

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention de
**Diplôme de Master en génie
mécanique**
Matériaux et traitements de surfaces



Thème :

Optimisation du revenu des fils en alliage d'aluminium
tréfilés utilisés pour les câbles électriques

Proposé et dirigé par :

-Madame: HANNACHE

-BOUGHOUAOU Farid

Présenté par :

- MEROUCHI benali

Année Universitaire 2015/2016

Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu le bon dieu de nous avoir donné le courage la patience et la capacité de ce travail à terme.

Nous présentons nos profondes reconnaissances en premier lieu à monsieur le directeur général de CABEL ELECTRIQUE –SPA-Alger qui a offert un accueil chaleureux au sein de l'entreprise.

Nous tenons à remercier madame HANNACHE notre promotrice et Co-promoteur BOUGHOUAOU Farid pour son grand soutien et conseils considérables.

Nous tenons aussi à remercier toute la personne des laboratoires de métallurgie de CABEL ELECTRIQUE –SPA-Alger qui nous ont aidés pour l'accomplissement de notre travail.

Je tiens à remercier vivement.

La technicienne laboratoire des sciences et matériaux madame BOUAFIA Hanifa.

Aux membres de jury pour l'honneur que nous ont accordé en acceptant de juger notre travail.

Enfin nous voudrions exprimer notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont bien voulu participer à ce travail, ont contribué largement à son aboutissement.

Dédicace

Je dédie ce travail a

Ma très chère mère, et mon très cher père, à leur grand sacrifice e le

Dévouement Our non bonheur

Ames frères ma famille

Sans oublier grand –père

A tous mes amis sans exception

Et a tout la promotion de matériaux et traitement de surface

2015-2016

Sommaires

Introduction générale

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Introduction

I. Propriétés de L'aluminium	01
II. Principales caractéristiques de l'alliage l'aluminium	01
II.1. Masse volumique	01
II.2. Résistance à la corrosion	02
II.3. Mise en forme	02
II.4. Propriétés physiques de l'aluminium.....	02
II.4.1. Conductivité électrique	02
II.4.2.. Propriétés thermique	04
II.5. Propriétés mécaniques	04
II.6. Propriétés à chaud	05
III. L'aluminium et ses alliages.....	05
III.1. Les familles d'alliages d'aluminium	05
III.1.1. Alliages corroyés	05
III.1.1.a. Alliage à durcissement par écrouissage.....	06
III.1.1.b. Alliage à durcissement structural.....	07
III.1.2. Alliages de fonderie	07
III.1.2.a. Qualités recherchées	07
III.2. Effets des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium.....	07
III.2.1. Le silicium.....	08
III.2.2. Le cuivre.....	08
III.2.3. Le magnésium.....	08
III.2.4. Le zinc.....	08
III.3. Influence des impuretés.....	08
III.3.1. Le fer.....	08
III.3.2. Le nickel.....	08

Sommaires

III.3.3.Le phosphore.....	08
III.3.4.Le plomb.....	09
III.3.5.L'étain.....	09
III.3.6.L'antimoine.....	09
III.3.7.Le titane.....	09
IV. Alliages Almélec	09
IV.1.Définition de l'almélec	09
IV.2.Applications de l'almélec	09
IV.3. série 6XXX	10
IV.4.Le diagramme d'équilibre Al-Mg ₂ Si	10
IV.4. Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage d'aluminium 6101... 11	
IV.5. Comportement en corrosion des alliages almélec 6101	11
Chapitre II: tréfilage et revenu de l'Aluminium	
I-tréfilage	12
I.1. Introduction	12
I.2. Définition de tréfilage	12
I.3.Principe de tréfilage	13
I.4. la préparation de surface	14
I.5. Le lubrifiant	14
I.5.1. Rôle de lubrifiant	14
I.5.2. Propriétés de lubrifiant	15
I.6. La filière	15
I.7. outils et équipement industriels de tréfilage	16
I.7.1. La machina simple	16
I.7.2. Les machines multiples	17
I.7.2.1. Les machines continues ou à passage direct	17
I.7.2.2. Les machine à accumulation	17
I.7.2.3. Les machine à glissement	17
I.8. Le frottement	17
I.9. la température	18
I.10. Ecouissage d'un matériau	18

Sommaires

I.11 nettoyage et Traitement thermique	18
II. Traitement thermique de l'alliage d'aluminium	19
II.1.Introduction	19
II.2.Mise en œuvre industrielle	19
II.3.Les différents états d'alliage d'aluminium traité	19
II.4.But de traitement thermique	20
II.5. revenu de l'aluminium	20
II.5.1.Définition de revenu	20
II.5.2.Etats revenu.....	20
Chapitre III : Techniques Expérimentales	
I. Introduction	22
II. La méthodologie expérimentale	22
II.1.Matériaux étudié	22
II.2. échantillons étudiés.....	23
II.3. Taux de réduction de la section	23
II.4 Traitement thermique	23
III. Techniques de caractérisations	24
III.1.Mesure de la résistance électrique linéique	24
III.2 Essai de traction	25
III.3.La machine de traction	26
III.4.Objectif d'Essai de traction	26
III.5. Préparation métallographique des échantillons	27
III.5.1.Prélèvement	27
II.5.2. Enrobages	27
III.5.3. polissages	28
III.5.4.Polissage de finition	28
III.5.5. attaque chimique	29
III.5.6.Observation microscopique	29
III.5.7.La dureté	30

Sommaires

III.5.8.Principe de la dureté Brinell.....	30
Chapitre IV Résultats et Interprétations	
I. Caractérisation du fil machine	31
I.1. Composition chimique du fil machine	31
I.2. Résistivités ρ et conductivités σ électriques	31
II.3.Microstructure du fil machine	32
II.4.Essai de traction	32
I.5.Caractéristiques mécaniques du fil machine	34
I.6 La dureté	35
II. Caractérisation du fil machine tréfiles avant revenu.....	35
II.1.Résistivités ρ et conductivités σ électriques du fil tréfilé avant revenu	35
II.2.Essai de traction	36
II.3.Caractéristiques mécaniques de fil tréfilé avant revenu.....	37
III. Caractérisation du fil machine tréfiles après revenu	36
III.1. Résistivités ρ et conductivités σ électriques après revenu	37
III.2.Essai de traction	38
III.2.1.Courbe de traction du fil tréfiles après revenu	38
III.3.Caractéristiques mécaniques du fil tréfilé après revenu.....	39
III.4.Traitement thermique (revenu) $T=190^{\circ}\text{C}$	40
III.5.Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C ...	41
IV. Interprétations	42
IV.1.Tréfilage	42

Sommaires

IV.2.Traitement thermique (revenu) T=160°C	43
IV.2.Traitement thermique (revenu) T=190°C	44
IV.3. Les conditions optimales d'utilisation de l'alliage d'aluminium pour les câbles électriques	44
Conclusion général	45
Référence bibliographique.....	46

Liste des figures

N° de figure	Titre de figure	N° de page
Figure (II.1)	photo d'une ligne de tréfilage	13
Figure (II.2)	schéma principe de tréfilage	14
Figure (II.3)	Schéma d'une filière de tréfilage	15
Figure (II.4)	Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple	18
Figure (III.1)	fil machin étudiés	22
Figure (III.2)	L'appareil de mesuré la résistance R_L	25
Figure (III.3)	Machine de traction (MTS)	26
Figure (III.4)	Echantillons enrobé	27
Figure (III.5)	Enrobeuse	27
Figure (III.6)	La polisseuse.	28
Figure (III.7)	Polisseuse de finition	28
Figure(III.8)	Microscope optique Carl Zeiss	29
Figure1(III.9)	Schéma de principe	30
Figure(VI.1)	Microstructure de l'alliage d'aluminium par microscopie optique-fil machine $\Phi=9.36$ (mm) :	32

Liste des tableaux

N° de tableaux	Titre de tableaux	N° de page
tableaux (I.1)	Propriétés physiques de l'aluminium	04
tableaux (I.2)	Familles d'alliage d'aluminium	06
tableaux (I.3)	Alliage durcissement par écrouissage	06
tableaux (I.4)	Alliage durcissement structural	07
tableaux (I.5)	Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage d'aluminium 6101	11
tableaux (III.1)	Taux de réduction de la section	24
tableaux (VI.1)	Composition chimique du fil machine	31
tableaux (VI.2)	résistance linéique de Fil machine	31
tableaux (VI.3)	résistivités et conductivités électriques de Fil machine	32
tableaux IV.4)	caractéristiques mécaniques de Fil machine	34
tableaux (IV.5)	Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage 6101	34
tableaux (IV.6)	résistance linéique de fil tréfile avant revenu	35
tableaux (IV.7)	résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu	35
tableaux (IV.8)	caractéristiques mécaniques de fil tréfilé avant revenu	36
tableaux (IV.9)	résistance linéique de fil tréfile après revenu	37
tableaux (IV.10)	résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu	37
tableaux (IV.11)	caractéristiques mécaniques de fil tréfilé après revenu	39
tableaux (IV.12)	Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C	41
tableaux (IV.13)	caractéristiques mécaniques de fils machine, tréfilé après et après revenu	42

Liste des courbes

N° de courbes	Titre des courbes	N° de page
Courbe I-1	Le diagramme d'équilibre Al-Mg ₂ S	10
Courbe IV-1	Courbe de traction de Fils machine	33
Courbe IV-2	détermination des caractéristiques mécaniques	33
Courbe IV-3	Courbe de traction de Fil tréfilé avant revenu	35
Courbe IV-4	Courbe de traction de fil tréfile après revenu (02 heures)	38
Courbe IV-5	Courbe de traction de fil tréfile après revenu (04 heures)	38
Courbe IV-6	Courbe de traction de fil tréfile après revenu (06 heures)	39
Courbe IV-7	variation des résistivités électriques	41
Courbe IV-8	variation des résistances mécaniques R _m	41
Courbe IV-9	variation de l'allongement a la rupture A (%)	42

Résumé :

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques et mécaniques d'un fil en alliage d'aluminium (Al-Si-Mg) de la série 6101, utilisé pour le transport de l'énergie électrique.

Les caractéristiques ont été examinées pour un fil tréfilé à froid avec un taux de réduction du diamètre de 85%. Nous avons effectué un traitement thermique de revenu à 160°C et 190°C afin d'améliorer les propriétés mécaniques et augmenter la conductivité électrique. Des mesures de résistance électriques et des essais de traction ont montrés que les conditions optimales de l'utilisation de ce fil pour le transport de l'énergie électrique est de 6 heure de revenu à 160°C.

ملخص

من خلال هذا العمل درسنا الخصائص الكهربائية والميكانيكية لأسلاك (الألمونيوم السليسيوم-المغنيزيوم) من سلسلة 6101، وتستخدم لنقل الطاقة الكهربائية.

تم فحص الخصائص لسلك مسحوب على البارد مع نسبة التخفيض من قطر إلى 85 أجرينا المعالجة الحرارية لتحسين الخواص الميكانيكية وزيادة التوصيل الكهربائي.

وقد أظهرت قياسات المقاومة الكهربائية واختبارات الشد أن الظروف المثلى لاستخدام هذا الموضوع لنقل الطاقة الكهربائية هي 06 ساعات على 160 درجة مئوية

Abstract:

As part of this work we have studied the electrical and mechanical aluminium alloy wire (Al-Si-Mg) of the 6101 series, used for the transport of electrical energy.

The characteristics were examined for a wire from cold with a reduction rate of the diameter of 85%. We conducted a thermal annealing treatment to improve the mechanical properties and increase the electrical conductivity. Electrical resistance measurements and tensile tests have shown that the optimal conditions for the use of this thread for the transport of electrical energy is of 6 hours of income to 160 ° C.

Introduction générale

Introduction générale

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

Les lignes électriques aériennes à hautes tension sont construites avec un alliage de la série 6xxx, type 6101 (almélec) ou 6201, qui a une contrainte à la rupture en traction plus importante que l'aluminium, avec une résistivité électrique acceptable. Cette contrainte à la rupture permet de réaliser des câbles homogènes constitués uniquement de fils en almelec sans âme d'acier, pouvant supporter des surcharges.

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

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

Dans ce travail nous avons étudiés des fils en alliage almelec au niveau de l'entreprise CABLES ELECTRIQUES, spécialisée dans la fabrication des fils et des câbles électriques. Nous nous sommes intéressés aux conditions optimales de traitements thermiques de revenu pour utiliser ces fils comme câbles électriques.

Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé différentes techniques de caractérisation telle que l'essai de traction, la mesure de la résistance électrique, et l'observation

Introduction générale

métallographique, sur le fil machine ainsi que des fils tréfilés. Nous avons effectué par la suite des traitements thermiques de revenus pour atteindre les propriétés finales du fil électrique.

Le présent mémoire comporte une introduction générale et quatre chapitres. Le premier chapitre comporte des notions générales sur l'aluminium et ses alliages et plus particulièrement l'alliage AlMgSi 6101.

Le deuxième chapitre est consacré à une présentation générale du procédé technologique du tréfilage à froid et les traitements thermiques de l'alliage d'aluminium-AlMgSi.

Le troisième chapitre est consacré aux techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques mécaniques en traction, la résistivité électrique, la dureté et l'étude métallographique de l'état déformé et revenu des alliages.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation, l'interprétation et la discussion des résultats expérimentaux obtenus à travers les différents essais.

Enfin, l'ensemble de ce travail se résume par une conclusion générale.

Chapitre 1

Aluminium et ses alliages

Introduction :

Ce chapitre se propose de rappeler quelques notions générales sur l'aluminium et les alliages d'aluminium qui sont des matériaux métalliques les plus utilisés juste après les aciers et les fontes.

I. Propriétés de L'aluminium :

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendélien, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C. Il cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de $23.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, son module de Young de 66 MPa. L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très réduites et insuffisants pour son utilisation dans un bon nombre d'applications structurales : résistance mécanique environ 90Mpa. Cependant il présente une très bonne conductivité électrique, la conductibilité électrique de l'aluminium commercialement pur atteint 62% de celle du cuivre. Cependant, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium.

Ses propriétés thermique sont cinq fois supérieurs à celles celle des aciers, il est léger, ductile ($A\% \approx 40\%$) possède un coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers et des propriétés réfléchissantes et possède une bonne résistance à la corrosion. Toutes ces propriétés font de l'aluminium un candidat de choix pour diverses applications notamment le transport de l'énergie électrique

II. Principales caractéristiques des alliages l'aluminium :

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières

II.1. Masse volumique :

L'aluminium est un métal léger, sa masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m^3 , les alliages d'aluminium possèdent une masse volumique est comprise entre 2600 et 2800 kg/m^3

suivant les éléments d'additions. La présence de certains éléments (ex: B, Si, Mg, Li) dans l'aluminium diminue la masse volumique alors que d'autres éléments (ex: Ti, Zn, Cr, Fe, Cu) augment la masse volumique. L'utilisation de ces alliages s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport, conducteur électrique

I.2. Résistance à la corrosion :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, la construction navale... milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être sévères. En effet l'aluminium se couvre, au contact de l'air, d'une couche naturelle protectrice d'oxyde, alumine Al_2O_3 . Cette couche est présente dans les alliages d'aluminium mais elle est affectée par les éléments d'additions.

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. Cette couche protectrice d'oxyde est rendue plus épaisse par anodisation. Ainsi, les alliages d'aluminium peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments.

Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium peuvent subir des effets négatifs. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue-corrosion, et même de la corrosion généralisée peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état. Des traitements de surface sont appliqués pour remédier à l'effet néfaste de la corrosion.

I.3. Mise en forme :

L'aluminium a une température de fusion relativement basse ce qui résulte d'une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'écroutissage $n = 0.2$ à 0.3), faciles à emboutir.

II.4. Propriétés physiques de l'aluminium:

I.4.1. Conductivité électrique :

L'aluminium possède des liaisons métalliques, par conséquent ses électrons de valence sont délocalisés et sont libres de se déplacer à travers le métal, donc il s'agit d'un bon conducteur électrique.

Pour les alliages, les éléments d'addition représentent des obstacles au déplacement des électrons de conduction, ceci entraîne une augmentation de la résistivité électrique mais accompagnée d'une meilleure résistance mécanique. L'aluminium et ses alliages offrent une bonne conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre mais à volume supérieur au cuivre, c'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus pour les lignes à haute tension.

La résistivité ρ de l'aluminium pur est de l'ordre de $2,8 \cdot 10^{-8}$ ($\Omega \cdot m$) et son coefficient de température égal à $4,3 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}C$.

Connaissant la résistivité d'un conducteur, il est donc possible de calculer sa résistance (R).

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

Avec :

R=résistance du conducteur en ohm (Ω).

ρ =résistivité électrique en ($\Omega \cdot m$).

L=longueur du conducteur en mètre(m).

S=section du conducteur en (m^2).

II.4.2. Propriétés thermique :

L'aluminium a une conductivité thermique très élevée environ 66 % de celle du cuivre, celle des alliages d'aluminium, étant plus faible car les électrons ont une plus faible mobilité.

La diffusivité thermique de l'aluminium est du même ordre de grandeur que celle du cuivre. La diffusivité thermique a exprimé l'aptitude d'un métal à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Une diffusivité élevée signifie que la chaleur y transite rapidement, ce qui est le cas pour l'aluminium.

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau I-1. [2]

<i>Propriété</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>	<i>Remarque</i>
Numéro atomique		13	
Masse volumique ρ	Kg . m ⁻³	2 698	
Point de fusion	°C	660.45	sous 1013 10 ⁻³ bar
Point d'ébullition	°C	2 056	sous 1013 10 ⁻³ bar
Pression de vapeur	Pa	3.7 10 ⁻³	à 927 °C
Energie interne massique u	J . kg ⁻¹	3.98 . 10 ³	
Capacité thermique massique C_p	J kg ⁻¹ . K ⁻¹	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	W m ⁻¹ . K ⁻¹	237	à 27 °C
Coefficient de dilatation linéique α_l	10 ⁻³ K ⁻¹	23.1	à 25°C
Résistivité électrique ρ	10 ⁻⁹ Ω . m	26.548	à 25°C
Susceptibilité magnétique K		0.6 . 10 ⁻³	à 25°C
Module d'élasticité longitudinal E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson ν		0.33	

Tableau I-1 : Propriétés physiques de l'aluminium [2].

II.5. Propriétés mécaniques :

L'aluminium est un métal ductile et très malléable, mais sa résistance mécanique est faible. Les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être modifiées avec l'addition d'autres éléments, notamment le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le lithium et le zinc, formant ainsi des alliages plus résistants. Les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture équivalente à celles des aciers pour un poids inférieur. Ces propriétés peuvent être modifiées par traitement thermique ou par écrouissage.

II.6. Propriétés à chaud :

Les propriétés mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. La nature de l'alliage, la durée du maintien à chaud et la température de maintien sont les paramètres les plus sensibles.

III. L'aluminium et ses alliages :

Seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium par ce qu'ils ont solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieure à 0,5 %. Ce sont : l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficile mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, uniquement sur cinq éléments d'alliage qui sont le cuivre, le magnésium, le silicium, le zinc

Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée.

III.1. Les familles d'alliages d'aluminium :

Deux grandes familles : les aluminiums corroyés, obtenus par déformation plastique (laminage...) et les aluminiums pour la fonderie. Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement: ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempant

III.1.1. Alliages corroyés :

En métallurgie, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage Tableau I-2, obtenus par déformation plastique (laminage...), se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés comme: les alliages à durcissement structural, et les alliages sans durcissement structural.

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1XXX	99% d'Al au minimum	-
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	Autres éléments.	-

Tableau I-2: Familles d'alliage d'aluminium [2].

III.1.1.a. Alliage à durcissement par écrouissage:

L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique, de la dureté et par perte de ductilité. Les séries 1000, 3000, 5000 et la plupart des 4000 ne peuvent pas être traitées, sont dites non trempâtes ou sans durcissement structural et sont durcis par écrouissage (Tableau I-3).

Durcissement par écrouissage

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5 – 1,5	Magnésium – cuivre
5000	Magnésium	0,5 - 5	Manganèse – Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 - 2	Nickel

Tableau I-3: Alliage durcissement par écrouissage [3].

III.1.1.b. Alliage à durcissement structural.

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement thermique en trois étapes: mise en solution par chauffage, maturation, revenu. Les séries 2000, 6000 et 7000 peuvent être traitées et sont dites trempâtes ou avec durcissement structural.

Durcissement structural

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
6000	Magnésium et silicium	Mg : 0,5 – 1,5 Si : 0,5 – 1,5	Silicium – magnésium- manganèse
2000	Cuivre	2 - 6	
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 - 2	Cuivre

Tableau I-4 : Alliage durcissement structural [3].

III.1.2. Alliages de fonderie :

On distingue les alliages de première fusion, élaborés à partir de l'aluminium primaire issue de l'électrolyse et de seconde fusion (appelé aussi alliages d'affinage). Ils sont élaborés par refusions des déchets récupérés. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces d'automobile

III.1.2.a. Qualités recherchées :

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie .

III.2. Effets des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium :

III.2.1. Le silicium : confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, et de l'aptitude à la retassure (il se dilate à la solidification). On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure (le silicium est très dur), de l'étanchéité des pièces, mais une diminution de l'allongement à rupture.

III.2.2. Le cuivre : augmente les propriétés mécaniques par durcissement structural, principalement la dureté (donc l'usinabilité) et la tenue à chaud sans perte au niveau de la coulabilité mais diminue la résistance à la corrosion et augmente l'aptitude à la crique.

III.2.3. Le magnésium : augmente la résistance à la corrosion, aux dommages, l'allongement à rupture et engendre un nouveau système durcissant après traitement thermique (Mg_2Si) mais diminue les propriétés de fonderie et d'usinabilité (les copeaux ont tendance à coller aux outils, ce qui augmente leur usure).

III.2.4. Le zinc : très peu utilisé à cause de ses médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques, il se trouve sous forme de ternaire Al-Zn-Mg, ce qui donne un alliage à durcissement structural avec des précipités $MgZn_2$, atténue le gazage de l'alliage, améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro retassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu.

III.3. Influence des impuretés :

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement Ou non, les diverses propriétés du matériau. On trouve principalement comme Impuretés :

III.3.1. Le fer : c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques et diminue l'étanchéité de la culasse. Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée à moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits à haute pureté ; le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets.

III.3.2. Le nickel : améliore légèrement les propriétés sa chaud mais coute cher.

III.3.3.Le phosphore : est un poison pour les alliages hypo-eutectiques car il constitue un site de germination du silicium, par contre, ce sera un élément affinant pour les alliages hyper eutectiques (hyper-slicés). En effet dans ces alliages, ce sont les plaquettes de Si qui germent en premier et il n'y a donc pas de dendrites d'aluminium.

III.3.4.Le plomb: au-delà de 0.05% il neutralise la modification au strontium et diminue les propriétés mécaniques de l'alliage.

III.3.5.L'étain : abaisse les caractéristiques mécaniques, augmente la porosité, améliore très peu la coulabilité.

III.3.6.L'antimoine : permet de piéger le phosphore mais n'est pas compatible avec le Strontium.

III.3.7.Le titane : c'est une impureté de l'aluminium, mais il permet d'affiner la dendrite de solution solide riche en aluminium : c'est un affinant. L'opération d'affinage consiste à ajouter dans l'alliage liquide des germes de cristallisation comme TiB_2 en grand nombre afin d'augmenter le nombre de grains de l'alliage pour diminuer la taille de dendrite et augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la durée de vie en fatigue.

IV. Alliage Almélec :

IV.1.Définition de l'almélec :

L'almélec est un alliage composé principalement d'aluminium de magnésium (de 0,6 à 0,8%) et du silicium (de 0,6 à 0,8%). Il est surtout utilisé pour la fabrication des câbles des lignes électriques aériennes. Sa résistivité ($32,5 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$) est environ le double de celle du cuivre, mais ses caractéristiques mécaniques lui permettent de résister aux contraintes liées à l'environnement (vent, gel, neige, variations de température).

L'aluminium 6101 est un alliage d'aluminium à haute conductivité électrique qui présente de bonnes propriétés mécaniques, d'usinabilité, de formabilité et de soudabilité. Il est souvent utilisé dans les applications de conducteurs sur barres dans les installations électriques à barres omnibus cloisonnées.

Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être augmentées par addition de

silicium qui donnera le précipité durcissant Mg_2Si . Ils ont une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. [5]

L'almélec, qui possède une résistance mécanique à la traction notablement plus importante que celle de l'aluminium permet, de ce fait, de réaliser des câbles homogènes constitués uniquement de fils d'almélec.

