

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie des procédés des matériaux

THÈME

Étude de l'effet des traitements thermiques à différents temps et températures sur les propriétés mécaniques et électriques d'un alliage à base d'aluminium Al-Mg-Si (Almelec)

Présenté par

1. BOUNOUAR Ouiam
2. GOUAICH Hadil

Soutenu le 22/06/2026 devant le jury composé de :

Président :	SAIDJ Merzouk	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	BOUBEGRA Naima	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	CHOUAIIH Abdelkader	Professeur	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur amour, leur patience, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Que Dieu les protège et les garde toujours à mes côtés.

À mes chers frères et sœurs : **Sofian, Lakhder, Mohamed Amin** et **Soulaf**, pour leurs encouragements et leur présence, dans les moments difficiles comme dans les meilleurs, sans oublier la petite famille de ma sœur **Assia** : À son époux **Nabil** et à leurs chers enfants **Assrar, Abed Star** et **Almass**.

Une pensée particulière à ma chère amie **Lattab Samira**, pour son soutien et ses précieux conseils.

À tous ceux qui me portent dans leur cœur et ma souhaitent le succès, trouvez ici l'expression de ma vive affection et de ma reconnaissance.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, qui ont toujours été une source d'amour, de soutien et d'encouragement. Grâce à leurs sacrifices et leurs prières, j'ai pu atteindre cette étape importante de ma vie.

À mes sœurs **Asma, Ritedje** et **souna** et à mon frère **Abdelbari issam** pour leur Présence et leur soutien.

À mes amis qui m'ont accompagné durant ce parcours.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

(بَارِكَ اللهُ فِيكُمْ)

Remerciements

﴿وَفَوْقَ كُلِّ ذِي عِلْمٍ عَلِيمٌ﴾

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Professeur **CHOUAÏH Abdelkader**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants pour la qualité de leur formation ainsi que pour les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi à la société GISB pour son accueil et son aide précieuse, notamment à l'ingénieur Monsieur **ZOUHEYR Zobir**, pour sa collaboration et les moyens mis à notre disposition afin de réaliser ce travail dans de bonnes conditions.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury, **Monsieur SAIDJ Merzouk** et **Madame BOUBEGRA Naima**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour le temps qu'ils ont consacré à sa lecture et les remarques constructives qu'ils nous apporteront.

Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'effet des traitements thermiques sur les alliages à base d'aluminium utilisé dans la fabrication des câbles électriques. Cette étude a été réalisée au sein de l'entreprise GISB – Câblerie de Sidi Bendhiba, Mesra, Mostaganem.

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser les paramètres des traitements thermiques afin de réduire la température et le temps de traitement tout en assurant la qualité du produit final. Cette optimisation permet de diminuer la consommation d'énergie et d'améliorer le rendement industriel.

Pour cela, plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés sur des échantillons soumis à différentes températures et durées de traitement thermique. Des contrôles de qualité ont ensuite été effectués afin d'évaluer les propriétés électriques et mécaniques de l'alliage.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire certaines conditions de traitement tout en conservant des caractéristiques conformes aux exigences industrielles. Cette étude contribue ainsi à l'amélioration des performances énergétiques et économiques du procédé de fabrication.

Abstract :

This work investigates the effect of heat treatments on aluminum-based alloys used in the manufacturing of electrical cables. The study was conducted at GISB – Sidi Bendhiba Cable Manufacturing.

The primary objective of this research is to optimize the heat treatment parameters by reducing both the treatment temperature and processing time while ensuring the quality of the final product. Such optimization contributes to lowering energy consumption and enhancing industrial productivity.

To achieve this objective, a series of experimental tests were carried out on samples subjected to different heat treatment temperatures and holding times. Subsequently, quality control assessments were performed to evaluate the electrical and mechanical properties of the material.

The obtained results demonstrate that certain heat treatment conditions can be reduced while maintaining material characteristics that comply with industrial requirements. Consequently, this study contributes to improving the energy efficiency and economic performance of the manufacturing process without compromising product quality.

الملخص:

يتناول هذا البحث دراسة تأثير المعالجات الحرارية على السبائك المعتمدة على الألمنيوم والمستخدمة في صناعة الكابلات

الكهربائية، وذلك من خلال دراسة تطبيقية أُنجزت على مستوى مؤسسة GISP كابلات سيدي بن زهية.

وتهدف هذه الدراسة أساسًا إلى تحسين شروط المعالجة الحرارية من خلال تحديد القيم المثلى لدرجات الحرارة وأزمنة المعالجة، بما يضمن الحفاظ على جودة المنتج النهائي مع تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الكفاءة الإنتاجية. وتكتسي هذه المقاربة أهمية خاصة نظرًا لما توفره من مزايا اقتصادية وطاقوية تسهم في تعزيز مردودية العملية الصناعية.

ولتحقيق أهداف الدراسة، أُجريت سلسلة من التجارب على عينات من السبائك خضعت لظروف مختلفة من المعالجة الحرارية، شملت تباينًا في درجات الحرارة ومدد المعالجة. كما أُنجزت اختبارات مراقبة الجودة لتقييم الخصائص الميكانيكية والكهربائية للعينات المعالجة، ومقارنة نتائجها بالمتطلبات والمعايير الصناعية المعتمدة.

وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها إمكانية خفض بعض معايير المعالجة الحرارية، سواء من حيث درجة الحرارة أو مدة المعالجة، دون التأثير سلبًا على الخصائص الوظيفية للمادة أو على مدى مطابقتها للمواصفات الصناعية. وتبرز هذه الدراسة إمكانات واعدة لتحسين الأداء الطاقوي والاقتصادي لعمليات تصنيع الكابلات الكهربائية، مع المحافظة على جودة المنتج النهائي ومتطلبات الاعتمادية الصناعية.

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur les alliages Al-Mg-Si	
I. Généralités sur l'aluminium	3
I.1. Historique de l'aluminium	4
I.2. Les propriétés physiques	6
I.3. Les propriétés mécaniques	7
I.4. Les propriétés électriques	8
I.5. Les alliages Al-Mg-Si	8
I.5.1. Les compositions chimiques	8
I.5.2. Classification des alliages d'aluminium	9
I.5.3. Domaines d'application	9
I.6 Phénomène de précipitation	12
I.7 Rôle de Mg ₂ Si	12
I.7.1 Influence de Mg ₂ Si sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si	13
I.8 Conclusion	13
Chapitre II Présentation de l'entreprise GISB	
II.1 Introduction	15
II.2 Présentation générale de l'entreprise	15
II.3 Historique	15
II.4 Situation géographique	15
II.5 Activités principales	16
II.6 Procédé de fabrication	16
II.6.1 Tréfilage	17
II.6.2 Câblage	18
II.6.3 Isolation	18
II.6.4 Assemblage et gainage	18
II.7 Traitement thermique dans l'entreprise	18
II.7.1 Objectif du traitement thermique	18
II.8 Contrôle qualité	19
II.9 Conclusion	19

Chapitre III Traitements thermiques des alliages Al-Mg-Si (Almélec)	
III.1 Traitements thermiques	21
III.2 La mise en solution	21
III.3 La trempe	21
III.4. Le vieillissement	22
III.4.1 Vieillissement naturel	22
III.4.2 Vieillissement artificiel	22
III.5 Paramètres étudiés	23
III.5.1 Influence de la température	23
III.5.2 Influence du temps	23
III.6 Influence du traitement thermique	23
III.6.1 Propriétés mécaniques	23
III.6.2 Propriétés électriques	24
III.7 Conclusion	24
Chapitre IV Partie Expérimentale	
IV.1 Introduction	26
IV.2 Matériau étudié	26
IV.3 État initial avant traitement thermique	28
IV.4 Conditions expérimentales	29
IV.4.1 Traitement thermique de référence	29
IV.4.2 Conditions de température et de temps	30
IV.4.3 Tests réalisés	30
IV.4.3.1 Essai de résistivité	31
IV.4.3.2 Essai d'allongement	31
IV.4.3.3 Essai de traction	32
IV.5. Représentation des résultats	32
IV.5.1 La résistivité R	33
IV.5.2 Allongement	33
IV.5.3 Traction	34
IV.6 Discussion des résultats	35
Conclusion générale	40
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des figures

Figure 1: L'aluminium non allie et structure CFC	3
Figure 2: Position de l'aluminium dans le tableau périodique des éléments..	4
Figure 3: Les inventeurs de la procédure d'électrolyse de l'aluminium	5
Figure 4 : Minerais d'aluminium.....	6
Figure 5: Alliage d'aluminium 6000 Applications dans l'industrie automobile et les panneaux de construction.	9
Figure 6: Alliage d'aluminium 6002 Applications dans l'industrie aéronautique et les barres cylindriques industrielles.	10
Figure 7: Alliage d'aluminium 6061	10
Figure 8: Alliage d'aluminium 6082 Applications dans les structures offshore et les profilés métalliques.	11
Figure 9: Alliage d'aluminium 6063 Applications dans les transports ferroviaires et les profilés architecturaux.	11
Figure 10: Alliage d'aluminium 6061 Applications dans les équipements industriels et médicaux.....	11
Figure 11: Alliage d'aluminium 6082Applications dans la construction navale et les tubes industriels	12
Figure 12: Localisation géométrique.....	16
Figure 13: Tréfilage	17
Figure 14: Matière première (Almulec)	17
Figure 15	18
Figure 16: Machine d'essai de torsion	19
Figure 17: Appareil de Traction Mécanique (JBA).....	19
Figure 18: Fil machine étudié	
Figure 19: Appareil de diamètre de la matière étudiée	27
Figure 20: Câble almelec	27
Figure 21: Millihommètre pour mesurer la résistance électrique.....	27

Figure 22: Spectrometer pour analyse chimique de matirieux.....	28
Figure 23: Appareil de traction.....	28
Figure 24: Le four.....	
Figure 25: Courbe de variation de la résistivité $R=f(t)$	33
Figure 26: Courbe de variation d'allongement $A=f(t)$	34
Figure 27: Courbe de variation de traction $Tr=f(t)$	35
Figure 28: Colonne de la comparaison des résultats de la résistivité.....	36
Figure 29: Colonne de la comparaison des résultats d'allongement.....	37
Figure 30: Colonne de la comparaison des résultats de traction	37

Liste de tableaux

Tableau 1: Principales propriétés physiques de l'aluminium pur.	7
Tableau 2: Propriétés mécaniques de alliages l'aluminium.	7
Tableau 3: Propriétés électriques de alliages l'aluminium	8
Tableau 4: Fiche technique – Alliage Almélec 6101 (Al-Mg-Si)	8
Tableau 5: Conditions testées	30
Tableau 6: Les Norme des essais.	31
Tableau 7: Les Essais de La Résistivité R ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{Km}$)	32
Tableau 8: Les Essais de L'allongement	33
Tableau 9: Les Essais de La Traction	34

Liste des symboles

A : Allongement (%)

Tr : Traction (N/mm^2)

R : Résistivité ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)

R : Résistance (Ω/km)

S : Section (mm^2)

D : Diamètre (mm)

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

T : Temps

Δ : La résistance à la traction (N/mm^2)

