

Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم والتكنولوجيا

Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2025

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DEMASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option : **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

**Influence des impuretés sur les propriétés mécaniques
et électriques d'un fil en cuivre de 8 mm**

Présenté par :

- 1- Mammour Intissar Roumaissa
- 2- Amrani Fatima

Soutenu le 19/06/ 2025 devant le jury composé de :

Président :	Mehtougui Nabila	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	Sefir Yamina	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Bendahma Fatima	Professeur	Université de Mostaganem

Remerciement

*Tout d'abord, nous tenons à **remercier DIEU** pour nous avoir guidés afin d'atteindre ce stade.*

*Nous voudrions adresser toute notre **gratitude** à notre encadreur de ce mémoire, le **professeur BENDAHMA FATIMA**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Un grand merci aux **membres du jury**, Dr. SEFIR YAMINA et Dr. MEHTOUGUI NABILA, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail. Merci à vous tous.*

*Nous adressons toute notre gratitude aux personnes travaillant dans **La Câblerie Algérienne** pour nous avoir fait confiance et ainsi nous offrir la possibilité de vivre cette expérience professionnelle.*

*Nous tenons également à remercier **Mr. AZZI FETHI**, ingénieur de production, pour nous avoir formés avec rigueur et patience. Pour le temps qu'il a accordé à relire ce mémoire, pour nous avoir fait l'honneur de nous accueillir.*

*Nos remerciements vont également à **tous les enseignants, les membres du personnel universitaire, nos amis et notre famille** qui nous ont soutenus tout au long de cette période. Leurs encouragements, leur motivation et leur soutien indéfectible ont été une source d'inspiration et de détermination.*

Nous sommes honorés d'avoir pu bénéficier de vos connaissances, de votre expertise et de votre soutien tout au long de ce parcours académique et professionnel.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*Au meilleur des pères et à ma très chère maman qu'ils
trouvent en moi la source de leur fierté qui ne cessent de me
Donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver*

A ce que je suis aujourd'hui.

*Que dieu les protège et que la réussite soit toujours
à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.*

À mes frères Mohamed Nadir et Adem

Ma jolie sœur Meriem

À toute mes amies, et surtout Chaima

*Je dédie ce travail à la mémoire de ma chère grand-mère,
Que Dieu ait son âme.*

*Sa présence bienveillante et ses encouragements constants
resteront à jamais gravés dans nos cœurs et ont été une
Source d'inspiration tout au long de nos études.*

Allah yar7mek MIMA

INTISSAR ROUMAISSAA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents

qui ont été toujours à mes côtés et m'ont

soutenu tout au long de ces années d'études.

En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici,

l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce

qu'ils ont consenti d'efforts

et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À mes frères Mohamed Amine et Nadir ma sœur Nouria

À toute ma famille

À tous les gens qui me connaissent et que je connais

en particulier

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent

Pas devant les obstacles de la vie.

FATIMA

Résumé

Les impuretés présentes dans le cuivre, telles que le fer, le soufre et l'oxygène, peuvent endommager la structure cristalline, modifiant ainsi ses propriétés mécaniques, électriques et thermiques. Ils réduisent la conductivité, la ductilité et augmentent la fragilité. Les processus de raffinage tels que l'électrolyse et la chaleur du métal sont essentiels pour éliminer ces impuretés, améliorant ainsi la pureté et les performances du cuivre. Le cuivre pur a une structure cristalline uniforme, une meilleure conductivité électrique et une meilleure résistance mécanique, ce qui est crucial pour ses applications industrielles. Nous effectuons le traitement thermique, la composition chimique et les tests. Les analyses ont été réalisées mécaniquement sur les échantillons qui nous ont été fournis par le GISB.

Mots-clés : GISB, propriétés mécaniques, impuretés, la conductivité, la ductilité

Abstract

Impurities present in copper, such as iron, sulfur, and oxygen, can damage the crystalline structure, thus altering its mechanical, electrical, and thermal properties. They reduce conductivity, ductility, and increase brittleness. Refining processes such as electrolysis and metallurgical heat treatment are essential to eliminate these impurities, thereby improving the purity and performance of copper. Pure copper has a uniform crystalline structure, better electrical conductivity, and higher mechanical strength, which is crucial for its industrial applications. We conduct heat treatment, chemical composition analysis, and tests. The analyses were carried out mechanically on samples provided to us by GISB.

Keywords: GISB, mechanical properties, impurities, conductivity, ductility

ملخص

الشوائب الموجودة في النحاس، مثل الحديد والكبريت والأكسجين، يمكن أن تلحق الضرر بالهيكل البلوري، مما يؤدي إلى تغيير خصائصه الميكانيكية والكهربائية والحرارية. هذه الشوائب تقلل من التوصيلية والليونة وتزيد من الهشاشة. تُعد عمليات التكرير مثل التحليل الكهربائي والمعالجة الحرارية للمعادن ضرورية لإزالة هذه الشوائب، وبالتالي تحسين نقاء وأداء النحاس. النحاس النقي يتمتع بهيكل بلوري منتظم، توصيلية كهربائية أفضل، وقوة ميكانيكية أعلى، وهو أمر ضروري لتطبيقاته الصناعية. نقوم بإجراء المعالجة الحرارية، وتحليل التركيب الكيميائي والاختبارات. تم إجراء التحاليل ميكانيكيًا على العينات المقدمة لنا من GISB.

الكلمات المفتاحية: الخصائص الميكانيكية، الشوائب، التوصيلية، الليونة

Sommaire

Introduction Générale	1
CHAPITRE I	3
I.1 Présentation de GISB	4
I.1.1 Fiche Technique du GISB	4
I.1.2 Historique	5
I.1.3 Situation du complexe	5
I.1.4 Fonctionnement.....	6
I.1.5 Norme	7
I.1.6 Capacité Annuelle Du Complexe	7
I.2 Différents services du GISB	8
I.2.1 Service personnel	9
I.2.2 Service bureau d'étude.....	9
I.2.3 Laboratoire contrôle qualité	9
I.2.4 Service planification	11
I.2.5 Test électrique	11
I.2.6 Service maintenance.....	11
I.2.7 Service gestion de stock.....	12
I.2.8 Service commercial	12
I.2.9 Service approvisionnement	12
I.3 Conducteurs et les câbles électriques	13
I .3.1 Définition	13
I.3.2 Matières premières (âme)	13
I .3.3 Enveloppe Isolante	13
I .3.4 Matières premières (Isolation)	14
I .3.5 Gaine de protection	14
I .3.6 Classe de souplesse	15
I .3.7 Repérage des conducteurs.....	15
I .4 Processus de fabrication des câbles électriques	15
I .4.1 Tréfilage.....	16
I .4.2 Câblage	17
I .4.3 Isolation	17

I .4.4 Assemblage	18
I .4.5 Bourrage /Gainage	18
I .4.6 Marquage	19
CHAPITRE II.....	20
Introduction	21
II.1 Le cuivre.....	21
II.1.1 Définition	21
II.1.2 Cuivre industriel non allié	22
II.1.3 Propriétés physico-chimiques et mécaniques du cuivre.....	23
II.1.3.1 Caractéristiques chimique	24
II.1.3.2 Caractéristiques physique.....	25
II.1.3.3 Caractéristiques mécaniques	25
II.1.4 Utilisation du cuivre dans différents domaines	26
II.2 Alliages de cuivre	27
II.2.1 Cuivre faiblement allié	27
II.2.2 Cuivre fortement allié	28
II.3 Le Recuit	28
II.3.1 Définition	28
II.3.2 Avantage	28
II.4 L'Écroui	29
II.4.1 Définition	29
II.4.2 Avantage	29
II.5 Différents type des impuretés	29
II.5.1 Plomb	29
II.5.2 Soufre.....	31
II.5.3 Oxygène	32
II.5.4 Phosphore	32
II.5.5 Bismuth.....	33
II.6 Effet des impuretés sur la Qualité de cuivre	33
II.6.1 Conductivité électrique	34
II.6.2 Résistivité.....	34
II.6.3 Couleur et ductilité du cuivre	35

II.6.4 surface de cuivre.....	35
II.7 Méthodes d'élimination des impuretés du cuivre	36
II.7.1 Fusion.....	37
II.7.2 Affinage électrolytique.....	37
II.7.3 Affinage thermique.....	38
II.8 Etude des effets des procédés d'élimination des impuretés sur la propriété du cuivre	38
II.9 Recyclage du cuivre	39
II.9.1 La coulée continue.....	40
II.9.2 Problématique et paramètres « coulées » importants	41
II.9.3 Liste des paramètres « coulée » importants pour l'étude	42
CHAPITRE III	21
Introduction	44
III.1 Four réverbère.....	44
III.1.1 Utilisation dans la métallurgie	44
III.1.2 Exigences pour le rouge de cuivre	45
III.1.3 Données techniques.....	45
III.2 Pyro-Raffinage du cuivre de seconde fusion	45
III.3 Analyse de la composition chimique	47
III.3.1 Avant traitement	48
III.3.2 Elimination des impuretés métallique	49
a) Oxydation à 1200°C.....	49
b) Purification	52
c) Réduction	53
III.3.3 Après traitement	55
III.4 Coulée	56
III.4.1 Cristallisation.....	56
III.4.2 Laminage	57
III.5 Essais de laboratoire et résultats mécanique / physique	58
1. Poids	59
2. Diamètre	59
3. Résistance électrique.....	60
4. Résistivité	61
5. Conductivité électrique.....	62

6. Résistance à la Traction.....	62
7. Allongement à la rupture.....	63
III.6 Résultats	64
Conclusion.....	65
Conclusion Générale.....	66

Liste des Figures

Figure I.1: Vue géographique de l'entreprise.....	5
Figure I.2: différentes sortes de câbles	6
Figure I.3: Organisation du l'industrie	8
Figure I.4: Nombre et diamètre de brin	15
Figure I.5: Schéma d'une Tréfileuse.....	16
Figure I.6: Processus de câblage	17
Figure I. 7: Conducteur après isolation	18
Figure I.8: Assemblage d'un câble.....	18
Figure I.9: Bourrage et gainage d'un câble	18
Figure II.1: Le métal de cuivre	Error! Bookmark not defined.
Figure II.2: Variation de la résistivité électrique en fonction du taux d'impuretés	35
Figure II.3: Schéma du procédé d'anode soluble	37
Figure II.4: Schématisation de la coulée continue.....	40
Figure II.5: Solidification dans la roue à gorge et laminage.	42
Figure III.1: Four réverbère	44
Figure III.2: Tendance des premiers éléments du groupe	46
Figure III.3: Tendance des deuxièmes éléments du groupe	46
Figure III.4: Tendance des troisièmes éléments du groupe	47
Figure III.5: Spectromètre d'analyse de la composition chimique GISB.....	47
Figure III.6: Les éléments ayant les concentrations les plus élevées dans le métal cuivre	49
Figure III.7: Tronc d'arbre utilisé pour la réduction	53
Figure III.8: processus de formation et de cristallisation du cuivre	56
Figure III.9: processus de laminage.....	57
Figure III.10: Les étapes de réduction section de cuivre laminé.....	57
Figure III.11: Fil machine 8mm.....	58
Figure III.12: échantillon de 1 m du ' fil machine.....	58
Figure III.13: Balance KERN-FKB 12000g.....	59
Figure III.14: Appareil de mesure du diamètre	59
Figure III.15: MILLIOHMMETRE MGR10.....	61
Figure III.16: Appareil de traction mécanique JBA (10 KN)	62

Liste des tableaux

Tableau I.1: Différentes sections et domaines de tension des câbles MT/HT.....	6
Tableau I.2: Repérage des conducteurs.....	15
Tableau II.1: Principales propriétés physico-chimiques du cuivre	22
Tableau II.2: Principales propriétés physiques et mécaniques des divers cuivres industriels non alliés.	23
Tableau II.3: Principales impuretés métalliques du cuivre	30
Tableau II.4: Appellations et teneurs en impuretés des divers cuivres industriels non alliés.....	38
Tableau III.1: Bulletin d'analyses spectrométriques des impuretés affectant la qualité du cuivre.....	48
Tableau III.2 : Quantités d'oxygène nécessaire pour oxyder les impuretés.....	51
Tableau III.3: Résultats de réaction des impuretés après purification	53
Tableau III.4: Bulletin d'analyses spectrométriques des impuretés affectant la qualité du cuivre.....	55
Tableau III.5: Propriétés physique, mécanique et électrique.	64