IV.2.Applications de l'almélec :

Le fil électrique est un composant encore très largement utilisé dans la plupart des applications dans les domaines de l'électricité, de l'électronique, de l'électrotechnique. Il est notamment le constituant principal de certaines cartes électroniques prototypes, Ces câbles sont utilisés pour les lignes aériennes dans les réseaux de distribution et de transport d'énergie nécessitant une tension plus élevée. Ils sont aussi utilisés comme porteur pour supporter les câbles aériens.

Le but d'accroître la capacité de transport de certaines lignes existantes sans modifier notablement l'environnement, des métaux conducteurs pouvant supporté des températures de fonctionnement plus élevées que celles de l'aluminium ou de l'almélec ont été étudiés.

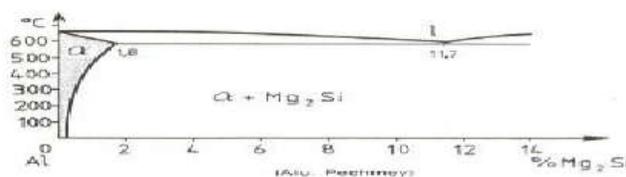
IV.3. série 6XXX :

Les alliages de la série 6xxx ont de très bonnes capacités de formage, ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion ,ils sont donc plutôt utilisés pour la conception de conducteur électrique tel que les câbles des lignes à haute et moyenne tension. [5]

Les alliages de la série 6000 ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud, à froid, un bon comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. [5]

IV.4.Le diagramme d'équilibre Al-Mg₂Si

Le diagramme d'équilibre de la Tableau I-3, est une coupe de diagramme ternaire Al-Mg-Si pour un rapport atomique Mg/Si = 2. Le composé Mg_2Si peut être considéré comme un composé simple et le durcissement est dû à la précipitation de phases transitoire de Mg_2Si .



Courbe I-1: Le diagramme d'équilibre Al-Mg₂Si [5].

IV.5. Propriétés mécaniques et électriques de l’alliage d’aluminium 6101

L’alliage 6101 possède l’avantage de présenter une résistance mécanique supérieure à celle de l’aluminium non allié 1310 pour une conductivité électrique inférieure seulement de 10 à 15%.

Le produit élémentaire, c’est-à-dire le fil unitaire en alliage d’aluminium 6101, est généralement utilisé à l’état métallurgique. Cet état est obtenu suite au tréfilage de l’ébauche qui introduit un fort écrouissage des matériaux. Le tréfilage peut être réalisé en une ou plusieurs étapes. Dans ce dernier cas, des revenus intermédiaires sont imposés au matériau entre chaque étape de tréfilage. La température des revenus est comprise entre 155 et 185°C.après la dernière étape de tréfilage, un revenu final réalisé à une température voisine de 155 à 165°C est appliqué au fil.

Tableaux I-5

Tableau 1 – Caractéristiques comparées des matériaux utilisés				
Caractéristique	Cuivre (1)	Almélec	Aluminium	Acier
Résistivité à 20 °C(10 ⁻⁸ Ω.m)	1,72	3,26	2,82	~ 15
Coefficient de température(10 ⁻³ K ⁻¹)	4,1	3,6	4	
Masse volumique (kg.m ⁻³)	8 890	2 700	2 700	7 800
Contrainte à la rupture en traction (2) (MPa)	380 à 450	320 à 380	150 à 190	1 410 à 1 450 (2)
Module d’élasticité (MPa)	câble : 105 000 fil : 120 000	câble : 60 000	câble : 60 000 fil : 65 000	câble : 185 000 fil : 200 000
Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	17	23	23	11,5

(1) pour mémoire.
 (2) acier à très haute résistance mécanique ; contrainte minimale à 1 % d’allongement.

Tableaux I-5 : Propriétés mécaniques et électriques de l’alliage d’aluminium 6101 [6].

IV.6. Comportement en corrosion des alliages almélec 6101

Les alliages d’aluminium 6101 sont utilisés dans de nombreux domaines d’activité du fait de leur faible densité, de leurs bonnes propriétés mécaniques et leur relative bonne tenue générale à la corrosion. Cependant, ils peuvent être néanmoins sensibles à différents types de corrosion généralisée et localisée. Ces phénomènes sont étroitement liés aux caractéristiques microstructurales propres à chaque alliage.

Chapitre 2

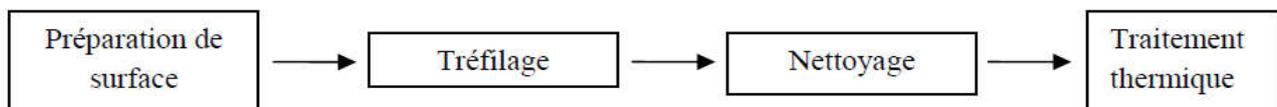
Tréfilage et revenu de l'Aluminium

I-tréfilage :

I.1. Introduction :

Le procédé de mise en forme à froid connu sous le nom de tréfilage est de plus en plus important dans le domaine industriel, est appliqué sur plusieurs métaux et alliages comme le cuivre, l'aluminium (fils électrique) et les aciers en particulier les aciers doux. [6]

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



I.2. Définition de tréfilage :

Le tréfilage est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, par déformation plastique, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'effet combiné d'application d'un effort de traction et d'un effort radial de compression et en présence d'un lubrifiant, cette déformation s'obtient par glissement suivant certains plans et directions de glissement grâce au déplacement de dislocations. Après déformation, une partie de ces dislocations reste piégée à l'intérieur des grains. Dans ce cas, la structure est dite écrouie et les propriétés du métal sont modifiées. Le tréfilage a pour effet de (durcir) le métal et de diminuer ses possibilités de déformation ultérieure. Voilà pourquoi on est amené à recuire le métal soit pour poursuivre le tréfilage à froid, soit pour redonner aux produits finis des propriétés de plasticité suffisante. [7]

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

Les matériaux le plus utilisés dans le cadre d'applications industrielles sont l'acier, le cuivre, l'aluminium et le tungstène. Les applications des produits mise en œuvre par cette technique, qui peut être utilisés en soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatiquesetc. [8]



Figure II-1 : photo d'une ligne de tréfilage :

I.3.Principe de tréfilage :

Dans une opération de tréfilage, un fil de diamètre D_i préalablement appointé est tiré à travers une filière ayant un diamètre de col D_f inférieur à D_i au cours de laquelle la contrainte de traction se superpose avec la compression latérale par l'inclinaison des parois et le frottement, on dit que le fil à la sortie de la filière est tréfilé.[9] , Figure II-1.

On peut définir l'aptitude au tréfilage du fil machine par la réduction de section ($\varepsilon\%$) Au-delà de laquelle le fil se rompt, ou par son allongement ($A\%$) qui diminue jusqu'à ce qu'il devient très difficile de poursuivre la déformation, on définit ($\varepsilon\%$) et ($A\%$) :

$$\varepsilon\% = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$A\% = \frac{S_i - S_f}{S_f} \times 100 \quad \dots\dots\dots 2$$

Avec :

S_i : section de fil avant le tréfilage.

S_f section de fil après le tréfilage.

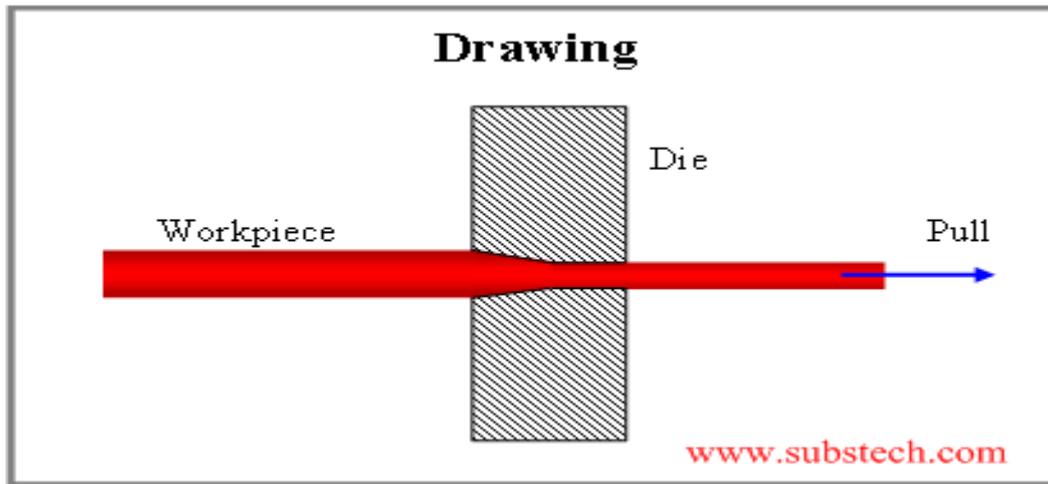


Figure II-2 : schéma principe de tréfilage [9] :

I.4. la préparation de surface :

Le matériau de départ utilisé pour le tréfilage est appelé fil-machine, il provient du laminage à chaud de billettes produites par coulée continue et se présente sous forme de couronnes, refroidies à l'air. La surface du fil est souvent recouverte d'une couche d'oxydes métalliques, dont l'épaisseur est fonction de la température de sortie du fil. A cause de son caractère abrasif, de sa dureté et de son absence de ductilité, cette couche doit être éliminée avant le tréfilage. Différents procédés de nettoyage de surface peuvent être employés ; par action chimique (décapage), mécanique (décalaminage) ou action combinée des deux. [10]

I.5. Le lubrifiant :

L'utilisation d'un lubrifiant est capitale au cours du procédé pour limiter le frottement et l'usure et assurer un régime de lubrification stable. Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil. En général, pour les gros et moyens diamètres, ce sont des savons qui sont utilisés (tréfilage à sec).

I.5.1. Rôle de lubrifiant :

Le rôle de lubrifiant (graisse, huile minéral) 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 et limiter l'effort à exercer pour obtenir la déformation du métal, et assurer un régime de lubrification stable, ou pour éviter

I.5.2. Propriétés de lubrifiant :

Un bon lubrifiant de tréfilage doit donc posséder comme propriétés une viscosité suffisante et 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.

1.6. La filière :

Elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, 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 3) :

- 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 α , 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 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. [11]

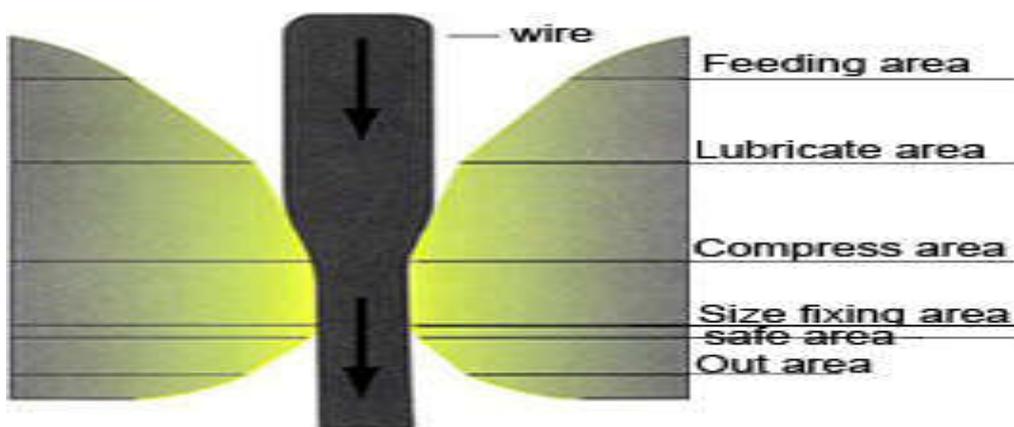


Figure II-3 : Schéma d'une filière de tréfilage [10].

I.7. outils et équipement industriels de tréfilage :

L'ensemble du matériel de tréfilage comporte trois éléments: [11]

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

Parmi tous les dispositifs, nous distinguons :

- les machines de tréfilage à sec, qui permettent d'obtenir des fils jusqu'à 1 mm de diamètre.
- les machines de tréfilage humide, qui sont particulièrement adaptées pour l'obtention de fils plus fins.

