



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج م / ك.ع.ت / 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE DES PROCÉDÉS DES MATÉRIAUX**

THÈME

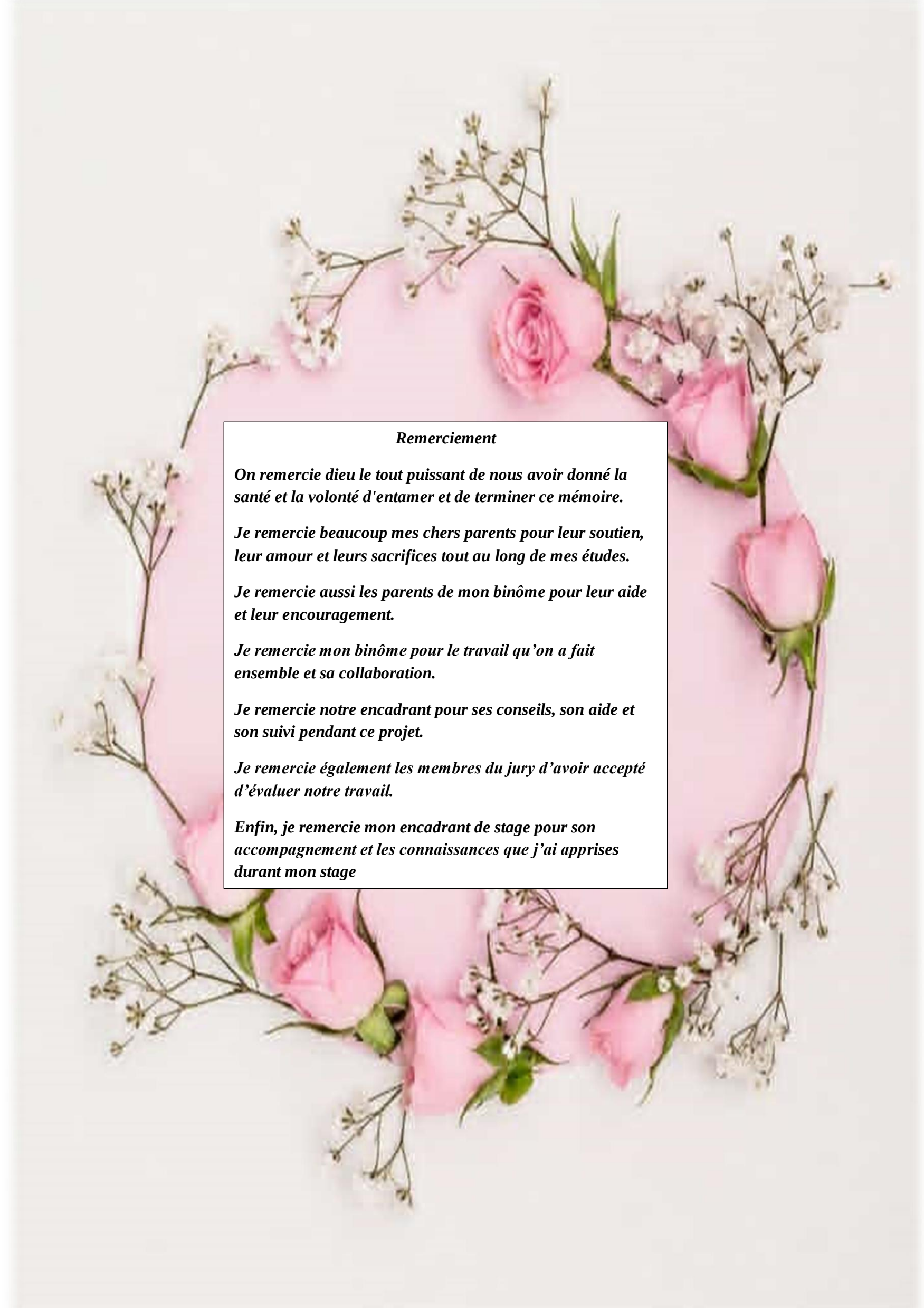
Le choix des alliages d'aluminium série 6xxx dans les conducteurs aériens pour amélioration de leur performances mécaniques.

Présenté par

- 1- Mlle. Sahlellou Ahlem
- 2- Mlle.Yezid Chaima

Soutenu le 14 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	Pr.BENDAHMA Fatima	Université de Mostaganem
Examineur :	Dr.BELKAFOUF NOUR EL HOUDA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Dr.BOUBEGRA Naima	Université de Mostaganem



Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Je remercie beaucoup mes chers parents pour leur soutien, leur amour et leurs sacrifices tout au long de mes études.

Je remercie aussi les parents de mon binôme pour leur aide et leur encouragement.

Je remercie mon binôme pour le travail qu'on a fait ensemble et sa collaboration.

Je remercie notre encadrant pour ses conseils, son aide et son suivi pendant ce projet.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, je remercie mon encadrant de stage pour son accompagnement et les connaissances que j'ai apprises durant mon stage



Dédicace

Ce moment ne s'hérite pas et ne s'achète pas.

J'y ai consacré ma vie, ma jeunesse, mes veilles, mes peurs et mes larmes.

C'est un instant d'aboutissement, une larme mêlée de joie et de tristesse.

La joie de toute une vie...

*C'est une fin heureuse annonçant les plus beaux débuts,
et mon rêve est enfin devenu réalité.*

*Je dédie la réussite de mon diplôme à celle qui a porté tous mes soucis,
à celle qui a été mon pilier solide au fil des années,
à celle qui a transformé les difficultés de la vie en espoir,
à la plus belle des mères : ma mère et mon père.*

*Je dédie également la réussite de mon diplôme à mes sœurs et mon frère
à tous ceux qui sont restés à mes côtés dans les moments faciles comme
difficiles,*

et à chaque personne qui m'a entourée d'amour et de prières.

*Merci à tous ceux qui ont été sur mon chemin,
que je me sois appuyée sur eux ou que je les aie simplement croisés.*

Merci à tous ceux qui m'ont appris un mot ou un savoir .

Nous avons brisé la règle qui dit de faire la mémoire seule...

Et nous avons écrit une histoire de réussite à deux

Moi et mon binôme ,nous avons travaillé,ri et réussi ensemble.

2026



Sahlellou ahlem



Dédicace

Louange à Dieu, Seigneur des Mondes, qui nous a accordé le langage, la connaissance et le don de l'éloquence. Louange à Toi jusqu'à ce que Tu sois satisfait, louange à Toi lorsque Tu l'es, et louange à Toi après Ta satisfaction. Gloire à Toi ! Nous ne T'avons jamais invoqué sans avoir confiance en Ta miséricorde, et nous ne T'avons jamais craint sans croire en Ta promesse et en Ton avertissement. Louange à Toi, une louange abondante et bénie. Que la paix et les bénédictions soient sur le Sceau des Prophètes et le Maître de la Création, notre Prophète Muhammad, paix et salut sur lui. Quant à la suite,

je dédie ce travail à moi-même, À cette âme qui a avancé avec courage sur des chemins semés d'épreuves, qui est tombée mais s'est toujours relevée, portée par la certitude que le soutien de Dieu suffit à surmonter toutes les difficultés. Je me dédie cette réussite, car j'ai été la première à croire en la patience, au travail et à la persévérance.

*À mes très chers parents, mon père « **benne amour** » et ma mère « **kheira** »*

*Pour leurs sacrifices, leur amour infini, leurs prières et leur soutien précieux tout au long de mon parcours. À mes frères « **abdellah** » « **souhaib** » « **miloud** » et sœurs « **Nesrine** » « **Cherifa** » « **israa** », pour leur présence, leur affection et leurs encouragements.*

*À ma chère binôme **Ahlem**, Pour sa collaboration, sa patience et tous les moments partagés durant ce travail.*

*À ma proche amie **Hasna**, Pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien moral.*

À tous mes enseignants et professeurs, Qui m'ont transmis le savoir, guidée avec patience et accompagnée tout au long de mon parcours universitaire.



Yezid Chaima



Résumé

Ce mémoire porte l'étude des alliages d'aluminium utilisés dans les conducteurs aériens de type AAAC pour le transport d'énergie électrique. Les alliages Al-Mg-Si de la série 6000 sont très utilisés en raison de leur bonne conductivité électrique, leur faible masse volumique et leurs propriétés mécaniques.

Dans le cadre de notre stage chez GISB Électrique, une entreprise spécialisée dans la fabrication de conducteurs électriques nous avons cherché à trouver un équilibre entre les performances mécaniques et la conductivité électrique. L'objectif est de garantir l'efficacité et la fiabilité des conducteurs dans les réseaux de transport d'énergie.

Nous nous sommes intéressés à l'influence des traitements thermiques et de la microstructure sur les propriétés des alliages d'aluminium. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs essais et analyses, notamment des mesures géométriques, des essais mécaniques ainsi que des tests électriques afin d'évaluer la résistance mécanique et la conductivité des matériaux.

Mots-clés : Alliages d'aluminium – Al-Mg-Si – Série 6xxx – Conducteurs aériens.

Abstract

This thesis focuses on the study of aluminium alloys used in AAAC-type overhead conductors for electrical power transmission. Al-Mg-Si alloys of the 6000 series are widely used due to their good electrical conductivity, low density, and mechanical properties.

During my internship at GISB Électrique, a company specializing in the manufacture of electrical conductors, I sought to find a balance between mechanical performance and electrical conductivity. The objective is to Ensure the efficiency of conductors in energy transmission networks. We investigated the influence of heat treatments and microstructure on the properties of aluminium alloys. To this end, we conducted several tests and analyses, including geometric measurements, mechanical tests, and electrical tests to evaluate the mechanical strength and conductivity of the materials.

Keywords: Aluminum alloys – Al-Mg-Si – 6xxx series – Overhead conductors .

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة سبائك الألومنيوم المستعملة في الموصلات الهوائية من نوع AAAC الخاصة بنقل الطاقة الكهربائية. تُستعمل سبائك الألومنيوم-المغنيسيوم-السليسيوم من السلسلة 6000 بشكل واسع، وذلك بفضل موصليتها الكهربائية الجيدة، وكثافتها المنخفضة، إضافةً إلى خصائصها الميكانيكية المميزة.

في إطار تربصنا بمؤسسة GISB Électrique المتخصصة في صناعة الموصلات الكهربائية، سعينا إلى تحقيق توازن بين الأداء الميكانيكي والموصلية الكهربائية، بهدف تأكيد كفاءة الموصلات في شبكات نقل الطاقة..

وقد اهتممنا بدراسة تأثير المعالجات الحرارية والبنية المجهرية على خصائص سبائك الألومنيوم. ولتحقيق ذلك، قمنا بإنجاز عدة تجارب وتحاليل شملت القياسات الهندسية، والاختبارات الميكانيكية، بالإضافة إلى الاختبارات الكهربائية، وذلك من أجل تقييم المقاومة الميكانيكية والموصلية الكهربائية للمواد

الكلمات المفتاحية: سبائك الألومنيوم – ألومنيوم-مغنيسيوم-سيليكون – سلسلة 6xxx – الموصلات الهوائية.

SOMMAIRE

Introduction Générale	12
Chapitre I	14

I. Présentation de GISB	15
I.1.1 Fiche technique du GISB	15
I.1.2 Historique	16
I.1.3 Situation géographique du GISB	16
I.1.4 Fonctionnement.....	16
I.1.5 Normes	17
I.1.6 Capacité annuelle de complexe.....	18
I.2. Différents services de GISB électrique	18
I.2.1. Service personnel.....	19
I.2.2. Service bureau d'étude	19
I.2.3. Laboratoire contrôle qualité	19
I.2.4. Service planification	20
I.2.5. Service maintenance	20
I.2.6. Service gestion de stock	20
I.2.7. Service commercial	20
I.2.8. Service approvisionnement	21
I.2.9. Service de HSE	21
I.3. Produit	21
I.4. Conducteurs et câbles électrique	21
I.4.1. Définition	21
I.4.2. Matière première.....	21
I.4.3. Enveloppe Isolent	22
I.4.4. Matière première (isolation).....	22
I.4.5. Gain de protection.....	23
I.4.6. Classe de souplesse.....	23
I.4.8. Processus de fabrication des câbles	24
Conclusion	28
Chapitre II	30
II.1. Introduction	31
II.2. Définition	31
II.3. Historique de Aluminuim	32
II.3. Propriètee de Aluminuim.....	33
II.3.1. Légèreté.....	33
II.3.2. Conductivité thermique	33
II.3.3. Conductivité électrique	33
II.3.4. La tenue à la corrosion	34
II.3.5. Aptitude aux traitements de surface	34
II.3.6. Recyclage.....	34
II.3.7. Facilité de mise en œuvre	35
II.3.8. Aptitudes au soudage	35
II.4. Alliage d'Aluminuim	35
II.4.1. Alliages à durcissement par écrouissage et par mise en solution solide	35

II.4.2. Alliages d'aluminium à durcissement structural	36
II.5. Classification des alliages d'Aluminium	38
II.6. Propriétés des alliages d'Aluminium	38
II.7. Applications de l'aluminium et de ses alliages	39
II.7.1. Transports	39
II.7.2. Construction et architecture	39
II.7.3. L'emballage	39
II.7.4. Construction aérospatiale	40
II.7.5. Construction électronique et électricité	40
II.8. Alliage d'aluminium série 6XXX	41
II.8.1. Présentation général	41
II.8.2. Éléments d'alliage dans les conducteurs d'alliages 6XXX	41
II.9. Procédé de tréfilage des fils conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX	42
II.9.1. Définition et principe	43
II.9.2. Présentation de la filière	43
II.9.3. Propriétés requises pour les conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX	45
II.9.4. Critères de la norme européenne	45
II.9.5. Propriétés électriques des conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX	46
II.9.6. Propriétés mécaniques des conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX	47
II.9.7. Propriétés microstructurales de la série 6XXX	47
II.10. Câblage	48
Conclusion	49
Chapitre III	54
III. 1. Introduction	54
III.2. Présentation et caractéristiques du conducteur étudié	55
III.3. Détermination des caractéristiques de conducteur	56
III.4. Analyse de la composition chimique (Spectromètre)	57
III.4.1 Principe de spectromètre	57
III.4. 2 Mode opératoire du spectromètre	57
III.3.3. Caractéristiques électriques	59
III.4. La section du conducteur	62
III.5. Définitions des grandeurs électriques	62
III.5.1. Mesure de la résistance	63
III.5.2. Détermination de la résistivité et de la conductivité	64
III.3. Caractéristique mécanique	65
III.3.1. Résistance à la traction	65
III.3.1. Principe de l'essai	66
III.3.2. Allongement à la rupture	67
III.4. Analyse avant traitement thermique du produit semi-fini issu du tréfilage	67
III.4.1. Mesures dimensionnelles	67
III.5. Caractéristiques électriques	68
III.6. Caractéristique mécanique	69

III.6.1. Contrainte à la rupture	69
III.6.2. Allongement a la rupture :.....	70
III.6.3. Domaine élastique (zone linéaire)	70
III.6.4. Domaine plastique	71
III.6.5. Rupture	71
III.7. Analyse après traitement thermique	71
III.7.1. Analyse électrique après traitement	71
III.7.2. Essai de traction	73
III.7.3. Allongement à la rupture	74
III.7.4. Essai d'enroulement du conducteur après traitement thermique	74
III.8. Analyse du câblage et des performances du conducteur	76
III.8.1. Analyse du rapport de câblage	77
III.8.2. Vérification des propriétés électriques	77
III.8.3. Analyse de la charge de rupture	78
III.8.4. Analyse des défauts observés.....	78
III.9. Essais réalisés sur la graisse	78
III.9.1. Essai de pénétration de la graisse.....	78
III.9.2. Essai du point de goutte	79
Conclusion	81
<i>Conclusion Générale</i>	83

Abréviation

Abréviation	Signification
GISB	Groupe Industriel Sidi Bendhiba
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension

HT	Haute Tension
NF	Norme Française
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
UTE	Union Technique de l'Électricité
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
BS	British Standards Institution
EN	Norme Européenne
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
Al	Aluminium
Cu	Cuivre
Mg	Magnésium
Si	Silicium
Ni	Nickel
As	Arsenic
Sb	Antimoine
Sn	Étain
Ppm	Parties par million
wt %	Pourcentage massique
IACS	International Annealed Copper Standard
OFHC	Oxygen Free High Conductivity
ETP	Electrolytic Tough Pitch
EC	Electrical Conductivity (Conductivité électrique)
RE	Résistance Électrique
AAAC	All Aluminium Alloy Conductor
PVC	Polychlorure de vinyle
XLPE	Polyéthylène réticulé
HSE	Hygiène, Sécurité, Environnement
MPa	Méga pascal
Nm	Nano-ohm mètre
T°	Température
Mg₂Si	Phase durcissant (Magnésium-Silicium)

Introduction Générale

Les conducteurs en aluminium et leurs alliages sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, notamment la construction, l'aérospatiale, les lignes téléphoniques et, surtout, les réseaux de transport d'énergie. Grâce à leur faible densité, leur conductivité élevée et leur coût relativement bas (comparé au cuivre), les conducteurs en aluminium sont devenus l'alternative privilégiée dans le secteur de l'énergie. Ces propriétés permettent de concevoir des lignes de transport plus légères tout en garantissant un transport d'énergie efficace sur de longues distances.

Dans le domaine des réseaux électriques, les conducteurs doivent répondre à plusieurs exigences, notamment une conductivité élevée, de bonnes propriétés mécaniques et une résistance suffisante au fluage et aux contraintes mécaniques liées aux conditions d'exploitation.

Par conséquent, le choix des matériaux conducteurs est un facteur déterminant pour garantir la fiabilité et les performances des lignes de transport d'énergie.

Parmi les alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication de conducteurs électriques, les alliages de la série 6xxx, principalement composés de magnésium (Mg) et de silicium (Si), offrent une excellente combinaison de propriétés, telles qu'une bonne conductivité électrique, une résistance supérieure à la corrosion et une bonne formabilité. Ces alliages possèdent également une résistance mécanique relativement élevée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications exigeant un équilibre entre légèreté et robustesse mécanique.

Ces propriétés expliquent l'utilisation de plus en plus répandue des alliages Al-Mg-Si dans la fabrication des conducteurs électriques aériens, notamment pour la production de conducteurs de type AAAC destinés au transport d'énergie sur de longues distances. Les performances de ces conducteurs dépendent fortement de la microstructure de l'alliage ainsi que des conditions de fabrication et de traitement thermique. La conductivité électrique est le paramètre le plus important pour les matériaux conducteurs métalliques utilisés en génie électrique. Cependant, les propriétés mécaniques, telles que la limite d'élasticité et la résistance à la traction, jouent également un rôle crucial dans la durabilité et la fiabilité du conducteur. La conductivité électrique est fortement influencée par la microstructure du matériau car elle dépend du mouvement des électrons au sein du réseau cristallin. Ce mouvement est affecté par l'interaction des atomes de solide. Les défauts cristallins ou dislocations améliorent souvent la résistance mécanique, mais réduisent la conductivité électrique.

Cependant, l'amélioration des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium s'accompagne souvent d'une diminution de leur conductivité électrique. Ainsi, il devient nécessaire de rechercher un compromis optimal entre les performances mécaniques et électriques afin de garantir la fiabilité et l'efficacité des conducteurs utilisés dans les lignes de transport d'énergie. Cette problématique représente un enjeu important dans le domaine des matériaux conducteurs destinés aux réseaux électriques.

Introduction générale

La formation de précipités joue également un rôle crucial dans l'évolution de la microstructure des alliages Al-Mg-Si, influençant directement leurs propriétés mécaniques et électriques. Ces alliages subissent un renforcement par précipitation lors du vieillissement thermique, donnant naissance à diverses phases métastables qui améliorent encore leurs propriétés mécaniques.

Dans ce contexte, la compréhension des propriétés des alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication des conducteurs représente un enjeu majeur pour l'industrie du câble. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un stage effectué au sein de l'entreprise GISB Electric, située à Mostaganem et spécialisée dans la fabrication de conducteurs électriques. L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier les propriétés mécaniques et électriques des alliages d'aluminium utilisés dans les conducteurs AAAC, ainsi que l'influence des traitements thermiques sur leurs performances. Dans ce cadre, l'importance des traitements thermiques apparaît comme un axe central de l'étude, notamment pour les alliages Al-Mg-Si utilisés dans les conducteurs aériens AAAC. En effet, les cycles de traitement (mise en solution, trempe et vieillissement) gouvernent directement le phénomène de durcissement par précipitation ainsi que la formation des phases renforçâtes Mg_2Si , ce qui conditionne la microstructure du matériau, notamment la taille, la distribution et la cohérence des précipités.

Cette microstructure joue un rôle déterminant sur les propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction, la ductilité et la tenue en fatigue, ainsi que sur certaines propriétés fonctionnelles comme la conductivité électrique. Ainsi, la maîtrise des paramètres de traitement thermique constitue un levier essentiel pour optimiser le compromis entre performances mécaniques et comportement électrique des conducteurs.

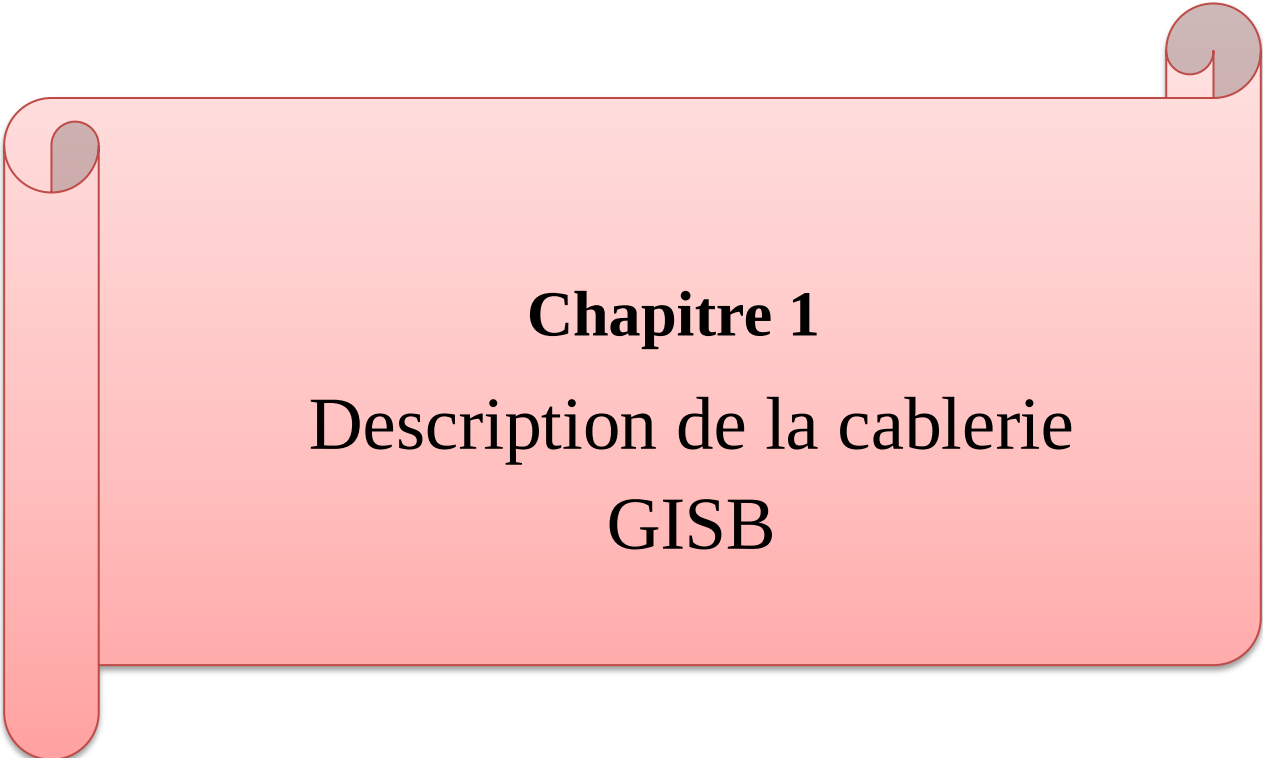
Dans cette perspective, la présente étude s'inscrit dans une analyse des relations entre microstructure et propriétés, en vue de mieux comprendre l'influence des traitements thermiques sur les performances des conducteurs aériens et d'identifier les conditions optimales d'élaboration adaptées aux exigences industrielles.

Pour atteindre les objectifs fixés dans cette étude, nous avons mis en place une approche expérimentale. Elle repose principalement sur la conduite d'expériences et de mesures sur des conducteurs en alliage d'aluminium. Nous avons mené des études géométriques, des tests mécaniques et des évaluations des propriétés électriques.

