

التحليل بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح يجعل من الممكن تحديد وجود النسيج البنيوي، الترسيبات والتجوييف.

تظهر نتائج الصلادة والمقاومة الكهربائية زيادة كبيرة في الصلادة والمقاومة الكهربائية مع زيادة معدل التشوه.

يُظهر تحليل حيود الأشعة السينية نزوح القمم نحو الزوايا المنخفضة في حالة السبائك ذات معدل تشوه كبير.

كلمات مفتاحية: النسيج البنيوي، الترسيبات التشوه عن طريق السحب، سبائك Al-Mg-Si، المقاومة الكهربائية.