Abréviation

GISB	Groupe Industriel Sidi Bendhiba
BT	Base Tension
MT	Moyenne Tension
HT	Haute Tension
NF	Norme Française
CEI	Commission Electrotechnique International
UTE	Union Technique de l'Electricité
CENLEC	Comité Européenne de Normalisation pour l'Electrotechnique
BS	British Standards Institution
NE	Comité Européenne de Normalisation
ISO	International Organisation for Standardisation
Ni	Nickel
As	Arsenic
Sb	Antimoine
Sn	Etain
ppm	Partie par million
wt %	Weight Percent (Pourcentage massique)
IACS	International Annealed Copper Standard
OFHC	Oxygen Free High conductivity
ETP	Electrolytic Tough-Pitch
EC	Electrical Conductivity
RE	Résistance Electrique
PPM	Pure Purple Metal (Pureté du cuivre Purifié à plus de 99,99%)

Introduction Générale

Le cuivre est un élément essentiel du développement industriel moderne. Son importance découle de ses propriétés exceptionnelles, qui en font un matériau indispensable dans des secteurs vitaux tels que l'électricité, l'électronique, les transports et la construction. Ces propriétés comprennent une conductivité électrique et thermique élevée, une résistance supérieure à la corrosion, ainsi qu'une ductilité et une malléabilité supérieures. Face à la demande mondiale croissante et à une prise de conscience environnementale croissante, le recyclage du cuivre usagé revêt une importance stratégique. Le recyclage contribue non seulement à la préservation des ressources naturelles et à d'importantes économies d'énergie par rapport à la production primaire de cuivre, mais réduit également l'empreinte environnementale liée à l'extraction et à la fabrication.

La qualité des produits finaux en cuivre, notamment ceux destinés à la fabrication de câbles électriques de différentes sections, dépend directement de la pureté du métal. Même la plus infime quantité d'impuretés peut avoir un impact significatif sur les performances. Chimiquement, les impuretés peuvent affecter la stabilité du cuivre et sa résistance à l'oxydation et à la corrosion, réduisant ainsi sa durée de vie. Sur le plan électrique, élément essentiel dans les applications de câblage, la présence d'éléments tels que le fer (Fe), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le silicium (Si), l'aluminium (Al), le plomb (Pb), l'étain (Sn), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb) augmente considérablement la résistance électrique du cuivre. Cette résistance accrue entraîne une perte d'énergie sous forme de chaleur, ce qui réduit l'efficacité de la conduction et peut affecter l'intégrité des câbles, limitant ainsi leur capacité à transmettre efficacement le courant. Sur le plan mécanique, ces impuretés réduisent la ductilité et l'étirabilité du cuivre, rendant les procédés de formage tels que le laminage plus difficiles et exposant le produit à des risques de rupture ou à l'apparition de défauts de surface et internes. Cela limite la capacité à produire des fils de cuivre fins, tels que des fils de cuivre de 8 mm de diamètre.

La chaîne de traitement du cuivre recyclé comprend des étapes successives visant à atteindre les plus hauts niveaux de pureté et de qualité. Ces procédés commencent généralement par la fusion des déchets de cuivre dans des fours spéciaux tels que des fours à réverbère. Cette étape est suivie d'une étape cruciale : le traitement thermique par oxydation (TTO). Ce procédé vise à éliminer les impuretés en les transformant en oxydes pouvant être

INTRODUCTION GENERALE

séparés soit sous forme de scories flottant à la surface et raclées, soit sous forme de gaz volatils captés. Une fois la plupart des impuretés éliminées, un procédé de réduction est mis en œuvre pour éliminer l'excès d'oxygène dissous dans le cuivre. L'étape finale est le formage, au cours duquel un laminoir est utilisé pour produire du fil de cuivre du diamètre souhaité.

Cette recherche se concentre spécifiquement sur l'effet de diverses impuretés sur les propriétés chimiques, électriques et mécaniques du cuivre et sur sa qualité globale, avec une attention particulière portée à la manière d'atténuer ces effets. Les mécanismes par lesquels chaque impureté affecte les propriétés fondamentales du cuivre seront explorés, ainsi que la manière de contrôler ces impuretés pendant les étapes de fusion et d'oxydation dans un four à réverbère afin de garantir un cuivre de haute pureté. L'objectif ultime est de contribuer à l'amélioration des procédés de recyclage du cuivre afin de produire du fil de cuivre de 8 mm de diamètre de haute qualité, entièrement conforme aux normes strictes requises pour la production de câbles électriques en cuivre de différentes sections, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité des infrastructures électriques.

Ce travail est structuré en Trois chapitres :

- 1. Présentation de l'entreprise algérienne de cuivre GISB :** Ce chapitre décrit l'entreprise où j'ai effectué mon stage. Nous abordons ses procédés, ses principaux composants et son rôle dans l'industrie du cuivre.
- 2. généralité sur le cuivre :** Ce chapitre fournit un aperçu détaillé du cuivre métallique et de ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que de ses propriétés fondamentales, notamment la conductivité électrique, la ductilité, les propriétés mécaniques et thermiques. Nous abordons également les différents alliages de cuivre.

Ce chapitre aborde également le recyclage du cuivre et le processus d'affinage par traitement thermique et électrolytique, ainsi que les mécanismes d'écoulement continu.

- 3. Résultats et discussion :** Dans ce dernier chapitre, nous présentons les résultats obtenus au cours de notre étude, suivis d'une discussion approfondie sur leur importance et leurs implications pour l'amélioration de la qualité du cuivre. Ainsi, chaque chapitre contribue à une compréhension globale des problématiques liées au cuivre, de ses propriétés fondamentales à ses applications industrielles, en tenant compte des effets des impuretés et des résultats de notre étude.

CHAPITRE I

A decorative banner with a central rectangular box containing text. The banner has a white background and a black outline. The central box is white with a black border and contains the text "Description de la câblerie GISB" in a bold, black, serif font. The banner has a slight 3D effect with a grey shadow on the right side.

**Description de la
câblerie GISB**

I.1 Présentation de GISB

La Câblerie Algérienne est une marque du groupe industriel Sidi Bendehiba (GISB) spécialisée dans la fabrication et commercialisation des fils et des câbles électriques (BT, MT, HT, THT), câbles spéciaux et câbles pour applications ferroviaires. La Câblerie Algérienne utilise les technologies les plus récentes dans le domaine, ce qui permet la mise à disposition des produits faits sur mesure pour satisfaire des besoins hautement spécialisés, spécifiques avec des câbles de différentes gaines et couleurs, protégés contre les effets du rayonnement UV, et adaptés aux différents environnements et des températures.

Grâce à l'un des plus importants investissements d'Afrique et à son capital humain de plus de 800 personnes, La Câblerie Algérienne est devenue un leader et un partenaire incontournable dans l'industrie du câble.

L'objectif de l'entreprise est d'accompagner le pays dans son processus de développement, d'émergence et de mondialisation en exploitant son emplacement géostratégique qui offre un accès privilégié au marché Africain et Européen.

I.1.1 Fiche Technique du GISB

Activités Principales : Fabrication des câbles.

- Production du fils machine en cuivre et aluminium et alliages d'aluminium
- Production fils et câbles électrique : câble de contrôle, câble base et moyenne tension, câble et conducteur pour les lignes de transmission aérienne.

Capitale sociale : 102 400 000 DA

Détenu à 100% par investisseurs Algériens

Nombre d'employés : plus de 800 employés.

Lieu d'implantation : Siège et usine à la zone industrielle de Mesra –Mostaganem

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

Superficie site 1 : extrusion et administration 20 000 m²

I.1.2 Historique

Le groupe industriel GISB opère dans le domaine de l'énergie depuis 2009. Il est composé de deux filiales: CSB (Câblerie Sidi Bendehiba) dont l'activité principale est la production et la commercialisation des câbles électriques (basse, moyenne et haute tension) de haute qualité afin de répondre aux besoins du marché national et international.

Maghreb Transfo, quant à elle, est une unité de fabrication de transformateurs électriques. Son savoir-faire lui permet d'usiner une grande variété d'appareils : transformateur de distribution, transformateur de type sec, transformateur monophasé, transformateur avec cabine et transformateur de type spéciale. Avec le plus important investissement en Algérie et au Maghreb.

I.1.3 Situation du complexe

GISB (groupe Industriel Sidi Bendehiba) est un groupe industriel diversifié implanté dans la zone d'activité de Mesra, Wilaya de Mostaganem, GISB a su profiter d'avantages géographique : une implantation dans une ville portuaire à proximité du port de Mostaganem a 12,5 Km,



Figure I.1: Vue géographique de l'entreprise

I.1.4 Fonctionnement

GISBest une société industrielle spécialisée dans la fabrication de différentes sortes de câbles (Figure I.1), telle que :

- Câbles BT Domestiques
- Câbles BT aériens de distribution et branchement
- Câbles MT & HT isolés
- Câbles sans Halogènes
- Câbles de commande
- Câbles BT Industriels
- Conducteurs Nu Aériens



Figure I.2: différentes sortes de câbles

La fabrication descâbles MT/HT est un projet en cours de réalisation. Le tableau ci-dessous montre les différentes sections et domaines de tension des câbles MT/HT qui seront fabriqués prochainement à la câblerie algérienne.

Tableau I.1: Différentes sections et domaines de tension des câbles MT/HT

		MT		HT
Tensions		6/10 KV	18/30 KV	36/60 KV
section (mm ²)/Cu		1x500	1x35 1x50 1x300	1x630 1x800
section (mm ²)/Al	1x240 1x185	1x120 1x185 1x240		

GISB représente l'un des plus grands complexes industriels de production des câbles électriques en Algérie, qui a su s'imposer autant que spécialiste du câble en maîtrisant toute la chaîne de production. GISB a consolidé sa place de leader dans le marché grâce à une technologie de pointe, l'innovation, la qualité et le professionnalisme. Grâce à une large gamme de câblage cuivre, fil machine et câbles spéciaux. Il dessert des clients dans les domaines commerciaux, industriels, de la distribution d'électricité, des télécommunications, de l'équipement d'origine, des industries militaires / gouvernementales, du détail, de l'électricité et des communications à travers le pays, De ce fait, elle est leader dans l'industrie des câbles.

I.1.5 Norme

CSB s'est engagé à rendre ses produits meilleurs, plus sûrs et plus intelligents. Tout en respectant un ensemble des normes internationales et nationales, telle que :

- La Norme de la Commission Electrotechnique International(CEI).
- La norme Electrique (Nf).
- La Norme UTE (Union technique de l'électricité).
- Le Norme CENELEC (Comité Européen de Normalisation pour l'Electrotechnique).
- Norme BS (British Standards Institution).
- Norme NE (Comité européen de normalisation).

I.1.6 Capacité Annuelle Du Complexe

La société CSB regroupe environ 500 effectifs avec un capital social de 102.400.000 DA, d'une capacité de production importante (90.000 tonnes/an d'alliage de cuivre, 40000 tonnes/an d'alliage d'aluminium, 5000 tonnes/an de PVC granulé, avec une production annuelle prévisionnelle de 18000 tonnes/an), le groupe possède deux sites: l'un étant un atelier de métallurgie, de tréfilage et de câblage des câbles électrique et l'autre un atelier d'extrusion des câbles électriques. Ce complexe s'étend sur 132000 m².

I.2 Différents services du GISB

La Figure I.3 montre les différents services du GISG.