F : Force appliqués (N)

Liste des abréviations

GISB : Groupe Industriel Sidi Bendehiba

Al : Aluminium

Mg : Magnésium

Si : Silicium

Mm : Millimètre

°C : Degré Celsius

H : Heure

Min : Minute

S : Seconde

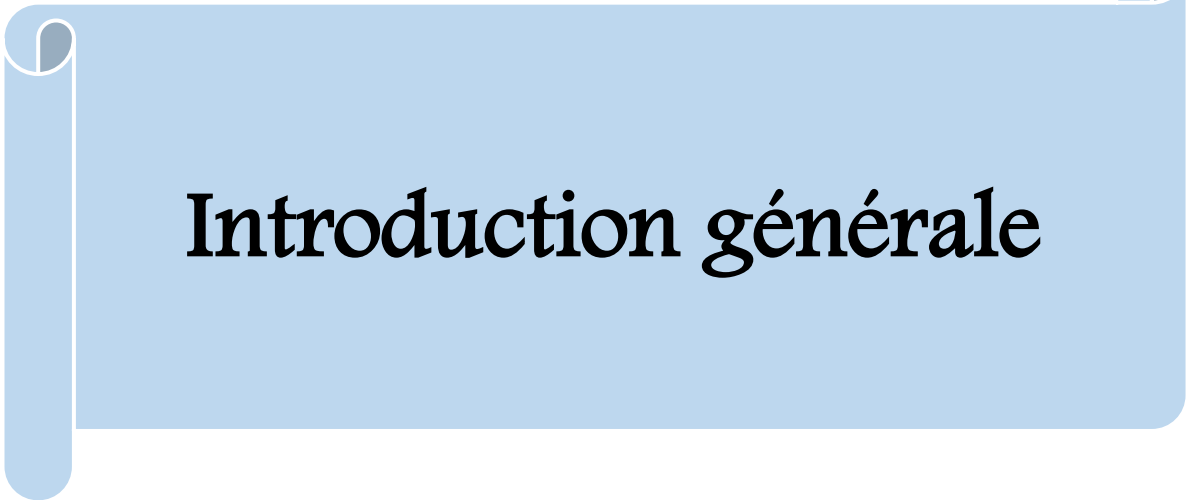
% : Pourcentage

N : Newton

Ω : Ohm

Km : Kilomètre

Mm² : Millimètre carré



Introduction générale

Introduction générale

L'aluminium est un matériau largement utilisé dans l'industrie, notamment dans le domaine électrique pour la fabrication des conducteurs, en raison de sa faible densité, de son excellente conductivité électrique ainsi que de son coût relativement réduit. Cependant à l'état pur, ses propriétés mécaniques demeurent limitées, ce qui nécessite son utilisation sous forme d'alliage afin d'en améliorer les performances.

Parmi les alliages d'aluminium les plus utilisés, les alliages Al-Mg-Si appartenant à la série 6000 occupent une place importante grâce à leur compromis intéressant entre résistance mécanique, aptitude à la mise en forme et conductivité, ces matériaux sont particulièrement adaptés aux applications électriques et structurelles.

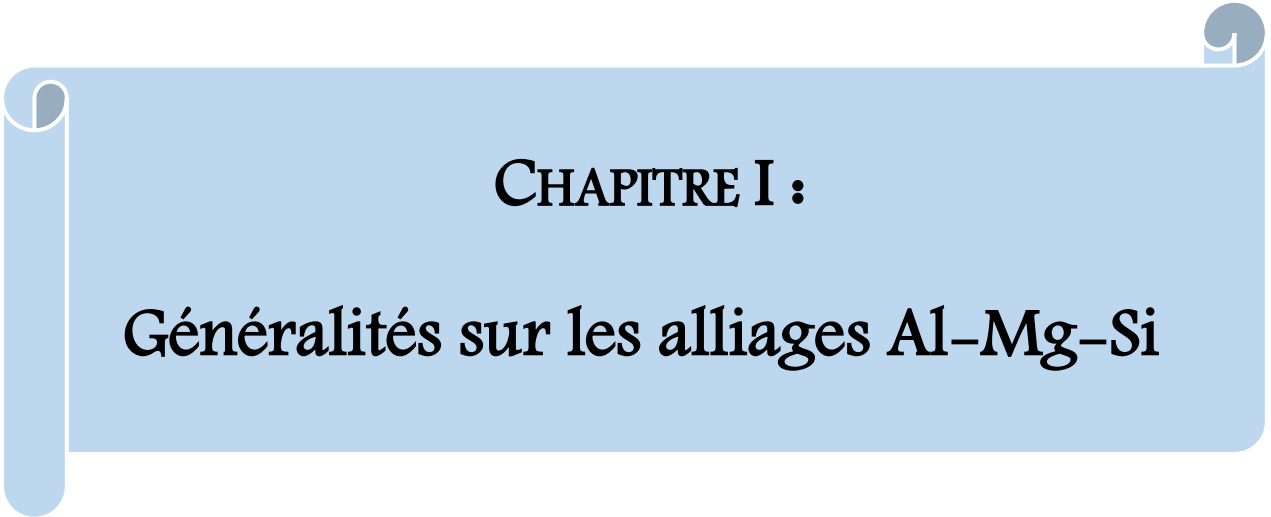
Dans ce contexte les traitements thermiques constituent un facteur clé pour l'optimisation des propriétés de ces alliages, les paramètres principaux, notamment la température et le temps de maintien, influencent fortement l'évolution de la microstructure, ce qui affecte directement sur les propriétés mécaniques et électriques du matériau.

Ainsi, ce travail a pour objectif d'étudier l'effet combiné du temps et de la température de traitement thermique sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si utilisés dans les conducteurs électriques, afin d'identifier les conditions optimales permettant de réduire le temps de traitement et la consommation énergétique, tout en garantissant de bonnes performances.

Enfin, cette étude s'inscrit dans une démarche d'optimisation industrielle visant à améliorer la productivité et à réduire la consommation énergétique des procédés de traitement thermique.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les alliages Al-Mg-Si.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation l'entreprise GISB.
- Le troisième chapitre traite des traitements thermiques appliqués aux alliages Al-Mg-Si (Almélec).
- Le quatrième chapitre présente étude expérimentale.
- Une annexe regroupe les définitions des concepts et méthodes d'analyse utilisées.



CHAPITRE I :

Généralités sur les alliages Al-Mg-Si

I. Généralités sur l'aluminium

L'aluminium est le troisième élément le plus abondant sur terre [1], après l'oxygène et le silicium.

Il s'agit d'un métal de couleur blanc argenté, caractérisé par sa grande malléabilité et sa légèreté [2]. D'un point de vue chimique, il est représenté par le symbole Al et possède le numéro atomique 13, appartenant ainsi au groupe 13 du tableau périodique, connu sous le nom de famille des métaux pauvres. Sur le plan industriel, l'aluminium occupe une place très importante puisqu'il constitue le deuxième métal le plus utilisé après le fer et les aciers [3]. Toutefois, son exploitation à grande échelle est relativement récente, car sa production industrielle n'a réellement débuté qu'au début du 20^{ème} siècle [4].

Depuis lors, il connaît une croissance remarquable, avec un volume de production en constante augmentation [5].

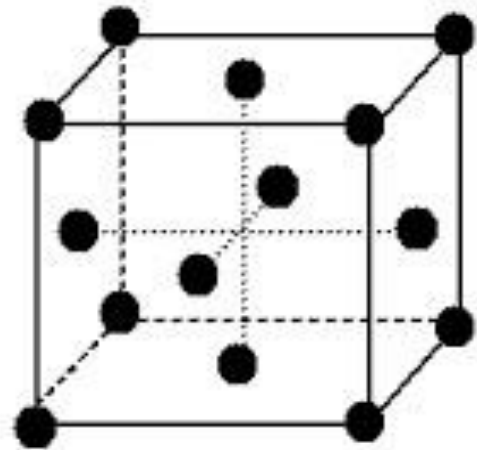


Figure 1: L'aluminium non [6] allié et structure CFC.

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

H

HYDROGÈNE

1.0079

Li

LITHIUM

6.941

Na

SODIUM

22.989

K

POTASSIUM

39.098

Rb

RUBIDIUM

85.467

Cs

CÉSURIUM

132.905

Fr

FRANCIUM

(223)

Be

BÉRYLLIUM

9.0122

Mg

MAGNÉSIE

24.305

Ca

CALCAIRE

40.078

Sr

STRONTIUM

87.62

Ba

BARYUM

137.327

Ra

RADIUM

(226)

Sc

SCANDIUM

44.955

Y

YTHIUM

88.9058

La

LANTHANE

138.90

Ti

TITANE

47.867

Zr

ZIRCONIUM

91.224

Hf

HAFNIUM

178.49

V

VANADIUM

50.9415

Nb

NIOBIUM

92.9063

Ta

TANTALE

180.94

Cr

CHROME

51.9961

Mo

MOYBÈNE

95.95

W

TUNGSTÈNE

183.84

Mn

MANGANESE

54.938

Tc

TECHNETIUM

(98)

Rh

RHODIUM

102.90

Fe

FER

55.845

Ru

RUTHÈNIUM

101.07

Pd

PALLADIUM

106.42

Co

COBALTE

58.933

Ni

NICKEL

58.6934

Rh

RHODIUM

102.90

Cu

CUIVRE

63.546

Zn

ZINC

65.38

Ag

ARGENT

107.8682

Cd

CADMIUM

112.414

Hg

MERCURE

200.59

Cn

COPERNICIUM

(285)

B

BORE

10.811

C

CARBONE

12.011

N

AZOTE

14.007

O

OXYGÈNE

15.999

F

FLUORINE

18.998

Ne

NEON

20.1797

Al

ALUMINIUM

26.981

Si

SILICIE

28.086

P

PHOSPHORE

30.974

S

SULFURE

32.066

Cl

CHLORE

35.453

Ar

ARGON

39.948

Kr

KRYPTON

83.798

Xe

XÉNON

131.293

Rn

RADON

(222)

U

URANIUM

238.02

Np

NEPTUNIUM

(237)

Pu

PLUTONIUM

(244)

Am

AMÉRICIUM

(243)

Cm

CURIUM

(247)

Bk

BERKÉLIUM

(247)

Cf

CALIFORNIUM

(251)

Es

EINSTEINIUM

(252)

Fm

FERMIUM

(257)

Md

MENDELÉVIUM

(258)

No

NOBELIUM

(259)

Lr

LAWRENCIUM

(262)

Al

ALUMINIUM

26.981

Si

SILICIE

28.086

P

PHOSPHORE

30.974

S

SULFURE

32.066

Cl

CHLORE

35.453

Ar

ARGON

39.948

Kr

KRYPTON

83.798

Xe

XÉNON

131.293

Rn

RADON

(222)

U

URANIUM

238.02

Np

NEPTUNIUM

(237)

Pu

PLUTONIUM

(244)

Am

AMÉRICIUM

(243)

Cm

CURIUM

(247)

Bk

BERKÉLIUM

(247)

Cf

CALIFORNIUM

(251)

Es

EINSTEINIUM

(252)

Fm

FERMIUM

(257)

Md

MENDELÉVIUM

(258)

No

NOBELIUM

(259)

Lr

LAWRENCIUM

(262)

Al

ALUMINIUM

26.981

Si

SILICIE

28.086

P

PHOSPHORE

30.974

S

SULFURE

32.066

Cl

CHLORE

35.453

Ar

ARGON

39.948

Kr

KRYPTON

83.798

Xe

XÉNON

131.293

Rn

RADON

(222)

U

URANIUM

238.02

Np

NEPTUNIUM

(237)

Pu

PLUTONIUM

(244)

Am

AMÉRICIUM

(243)

Cm

CURIUM

(247)

Bk

BERKÉLIUM

(247)

Cf

CALIFORNIUM

(251)

Es

EINSTEINIUM

(252)

Fm

FERMIUM

(257)

Md

MENDELÉVIUM

(258)

No

NOBELIUM

(259)

Lr

LAWRENCIUM

(262)

Figure (2) : Position de l'aluminium dans le tableau périodique des éléments [7].