Ces tests nous ont permis d'examiner le comportement des matériaux. Nous avons pu analyser comment les facteurs de production et les traitements thermiques affectent leurs performances.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** présente une description générale de l'entreprise d'accueil GISB Electric ainsi que ses activités dans le domaine de la fabrication des conducteurs électriques.
- **Le deuxième chapitre** est consacré aux généralités sur l'aluminium et ses alliages, avec un focus particulier sur les alliages Al-Mg-Si utilisés dans les conducteurs aériens.
- **Le troisième chapitre** est dédié aux essais expérimentaux réalisés, ainsi qu'à l'analyse et la discussion des résultatsobtenus.

A decorative red scroll graphic with a light red gradient and a darker red border. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

Chapitre 1

Description de la cablerie GISB

1. Présentation de GISB

Le Groupe Industriel Sidi Bendhiba (GISB) occupe une place stratégique dans le secteur électrique algérien. Spécialisé dans la fabrication de câbles électriques, il ambitionne de devenir un fournisseur majeur d'énergie sur le marché local et à l'échelle africaine. Son siège social, situé dans la zone industrielle de Mesra (wilaya de Mostaganem), bénéficie d'un emplacement privilégié à proximité des ports de Mostaganem et d'Oran, ce qui facilite l'importation des matières premières et l'exportation des produits finis. Fondée par la famille Kobibi dans les années 1970 comme une petite structure d'installation électrique, l'entreprise a connu une industrialisation progressive à partir de 1992, avec le lancement d'une unité de transformation de plastique. À partir de 2007 2008, elle a créé sa première unité de production de matériel électrique, suivie en 2009 par le lancement de son activité principale dans le secteur de l'énergie (câblerie, transformateurs). Aujourd'hui, GISB emploie plus de 800 personnes, dispose d'un capital social de 102 400 000 DA et s'étend sur deux sites : le site 1 (20 000 m²) dédié à l'extrusion et à l'administration, et le site 2 (72 000 m²) consacré à la métallurgie, au tréfilage et au câblage.[\[1\]](#)

L'entreprise produit une large gamme de câbles (domestiques, industriels, moyenne et basse tension, conducteurs nus) tout en respectant des normes internationales strictes (NF EN 50182, NF EN 50183, NF EN 50326), garantes de la conformité et de la qualité des produits. La capacité annuelle de production atteint environ 70 000 tonnes, avec un taux d'intégration supérieur à 70 %. Le groupe Industriel Sidi Bendhiba Algérien (GSIB) Une entreprise algérienne spécialisée dans la fabrication de câbles électriques, dont le siège social est situé à Masra, dans la wilaya de Mostaganem, joue un rôle clé dans le secteur énergétique algérien. Elle ambitionne de s'imposer comme fournisseur d'énergie non seulement sur le marché local, mais aussi à l'échelle de l'Afrique. Pour atteindre cet objectif, elle met en œuvre un plan stratégique, conjugué à un engagement fort en faveur du développement technologique et de l'innovation dans sa production. [\[2\]](#)

I.1.1 Fiche technique du GISB [\[3\]](#)

Nom : Groupe Industriel Sidi Bendhiba Algérien (GSIB).

Domaine d'activité : Industrie électrique.

Spécialité : Fabrication de câble électrique.

Localisation : Mesra wilaya de Mostaganem Algérie.

Activités principales : Production de câbles électriques à usage domestique et industriel.

Matières premières : Aluminium (Al), cuivre (Cu), polychlorure de vinyle (PVC) et polyéthylène (PE) .

Nombre d'employés : Plus de 800 employés.

Capital social : 102 400 000 DA

Superficie site 2 : métallurgie, tréfilage et câblage 72 000 m².

Superficie site 1 : extrusion et administration 20 000 m².

I.1.2 Historique

L'entreprise a été fondée par la famille Kobibi. Elle a commencé comme une petite structure d'installation électrique dans les bâtiments au cours des années 1970. En 1992, elle a lancé une unité de transformation de plastique, ce qui a marqué le passage à l'industrialisation. Développement industriel À partir de 2007-2008, GISB a créé sa première unité de production de matériel électrique. En 2009, elle a lancé son activité principale dans l'énergie avec des filiales comme la Câblerie Sidi Bendehiba pour les câbles et Maghreb Transfo pour les transformateurs. Le groupe a ensuite fusionné avec d'autres entreprises comme Cablerie Algérienne, KAST, GISB Energy et GISB Green Power. Aujourd'hui, le groupe GISB emploie entre 501 et 1000 personnes Expansion et exportations Le groupe GISB est implanté près des ports de Mostaganem et Oran, ce qui lui permet d'exporter facilement ses produits. Le groupe GISB exporte ses produits vers l'Afrique, notamment vers le Sénégal, où il a réalisé un chiffre d'affaires de 4 millions de dollars en câbles. Le groupe GISB a également exporté son savoir-faire en cablerie vers le Bénin sur une surface de 110 hectares [4].

I.1.3 Situation géographique du GISB



Figure I.1: Localisation géographique du GSIB.

L'entreprise GISB est située dans la zone industrielle de Mesra, dans la wilaya de Mostaganem, l'entreprise bénéficie d'un emplacement stratégique offrant plusieurs avantages. Sa proximité avec les infrastructures portuaires, notamment le port de Mostaganem, facilite les opérations d'importation des matières premières ainsi que l'exportation des produits finis.

De plus, la proximité du port d'Oran renforce son ouverture sur les marchés nationaux et internationaux. Cette position géographique permet à l'entreprise de répondre efficacement aux besoins de sa clientèle tout en optimisant les coûts de transport.

I.1.4 Fonctionnement

- **Câbles domestiques** : Ils sont conçus pour les installations électriques résidentielles.
- **Câbles industriels** : Ils sont utilisés dans les équipements et installations du secteur industriel.
- **Câbles moyenne tension** : Ils servent au transport de l'électricité via les réseaux de distribution moyenne tension.
- **Conducteurs nus** : Ils sont principalement utilisés pour les lignes de transport d'électricité aériennes.
- **Câbles basse tension** : Ils servent au transport et à la distribution de l'électricité aux consommateurs.



Figure I.2 : Fonctionnement.

I.1.5. Normes

Les normes NF EN 50182 ; NF EN 50183 ; NF EN 50326 sont très importantes pour les conducteurs électriques ; Afin de garantir la conformité et la qualité des produits.

- **NF EN 50182 : Conducteurs pour lignes aériennes**

Cette norme définit les caractéristiques électriques et mécaniques des conducteurs nus à brins circulaires en alliage d'aluminium pour lignes aériennes, avec essais sur résistance, torsion et allongement après toronnage.

- **NF EN 50183 : Fils en alliage Aluminium-Magnésium-Silicium**

Elle spécifie les conducteurs en alliage d'aluminium-magnésium-silice pour lignes aériennes à haute tension, avec haute résistance mécanique adaptée aux applications renforcées (elle définit leur propriété mécanique et électrique).

- **NF EN 50326 : Caractéristiques des graisses**

Cette norme décrit les propriétés des produits de protection (graisses) utilisés sur les conducteurs aériens nus non constitués de métaux conducteurs, notamment la masse par unité de longueur et le point d'impact, pour prévenir la corrosion.

I.1.6 Capacités annuelle de complexe

La société CSB regroupe environ 900 effectifs dispose de capacités de production annuelles Pour ses câbles, la capacité atteint environ 70 000 tonnes par ans , Elle produit également différents types de câbles avec une capacité de production annuelle de 70 000 unités et un taux d'intégration supérieur à 70 %.. Ce complexe s'étend sur 132000 m2.

I.2. Déférentes service de GISB électrique

GISB Eléctrique est une entreprise organisée en plusieurs service complémentaires, et chaque service jouent un role spécifique dans le processus de production et gestion.Et la Figure I.2 montre c'est déférent service .

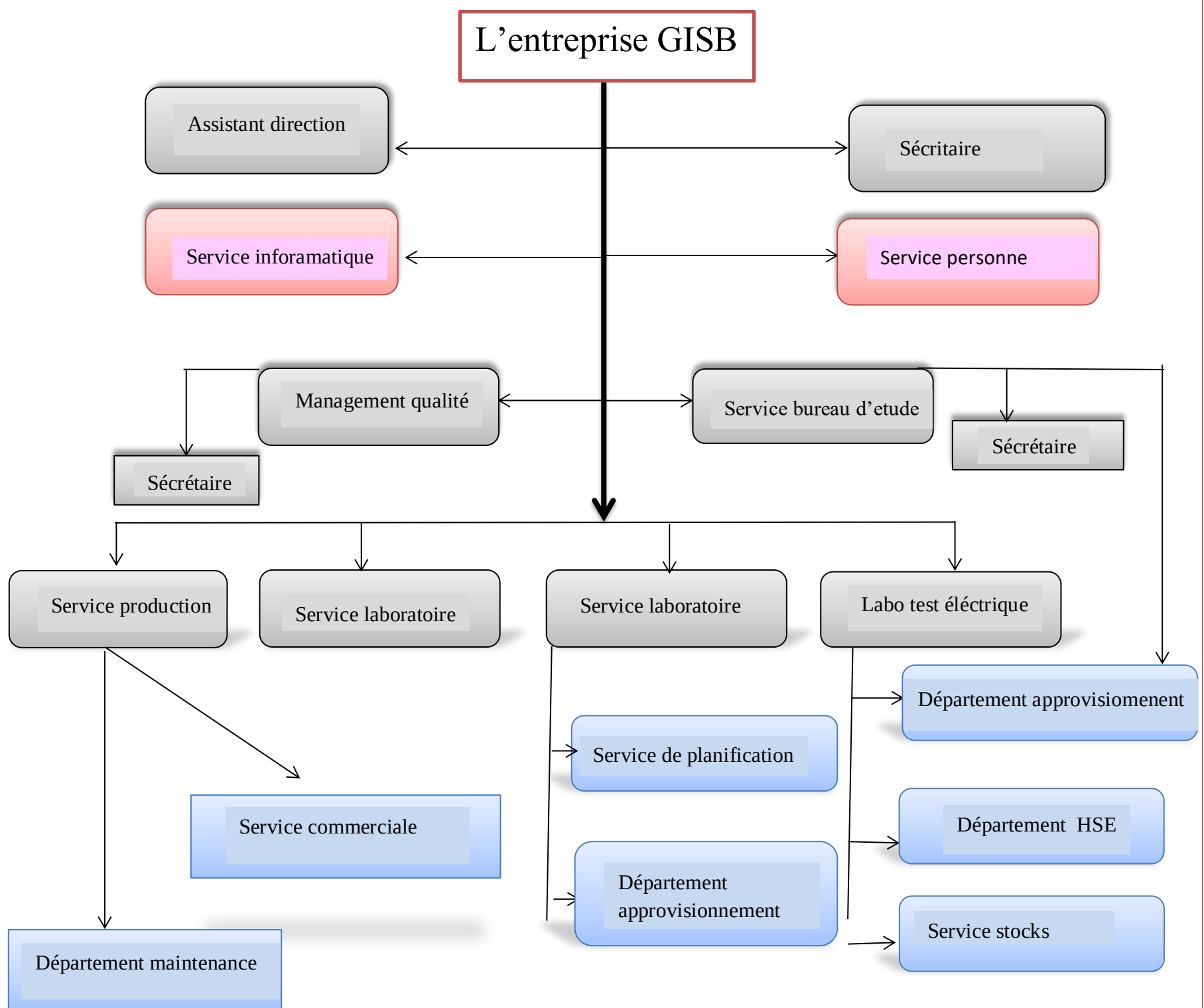


Figure I.3 : Organisation de l'entreprise (GISB ELECTRIQUE).

I.2.1. Service personnel

Une équipe de service dédiée effectue le travail, ce qui inclut la gestion de cette équipe et les fonctions administratives afin de garantir sa responsabilité dans le traitement des dossiers. Le personnel de service doit faire des choses comme :

- Embauche de personnel, pour le personnel de service.
- Enseigner au personnel de service ce qu'il faut faire dans ses fonctions.
- l'accueil et l'orientation du personnel.
- l'évaluation des performances du personnel.

I.2.2. Service bureau d'étude

Bureau d'étude joue un rôle essentiel dans la production industrielle, car elle est responsable de :

- La conception et le développement des procédés.
- L'amélioration de l'efficacité et de la productivité.
- La gestion et le maintien de la qualité.

I.2.3. Laboratoire contrôle qualité

Tous nos produits manufacturés sont soumis à des tests rigoureux et respectent des normes strictes, ce qui nous permet de garantir leur qualité et leur conformité aux exigences actuelles, rassurant ainsi nos clients.

- Machine de traction 100KN.
- Mili-ohm-mètre de mesure la résistance électrique.
- Balance électrique pour mesurer le poids.
- Spectromètre pour analyser les composants du métal.
- Viscosimètre pour tester la viscosité de lubrifiant.
- Analyseur d'oxygène pour analyser la quantité d'oxygène dans le conducteur.
- Pénétrömètre est un instrument de mesure utilisé pour établir la résistance de pointe.
- Densimètre appareil de mesure de densité.
- Testeur point de goutte de graisse.
- Etuve électrique de 300°C pour l'essai de vieillissement..
- Machine de traction 10 kN.
- Etuve électrique de 250°C pour d'allongement à chaud.
- Bain marie électrique $T_{max}=80^{\circ}C$.
- Balance /densimètre $M_{max}=360g, M_{min}=0,02$.
- Viscosimètre.
- Testeur point de goutte de la graisse.
- Pénétrömètre pour la graisse.

a) Paramètres des tests de câble

Les paramètres des essais comprennent :

L'épaisseur ; le diamètre ; le poids ; la résistance électrique ; la résistance à la traction ; l'allongement ; la résistivité.

b) Présentation Le Plan De Contrôle Qualité

Il se fait en trois étapes :

1. Dans la réception de la matière première ;
2. En cours de production ;
3. Et pour les produits finis ;

I.2.4. Service planification

Est très important pour l'organisation industrielle et a un effet notable sur plusieurs aspects clés, notamment :

- La planification et l'organisation du travail ;
- La gestion de la production et des ressources disponibles ;
- La réduction des coûts pour améliorer l'efficacité ;
- Les études de site et d'objectifs, également appelées études de cadrage ;
- Le suivi et l'évaluation des résultats pour ajuster les stratégies ;

❖ Test électrique

Est très important pour la sécurité des installations et des équipements **GISB**. Il aide à détecter les problèmes d'isolation et de connexion. Le contrôle électrique assure que les installations respectent les spécifications. Il comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, il vérifie la tension et la résistance de mise à la terre avant la mise en service. Ensuite, il applique une haute tension pendant une durée déterminée. Par exemple, les câbles en cuivre sont testés avec une tension de 3 500 volts pendant 5 minutes. Les câbles en aluminium sont testés avec une tension de 4 000 volts pendant 15 minutes. D'autres contrôles sont également effectués sur le produit fini. Ces contrôles incluent l'inspection de la bobine, l'inspection des extrémités du câble, la mesure de sa longueur et la vérification des marquages et des données d'identification.

I.2.5. Service maintenance

Le service de maintenance joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de GISB. Grace à ses programmes de maintenance préventive et corrective, il garantit : La continuité des opérations, Une durée de vie prolongée, Un temps d'arrêt réduit.

- Ses missions comprennent :
 - La maintenance des équipements ;
 - Les réparations rapides ;
 - La sécurité opérationnelle ;

I.2.6. Service gestion de stock

Cela comprend le suivi des quantités entrant et sortant d'un ou plusieurs entrepôts. Ces quantités peuvent être des matières premières, des produits finis ou des biens de consommation.

I.2.7. Service commercial

Le service des ventes est chargé de coordonner la relation entre l'entreprise et les consommateurs. Il doit étudier les besoins des consommateurs afin de déterminer les produits qui leur conviennent le mieux. Le service des ventes est également responsable des actions marketing. Il modifie les produits pour répondre aux attentes des clients.

Il est divisé en quatre sections principales. Il y a d'abord le service client. Ensuite, il y a le règlement des commandes. Le service des ventes est également responsable de l'expédition. Enfin, il y a le marketing. Chacune de ces

Chapitre1 Description de la cablerie GISB

Sections est importante pour que le service des ventes fonctionne bien. Le service des ventes travaille dur pour s'assurer que les consommateurs sont satisfaits de leurs produits.

I.2.8. Service approvisionnement

Le service des achats est la pierre angulaire chargée de veiller à ce que l'organisation soit approvisionnée en matières premières et en équipements au coût le plus bas possible et de la meilleure qualité afin d'assurer la continuité de la production.

❖ Clients

LA CABLERIE ALGÉRIENNE sert des clients dans toute l'Algérie, représentant de nombreuses grandes industries.

Ses clients comprennent :

- SONATRACH
- SONELGAZ
- KAGRIF
- SONACOM
- TOSYALI ALGEIRE
- ENIE, MEI
- HASNAOUI

I.2.9. Service de HSE

Ce domaine d'expertise vise à protéger les travailleurs, les biens et l'environnement sur le lieu de travail. Il se concentre sur la gestion des risques, la prévention des accidents du travail et la lutte contre les maladies professionnelles, des politiques de prévention rigoureuses sont mises en œuvre à cette fin.

I.3. Produit

- Câble BT Industriel (Rigide et Souple).
- Câble BT Aérien (Torsade de Branchement et Torsade de Distribution).
- Câble Sans Halogène.
- Conducteur Nu.
- Câble MT & HT Isolée.
- File à souder (1.38 mm).

I.4. Conducteurs et câbles électrique

I.4.1. Définition

Les conducteurs électriques sont des composants essentiels des systèmes électriques en raison de leur capacité à résister à la tension et à transmettre et acheminer l'énergie et les communications de la source vers différents récepteurs.

I.4.2. Matière première

L'entreprise utilise actuellement comme matière première le Cuivre, l'Aluminium ou l'Almélec.

- **Le cuivre**

Le cuivre est le métal non ferreux plus courant pour les conducteurs, à cause de leur haute conductivité, sa ductilité et sa faible résistivité, idéal pour les câbles de basse et moyenne tension. On l'utilise soit en fil de section cylindrique monobrin (rigide), soit en section toujours cylindrique mais multibrins ou (souple).[\[9\]](#)

- **L'aluminium**

On utilise aujourd'hui des conducteurs d'aluminium pour la ligne aérien, grâce à, Bonne conductivité (environ 60% de celle du cuivre à section égale), mais beaucoup plus léger (1/3 du poids du cuivre). Très résistant à la corrosion atmosphérique.[\[9\]](#)

- **Almélec**

Alliage aluminium et magnésium et silicium, il est utilisé spécifiquement pour les conducteurs aériens et les lignes de transport d'énergie à haute portée, car résistance mécanique est nettement supérieure à celle de l'aluminium pur, mais ses caractéristiques mécaniques lui permettent de résister aux contraintes liées à l'environnement (vent, gel, neige, variations de température).

I.4.3. Enveloppe Isolent

Enveloppe isolent ou gaine isolent c'est matière ou couche non conductrice qui entoure l'âme, elle permet de :

- Être une gaine vide qui entoure le conducteur.
- Isoler électriquement les conducteurs entre eux, qui sont à des tensions différentes.
- Protégé contre le contact direct, et contre les fuites de courant (défauts d'isolement).

Pour être efficace, cette enveloppe doit avoir une très haute résistance au passage du courant (forte résistivité) et supporter des températures élevées.

I.4.4. Matière première (isolation)

L'entreprise utilise deux principaux matériaux actuellement :

- **PVC** : pour les câbles standards (usage domestique, industriel courant).
- **XLPE(PR)** : pour les câbles moyenne et haute tension (plus grande résistance thermique).

a) Polychlorure de vinyle (PVC)

Un thermoplastique en poudre blanche, Pour le transformer correctement, nécessite des adjuvants pour former des 'compounds', qui déterminent sa qualité (souple ou rigide, opaque ou transparent, isolant ou conducteur). Le PVC est un matériau malléable qui se plie à toutes les architectures et Recyclable, il est parfaitement écologique pour un meilleur respect de l'environnement.

b) Polyéthylène réticulé (XLPE)

Egalement désigné par l'abréviation PER, XPE, PEX, dans les pays de langue anglaise, est un polyéthylène transformé réticulation afin d'améliorer certaines caractéristiques comme la résistance aux hautes températures (90°C). (Le XLPE nécessite l'ajout d'un catalyseur).

I.4.5. Gain de protection

Gaine de protection, toujours en PVC (un couche protectrice), sont protègent les câbles électriques des dommages et des risques environnementaux, assurant ainsi une performance durable. Elle doit satisfaire à des conditions liées à l'environnement du câble :

- La température.
- Le vieillissement.
- La présence d'eau.
- La présence de poussières.
- La possibilité de chocs mécaniques.

I.4.6. Classe de souplesse

La flexibilité d'un câble électrique se réfère à la capacité de son conducteur à se plier ou à se tordre sans se rompre. Selon la norme CEI 60228, elle classifie les câbles en diverses catégories : de la classe 1 (rigide) à la classe 6 (très flexible).

- **Classe 1** : Conducteurs monofils rigides, destinés aux installations fixes.
- **Classe 2** : Multibrins rigides, configurations standardisées.
- **Classe 5** : Fils multibrins fins, pour des mouvements modérés.
- **Classe 6** : Câbles multi-brins ultra-fins extra-souples, conçus pour des flexions répétées (machines, robots). [8]

Âme des câbles = Nombre de brin(s) × diamètre d'un brin (en mm)

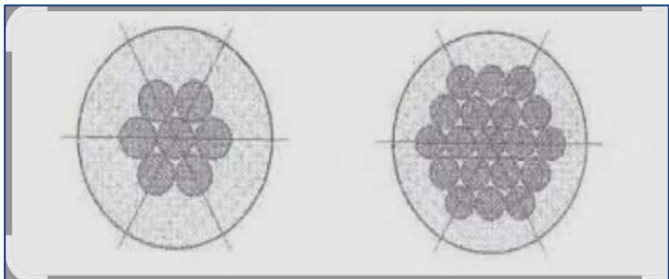


Figure I.4 : Nombre et diametre de brine .

I.4.7. Repérage des conducteurs

L’identification des conducteurs électriques est très importante. Elle se fait généralement par la couleur de l’enveloppe isolante. Phase, Neutre ou Protection Equipotentielle (PE).

Tableau I.1 : Repérage des conducteur.

Conducteur	Couleur	Symbole
Phase (L)	Rouge, marron , gris ou noire.	L
Neutre(N)	Bleu calair.	N
Terre /Protection (PE)	Vert et joune (bicolor).	PE

I.4.8. Processus de fabrication des câbles

L'entreprise algérienne de câblage dispose de deux installations spécialisées dans la production de câbles électriques. Ces installations sont :

- Site 2 : Ici, on procède au tréfilage et câblage.
- Site 1 : Cet endroit est dédié à l'isolement, à l'assemblage et bourrage et marquage.

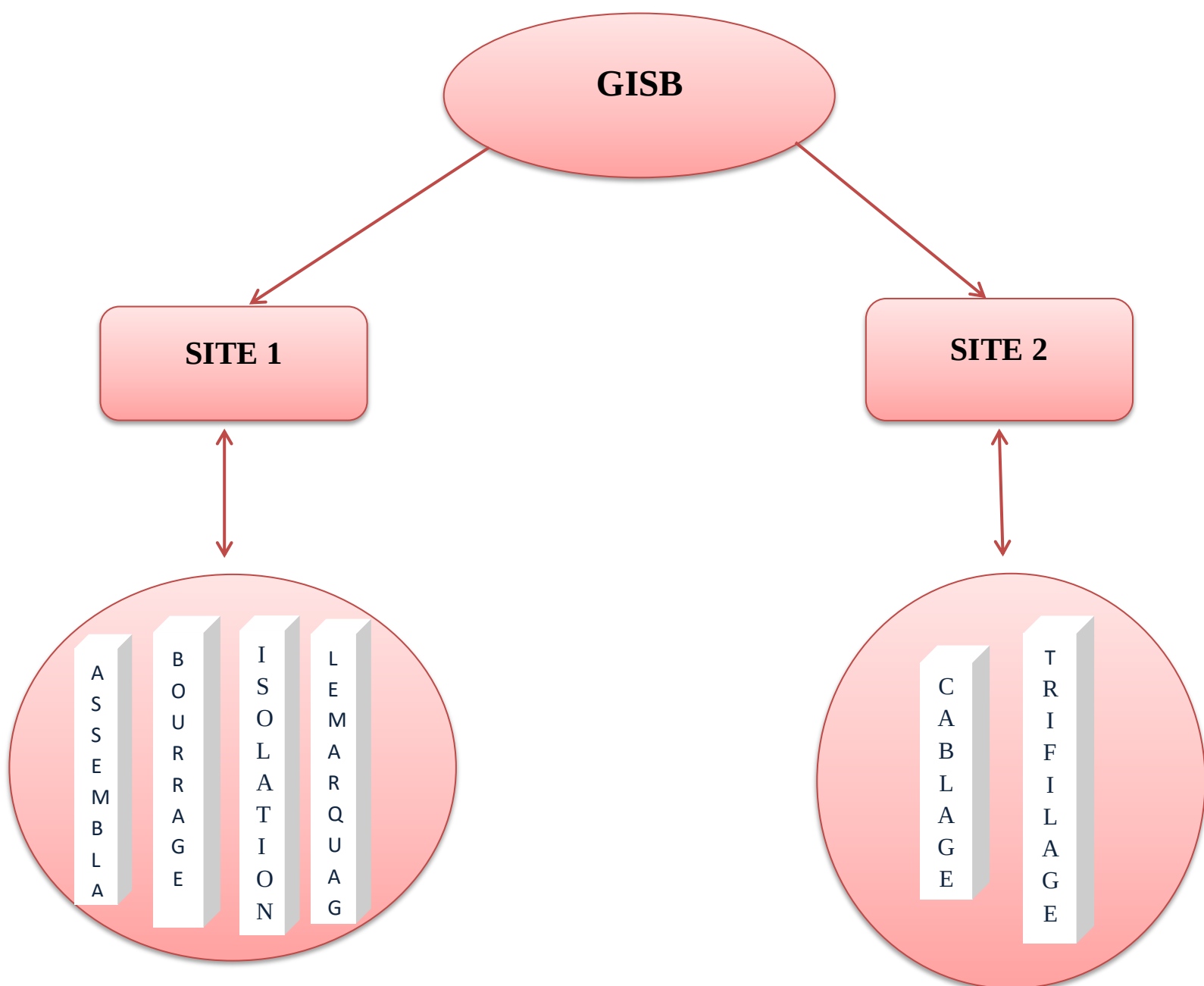


Figure I.5 : Processus de fabrication.