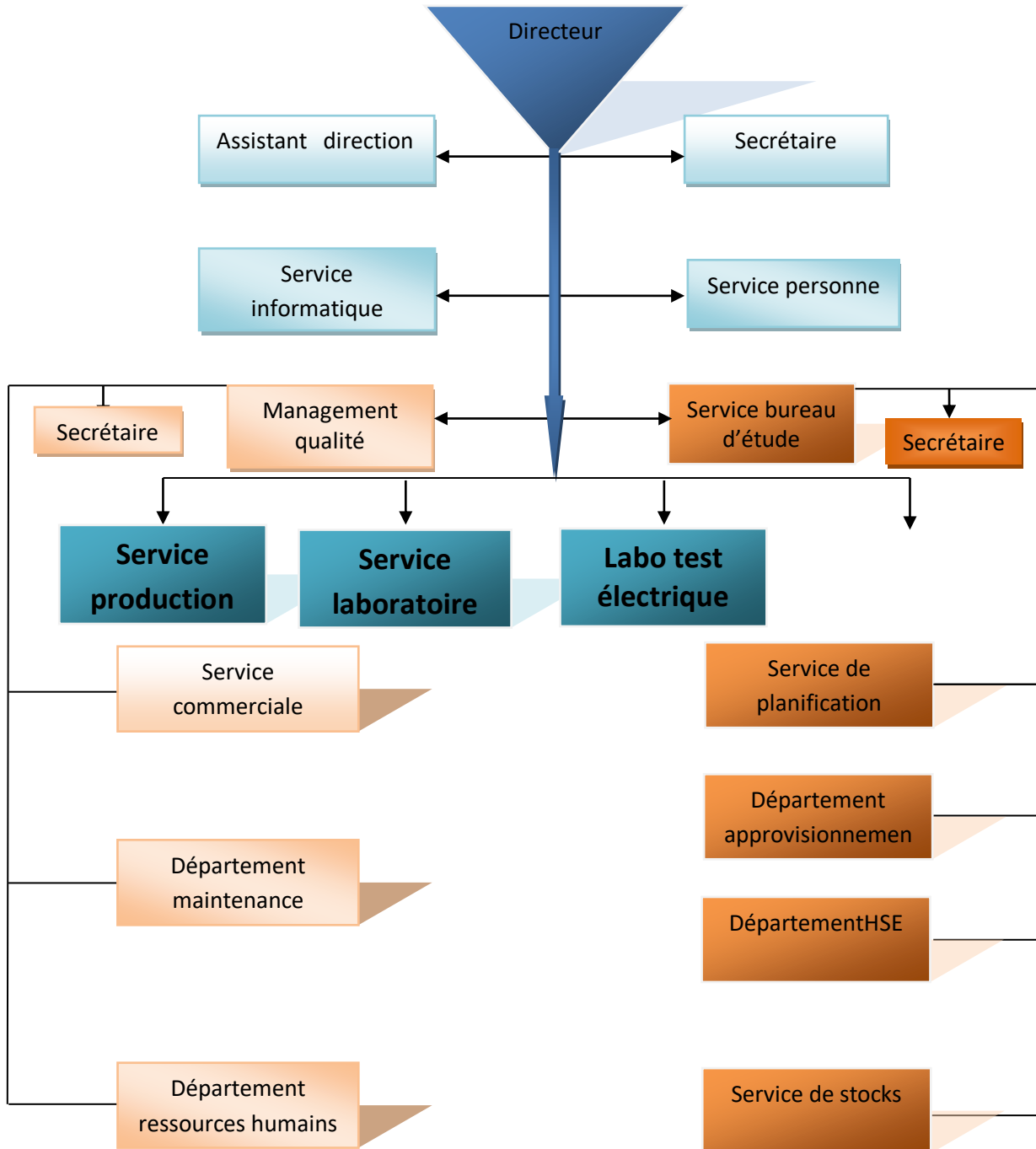


Figure I.3: Organisation de l'industrie

I.2.1 Service personnel

La gestion des ressources humaines comprend des fonctions administratives et opérationnelles, elle comprend donc les tâches de :

- Recrutement et d'embauche du personnel
- Orientation du personnel ;
- Encadrement dans les fonctions ;
- Évaluation de la performance du personnel.

I.2.2 Service bureau d'étude

- Conception des produits.
- Etablir les fiches construction pour services planification, production et contrôle qualité et les fiches techniques pour services commercial et communications.

I.2.3 Laboratoire contrôle qualité

Tous les produits fabriqués sont soumis en laboratoire interne à tous les essais normalisés exigés avant leurs mises en consommation. Ceci nous permet de garantir la qualité de nos produits et d'assurer le consommateur sur leur conformité. Le système de Management et de la qualité développé à GISB conformément à la norme ISO 9001 version 2008 est un élément de cette stratégie, d'où il contient :

- 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.
- Testeur point de goutte de graisse.
- Densimètre appareil de mesure de densité.
- 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 Tmax=80°C.
- Balance /densimètre Mmax=360g.Mmin=0,02
- Viscosimètre.
- Testeur point de goutte de la graisse.
- Pénétrömètre pour la graisse.

a) Paramètres des tests de câble

L'épaisseur /Diamètre/le poids/Résistance/traction/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

La planification est un instrument d'action, elle donne à l'entreprise le moyen d'agir sur le futur, elle a pour but d'optimiser le cout les délais et la qualité. Dans ce contexte, on planifie pour :

- Coordonner les activités de l'entreprise ;
- S'assurer que le futur est pris en considération ;
- Définir les objectifs à long terme ;
- Agir sur le futur et le contrôler ;
- Maîtriser son environnement en perpétuel changement.

Après la réception des commandes du service commercial, le planificateur l'ajoute à la liste d'attente, puis il établit un plan de 24 heures, ensuite, il le communique au magasinier de filière, ingénieur de production, chef de groupe et laboratoire, et finalement faire un suivi.

I.2.5 Test électrique

Il applique une tentions de 3500 V pondant 5 minutes pour le cuivre et 4000 V pondant 15 minute pour l'aluminium pour confirmer la conformité du produit fini, comme il vérifie le touret, le début et la fin du câble, la langueur et le marquage.

I.2.6 Service maintenance

Il a pour but d'assurer la disponibilité et le bon fonctionnement des équipements, en utilisant deux types de maintenance :

Maintenance préventive : consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, afin de tenter de prévenir la panne, elle peut être systématique ou conditionnel.

Maintenance corrective : consiste à intervenir sur un équipement après la défaillance son rôle est remettre l'équipement dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

I.2.7 Service gestion de stock

Il s'agit de faire le suivi des quantités entrées et sorties dans un ou plusieurs dépôts, Ces quantités peuvent être matière première, produits finis ou consommable.

I.2.8 Service commercial

Ce service garantit la coordination entre l'entreprise et les consommateurs. En plus, il étudie les besoins à satisfaire afin de définir les produits à fabriquer. Enfin, il agit sur le marché en adaptant les produits aux besoins du client. Il se divise en quatre : écoute client, facturation, expédition, marketing.

I.2.9 Service approvisionnement

Dans l'entreprise, la fonction approvisionnement recouvre les achats (matière première ou consommable), parmi ces taches le choix du fournisseur, dans le cas d'un article inhabituel ou dans l'indisponibilité.

❖ Clients

Les clients de LA CABLERIE ALGERIENNE sont issus de tout le territoire national, tel qu'elle serve des industries qui ont une production considérable, parmi ses clients :

- Sonatrach
- SONELGAZ
- KAGRIF
- SONACOM
- Tosyali Algérie
- ENIE, MEI
- HASNAOUI

I.3 Conducteurs et les câbles électriques

I.3.1 Définition

Ils permettent de réaliser les liaisons électriques, leur rôle est de conduire le courant électrique et transporter l'énergie électrique jusqu'aux les récepteurs.

I.3.2 Matières premières (âme)

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

a- Cuivre

Le cuivre est le métal le plus utilisé pour faire des fils et câbles électriques, car il a une excellente conductivité électrique. On l'utilise soit en fil de section cylindrique monobrin (rigide), soit en section toujours cylindrique mais multibrins ou (souple).

b- Aluminium

On utilise aujourd'hui des conducteurs d'aluminium pour les lignes aériennes, car le gain de poids ainsi obtenu compense largement la perte de conductivité par rapport au cuivre. Ils sont fabriqués par extrusion à la presse, à travers une filière, d'une billette d'aluminium chauffée.

c- Almélec

Alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium. Il est principalement utilisé pour la réalisation des lignes aériennes. Sa résistivité ($32,5 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$) est environ le double de celle du cuivre, mais ses caractéristiques mécaniques lui permettent de résister aux contraintes liées à l'environnement (vent, gel, neige, variations de température).

I.3.3 Enveloppe Isolante

L'enveloppe isolante c'est la matière qui entoure l'âme, elle permet :

- d'isoler les conducteurs.
- Enveloppes isolantes vides
- de protéger contre les contacts directs et les défauts d'isolement .Elle doit posséder des propriétés bien précises.

L'isolant assurant l'isolement entre les conducteurs à des potentiels différents et avec la terre ou les masses, il doit présenter une très forte résistivité) et une bonne tenue en température.

I.3.4 Matières premières (Isolation)

L'entreprise utilise actuellement :

- Le PVC : Polychlorure de Vinyle ou le Polyéthylène.
- Le XLPE (PR) : Polyéthylène Réticulé.

a- Polychlorure de vinyle (PVC)

Il se présente sous forme de poudre. Pour le transformer correctement, on ajoute un stabilisant (qui empêchera la matière de se dégrader en cours de transformation) et un lubrifiant (pour favoriser la transformation).

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)

C'est un type de polyéthylène ayant subi une réticulation, dans le but d'améliorer certaines propriétés, et particulièrement la résistance aux hautes températures (90°C). (Le XLPE nécessite l'ajout d'un catalyseur).

I.3.5 Gaine de protection

La gaine de protection, toujours en PVC, protège le câble de son environnement. 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.3.6 Classe de souplesse

La souplesse d'un conducteur ou d'un câble dépend du nombre de brins pour la même section conductrice. La souplesse des câbles est définie en 6 classes : les âmes les plus rigides étant en classe 1, les plus souples en classe 6.

- **Classe 1** : âmes massives (un seul brin)
- **Classe 2** : âmes rigides (plusieurs brins câblés)
- **Classe 5** : âmes souples (une multitude de brins)
- **Classe 6** : âmes extra-souples (une multitude de brins)

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

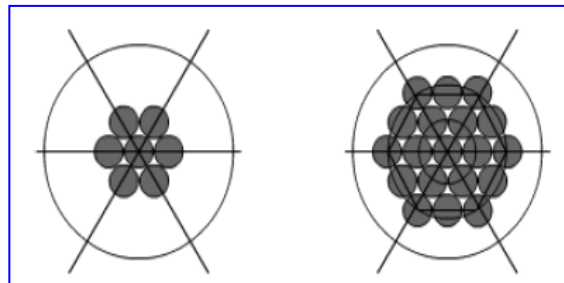


Figure I.4: Nombre et diamètre de brin

I.3.7 Repérage des conducteurs

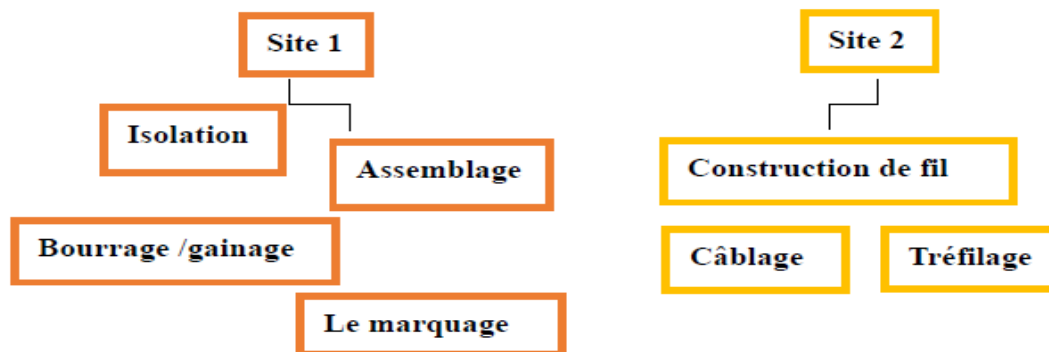
Le repérage par la couleur des isolants des conducteurs permet de savoir l'utilité du conducteur : Phase, Neutre ou Protection Equipotentielle (PE) (Tableau I.2).