1.1. Historique de l'aluminium

L'aluminium a été obtenu pour la première fois en 1854 sous forme de lingot par voie chimique [8]. Cette première méthode a été initiée par Hans Christian Oersted [9], puis développée par le chimiste français Sainte-Claire Deville, notamment lors d'une présentation à l'Académie des Sciences [10]. Cependant, ce n'est qu'en 1886 que la production de l'aluminium a connu un véritable essor, grâce à l'invention du procédé d'électrolyse par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis [11].

Par la suite, en 1888, Karl Josef Bayer a mis au point un procédé permettant l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite, par dissolution dans l'hydroxyde de sodium. L'oxyde

D'aluminium ainsi obtenu est ensuite utilisé dans les unités d'électrolyse, ou il est réduit afin de produire de l'aluminium primaire [12].



Charles Martin Hall



Paul Héroult

Figure 3: Les inventeurs de la procédure d'électrolyse de l'aluminium [13] .

En raison d'impuretés ou d'éléments additionnels, l'aluminium pur est rarement décelable, malgré sa présence abondante dans la nature.

L'aluminium se trouve dans divers minerais, comme : silicates, kaolin, micas, fluorures cryolithe, feldspaths et surtout d'hydroxydes [14].

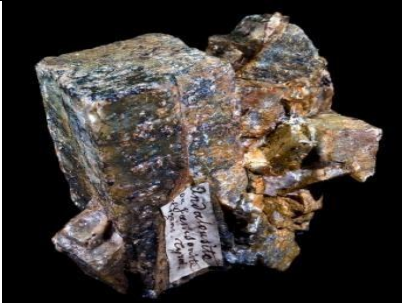
		
<i>Silicates</i>	<i>Kaolin</i>	<i>Mica</i>
		
<i>Fluorures cryolithe</i>	<i>Felds-paths</i>	<i>Hydroxides</i>

Figure 4 : minerais d'aluminium.

I.2. Les propriétés physiques

Les principales propriétés physiques de l'aluminium pur sont rassemblées dans le tableau [15] :

Propriétés	Valeur
Structure cristalline	cubique à face centrée
Paramètre de maille	0.405 nm à 25°C
Masse volumique	à 25°C: 2.698 g/cm ³
Point de fusion	660°C.
Température d'ébullition	2270°C.
Coefficient de dilatation moyen	entre 20 et 300°C: 2,55.10 ⁻⁵ /°C.
Conductivité thermique à 20 °C	$\lambda = 217.6$ W/m.K
Résistivité électrique à 20°C	$\rho = 2.63$ $\mu\Omega$ cm.
Module d'élasticité	68000 MPa
Limite d'élasticité (0,2%)	30 à 40 MPa

Tableau 1: Principales propriétés physiques de l'aluminium pur.

I.3. Les propriétés mécaniques

Propriétés	Valeur prescrite
Résistance traction (Résistance de la rupture) N/mm ²	≥ 325
Allongement a la rupture %	≥ 3

Tableau 2: Propriétés mécaniques de alliages l'aluminium

I.4. Les propriétés électriques

Propriétés	Valeur prescrite
Resistance Ω/km	3.474
Resistivity $\Omega \text{ mm}^2/\text{km}$	≤ 32.9
Conductivity	/

Tableau 3: Propriétés électriques de alliages l'aluminium.**I.5. Les alliages Al-Mg-Si****I.5.1. Les compositions chimiques**

Pour notre recherché, nous avons opté pour l'alliage d'aluminium Almélec 6101 qui appartient à la série 6000 (Al-Mg-Si). Ce mélange est couramment employé dans les dispositifs électriques, notamment pour la production de conducteurs, grâce à sa conductivité électrique efficace, sa résistance à la corrosion et son équilibre en termes de propriétés mécaniques.

Le tableau ci-dessous détaille ses caractéristiques prédominantes ainsi que sa composition chimique.

Propriété	Description
Désignation	AA 6101 (Almélec)
Famille	Alliage d'aluminium série 6xxx
Système	Al-Mg-Si
Composition principale	Al (Balance), Mg (0.35–0.80%), Si (0.30–0.70%)

Tableau 4: Fiche technique – Alliage Almélec 6101 (Al-Mg-Si).

I.5.2. Classification des alliages d'aluminium

On distingue deux principales catégories d'alliages d'aluminium : les alliages corroyés et les alliages destinés à la fonderie.

Les alliages corroyés sont façonnés mécaniquement par des techniques comme le laminage, l'extrusion, le forgeage, l'étirage ou encore le tréfilage.

Les alliages de fonderie, en ce qui les concerne sont réalisés par divers procédés tels que le moulage sous pression, le moule permanent, le moule à sable vert, le moule à sable chimiquement lié, la cire perdue, le moule en plâtre, le moulage sous vide ou basse pression et la coulée centrifuge [16].

I.5.3. Domaines d'application

On peut citer quelques types des alliages d'aluminium Al-Mg-Si de la série 6000, et leurs utilisations :



Figure 5: Alliage d'aluminium 6000 Applications dans l'industrie automobile et les panneaux de construction.



Figure 6:Alliage d'aluminium 6002 Applications dans l'industrie aéronautique et les barres cylindriques industrielles.



Figure 7:Alliage d'aluminium 6061
Applications dans les composants mécaniques les produits extrudés.



Figure 8:Alliage d'aluminium 6082 Applications dans les structures offshore et les profilés métalliques.



Figure 9:Alliage d'aluminium 6063 Applications dans les transports ferroviaires et les profilés architecturaux.

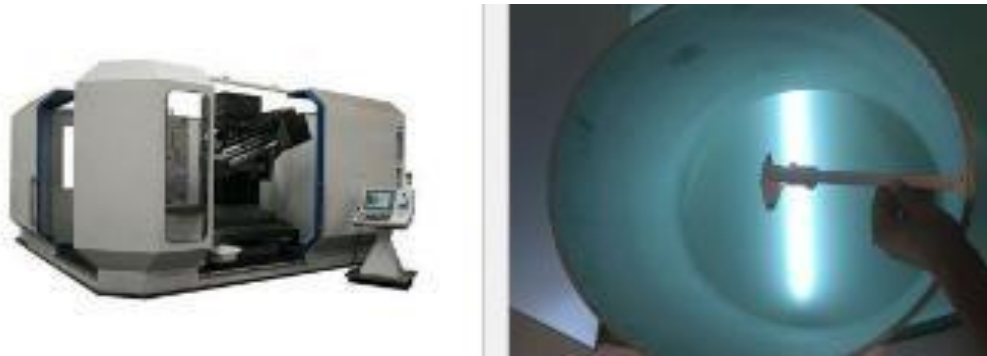


Figure 10:Alliage d'aluminium 6061 Applications dans les équipements industriels et médicaux.



Figure 11:Alliage d'aluminium 6082 Applications dans la construction navale et les tubes industriels

I.6 Phénomène de précipitation

Afin de réduire son énergie, tout système en déséquilibre réalise un réagencement atomique à travers la diffusion des atomes et des imperfections de structure pour parvenir à un état stable ou métastable [17]. La précipitation d'une solution sursaturée solide est une transformation à l'état solide qui entraîne une augmentation du nombre de phases. Elle se compose généralement d'une séparation de la solution sursaturée (la matrice mère) en deux nouvelles phases :

- La matrice appauvrie.
- La phase précipitée.
- La formation de Zones Guinier et Preston (zones G.P) caractérisée par l'apparition d'amas enrichis en atomes de soluté, marque le début de nouvelle phase dans une matrice sursaturée. Ces étapes accroissent la rigidité et le seuil d'élasticité du matériau [18]. Ce qui engendre une hétérogénéité structurelle dans le métal [19]. Guinier et Preston ont découvert ces zones en 1938 [20]. Ils ont démontré l'existence de zones saturées d'atomes dissous, qui forment de petits domaines cohérents avec la matrice. S'est-elle qui sont à l'origine du renforcement structurel du matériau [21].

I.6.1 Rôle de Mg_2Si

Dans les alliages Al-Mg-Si, le composé Mg_2Si est essentiel pour optimiser les caractéristiques du matériau. Au cours des procédés de chauffage, le magnésium (Mg) et le silicium (Si) s'unissent pour créer des précipités de Mg_2Si qui sont dispersés dans la matrice d'aluminium.

I.6.2 Influence de Mg_2Si sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si

Ces précipités influencent directement les attributs mécaniques de l'alliage. Quand ils sont fins et uniformément répartis, ils gênent le déplacement des dislocations, ce qui renforce la résistance mécanique.

Toutefois, si les précipités deviennent plus grossiers suite à une durée de traitement trop longue, la résistance pourrait se réduire.

De plus, la formation de précipités de Mg_2Si influence aussi les caractéristiques électriques. Effectivement, la diminution de la concentration des éléments en solution solide dans l'aluminium contribue à une conductivité électrique améliorée.

Par conséquent, contrôler la formation et la répartition des précipités Mg_2Si permet de modifier les caractéristiques mécaniques et électriques des alliages Al-Mg-Si selon les conditions du traitement thermique.

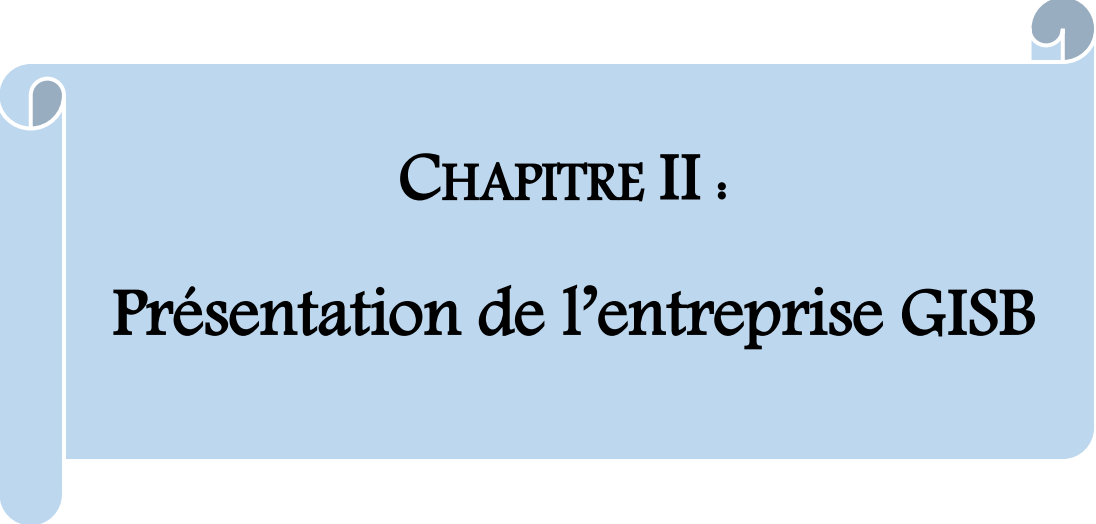
I.7 Conclusion

Les alliages Al-Mg-Si représentent une solution performante pour les applications électriques grâce à leur équilibre entre conductivité et résistance mécanique.