I.4.8.1. Site 2

Sur le Site 2, la production d'un conducteur, qui est un produit semi-fini, se fait en trois étapes distinctes, sont :

a) Construction de fil machine

Après la réception des déchets du cuivre, on fait un traitement (séparation et classification). Ensuite on met des quantités du cuivre dans la presse pour former des cubes de cuivre (compactage) à placer dans le four qui a une température de fusion entre 1200 °C et 1250°C pour faire fondre ces cubes et purifier les impuretés. Durant la fusion on

Chapitre1 Description de la cablerie GISB

ajoute des pièces de verre qui devient une pate qui ramasse les impuretés légères et on ajoute aussi des troncs d'arbres pour diminuer le taux d'oxygène. Le cuivre liquide sortira par un chemin vers un laminoir où il se refroidira et solidifiera pour réduire son diamètre et obtient un fil de machine à 8mmmm (former dans des bottes). Dans laminage on ajoute l'alcool dilué pour faire le fil briller et éviter son corrosion.

b) Tréfilage

La première étape de la fabrication des conducteurs en alliage d'aluminium AAAC est le tréfilage. Ce fil est fabriqué à partir d'un alliage d'aluminium tel que le 6201. La machine de tréfilage comporte plusieurs étapes, notamment l'utilisation d'une bobine pour connecter les fils entre des filières afin de réduire leur diamètre par traction .

Les fils sont ensuite immergés dans un bain d'émulsion (huile et eau) pour faciliter le glissement et l'échange thermique, empêchant ainsi toute déformation plastique du matériau. Ce procédé modifie les propriétés mécaniques du matériau, c'est pourquoi un recuit est effectué pour augmenter son élasticité. Ce procédé est spécifique au cuivre. Pour l'aluminium et Almelec en fusion, le recuit n'est pas nécessaire, mais les fils peuvent être traités thermiquement au four pour restaurer leurs propriétés mécaniques.[5]

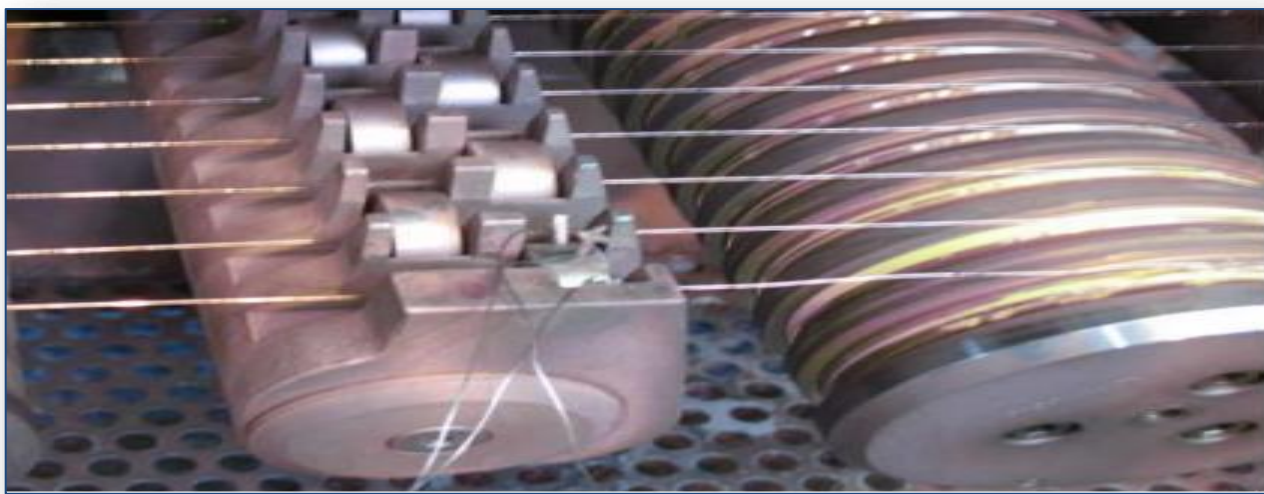


Figure I.6 : Processus de tréfilage



FigureI.7 : Filié.

c) Câblage

C'est la deuxième procusses après le tréfilage regroupent les fils (aluminium, cuivre, almélec) les conducteurs grâce à des filières spécifiques et une boîte de commande qui détermine le pas et l'orientation du câblage(droite pour l'aluminium et gauche pour le cuivre et l'almélec), nous procédons à une série de vérifications, on contrôle le diamètre câblage ,le diamètre de conducteur ,l'orientation du câblage ,la résistance, le poids , le pas et la composition .[6]



Figure I.8 : Processus de câblage

I.4.8.2. Site 1

Quand on termine les trois étape de site 2,on passe par les étapes de site 1 ,sont :

a) Isolation

Le processus suivant dans la fabrication d'un câble électrique est l'isolation ,Au cours de cette phase, une couche isolante en PVC ou XLPE est appliquée sur le fil conducteur pour prévenir toute fuite de courant potentielle. Ce processus est réalisé par un appareil nommé une extrudeuse, et à la fin de ce procédé, nous contrôlons le diamètre, l'épaisseur et le poids.[7]

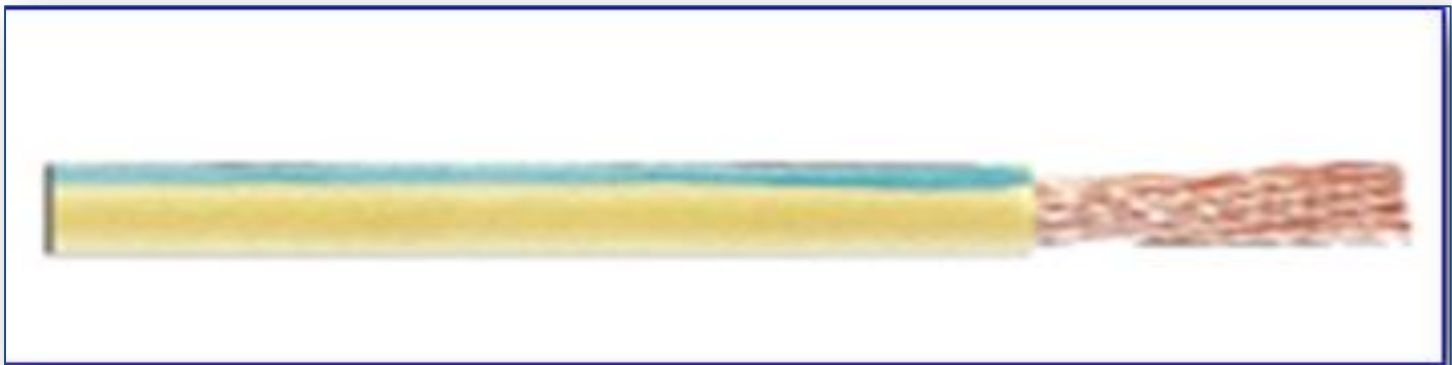


Figure I.9 : Conducteur apres isolation

b) Assemblage

Il consiste à regrouper différents conducteurs isolés afin de former un câble multi-polaire, l'identification d'une phase est effectuée par une couleur ou par un numérotage. [8]

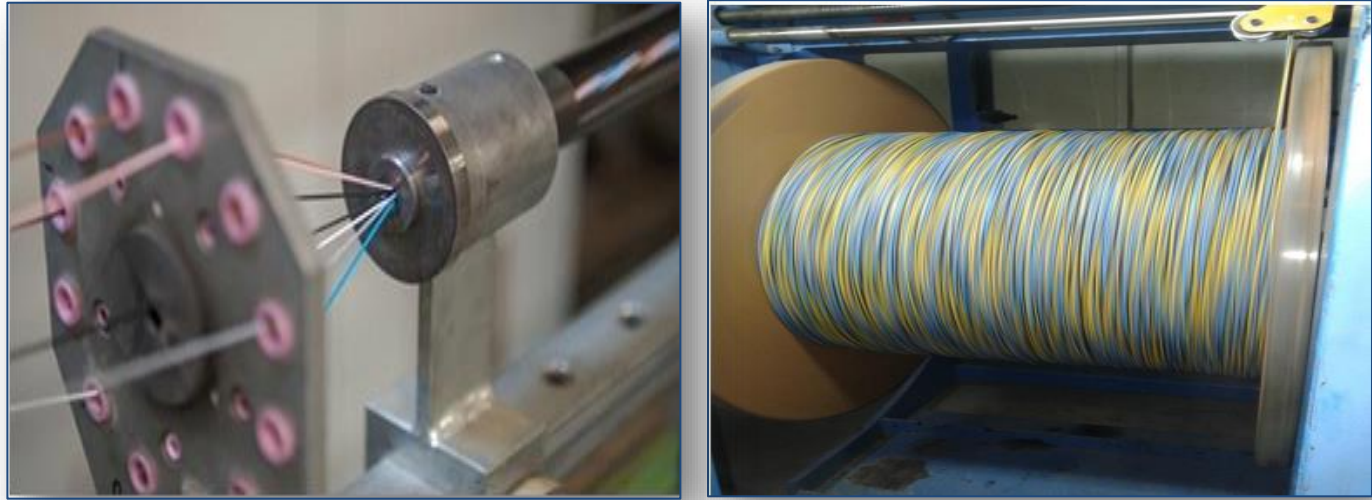


Figure I.10 : Assemblage

c) Bourrage

Est joué un rôle crucial dans la protection du câble contre les facteurs externes tels que l'humidité, et lui assure une protection mécanique contre les chocs grâce à un matériau polymère. [9]

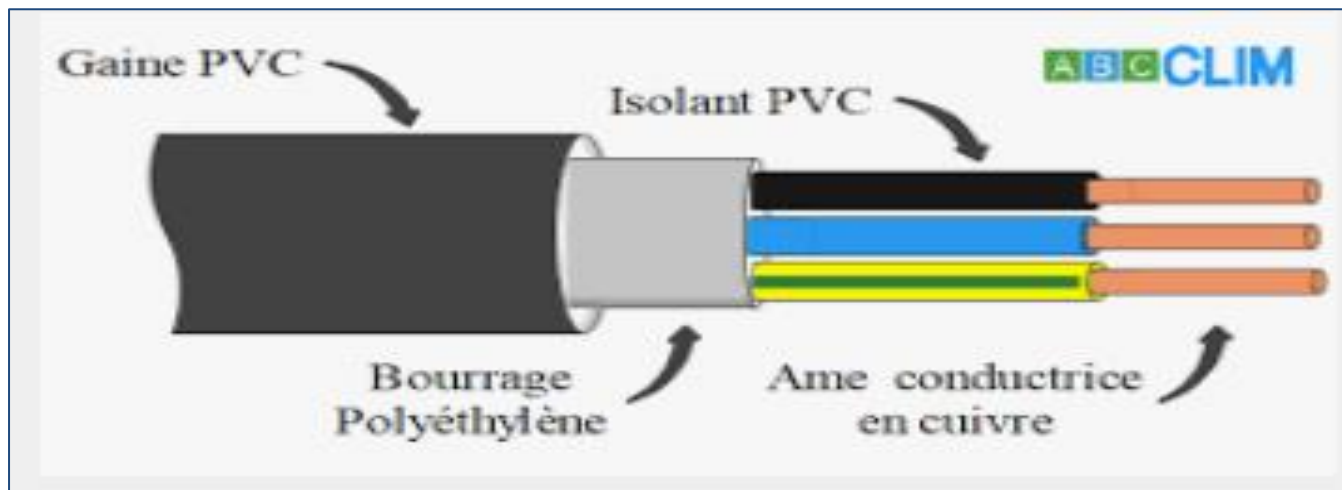


figure I.11 : Bourrage

d) Marquage

Étape cruciale de la fabrication des câbles, le marquage consiste à apposer sur le câble lui-même les informations techniques essentielles, telles que le nom du fabricant, la marque commerciale, le nombre de conducteurs, la section et la norme de production. Ce marquage facilite la traçabilité et la gestion des stocks. [10]



Figure I.12. Marquage

Conclusion

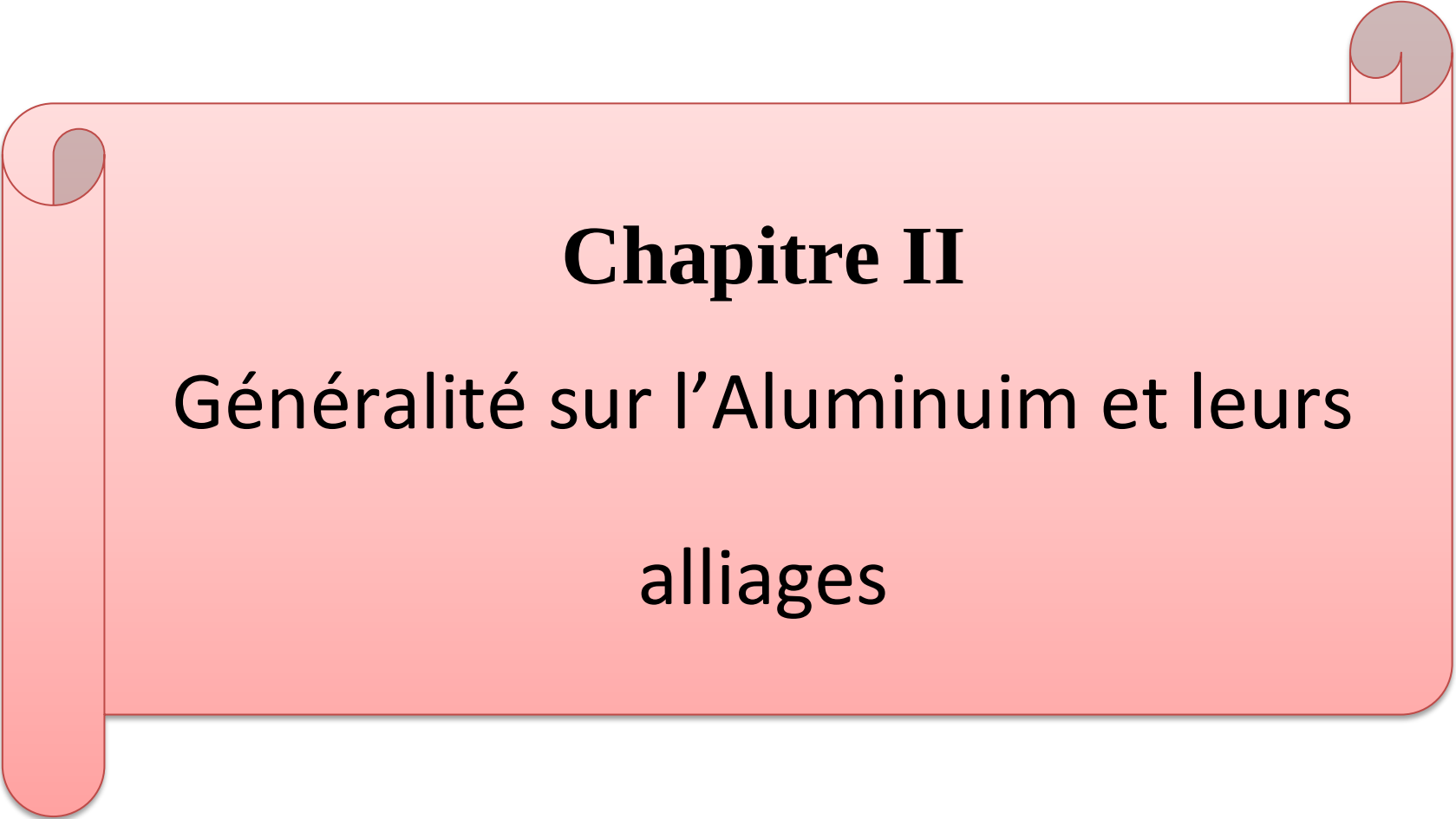
GISB dispose de plusieurs services complémentaires (personnel, bureau d'études, laboratoire de contrôle qualité, planification, maintenance, gestion de stock, commercial, approvisionnement, HSE) qui assurent la coordination et la maîtrise de l'ensemble du processus, depuis la réception des matières premières (cuivre, aluminium, Almélec, PVC, XLPE) jusqu'à l'expédition des produits finis. Le processus de fabrication s'articule autour de deux sites principaux :

- **Site 2** : tréfilage (réduction du diamètre des fils) et câblage (assemblage des brins en conducteurs toronnés) ;
- **Site 1** : isolation (PVC ou XLPE), assemblage, bourrage et marquage.

Chaque étape fait l'objet de contrôles qualité rigoureux (résistance électrique, traction, allongement, épaisseur, diamètre, etc.), réalisés par un laboratoire équipé d'appareils de mesure performants (machine de traction, spectromètre, viscosimètre, densimètre, etc.). Ainsi, ce premier chapitre a permis de dresser un état des lieux complet de l'entreprise GISB, de son organisation, de ses moyens de production et de ses exigences qualité. Ces éléments constituent une base solide pour aborder, dans le chapitre suivant, l'étude approfondie des alliages d'aluminium et des procédés de transformation qui y sont associés

Références

- [2] GISB Electric, *Présentation générale de l'entreprise et de ses activités industrielles*, Mostaganem, Algérie, 2026.
- [1] GISB Electric, *Documentation technique interne de la câblerie*, Service Production, Mostaganem, Algérie, 2026.
- [3] GISB Électrique. Fiche technique de l'entreprise: Groupe Industriel Sidi Bendhiba Algérien (GSIB). Document interne, Mesra, Mostaganem, Algérie, 2024.
- [4] GISB ELECTRIC. Notre Histoire. GISB ELECTRIC, 27 mars 2026. [Disponible sur: <https://gisbelectric.com/notre-histoire/> [Consulté le 10 juin 2026].
- [5] J. G. Bralla, *Handbook of Manufacturing Processes*, Industrial Press Inc., New York, 2007.
- [6] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [7] W. F. Hosford et R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, 2011.
- [8] International Electrotechnical Commission, *IEC 60228 : Conducteurs des câbles isolés*, Genève, Suisse.
- [9]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/problematiques-communes-des-reseaux-electriques-ingenierie-42267210/cables-de-transport-d-energie-d4520/materiaux-mis-en-uvre-dans-les-cables-isoles-d4520niv10002.html>

A decorative red scroll graphic with a light red gradient and a darker red border. It has a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends and a small circular detail at the top right corner of the horizontal strip.

Chapitre II

Généralité sur l'Aluminuim et leurs alliages

II.1. Introduction

L'Aluminium est un matériau largement utilisé dans l'industrie actuelle, notamment pour fabriquer des conducteurs et des câbles. De plus, il est de plus en plus utilisé pour remplacer le cuivre dans de nombreux usages industriels, car il est moins dense, il conduit bien l'électricité et il résiste bien à la corrosion. L'Aluminium pur a de très bonnes caractéristiques et est utilisé dans de nombreux domaines. Cependant, l'Aluminium pur a quelques faiblesses, notamment en ce qui concerne ses propriétés chimiques. C'est pourquoi des alliages différents ont été créés pour améliorer les performances de l'Aluminium.

Dans ce chapitre, nous commencerons par caractériser l'Aluminium et retracer son parcours historique, depuis sa découverte au 19^{ème} siècle jusqu'à son développement, en mettant en évidence ses diverses propriétés, y compris physiques, chimiques et notamment électriques, sans oublier ses alliages.

Une attention particulière sera accordée aux types d'alliages utilisés dans les communications aériennes, y compris la série 6000 (Aluminium-Magnésium-Silicium), en montrant comment les performances mécaniques (résistance au fluage, résistance à la traction et comportement au fluage) et la conductivité évoluent.

Pour conclure, nous mettrons en évidence l'importance de la sélection de l'alliage lors de la conception des conducteurs aériens. Cette décision influence non seulement l'efficacité énergétique de la ligne (pertes Joule), mais également sa fiabilité industrielle (durée de vie, résistance aux conditions climatiques, stabilité des connexions, coût d'entretien). Ce chapitre vise donc à clarifier ce qui est un compromis stratégique.

II.2. Définition

L'Aluminium est le second élément métallique le plus répandu sur Terre après la silice (représentant environ 8% de l'écorce terrestre). C'est un métal non ferreux, de couleur blanche, très ductile et extrêmement malléable. L'aluminium est un élément du troisième groupe de la table de Mendeleïev, avec le nombre atomique 13 (métaux alcalino-terreux) et le symbole « Al ». Il appartient également à la famille des métaux pauvres.

La bauxite, un mélange d'alumine (40 à 60 %), d'oxyde de silicium (2 à 12 %), d'oxyde de fer (18 à 25%), d'oxyde de titane (2 à 4%) et d'eau (10 à 15%), est le principal minerai de l'aluminium. On trouve des réserves de bauxite en grande quantité et d'importance à travers le monde entier. Les plus anciens, aujourd'hui épuisés, étaient localisés dans le sud de la France, à proximité des Baux-en-Provence, ce qui a inspiré le nom du minerai.

• Production et extraction d'Aluminium

L'aluminium est produit à partir de l'extraction de l'alumine qui se trouve dans la bauxite, Et cela se réalise par le biais de ce qui suit.

1. L'extraction de la bauxite, riche en oxyde d'aluminium (**alumine**), se fait généralement sous forme de gibbsite (**Al(OH)₃**), de boehmite (**AlO(OH)**) ou de diasprose (**Al₂O₃·2H₂O**), ainsi que diverses combinaisons avec la silice (**SiO₂**), l'oxyde de fer (**Fe₂O₃**) et l'oxyde de titane (**TiO₂**). d'autres impuretés comme les traces de carbonates et de sulfures [1].

2. Le procédé principal d'extraction de l'alumine pure à partir de la bauxite est le procédé Bayer, développé en 1886 [2]. Le minerai subit un processus de concassage, lavage, séchage et broyage, suivi d'un chauffage sous pression avec de l'hydroxyde de sodium [3].
3. Le procédé Hall-Héroult, qui consiste à produire de l'aluminium pur par électrolyse de l'alumine en fusion dans la cryolithe, est la technique prédominante actuellement adoptée dans la fabrication industrielle de l'aluminium. L'alumine, possédant un point de fusion de **2050°C**, requiert un processus chimique sophistiqué pour la dissolution de son oxyde. Le procédé consiste à abaisser le point de fusion à **950°C**, en intégrant l'alumine dans une cuve recouverte de carbone servant de cathode, et en utilisant des barres suspendues en haut de la cuve comme anodes. La cryolithe (**fluorure de sodium-aluminium**) est employée comme électrolyte. L'écoulement de courant électrique continu conduit à la formation de dépôts d'aluminium pur (**sous forme liquide**) au fond de la cellule [4].



Figure II.1 : Aluminium [5].

II.3. Historique de Aluminium

Ce n'est qu'au début du **19^e siècle** que l'aluminium a été isolé. Il se trouve naturellement dans la majorité des roches, argiles et sols, mais il est toujours lié à l'oxygène et à d'autres éléments. On ne le trouve que sous forme de combinaison dans d'autres matières : **Silicates. et oxydes**. Ces derniers sont extrêmement stables et, conséquemment, plusieurs années de recherche et d'efforts ont été requises pour « isoler » le métal. Des civilisations anciennes employaient, entre autres, des argiles riches en Aluminium (**Silicates d'Aluminium Hydratés**) pour la fabrication de poteries. Durant l'Antiquité, les Égyptiens et les Babyloniens utilisaient des sels d'Aluminium pour fabriquer des teintures et des médicaments (traitements contre l'indigestion, pâte dentifrice).