Tableau I.2: Repérage des conducteurs

Couleur	Type de conducteurs
Noir	Conducteur de Phase
Gris	Conducteur de Phase
Marron	Conducteur de Phase
Bleu	Conducteur de Neutre
Vert/ Jaune	Conducteur de Protection Equipotentielle (PE)

I.4 Processus de fabrication des câbles électriques

L'entreprise est dotée de deux sites :



I.4.1 Tréfilage

C'est le premier processus de fabrication d'un conducteur, son principe est simple, le fil-machine se déplace à travers une série de filières au diamètre décroissant, ce qui permet une réduction progressive de son épaisseur initiale. Les filières et les cabestans sont directement submergés dans le liquide lubrifiant afin d'apporter une meilleure lubrification et un plus grand refroidissement.

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, en diamant qui va assurer la réduction du diamètre du fil et une frette en acier qui maintient le noyau et lui permet de résister aux fortes pressions développées au cours du tréfilage.

Les fils de cuivre sont soumis à un traitement thermique appelé recuit. Le recuit d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste à faire subir au matériau un choc électrique, c'est une étape de montée graduelle en température suivi d'un refroidissement contrôlé. Le but de cette étape est d'augmenter sa ductilité et sa conductivité. Le recuit n'est pas nécessaire pour l'Aluminium et l'Almélec.

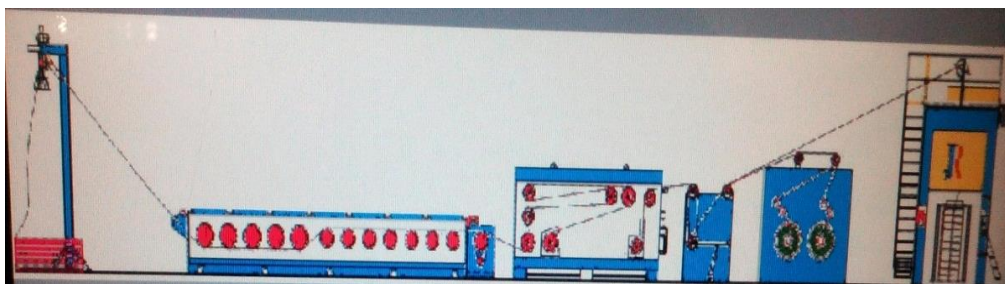


Figure I.5: Schéma d'une Tréfileuse

NB : Tous les fils en cuivre sont soumis à un recuit, et les fils en almélec à un traitement thermique pour but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

I.4.2 Câblage

C'est le second processus qui vient Après le tréfilage, les fils obtenus sont regroupés afin de former les conducteurs à l'aide des filières spécifiques et une boîte de commande pour définir le pas et le sens de câblage (droite pour l'aluminium et gauche pour le cuivre et l'almélec), à la fin de cette opération on vérifie le diamètre de câblage, le diamètre du conducteur, le sens de câblage, la résistance, le poids, le pas.



Figure I.6: Processus de câblage

I.4.3 Isolation

Dans ce processus nous allons poser un recouvrement isolant sur le conducteur afin d'éviter les fuites de courant. La capacité d'isolation du matériau et son épaisseur détermineront la tension maximale de service du câble. Un matériau d'isolation de meilleur niveau thermique permettra de transmettre une plus grande puissance pour une même section de conducteur.

Le matériau d'isolation est fondu et s'applique sur le conducteur en continu à l'aide d'une extrudeuse afin d'éviter la fuite de courant. Les matériaux d'isolation peuvent être de différente nature : PVC, XLPE, etc.

Toute la longueur du câble est soumise à un contrôle de voltage (spark test) afin de garantir que la couche d'isolation ne présente aucun défaut.

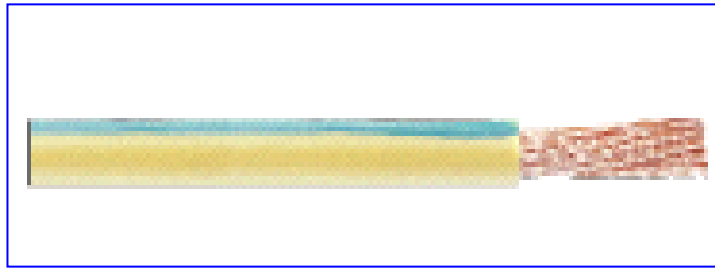


Figure I. 7: Conducteur après isolation

I .4.4 Assemblage

Il consiste à regrouper différentes âmes isolées afin de former un câble multi polaire. L'identification des phases peut être effectuée par une coloration ou par un numérotage de celles-ci.

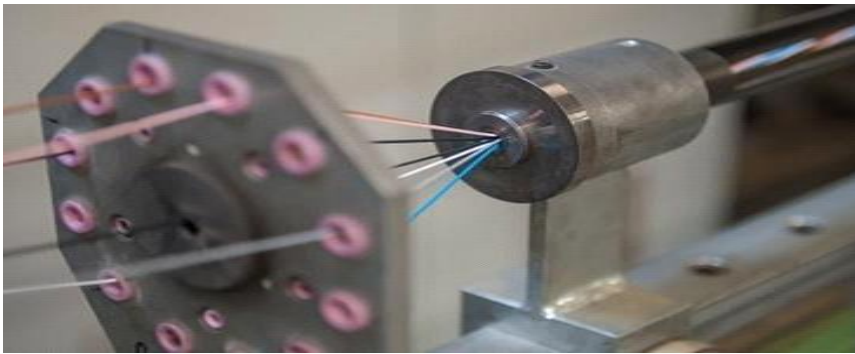


Figure I.8: Assemblage d'un câble

I .4.5 Bourrage /Gainage

Le bourrage a pour but de donner une forme ronde au câble. La gaine extérieure est un recouvrement polymérique il isole l'intérieur du câble d'éléments externes qui pourraient altérer ses propriétés électriques comme l'humidité et le protège des chocs qu'il peut recevoir durant son installation et utilisation.



Figure I.9: Bourrage et gainage d'un câble

I.4.6 Marquage

Pour que les clients identifient correctement le câble, celui-ci est marqué avec les informations les plus importantes : fabricant, dénomination commerciale et celle du câble, nombre de conducteurs, section, norme de fabrication et autres informations intéressantes comme la certification du produit et le marquage mètre par mètre qui facilite le contrôle du stock.

CHAPITRE II



**Généralité sur le
cuivre**

Introduction

Le cuivre ($d = 8,94\text{g/cm}^3$) fait partie des métaux lourds qui existent naturellement dans la croûte terrestre, connu pour sa conductivité électrique. Sous forme de traces mélangée sa d'autres minerais (Cd associé au Zn ou au Pb, As présent dans les sulfures métalliques), en quantités allant des traces aux gisements (mines de Cr, de Ni...) [1]. Il est le second en importance des métaux non ferreux, et plus consommé. Le cuivre est utilisé dans les câbles électriques, la plomberie, les équipements de chauffage et de refroidissement, ainsi que dans l'industrie électronique en raison de sa malléabilité et de sa résistance à la corrosion, le cuivre peut être recyclé à l'infini, ce qui en fait un matériau respectueux de l'environnement et durable.



Figure II.1: Le métal de cuivre

II.1 Le cuivre

II.1.1 Définition

Le cuivre est un métal de la première série de transition. Il fait partie du groupe 11 (IB) dans le tableau périodique des éléments. Il est malléable, ductile, et résiste à la corrosion de l'air et de l'eau mais est attaqué par les acides. Son numéro atomique est égal à 29 et sa masse molaire est de $63,57\text{ g/mol}$ [2].

Sa configuration électronique est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}1s^1$ [3,4] Suivant la règle classique de remplissage des orbitales atomiques (règle de Klechkowski). La résistivité électrique du cuivre est $0.0178 \text{ ohm.mm}^2/\text{m}$ [5].

Tableau II.3: Principales propriétés physico-chimiques du cuivre

Numéro atomique	29
Masse atomique	63,546 g/mol
Masse volumique	8,9 g/cm ³ à 20°C
Température de fusion	1083°C
Température d'ébullition	2595°C
Conductivité électrique	59,6.105 S.m ⁻¹
Conductivité thermique	401 Wm ⁻¹ K ⁻¹

II.1.2 Cuivre industriel non alliée

Les cuivres industriels non alliés peuvent, en général, être classés en trois grandes catégories qui sont, d'après la nomenclature française, **Cu-a**, **Cu-b** et **Cu-c** :

♦ Le cuivre **Cu-a** contenant de l'oxygène, existe sous forme de trois nuances normalisées dépendant du procédé d'affinage : **Cu-a1**, **Cu-a2** et **Cu-a3**. Le cuivre **Cu-a1**, obtenu par affinage électrolytique, contient une teneur en cuivre supérieure ou égale à 99,90% en masse. C'est le cuivre le plus pur chargé en oxygène et aussi le plus couramment utilisé. Il a de hautes conductivités électrique et thermique et est destiné à des usages électriques (ou thermiques). Il est difficilement soudable et ne peut être utilisé sous vide. Les deux autres nuances (**Cu-a2** : Cu ≥ 99,90% et **Cu-a3** : Cu ≥ 99,85%) sont obtenues par affinage thermique, seule la première étant de conductivité électrique garantie. Ces cuivres sont cependant moins utilisés que le cuivre **Cu-a1**, en raison de présence d'un taux d'impuretés plus élevé.

♦ Le cuivre **Cu-b**, exempt d'oxygène et désoxydé au phosphore, contient au moins 99,90% en masse de cuivre et entre 0,013% et 0,050% (**Cu-b1**) ou entre 0,004% et 0,012% (**Cu-b2**) de phosphore. Ce cuivre présente de bonnes caractéristiques mécaniques (bonne soudabilité, meilleure tenue mécanique à température moyenne), mais sa conductivité électrique est limitée par rapport au cuivre Cu-a.

♦ Le cuivre **Cu-c**, exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, **Cu-c1** (cuivre pur) qui

Comprend 99,95 % de cuivre et **Cu-c2** (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. C'est l'équivalent des cuivres de marque OFHC (Oxygen Free High Conductivity) d'origine américaine. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques (ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité).

II.1.3 Propriétés physico-chimiques et mécaniques du cuivre

Tableau II.4: Principales propriétés physiques et mécaniques des divers cuivres industriels non alliés.

Elément Cu (M = 63,54 / Z=29)					
Propriétés physiques					
Enthalpie de fusion		211850 J/kg			
Température de Fusion		1065° à 1083 C			
Coefficient de dilatation (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	de -190° à 16°C		14,1		
	de 25° à 100°C		16,8		
	de 20° à 200°C		17,3		
	de 20° à 300°C		17,7		
Capacité thermique Massique (en J / (kg.K))	20°C		386		
	100°C		393		
	200°C		403		
	900°C		528		
Conductivité thermique (W / (m .K))	20°C		400		
	100°C		385		
	200°C		381		
	300°C		377		
Conductivité électrique (% IACS)	(état recuit)	20°C	100 à 102,5		
		100°C	76		
		200°C	58		
	(état écroui)	20°C	97		
Résistivité électrique ρ (μΩ .cm)	(état recuit)	20°C	1,724 à 1,682		
		100°C	2,27		
		200°C	2,95		
	(état écroui)	20°C	1,78		
Propriétés mécaniques					
Etat de Livraison	Symbole AFNOR	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (A %)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	230	45	50
¼ dur	H11	190	270	25	80

½ dur	H12	250	300	14	100
4/4 dur	H14	320	350	6	110

L'état de recuit signifie 0% d'érouissage : état AFNOR O

¼ dur : 10% d'érouissage : état AFNOR H11

½ dur : 25% d'érouissage : état AFNOR H12

4/4 dur : 50% d'érouissage : état AFNOR H14

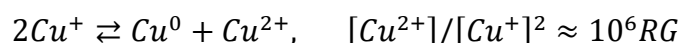
Rp0, 2 limite élastique à 0.2% d'allongement

Rm résistance mécanique

II.1.3.1 Caractéristiques chimique

Dans le tableau périodique, le cuivre appartient au groupe des métaux de transition et se situe après l'argent, dans le sous-groupe B de la première colonne. Il est le neuvième des dix éléments de transition entre le calcium et le gallium, et il est le premier à avoir une sous-couche 3d complètement remplie. Le cuivre adopte souvent un état d'oxydation +1, ce qui rend ses composés similaires à ceux de l'argent.