Les traitements thermiques jouent un rôle essentiel dans l'optimisation de ces propriétés notamment à travers la formation et l'évolution des précipités de Mg_2Si .

Un contrôle précis des paramètres de traitement en particulier le temps et la température permet d'obtenir une microstructure optimale garantissant ainsi de meilleures performances mécaniques et électriques.

Ainsi, l'optimisation de ces conditions constitue un enjeu majeur pour améliorer l'efficacité industrielle tout en réduisant la consommation énergétique.



CHAPITRE II :

Présentation de l'entreprise GISB

II.1 Introduction

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons réalisé un stage à l'entreprise GISB (Groupe Industriel Sidi Bendhiba) à Mostaganem. Cette expérience nous a permis de plonger dans le monde industriel et de suivre de près la fabrication des conducteurs électriques en aluminium, en mettant l'accent sur le traitement thermique.

II.2 Présentation générale de l'entreprise

GISB est un acteur clé du secteur énergétique algérien, spécialisé dans la production et la commercialisation de câbles électriques basse, moyenne et haute tension. L'entreprise respecte scrupuleusement les normes nationales et internationales, en misant sur la qualité, l'innovation et la satisfaction client [22].

II.3 Historique

La Câblerie Sidi Bendhiba (CSB), filiale de GISB, a vu le jour en 2009. Depuis, elle n'a cessé de progresser grâce à la modernisation de ses équipements et de ses procédés, afin de mieux répondre à la demande du marché [23].

II.4 Situation géographique

Implantée dans la zone industrielle de Mesra (wilaya de Mostaganem), GISB bénéficie d'une position stratégique près du port, ce qui facilite l'importation des matières premières et l'exportation des produits finis.



Figure 12: Localisation géométrique.

II.5 Activités principales

GISB fabrique une gamme variée de câbles et conducteurs :

- Câbles domestiques et industriels.
- Câbles de commande.
- Conducteurs en aluminium et cuivre.
- Alliages AAAC (Al-Mg-Si) pour lignes aériennes [24].

II.6 Procédé de fabrication

La production suit plusieurs étapes clés :

II.6.1 Tréfilage

Les barres d'aluminium sont réduites en fils fins via des filières progressives jusqu'au diamètre requis [25].

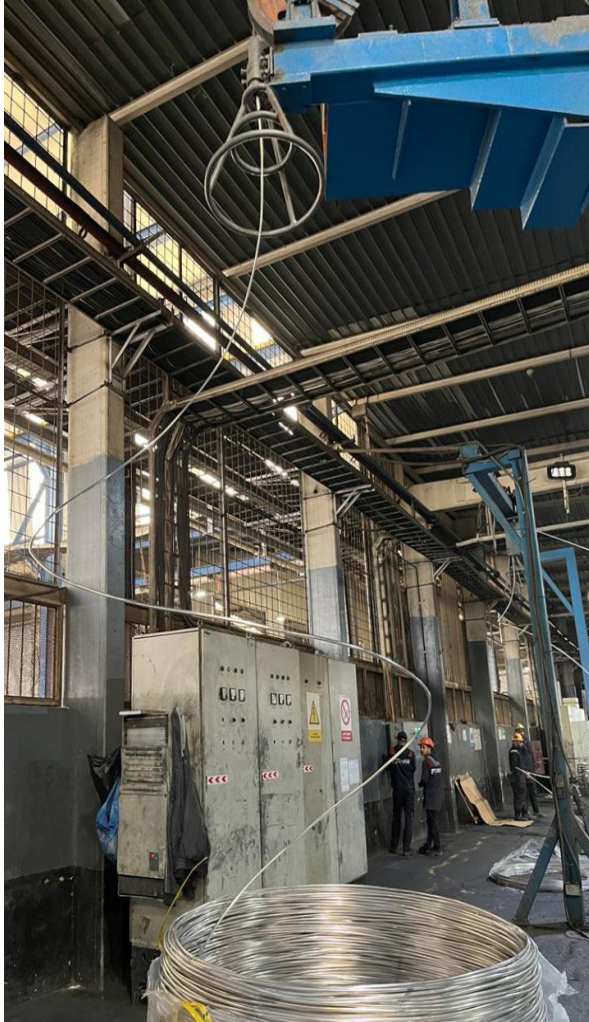


Figure 14: Matière première

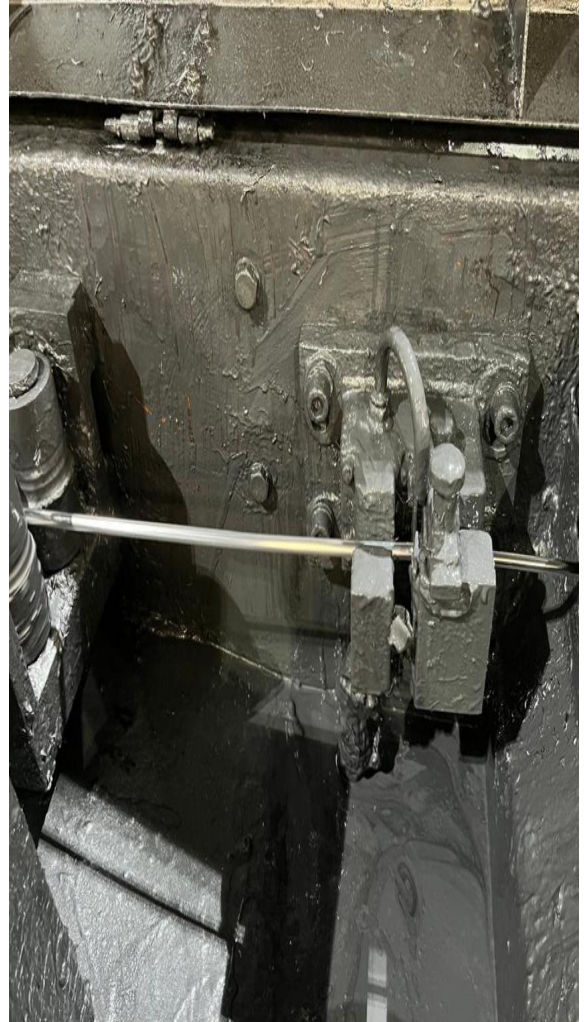


Figure 13: Tréfilage

II.6.2 Câblage

Les fils sont torsadés pour former le conducteur, avec un pas et un sens précis.



Figure 15 : Câblage

II.6.3 Isolation

Un isolant est appliqué pour prévenir les pertes et assurer la sécurité.

II.6.4 Assemblage et gainage

Les ensembles sont gainés afin de renforcer la résistance mécanique.

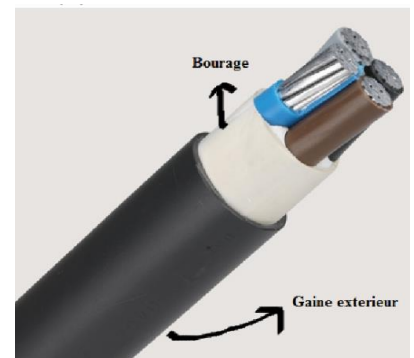


Figure 15

II.7 Traitement thermique dans l'entreprise

Durant notre stage, nous avons observé le vieillissement artificiel des conducteurs AAAC dans un four industriel. Jusqu'à 24 bobines (réparties en phases A, B et C) y sont traitées à température et durée contrôlées, en mode continu ou discontinu selon les besoins de production et les tests qualité (traction, conductivité, allongement). Ce procédé optimise les propriétés mécaniques sans altérer la conductivité [26].

II.7.1 Objectif du traitement thermique

Le traitement thermique vise à modifier la microstructure des métaux, permettant ainsi un contrôle précis de leurs propriétés chimiques et mécaniques. Après l'opération de tréfilage, le métal perd certaines de ses propriétés essentielles, ce qui conduit à recourir à ce traitement pour les ajuster et les restaurer, parmi les plus importantes figurent : l'amélioration de la dureté,

L'optimisation de l'usinabilité, l'augmentation de la résistance de la transaction, l'allongement et la modification des propriétés électriques telles que la conductivité, la résistivité.

II.8 Contrôle qualité

Le contrôle est omniprésent : des essais de traction (résistance mécanique), ainsi que des mesures de conductivité et d'allongement sont réalisés au laboratoire afin de valider la conformité des produits avant expédition [27].



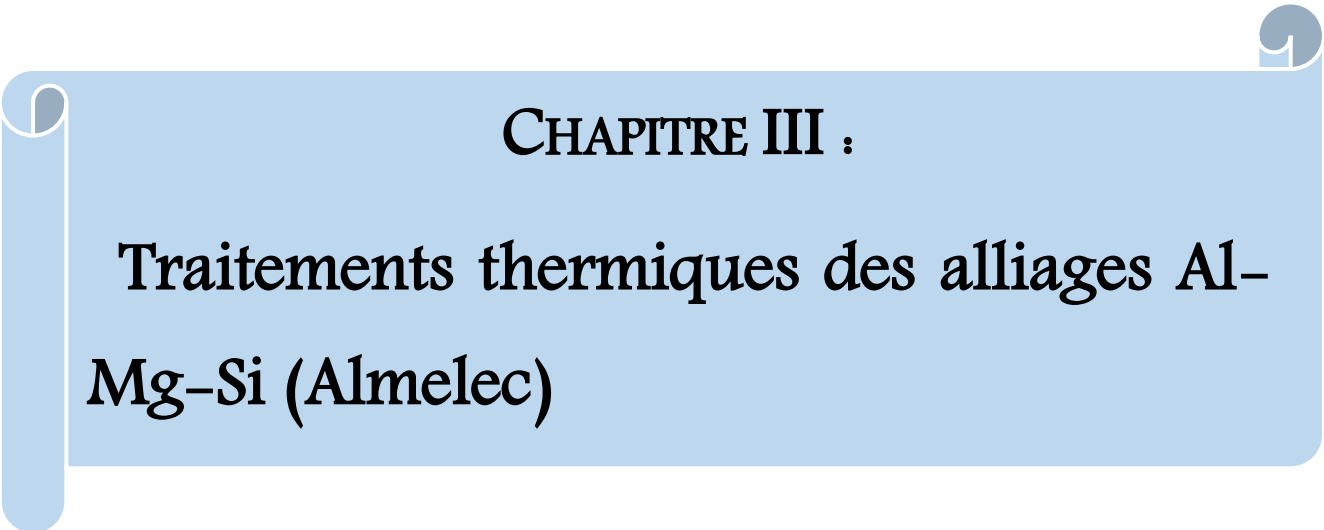
Figure 16: Machine d'essai de torsion.