La lubrification est mise en œuvre par immersion ou aspersion d'huile minérale. Suivant la réduction de diamètre souhaitée, le nombre de passes (c'est-à-dire de passages en filière), Figure II-4 est ajusté. Pour des réductions de section de l'ordre de 35%, ce sont des dispositifs simples (ou mono passes) qui sont utilisés. Pour des réductions de section plus importantes, il faut envisager des réductions successives et donc utiliser des machines multiples (appelées également multi passes). Les dispositifs Mono passes sont généralement utilisés pour des phases de calibrage, de finition ou pour l'obtention d'un état de surface particulier. [8]

I.7.1. La machina simple :

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception.

Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant (appelé également savonnier) et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant. [10]

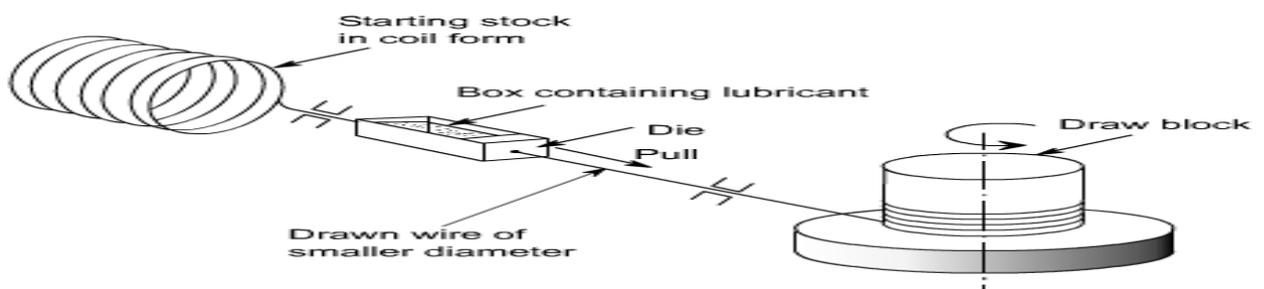


Figure I-4 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple.

I.7.2. Les machines multiples :

Elles permettent des réductions de section importantes grâce à un enchaînement de filières. Il existe trois types de machines multiples. [11]

I.7.2.1. Les machines continues ou à passage direct :

Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répandus. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. En effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil. Ce type de machine est particulièrement utilisé pour le tréfilage des aciers inoxydables, car ceux-ci ne nécessitent pas un refroidissement entre passes aussi poussé que d'autres types d'aciers. [10]

I.7.2.2. Les machine à accumulation :

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

I.7.2.3. Les machine à glissement :

Dans ces machines dédiées au tréfilage humide, il n'y a ni équilibrage des vitesses, ni accumulation de fil. Le glissement du fil sur les bobines compense les différences de vitesses. Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche", c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le

Diamètre du fil machine de 5,5mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes. Le fil peut ensuite être tréfilé en "reprise" à sec sur des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fils très propres.

I.8. Le frottement :

Contrairement à d'autres procédés où il est moteur, le frottement est un phénomène parasite pour le tréfilage. Il génère une augmentation de la force de tréfilage et de la température au cours de l'opération et rend les conditions de tréfilage critiques (rayures du fil, usure de la filière). L'objectif du tréfileur est donc de le minimiser en ajustant les paramètres du procédé (réduction du

fil, angle de filière) ou en utilisant un bon lubrifiant (c'est-à-dire un lubrifiant qui recouvre de manière homogène le fil). Le frottement peut être estimé de manière expérimentale, lors d'essais de tréfilage, par mesures directe ou indirecte. [10]

I.9. la température :

La connaissance de ce paramètre est capitale puisqu'elle va conditionner le déroulement de l'opération. En effet, un échauffement élevé va modifier les propriétés rhéologiques du lubrifiant, sa consistance et donc son épaisseur passante. Dans le cas le plus critique, un échauffement excessif peut dégrader le lubrifiant et compromettre ses performances, accentuer les phénomènes d'usure qui vont conduire à un état de surface du fil non souhaité voire provoquer des changements métallurgiques. [10]

I.10. Ecroissage d'un matériau :

L'écroissage se traduit par le durcissement d'un métal ou d'un alliage provenant de la déformation plastique, il correspond à une modification structurale.

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne, ces évaluations de propriétés et de microstructure, appelées écroissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécanique. Dans le premier cas, l'écroissage a lieu façon très local au fond de la fissure dans un matériau endommagé. [12]

I.11 nettoyage et Traitement thermique :

Après le tréfilage, le fil comporte un film superficiel de lubrifiant et de revêtement dont il faut se débarrasser avant de procéder à un traitement thermique (pour éviter la diffusion d'éléments polluants). Deux sortes de nettoyage peuvent être envisagés, par action mécanique ou chimique (lessives alcalines, solutions acides), au trempé ou au défilé (suivant les sections des fils tréfilés). En dernière étape, les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au tréfilage ou aux déformations ultérieures, pour supprimer l'effet de l'écroissage et adoucir le fil (revenu) ou encore pour communiquer au fil des caractéristiques particulières (trempé). Les fours de recuit peuvent être de types statiques (couronnes, bobines) ou au défilé. [10]

II. Traitement thermique de l'alliage d'aluminium :

II.1.Introduction :

Certains alliages d'aluminium peuvent recevoir un traitement thermique permettant une amélioration des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté...). Ce traitement s'opère par durcissement structural.

II.2.Mise en œuvre industrielle :

Le traitement est réalisé dans un four sous air possédant une très bonne homogénéité de température. Le refroidissement doit être très rapide. Pour ces raisons, l'eau est souvent utilisée comme milieu de trempe, les pièces sont plongées rapidement dans un bac d'eau thermo régulé. Le temps de transfert et la température de l'eau sont des éléments importants pour une bonne maîtrise du procès.

Etape de maturation de revenu la maturation permet une évolution de la structure métallurgique à température relativement basse (souvent température ambiante). Le revenu s'opère à une température supérieure à celle de la maturation. Le durcissement est effectif pendant cette étape.

II.3.Les différents états d'alliage d'aluminium traité :

T4 : mise en solution, trempé, mûri.

T6 : mise en solution, trempé, revenu.

T7 : mise en solution, trempé, sur- revenu (alliage7000).

Les principaux alliages d'aluminium pour le traitement thermique sont :

Série 2000 : aluminium-cuivre

Série 6000 : aluminium- magnésium -silicium

Série 7000 : aluminium- zinc

Après traitement thermique en fonction des alliages, il est possible d'obtenir une résistance à la rupture de l'ordre de 300 à 500 MPa (max 600MPa).

II.4. But de traitement thermique :

Un ou plusieurs des objectifs suivants sont à la base du choix du traitement thermique: [22].

- Augmenter la dureté.
- Améliorer l'usinabilité
- Améliorer la résistance à l'usure.
- Stabiliser les propriétés mécaniques et physiques.
- Assurer la stabilité dimensionnelle.
- Modifier les caractéristiques électriques.
- Modifier résistance à la corrosion.
- Soulager les contraintes résiduelles.

II.5. revenu de l'aluminium :

II.5.1. Définition de revenu :

Les traitements thermiques dits de revenu font partie d'une famille de traitements thermiques ayant pour trait commun d'être toujours effectués à des températures inférieures aux températures de transformations allotropiques des métaux, lorsque celles-ci existent.

Le traitement thermiques de revenu après tréfilage, est nécessaires pour diminuer la résistivité électrique est amélioration des caractéristiques mécaniques en traction par modification de la microstructure, contribuent à un meilleur comportement en service des fils électriques

II.5.2. Etats revenu:

Les revenus ont la particularité de produire une transformation métallurgique rendue possible par le mécanisme de diffusion amorcé pendant un séjour suffisant à la température de revenu. Le revenu dans le cas des alliages d'aluminium permet d'augmenter la résistance mécanique par précipitation de phases durcissant.

Pour l'alliage 6101, après la dernière étape de tréfilage, un revenu final réalisé à une température voisine de 155 à 165°C est appliqué au fil. Les propriétés finales doivent respecter les normes suivantes :

- $R_m \geq 324$ MPa pour les fils de diamètre inférieur à 3,6 mm
- $R_m \geq 319$ MPa pour les fils de diamètre supérieur à 3,6 mm
- $\rho \leq 3,28 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, soit une conductibilité supérieure à 52,6% IACS.

Par ailleurs, il est clair également que le dernier traitement de revenu appliqué au fil après tréfilage pour obtenir l'état final T9 influence les propriétés du matériau. A ce propos, la Figure I.5 montre l'influence de la température et de la durée du revenu sur la résistance mécanique et la résistivité électrique d'un fil fin de 3,45mm de diamètre en alliage AA 6101 tréfilé à partir d'un fil unitaire de diamètre initial 9,5 mm. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence une forte variation des propriétés du fil fin tréfilé et revenu selon la température et la durée du revenu.

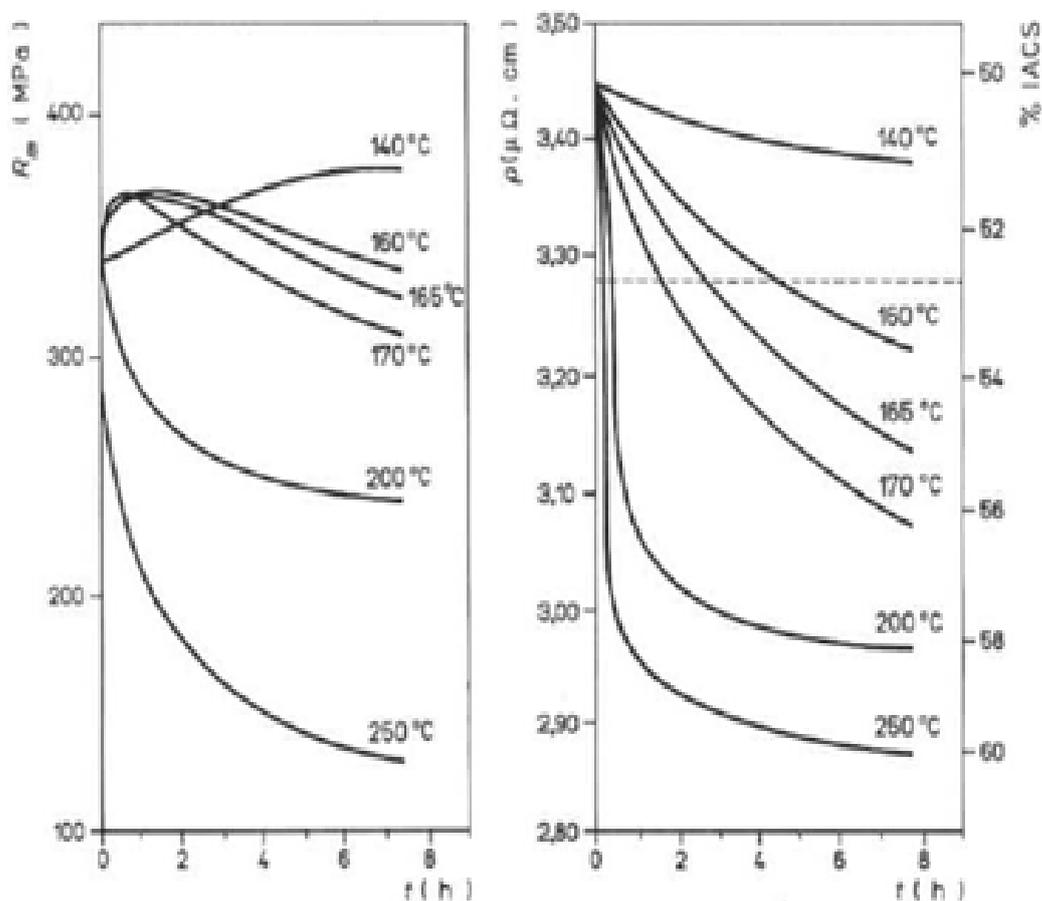


Figure I-5 influence du revenu sur les propriétés mécaniques et électriques des fils fins en AA6101

Chapitre 3

Techniques Expérimentales

I. Introduction

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction générale, notre travail porte sur L'étude des fils d'alliage d'aluminium –almélec- tréfilé à froid.

Notre travail consiste à la caractérisation mécanique, électrique et métallographique de cet alliage après tréfilage et traitement thermique de revenu.

II. La méthodologie expérimentale

II.1. Matériaux étudié

La matière première utilisée dans ce travail, le fil machine, est un alliage d'aluminium (almélec) achetée par l'entreprise CABEL ELECTRIQUE. Le fil machine utilisé pour la fabrication des câbles électrique destinés pour le transport de l'énergie électrique, est produit en coulée à partir d'un alliage d'aluminium de très haute qualité à l'aide d'une technologie de pointe, Figure III-1.