On retrouve fréquemment les composés cuivreux associés à des minéraux argentifères. Les oxydes, sulfures et halogénures de cuivre(I) ont une structure covalente et cristallisent dans un système cubique, similaire à celui de la blende. Ces composés fondent facilement et possèdent des propriétés semi-conductrices [6]. L'ion Cu^+ est incolore et ne présente pas de propriétés magnétiques (diamagnétiques). À cause de son rayon ionique relativement grand (0,091 nm), il ne forme pas d'hydrates stables et ses complexes sont en général peu durables en solution, notamment à cause de leur équilibre chimique :



En revanche, les sels de cuivre(II) (cuivriques) sont plus colorés. Par exemple, en présence d'ammoniac, ils forment des complexes $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_n]^{2+}$ à la couleur bleu foncé caractéristique. Les hydrates et complexes à base d'amines sont souvent paramagnétiques, car ils contiennent un électron non apparié et ont une géométrie de type dsp^2 .

a. Réactivité

Le cuivre est un métal peu réactif. Il ne réagit pas avec l'eau, ce qui explique sa bonne résistance à la corrosion dans des conditions normales.

Avec l'eau: aucune réaction notable.

Avec les acides oxydants : il réagit avec l'acide nitrique (HNO₃) ou l'acide sulfurique concentré (H₂SO₄), formant par exemple du nitrate de cuivre et du dioxyde d'azote selon l'équation suivante :



Avec l'air : au contact prolongé de l'air, il forme lentement une couche d'oxyde protectrice qui empêche une oxydation plus profonde.

b. Oxydation

À l'air libre, le cuivre s'oxyde en surface et forme une patine verte appelée vert-de-gris. Cette couche le protège de la corrosion ultérieure [7].

II.1.3.2 Caractéristiques physique

Le cuivre, derrière l'argent, se classe parmi les meilleurs conducteurs de chaleur et d'électricité, avec environ 6 % de conductivité en moins que l'argent. Cela explique son utilisation dans divers équipements tels que les chaudières, les serpentins, les cuves, les fils et câbles électriques, ainsi que dans les enroulements de dynamos et d'autres systèmes de transmission d'énergie. La conductivité du cuivre peut être modifiée par plusieurs facteurs. Les variations de température, les traitements mécaniques et la présence d'inclusions peuvent réduire cette propriété. Par exemple, lorsque la température augmente de 20°C à 100°C, la conductivité du cuivre pur peut diminuer jusqu'à 78 %. De plus, la déformation du métal lors de traitements à froid perturbe l'agencement du réseau cristallin, ce qui réduit encore sa capacité à conduire l'électricité. Un traitement thermique à 450°C permet de rétablir l'alignement des cristaux et d'améliorer ainsi la conductivité, ce qui peut également être obtenu en éliminant les inclusions.

II.1.3.3 Caractéristiques mécaniques

Le cuivre pur présente des caractéristiques mécaniques modérées, avec une dureté de 3 sur l'échelle de Mohs. Sa résistance à la traction est faible, tandis que son allongement est élevé. Bien qu'il soit ductile et relativement résistant, il reste néanmoins mou et présente une faible limite élastique, ce qui explique son utilisation courante sous forme d'alliages. Le cuivre est favorable à la mise en forme à chaud et à froid, bien qu'un recuit soit nécessaire lors du travail à froid pour éviter l'écrouissage. Son usinage est relativement médiocre, et un retrait élevé impacte ses propriétés de fonderie. Le cuivre à faible teneur en oxygène est

particulièrement utilisé dans les conducteurs de courant en raison de sa meilleure élasticité. À haute température, le cuivre perd en résistance à l'oxydation et ses propriétés mécaniques diminuent à partir de 200°C. En revanche, certains alliages de cuivre, tels que les cupronickels et les cupro-aluminiums, présentent une meilleure résistance à la chaleur, avec une température limite de 400 à 500°C selon le temps d'exposition. Pour des applications nécessitant à la fois résistance thermique et conductivité électrique, des matériaux composites peuvent être utilisés. [8]

II.1.4 Utilisation du cuivre dans différents domaines

Le cuivre est utilisé dans de nombreuses industries, notamment la fabrication, la construction et le transport. Le cuivre est considéré comme un oligo-élément et est essentiel à tous les organismes vivants.

Le Cuivre et ses composés ont de nombreuses utilisations industrielles sont :

Fabrique une large gamme d'alliages à base de cuivre : bronze (étain), laiton (zinc), monel (nickel), maillechort (nickel et zinc), devarda (aluminium et zinc), alliages de bijouterie (y compris l'or et l'argent).

Préparation de catalyseurs en synthèse organique (Cu, Cu(CH₃COO)₂, CuCl₂, CuCl, Cu₂O, Cu(NO₃)₂, Cu₂Cl(OH)₃).

Production de colorants métalliques, pigments de verre, céramiques, émaux, peintures, encres et vernis (Cu(CH₃COO)₂, CuCl₂, Cu₂O, CuO, Cu(NO₃)₂, CuSO₄).

Fabrication de produits phytopharmaceutiques : herbicides, fongicides (contre les moisissures) (Cu₂O, Cu(OH)₂), bouillies bordelaises (CuSO₄ et hydroxyde de calcium Cu(OH)₂, sulfate de cuivre tribasique. [9]

Hydrométallurgie : Affinage des métaux (Cu₂O, CuO, CuCl₂).

Il est utilisé dans des domaines variés tels que l'électricité, l'électronique, la plomberie, l'industrie automobile, la fabrication d'équipements industriels et la production de pièces de monnaie.

Le cuivre entre dans la composition de nombreux alliages utilisés notamment dans les radiateurs et les échangeurs de chaleur. Grâce à sa conductivité électrique exceptionnelle la plus élevée parmi les métaux non précieux ainsi qu'à sa remarquable conductivité thermique, il est largement privilégié dans les secteurs des télécommunications, de la construction et du transport de l'énergie.

L'utilisation du cuivre connaît une croissance continue dans les circuits intégrés et les circuits imprimés, en raison de ses excellentes propriétés conductrices. Il est également utilisé dans des composants électroniques tels que les tubes à vide et les guides d'onde. En architecture, le cuivre sert de matériau de revêtement imperméable, notamment pour la couverture des toitures [10].

Le cuivre, associé au nickel, est utilisé en construction navale pour sa résistance élevée à la corrosion. Bien que représentant une part moindre de son utilisation globale, les composés cuivrés sont notamment employés dans la fabrication de fongicides [11].

II.2 Alliages de cuivre

II.2.1 Cuivre faiblement allié

Aux teneurs employées (généralement 1 % au maximum), toutes ces additions (Ag, P, As, B, Te, Cd, Sn ou Mg), à l'exception du tellure, sont et restent solubles dans le cuivre de base : elles sont employées pour améliorer une propriété spécifique d'usage [12].

Cuivre à l'Argent (0,08 %)

Température de recristallisation plus élevée, tenue au fluage améliorée

Cuivre au Cadmium (0,7 à 1 %)

Propriétés mécaniques très augmentées par rapport au Cu pur. Applications : fils et ressorts conducteurs (Exemples : « bronzes téléphoniques » pour les lignes électriques : Cu – Cd 1 Sn 0,15 ou Cu – Cd 0,9 Sn 0,4).

Cuivre au Tellure (0,3 à 0,7 %)

Meilleures propriétés mécaniques, et usinabilité améliorée ; idem pour les cuivres au soufre, au sélénium, au plomb.

Cuivre au Chrome (0,5 à 0,9 %)

Alliage à durcissement structural, conservant ses propriétés mécaniques jusqu'à 450°C. Applications : pièces électriques et mécaniques utilisées à chaud (électrodes de soudage, pièces de freinage, contacteurs de puissance).

Cuivre au Béryllium (2 %)

Alliage à durcissement structural, dans lequel les propriétés mécaniques restent très élevées jusqu'à 300 °C. De nombreuses applications en électromécanique (dans cette famille se trouve la variante Cu – Co 2,5 Be 0,5, à résistance mécanique plus faible mais à conductivité plus élevée) [13].

II.2.2 Cuivre fortement allié

On distingue deux groupes essentiels d'alliages de cuivre fortement alliés :

a) Laitons

Les laitons sont les alliages de cuivre et de zinc, contenant de 5 à 45 % en poids de zinc et éventuellement d'autres éléments tels que le plomb, l'étain, le manganèse, l'Aluminium, le fer, le silicium, le nickel ou l'arsenic qui, ajoutés en faible proportion, améliorent certaines propriétés.

b) Bronzes

Les bronzes sont les alliages de cuivre et d'étain et des alliages ternaires cuivre, étain, zinc. Le terme bronze est parfois abusivement utilisé pour désigner d'autres alliages, comme les cupro-aluminiums et les cuivres au béryllium. [14]

Cupro-aluminiums

On appelle cupro-aluminiums, les alliages de cuivre et d'aluminium ayant 4 à 14 % d'aluminium le plus souvent, avec l'ajout de fer, nickel ou manganèse, qui permettent d'améliorer les propriétés.

Cupro-nickels

Le nickel est soluble sans contrainte dans le cuivre. En pratique, les alliages cuivre-nickel contiennent 5 à 44 % de nickel, plus quelque autres éléments comme le fer, l'aluminium, le manganèse et le silicium. [15]

II.3 Le Recuit

II.3.1 Définition

Le recuit est un procédé de traitement thermique visant à diminuer la dureté d'un matériau, à améliorer sa ductilité et à relâcher les contraintes internes.

II.3.2 Avantage

Selon les propriétés recherchées, les avantages du traitement peuvent varier et incluent notamment : une rectification facilitée, une meilleure stabilité dimensionnelle, ainsi qu'une amélioration des caractéristiques mécaniques et électriques.

II.4 L'Écroui

II.4.1 Définition

L'écrouissage est un procédé qui consiste à déformer un métal à froid, c'est-à-dire en dessous de sa température de recuit, par battage, étirage ou laminage, afin d'en accroître la densité, l'élasticité et la résistance [16].

II.4.2 Avantage

- ✓ **Augmentation de la résistance mécanique** : le métal devient plus dur et plus résistant à la déformation.
- ✓ **Amélioration de l'élasticité** : le matériau peut mieux retrouver sa forme après une contrainte.
- ✓ **Affinage de la structure cristalline**: la déformation à froid modifie la microstructure, ce qui renforce certaines propriétés mécaniques.
- ✓ **Amélioration de la précision dimensionnelle**: particulièrement utile pour les pièces nécessitant des tolérances serrées.
- ✓ **Absence de traitement thermique** : le procédé se fait à froid, ce qui évite les déformations thermiques ou les risques d'oxydation.

II.5 Différents type des impuretés




Comme beaucoup d'autres métaux, le cuivre peut avoir des impuretés. Ces impuretés peuvent changer ses propriétés physiques, mécaniques et électriques.

II.5.1 Plomb

La quantité de plomb qui peut se dissoudre dans le cuivre est fortement liée à la quantité d'oxygène présente dans le cuivre. Par exemple, quand le cuivre contient 200 ppm d'oxygène, seulement environ 10 ppm de plomb peuvent se dissoudre à 800°C. Si la quantité de plomb dépasse 10 ppm, il forme de petits morceaux à l'intérieur du cuivre et cela affecte beaucoup la température à laquelle le cuivre change de structure cristalline [17]. En l'absence d'oxygène, plus il y a de plomb dans le cuivre (par exemple, 13 ppm), plus la température nécessaire pour cette recristallisation augmente considérablement (environ +47°C)."

Tableau II.5: Principales impuretés métalliques du cuivre [18].