Figure 17: Appareil de Traction Mécanique (JBA).

II.9 Conclusion

Ce chapitre dresse le portrait de GISB, de ses activités et de ses processus. Notre stage nous a permis de comprendre l'importance cruciale du traitement thermique et du contrôle qualité dans la fabrication de conducteurs performants.



CHAPITRE III :

Traitements thermiques des alliages Al-Mg-Si (Almelec)

III. 1. Traitements thermiques

La résistance et la dureté de certains alliages d'aluminium peuvent être améliorées par l'application d'une série de traitement thermique appelée durcissement structural. Ce procédé conduit à la formation de très fines particules, appelées précipités, correspondant à une seconde phase uniformément dispersée dans la matrice initiale [28].

Le durcissement structural s'effectue en trois étapes principales :

- ✓ La mise en solution.
- ✓ La trempe.
- ✓ Le vieillissement.

III.2 La mise en solution

La mise en solution est une étape essentielle dans le durcissement par précipitation. Elle consiste à dissoudre la plus grande quantité possible des éléments d'alliage (comme le Cu ; Mg ; Si ou Zn) dans la matrice afin de former une solution solide homogène.

Pour cela, l'alliage est chauffé à une température élevée pendant un temps suffisant, ce qui permet aux éléments de se répartir uniformément dans la structure. Cette homogénéité est nécessaire pour favoriser ensuite le durcissement par précipitation.

En général, les températures de mise en solution se situent entre 450°C et 500°C pour l'aluminium, et peuvent aller de 450°C à 590 °C pour ses alliages [29].

III.3 La trempe

La trempe est une étape indispensable dans le traitement thermique. Elle consiste à refroidir rapidement la solution solide obtenue après la mise en solution, afin d'empêcher la formation précipitée intermétalliques stables. Cette opération est très rapide et ne dure que peu de temps.

Le refroidissement peut être réalisé à l'aide de différents milieux, comme l'eau, l'air, l'huile ou même des métaux en fusion, selon les conditions souhaitées. L'objectif principal est d'éviter la formation de la phase d'équilibre Mg_2Si pendant le refroidissement, et de conserver la solution solide obtenue précédemment.

Grâce à ce refroidissement rapide (environ $260^{\circ}\text{C}/\text{s}$) jusqu'à une température proche de l'ambiante, on obtient finalement une solution solide sursaturée en éléments d'alliage, contenant également un grand nombre de lacunes [30].

III.4. Le vieillissement

Après près la mise en solution et la trempe, le durcissement par précipitation se termine par une étape de vieillissement, qui peut se faire soit naturellement à température ambiante, soit artificiellement à une température contrôlée.

Dans de nombreux alliages, une précipitation suffisante se produit déjà à température ambiante quelques jours après la trempe, ce qui permet d'obtenir des propriétés mécaniques adaptées à plusieurs applications [31].

III.4.1 Vieillissement naturel

Après un traitement thermique, les alliages continuent d'évoluer une fois revenus à température ambiante. Ce phénomène est appelé vieillissement naturel. La vitesse de ce processus dépend du type d'alliage.

Par exemple, certains alliages de la série 6000 durcissent progressivement et peuvent atteindre leur dureté maximale après environ un mois à température ambiante [32].

III.4.2 Vieillissement artificiel

Le vieillissement artificiel consiste à chauffer le matériau à une température supérieure à la température ambiante, puis à le maintenir pendant une durée déterminée en fonction des propriétés recherchées et du type d'alliage.

À cette température, la précipitation est accélérée, ce qui entraîne une augmentation de la dureté, généralement plus importante que lors du vieillissement naturel. Pour les alliages de la série 6000, ce traitement est réalisé entre 100°C et 240°C .

Au cours du maintien à température constante, la dureté augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale après un certain temps [33].

III.5 Paramètres influents

Les traitements thermiques des alliages Al- Mg-Si dépendent étroitement de quelques paramètres clés, comme la température, le temps et la vitesse de refroidissement. Ces éléments guident l'évolution de la microstructure et fixent les performances finales du matériau.

III.5.1 Influence du la température

La température joue un rôle central dans ces traitements. Lorsque on porte l'alliage à haute température afin de dissoudre les précipités dans la matrice d'aluminium. Une température trop basse laisse les phases Mg_2Si partiellement intactes, ce qui limite l'effet du traitement ce qui entraîne une diminution de la conductivité électrique. À l'inverse, une surchauffe altère la structure et affaiblit les propriétés mécaniques. Lors du vieillissement artificiel, une température plus élevée stimule la formation des précipités responsables du durcissement. Mais si elle est excessive, elle mène au sur-vieillissement, avec des précipités plus gros et moins performants pour renforcer l'alliage [34].

III.5.2 Influence du temps

Le temps de maintien joue aussi un rôle dans les résultats du traitement. Si la durée est trop courte en traitement thermique, les éléments d'alliage ne se dissolvent pas complètement. Par contre, si c'est trop long, les grains grossissent et la résistance mécanique chute. Pendant le vieillissement, le temps gère la taille et la répartition des précipités. Un timing optimal booste la dureté et la résistance grâce à des précipités fins et bien répartis. Mais si ça traîne trop, on tombe dans le sur-vieillissement et les propriétés mécaniques baissent [35].

III.6 Influence du traitement thermique**III.6.1 Influence sur les propriétés mécaniques**

Après le traitement thermique, le magnésium et le silicium restent dissous dans la matrice aluminium en solution solide sursaturée. Pendant le vieillissement, ils précipitent en fines particules qui bloquent les dislocations. Ça augmente fortement la dureté, la résistance mécanique. Le T6 est super courant car il équilibre bien résistance et ductilité. Mais si température ou temps de vieillissement sont trop poussés, les précipités grossissent et perdent en efficacité – c'est le sur- vieillissement, qui fait chuter dureté et résistance [38]

III.6.2 Influence sur les propriétés électriques

Les traitements thermiques influencent également la conductivité électrique des alliages Al-Mg-Si. Après la trempe, la conductivité électrique est relativement faible à cause de la présence des atomes de magnésium et de silicium dissous dans la matrice d'aluminium. Au cours du vieillissement, ces éléments forment progressivement des précipités Mg_2Si , ce qui réduit la concentration des atomes dissous dans la matrice et améliore la conductivité électrique. Ainsi, les alliages Al-Mg-Si présentent un bon équilibre entre résistance mécanique et conductivité électrique, ce qui favorise leur utilisation dans les domaines du transport d'énergie et des constructions mécaniques [37.40].

III.7 Conclusion

Les alliages Al-Mg-Si tiennent une place clé dans de nombreux secteurs industriels, grâce à leur faible densité, leur résistance à la corrosion et leurs solides propriétés mécaniques. Les traitements thermiques mise en solution, trempe et vieillissement boostent vraiment leurs performances globales. Les paramètres comme la température et le temps pilotent directement la formation des précipités et les propriétés finales. Un bon réglage permet une microstructure homogène, avec des gains en résistance mécanique et en conductivité électrique. Ces alliages brillent en automobile, aéronautique et transport électrique, grâce à leur équilibre mécanique et leur légèreté remarquable [35.41].

CHAPITRE IV :
Partie Expérimentale

IV.1 Introduction

Les alliages d'aluminium Al-Mg-Si sont très utilisés dans les domaines industriels grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques, leur légèreté et leur bonne conductivité électrique. L'alliage almélec fait partie des matériaux les plus utilisés pour la fabrication des conducteurs électriques.

Au cours de l'opération de tréfilage, l'alliage subit une importante déformation qui provoque une modification de certaines propriétés mécaniques et électriques. Afin de restaurer et d'améliorer les caractéristiques du matériau après cette opération, un traitement thermique est appliqué.

Dans l'industrie, le traitement thermique de référence est généralement effectué à une température de 165°C pendant 6h30. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de travailler avec des températures légèrement inférieures avec des temps de maintien plus longs afin d'observer leur influence sur les propriétés mécaniques et électriques de l'alliage étudié.

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale réalisée sur l'alliage Al-Mg-Si pour étudier l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques et électriques. Pour cela, plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés, tels que l'essai de traction, la mesure de l'allongement ainsi que l'étude des propriétés électriques comme la résistance, la résistivité et la conductivité électrique. Les résultats obtenus seront analysés et comparés afin d'évaluer l'effet des différentes conditions de traitement thermique sur l'alliage étudié.

IV.2 Matériau étudié

La matière première utilisée dans cette étude, est le fil machine en alliage d'aluminium (almélec), fourni par l'entreprise CABEL ÉLECTRIQUE. Ce fil est destiné à la fabrication de câbles électriques utilisés dans le transport de l'énergie électrique. Il est obtenu par coulée à partir d'un alliage d'aluminium de haute qualité, élaboré grâce à une technologie de pointe.



Figure 18: Fil machine étudié.



Figure 20: Câble de matière étudiée.



Figure 19: Appareil de diamètre de la matière étudiée.



Figure 21: Millihommètre pour mesurer la résistance électrique.



Figure 22: Spectrometer pour analyse chimique de matériaux.

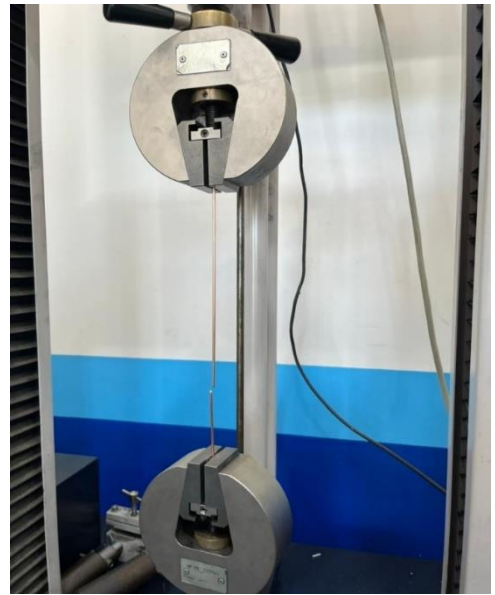


Figure 23: Appareil de traction.



Figure 24: Le four.

IV.3 État initial avant traitement thermique

Préalablement aux essais expérimentaux, les conducteurs en alliage employés dans cette étude ont été fabriqués et tréfilés conformément aux conditions industrielles standardisées au sein de l'entreprise GISB.

L'état initial correspond à la configuration standard adoptée en usine, antérieure à toute modification des paramètres expérimentaux. Les conducteurs ont ainsi subi un traitement thermique à une température de 165°C pendant une durée de 6h30 min.

Cette condition a été retenue comme état de référence afin d'évaluer l'impact des variations de température et de durée sur les propriétés mécaniques et électriques de l'alliage.