Figure III-1 : fil machine étudié

II.2. échantillons étudiés

La matière qui nous a été fournie par l'entreprise est Composée du fil machine et de sept fils tréfilés de même diamètre. Le fils machine est directement prélevé des bobines du fournisseur. Le fils tréfilés ils ont été sélectionnés et prélevés depuis la chaîne de tréfilage par le personnel de CABLE ELECTRIQUE, Ils ont été tréfilés par une tréfileuse à glissement horizontal, dont les filières sont en carbure de tungstène.

II.3.Taux de réduction de la section

Le tréfilage est une opération qui entraîne une réduction de la section par déformation plastique. Le taux de réduction de la section \mathcal{E} est calculé par la formule suivante :

$$\mathcal{E} = \frac{\text{section initiale} - \text{section finale}}{\text{section initiale}}$$

$$\mathcal{E} = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{D_0^2 - D^2}{D_0^2}$$

Avec :

$$S = \frac{\pi * D^2}{4}, \quad S_0 = \frac{\pi * D_0^2}{4}$$

$$D_0 = 9.36 \text{ (mm)}.$$

- D_0 = diamètre initiale (mm).
- D = diamètre final après tréfilage en (mm).
- S_0 = section initiale (mm²).
- S = section finale (mm²).

Le tableau III-1, donne le diamètre final et la section finale de fil tréfile ainsi que le taux de réduction de la section pour le fil.

matériaux	D (mm)	S (mm ²)	$\varepsilon\%$
Fil machine	9.36	68.77	-
Fil tréfilé	3.55	9.89	0.85

Tableau III-1 : Taux de réduction de la section

II.4 Traitement thermique

Le traitement thermique d'une pièce de métal consiste à lui faire subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques (dureté, ductilité, limite d'élasticité..).

Il existe différents types de traitements thermiques, selon les propriétés recherchées.

Pour notre alliage d'aluminium –almélec- c'est un revenu après le tréfilage qui est effectué afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et surtout électriques puisque c'est un alliage destiné à fabriquer des câbles conducteurs.

La température utilisée par l'entreprise pour cet alliage est de 160°C.

Nous mettons 07 fils d'alliage d'aluminium –almélec- tréfilés de diamètres D=3.55mm à l'intérieur d'un four électrique à 160°C, à des temps de revenu différents.

Dans un autre essai afin d'améliorer le temps de revenu nous avons utilisé la température de 190°C pour ce même taux de réduction à des temps différents.

III. Techniques de caractérisations

III.1.Mesure de la résistance électrique linéique

La résistivité électrique d'un matériau, généralement symbolisée par ρ , représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau de 1 m de longueur et de 1 m² de section et est exprimée en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). [10] La résistance électrique linéique, R_L correspond à la résistance par unité de longueur exprimée en (Ω/km), donnée par : $R_L = R/L = \rho/S$, la résistivité ρ est obtenue en multipliant la résistance linéique R_L par la section S.

Avec :

- R =résistance du conducteur en ohm (Ω).
- ρ =résistivité électrique en ($\Omega.m$).
- L =longueur du conducteur en mètre(m).
- S =section du conducteur en (m^2).

La mesure de la résistance électrique linéique s'effectue à l'aide d'un banc d'essai (équipement) basé sur la mesure de la chute de tension et du courant qui parcourent un fil électrique de 1m de longueur, Figure III-2.

L'appareil nous donne la valeur de R_L puis on calcule la résistivité électrique a partie de la relation suivante : $\rho = R_L * S$



Figure III-2 : L'appareil de mesuré la résistance R_L .

III.2. Essai de traction

L'essai de traction détermine l'aptitude d'un matériau à se déformer, soumis à un effort axial croissant. Ce type d'essai est nécessaire pour prévoir le comportement du matériau dans des conditions réelles d'utilisation.

L'essai de traction consiste à appliquer sur une éprouvette normalisée du matériau d'étude, de longueur initiale L_0 et de section initiale S_0 , un effort F et à mesurer l'allongement correspondant ΔL , correspondant à l'effort F . ΔL , et F sont des grandeurs physiques liées à l'éprouvette. Afin de les interpréter et ainsi de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau : la contrainte $\sigma = F/S_0$ et la déformation $\varepsilon = \Delta L/L_0$.

III.3. La machine de traction

L'essai de traction est effectué au niveau du laboratoire métallurgique de l'entreprise CABEL-SPA, Alger, sur une machine automatisée- MTS-machine test system figure III-3, dotée d'une capacité de mesure 50(kN) et d'un fil machine de longue ($L_0 = 345\text{mm}$), elle est commandée et pilotée par un ordinateur.

Au cours du fonctionnement de la machine de traction :

- le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante.
- la force appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur à jauges extenso métriques.
- l'allongement de l'éprouvette est mesuré par un extensomètre à jauge. [17]



Figure III-3: Machine de traction (MTS) :

III.4. Objectif d'Essai de traction

- Tracer des courbes de traction $\sigma=f(\epsilon)$ de différents matériaux : alliages d'aluminium, de cuivre, aciers...
- Interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, la résistance à la traction, l'allongement à rupture ...
- Estimer la précision de mesure.

III.5. Préparation métallographique des échantillons :

Les échantillons étudiés par microscopie optique ont subi une préparation métallographique au niveau du laboratoire de SDM. Cette préparation comprend quatre étapes.

III.5.1. Prélèvement :

Il s'effectue par découpage d'un échantillon, à la scie manuelle, de chacun des fils suivant : fil machine, tréfilé à 85% , voir le tableau III-1.

III.5.2. Enrobages :

C'est une opération qui permet de faciliter la manipulation des échantillons qui sont très petits, en les incluant dans un montage mécanique, à l'aide d'une résine de matière thermodurcissable et une presse pour l'enrobage à chaud.

L'enrobage permet de limiter les effets de bords pendant l'étape de polissage. Le choix d'une résine adaptée à la dureté du matériau à polir rendra possible l'examen de la périphérie de l'échantillon.



Figure III-4: Echantillons enrobé



Figure III-5: Enrobeuse

III.5.3. polissages

Le pré polissage mécanique est un micro-usinage qui permet d'éliminer les bavures et les rayures, s'effectue avec les papiers abrasifs en carbure de silicium Sic de granulométrie décroissante : 280, 400, 600, 800, 1000, et 1200.

L'utilisation de l'eau comme agent refroidisseur permet de prévenir la surchauffe de l'échantillon. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés avec l'eau.



Figure III-6 : La polisseuse.

III.5.4. Polissage de finition :

Cette opération est nécessaire avant d'observer les échantillons au microscopique, pour obtenir une surface plane et réfléchissante (état miroir).

Le polissage est accompli sur un disque en feutre en ajoutant de l'alumine (Al_2O_3) pour avoir un aspect miroir.

Enfin un rinçage à l'eau pour éliminer toute particule solide retenue par les échantillons.



Figure III-7: Polisseuse de finition

III.5.5. attaque chimique :

L'attaque chimique a pour rôle de révéler les grains, les phases, et les différents composants d'une microstructure, par dissolution différentielle. Elle a été réalisée avec le réactif de KELLER de composition chimique suivante :

1-H₂O: 95,5ml.

2-HNO₃: 32,5 ml.

3-HCl: 1,5ml.

4-HF: 0,5 ml.

Les échantillons sont plongés environ une minute dans cette solution, puis sont à nouveau nettoyés à l'eau

III.5.6. Observation microscopique :

Nous avons procédé à l'analyse microstructurale, par le moyen du microscope optique, des échantillons polis et attaqués.

Après polissage et attaque chimique l'observation micrographique a été faite avec un microscope optique de type Carl Zeiss Figure III-8, avec un agrandissement de 100 à 1000. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, reliée à l'écran d'un ordinateur permettant la capture de photos de la structure observée après avoir choisi la surface à photographier.



Figure III-8: Microscope optique Carl Zeiss :

III.6. La dureté :

La dureté est une mesure de la résistance à la déformation d'un matériau. La valeur exprimée par un nombre sans dimension est reliée directement ou indirectement, dans les essais les plus fréquents, à la plus ou moins grande facilité d'enfoncer un pénétrateur à la surface du corps étudié. [16]

III.6.1. Principe de la dureté Brinell:

La méthode consiste à appliquer sur la surface du matériau dont on veut mesurer la dureté une bille en matériau dur d'un certain diamètre D avec une force F donnée mesurée en (kilogramme-force) pendant une durée t . Après retrait, on mesure la taille de l'empreinte laissée, une calotte sphérique de diamètre d , Figure III-9

La dureté Brinell ou nombre de Brinell est notée $HB = F/S$.

Avec :

- F = force appliquée (N)
- S = section (mm^2)

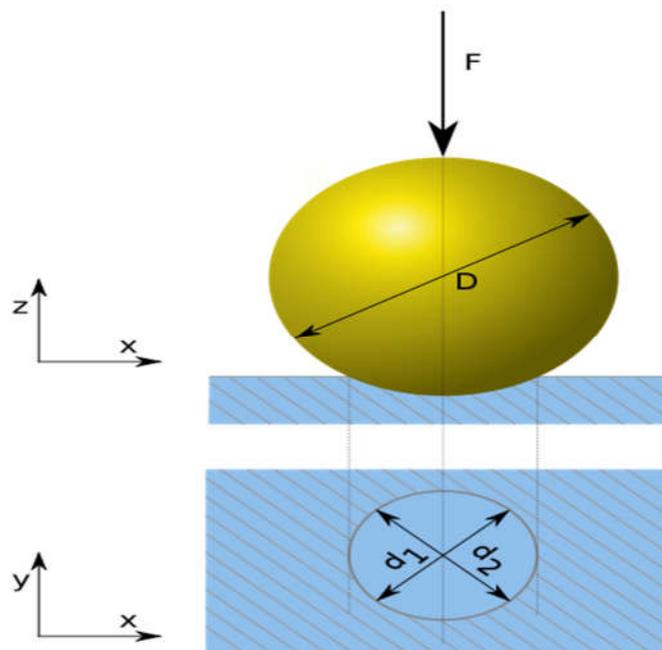


Figure III-9: Schéma de principe : [16]

Chapitre 4

Résultats et Interprétations

I. Caractérisation du fil machine :

I.1. Composition chimique du fil machine :

L'analyse chimique (effectuée au niveau de l'entreprise Sidi Ben Thuhayba Massera Mostaganem) du fil machine d'alliage d'aluminium $\varnothing = 9.5\text{mm}$ à donner le résultat représenté sur le tableau IV-1.

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

Tableau IV-1: Composition chimique du fil machine :

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

I.2. Résistivités ρ et conductivités σ électriques :

La résistance électrique linéique R_L du fil machine a été mesurée au niveau de l'entreprise CABEL électrique d'Alger-à l'aide d'un banc d'essai.

La valeur de la résistance électrique linéique en Ω/Km est représenté sur le Tableau IV-2

Elément	Diamètre (mm)	Résistance électrique linéique R_L (Ω/km)
Fil machine	9,36	0.44

Tableau IV-2 : résistance linéique du Fil machine :

La résistivité d'un matériau, ρ , représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique, est calculée par la relation : $\rho = R_L * S$

La conductivité électrique σ est l'aptitude d'un matériau à faire circuler librement des charges électriques libres ou le courant électrique. Elle dépend de plusieurs facteurs : nombre d'électron de valence du matériau, la concentration de défaut dans le matériau, la température, etc. La conductibilité est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Les résultats Correspondant aux Résistivités ρ et conductivités σ calculées du fil machine sont données dans le Tableau IV-3.

Elément	Diamètre (mm)	S (m ²).10 ⁻⁶	ρ (Ω .m).10 ⁻⁶	σ (Ω .m) ⁻¹ .10 ⁻⁶
Fil machine	9,36	68.77	0.0302	33.33

Tableau IV-3.résistivités et conductivités électriques du fil machine

II.3.Microstructure du fil machine :

La figure IV-1 montre la microstructure du fil machine après préparation métallographique. Les grains n'ont pas été révélés à cause de la préparation de surface insuffisante, ceci ne nous a pas permis d'obtenir des renseignements sur la microstructure de l'état initial de l'alliage -fil machine-.