Le métal	L'effet sur le cuivre	
Plomb(Pb)	Il est parfois employé pour faciliter l'usinage, son utilisation peut entraîner une diminution de la résistance mécanique.	
Fer(Fe)	Il peut créer des composés dans le cuivre, ce qui risque de diminuer la capacité à conduire l'électricité et la résistance à la rouille.	
Antimoine(Sb)	Il peut améliorer certaines propriétés, mais en excès, il peut rendre le matériau moins ductile.	
Arsenic(As)	On le trouve parfois en petites quantités il peut augmenter la résistance à la corrosion mais devient toxique à concentrations élevées.	

Nickel (Ni)	On l'ajoute parfois pour un but précis, mais s'il est juste une impureté, il peut changer les propriétés du cuivre.	
Zinc (Zn)	On le trouve dans le laiton (un mélange de cuivre et de zinc), mais s'il est une impureté dans le cuivre pur, il peut changer ses propriétés.	
Silicium(Si)	On le trouve dans le laiton (un mélange de cuivre et de zinc), mais s'il est une impureté dans le cuivre pur, il peut changer ses propriétés.	

II.5.2 Soufre

Le soufre est depuis longtemps identifié comme un élément ayant un impact négatif sur le processus de recristallisation du cuivre. Sa solubilité dans le cuivre est limitée, se situant autour de 2 ppm à 600°C et de 20 ppm à 800°C [19]. Selon la référence .L'ajout de seulement 10 ppm de soufre au cuivre pur peut entraîner une augmentation de la température de recristallisation de l'ordre de 60°C.Smart et al. [20] ont également étudié la solubilité du soufre dans le cuivre considéré comme pur. Leurs estimations concordent avec celles de [19], indiquant une solubilité de 2 ppm à 600 °C, 10 ppm à 700 °C et 20 ppm à 800 °C.

Saavarita [21] confirme ces données et étend l'étude à des températures plus élevées, rapportant une solubilité de 25 ppm à 850 °C et de 36 ppm à 950 °C. Il estime que la solubilité au point eutectique de 1067 °C se situe entre 64 et 76 ppm. Ces observations s'alignent avec le rapport d'Archbutt, qui suggère que le soufre ne devrait pas causer de problèmes de durabilité lors du laminage, car il serait entièrement en solution solide à ces températures. Cependant, une teneur en soufre supérieure à 18 ppm peut s'avérer critique lors du processus de lamination.

II.5.3 Oxygène

Quand le cuivre se mélange à l'oxygène, il se forme une sorte de rouille. Il y en a deux types : un rouge (Cu_2O) et une noire (CuO). Le rouge peut se dissoudre dans le cuivre chaud, mais la noire reste plutôt à la surface. Si le cuivre contient trop d'oxygène ou d'autres métaux comme le fer et le zinc, ça peut le rendre moins facile à travailler. Ça change la façon dont il se transforme quand on le chauffe et ça le rend plus dur, ce qui n'est pas bon pour faire des fils Archbutt [22] a montré qu'un mélange précis de cuivre et d'oxygène fond à une température spéciale. La quantité d'oxygène qui peut se mélanger au cuivre est très faible à basse température. S'il y en a trop, on voit apparaître la rouille rouge (Cu_2O). Un peu trop d'oxygène peut rendre le cuivre cassant, que ce soit à chaud ou à froid. On ne va pas parler ici des cas où il y a vraiment beaucoup d'oxygène.

En général, la quantité d'oxygène dans le cuivre est petite, entre 175 et 450 parties par million. Si elle dépasse cette limite, ça peut abîmer le cuivre. Il faut donc bien choisir comment on le chauffe et comment on le travaille pour éviter qu'il ne devienne trop faible. Pendant la fabrication du cuivre pur, il y a beaucoup d'oxygène au début, mais il est enlevé pour que le cuivre soit de bonne qualité. S'il reste trop d'oxygène, le cuivre peut devenir plein de petits trous et inutilisable.

II.5.4 Phosphore

Archbutt établit la limite de solubilité solide du phosphore dans le cuivre à 0,5 % à 200 °C. L'eutectique Cu_3P présente un point de fusion de 707 °C et une composition de 8,27 % en phosphore. Par ailleurs, l'étude de Smart [23] sur l'influence du phosphore (jusqu'à 200 ppm) dans un cuivre de haute pureté révèle que cette concentration reste en solution solide entre 300 °C et 800 °C. Smart observe également qu'en solution, le phosphore diminue la conductivité de 0,73 % par tranche de 10 ppm jusqu'à 60 ppm, et élève la température de

ramollissement de 110 °C pour un ajout de 60 ppm. Enfin, Smart note l'utilisation du phosphore comme agent désoxydant à trois niveaux lors de l'électrolyse du cuivre.

II.5.5 Bismuth

Le bismuth constitue une impureté particulièrement critique dans le cuivre, et ce, même à des niveaux de concentration infimes. Son impact se manifeste dès 0,9ppm, concentration qui excède sa limite de solubilité dans le cuivre à 650 °C, laquelle est de 100 ppm selon la référence. Métal de numéro atomique 83, le bismuth adopte une structure cristalline rhomboédrique à l'état solide. Caractérisé par sa fragilité à température ambiante, il fond aux alentours de 271 °C. Le bismuth employé dans le cadre de cette étude, fourni par Cerac sous forme de granulés, présente une pureté certifiée d'au moins 99,999 % [24]. Sous la forme de solution solide, le bismuth augmente considérablement la température de recristallisation.

II.6 Effet des impuretés sur la Qualité de cuivre

Les impuretés sont importantes pour la qualité du cuivre utilisé dans l'industrie. Elles viennent des matières de départ ou sont ajoutées pendant la fabrication (comme l'oxygène). L'oxygène est mis exprès dans le cuivre au début pour que l'électricité passe bien. Le plomb, qu'on trouve souvent dans les vieux cuivres, est difficile à enlever avec la chaleur. Des tests ont montré que même une petite quantité de plomb (20 à 200 ppm) peut causer des fissures quand on fabrique le cuivre en continu. [25]

Les impuretés courantes sont le tellure (Te), le sélénium (Se), le bismuth (Bi), l'antimoine (Sb), l'arsenic (As), l'étain (Sn), le plomb (Pb), le fer (Fe), le nickel (Ni), le soufre (S) et l'argent (Ag). Au total, sans compter l'oxygène, il y a environ 65 ppm de ces éléments étrangers dans le cuivre industriel Cu-a1.

Certaines impuretés (phosphore P, fer Fe et silicium Si) peuvent beaucoup nuire à la façon dont l'électricité passe dans le cuivre, donc il faut en mettre très peu. D'autres n'ont pas beaucoup d'effet sur l'électricité, mais sont importantes pour la solidité du fil. C'est le cas du soufre et du plomb, qui peuvent rendre le fil moins étirable même en très petites quantités (5 ppm pour le soufre et 1 ppm pour le plomb).

II.6.1 Conductivité électrique

Le cuivre possède la meilleure capacité à conduire l'électricité parmi les matériaux utilisés en ingénierie. On peut ajouter de l'argent ou d'autres éléments pour rendre le cuivre plus solide ou moins résistant, ou modifier d'autres caractéristiques, sans beaucoup réduire sa capacité à conduire l'électricité.

Comment les impuretés affectent la conductivité électrique ?

La présence d'éléments étrangers dans le cuivre a un impact sur sa capacité à conduire l'électricité. Par exemple, une petite quantité de phosphore (0,04%) peut diminuer la conductivité d'un échantillon de cuivre jusqu'à 80% (selon la norme IACS).

La faible variation de la conductivité électrique : Pour qu'un échantillon de cuivre soit considéré comme ayant une très haute conductivité électrique, son aptitude à conduire l'électricité ne doit pas varier de plus de 0,1% [26]. Les éléments étrangers présents dans les matières premières ou ajoutés pendant la fabrication, en particulier l'oxygène, sont importants pour déterminer la qualité du cuivre utilisé dans l'industrie.

L'effet de l'ajout d'oxygène : La capacité du cuivre à conduire l'électricité augmente quand on ajoute de l'oxygène jusqu'à une certaine quantité (200 parties par million en poids pour un certain type de cuivre, le Cu-ETP), puis elle diminue si on ajoute plus d'oxygène. La quantité d'oxygène qui donne la meilleure conductivité est plus élevée si le cuivre contient plus d'éléments étrangers. Cela suggère qu'au début, l'oxygène se combine avec ces éléments étrangers pour former des composés, ce qui les enlève du cuivre et améliore sa conductivité électrique. Ensuite, quand tous ces éléments étrangers ont réagi, l'oxygène se place dans la structure du cuivre lui-même et réduit sa conductivité.

II.6.2 Résistivité

Des travaux ont montré que la résistivité électrique augmente avec la teneur en impuretés, et ce linéairement pour les très faibles teneurs jusqu'à 0,2%. Le cuivre Cu-ETP présentant une teneur totale en impuretés inférieure à 100 ppm hors oxygène, la variabilité de sa résistivité électrique est de l'ordre de 1% [27].

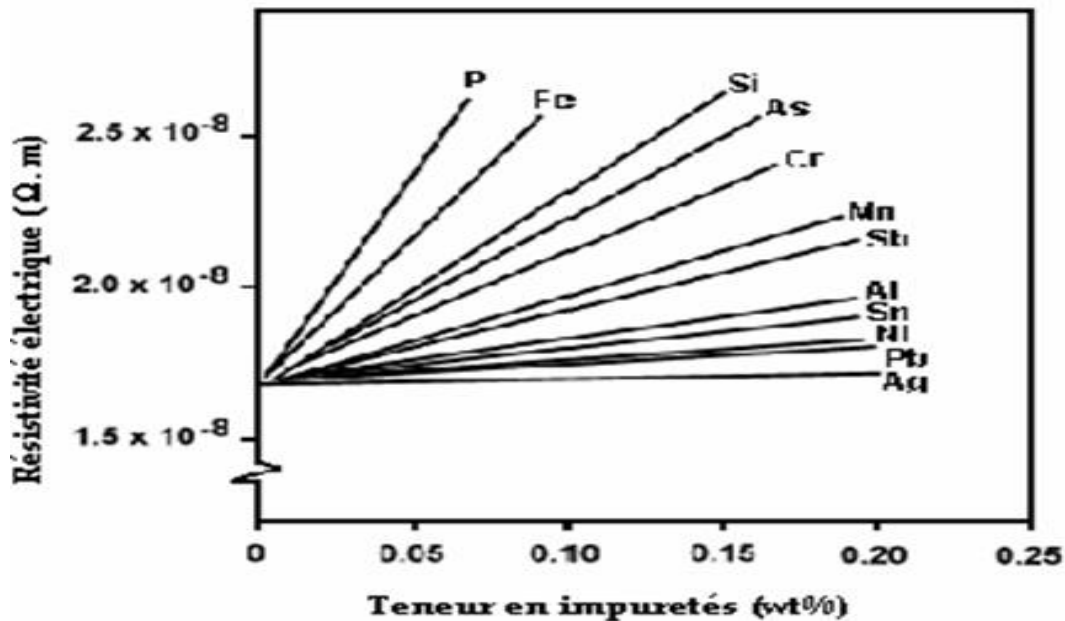


Figure II.2: Variation de la résistivité électrique en fonction du taux d'impuretés

II.6.3 Couleur et ductilité du cuivre

Le cuivre pur a une teinte dorée rougeâtre qui se ternit rapidement en un vert mat par oxydation. Étant donné que le cuivre contient souvent des impuretés naturelles ou est mélangé à d'autres éléments (allié), il est difficile de déterminer l'effet précis de chaque ajout sur la couleur finale de l'alliage.

Le cuivre de brai électrolytique, qui contient de l'argent et souvent des traces de fer et de soufre, a une couleur rose pâle.

Le cuivre doré, de couleur brun rougeâtre, contient du zinc, du fer et du plomb.

Le laiton, souvent utilisé pour la décoration car il ressemble beaucoup à l'or tout en étant moins cher, a une apparence dorée.

Les cuvettes (probablement une erreur de frappe pour "cuivres" ou un terme spécifique non courant ici) contiennent différentes quantités de zinc, de fer et de plomb, et leur couleur peut varier du rouge doré au verdâtre en passant par le brunâtre.

Le nickel-argent, qui comprend du nickel, du zinc, du fer, du plomb et du manganèse, peut avoir une apparence allant du blanc grisâtre à l'argenté [28].