IV.4 Condition expérimentales**IV.4.1 Traitement thermique de référence (T= 165°C / 6h30)**

Au sein de l'établissement GISB, le traitement thermique de référence constitue un vieillissement artificiel réalisé à une température de 165°C pendant 6 heures et 30 minutes. Cette opération s'effectue dans un four industriel, où les conducteurs sont disposés sous forme de bobines, distribuées de manière organisée en fonction des étapes de production. Elle vise à établir un équilibre optimal entre les propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction, et les propriétés électriques, notamment la conductivité. À l'issue de ce traitement, des essais de contrôle qualité sont conduits, incluant le test de traction, la mesure de la conductivité et de l'allongement. Cet état sert de référence pour évaluer l'impact des variations de température et de durée de traitement sur les propriétés de l'alliage.

IV.4.2 Conditions testées (165°C, 163°C, 160°C) et les durées (6h30, 6h45, 7h00)

Le tableau suivant regroupe les différentes conditions utilisées et les valeurs mesurées avant et après traitement thermique

Temps Température	6h30 min			6h45 min			7h00 min		
	R	Tr	A	R	Tr	A	R	Tr	A
165°C	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant
	34,38	312	6,5	34,73	317	5,4	34,65	322	5,7
	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après
	32,16	364	8,2	31,66	331	7,1	31,05	319	8,3
163°C	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant
	34,51	313	6,00	33,89	319	5,6	34,21	321	5,1
	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après
	32,88	344	7,3	32,67	351	6,8	32,10	358	7,2
160°C	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant	Avant
	35,09	310	5,1	34,63	323	5,7	34,36	314	6,00
	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après	Après
	33,09	320	6,2	32,92	329	7,1	32,71	335	8,00

Tableau 5: Conditions testées et résultats.

R : Résistivité $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$

Tr : Traction N/mm^2

A : Allongement %

IV.4.3 Tests réalisés

Après avoir réalisé les différents traitements thermiques en faisant varier la température et le temps de maintien, les échantillons ont été retirés du four puis soumis à un contrôle de qualité par essai de résistivité et traction et allongement. Chaque éprouvette a donné une valeur différente selon les conditions du traitement thermique appliqué

Essai	Unité de mesure	Valeur prescrite
Aspect visuel	-	Lisses sans bavures
Nombre de fils	-	61
Diamètre de fil	mm	$3,45 \pm 1\%$
Résistivité à 20 °C	($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)	$\leq 32,9$
Allongement à la rupture	%	≥ 3
Résistance à la rupture	N/mm ²	≥ 325

Tableau 6: les Norme des essais.

IV.4.3.1 Essai de Résistivité :

L'objectif principal de cet essai est d'obtenir une résistivité électrique inférieure ou égale à 32,9 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ($\leq 32,9$).

La loi est :

$$R = S \cdot r \dots (1)$$

$$S = \left(\frac{d}{2}\right)^2 * \Pi \dots (2)$$

$$S = \left(\frac{d^2}{4}\right) * \Pi \dots (3)$$

R : la Résistivité ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)

S : la section (mm^2)

r : la résistance (Ω/km)

$$\Pi = 3,14$$

IV.4.3.2 Essai de Allongement

L'essai d'allongement a pour objectif d'évaluer la capacité du matériau à se déformer avant la rupture. Cet essai permet de connaître le comportement mécanique de l'alliage ainsi que sa ductilité après les traitements effectués. Dans notre étude, la valeur de l'allongement doit être

Supérieure ou égale à 3 % (≥ 3), afin de respecter les exigences de qualité demandées. La mesure de l'allongement est obtenue à l'aide d'un appareil d'essai de traction, qui nous donne directement la valeur correspondante après la rupture.

IV.4.3.3 Essai de Traction

Dans notre étude, la résistance à la traction doit être supérieure ou égale à 325 N/mm² (≥ 325) afin de satisfaire les exigences de qualité demandées. Cette valeur est calculée à l'aide de la relation suivant :

$$\delta = \frac{F}{S} \dots \dots (4)$$

F : la force (N).

S : la section (mm²)

IV.5. Représentation graphique

IV.5.1 La résistivité

Les résultats de mesure de la résistivité (R) sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Temps Température	R (Ω.mm²/Km)		
	6h30 min	6h45 min	7h00 min
165°C	32,16	31,66	31,05
163°C	32,88	32,67	32,10
160°C	33,09	32,92	32,71

Tableau 7: Les Essais de La Résistivité R (Ω.mm²/Km).

La figure 25 représente les courbes de variation de la résistivité (R) en fonction du temps et à différentes températures.

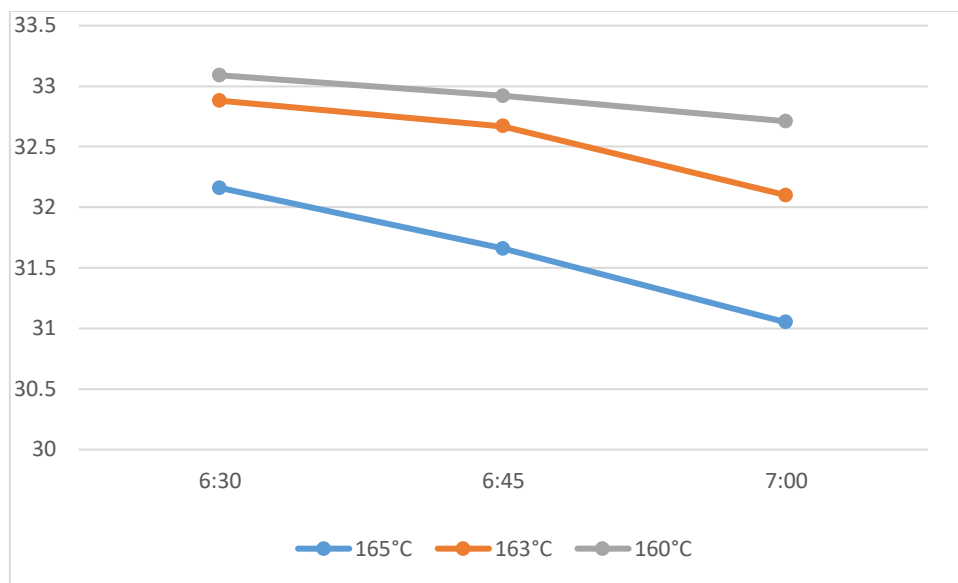


Figure 25: Courbe de variation de la résistivité $R=f(t)$.

Observation

Toutes les valeurs du tableau sont conformes à la norme $R \leq 32.9$ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$), à l'exception des valeurs :

- $T = 160^\circ\text{C}$ à $t = 6\text{h}30 \text{ min}$ $R = 33.09 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km} > 32.9 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.
- $T = 160^\circ\text{C}$ à $t = 6\text{h}45 \text{ min}$ $R = 32.92 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km} > 32.9 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.

IV.5.2 Allongement

Les résultats de mesure de l'allongement sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Temps Température	Allongement		
	6h30 min	6h45 min	7h00 min
165°C	8,2	7,1	8,3
163°C	7,3	6,8	7,2
160°C	6,2	7,1	8,00

Tableau 8: Essais de L'allongement.

La figure 26 représente les courbes de variation de l'allongement en fonction du temps et à différentes températures.

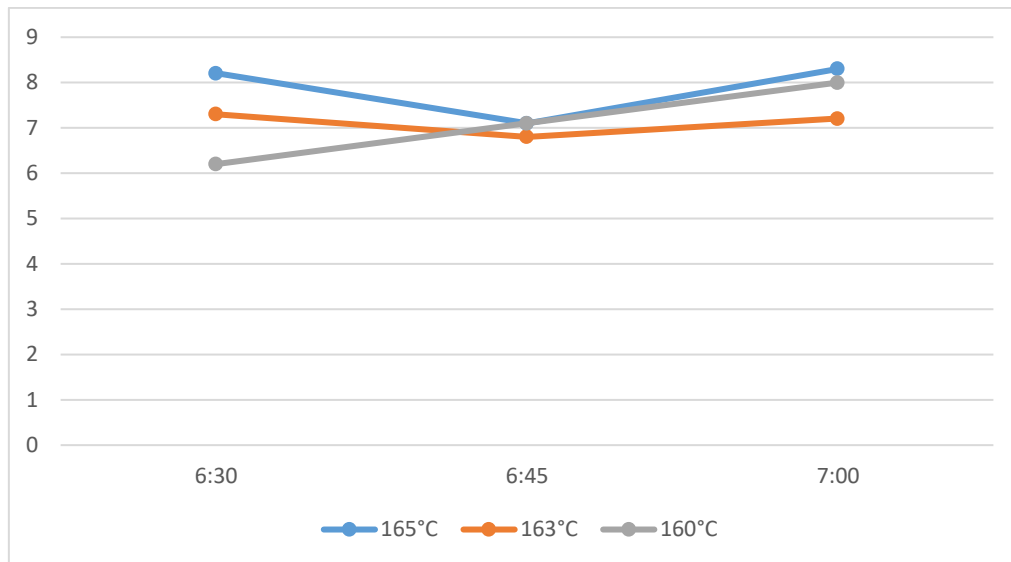


Figure 26: Courbe de variation d'allongement $A=f(t)$.

Observation

Toutes les valeurs du tableau sont conformes à la norme $A \geq 3\%$

IV.5.3 Traction

Les résultats de mesure de la traction sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Temps Température	Traction		
	6h30 min	6h45 min	7h00 min
165°C	364	331	319
163°C	344	351	358
160°C	320	329	335

Tableau 9: Essais de traction.

La figure 27 représente les courbes de variation de la traction en fonction du temps et à différentes températures.

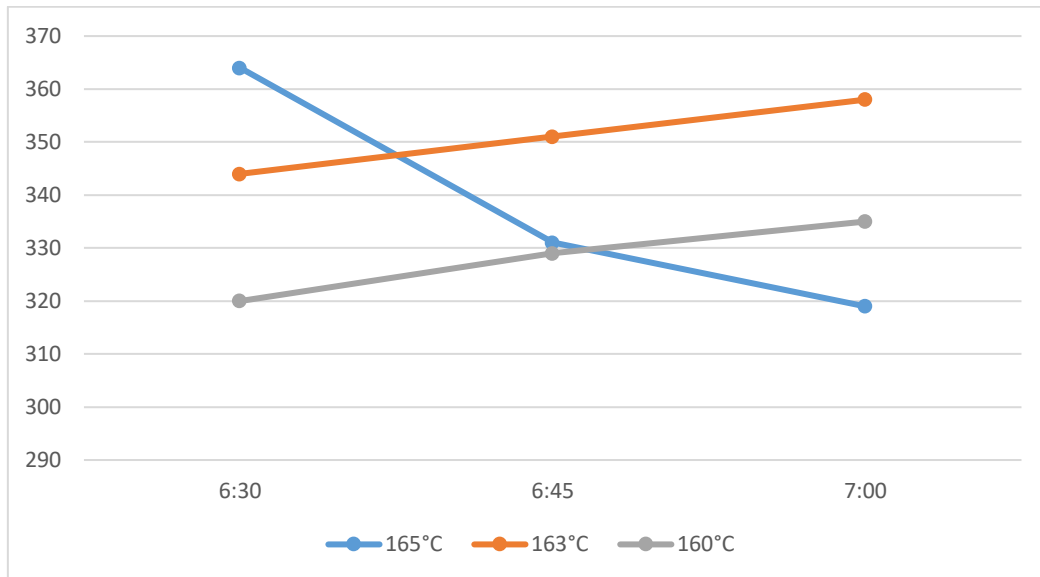


Figure 27: Courbe de variation de traction $Tr=f(t)$.