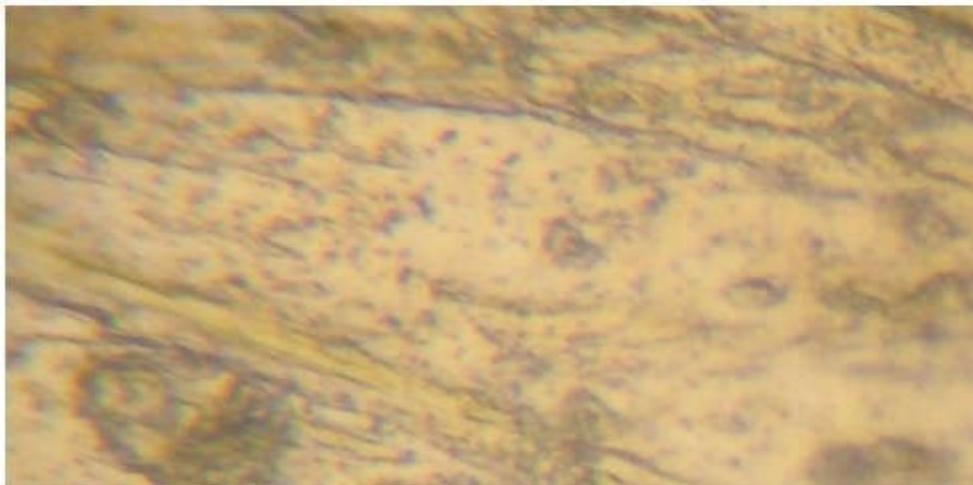


Figure IV-1: Microstructure du fil machine par microscopie optique

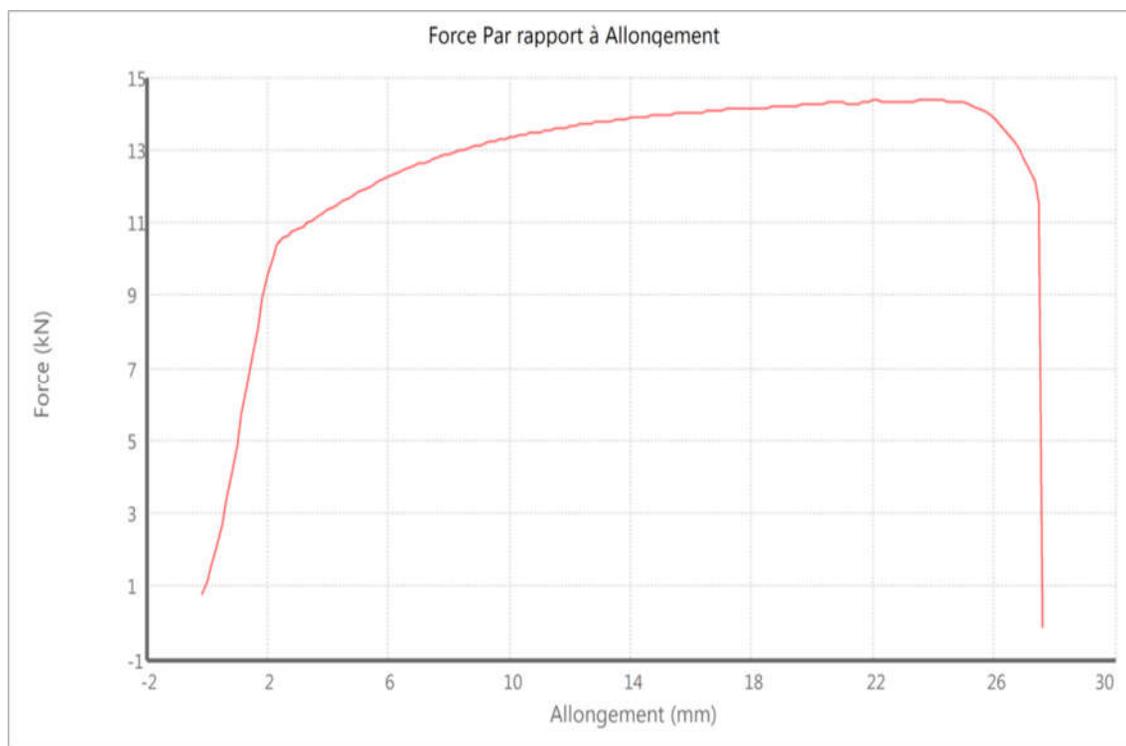
Nous avons prélevé des échantillons tréfilés avec un taux de réduction de la section 85% pour une étude métallographique. Malheureusement, le polissage n'étant pas réussi, la microstructure n'a pas pu être révélée et nous n'avons pas pu tirer des conclusions de cette partie.

II.4.Essai de traction :

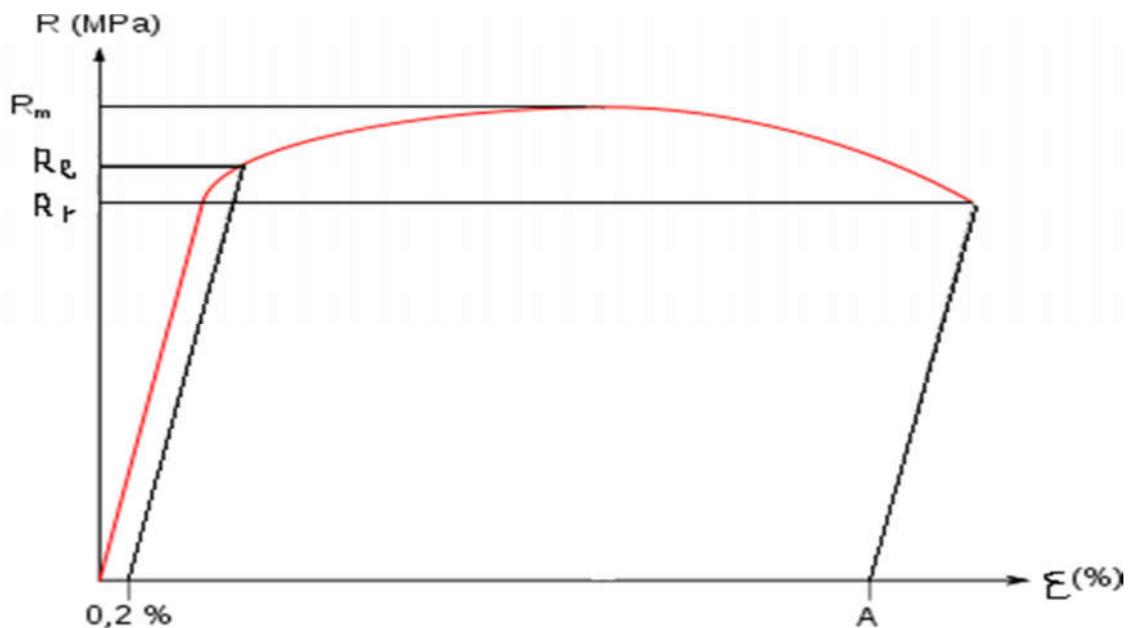
Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, la limite d'élasticité R_e , la résistance à la traction R_m la résistance à la rupture R_r , l'allongement total après rupture A (%), et le coefficient de striction Z .

La courbe de traction de la figure IV-1. Correspond au fil machine, les caractéristiques mécaniques, allongement A (%), la force maximal F_{max} et la contrainte à la rupture (R_r) sont donnée par logiciel associé à la machine de traction, la résistance à la traction R_m est calculée par la relation : $R_m = F_{max}/S$.

La limite élastique $R_{e(0,02)}$ est déterminée à partir de la courbe de traction comme la montre la Courbe IV -2.



Courbe IV-1: Courbe de traction de fil machine :



Courbe IV -2 : détermination des caractéristiques mécaniques

I.5.Caractéristiques mécaniques du fil machine :

Le tableau IV-4, donne les caractéristiques mécaniques du fil machine déterminés à partir de la courbe de traction.

Elément	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S ₀ (mm ²)	D (mm)	Re _{0.2} (MPa)	Rm(MPa)
Fil machine	207,61	12.5	1466,24	68,812	9,36	174.38	213.08

Tableau IV-4 : caractéristiques mécaniques de Fil machine :

Ces résultats montrent que le fil machine est ductile et de faible résistance mécanique ce qui permet de faciliter la production des fils fins par tréfilage. En comparaison avec des données bibliographiques [7] concernant le même alliage 6101à l'état T4 les valeurs de A %, est plus faible, et R_m est plus élevé, comme le montre le Tableau IV-5

Etat thermique	R _m (MPa)	A ₁₀₀ (%)
T4	150-175	23
T6	220	15

Tableau IV-5: Propriétés mécaniques et électriques de l'alliage 6101 [7].

I.6 La dureté :

L'essai de dureté effectué sur un échantillon de fil machine, a donné une valeur moyenne de 54 HB, valeur en accord avec les données bibliographiques [16].

II. Caractérisation du fil machine tréfiles avant revenu :

II.1. Résistivités ρ et conductivités σ électriques du fil tréfilé avant revenu :

Le fil tréfilé que nous avons étudié possède un taux de réduction de 85 %

La valeur de la résistance électrique linéique en Ω/Km est donnée sur le

Tableau IV-6.

Elément	D (mm)	résistance électrique linéique (Ω/km)
fil tréfile avant revenu	3,552	3.4837

Tableau IV-6.résistance linéique de fil tréfile avant revenu :

Les valeurs calculées correspondant aux résistivités ρ et conductivités électriques σ calculée du fil tréfilé avant revenu sont donnés dans le Tableau IV-6.

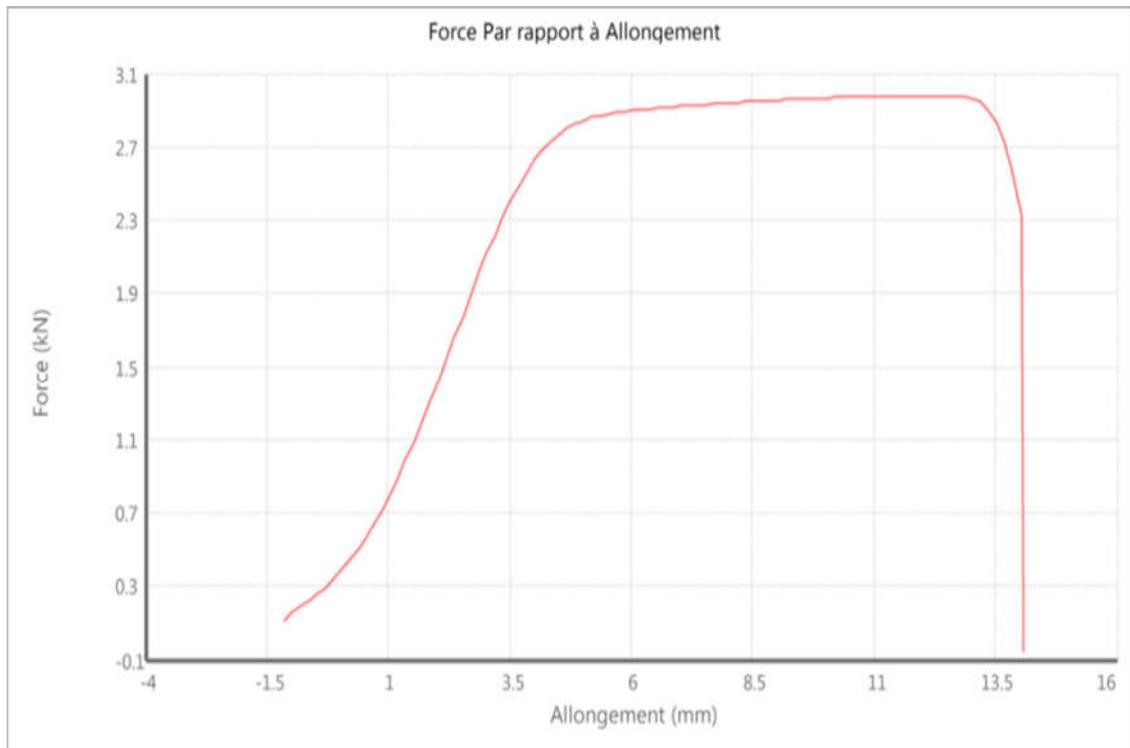
Elément	D (mm)	S (m^2). 10^{-6}	ρ ($\Omega.\text{m}$). 10^{-6}	σ ($\Omega.\text{m}$) $^{-1}.$ 10^{-6}
Fil tréfilé avant revenu	3,552	9.904	0.0345	28.98

Tableau IV-7.résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu

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

II.2.Essai de traction

La courbe IV-3 de traction correspond au fil tréfilé $\epsilon= 85\%$ avant revenu.