Depuis sa découverte par le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville en 1854, qui a présenté un petit lingot produit chimiquement à l'Académie des Sciences, l'Aluminium a connu une évolution remarquable.

En 1886, deux jeunes chercheurs, Paul Toussaint Héroult en France qui a enregistré son brevet le 23 avril de cette année-là, et Charles Martin Hall aux États-Unis qui a déposé le sien le 9 juillet 1886. Ces derniers, qui mènent leurs recherches en toute autonomie et sans avoir connaissance des travaux individuels des autres, déposent chacun leur brevet respectif relatif à la production d'Aluminium. En effet, ils constatent que l'oxyde d'Aluminium, ou Alumine, se dissout

dans la cryolite à l'état fondu. et peut par la suite être décomposé par électrolyse, en soumettant à un courant électrique intense, pour produire le métal brut en fusion. Cette découverte va provoquer un véritable « boom » pour l'Aluminium.

Le processus Hall-Héroult reste toujours le fondement de la production économique d'Aluminium actuelle, bien qu'il ait bénéficié de plusieurs améliorations techniques au fil du temps. Les premières usines industrielles de production d'Aluminium par électrolyse ont été établies en 1888. Depuis 1914, « sous l'impulsion » des exigences de la première guerre mondiale, l'Aluminium, grâce à sa légèreté, s'impose comme un matériau essentiel dans le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale (avions, dirigeables). C'est en 1947 que le métal fait son apparition sur les premières automobiles de production. sur les lignes de production de la Dyna Panhard. En 1900, la production d'Aluminium s'élevait à **8000 tonnes** par an. En 1920, ce chiffre a considérablement augmenté pour atteindre **128000 tonnes**. En 1946, elle a encore progressé et s'est établie à **681000 tonnes**. Enfin, en 1997, elle a atteint un impressionnant total de **22000000 de tonnes**.

II.3. Propriété de Aluminium

Après avoir examiné le concept et l'histoire de l'Aluminium, il est maintenant approprié d'étudier ses différentes propriétés essentielles qui le distinguent, en particulier dans le domaine des conducteurs électriques, lesquelles déterminent à leur tour sa capacité à répondre aux exigences techniques et économiques du transport de l'électricité.

II.3.1. Légèreté

L'Aluminium est un métal extrêmement léger avec une **densité spécifique de 2,7 g/cm³**, ce qui représente approximativement un tiers de la densité de l'**acier (7-8 g/cm³)** et du **cuivre (8,96 g/cm³)** [6]. L'expérience démontre que l'allègement réalisé grâce à une structure en alliance d'Aluminium peut aller jusqu'à **50 %** en comparaison avec une structure semblable en acier classique ou inoxydable. L'Aluminium est largement employé dans le secteur des transports ; depuis 1930, tous les avions sont fabriqués à partir d'alliage d'Aluminium. Ils représentent au moins **75 %** du poids à vide des avions de dernière génération.

II.3.2. Conductivité thermique

Avec une conductivité thermique de **237 W.m⁻¹.K⁻¹ (à 20 °C)**, contre **390 W.m⁻¹.K⁻¹ (à 20 °C)** pour le cuivre, ce métal se révèle être le plus efficace parmi les métaux fréquemment employés en matière de conductivité thermique. En matière de transfert thermique, l'utilisation de l'Aluminium demeure toujours.

Prévue, à condition bien sûr que les conditions environnantes soient favorables, que ce soit pour des interactions liquide-liquide ou liquide-gaz. Les échangeurs en Aluminium ont de multiples usages : automobiles, engins lourds, refroidisseurs d'air, systèmes de climatisation, désalinisation de l'eau de mer, énergie solaire et systèmes de refroidissement dans le domaine de l'électronique.

II.3.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'Aluminium atteint **37,7 × 10⁶ S.m⁻¹**, ce qui représente environ deux tiers de celle du cuivre, qu'il a largement remplacé dans diverses applications électriques. Les câbles aériens en Aluminium ou en alliage d'aluminium de la marque « **Almelèc** » sont utilisés. Disponibles en France depuis 1927, ces produits sont utilisés à travers le globe. L'Aluminium est également largement employé dans les points de raccordement des réseaux aériens à haute et moyenne tension. L'aluminium est employé dans la fabrication des câbles téléphoniques, terrestres et sous-marins, ainsi que pour la conception de postes blindés isolés sous hexafluorure de **soufre (SF₆)**, afin d'assurer une protection contre les champs électriques ou magnétiques [7].

II.3.4. La tenue à la corrosion

L'Aluminium et ses alliages ont une excellente résistance à la corrosion. Cela est dû à la présence d'une couche continue d'oxyde d'Aluminium, appelée alumine, dont la formule chimique est Al_2O_3 . Cette couche rend le métal passif face à son environnement.

Lorsque l'Aluminium est exposé à l'air ou à l'eau, cette couche se forme immédiatement. Elle se reforme également au contact de l'air pendant les processus de mise en forme, tels que le pliage, le découpage ou le perçage. Cela se produit également lors du soudage, pendant la phase de solidification du cordon de soudure. La résistance à la corrosion de l'Aluminium est remarquable. C'est pourquoi il est de plus en plus utilisé dans divers domaines, tels que le bâtiment, les transports, l'aménagement du territoire et la construction navale [8].

II.3.5. Aptitude aux traitements de surface

Les traitements de surfaces sur l'Aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels :

1) Renforcement de la résistance à la corrosion

Des procédés tels que l'anodisation ou la chromatisation augmentent l'épaisseur de la couche d'oxyde naturelle (Al_2O_3) pour assurer une protection contre l'oxydation et les éléments atmosphériques.

2) Renforcement de la dureté et de la résistance à l'abrasion

L'anodisation à forte épaisseur ou les traitements chimiques (**phosphatation**) renforcent la surface, ce qui est parfait pour les composants mécaniques exposés à l'abrasion.

3) Amélioration de l'adhérence des revêtements

La surface est préparée pour une meilleure adhérence des peintures, des vernis ou des adhésifs grâce à des processus tels que le décapage, le dégraissage ou la phosphatation.

4) Finition décorative et esthétique

Des techniques telles que le polissage, le brossage, le sablage ou la coloration électrolytique apportent éclat, texture ou couleur pour des utilisations en vue (**architecture, design**).

5) Amélioration des caractéristiques fonctionnelles

Des revêtements spécialisés (**comme la métallisation et les vernis isolants**) améliorent la conductivité électrique, l'isolation thermique ou la résistance chimique.

II.3.6. Recyclage

L'Aluminium est vraiment intéressant à recycler, surtout si on regarde les aspects énergétiques et économiques. Pour recycler l'Aluminium, il ne faut que 5 % de l'énergie nécessaire pour le produire à partir du minerai. En pratique, les déchets d'Aluminium ont une valeur commerciale bien supérieure à celle des métaux ferreux, car une tonne d'Aluminium recyclée permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. Par ailleurs, l'aluminium possède l'avantage remarquable d'être recyclable presque indéfiniment sans altération significative de ses propriétés physiques et mécaniques, ce qui en fait un matériau particulièrement adapté aux exigences du développement durable et de l'économie circulaire [9].

II.3.7. Facilité de mise en œuvre

L'Aluminium se prête facilement :

- Aux usinages de toute sorte (tournage, fraisage, perçage, sciage, etc.) .
- Aux techniques de mise en forme (forgeage, emboutissage, repoussage, pliage, moulurage, cintrage, étirage, etc.)

[1] Pour les assemblages divers : le collage, le visage, le rivetage, le soudage, le brasage, le câblage [10].

II.3.8. Aptitudes au soudage

Le soudage devient facile si l'on considère la présence de la couche d'alumine protectrice. Ainsi, les techniques employées sont celles sous atmosphère contrôlée (**TIG, MIG**) ou sous vide (**faisceaux d'électrons**). Cependant, il n'y a pas de problème concernant les alliages non trempants, par

Il pourrait y avoir des problèmes liés aux alliages de trempe rapide (**série 2000**). Il pourrait également y avoir des risques de corrosion par feuilletage après la soudure d'alliages de la **série 7000 (Al-Zn)**.

II.4. Alliage d'Aluminium

Un alliage est un matériau métallique composé d'au moins deux éléments chimiques, dont au moins un métal. L'alliage étudié ici est composé d'aluminium, de cuivre, de zinc et de magnésium (**série 6xxx**) [11]. L'aluminium est utilisé de manière répandue. C'est parce que l'aluminium pur (**série 1000**) est relativement léger.

L'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs. Voici quelques exemples :

- l'industrie aérospatiale.
- les voitures de sport.

Les alliages d'aluminium sont classés en grandes séries en fonction de leurs éléments d'addition principaux. Ils sont désignés par un nombre à quatre chiffres, dont le premier indique le numéro de la série.

II.4.1. Alliages à durcissement par écrouissage et par mise en solution solide

1. Série 1xxx– Aluminium pur

L'aluminium pur contient plus de 99 % d'aluminium. À l'état recuit, ses propriétés mécaniques sont faibles, mais il présente une très bonne résistance à la corrosion, une excellente conductibilité thermique et électrique, une bonne soudabilité ainsi qu'une très bonne tenue aux basses températures [12].

- Exemples d'alliages :

1050, 1100 utilisés notamment dans l'emballage, les câbles électriques et les échangeurs thermiques.

2. Série 3xxx – Alliages aluminium-manganèse (Al-Mn)

Les propriétés mécaniques de ces alliages sont améliorées par la présence de précipités de la phase **Al₆Mn**. Ils offrent une bonne aptitude à la mise en forme, une bonne résistance à la corrosion et sont soudables.

- Exemples d'alliages :

3003, 3004 couramment employés pour les ustensiles de cuisine, les équipements de chauffage et de ventilation.

3. Série 5xxx– Alliages aluminium-magnésium (Al-Mg)

L'ajout de magnésium à l'aluminium permet d'améliorer la résistance mécanique par mise en solution solide. Ces alliages présentent une bonne aptitude à la mise en forme, une excellente soudabilité, une bonne résistance à la corrosion (notamment en milieu marin) et une bonne aptitude à l'anodisation.

- **Exemples d'alliages**

5083, 5754 largement utilisés dans la construction navale, les citernes, les réservoirs et les structures soudées.

II.4.2. Alliages d'aluminium à durcissement structural

4. Série 2xxx – Alliages aluminium-cuivre (Al-Cu)

Le durcissement est obtenu par précipitation contrôlée de la phase Al_2Cu . Ces alliages présentent une bonne résistance mécanique et une bonne usinabilité, mais leur résistance à la corrosion est médiocre et ils sont difficilement soudables.

- **Exemples d'alliages**

2024, 2017 largement utilisés dans l'aéronautique pour les structures d'avions, les ailes et les fuselages, ainsi que dans les pièces mécaniques fortement sollicitées.

5. Série 6xxx – Alliages aluminium-magnésium-silicium (Al-Mg-Si)

Le durcissement est assuré par précipitation contrôlée de la phase Mg_2Si . Ces alliages offrent une bonne aptitude à la mise en forme à chaud et à froid, une bonne résistance à la corrosion et sont soudables.

- **Exemples d'alliages**

6061, 6063 très répandus dans les profilés architecturaux, les châssis, les ponts, les structures soudées et les pièces extrudées.

6. Série 7xxx – Alliages aluminium-zinc-magnésium (Al-Zn-Mg), avec addition possible de cuivre

Le durcissement provient de la précipitation contrôlée de la phase $MgZn_2$ (phase η). Ces alliages possèdent de très bonnes propriétés mécaniques, parmi les plus élevées de tous les alliages d'aluminium. Leur résistance à la corrosion et leur soudabilité sont moyennes.

- **Exemples d'alliages**

7075, 7050 utilisés dans l'industrie aérospatiale pour les longerons d'ailes, les fuselages très sollicités, ainsi que dans les voitures de sport, les équipements de montagne et les outillages haute performance.

7. Série 4xxx (Aluminium-Silicium)

Principalement utilisés comme alliages de fonderie. Leur composition est proche de l'eutectique (**12,7 % de silicium**), souvent affinée par ajout de sodium. Ils présentent des propriétés mécaniques modestes et une faible ductilité, mais offrent une excellente coulabilité et une bonne résistance à la corrosion.

8. Série 8xxx

Cette série regroupe plusieurs familles d'alliages aux propriétés spécifiques :

- 1 Fe : destinés à l'emballage ménager comme le papier d'aluminium.
- Al Sn : caractérisés par un faible coefficient de frottement.
- Al Li : plus légers que les alliages classiques et présentant un module d'Young plus élevé.
- **Exemples d'alliages**

8090 utilisé sur l'Airbus **A330/A340** (cadres de portes, longerons), aussi sur des réservoirs de fusée (**Delta II**).

Pour compléter l'identification des alliages d'aluminium, une lettre indiquant le traitement thermique appliqué à l'alliage (ou son état primaire) est ajoutée après sa désignation (tableau II.1). Il est possible de subdiviser ces états fondamentaux. Pour distinguer chaque subdivision, un nombre est intégré à la désignation de l'alliage, après la lettre qui indique l'état fondamental de l'alliage [13]. Les alliages à durcissement structural sont identifiés par la lettre T. Le tableau II.2. précise le sens du premier chiffre qui indique le traitement thermique auquel les alliages d'aluminium ont été soumis lors de leur fabrication [15].

Tableau II.1 : Désignation des états métallurgiques de base [22].

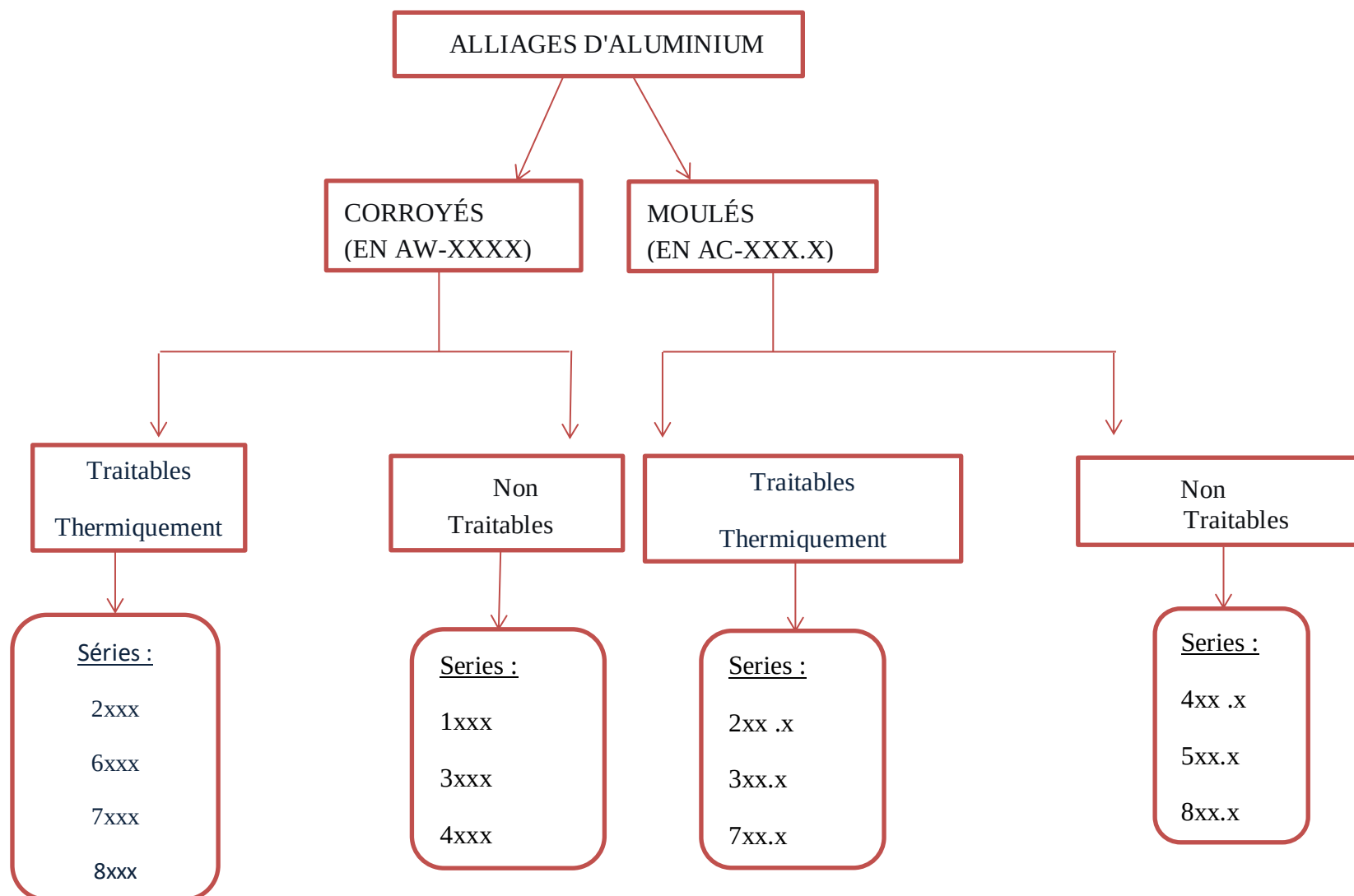
F	Etat brut de fabrication
O	Etat recuit
H	Etat écroui et éventuellement restauré ou stabilisé
W	Etat trempé non stabilisé
T	Etat durci par traitement thermique

Tableau II.2 : Traitements thermiques des alliages d'aluminium [15].

Désignation	Descriptif du traitement
T1	Pas de mise en solution, maturation
T2, T6	Mise en solution, trempe, revenu
T3	Mise en solution, trempe, écouissage, maturation
T4	Mise en solution, trempe, maturation
T5	Pas de mise en solution, revenu
T7	Mise en solution, trempe, sur revenu
T8	Mise en solution, trempe, écouissage, revenu
T9	Mise en solution, trempe, revenu, écouissage

II.5. Classification des alliages d'Aluminium

Les alliages d'Aluminium sont classés selon le processus suivant :



II.6. Propriétés des alliages d'Aluminium

Tableau II.3. : Propriétés des alliages d'Aluminium

Propriété	Description
Densité	Légers, avec une densité comprise entre 2,55 et 2,85 g/cm³
Rapport résistance/poids	Excellent, ce qui les rend très utilisés dans les structures légères
Résistance à la corrosion	Bonne à très bonne pour les séries 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx ; limitée pour les séries 2xxx et 7xxx (nécessitent une protection)
Formabilité	Variable selon l'alliage et son état métallurgique : excellente à l'état recuit , mais faible à l'état trempé vieilli
Choix de l'alliage	Il est indispensable de consulter la fiche technique de l'alliage et de son état pour chaque application

II.7. Applications de l'aluminium et de ses alliages

Nous avons précédemment souligné l'importance cruciale de l'aluminium, représentant **8 %** de la croûte terrestre. Cette importance découle de ses diverses et uniques caractéristiques, y compris sa remarquable résistance à la corrosion, sa densité réduite et sa notable résistance mécanique.

De nos jours, l'aluminium, qui était à l'origine utilisé dans la joaillerie, trouve sa place dans de nombreux secteurs grâce à ses méthodes de production, notamment par le biais d'alliages qui lui donnent des caractéristiques thermiques, électriques et mécaniques exceptionnelles.

II.7.1. Transports

Le premier domaine d'application de l'aluminium qui vient à l'esprit est incontestablement celui du transport.ou, Les alliages de **la série 2xxx (Al-Cu)** et **7xxx (Al-Zn)** prédominent dans le secteur aéronautique pour les fuselages, les ailes et les structures (par exemple : **Airbus A350, Boeing 787**). Dans le domaine de l'automobile, les alliages **5xxx (Al-Mg)** et **6xxx (Al-Mg-Si)** sont utilisés pour la fabrication des châssis, des capots et des roues, ce qui contribue à réduire le poids des véhicules électriques. Dans le domaine naval, résistance à la corrosion marine.[\[14\]](#)

II.7.2. Construction et architecture

Des alliages **5xxx** sont utilisés pour les façades, les menuiseries, les toits et les structures porteuses (caractérisés par une faible inflammabilité et une grande durabilité). Extrusions pour profilés architecturaux contemporains (par exemple : fenêtres, vérandas).

II.7.3. L'emballage

L'industrie de l'emballage consomme une grande quantité d'aluminium. Effectivement, l'aluminium est employé dans la production de boîtes de conserve, de canettes à boissons, d'aérosols et de capsules de bouchage. Il est aussi fabriqué en feuilles extrêmement minces pour assurer la protection.

II.7.4. Construction aérierentique

Comme mentionné précédemment, l'aluminium est largement utilisé dans le secteur des transports, en particulier pour la construction aéronautique où il a permis d'importants progrès. Actuellement, l'aluminium représente approximativement **80 %** du poids d'un avion (fig. II.2), proportion qui tend à se réduire avec l'émergence de nouveaux matériaux composites commençant à succéder à l'aluminium dans certaines utilisations aéronautiques.

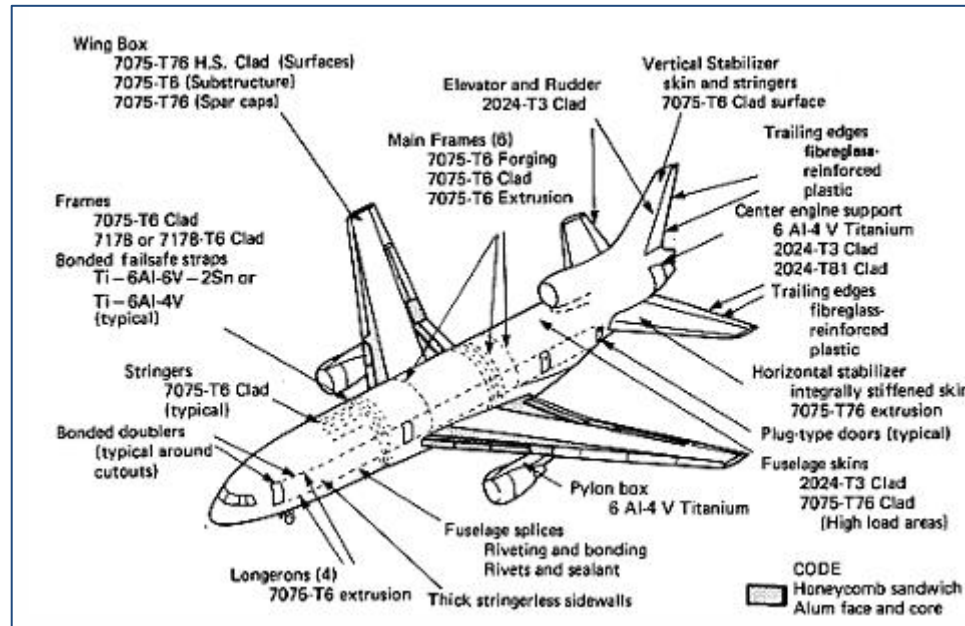


Figure II.2 : Différents types d'alliage d'Aluminium utilisés dans la construction d'un avion civil et leur localisation [15].

II.7.5. Construction électronique et électricité

L'aluminium, en termes de volume, est largement utilisé dans l'industrie, particulièrement dans la construction électrique où il est privilégié pour les câbles grâce à son remarquable rapport performance/poids : **1 kg** d'aluminium correspond à **2 kg** de cuivre pour une résistance et une longueur identiques, procurant ainsi un avantage considérable en termes de poids et d'économie financière. Son excellente conductivité électrique (approximativement **61%** de celle du cuivre en termes de poids), sa légèreté, son absence de caractéristiques magnétiques et sa résistance innée à la corrosion le rendent parfait pour les lignes de transport d'énergie à haute et moyenne tension [16].

Ce métal s'ouvre aussi à de nouveaux marchés : les fils pour l'installation domestique, les câbles flexibles et les fils isolés pour le bobinage.

On utilise les nuances suivantes :

1. L'aluminium pur 1350 et 1370.
2. L'alliage 1340 destiné aux fils fins émaillés pour le bobinage.
3. L'alliage 1310 est utilisé pour la fabrication de fils fins destinés aux câbles flexibles.
4. L'alliage 6101, commercialement nommé « **Almélec** », est utilisé sous forme de fils traités (trempés, écrouis, revenu-restaurés), ce qui permet la fabrication de câbles à haute résistance en substitution des câbles aluminium-acier.

Depuis 1985, une version distincte de l'alliage **6101**, appelée « **Almelo** », est disponible sur le marché pour les fils destinés à l'installation domestique. Ce dernier est spécialement formulé pour offrir des fils avec des propriétés mécaniques facilitant une installation aisée : pliage et tirage dans les conduits, Installation dans les équipements [16].