Observation

Toutes les valeurs du tableau respectent à la norme $Tr \geq 325$ (N/mm²), sauf les deux valeurs suivantes :

- $T = 160^{\circ}\text{C}$ à $t = 6\text{h}30$ min $Tr = 320 \text{ N/mm}^2 < 325 \text{ N/mm}^2$
- $T = 165^{\circ}\text{C}$ à $t = 7\text{h}00$ min $Tr = 319 \text{ N/mm}^2 < 325 \text{ N/mm}^2$

IV.6 Discussion des résultats

D'après les observations du tableau, on constate que toutes les valeurs sont acceptables, à l'exception des valeurs suivantes :

- $T = 160^{\circ}\text{C}$ à $t = 6\text{h}30$ min ($R = 33.09 \Omega.\text{mm}^2/\text{km}$).
- $T = 160^{\circ}\text{C}$ à $t = 6 \text{ h}45$ min ($R = 32.92 \Omega.\text{mm}^2/\text{km}$).
- $T = 160^{\circ}\text{C}$ à $t = 6\text{h}30$ min ($Tr = 320 \text{ N/mm}^2$).
- $T = 165^{\circ}\text{C}$ à $t = 7\text{h}00$ min ($Tr = 319 \text{ N/mm}^2$).

Concernant les essais d'un fil. En ce qui concerne les essais du câble, les valeurs (**163°C \6:45 min**) et (**160°C \7h00min**) sont les plus appropriées et offrent les meilleures performances en termes de qualité et d'efficacité. La valeur (**163°C \6h45 min**) est particulièrement recommandée, car elle est la plus proche de l'état de référence (**165°C \6h30min**) tout en étant la moins consommatrice de temps et d'énergie.

Les figures 28, 29 et 30 montrent les histogrammes de la variation de la résistivité, l'allongement et la traction, respectivement, en fonction du temps de traitement et à différentes températures.

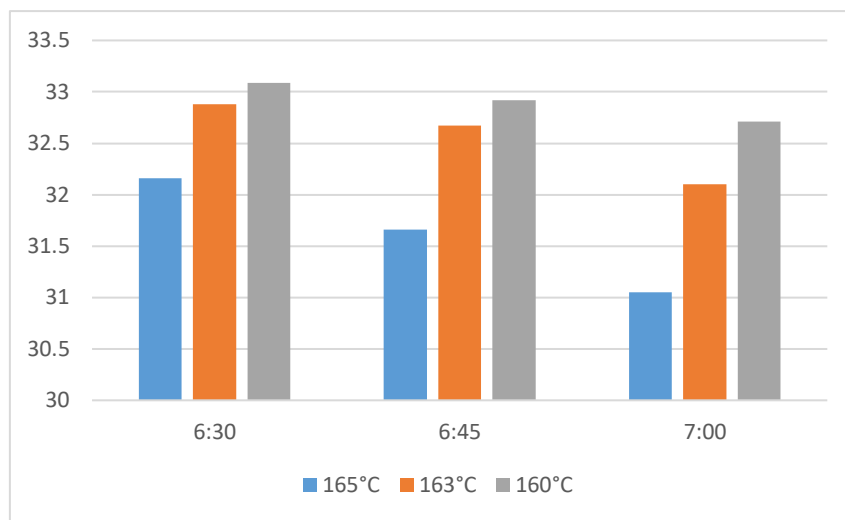


Figure 28: Colonne de la comparaison des résultats de la résistivité.

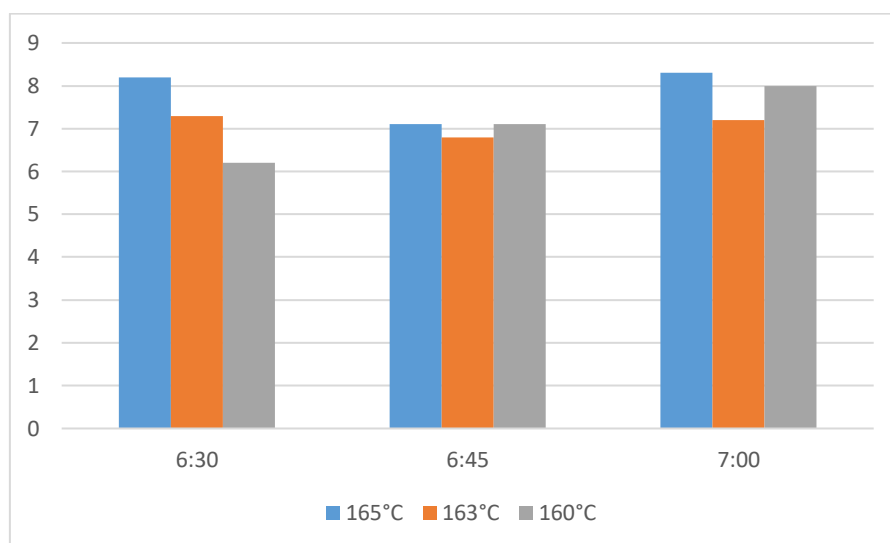


Figure 29: Colonne de la comparaison des résultats d'allongement.

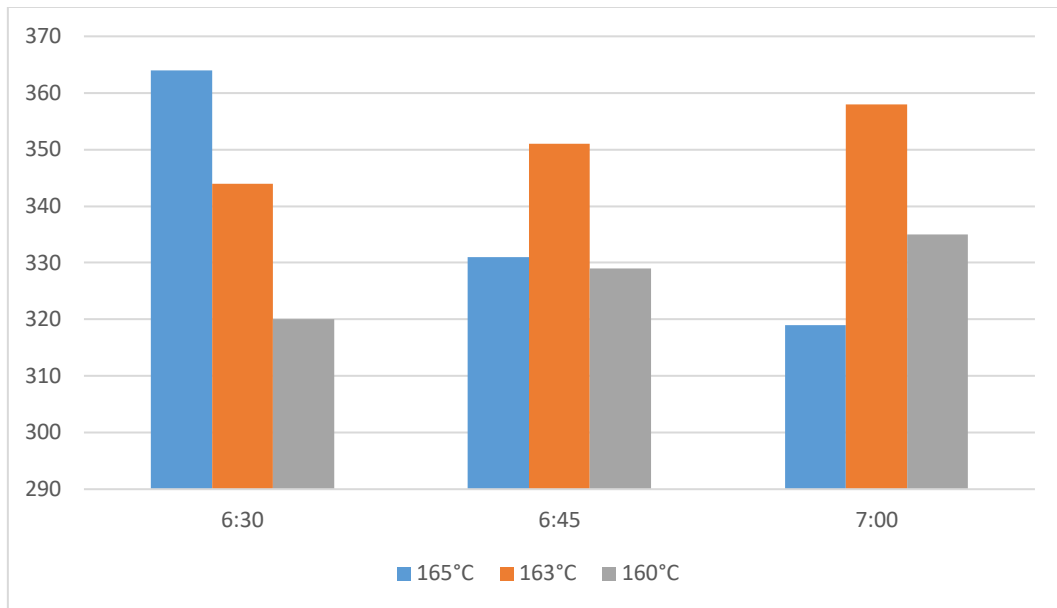


Figure 30: Colonne de la comparaison des résultats de traction.

Conclusion

L'analyse des histogrammes montre que les conditions de traitement thermique influencent directement les propriétés mécaniques et électriques de l'alliage Al-Mg-Si. Parmi les conditions étudiées, le traitement à 163°C pendant 6h45 min présente les résultats les plus proches de l'état de référence (165°C pendant 6h30 min) tout en respectant les exigences de qualité. Cette condition assure un bon équilibre entre la résistivité, l'allongement et la résistance à la traction, avec une réduction de la température de traitement, ce qui permet une diminution énergétique et une meilleure optimisation du procédé industriel.

A blue horizontal scroll with a black outline and rounded ends. The scroll is unrolled, showing the text "Conclusion générale" in the center. The left and right edges of the scroll have a small circular detail indicating the binding or the edge of the scroll.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur l'influence des paramètres du traitement thermique, notamment la température et le temps de maintien, sur les propriétés mécaniques et électriques des alliages d'aluminium Si-Al-Mg utilisés dans la fabrication des conducteurs électriques. L'objectif principal était d'évaluer l'effet combiné de ces paramètres afin d'identifier des conditions optimales permettant d'améliorer les performances du matériau tout en réduisant la consommation énergétique et le temps de traitement.

L'étude bibliographique a montré que les alliages Al-Mg-Si de la série 6000 présentent un compromis intéressant entre la conductivité électrique, la résistance mécanique et la résistance à la corrosion. Les propriétés de ces alliages sont fortement influencées par les traitements thermiques, notamment par les phénomènes de précipitation des phases Mg_2Si qui jouent un rôle essentiel dans le renforcement structural du matériau.

Le stage effectué au sein de l'entreprise GISB a permis de mieux comprendre les procédés industriels appliqués à la fabrication des conducteurs électriques ainsi que l'importance des traitements thermiques dans l'amélioration des caractéristiques finales des produits. Cette expérience a également permis d'observer les techniques de contrôle qualité utilisées pour garantir la conformité des conducteurs fabriqués.

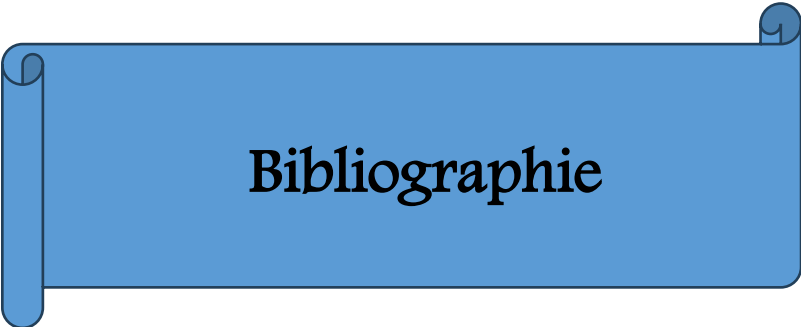
L'étude expérimentale a permis d'analyser l'influence de différentes températures (165°C, 163°C et 160°C) et durées de maintien (6h30, 6h45 et 7h00) sur la résistivité électrique, la résistance à la traction et l'allongement. Les résultats obtenus montrent que certaines conditions expérimentales conduisent à une amélioration des propriétés étudiées tandis que d'autres ne répondent pas aux exigences industrielles fixées.

Les résultats ont montré que les conditions de traitement thermique (163°C pendant 6h45 min) et (160°C pendant 7h00 min) offrent des performances satisfaisantes. Toutefois, la condition (163°C pendant 6h45 min) apparaît comme la plus avantageuse puisqu'elle fournit des résultats proches de l'état de référence (165°C pendant 6h30 min) tout en permettant une réduction de la température de traitement et, par conséquent, une diminution de la consommation énergétique.