Courbe IV-3: courbe de traction de fil tréfilé avant revenu:

II.3.Caractéristiques mécaniques de fil tréfilé avant revenu :

Les résultants sont donne dans le tableau IV-8, correspondant aux caractéristiques mécaniques du fil tréfilé avant revenu :

Elément	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S ₀ (mm ²)	D (mm)	Re _{0.02} (MPa)	Rm(MPa)
Fil machine	300.675	05	303.818	9.904	3.552	292.81	306.76

Tableau IV-8: caractéristiques mécaniques de fil tréfilé avant revenu

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

III. Caractérisation du fil machine tréfiles après revenu à 160°C

L'écrouissage du fil machine tréfiles est important ce qui nécessite un traitement thermique pour éviter au fil d'être trop cassant en améliorant sa plasticité, et diminuer sa résistivité électrique le revenu permet donc d'améliorer la caractéristique mécanique et électrique des fils traités.

Dans notre traitement, pour le fil tréfilé ayant un taux de réduction de 85%, le revenu est fait à 160°C pendant trois temps différents : 01h, 02h, 03h, 04h, 05h, 06h, et 07h, ensuite on refroidit nos échantillons à l'air. On caractérise par la suite chaque fil par essai de traction et résistivité électrique

III.1. Résistivités ρ et conductivités σ électriques après revenu

Les valeurs des résistances électriques linéiques en Ω/Km est représenté sur le tableau IV-8, Pour les sept temps de revenu utilise : 01h, 02h, 03h, 04h, 05h, 06h, et 07h. à 160°C

La résistance R_L prescrit (pour les $D=3.55 \text{ mm}$)= $3.30 \Omega/\text{Km}$.

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

Tableau IV-9 : résistance linéique de fil tréfile après revenu.

Les résultants correspondant aux résistivités ρ et conductivités σ électriques du fil tréfilé après revenu à 160°C sont donne des tableaux IV.10

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

Tableaux IV.10 : résistivités et conductivités électriques de fil tréfilé avant revenu :

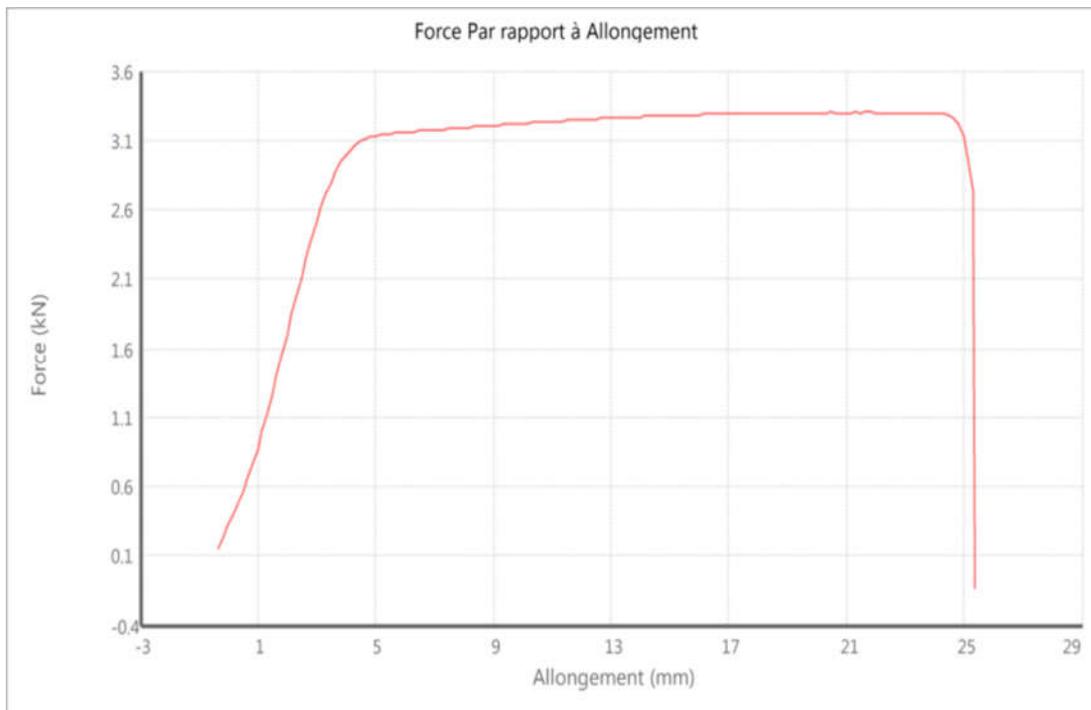
Le tableau montre une diminution de la résistivité lorsque le temps de revenu augmente. Ceci est lié à la diminution du nombre des défauts créés par le tréfilage, au cours du traitement thermique.

III.2.Essai de traction :

Les courbes de traction de la figures IV4-5-6, Correspond au fils tréfiles après revenu à 160°C les caractéristiques mécaniques, sont donne sur le Tableau IV-9.Nous avons 03 fils avec un temps de revenu de 02,04 et 06 h

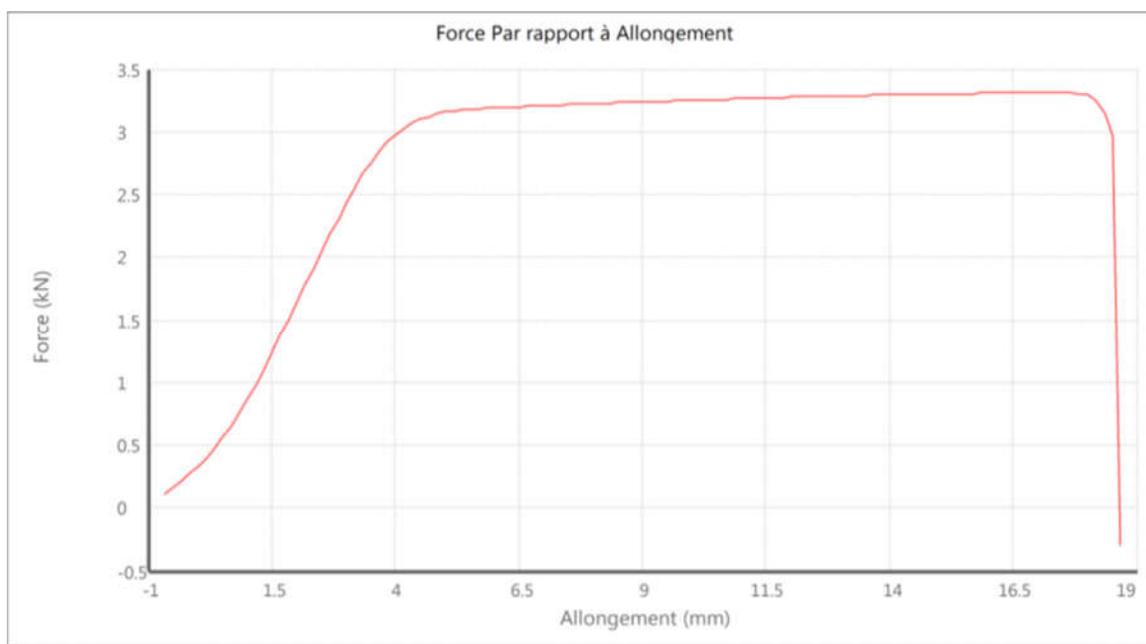
III.2.1.Courbe de traction du fil tréfiles après revenu :

La Courbe IV-4 donné les résultats de l'essai de traction de fil resté 02 heures s à l'intérieur du four à 160°C:



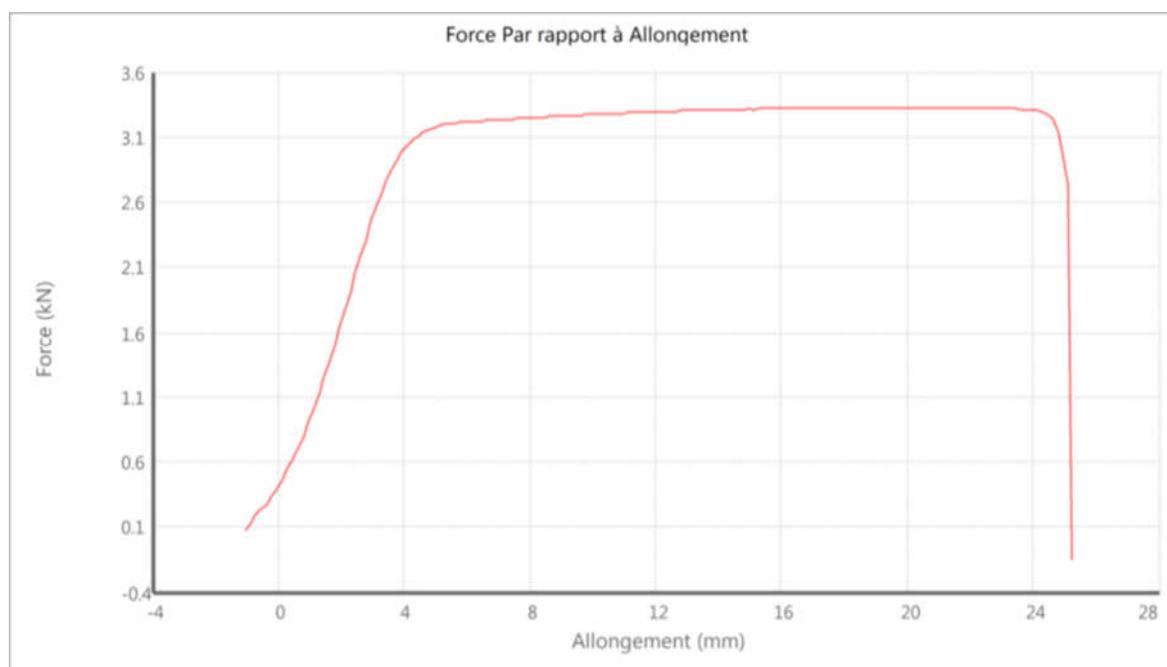
Courbe IV-4: Courbe de traction de fil tréfilé après revenu (02 heures)

La Courbe IV-5 donné les résultats de l’essai de traction de fil resté 04 heures s à l’intérieur du four à 160°C:



Courbe IV-5: Courbe de traction de fil tréfilé après revenu (04 heures).

La Courbe IV-6 donné les résultats de l’essai de traction de fil resté 06 heures s à l’intérieur du four à 160°C.



Courbe IV-6 : Courbe de traction de fil tréfilé après revenu (06heures).

III.3.Caractéristiques mécaniques du fil tréfilé après revenu :

A partir des résultats de l'essai de traction nous avons rassemblés les Caractéristiques mécaniques des fils tréfilés après revenu, 01, 02, 03, 04, 05,06 et07h. à 160°C Tableau IV-11

Elément	Revenu(h)	Rr (MPa)	A (%)	F max (kgf)	S (mm ²)	D (mm)	Re _{0.02} (MPa)	Rm(MPa)
1	01 heures	325.129	9.6	328,641	9.898	3.551	313.19	332.02
2	02 heures	332.713	9.1	336,451	9.904	3,552	323.10	339.71
3	03 heures	333.654	8.8	336,109	9.898	3.551	323.29	339.57
4	04 heures	334.557	7	337,482	9.887	3,549	330.73	341.33
5	05 heures	336.430	9.0	339,836	9.887	3.549	332.71	343.72
6	06 heures	335.395	9.0	339,181	9.892	3,550	333.60	342.88
7	07 heures	335.232	8.0	338,613	9.892	3.55	328.54	342.74

Tableau IV-11 : caractéristiques mécaniques de fil tréfilé après revenu à 160°C

Nous constatons globalement R_m augmente avec le temps de revenu jusqu'à 04 h correspondant à une diminution de l'allongement A%

Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C

Le tableau IV-12 donne les résultats de la résistivité, conductivité électrique et des caractéristique mécanique en traction des fils tréfilés après revenu à 190°C pendant 1, 2, et 3 h, ont constaté que R_m et ρ diminue après une heure de revenu (en dessous de la valeur du prescrit)

Pour 2h et 3h, bien que la valeur de ρ est convenable, R_m et R_r sont inférieure au prescrit.