Figure II.3 : Conducteur aérien .

II.8. Alliage d'aluminium série 6XXX

II.8.1. Présentation général

Les alliages Al-Mg-Si de la série 6xxx sont des alliages structuraux destinés à être durcis . Les principaux composants qui s'ajoutent sont le magnésium et le silicium. Il existe une grande variété d'alliages d'aluminium dans la série 6xxx. Ils se distinguent par leur contenu. en magnésium (fluctuant entre 0,3 et 1,5%) et leur concentration en silicium (variant de 0,3 à 1,4%) [16] .

II.8.2. Éléments d'alliage dans les conducteurs d'alliages 6XXX

Les alliages de la série 6000 sont couramment employés pour l'extrusion, en raison de leur équilibre optimal entre résistance, résistance à la corrosion, capacité de soudage, machinabilité et qualité de surface. C'est pourquoi les alliages 6xxx sont employés dans une multitude d'applications, y compris le transport, l'architecture, les produits de consommation et l'électricité. Dans cette série, le silicium (**Si**) et le magnésium (**Mg**) constituent les éléments d'alliage majeurs.

II.8.2.1. Effets spécifiques du silicium

L'impact le plus notable du silicium dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des propriétés de mise en forme (ou moulage).Après avoir ajouté du cuivre à l'alliage **Al-Mg-Si**, l'existence de cuivre dans la structure ne dépend pas seulement de la teneur en cuivre, mais est également affecté par la teneur en magnésium et en silicium. Lorsque la teneur en cuivre est faible, $\mu(\text{Mg}):\mu(\text{Et})=1,73:1$, le Mg 2 La phase Si est formée, et tout le cuivre est solidement dissous dans la matrice; lorsque la teneur en cuivre est élevée, $\mu(\text{Mg}):\mu(\text{Et}) < 1.08$, le **W(Al₄CuMg 5 Et 4)** la phase peut être formée, et le cuivre restant formera **CuAl₂**; lorsque la teneur en cuivre est élevée, $\mu(\text{Mg}):\mu(\text{Et}) > 1.73$, **S(Al₂CuMg)** Et **CuAl 2** phase. La phase W est différente de la phase S, Qui 2 phase et Mg 2 Si phase. A l'état solide, seule la dissolution partielle participe au renforcement, et son effet fortifiant n'est pas aussi important que celui du Mg 2 Si phase.

L'ajout de cuivre à l'alliage améliore non seulement considérablement la plasticité de l'alliage pendant le travail à chaud, mais augmente également l'effet de renforcement du traitement thermique. Il peut également supprimer l'effet d'extrusion et réduire l'anisotropie de l'alliage due à l'ajout de manganèse [17].

II.8.2.2. Effet de Magnésium

Le développement de la résistance et de la dureté lors des traitements thermiques des alliages Al-Si repose sur l'utilisation du magnésium. Toutefois, l'introduction de Mg entraîne une réduction significative de la conductivité électrique. De ce fait, un compromis est nécessaire entre la propriété mécanique et la conductivité électrique.

Il est généralement employé dans les alliages Al-Si plus sophistiqués, qui intègrent le cuivre, le nickel et d'autres composants dont l'objectif est aussi de renforcer l'alliage. La phase Mg_2Si , qui confère de la dureté à l'alliage, présente une solubilité maximale de 0,70 % en magnésium. Au-delà de ce seuil, aucun renforcement supplémentaire n'est possible, et un adoucissement de l'alliage pourrait même se produire [18].

Dans l'alliage d'aluminium de série 6, les oligo-éléments ajoutés incluent le manganèse, le chrome et le titane. Par ailleurs, les éléments d'impureté principaux sont le fer, le zinc, etc., et leurs rôles respectifs sont les suivants [17] :

- Une excellente capacité à la déformation à chaud, notamment par le biais du laminage, du filage et du matriçage, simplifie leur façonnage.
- Les alliages de la série 6xxx représentent 80 % de la fabrication des profilés extrudés en aluminium.
- L'obtention de l'état métallurgique **T4**, correspondant à l'état métallurgique de **l'alliage 6101** après la production, est jugée assez facile à réaliser.
- Des propriétés mécaniques plutôt bonnes à l'état trempé revenu (**T6**).
- Une excellente résistance à la corrosion qui peut être accentuée par des procédés d'anodisation.
- La capacité à obtenir de jolies finitions de surface directement issues de la presse à filer, qui peuvent par la suite être perfectionnées par un polissage et anodisation.
- Ces alliages présentent une bonne soudabilité, mais requièrent l'utilisation de matériaux supplémentaires pour effectuer un assemblage avec d'autres alliages d'aluminium de diverses familles.
- Les alliages **Al-Mg-Si** sont efficaces à basse température, mais leurs caractéristiques mécaniques et

électriques peuvent se dégrader davantage [16-19].

II.9. Procédé de tréfilage des fils conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX

La déformation plastique des métaux, qu'elle soit effectuée à chaud ou à froid, dépend fortement des propriétés souhaitées et du procédé utilisé. Les alliages d'aluminium de la **série 6XXX**, qui ont une structure cristalline cubique à faces centrées, sont bien adaptés à la déformation en raison de leurs nombreux systèmes de glissement.

Dans les matériaux polycristallins, la déformation plastique se produit lorsque la contrainte appliquée est supérieure à la limite d'élasticité, ce qui entraîne le mouvement des dislocations. Ce mécanisme est utilisé dans les procédés de mise en forme, comme le tréfilage à froid des fils conducteurs.

Le tréfilage à froid permet de réduire le diamètre des fils tout en augmentant leur résistance mécanique grâce à l'écrouissage. Cependant, les fils obtenus individuellement ne répondent pas toujours aux exigences de l'industrie. C'est pourquoi ils sont assemblés par câblage.

L'opération de câblage consiste à combiner plusieurs fils en une structure unique pour améliorer la résistance mécanique, la flexibilité et les performances du conducteur final. La maîtrise des paramètres mécaniques et structuraux à chaque étape est essentielle pour optimiser la mise en forme et garantir l'intégrité du produit.

II.9.1. Définition et principe

Le tréfilage est une technique d'usinage par déformation plastique. Cette opération consiste à étirer à froid un fil métallique en le forçant à travers une filière (outil conique calibré) à l'aide d'une tréfileuse, afin de réduire progressivement son diamètre jusqu'à la valeur souhaitée. Le tréfilage s'applique couramment à l'acier et à l'aluminium. Les fils ainsi obtenus peuvent être utilisés dans divers domaines, notamment en broderie ou en rubanerie.[\[20\]](#)

II.9.2. Présentation de la filière

La filière est un outil de précision fabriqué en carbure de tungstène ou en diamant poly cristallin, capable de supporter des contraintes élevées et l'abrasion.

Elle se compose de plusieurs zones distinctes :

- **L'entrée** : elle guide le fil et assure son centrage.
- **Le cône de travail** (zone de réduction) : c'est dans cette zone que se produit la déformation plastique.
- **La zone de calibrage** : elle permet de fixer le diamètre final et la qualité de surface.
- **La sortie** : son rôle est de réduire les contraintes résiduelles [\[21\]](#).

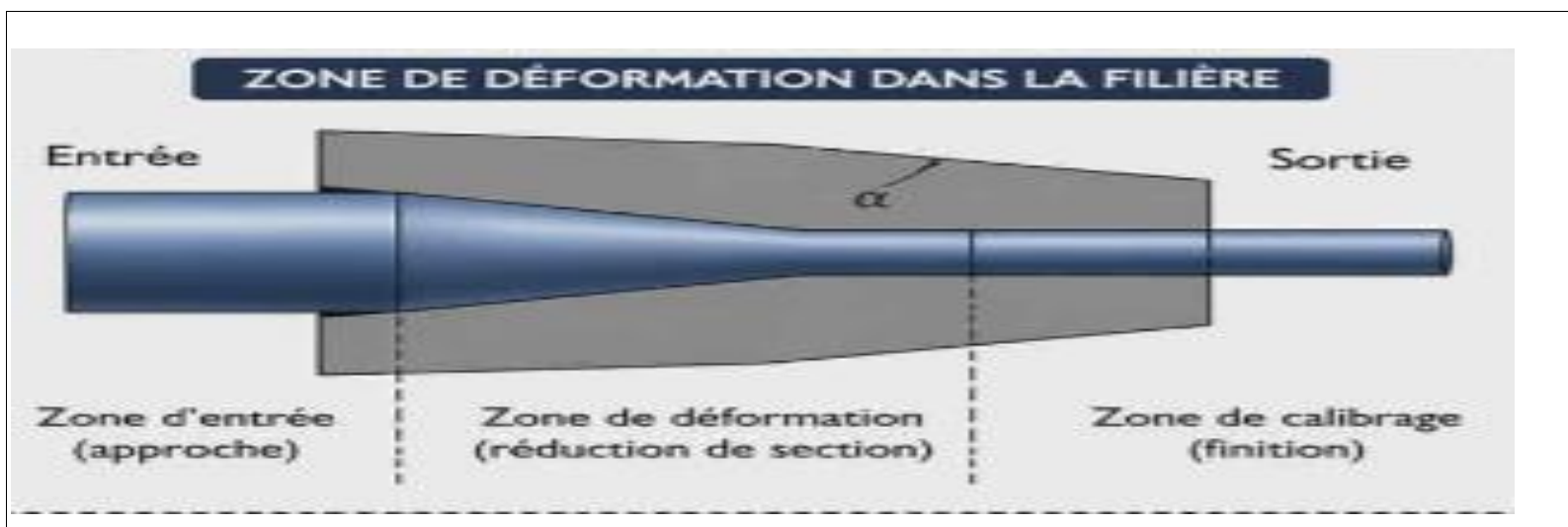


Figure II.4 : Déformation dans la filière

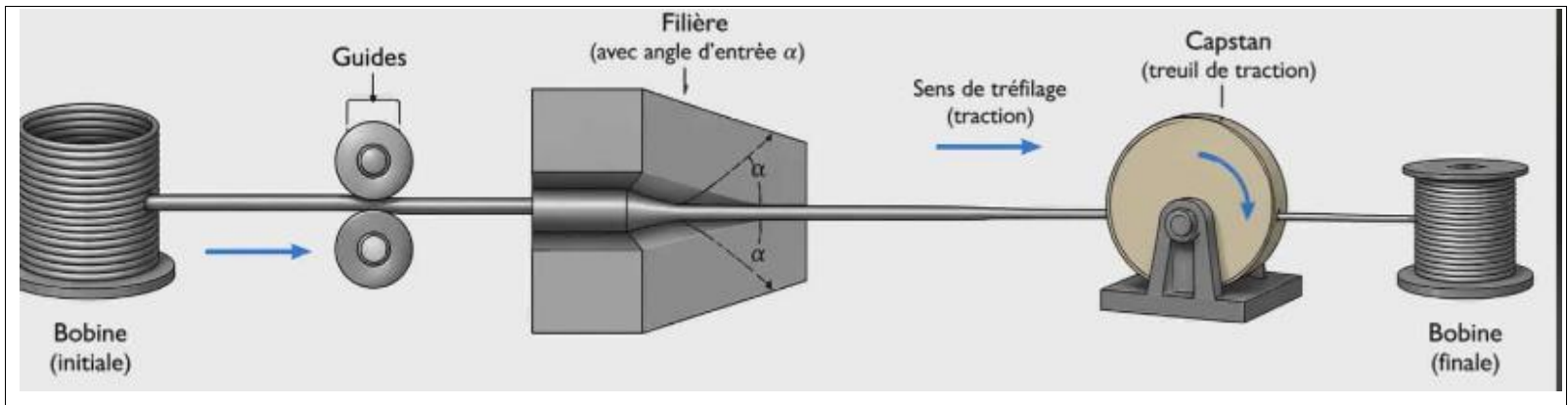


Figure II.5: Schéma explicative de tréfilage.

II.9.2.3. Paramètres de la filière

1. **Angle du cône de travail (2α)** : il influence la répartition des contraintes et l'effort de tréfilage. Un angle trop faible allonge la zone de déformation, tandis qu'un angle trop élevé crée des contraintes excessives en surface.
2. **Longueur de la zone de calibrage** : elle détermine la stabilité dimensionnelle et l'état de surface du fil. Une longueur insuffisante dégrade la précision ; une longueur excessive augmente les frottements.
3. **Rapport de réduction (section entrée / section sortie)** : il conditionne l'intensité de la déformation plastique par passe [22].

II.9.2.4. Paramètres liés au matériau

- **Diamètre initial du fil** : il détermine le nombre de passes nécessaires pour atteindre le diamètre final.
- **Nature du métal tréfilé** : acier, cuivre, aluminium, alliages... Chaque matériau a sa propre limite d'écoulement et sa sensibilité à l'écrouissage.
- **État de surface et préparation** : un fil propre, lubrifié et sans défauts superficiels se tréfile plus facilement.
- **État de surface et préparation** : un fil propre, lubrifié et sans défauts superficiels se tréfile plus facilement. [23]

II.9.2.5. Paramètres mécaniques

- **Effort de tréfilage** : force nécessaire pour tirer le fil à travers la filière. Il ne doit pas dépasser la résistance à la traction du fil sous peine de rupture.
- **Tension du fil** : doit être contrôlée pour éviter les vibrations ou l'étirement excessif. [24]

II.9.2.6. Paramètres opératoires

- **Vitesse de tréfilage** : une vitesse élevée augmente la productivité mais aussi l'échauffement et le risque de rupture.
- **Température** : la chaleur générée par déformation et frottements doit être évacuée (refroidissement, lubrification).
- **Lubrification** : elle réduit les frottements, limite l'usure de la filière et améliore l'état de surface. [25]

Le tréfilage provoque un phénomène d'écrouissage qui se caractérise par une augmentation de la densité des dislocations. Les grains se déforment et s'allongent dans la direction de traction. Cela entraîne une anisotropie des

propriétés mécaniques. Ces transformations microstructurales font augmenter la limite d'élasticité et la résistance à la traction. Cependant, elles provoquent également une diminution de la ductilité et l'apparition de contraintes internes.

Pour corriger ces effets, les fils en alliages Al-Mg-Si subissent un traitement thermique après le tréfilage. Ce traitement est réalisé dans un four industriel. Il s'agit généralement d'un recuit de restauration ou d'un vieillissement contrôlé. Ce dernier est adapté aux alliages **Al-Mg-Si**.

Les conditions opératoires typiques de ce traitement thermique sont une température comprise entre **160 et 165 degrés Celsius**. La durée de maintien est de **6 à 6,5 heures**. Ensuite, un refroidissement lent à l'air est appliqué. Ces paramètres sont soigneusement choisis pour limiter la perte de résistance mécanique. Ils visent également à améliorer la ductilité et à stabiliser les propriétés du matériau.

II.9.3. Propriétés requises pour les conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX

Les alliages Al-Mg-Si (**série 6xxx**) ont été largement utilisés pour la fabrication des conducteurs pour les lignes électriques aériennes moyenne, haute et très haute tension (fig. II.6). Ils contiennent des faibles additions de magnésium et de silicium afin d'améliorer certaines propriétés. L'addition de ces éléments permet d'avoir une bonne combinaison entre les propriétés mécaniques et électriques par rapport aux autres alliages d'aluminium.

Dans le domaine de l'ingénierie électrique, la conductivité électrique est la caractéristique primordiale des matériaux métalliques conducteurs. Cependant, il arrive fréquemment que les caractéristiques mécaniques (seuil d'élasticité et capacité de traction) soient tout aussi essentielles. Par exemple, l'aluminium pur présente une conductivité électrique très élevée (62 % IACS (norme internationale de cuivre recuit)), mais une résistance à la traction très faible [24].

Les conducteurs en aluminium et ces alliages doivent pouvoir être développés en toute sécurité pour présenter une bonne combinaison de conductivité électrique élevée, des propriétés mécaniques élevées et de résistance élevée au fluage pour la stabilité de contact [25 - 26].

D'abord, une forte conductivité électrique est généralement recherchée pour les matériaux conducteurs. Une conductivité électrique insuffisante provoquera d'importantes pertes d'énergie dans l'application et causera des problèmes de température.

II.9.4. Critères de la norme européenne

Selon la norme EN 50183 [27], pour les lignes à haute tension construites avec l'alliage d'aluminium 6101, la résistivité électrique ne devrait pas excéder 32.6 nΩ.m, et pour un fil unique, elle serait de 32.9 nΩ.m.

De plus, les conducteurs en aluminium allié devraient posséder des caractéristiques mécaniques adéquates pour satisfaire aux exigences minimales exigées par les conditions d'utilisation dans les applications électriques.

Conformément à la norme EN 50183 [27], la résistance à la traction minimale requise pour un conducteur est de 342 MPA. Bien que ce chiffre soit notablement plus élevé que celui de l'aluminium, il est nécessaire de dépasser 325 MPA pour un fil unitaire.

Une autre caractéristique requise pour l'utilisation du conducteur en aluminium et de ses alliages est une forte résistance au fluage [28]. Le fluage est une déformation durable qui découle d'une pression exercée sur un matériau pendant une durée prolongée.

Bien que la propriété de fluage soit très importante pour les conducteurs en alliage d'aluminium, il existe peu de références pour une étude systématique des propriétés de fluage des alliages conducteurs en alliages d'aluminium **6xxx** et surtout l'effet des précipités sur le fluage. On note que le problème le plus important est l'optimisation entre les propriétés mécaniques et la conductivité électrique du matériau de conducteur.



Figure II.6 : Conducteur aérien en alliage d'aluminium 6101.

II.9.5. Propriétés électriques des conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX

Lors de l'élaboration d'alliages conducteurs adéquats, l'aspect central à considérer est la conductivité électrique. La conductivité électrique se réfère à la compétence d'un matériau à conduire un courant d'électrons. La microstructure a un impact crucial sur la conductivité électrique.

Cette propriété est liée aux matériaux métalliques, car elle dépend de la diffusion des électrons suite à des perturbations dans la structure cristalline atomique, les atomes de soluté et les défauts cristallins [24]. La formation de précipités a eu un imp.

Plusieurs chercheurs [29-30] ont examiné le lien entre la résistivité électrique et la précipitation des alliages Al-Mg-Si. Ils ont observé que la formation d'agrégats augmentait la résistivité de l'alliage au début du processus de vieillissement, mais finalement, la résistivité diminuait avec l'âge maximal. Les agrégats et les précipités fins ont un puissant impact sur la diffusion des électrons [31-32] acte sur la réduction de la conductivité électrique.

Li-xin et al. [33] ont examiné l'impact des phases métastables β'' , fréquemment présentes dans les alliages électriques **Al-0.96Mg2Si (6101)**, sur la résistivité électrique lors du processus de vieillissement. Les auteurs ont établi une relation semi-quantitative. Entre les dépôts et la résistivité électrique.

II.9.6. Propriétés mécaniques des conducteurs en alliage d'aluminium 6XXX

Globalement, l'alliage 6101 offre l'avantage d'avoir une résistance mécanique supérieure par rapport à l'aluminium non **allié AA 1370**, tout en ayant une conductivité électrique seulement inférieure de **10 à 15 %**. La résistance mécanique des métaux est renforcée par la présence d'atomes de soluté et de défauts dans leur structure cristalline, tandis que leur conductivité électrique s'en trouve réduite. L'aluminium pur, le durcissement par contrainte ou le renforcement par précipitation améliorent ses caractéristiques mécaniques (fig. II.7), tout en provoquant une réduction de sa conductivité électrique. La sélection appropriée des matériaux pour les lignes de transport d'énergie représente un compromis entre leurs caractéristiques mécaniques et électriques [24].

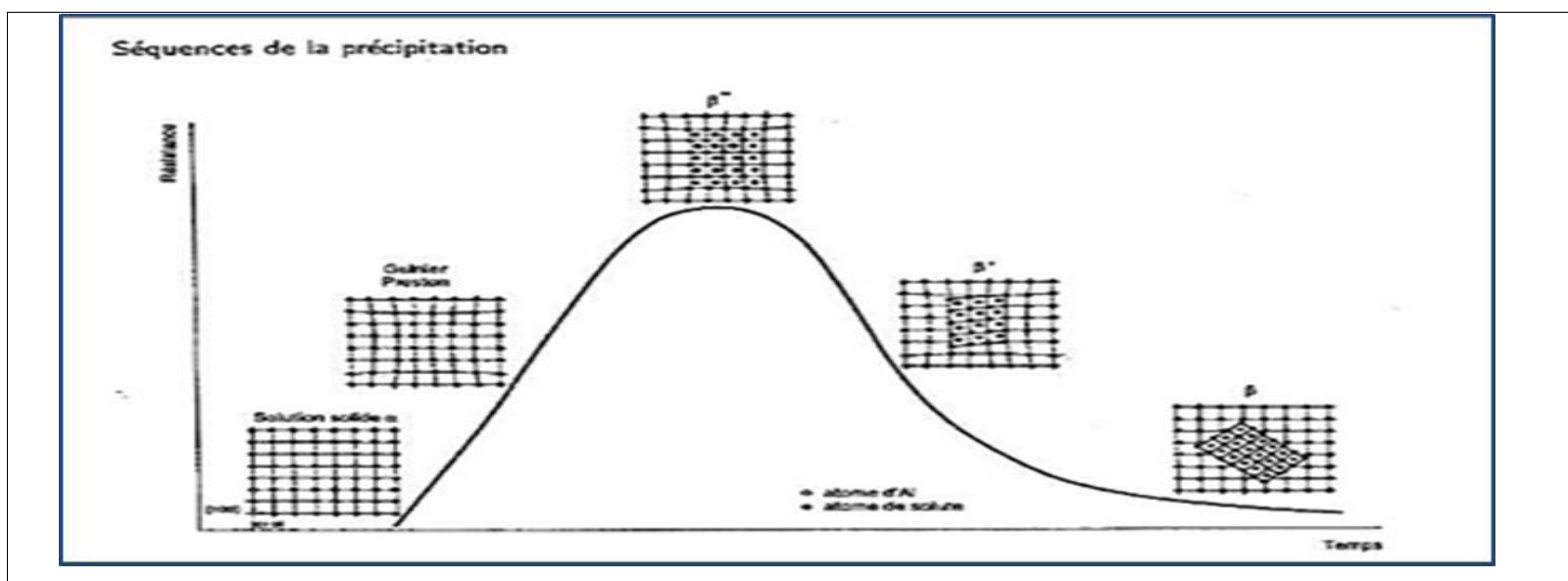


Figure II.7 : Evolution de la résistance mécanique en fonction des précipités

Durcissant au cours d'un revenu pour la série 6xxx [34].

II.9.7. Propriétés microstructurales de la série 6XXX

Il a été précédemment indiqué que les alliages de la **série 6xxx** sont des alliages soumis à un durcissement structural. Cela implique que ses caractéristiques mécaniques et électriques sont régulées par un processus de durcissement structural qui comprend trois phases consécutives. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023.

- Un chauffage au-delà de la température de solvus, suivi d'un maintien à cette température suffisamment longtemps pour parvenir à l'équilibre thermodynamique et assurer la dissolution complète des atomes de soluté. On évoque le processus de mise en traitement.
- Une trempe, c'est-à-dire un refroidissement assez rapide de l'alliage, vise à éviter la décomposition de la solution solide et la création de gros précipités d'équilibre qui n'entraîneraient pas le durcissement de l'alliage. Suite immédiate à la trempe, on obtient ainsi une solution solide sursaturée en atomes de soluté et en lacunes.

- Un processus de décomposition de la solution solide métastable sursaturée en éléments d'addition se produit lors du maintien à température ambiante. Cette période de maturation ou de vieillissement naturel peut être éventuellement complétée par une source de revenu à
- Température contrôlée pour favoriser la décomposition de la solution solide par précipitation de phases durcissantes selon des séquences de précipitation distinctes à chaque alliage. Ce chapitre fournira plus de détails sur ces séquences pour l'**alliage 6xxx** ultérieurement.

II.10. Câblage

Dans la production de conducteurs électriques en Almélec, l'acte de câblage revêt une importance capitale. On utilise fréquemment cet alliage d'aluminium dans les lignes aériennes, grâce à ses remarquables caractéristiques tant mécaniques qu'électriques.

Suite au processus de tréfilage qui produit des fils élémentaires de diamètre inférieur, l'étape de câblage consiste à réunir ces fils ou brins afin de créer un conducteur unique conforme aux normes d'utilisation. On applique la technique du toronnage hélicoïdal, dans laquelle les fils sont disposés en couches concentriques autour d'un fil central, respectant un agencement spécifique. Par exemple, un conducteur à **61 brins** présente une structure structurée comprenant un brin central entouré de couches comportant respectivement **6, 12, 18 et 24 brins**. Cela garantit une distribution uniforme des efforts mécaniques et de l'électricité.