II.6.4 surface de cuivre

Les impuretés présentes dans le cuivre ont un impact significatif sur ses propriétés de surface, influençant ainsi ses performances dans diverses applications industrielles. Voici quelques effets majeurs des impuretés sur les propriétés de surface du cuivre :

La corrosion du cuivre peut se manifester sous différentes formes, chacune ayant ses caractéristiques et ses implications distinctes. Les types de corrosion du cuivre les plus courants comprennent la corrosion générale, la corrosion par piqûres, la corrosion inter granulaire et la dézincification.

- **Corrosion générale** : C'est la forme la plus connue de corrosion du cuivre, se produisant lorsque le cuivre s'oxyde en présence d'oxygène et d'humidité. Il en résulte une couche uniforme de produits de corrosion à la surface du métal, qui s'amincit progressivement au fil du temps.
- **Corrosion par piqûres** : Contrairement à la corrosion générale, la corrosion par piqûres est localisée et se présente sous la forme de petites piqûres ou trous sur la surface du cuivre. Elle est généralement causée par des déséquilibres chimiques localisés ou par la présence d'ions agressifs dans l'environnement.
- **Corrosion inter granulaire** : La corrosion inter granulaire affecte les limites entre les grains de cuivre, entraînant un affaiblissement et une éventuelle rupture du métal. Cela est généralement dû à des impuretés ou à un traitement thermique inapproprié lors du processus de fabrication.
- **Dézincification** : Ce type de corrosion touche principalement le laiton, un alliage de cuivre et de zinc. Lors de la dézincification, le composant zinc du laiton se corrode préférentiellement, laissant derrière lui une structure de cuivre poreuse sujette aux défaillances mécaniques.

II.7 Méthodes d'élimination des impuretés du cuivre

L'élimination des impuretés est une méthode courante et fiable pour nettoyer et rendre plus concentrés des métaux comme le nickel, le cuivre, le cobalt et le zinc lorsqu'ils sont dissous dans de l'eau. Cette technique fonctionne en forçant les impuretés métalliques à se séparer de la solution, un peu comme si elles devenaient solides et tombaient au fond. Pour faire cela, on modifie l'acidité (pH) de la solution et on ajoute des produits chimiques spécifiques qui réagissent avec les impuretés. C'est une façon efficace de récupérer les métaux désirés avec une bonne pureté.

II.7.1 Fusion

La fusion du cuivre secondaire comprend la production de cuivre issu de sources qui peuvent inclure des déchets de cuivre, des boues, des ordinateurs et déchets électroniques ainsi que les scories venant des usines d'affinage [29]. Les procédés concernés par la production du cuivre sont les prétraitements des charges, leur fusion, la mise sous forme d'alliage, puis leur coulée.

II.7.2 Affinage électrolytique

Il est basé sur le procédé de l'anode soluble. Dans un bain électrolytique spécifique, on impose une différence de potentiel entre une cathode (cuivre le plus pur possible) et une anode (le blister). Sous l'effet de la tension, l'oxydation qui a lieu à l'anode entraîne la migration des ions Cu^{2+} vers la cathode où la réaction de réduction forme des atomes Cu. La majorité des impuretés, quant à elles, tombent au fond du bain [31].

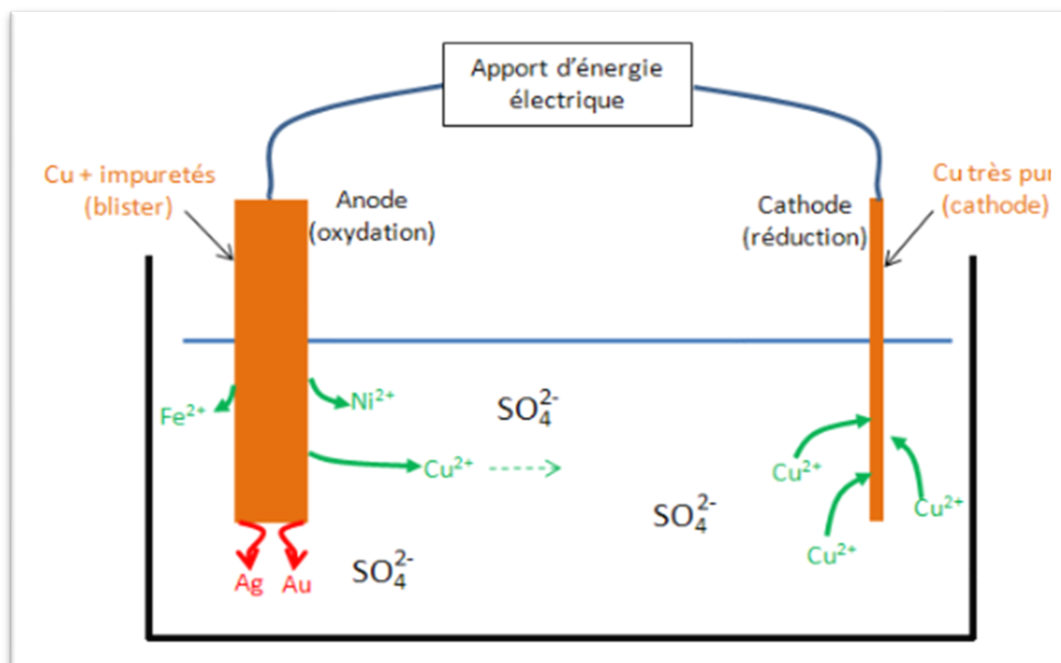


Figure II.3: Schéma du procédé d'anode soluble

Cette opération permet d'obtenir une grande pureté (>99,99%) mais le produit obtenu est inutilisable tel quel en raison des nombreuses porosités qu'elle entraîne et les impuretés électrolytiques potentielles résultant du procédé. Par conséquent, les cathodes électrolytiques

obtenues sont généralement refondues. En revanche, un affinage thermique est effectué sur les pièces moulées pour traiter les déchets riches en cuivre [32].

Tableau II.6: Appellations et teneurs en impuretés des divers cuivres industriels non alliés.

Norme française	Cu-a1	Cu-a2	Cu-a3	Cu-b1	Cu-b2	Cu-c1	Cu-c2
Norme ISO 431	Cu-ETP <i>Electrolytic Tough Pitch</i>	Cu-FRHC <i>Fire-Refined High-Conductivity Tough Pitch</i>	Cu-FRTP <i>Fire Refined Tough Pitch</i>	Cu-DHP <i>Deoxidize d copper, Higher ideal Phosphorus</i>	Cu-DLP <i>Deoxidize d copper Lowers ideal Phosphorus</i>	Cu-OF <i>Oxygen Free</i>	Cu-OFE <i>Oxygen Free Electronic copper</i>
Teneur en masse (ppm)	O2 50à400	O2 50à400	O2 150 à400	P 130 à500	P 40à120	P 30	P 30
Ag:	5-20	5-20	5-20				
S,Fe,Ni:	5-15	5-15	10-20				
As,Se,Sn,Pb:	1-5	1-5	1-5				
Te,Au,Bi:	□1	1-5	1-5				

II.7.3 Affinage thermique

Qui consiste à refondre le cuivre brut en l'oxydant pour éliminer les impuretés sous forme d'oxyde qui se volatilisent. Au cours de ce traitement, le cuivre se charge de 0,6 à 0,9% d'oxygène dont il faut éliminé l'essentiel par une opération de perchage, qui consiste à introduire des troncs de bois vert dans le bain de cuivre.

On obtient alors un cuivre de qualité thermique titrant à 99.5%, Qui contient encore 0,02 à 0,04 % d'oxygène et un peu d'hydrogène, et par conséquent, ses applications dans l'industrie sont peu nombreuses [33].

II.8 Etude des effets des procédés d'élimination des impuretés sur la propriété du cuivre

Lors du processus d'électrorefinage du cuivre, les impuretés anodiques, le plus souvent l'arsenic (As), le bismuth (Bi), le fer (Fe) et l'antimoine (Sb), se dissolvent avec le cuivre de l'anode dans l'électrolyte [34,35]. Ces impuretés peuvent s'accumuler dans l'électrolyte ou former différents types de boues anodiques qui peuvent adhérer à l'anode, se déposer au fond de la cellule électrolytique ou flotter dans l'électrolyte [36-39].

Les espèces redox de l'arsenic et de l'antimoine ont une grande influence sur la formation des précipités insolubles, ce qui pourrait affecter la qualité des cathodes en cuivre. As(V) et Sb(V) peuvent former une série d'acides arséniate-antimoniés, qui peuvent ensuite réagir avec As(III), Sb(III) et Bi(III) pour former des arséniate-antimoniés. As(V), Sb(III) et Bi(III) peuvent former des arséniates [40], et Sb(V) joue un rôle substantiel dans la formation

des boues flottantes [41,42], qui sont des composés amorphes et chimiquement indéfinis pouvant contenir Sb(III), Sb(V), Bi(III), As(V) et As(III) [43,44].

Les boues flottantes sont généralement évitées en contrôlant la concentration totale d'antimoine dans l'électrolyte en dessous de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ en maintenant la concentration d'arsenic dans l'électrolyte au-dessus de $6-7 \text{ g L}^{-1}$ et un rapport molaire As/(Sb+Bi) supérieur à 1,5-2 dans les anodes [45]. D'autres techniques ont été proposées pour contrôler les concentrations d'antimoine dans les électrolytes de cuivre, y compris la précipitation [46], l'adsorption [47,48] et l'échange d'ions. Les résines d'échange ionique sont utilisées dans plusieurs raffineries de cuivre pour éliminer Sb et Bi et maintenir leurs concentrations en dessous de $0,50 \text{ g L}^{-1}$ dans les électrolytes commerciaux [49], bien que les concentrations de ces éléments puissent augmenter en raison de la forte teneur en impuretés des anodes de cuivre [50]. Les résines utilisées sont généralement des résines charlatanâtes, un sous-groupe de résines d'échange ionique avec des composés de coordination capables d'établir des liaisons covalentes sélectives entre l'ion central du groupe fonctionnel de la résine et les ions donneurs en solution [51].

II.9 Recyclage du cuivre

Le recyclage implique la collecte, le démantèlement, le trié la transformation d'un déchet qui peut ainsi faire à nouvel office de « matière première » destinée à un usage similaire.

De façon générale, le recyclage du cuivre permet de réduire les émissions dans l'environnement et de diminuer l'énergie utilisée pour la production de cuivre. De plus en plus utilisé, son recyclage est très rentable. Cependant quelques difficultés persistent.

La demande en cuivre augmente et le coût de la production de cuivre primaire est devenu suffisamment important pour que la filière de recyclage soit financièrement avantageuse. En effet, le cuivre peut être recyclé sans perte de qualité ni de performance. Il n'y a pas de différence de qualité entre le métal recyclé et le métal issu de l'extraction minière.

La possibilité de recycler le cuivre dépend de la nature parfois complexe des produits en fin de vie. Ces produits peuvent contenir des métaux variés qui rendent très difficile, voire impossible la valorisation du cuivre qu'ils contiennent [52].

II.9.1 Coulée continue

Aujourd'hui les systèmes de coulée continue destinés à la production de câbles électriques en cuivre fonctionnent pour la grande majorité en refondant du cuivre ETP ou cathodes électrolytiques. Une fois le cuivre mis en fusion, il est conduit jusqu'à une roue à gorge où il se solidifie formant une barre continue donc la section dépend directement des dimensions de la gorge ($\sim 48\text{cm}^2$ dans notre cas). Cette barre subit ensuite de nombreuses passes de laminage qui permettent d'obtenir en sortie de ligne un fil de diamètre 8 mm. Ce fil sera par la suite tréfilé à différents diamètres dépendant de leurs applications.

Ces dernières années, pour des raisons économiques évidentes (le procédé d'affinage électrolytique étant bien plus coûteux qu'un simple affinage thermique) et dans une optique environnementale. Certaine quantité de déchets riches en cuivre sur la coulée.