Ainsi, cette étude confirme que l'optimisation des paramètres de traitement thermique constitue un moyen efficace d'améliorer les propriétés des alliages Al-Mg-Si et d'augmenter la productivité industrielle tout en réduisant les coûts énergétiques. Comme perspective future,

Conclusion générale

Cette étude pourrait être élargie vers le développement d'un outil intelligent destiné à l'optimisation des traitements thermiques dans l'industrie. À travers la collecte d'une base de données plus importante issue des résultats de contrôle qualité (résistivité, traction et allongement), il serait possible de développer un modèle prédictif capable de déterminer automatiquement les conditions optimales de traitement thermique (température et temps de maintien). Une telle approche pourrait évoluer vers une application industrielle ou une startup innovante intégrant des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique afin d'améliorer la qualité des produits, réduire les coûts énergétiques et optimiser la productivité.



Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

[1] M. Bayarassou : Effet des traitements de vieillissement sur l'évolution de la structure et les propriétés mécaniques des fils en alliages d'aluminium (AGS) tréfilés à L'ENICAB. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2018).

[2] F. Serradj : Etude de la cinétique de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si contenant différentes teneurs des éléments d'additions. Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, (2014).

[3] M. LOÏC Oger : Corrosion sous contrainte et fragilisation par l'hydrogène d'alliages d'aluminium de la série 7xxx (Al-Zn-Mg): identification des paramètres microstructuraux critiques pilotant l'endommagement à l'échelle locale. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Toulouse, (2017).

[4] F. Z. Lemmadi : Caractérisations des alliages à base d'aluminium et étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2014)

[5] A. Fleury : Conception en fatigue de joints soudés par friction malaxages dans les tabliers de pont en aluminium. Université de Québec, Chitoumi, (2020).

[6] A. Ourabi : Etude du comportement des fils de cuivre et des fils d'alliage d'aluminium déformés industriellement. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, (2017).

[7] <https://www.montremoicoment.com/scolaire/comment-apprendre-le-tableau-periodique-des-elements.html>

[8] M. Bayarassou : Effet des traitements de vieillissement sur l'évolution de la structure et les propriétés mécaniques des fils en alliages d'aluminium (AGS) tréfilés à L'ENICAB. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2018).

[9] A. Cochard : Microstructures et propriétés mécaniques des alliages de type Duralumin du Breguet 765 n°504 64-PH : Approche historique et sciences des matériaux. Thèse de doctorat, université de Toulouse, Toulouse. (2016)

[10] F. Z. Lemmadi : Caractérisations des alliages à base d'aluminium et étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2014).

Bibliographie

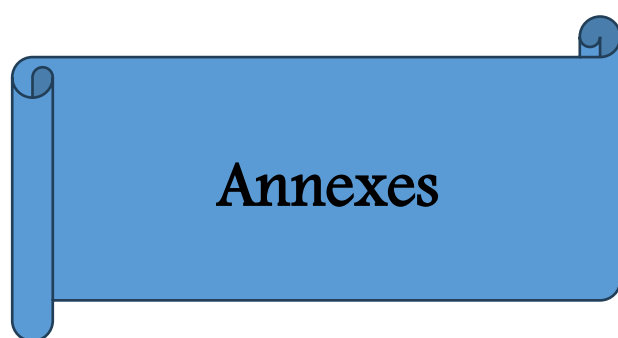
- [11] A. Tireira : Endommagement dans les alliages AlSi12 pour moteurs automobiles : Observations in situ et modélisation micromécanique. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, (2015).
- [12] A. Fleury : Conception en fatigue de joints soudés par friction malaxages dans les tabliers de pont en aluminium. Université de Québec, Chitoumi, (2020).
- [13] <https://sites.google.com/site/productiondelaluminium/ii-extraction-de-l-alumine-et-de-l-aluminium/b-extraction-de-l-aluminium?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [14] G. Hartmann : L'aluminium historique. Fichier pdf. www.hydroretro.net/etudegh/aluminium_historique.pdf (2014).
- [15] H.Fareh : Etude de l'évolution de la microstructure et des propriétés thermomécaniques d'une série d'alliage d'aluminium. Thèse de doctorat, Université de Larbi Ben M'hidi , Oum El Bouaghi, (2012).
- [16] D. Gagnon : Effets des paramètres métallurgiques sur la microstructure, la macrostructure et la performance des alliages 319, 356 et 413, Mémoire de la maîtrise en Ingénierie, Université du Québec, (2005).
- [17] K. Djabri : Etude de l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si contenant différentes teneurs des éléments d'additions. Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, (2016).
- [18] W. Kurz, J. P. Mercier et G. Zambelli : Introduction à la science des matériaux, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1995) 254.
- [19] M. Boufenghour : Effet de l'addition du bismuth sur la précipitation discontinue de l'alliage Cu 15 % mass. Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine (2001).
- [20] G.D. Preston, A. Guinier nature: Structure of Age-Hardened Aluminium-Copper Alloys. 142 (1938) 570.
- [21] S. Bourahla : Influence du recuit sur la recristallisation de l'alliage Al-Li. Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, (2007).
- [22] officiel GISB, "Présentation de l'entreprise", consulté en 2023. Disponible sur: www.gisb.dz.

Bibliographie

- [23] Rapport annuel GISB, 2022, p. 5-10.
- [24] IEC 61089, "Conducteurs pour lignes aériennes", International Electrotechnical Commission, 2014.
- [25] Davis, J.R., Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993, chap. 5 (Tréfilage des alliages Al-Mg-Si).
- [26] Totten, G.E., Heat Treatment of Aluminum Alloys, ASM Handbook Vol. 4B, 2010, p. 345-360 (Vieillissement artificiel des AAAC).
- [27] Norme NF EN 50182, "Conducteurs en aluminium pour lignes aériennes", AFNOR, 2010 (Essais mécares et électriques).
- [28] ASM International. (1999). Traitement thermique des alliages d'aluminium. Manuel ASM, Volume 4B. Materials Park, OH: ASM International.
- [29] Polmear, I.J. (2006). Alliages légers : Des alliages traditionnels aux nanocristaux (4ème éd.). Oxford: Butterworth- Heinemann.
- [30] Totten, G.E. & MacKenzie, D.S. (2003). Traitement thermique de l'aluminium. In: Manuel de l'aluminium: Volume 1- Métallurgie physique et processus. New York: Marcel Dekker.
- [31] Marthinsen, K. & Nes, E. (2001). Fondements du recuit et de la précipitation dans les alliages Al-Mg-Si. Progress in Materials Science, 46(2), pp. 165-201.
- [32] Rangarajan, V. & Van Tyne, C.J. (2007). Durcissement par précipitation des alliages Al-Mg-Si. Journal of Materials Engineering and Performance, 16(3), pp. 342-349.
- [33] Zhou, M. & Bian, X. (2005). Comportement au vieillissement des alliages Al-Mg-Si. Materials Science and Engineering: A, 398(1-2), pp. 132-139.
- [34] Gao, M. & Peng, L. (2008). Effet du traitement thermique sur la conductivité électrique des alliages Al-Mg-Si. Journal of Materials Processing Technology, 199(1-3), pp. 173-178.
- [35] IEC. (2014). IEC 61089: Fils ronds toronnés pour lignes électriques aériennes. Genève: Commission Electrotechnique Internationale.
- [36] H. Filali : Effet de vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si. Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine 1, (2012).

Bibliographie

- [37] I. Hamdi : Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000). Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Beskra, (2014).
- [38] K. Djabri : Etude de l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si contenant différents teneurs des éléments d'additions. Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, (2016).
- [39] A. Chahdane : Effet de vieillissement naturel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si. Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, (2012).
- [40] K. Boulemzaoud : Analyse thermique des alliages d'aluminium Al-Mg-Si(Cu). Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, (2012).
- [41] H. Filali : Effet de vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si. Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine 1, (2012).



ANNEXES

❖ **Annexe A : Définitions des concepts utilisés**

Traitement thermique :

Procédé consistant à chauffer puis refroidir un matériau selon des conditions contrôlées afin de modifier sa microstructure et ses propriétés mécaniques et électriques.

Tréfilage :

Les barres d'aluminium sont réduites en fils fins via des filières progressives jusqu'au diamètre requis.

Câblage :

Les fils sont torsadés pour former le conducteur, avec un pas et un sens précis.

Mise en solution :

Traitement thermique consistant à chauffer l'alliage à une température élevée afin de dissoudre les éléments d'alliage dans une solution solide homogène.

Trempe :

Refroidissement rapide après la mise en solution permettant d'obtenir une solution solide sursaturée.

Vieillessement artificiel :

Traitement thermique effectué à température contrôlée pour favoriser la formation des précipités responsables du durcissement.

Précipitation :

Formation de particules fines dans la matrice métallique après traitement thermique.

Mg₂Si :

Composé intermétallique formé par le magnésium et le silicium jouant un rôle majeur dans l'amélioration des propriétés mécaniques des alliages Al-Mg-Si.

Résistivité électrique :

Annexes

Grandeur représentant l'opposition du matériau au passage du courant électrique.

Résistance à la traction :

Contrainte maximale supportée par le matériau avant rupture.

Allongement :

Capacité du matériau à se déformer avant rupture.

❖ Annexe B : Equipment utilisés pendant l'étude expérimental.

Equipment	Fonction
Four industriel	Réalisation du traitement thermique
Appareil de Traction	Mesure de la résistance et de l'allongement
Milliohmmètre	Mesure de la résistance électrique
Spectromètre	Analyse chimique des matériaux
Machine d'essai de torsion	Contrôle des propriétés mécaniques
Appareil de mesure du diamètre	Vérification des démonstrations des fil

❖ Annexe C : Paramètres expérimentaux appliqués.

Traitement thermique de référence.

- Température : 165°C
- Temps de maintien : 6h30 min

Conditions expérimentales testées :

Annexes

Température	Temps
165°C	6h30 - 6h45 - 7h
163°C	6h30 - 6h45 - 7h
160°C	6h30 - 6h45 - 7h

❖ Annexe D : Formules utilisées

Calcul de la résistivité :

$$R = S * r$$

Avec :

- R : Résistivité ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)
- r : Résistance (Ω/km)
- S : Section (mm^2)

Calcul de Section :

$$S = \left(\frac{d}{2}\right)^2 * \Pi$$

Avec :

- d : diamètre du fil (mm)
- π : 3.14

Calcul de Traction

$$\delta = \frac{F}{S}$$

Avec :

- δ : la résistance à la traction (N/mm^2)
- F : Force appliqués (N)
- S : section (mm^2)

Annexes

❖ Annexe E : les Normes d'analyses appliqués

Paramètre	Valeur prescrite
Aspect visuel	Lisses sans bavure
Nombre de fils	61
Diamant du fil	$3,45 \pm 1$ (mm)
Résistivité	$\leq 32,9$ (Ω .mm)
Allongement	≥ 3 %
Résistance à la traction	≥ 325 (N/mm ²)