Cette forme de construction augmente la souplesse du conducteur, rendant son transport, sa manipulation et son installation plus aisés. L'accroissement des brins renforce la solidité générale, indispensable pour résister aux contraintes liées au vent, à la charge propre et aux fluctuations climatiques.

Le câblage diminue les risques de coupure en distribuant plus efficacement les tensions sur tous les fils. Sur le plan électrique, cette disposition garantit une conductivité efficace en raison de la continuité des liens entre les brins.

Étant donné sa résistance à la corrosion, l'Almélec n'a pas besoin de graisse lors du câblage. Cet alliage crée spontanément une couche d'oxyde protectrice sur sa surface, un phénomène désigné sous le terme de passivation.

Le fait de ne pas nécessiter de graissage permet de maintenir les performances électriques du conducteur tout en simplifiant le processus industriel et diminuant ainsi les coûts de production.

En fin de compte, le raccordement des fils en Almélec est effectué selon les normes prescrites par des entités internationales comme la Commission électrotechnique internationale. Cela assure la qualité, la sûreté et la crédibilité des produits terminés.

Cette action est cruciale pour améliorer les performances globales des conducteurs électriques employés dans les systèmes de transport et de distribution d'énergie. Figure II.8.

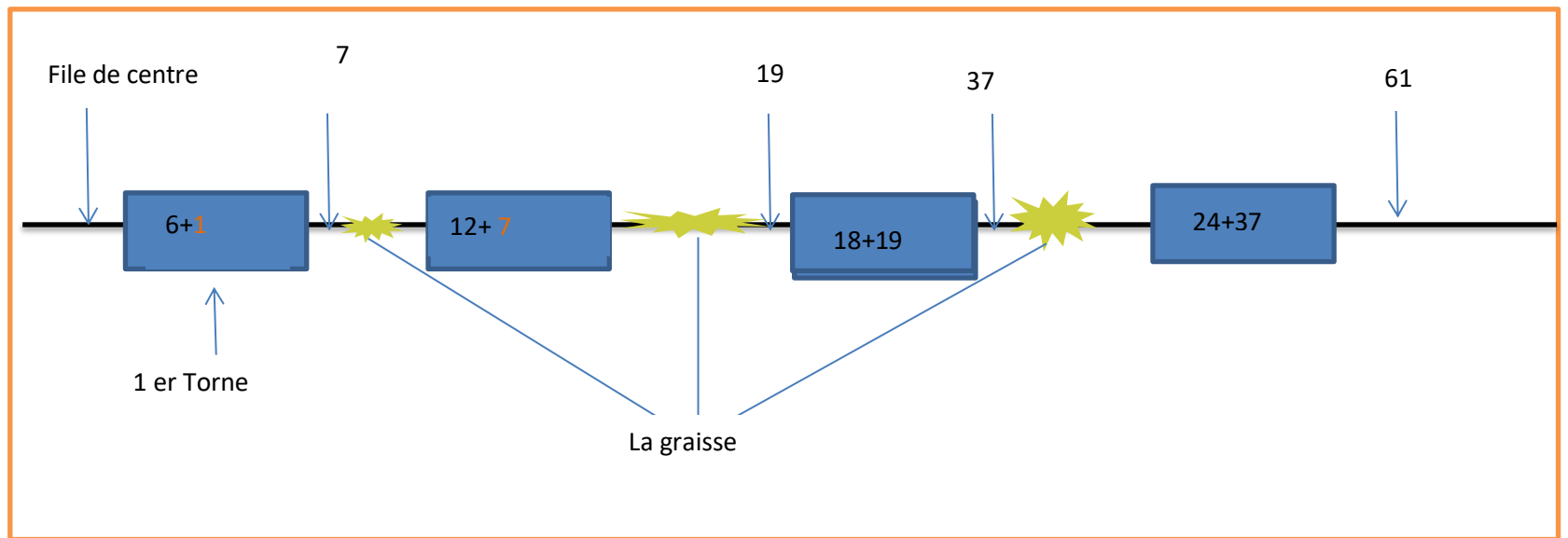


Figure II . 8. Schéma de câblage .



Figure II. : câblage .

Conclusion

L'aluminium, métal léger, abondant et recyclable, occupe une place centrale dans l'industrie des conducteurs électriques. Ses propriétés remarquables – conductivité électrique et thermique élevée, résistance naturelle à la corrosion, facilité de mise en œuvre – en font un matériau de choix, notamment pour les lignes aériennes de transport d'énergie.

Cependant, l'aluminium pur ne répond pas toujours aux exigences mécaniques sévères imposées par les conditions d'utilisation (vent, gel, variations de température). C'est pourquoi le recours à des alliages, en particulier ceux de la **série 6000 (Al-Mg-Si)**, s'avère nécessaire. Ces alliages, dont l'**Almélec** est un représentant typique, offrent un compromis performant entre résistance mécanique et conductivité électrique, grâce à un durcissement structural contrôlé par précipitation de la phase **Mg Si**.

Le **tréfilage** est le procédé de mise en forme clé pour réduire le diamètre des fils tout en augmentant leur résistance par écrouissage. Ce procédé dépend de nombreux paramètres interconnectés : géométrie de la filière (angle du cône, zone de calibrage), caractéristiques du matériau (nature, diamètre initial, état de surface), conditions opératoires (vitesse, température, lubrification) et paramètres mécaniques (effort, tension). La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour éviter les ruptures et garantir la qualité du produit final.

L'écrouissage induit par le tréfilage modifie la microstructure (augmentation des dislocations, allongement des grains, anisotropie). Si cela améliore la limite d'élasticité et la résistance à la traction, cela réduit la ductilité et génère des contraintes internes. Pour corriger ces effets, un **traitement thermique** (recuit de restauration ou vieillissement contrôlé) est appliqué, avec des paramètres typiques de **160 – 165 °C** pendant **6 à 6,5 heures**, suivi d'un refroidissement lent à l'air.

Ainsi, l'**assemblage par câblage** des fils élémentaires en une structure toronnée améliore la flexibilité, la résistance mécanique et la fiabilité du conducteur final, tout en simplifiant le procédé dans le cas de l'Almélec grâce à sa protection naturelle contre la corrosion (**absence de graissage nécessaire**).

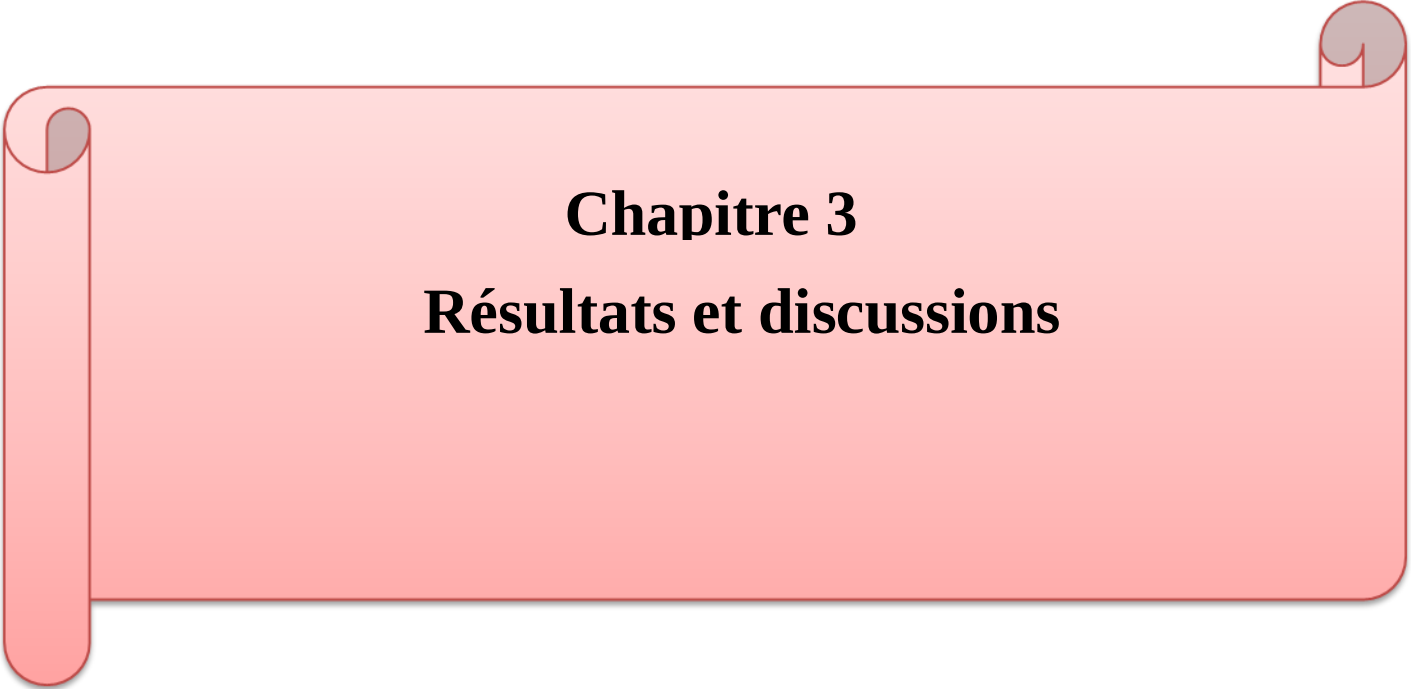
Enfin, la compréhension des alliages d'aluminium, de leurs transformations métallurgiques et des paramètres du tréfilage constitue une étape indispensable pour optimiser la fabrication des conducteurs électriques et garantir leurs performances en service.

Références

- [1] Vargel, "Historical reviews," in Corrosion of Aluminium, Elsevier, 2020, pp. 3–6. doi:10.1016/B978-0-08-099925-8.00001-6.
- [2] J. Chen et al., "High-efficiency extraction of aluminium from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminium-ferric sulfate coagulant," Journal of Cleaner Production, vol. 257, p. 120399, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120399.
- [3] E. Jeddi, "Numerical study of anodic voltage drop in the hall-heroult cells by finite element method," p. 180.
- [4] I. Djuri, "Kinetic Modelling of Different Bauxite Types in the Bayer Leaching Process," Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 49, no. 3, p. 10
- [5] G. Gauvin, "Investigation de l'augmentation de la résistivité des barres collectrices utilisées dans les cuves d'électrolyse d'aluminium," p. 85.
- [6] <https://www.aluminium.fr/proprietes-et-alliages#>
- [7] . Vargel, "Corrosion de l'aluminium", Dunod 1ère édition, Paris, 1999.
- [8] M. Colombié, "Matériaux métalliques", Hachette 2ème édition, Paris, 2001-2008
- [9] M. Laverroux, "Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage, revue de la métallurgie CIT, pp. 1293-1302, 1993
- [10] H. Wilquin, "Construction en aluminium, Le Moniteur, Paris, 2001.
- [11] <https://www.lejourdalgerie.com/>
- [12] D. Maissonnette, "Influences mécaniques et métallurgiques de procédés haute Température sur un alliage d'aluminium 6061-T6", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2010.
- [13] C. Vargel, "The advantages of aluminium," in Corrosion of Aluminium, Elsevier, 2020, pp. 9–16. doi: 10.1016/B978-0-08-099925-8.00003-X.
- [14] <https://aluquebec.com/ceial/laluminium/alliages-et-applications/>
- [15] A. Deschamps, "Influence de la prédéformation et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Zn-Mg-Cu", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1997.
- [16] "<https://www.alufoil.cn/fr/news/the-role-of-alloying-elements-and-impurity-elements-in-aluminum-alloy-6000-series.html>

-
- [17] M.A. Moustafa, F.H. Samuel, H.W. Doty, S. Valtierra, "Effect of Mg and Cu additions on the microstructural characteristics and tensile properties of Sr-modified Al-Si eutectic alloys", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 14, No. 4, pp. 235-253, 2002.
- [18] A. Laurino, "Intégration des alliages d'aluminium dans le câblage électrique automobile : procédés de mise en forme, microstructure et durabilité", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2012.
- [19] G. Vega, A. Haddi, A. Imad, "Influence des conditions du tréfilage sur le comportement thermomécanique dans le cas d'un fil en cuivre", 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009.
- [20] Lieu de stage
- [21] Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill.
- [22] ASM Handbook, Volume 14B – Metalworking: Wire Drawing
- [23] Z. Pakiel, K. Ludwichowska, J. Ferenc, M. Kulczyk, "Mechanical properties and electrical conductivity of Al 6101 and 6201 alloys processed by hydro-extrusion". IOP Conf. Ser : Mater. Sci. Eng, Vol. 63, 012120, 2014.
- [24] J. Rabinow, "Some thoughts on electrical connections", Nat Bur Stand US NBSIR : 78 1507, 1978.
- [25] K.W. Barber, K.J. Callaghan, "Improved overhead line conductors using aluminium alloy 1120", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 403-409, 1994.
- [26] EN 50183, "Conductors for overhead lines-Aluminum-magnesium-silicon Alloy wires", 2000.
- [27] N.S. Beniwal, H.O. Gupta, D.K. Dwivedi, "Effect of creep phenomenon on reliability of distribution transformers", National System Conference, Indian Institute of Technology Roorkee, India, pp. 623-627, 2008.
- [28] M.A. Gaffar, A. Gaber, M.S. Mostafa, E.F. Abo zeid, "The effect of Cu addition on the thermoelectric power and electrical resistivity of Al-Mg-Si balanced alloy : A correlation study ", Materials Science and Engineering : A, Vol. 465, No. 1-2, pp. 274-282, 2007.
- [29] H. Seyedrezai, D. Grebennikov, P. Mascher, H.S. Zurob, "Study of the early stages of clustering in Al-Mg-Si alloys using the electrical resistivity measurements", Materials Science and Engineering A, Vol. 525, No. 1-2, pp. 186-191, 2009.
- [30] P.L. Rossiter, P. Wells, "The dependence of electrical resistivity on short-range order", Journal of Physics, Vol. 4, pp. 354-363, 1971.

- [31] A.J. Hillel, J.T. Edwards, P. Wilkes, "Theory of the resistivity and Hall effect in alloys during Guinier-Preston zone formation, Philosophical Magazine, Vol. 32, No. 1, pp. 189-209, 1975.
- [32] L.X. Cui, Z.X. Liu, X.G. Zhao, J.G. Tang, K. Liu, X.X. Liu, C. Qian, "Precipitation of metastable phases and its effect on electrical resistivity of Al-0.96 Mg₂Si alloy during aging, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 24, pp. 2266-2274, 2014.
- [33] E. Sarrazin, "Modélisation du soudage d'alliage d'aluminium", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique

A decorative red scroll graphic with a light red gradient and a darker red border. It has a vertical strip on the left side and a small circular element on the right side, resembling a scroll's end.

Chapitre 3

Résultats et discussions

III. 1. Introduction

Ce chapitre fournit une étude approfondie des conducteurs aériens en aluminium allié afin d'examiner leurs performances tant sur le plan mécanique qu'électrique, ainsi que leur fiabilité lorsqu'ils sont utilisés. Les tests ont eu lieu dans le département de Contrôle Qualité du Groupe Industriel Sidi Bendhiba, comprenant des épreuves de traction, des évaluations de conductivité, ainsi que des vérifications dimensionnelles et visuelles. La mission prioritaire consiste à contrôler l'adéquation de ces conducteurs aux standards et à étudier l'influence du choix de l'alliage sur leur performance opérationnelle dans des conditions concrètes.

Cette remarquable performance mécanique (limite d'élasticité, résistance au fluage, longévité sous contrainte) est d'autant plus cruciale qu'elle est liée à des rendements électriques particuliers. Certes, même si la conductivité des alliages Al-Mg-Si (30 à 50 % IACS) est moins élevée que celle de l'aluminium pur (63 % IACS) ou du cuivre, leur robustesse supérieure permet de diminuer la taille du conducteur nécessaire pour supporter les contraintes mécaniques des lignes aériennes. Par conséquent, le petit compromis en conductivité est contrebalancé par une amélioration de la résistance à la traction et une diminution du poids, ce qui rend l'aluminium deux fois plus performant que le cuivre pour un poids équivalent dans le transport haute tension. Ainsi, les tests de traction et les mesures de conductivité corroborent conjointement que ces.

Les inspections visuelles et dimensionnelles servent à identifier les imperfections de surface, les anomalies et à contrôler la conformité géométrique des conducteurs. De plus, la résistance à la corrosion — un aspect crucial pour les câbles AAAC déployés dans les régions côtières - aide à étendre leur longévité. L'incorporation de magnésium et de silicium dans l'alliage aide à équilibrer les propriétés mécaniques et électriques, tout en diminuant la relaxation sous tension et les risques de panne en fonctionnement. L'ensemble de ces tests assure la conformité avec les normes NF EN 50182, NF EN 50183 et NF EN 50326, garantissant ainsi une fiabilité démontrée des lignes aériennes en service.

III.2. Présentation et caractéristiques du conducteur étudié

Avant de commencer à examiner la matière première, il est essentiel d'exposer les caractéristiques géométriques et structurelles majeures des conducteurs en alliage d'aluminium de type AAAC (Almélec) qui sont employés dans les lignes aériennes. Ces propriétés ont un impact direct sur les performances électriques et mécaniques du conducteur.

Le tableau ci-dessus détaille diverses sections de conducteurs AAAC et leurs principales spécifications, y compris le nombre de brins, le diamètre des fils, la structure du conducteur ainsi que le diamètre externe.

Il est observable qu'une extension de la section du fil conducteur provoque une hausse du nombre de brins et du diamètre global du câble. Cette configuration favorise l'augmentation de la résistance mécanique, de la flexibilité et de la capacité à conduire le courant électrique.

La fabrication des conducteurs se fait en formant des couches concentriques autour d'un fil central, selon diverses configurations telles que :

- 1-6,
- 1-6-12,
- 1-6-12-18-24.

Cette disposition assure une meilleure répartition des contraintes mécaniques et améliore la tenue du conducteur dans les conditions d'exploitation des lignes aériennes.

Dans cette étude, le conducteur utilisé est un conducteur **570 AAAC**, composé de **61 brins**, avec une construction de **type 1-6-12-18-24** et un diamètre extérieur d'environ **31,1 mm**.

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques et construction des conducteurs AAAC

Section (mm²)	Nombre du fil	Diamètre de fil (mm)	Construction conducteur	Diamètre conducteur (mm)
34.4 AAAC	7	2.50	1 - 6	7.50
54.6 AAAC	7	3.15	1 - 6	9.45
93.3 AAAC	19	2.50	1 - 6 - 12	12.50
72.5 AAAC	7	3.63	1-6	10.89
115 AAAC	19	2.78	1-6-12	13.90
117 AAAC	19	2.80	1-6-12	14.00
148 AAAC	19	3.15	1-6-12	15.75
248 AAAC	37	2.92	1-6-12-18	20.44
366 AAAC	37	3.55	1-6-12-18	24.9
570 AAAC	61	3.45	1-6-12-18-24	31.1
851 AAAC	91	3.45	1-6-12-18-24-30	38.0
1144 AAAC	91	4.00	1-6-12-18-24-30	44.00

III.3. Détermination des caractéristiques de conducteur

Lors de cette première étape expérimentale consacrée à l’analyse de la matière première, une série de mesures a été réalisée afin de caractériser les propriétés physiques, électriques et mécaniques du conducteur en alliage d’aluminium.

Le diamètre du fil a d’abord été mesuré à l’aide d’un micromètre, puis utilisé pour calculer la section transversale du conducteur à partir de la relation suivante :

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Cette grandeur est essentielle pour l’évaluation des performances électriques et mécaniques du conducteur.

La résistance électrique a ensuite été mesurée à l’aide d’un ohmmètre afin de déterminer la résistivité du matériau, puis sa conductivité électrique, qui représente un indicateur important de sa capacité à transporter le courant électrique. Par ailleurs, un essai de traction a été effectué afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. La contrainte mécanique a été calculée à l’aide de la relation :

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

L'allongement relatif a également été évalué afin d'analyser le comportement du matériau sous l'effet de la charge appliquée.

III.4. Analyse de la composition chimique (Spectromètre)

Avant toute transformation industrielle, notamment le tréfilage et le câblage, il est indispensable de vérifier la conformité de la matière première utilisée.

Dans le cas présent, le matériau étudié est un alliage d'aluminium de la série 6xxx (Almelc), largement utilisé dans la fabrication des conducteurs électriques.

Afin de garantir la qualité de cet alliage, une analyse de la composition chimique est réalisée à l'aide d'un spectromètre.

III.4.1 Principe du spectromètre

- Il permet d'identifier rapidement la composition chimique d'alliages métalliques.
- Ce type d'équipement est couramment utilisé dans les laboratoires de fonderie et les industries métallurgiques.



Figure III.1: Spectromètre utilisé pour l'analyse de la composition chimique des alliages d'aluminium 6xxx au sein de GISB

III.4. 2 Mode opératoire du spectromètre

L'analyse de la composition chimique par spectrométrie suit une procédure rigoureusement définie afin d'assurer la précision, la répétabilité et la fiabilité des résultats. Les étapes successives sont décrites ci-dessous.

1. Préparation de l'échantillon

Avant toute analyse, l'échantillon doit être correctement préparé selon le protocole suivant :

- **Nettoyage :** La surface est débarrassée de toute impureté (graisse, poussière, oxydation) à l'aide d'un solvant approprié (acétone ou éthanol).

- **Polissage** : Un polissage mécanique est réalisé afin d'obtenir une surface plane, propre et homogène, nécessaire à une excitation uniforme.

Cette étape préparatoire est essentielle pour garantir une qualité de mesure optimale et éviter les artéfacts d'analyse.

2. Mise en place de l'échantillon

L'échantillon est placé sur le support du spectromètre, puis positionné de manière à assurer :

- un **contact stable** avec la source d'excitation ;
- une **orientation correcte** de la surface à analyser face au système optique.

3. Excitation de l'échantillon

Une **étincelle électrique** (ou un arc) est générée à la surface de l'échantillon. Cette excitation provoque :

- La vaporisation d'une infime quantité de matière ;
- La formation d'un plasma ;
- L'émission d'un **rayonnement lumineux caractéristique** des éléments chimiques présents.

4. Analyse du spectre

Le spectromètre capte la lumière émise par le plasma, puis la décompose en longueurs d'onde élémentaires à l'aide d'un réseau de diffraction. Chaque élément chimique est alors identifié grâce à sa **signature spectrale unique** (position des raies).

5. Traitement des données

Le système mesure l'**intensité** de chaque raie spectrale et calcule, par comparaison avec une courbe d'étalonnage préétablie, la **concentration en pourcentage massique (%)** de chaque élément présent dans l'échantillon. Les résultats sont affichés dans le tableau III.2.

6. Vérification et validation

Les résultats obtenus sont comparés aux **normes de référence** (notamment NF EN 573-3 pour les alliages d'aluminium).

- Si les valeurs mesurées se situent dans les plages autorisées → l'alliage est **validé** pour la production.
- Dans le cas contraire → l'alliage est **rejeté** ou soumis à une contre-analyse.

Tableau III.2 : Composition chimique

	Al%	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Zn%	Cr%	Ni%	Ti%
Ort	83,54	9,94	1,74	2,09	0,399	0,436	1,44	0,030	0,177	0,073
1	83,54	9,94	1,74	2,09	0,399	0,436	1,44	0,030	0,177	0,073
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

	Be%	Ca%	Li%	Pb%	Sn%	Sr%	V%	Na%	Bi%	Zr%
Ort	0,000	0,008	0,001	0,046	0,024	0,000	0,008	0,003	0,005	0,008
1	0,000	0,008	0,001	0,046	0,024	0,000	0,008	0,003	0,005	0,008
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

	B%	Ga%	Cd%	Co%	Ag%	Hg%	In%	Ce%	La%
Ort	<0,001	0,007	<0,002	0,001	0,002	<0,002	<0,003	0,004	<0,001
1	<0,001	0,007	<0,002	0,001	0,002	<0,002	<0,003	0,004	<0,001
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Les résultats montrent un alliage à base d'Al à 83,54 %. Le Si à 9,94 % augmente la dureté et la résistance mécanique mais réduit la ductilité. Le Mg 0,436 % renforce l'alliage via Mg_2Si , améliorant la limite élastique et la traction. Le Cu 2,09 % accroît la résistance mais diminue la tenue à la corrosion, critique pour les conducteurs aériens. Le Fe 1,74 %, impureté, forme des phases fragiles qui abaissent la ductilité. Les éléments Mn, Zn, Cr, Ni, Ti améliorent les propriétés et la stabilité microstructurale. Les traces de Pb, Sn, Ca, Na, Zr, V sont négligeables, indiquant un procédé bien contrôlé.

III.3.3. Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques des conducteurs ont été déterminées à partir des dimensions mesurées et des relations théoriques usuelles.

III.3.3.1. Calcul du diamètre (d)

Le diamètre du conducteur a été déterminé par deux méthodes complémentaires

a) Méthode expérimental (Mesure à l'aide pied à coulisse numérique)

La détermination du diamètre du conducteur constitue une étape essentielle de toute analyse électrique. Elle permet de calculer la section réelle du matériau et d'en déduire ses propriétés conductrices.