Temps(h)	S (mm) ²	D (mm)	R_L (Ω /km)	ρ (Ω .m) 10^{-6}	σ (Ω .m) ⁻¹ 10^6	R_m (MPa)	R_r (MPa)
1	9.375	3.455	3.44	0.0325	30.76	340.16	333.42
2	9.387	3.456	3.38	0.0317	31.45	326.85	320.37
3	9.936	3.454	3.32	0.0311	32.15	310.79	304.39

Tableau IV-12 Caractéristiques mécaniques et électriques du fil tréfilé et revenu à 190°C

IV. Interprétations :

Le tableau suivante représente tous les résultant de traction et de résistivité du fil machine, fil tréfilé avant et après traitaient thermique de revenu : Tableau IV-12

Fils	ρ ($\Omega.m$) $.10^{-6}$	σ ($\Omega.m$) $^{-1}.10^6$	A (%)	R _r (MPa)	R _{e0.2} (MPa)	R _m (MPa)
Fil machine	0.030	33.33	12.5	207.61	174.38	213.08
Tréfilé	0.0345	28.98	05.0	300.675	292.81	306.76
Tréfilé et revenu 01 h	0.0339	29.49	9.6	325.129	313.19	332.02
Tréfilé et revenu 02 h	0.0335	29.85	9.1	332.713	323.10	339.71
Tréfilé et revenu 03h	0.0332	30.12	8.8	333.654	323.29	339.57
Tréfilé et revenu 04 h	0.0330	30.30	7	334.557	330.73	341.33
Tréfilé et revenu 05 h	0.0328	30.48	9.0	336.430	332.71	343.72
Tréfilé et revenu 06 h	0.0327	30.58	9.0	335.395	333.60	342.88
Tréfilé et revenu 07h	0.0326	30.67	8.0	335.232	328.54	342.74

Tableau IV-13: caractéristiques mécaniques et électriques des fils machine, tréfilé après et après revenu à 160° C

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans la variation des caractéristiques :

IV.1.Tréfilage :

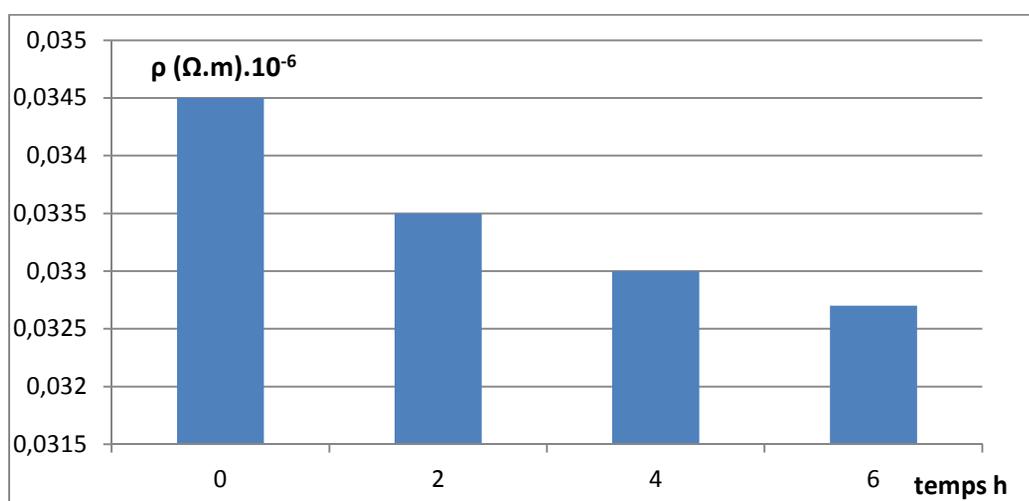
Il entraine une déformation plastique qui est accompagnée d'une augmentation des dislocations, ces derniers sont des obstacles que gênent le déplacement des électrons, d'où l'augmentation de la résistance au passage des électrons (courant électrique), c'est ce qui

explique l'augmentation de la résistivité. Ces mêmes dislocations entraînent une augmentation de R_m , une diminution de A % et un durcissement de l'alliage, en rendant difficile la déformation plastique

IV.2. Traitement thermique (revenu) $T=160^\circ\text{C}$:

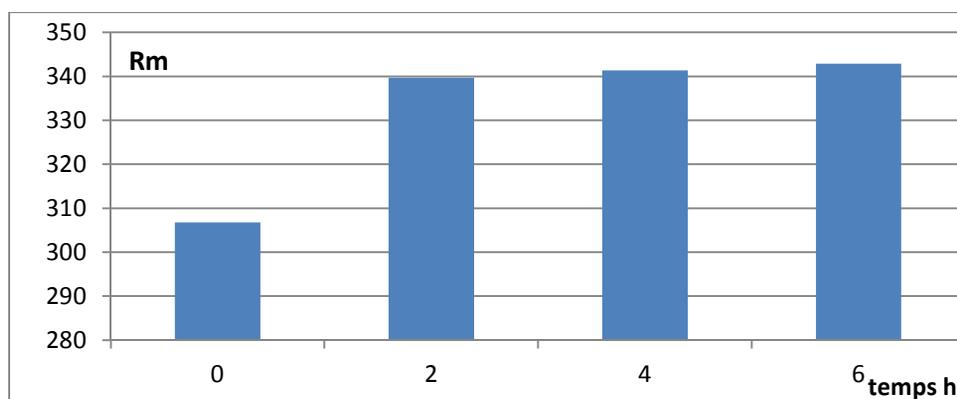
Dans cette étude le traitement thermique de revenu a entraîné :

- Une diminution de la résistivité électrique (augmentation de conductivité électrique) comme le montre la Courbe IV-7



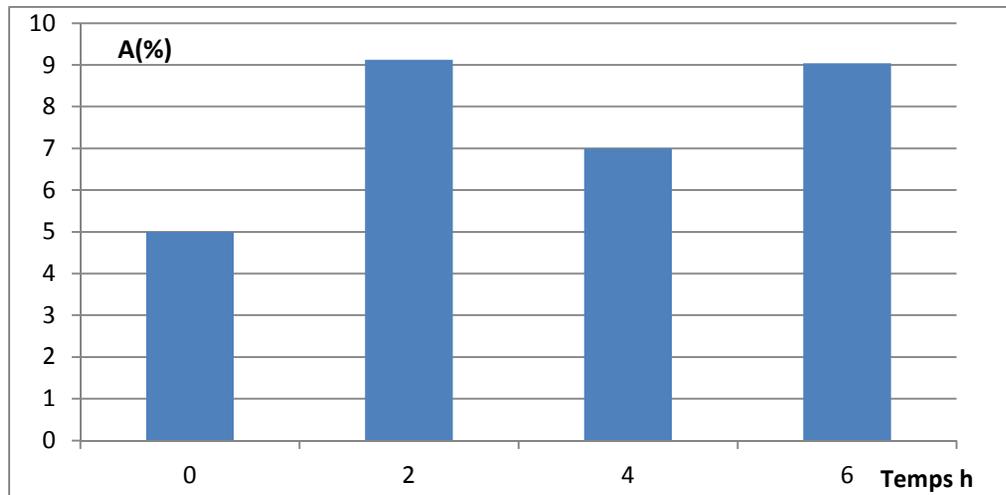
Courbe IV-7 : variation des résistivités électriques

- Augmentation de la résistance mécanique, limite élastique et la contrainte à la rupture, ce qui est dû au durcissement structural de l'alliage au cours du revenu Courbe IV-8 . Un traitement de 07 h et plus entraîne une diminution de la résistance mécanique ce qui ne convient pas à cette application.



Courbe IV-8 : variation des résistances mécaniques R_m

- Par contre il y a une augmentation de l'allongement à la rupture A (%) comme le montre la figure Courbe IV-9, ce qui n'est pas normal, il peut être dû à des erreurs (machine de traction).



Courbe IV-9: variation de l'allongement à la rupture A (%)

Traitement thermique (revenu) T=190°C :

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

IV.3. Les conditions optimales d'utilisation de l'alliage d'aluminium pour les câbles électriques

La conductivité électrique mesure l'aptitude d'un matériau à conduire l'électricité. La valeur de la conductivité électrique de l'alliage d'aluminium revenu 06 heures, à 160 °C, est de $31.25 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}^{-1}$, soit une résistivité de : $0.032 \cdot 10^{-6} \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$, associé à une valeur de R_m de 342 MPa qui sont les valeurs optimales précisées par la norme utilisée par l'entreprise, pour l'application de cet alliage dans les câbles électriques. En effet le câble doit posséder une bonne conduction électrique et résister aux contraintes mécaniques imposées en service.

Conclusion général

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques électriques et mécaniques d'un alliage d'aluminium almélec, de la série 6101, utilisé par l'entreprise CABEL ELECTRIQUE, après tréfilage et traitement thermiques de revenu. Les propriétés mécaniques et électriques de cet alliage dépendent de la combinaison des traitements thermomécaniques appliqués au matériau. Les propriétés finales des fils doivent respecter les normes précises qui sont obtenus après une série de tréfilages et de traitement thermiques précis

D'après ce qui a été obtenu comme résultats, on peut conclure les points suivants :

- Le tréfilage provoque le durcissement des fils, caractérisés par l'essai de traction qui a montré une augmentation de la résistance à la traction, de la contrainte à la rupture, et une diminution de l'allongement la rupture.
- Le tréfilage augmente la résistivité électrique des fils tréfilés. Cette modification des propriétés est attribuée à l'écroutissage de l'alliage

_ Un traitement thermiques de revenu à 160°C pendant 6 heures, après tréfilage, est nécessaires pour diminuer la résistivité électrique afin d'atteindre la valeur établies par le prescrit du fournisseur qui est dans notre cas 0.032 Ω .m.

_ Ce traitement thermique permet en même temps l'amélioration des caractéristiques mécaniques en traction par modification de la microstructure, contribuent à un meilleur comportement en service des fils électriques. Nous avons obtenu une résistance à la traction convenable après 6h de revenu correspondant à la norme en vigueur

-Le traitement thermique qu'on a effectué à 190°C permet d'atteindre les valeurs recommandées pendant une heure de revenu, ce qui montre qu'on peut réduire le temps et avoir les mêmes caractéristiques en résistance mécanique et électrique.

Cependant, ce temps est insuffisant pour homogénéiser la température de toutes les bobines dans un grand four industriel chargé, ce qui rend ce traitement inadapté en pratique.

Références bibliographiques

- [1] : Gérard. Hartmann. L'Aluminium historique. Larousse des industries, 2004.
- [2] :Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina. Fabrication characterization and application. Thin solid. Films; 29(1-2) -192-201, 1997
- [3] :M. Sara. Mémoire magister en physique. Université de Constantine 2007.
- [4] :M. Ratiba. Mémoire magister en chimie appliquée. Université de Skikda 2008.
- [5] :fr.wikipedia.org/wiki/Fil_%C3%A9lectrique#Almelec
- [6] dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6660/1/memoire.pdf
- [7] :Laverroxx, M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. La revue de métallurgie cite, (1993)
- [8] :Simonnet, G. tréfilage de l'acier M645. Instruite des matériaux métalliques, techniques de l'ingénieur, 1996
- [9] : Maurice. C et Driver. J.H. Acta Métal. V41, P41, P1653 (1993)
- [10] : Thèse de doctorat, Carole Levrau, Ecole des mines de paris (2006).
- [11] : Burno Chenal et Julian Driver, écrouissage d'alliages d'aluminium. M230. P1
- [12] :mms2.ensmp.fr/mat_paris/deformation/polycop/Ch_14_LdC.pdf.
- [13]: fr.wikipedia.org/wiki/Revenu
- [14]: www.bodycote.com/~media/Files/B/Bodycote-Plc-V2/Attachments/News%20and%20Media/FR/FICHE_les_traitements_thermiques_des_alliages_aluminium%20Fev2013.pdf
- [15]fr.wikipedia.org/wiki/Traitementthermique_d%27un_m%C3%A9tal#Le_revenu_.28tempering.29
- [16]: fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_Brinell
- [17] mms2.ensmp.fr/mat_paris/deformation/polycop/Ch_14_LdC.pdf
- [18] fr.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A9filage
- [19] fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9
- [20]webetab.ac.bordeaux.fr/pedagogie/physique/physic/Electro/e07fil.htm