Afin d'obtenir une précision satisfaisante, le diamètre du conducteur a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse numérique, instrument adapté aux mesures dimensionnelles courantes avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.

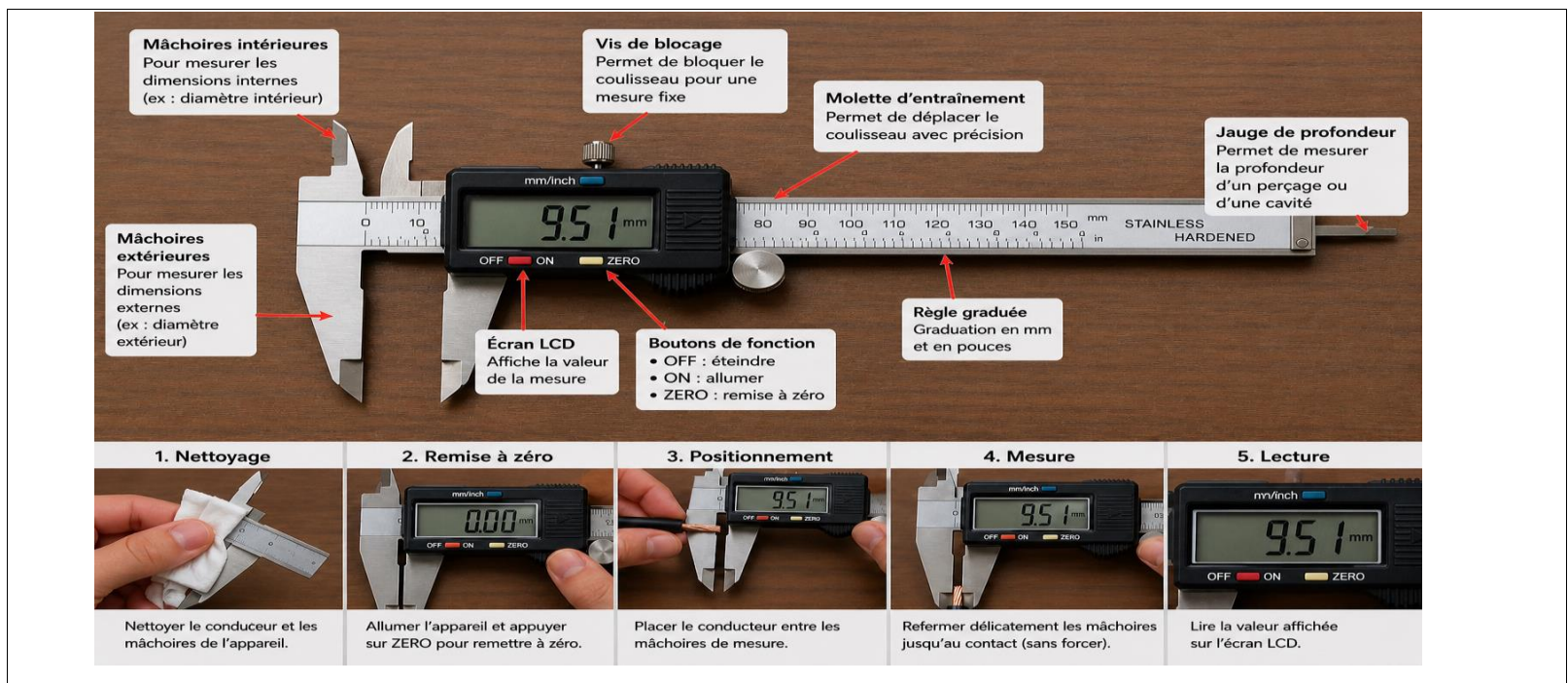


Figure III.2: Schéma explicatif du pied à coulisse numérique et procédure de mesure du diamètre d'un conducteur.

❖ Mode opératoire

1) Préparation : Le conducteur a été soigneusement nettoyé afin d'éliminer toute impureté pouvant influencer la précision de la mesure.

2) Vérification de l'instrument : Le pied à coulisse numérique a été contrôlé et remis à zéro avant utilisation afin d'assurer la fiabilité des mesures.

3) Mise en position : Le conducteur a été correctement positionné entre les becs de mesure de l'instrument, en veillant à un alignement optimal.

4) Réalisation de la mesure : Les becs ont été fermés progressivement jusqu'au contact avec le conducteur, sans appliquer de pression susceptible de provoquer une déformation.

5) Lecture des résultats : La valeur du diamètre a été directement relevée sur l'afficheur numérique du pied à coulisse.



Figure III.3 : Mesure de diamètre de conducteur.

- La valeur du diamètre mesuré est :

$$d = 9.51 \text{ mm.}$$

b) Méthode analytique

Dans cette méthode le diamètre a été déterminé à partir de la relation de section de conducteur.

$$S = \frac{P}{\rho} \dots \dots \dots (1)$$

$$S = \frac{d^2 * \pi}{4} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

- c) S : section de conducteur (mm²)
- d) P : poids linéique de conducteur (g /m) (193g de 1m)
- e) ρ : la masse volumique du matériau ($\approx 2.67 \text{ g/m}^3$)
- f) d : diamètre de conducteur (mm)
- g) π : constant mathématique (3.1416)

En égalisant les deux expressions de la section du conducteur , on obtient :

$$\frac{P}{\rho} = \frac{d^2 * \pi}{4}$$

On trouve :

$$d = \sqrt{\frac{4 * P}{\pi * \rho}}$$

- Valeur de diamètre trouve sont :

$$d = 9.59 \text{ mm}$$

❖ Interprétation de résultat

Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance entre le diamètre mesuré expérimentalement (**9,51 mm**) et celui déterminé par calcul (**9,52 mm**). L'écart observé est vraiment très faible. Il peut s'expliquer par les incertitudes de mesure et les approximations liées aux données utilisées.

Cet écart négligeable confirme que la méthode analytique utilisée est valide et que les mesures expérimentales réalisées sont fiables.

III.4. La section du conducteur

La section du conducteur est déterminée à partir du diamètre calculé en utilisant la relation suivante :

$$S = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

On remplace par la valeur de diamètre obtenue

$$d = 9,52 \text{ mm}$$

on obtient

$$S = \frac{9,52 \cdot 3,14}{4}$$

- valeur de section trouvée est : $S = 71,14 \text{ mm}^2$.

III.5. Définitions des grandeurs électriques

A. La résistance

La résistance (**symbole R, unité : ohm Ω**) mesure l'opposition au passage du courant électrique dans un conducteur donné. Elle dépend de la nature du matériau, de sa longueur, de sa section et de la température, selon la formule

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

B. La Résistivité

La résistivité (**symbole ρ , unité : $\Omega \cdot \text{m}$**) est une propriété intrinsèque d'un matériau, indiquant sa capacité à s'opposer au courant ; elle correspond à la résistance d'un échantillon de **1 m de long et 1 m² de section**. Les métaux ont une faible résistivité (**bons conducteurs**), contrairement aux isolants.

C. La conductivité

La conductivité (**symbole σ , unité : siemens par mètre S/m**) mesure l'aptitude d'un matériau à laisser passer le courant ; c'est l'inverse de la résistivité : $\sigma = 1/\rho$. Elle dépend de la mobilité des charges (**électrons ou ions**).

III.5.1. Mesure de la résistance

Afin de caractériser le comportement électrique du conducteur, une mesure de sa résistance a été réalisée sur une longueur de 1m. Cette mesure constitue une étape essentielle pour l'évaluation des performances électriques du matériau. Elle permet également de vérifier la cohérence des résultats obtenus et d'apprécier la qualité du conducteur étudié



Figure III.4 : Unité de torsion .

❖ Mode opératoire

- 1) **réparation de l'échantillon** : Un conducteur de longueur $L=1\text{m}$ a été préparé, en veillant à ce que les extrémités soient nettes pour assurer une bonne connexion..
- 2) **Choix de l'appareil** : La résistance a été mesurée à l'aide d'un appareil de mesure approprié (ohmmètre / multimètre).
- 3) **Raccordement** : Les bornes de l'appareil ont été connectées aux deux extrémités du conducteur en assurant un bon contact électrique.
- 4) **Mesure** : La valeur de la résistance a été relevée directement sur l'appareil.
- 5) **Répétition** : L'opération a été répétée plusieurs fois afin d'obtenir une valeur moyenne plus précise.

Remarque : La valeur de résistance du conducteur mesurée est $R = 0.4921 \Omega$.



Figure III. 5 : mesure de la résistance linéique du conducteur à l'aide d'un micro-ohmmètre .

III.5.2. Détermination de la résistivité et de la conductivité

III.5.2.1. Calcul de la résistivité

La résistivité du conducteur est déterminée à partir de la résistance mesurée et de la section du conducteur. La relation utilisée est la suivant :

$$\rho = R \cdot S$$

- La résistance mesurée est donnée par :

$$R = 0,4921 \, \Omega$$

- La section du conducteur est :

$$S = 71,14 \, \text{mm}^2$$

- Application numérique

$$\rho = (0.4921 \cdot 71,14)$$

- valeur de la résistivité calculer est

$$\rho = 35.008 \, \Omega \cdot \text{mm}^2$$

❖ Interprétation de résultat

La valeur de la résistivité obtenue expérimentalement est $3,57 \times 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$. En la comparant aux valeurs usuelles, on observe qu'elle est supérieure à celle de l'aluminium pur ($\approx 2,82 \times 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$) et proche de celle des alliages d'aluminium de type Almélec ($3,2$ à $3,6 \times 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$). Cette concordance globale confirme la cohérence des résultats expérimentaux. La légère différence observée peut s'expliquer par la présence d'éléments d'alliage (magnésium et silicium), qui augmentent les collisions des électrons et entraînent une augmentation de la résistivité électrique du matériau.

III.5.2.2. Calcul de la conductivité électrique (IACS %)

Une fois la résistivité du matériau analysé établie, on peut en déduire sa conductivité électrique pour affiner la caractérisation de ses performances. Dans cette section, on détermine la conductivité à partir des résultats expérimentaux obtenus, puis on l'exprime en pourcentage conformément à la norme **IACS**. Cela permet une comparaison avec les valeurs de référence des matériaux conducteurs, y compris les alliages d'aluminium de type Almélec.

La conductivité électrique relative a été déterminée à partir de la relation suivante :

$$\sigma \% = \frac{\rho(\text{ref})}{\rho(\text{expr})} * 100$$

Où :

ρ_{refe} : est la résistivité de référence du cuivre selon la norme **IACS**, égale à **17.24Ω·Km**.

ρ_{exp} : est la résistivité déterminée expérimentalement, égale à **35.008 Ω·Km**.

En appliquant cette relation, on obtient :

$$\sigma \% \approx 48.46 \%$$

❖ Interprétation de résultat

En comparant cette valeur aux données usuelles :

- **Aluminium pur** : environ 61 % IACS
- **Alliages d'aluminium de type Almélec** : 52 à 55 % IACS

On constate que la conductivité obtenue (**48,46 % IACS**) est légèrement inférieure à celle des alliages de type Almélec.

On peut justifier cette différence par :

La circulation des électrons peut être perturbée par la présence d'éléments d'alliage (Mg, Si), la présence potentielle d'impuretés ou de défauts structuraux, et les incertitudes associées aux conditions expérimentales (température, précision des instruments).

On conclure que, malgré cette différence, la valeur demeure assez proche des données standards, suggérant une homogénéité générale des résultats expérimentaux et attestant que le matériau examiné possède des propriétés similaires à celles des alliages d'aluminium employés dans les câbles aériens.

III.3. Caractéristique mécanique

III.3.1. Résistance à la traction

La résistance à la traction est la capacité d'un matériau à supporter une force de traction sans se rompre. Cela caractérise le comportement mécanique d'un conducteur lorsqu'il est soumis à des efforts d'étirement.

❖ Appareil utilisé

L'essai de traction a été effectué à l'aide d'une machine de traction mécanique appelée JBA 10 kN, qui est disponible au laboratoire. Cette machine permet d'appliquer une force de traction qui augmente progressivement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Elle mesure également la force appliquée et la déformation en même temps, grâce à un extensomètre. La force maximale que cette machine peut atteindre est de 10 kN.

L'éprouvette, qui est le conducteur, est fixée entre deux mors qui la maintiennent en place pendant l'essai.



Figure III.5 : Appareil de traction mécanique JBA (10 KN).

III.3.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à soumettre l'éprouvette à une traction qui augmente progressivement jusqu'à sa rupture, tout en enregistrant la force appliquée et l'allongement du matériau. Ces données permettent de tracer la courbe contrainte-déformation et de déduire les caractéristiques mécaniques du matériau.

❖ Mode opératoire

L'essai de traction a été réalisé en suivant les étapes suivantes :

- Lancer le logiciel de commande de la machine de traction.
- Sélectionner le type d'essai, qui est « MANUEL TRACTION STD ».
- Choisir la référence et les caractéristiques de l'éprouvette à partir de la base de données.
- Fixer l'éprouvette entre les mâchoires adaptées.
- Remettre à zéro les valeurs de force et de déformation à l'aide du bouton Tare.
- Démarrer l'essai en cliquant sur Initier Test.
- Appliquer progressivement la traction jusqu'à la rupture de l'éprouvette.
- Répéter l'essai deux ou trois fois pour obtenir une valeur moyenne fiable.
- Sauvegarder les résultats et générer le rapport d'essai.

❖ Expression de la contrainte

La contrainte de traction est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\sigma = F / S$$

Où :

σ : la contrainte en MPA,

F : la force appliquée en N

S : est la section du conducteur en mm².

❖ Interprétation des résultats d'essai de traction – Application aux conducteurs aériens en alliage d'aluminium 6xxx

L'essai de traction effectué sur l'éprouvette en alliage d'aluminium 6060 (série 6xxx) a permis d'évaluer le comportement mécanique du matériau à partir de la représentation graphique contrainte-déformation.

Les résultats obtenus indiquent que l'alliage étudié développe un niveau de résistance mécanique se situant dans une gamme moyenne à élever, en adéquation avec les caractéristiques généralement attendues pour les matériaux de la série 6xxx.

La valeur de la contrainte maximale enregistrée avant la rupture (**Rm**) témoigne de l'aptitude du conducteur à supporter des sollicitations importantes sans défaillance immédiate.

Par ailleurs, la limite d'élasticité (**Re**) mesurée met en évidence un domaine élastique suffisamment étendu, garantissant au matériau une bonne résistance vis-à-vis des déformations irréversibles.

Enfin, le comportement global observé montre une ductilité satisfaisante, caractérisée par une déformation plastique notable avant cassure. Cette propriété contribue à minimiser le risque de rupture de type fragile.

III.3.2. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture est une caractéristique mécanique qui traduit la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique avant de se rompre lors d'un essai de traction. Il permet d'évaluer la **ductilité** du matériau, c'est-à-dire sa capacité à s'allonger sans casser brutalement.

1. Expression de l'allongement

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

Avec :

- **L0** : longueur initiale de l'éprouvette avant essai (mm)
- **Lu** : longueur finale (ultime) juste avant rupture (mm)

2. Principe de mesure

Lors de l'essai de traction, l'éprouvette est soumise à une force croissante qui l'allonge progressivement. Au moment de la rupture, on mesure la longueur finale Lu. L'allongement correspond ainsi à la **variation relative de longueur** entre l'état initial et l'état final.

III.4. Analyse avant traitement thermique du produit semi-fini issu du tréfilage

III.4.1. Mesures dimensionnelles

Les mesures de diamètre ont été réalisées au moyen d'un micromètre, choisi pour sa capacité à fournir des relevés précis. La valeur obtenue est la suivante :

$$d = 3,45 \text{ mm}$$

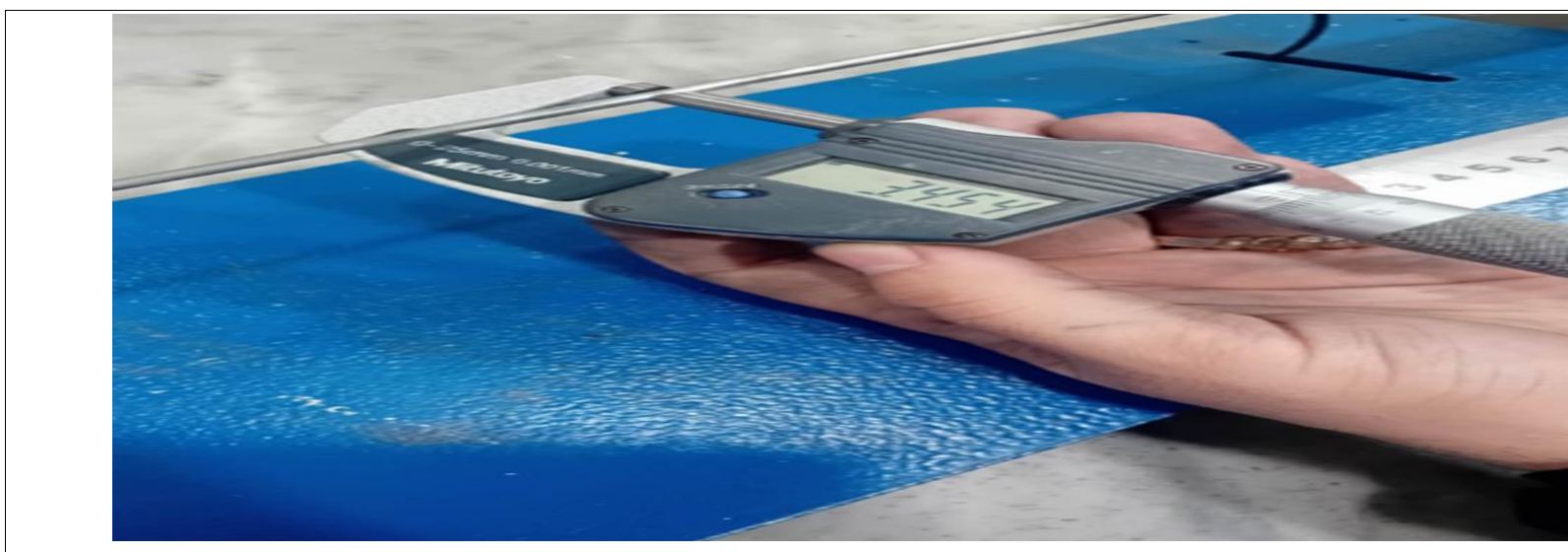


Figure III.6: Mesure du diamètre du fil à l'aide d'un micromètre numérique

❖ Interprétation du résultat

La mesure du diamètre du fil (**3,454 mm**) montre une grande précision grâce au micromètre numérique, avec une valeur très proche de la valeur nominale (**3,45 mm**), ce qui confirme la conformité dimensionnelle du produit semi-fini. Cette bonne homogénéité est importante car elle assure une répartition uniforme des contraintes lors du tréfilage et évite les défauts comme les déformations irrégulières ou les risques de rupture. Ainsi, le fil présente une bonne régularité géométrique, favorable à un processus de déformation stable et fiable.

La section transversale du fil est déterminée à partir de l'expression mathématique suivante, valable pour un profil circulaire :

$$S = \frac{\pi * d^2}{4}$$

L'application numérique avec la valeur du diamètre mesurée (**d=3,45 mm, d=3,45mm**) conduit à :

$$S = \frac{3,14 * 3,45^2}{4} \approx 9,34 \text{ mm}^2$$

Cette grandeur représente l'aire de la section droite du fil.

III.5. Caractéristiques électriques

La résistance électrique du fil a été mesurée afin d'évaluer sa capacité à conduire le courant.

A. Résistance

$$R = 3,725 \, \Omega$$



Figure III.8 : Milli-ohmmètre.**B. Résistivité :**

À partir de la résistance mesurée, de la section transversale

$$S=9,34\text{mm}^2$$

L : la longueur du tronçon de fil test $L=1\text{m}$

ρ : a été calculée en appliquant la relation présentée précédemment

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

L'application numérique conduit à la valeur suivante :

$$R = 0,003725 \Omega$$

Donc :

$$\rho=0,0348\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

❖ Interprétation de résultat :

La résistivité du fil a été déterminée à $\rho=0,0348 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ indiquant une bonne conductivité électrique. Toutefois, cette valeur reste légèrement supérieure aux valeurs théoriques des conducteurs purs, ce qui s'explique par l'influence de la composition du matériau, de l'écrouissage lié au tréfilage, ainsi que des incertitudes expérimentales. Le résultat obtenu demeure cohérent avec un matériau industriel réel.

❖ Pas de calcul de conductivité**III.6. Caractéristique mécanique****III.6.1. Contrainte à la rupture**

$$F=3293\text{N}$$

$$S=9,34\text{mm}^2$$

Donc :

$$\sigma = F / S$$

• Application numérique :

$$\sigma = 3293/9.34$$

$$\sigma = 352 \text{ MPA}$$

❖ Interprétation de résultat :

La contrainte obtenue ($\sigma = 352 \text{ MPA}$) appartient à l'intervalle $[300 \text{ } .330]$ qui indique une bonne résistance mécanique

III.6.2. Allongement à la rupture :

$L_0=200\text{mm}$

$L_f=218\text{mm}$

Donc :

$$((L-L_0)/L_0)*100$$

- **Application numérique :**

$$((218-200)/200)*100=9\%$$

- ❖ **Interprétation de résultat :**

Allongement de 9% indique une ductilité moyenne

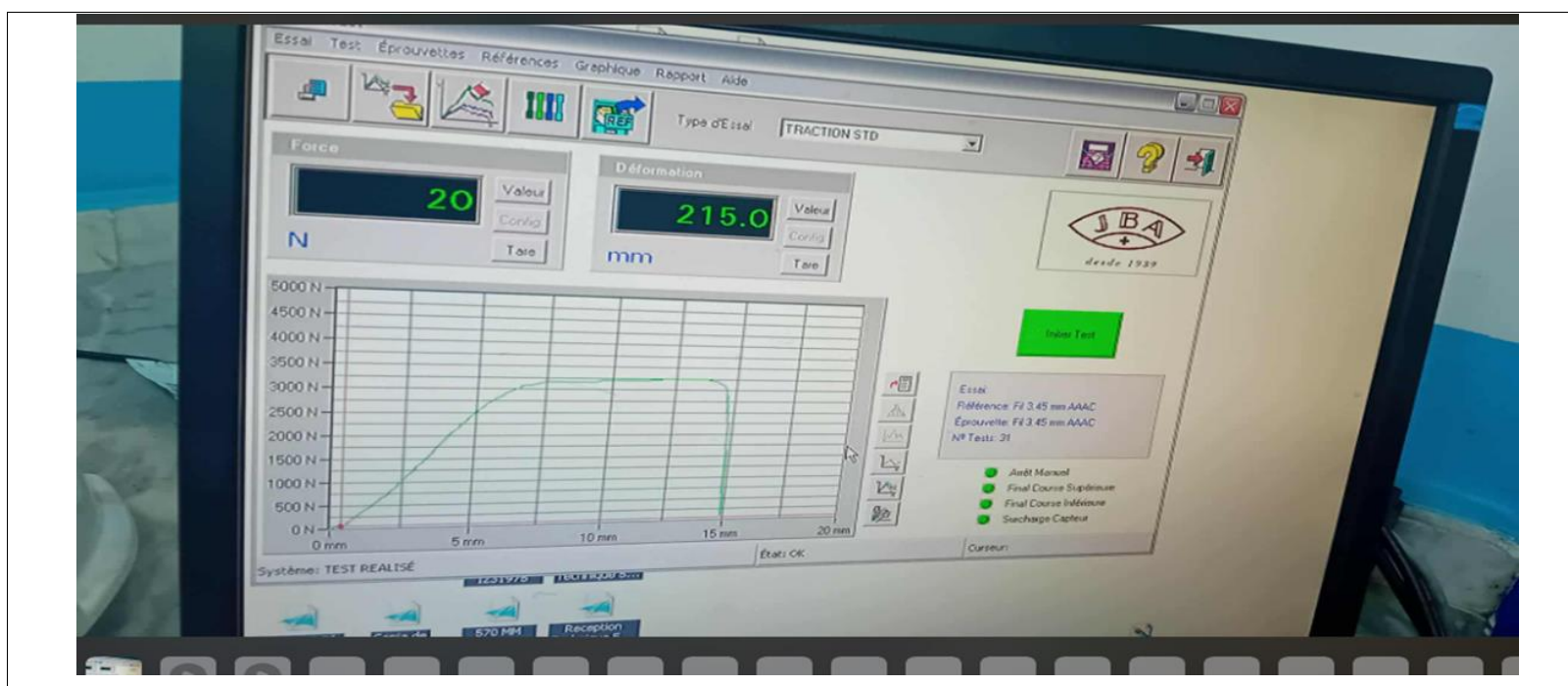


Figure III.9 : Courbe de l'essai de traction (force, déformation).

- ❖ **Interprétation de la courbe Force–Déformation**

L'essai de traction uni axiale a permis de tracer **la courbe Force–Déformation**. Son analyse met en évidence trois domaines distincts, chacun révélant des propriétés mécaniques spécifiques du matériau étudié.

III.6.3. Domaine élastique (zone linéaire)

Dans la phase initiale de l'essai, la force évolue linéairement avec la déformation. Cette proportionnalité se traduit par un segment rectiligne sur la courbe.

- ❖ **Interprétation**

Ce comportement linéaire caractérise le **domaine élastique**. Dans cette zone, les déformations subies par le matériau sont entièrement **réversibles** : le retour à l'état de non-charge permet à l'éprouvette de recouvrer sa

géométrie initiale. La pente de cette droite correspond au **module d'Young** (module d'élasticité), grandeur fondamentale qui renseigne sur la rigidité intrinsèque du matériau.

III.6.4. Domaine plastique

Au-delà de la limite d'élasticité, la courbe perd sa linéarité : la déformation s'accroît plus rapidement que la force appliquée, parfois sous une charge quasi constante ou modérément croissante.

❖ Interprétation

L'entrée dans ce second régime traduit le passage en **domaine plastique**. Les déformations deviennent alors **permanentes** ; après déchargement, l'éprouvette conserve une déformation résiduelle. L'importance de ce domaine renseigne sur la **ductilité** du matériau, c'est-à-dire sa capacité à s'écouler sous contrainte avant rupture.

III.6.5. Rupture

La courbe atteint une valeur maximale de l'ordre de **3200 N**, suivie d'une chute brutale de la force enregistrée.

❖ Interprétation

La force maximale correspond à la **résistance à la traction** (ou charge ultime) du matériau. La chute soudaine qui lui succède matérialise la **rupture** de l'éprouvette. L'allure de cette chute — brutale ou plus progressive — permet, couplée à l'observation de la striction, de distinguer une rupture **ductile** (avec striction marquée) d'une rupture **fragile** (peu ou pas de striction).

III.7. Analyse après traitement thermique

Après traitement thermique, diverses évaluations expérimentales ont été effectuées pour déterminer son impact sur les caractéristiques électriques et mécaniques du conducteur en aluminium allié. On a par la suite comparé les résultats obtenus aux exigences des normes actuelles pour s'assurer de la conformité et des performances du matériau post-traitement.

Les résultats obtenus après traitement thermique ont ensuite été comparés à ceux mesurés avant traitement afin d'identifier les variations des caractéristiques du matériau.

III.7.1. Analyse électrique après traitement

a) Mesure de diamètre

Le diamètre du fil a été mesuré à l'aide d'un micromètre afin de déterminer les dimensions du conducteur après traitement thermique.



Figure III.9 : mesure de diamètre.

Valeur du diamètre mesure est $d = 3,454 \text{ mm}$

III.7.1.1. Calcul de la section

À partir du diamètre mesuré, la section transversale du conducteur a été calculée en utilisant la relation suivante :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$S = \frac{3.454^2 \times 3,14}{4}$$

- Valeur de section calculer sont

$$S = 9,3434 \text{ mm}^2$$

III.7.1.2. Résistance à la traction

La résistance électrique du conducteur a été mesurée à l'aide d'un ohmmètre



Figure III.9: mesure de la résistance à l'aide d'omettre.

- Valeur de la résistance mesure est :

$$R=3,441 \, \Omega$$

❖ Interprétation de résultat

Le résultat obtenu montre que le conducteur conserve de bonnes propriétés de conduction électrique après le traitement thermique. Par ailleurs, la contrainte mécanique mesurée est supérieure à la valeur minimale imposée par la norme **NF EN 50182 (325 MPA)**, ce qui confirme la conformité mécanique du conducteur aux exigences des conducteurs **6XXX**. [1]

III.7.1.3. Résistivité électrique

La résistivité du matériau a été déterminée à partir des mesures expérimentales.

$$\rho = S * R$$

$$\rho = 9,3434 * 3,441$$

- Valeur de la résistivité calculer obtient

$$\rho = 32,1508 \, \Omega / \text{km}$$

$$S = \frac{3.454^2 * 3,14}{4}$$

- Valeur de section calculer sont

$$S = 9,3434 \, \text{mm}^2$$

❖ Interprétation de résultat

La valeur obtenue reste proche des valeurs usuelles des alliages d'aluminium de type Almélec, ce qui confirme la cohérence des résultats expérimentaux. [2]

III.7.2. Essai de traction

L'essai de traction a été réalisé afin d'évaluer les propriétés mécaniques du conducteur après traitement thermique.

➤ Données expérimentales

- Force maximale

$$F = 3192 \, \text{N}$$

- Section

$$S = 9,3434 \, \text{mm}^2$$

La contrainte mécanique est calculée par : $\sigma = \frac{F}{S}$

Résultat

$$\sigma = 341,75 \text{ MPA}$$

❖ Interprétation de résultat

La contrainte obtenue est supérieure à la valeur minimale exigée par **la norme NF EN 50182**, ce qui confirme la conformité mécanique du conducteur [3]

III.7.3. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture a été déterminé à partir de l'essai de traction et calculé à l'aide de la relation suivante :

$$A\% = \frac{L_0 - L}{L_0} * 100$$

Où:

- L_0 : longueur initiale de l'éprouvette.
- L : longueur finale après rupture.
- Valeur d'allongement calculer est : $A=11\%$

❖ Interprétation de résultat

La valeur obtenue est supérieure à la valeur minimale exigée par la norme **NF EN 50182**, fixée à **3 %** pour les conducteurs en alliage d'aluminium de type **6XXX**.

Cette valeur indique que le matériau possède une bonne ductilité et une capacité importante de déformation avant rupture. Le conducteur présente ainsi un comportement mécanique satisfaisant et une bonne aptitude à résister aux contraintes mécaniques en service.[4]

III.7.4. Essai d'enroulement du conducteur après traitement thermique

Après le traitement thermique, un essai d'enroulement a été réalisé afin d'évaluer la flexibilité et le comportement mécanique du conducteur. Cet essai permet de vérifier la conformité du conducteur aux exigences des normes applicables, en observant sa capacité à supporter une déformation par enroulement sans apparition de fissures ni de rupture.



FigureIII.10 : Dispositif utilisé pour l'essai d'enroulement après traitement thermique.

❖ Description des étapes

A. Préparation de l'échantillon : Le conducteur traité thermiquement a été préparé et découpé à une longueur adaptée à l'essai.

B. Fixation du conducteur : L'échantillon a été fixé entre les deux extrémités du dispositif mécanique afin d'assurer sa stabilité pendant l'opération.

C. Réalisation de l'essai : Le conducteur a été enroulé progressivement autour de l'axe métallique à l'aide du dispositif jusqu'à formation de plusieurs spires régulières.

D. Observation du comportement du conducteur : Après l'essai, le conducteur a été examiné afin de détecter d'éventuelles fissures, ruptures ou déformations anormales.

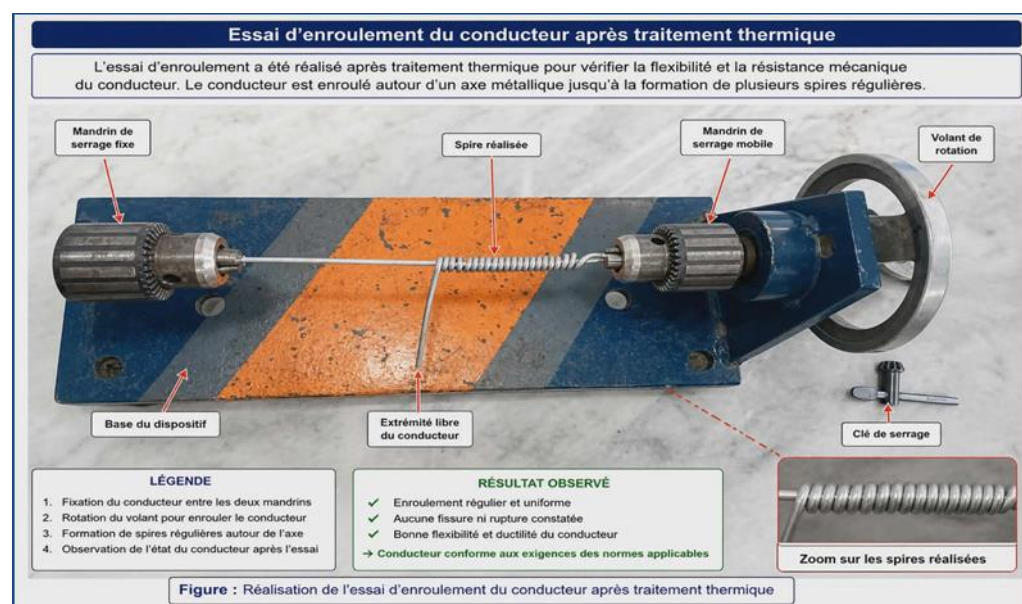


Figure III.11 : Réalisation de l'essai d'enroulement du conducteur traité thermiquement

❖ Interprétation

L'absence de fissures ou de rupture après l'essai d'enroulement indique que le conducteur conserve une bonne ductilité et une résistance mécanique satisfaisante après traitement thermique, ce qui confirme sa conformité aux exigences des conducteurs AAAC.[5]

Tableau III.3. Influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques et électriques du conducteur AAAC

Paramètre	Avant traitement thermique	Après traitement thermique	Évolution observée
Diamètre (mm)	3,454	3,454	Variation négligeable
Section (mm ²)	9,34	9,3434	Valeur pratiquement stable
Résistance électrique (Ω/km)	3,725	3,441	Diminution de la résistance électrique
Résistivité électrique (Ω•mm ² /km)	34,80	32,1508	Diminution de la résistivité et amélioration de la conductivité électrique

Force à la rupture F (N)	3293	3192	Légère diminution
Contrainte à la rupture (MPa)	352	341,75	Diminution légère mais valeur supérieure à la norme NF EN 50182
Allongement à la rupture (%)	9	11	Augmentation de la ductilité

❖ **Interprétation coopératif**

L'examen comparatif des résultats avant et après le traitement thermique met en évidence les effets de ce dernier sur les caractéristiques électriques et mécaniques du conducteur **AAAC**.

Les dimensions du fil conducteur, telles que son diamètre et sa section, demeurent pratiquement constantes suite au traitement thermique. Les légers écarts observés n'affectent pas de manière significative les dimensions globales du conducteur.

Sur le plan électrique, on note une diminution de la résistance, qui évolue **de 3,725 Ω/km à 3,441 Ω/km** . La résistivité électrique connaît aussi une baisse, allant de **34,80 à 32,1508 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$** . Cette diminution signale que le matériau acquiert une conductivité accrue suite au traitement thermique. Par ailleurs, la valeur mesurée est en-deçà de la limite maximale stipulée par la norme **NF EN 50182, qui s'élève à 32,90 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$** , attestant ainsi de la conformité électrique du câble.

D'un point de vue mécanique, la force de rupture et la contrainte à la rupture subissent une légère réduction suite au traitement thermique. La limite est abaissée de **352 MPa à 341,75 MPa**. Même après cette baisse, la valeur demeure supérieure à la limite minimale requise par **la norme NF EN 50182, fixée à 325 MPa**, ce qui démontre que le conducteur conserve une solide résistance mécanique. En outre, l'augmentation de la capacité de déformation avant rupture passe **de 9 % à 11 %**, ce qui témoigne d'une amélioration de la ductilité du matériau. Cela implique que le matériau devient plus apte à se déformer avant de céder, tout en gardant des caractéristiques mécaniques satisfaisantes.

Pour résumer, la thermoconduction augmente l'efficacité électrique du conducteur tout en conservant des propriétés mécaniques conformes aux normes industrielles pour les conducteurs **AAAC**.

III.8. Analyse du câblage et des performances du conducteur

Dans cette partie, une analyse détaillée du comportement du câble de type **570** a été réalisée, en prenant en compte ses caractéristiques géométriques, électriques et mécaniques. L'objectif est d'évaluer la qualité du câblage ainsi que la conformité du conducteur aux exigences industrielles.

Afin de caractériser les performances du câble étudié, plusieurs paramètres ont été analysés. Ces derniers permettent d'évaluer le comportement électrique, mécanique et structural du conducteur.

Les principaux paramètres retenus sont les suivants :

- **Dimension du conducteur** : elle détermine la section effective et influence directement les propriétés mécaniques du câble.
- **Résistance électrique (Re)** : indicateur clé de la capacité du conducteur à transporter le courant électrique dans des conditions nominales.

- **Poids du conducteur sans graisse** : correspond à la masse réelle du matériau conducteur, sans substance de protection.
- **Poids de la graisse** : paramètre important pour l'évaluation de la protection contre la corrosion et de la durabilité du câble.
- **Structure de câblage** : décrit l'organisation des torons, élément déterminant pour la flexibilité et la résistance mécanique de l'ensemble.

L'analyse croisée de ces paramètres permet d'obtenir une vision globale et cohérente de la qualité ainsi que des performances du câble étudié.

III.8.1. Analyse du rapport de câblage

Le rapport de câblage est défini par C/C_0 , où :

- C = valeur mesurée
- C_0 = valeur de référence

Tableau III.4 : Analyse du rapport de câblage

Échantillon	Calcul (C/C_0)	Résultat
C6	147 / 10,30	14,27
C12	239 / 17,25	13,85
C18	318 / 24,35	13,05
C24	390 / 31,1	12,54

❖ **Interprétation**

On observe une diminution progressive du rapport C/C_0 avec l'augmentation du nombre de torons. Cela indique que le câble devient plus compact, la répartition des contraintes plus homogène, et la structure mécaniquement plus stable.

III.8.2. Vérification des propriétés électriques

L'ensemble des mesures de résistance électrique satisfait la condition suivante :

$$10 < R_e < 16$$

Cette conformité permet d'affirmer que :

- la résistance électrique du conducteur reste dans la plage admissible ;
- le câble répond aux exigences des normes industrielles applicables.

III.8.3. Analyse de la charge de rupture

Le rapport de charge de rupture, calculé à partir des valeurs caractéristiques, est 570/372.

❖ Interprétation

Le résultat obtenu indique que le câble présente une **résistance mécanique acceptable**. Son comportement à la rupture est compatible avec les conditions d'usage prévues. En conséquence, le câble est capable de supporter les contraintes de service sans défaillance immédiate.

III.8.4. Analyse des défauts observés

L'examen du schéma de câblage révèle un défaut potentiel lié à la gaine, caractérisé par :

- une mauvaise répartition de la matière ;
- un risque de pénétration ou un défaut d'isolation ;
- une possibilité d'affaiblissement local du câble.

❖ Conséquences prévisibles

Ces anomalies peuvent entraîner :

- une réduction de la durée de vie du câble ;
- une dégradation progressive de ses performances mécaniques et électriques.

Il est donc recommandé de porter une attention particulière à ce point lors des étapes de fabrication ou de contrôle qualité.

III.9. Essais réalisés sur la graisse

Afin de vérifier la qualité de la graisse utilisée dans le câblage des conducteurs aériens en Almelèc,

Deux essais ont été réalisés : l'essai de pénétration et l'essai du point de goutte.

III.9.1. Essai de pénétration de la graisse

❖ Principe

L'essai consiste à mesurer la profondeur d'enfoncement d'un cône dans la graisse pendant 5 secondes.

❖ Matériel

- Pénétromètre
- Cône métallique
- Bain thermostaté (25 °C)

❖ Mode opératoire

1. Mettre la graisse à 25 °C
2. Remplir le récipient
3. Placer sous le cône
4. Laisser pénétrer 5 secondes
5. Lire la valeur

❖ **Interprétation :**

Graisse semi-molle, adaptée au câblage.

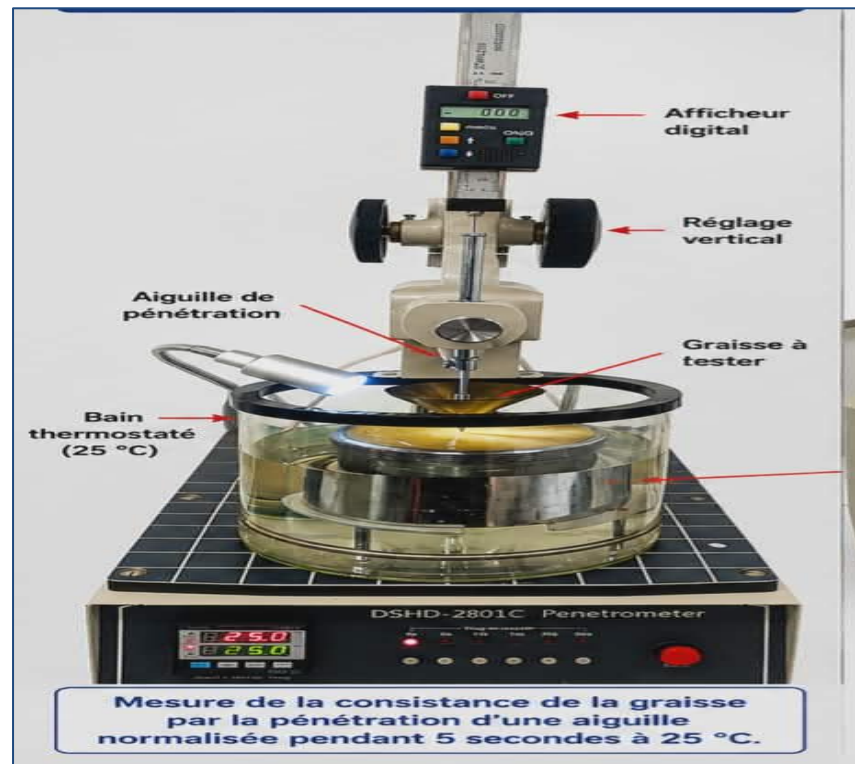


Figure III.11 : Appareil utilisé pour l'essai de pénétration de la graisse.



Figure III.12 : Dispositif de préparation de l'essai de pénétration de la graisse.

III.9.2. Essai du point de goutte

❖ **Principe**

Chauffer la graisse jusqu'à formation d'une goutte.

❖ **Matériel**

- Appareil point de goutte.
- Thermomètre.
- Tube en verre

❖ **Mode opératoire**

1. Mettre la graisse
2. Chauffer progressivement
3. Observer la goutte
4. Noter la température

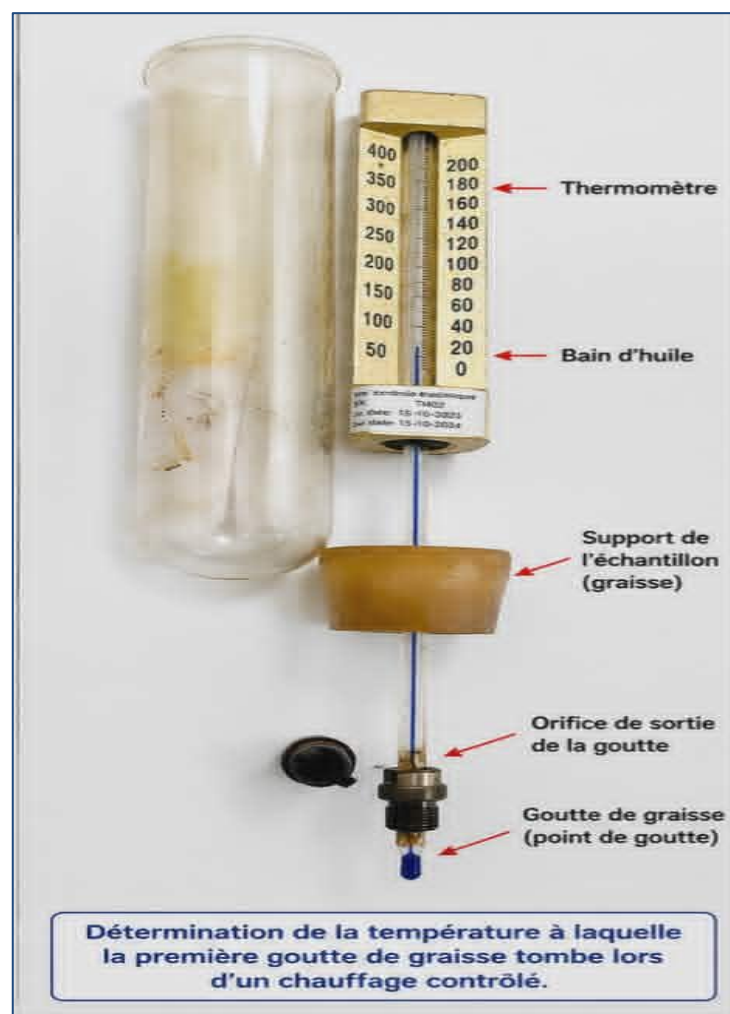


Figure III .13 : Appareil de détermination du point de goutte de la graisse.

❖ **Interprétation**

Bonne stabilité thermique.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons comparé les propriétés électriques et mécaniques des conducteurs en alliage d'aluminium de **type AAAC** avant et après un traitement thermique. Nous avons étudié plusieurs paramètres, tels que le diamètre, la section, la résistance électrique, la résistivité, la force à la rupture, la contrainte mécanique et l'allongement à la rupture.

Les résultats montrent que le traitement thermique a eu une influence positive sur les performances globales du conducteur. En effet, nous avons observé une diminution de la résistance électrique et de la résistivité après le traitement thermique, ce qui signifie que la conductivité électrique du matériau a été améliorée. La résistivité mesurée après le traitement thermique est inférieure à la limite maximale imposée par la norme **NF EN 50182**, ce qui confirme que le conducteur est conforme aux normes électriques.

Du point de vue mécanique, les caractéristiques que nous avons obtenues sont toujours conformes aux exigences normalisées, même si nous avons noté une légère diminution de la contrainte mécanique. L'augmentation de l'allongement à la rupture montre également que la ductilité et la flexibilité du conducteur ont été améliorées après le traitement thermique. De plus, l'opération de graissage appliquée après le câblage est très importante pour protéger les conducteurs Almélec contre la corrosion et les agressions extérieures. Elle permet également de réduire les frottements entre les brins et d'améliorer la durabilité ainsi que la fiabilité mécanique du câble.

Finalement, cette étude a montré que le traitement thermique améliore les propriétés électriques du conducteur tout en maintenant des caractéristiques mécaniques conformes aux normes en vigueur. Les résultats que nous avons obtenus confirment l'intérêt de l'utilisation des alliages d'aluminium dans les conducteurs aériens, car ils offrent un bon compromis entre conductivité électrique, résistance mécanique et fiabilité industrielle.

Conclusion Générale

Ce travail s'est concentré sur l'étude de l'équilibre entre les performances mécaniques et les propriétés électriques des conducteurs en alliage d'aluminium de la série 6xxx, un enjeu majeur pour les réseaux de transport d'énergie et un domaine clé au sein du groupe industriel Sidi Bendhiba (GISB).

Nous avons mené une analyse approfondie des facteurs influençant les performances des conducteurs, notamment la composition chimique, les procédés de fabrication (tréfilage, câblage) et les traitements thermiques, afin de comprendre leur impact sur le comportement global du matériau.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la résistance mécanique, induite principalement par l'écrouissage lors du tréfilage, s'accompagne d'une diminution de la ductilité et peut affecter la conductivité électrique.

L'étude a également mis en évidence que la conductivité électrique est fortement dépendante de la microstructure du matériau. La présence de défauts cristallins, d'éléments d'alliage et de précipités influence directement la mobilité des électrons et, par conséquent, les performances électriques du conducteur.

L'analyse des traitements thermiques, notamment le vieillissement, a permis de confirmer leur rôle essentiel dans la stabilisation des propriétés. La formation contrôlée des précipités de type Mg_2Si contribue à améliorer la résistance mécanique tout en limitant la dégradation de la conductivité.

Ce travail a également souligné que le compromis entre propriétés mécaniques et électriques constitue une contrainte fondamentale dans la conception des conducteurs. Une optimisation excessive d'une propriété se fait généralement au détriment de l'autre.

La maîtrise des paramètres de fabrication et des conditions de traitement thermique apparaît ainsi comme un levier essentiel pour atteindre un équilibre optimal, garantissant des performances conformes aux exigences des normes industrielles.

En conclure, cette étude démontre que la fiabilité des conducteurs utilisés dans les réseaux de transport d'énergie repose sur une approche globale intégrant matériau, microstructure et procédés, permettant d'assurer des conducteurs performants, durables et adaptés aux contraintes d'exploitation.

REFERENCES

[1] la norme NF EN 50182

[2] la norme NF EN 50183

[3] IEC 60228

[4] norme NF EN 50326

[5]la norme international IEC 60228 et européennes NF EN 50182, NF EN 50183