Ainsi le système de production de Lens s'éloigne légèrement du système conventionnel puisqu'une ligne « affinage » y a été greffée. On parle d'affinage car même si les déchets introduits sont riches en cuivre, ils possèdent des concentrations en impuretés trop élevées par rapport au cuivre ETP, et doivent donc être purifiés avant d'être mélangés au cuivre ETP, afin de garantir de bonnes propriétés électriques.

Contrairement au cuivre ETP, ces déchets sont traités par affinage thermique avant de rejoindre la ligne ETP au niveau d'un four de mélange. [53]

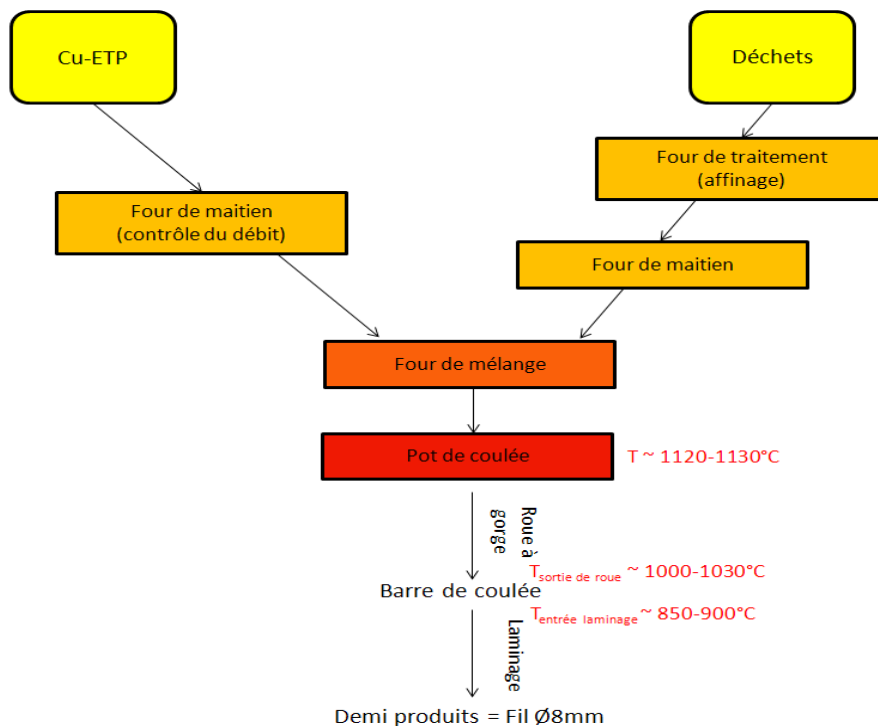


Figure II.4: Schématisation de la coulée continue

Il est important de noter qu'il est impossible de fonctionner en ligne affinage uniquement car le débit maximal pouvant être atteint sur la ligne affinage est trop faible pour permettre de garantir un rendement suffisant. De plus, la pureté du câble électrique risquerait d'être trop faible pour garantir de bonnes propriétés électriques.

Ainsi la coulée Lensoise possède deux modes de fonctionnement distincts :

- Un mode conventionnel dans lequel seule la ligne ETP est en route ; on parle alors de fonctionnement en pur et le demi-produit obtenu est qualifié d'ETP-1.
- Un mode peu commun dans lequel les deux lignes sont en fonctionnement simultanées.

Les cuivres liquides provenant des deux veines, cathode pur et affinage, se rejoignent au niveau d'un four de mélange. On parle alors de fonctionnement affinage et le demi-produit obtenu est qualifié d'ETP-A. Concernant le four de mélange, on notera que si il y a quelques années un brassage était effectué (induction à l'origine puis mécanique), aujourd'hui aucun brassage n'est réalisé.

II.9.2 Problématique et paramètres « coulées » importants

Le retour d'expérience de la coulée montre que l'introduction d'une ligne affinage sur le système de coulée continue entraîne des problèmes de fissuration plus fréquents qu'en fonctionnement cathode pur (Cu-ETP uniquement). Les fissures ou criques, sont observées entre la sortie de la roue de coulée sur la surface qui était en contact avec la gorge (on parle de « côté gorge ») et l'entrée du premier laminoir donc à des températures comprises typiquement entre 1030°C et 850°C (mesurées au pyromètre laser). Les contraintes de traction initiées côté gorge par le décintrage de la barre en sortie de roue auxquelles viennent s'ajouter celles exercées par la barre sous son propre poids semblent être responsables de la fissuration.

Le problème de telles criques est qu'elles entraînent parfois la rupture complète de la barre de coulée en sortie de roue à gorge et provoque ainsi l'arrêt de la production.

Lorsqu'un problème qui empêche la production est observé sur le système (rupture de la barre, problème de laminage = « bourrage »...) une cisaille automatique, placée avant le premier laminoir, permet de couper des morceaux de barre de coulée appelés CROPS, évacués manuellement du système, en attendant de dégager les débris engendrés par la casse de la barre et/ou les éventuels morceaux de cuivre bloqués au niveau des laminoirs. Ce procédé permet d'éviter de stopper entièrement le système, complexe à régler lors d'un démarrage. Il est important de noter que la majorité des fissures observées ne sont pas

critiques et disparaissent généralement suite aux laminages successifs. Dans ce cas de figure, aucun prélèvement n'est effectué pour ne pas perturber la production. [54]

Il est très important de noter que ce n'est pas parce qu'aucune crique n'est observée qu'elles ne sont pas présentes. Effectivement, d'une part il est très compliqué d'observer à l'œil nu, sur une barre en mouvement, des criques qui auraient une taille inférieure au centimètre (l'observateur se situe à plus de trois mètres de la barre de coulée en sortie de roue) et d'autre part, l'observation de la barre de coulée ne se fait que de manière ponctuelle.

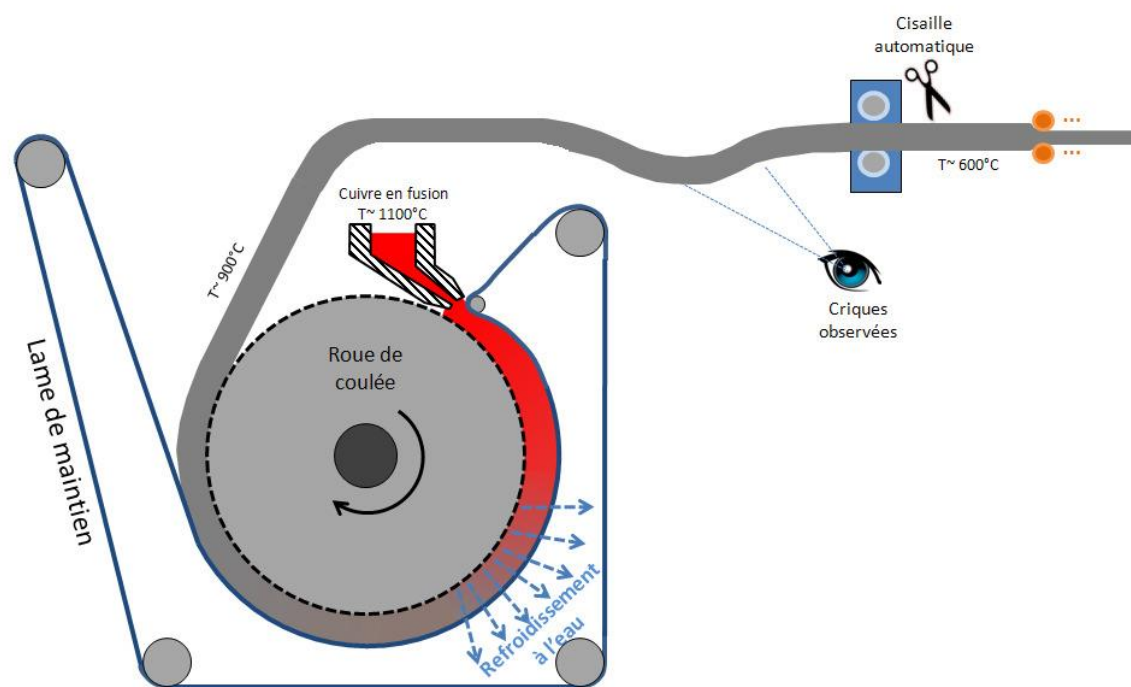


Figure II.5: Solidification dans la roue à gorge et laminage.

II.9.3 Liste des paramètres « coulée » importants pour l'étude

De très nombreux paramètres sont mesurés sur la coulée continue mais nous ne listons ici que ceux qui nous semblent essentiels dans le cadre de notre étude c'est-à-dire ceux qui pourraient agir sur le phénomène de fissuration et qui diffèreraient entre le fonctionnement en pur et en affinage.

Nous avons identifié deux paramètres principaux :

- ❖ La composition chimique
- ❖ Les conditions de refroidissement

Nous nous proposons ainsi d'étudier l'influence de chacun de ces paramètres sur la microstructure et les propriétés mécaniques du cuivre. [55]

CHAPITRE III



**Résultat
et discussion**

Introduction

Les résultats du traitement thermique de recristallisation et l'étude de la qualité du cuivre sont présentés dans ce chapitre. Un échantillon de cuivre, prélevé lors de mon stage au GISB, a été analysé en termes de composition physique et chimique.

III.1 Four réverbère

Un four à réverbère est un four dont la chaleur est réfléchi (réverbérée) par sa voûte vers une zone de réaction chimique séparée physiquement de celle où se produit la réaction de combustion fournissant l'énergie au système. Dans ce type de four, le combustible (charbon, gaz, fuel, etc.) est brûlé dans une chambre différente de celle des matières à traiter. Ainsi, on limite les contacts directs et les interactions indésirables entre le combustible et les matières à transformer ou à affiner.



Figure III.1: Four réverbère

III.1.1 Utilisation dans la métallurgie

Cette réverbération est utilisée pour la fusion et le raffinage des déchets de cuivre, fournissant la Matière première qualifiée pour la fabrication de 8mm tige de cuivre.

Déchets de cuivre; Fusion en réverbérant four, d'oxydoréduction fusion ; blanchir et Coulée continue et de laminage.

III.1.2 Exigences pour le rouge de cuivre

Le cuivre rougedéchet comme matière première devrait être mis dans le four selon les proportions suivantes: 60% de première qualité déchets de cuivre + 40% de deuxième année déchets de cuivre.

-Déchets de cuivre en d'excellente qualité ($Pb < 100$, $Sn < 300$, $Ni < 50$, $Zn < 50$, $Fe < 50$ et $Sb < 20$) doit être propre et non-alliage de cuivre fils sans étain, ne contenant pas fragile brûlé fils. Teneur n'en cuivre pas moins 98%.

-Déchets de cuivre en grade 2 ($Pb < 1000$, $Sn < 800$, $Ni < 150$, $Zn < 300$, $Fe < 500$, $Sb < 100$, $S < 200$) devrait être faible directeur fils de cuivre sans isolation, contenant généralement des fils téléphoniques, barre de bus en cuivre avec revêtement de vernis ou papier d'isolation et épais ou mince, propre barre de cuivre. Teneur en cuivre Pas moins de 94%.

III.1.3 Données techniques

- ✓ Matière première: Rouge déchets de cuivre
- ✓ Type: Fixe rectangulaire four à réverbère
- ✓ Combustible de chauffage: gaz Naturel

III.2 Pyro-Raffinage du cuivre de seconde fusion

1. Chargement du four avec du cuivre de seconde fusion (tout venant et récupéré) par étapes en fonction de la progression de la fusion du bain.

2. Une fois que le matériau est fondu, vérification du niveau du bain de fusion du métal pour faciliter l'opération de décrassage et éviter le débordement.

A l'issue de cette étape, la température doit atteindre 1200°C ; et une prise d'échantillon est effectuée afin de savoir la composition chimique du bain (degré d'impureté).

3. Par le biais des lances, on procède à l'étape d'oxydation on soufflant de l'air comprimé. Les brûleurs sont fonctionnels selon la température de fonctionnement ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$)

4 .Le temps d'oxydation et l'utilisation des lances dépendent des impuretés dans le bain de fusion:

- Si les éléments résiduels appartiennent au premier groupe (Fe, Zn, Cd, Si, Al, Pb), avec la silice comme agent de décarburage, 8000 ppm d'oxygène suffiront.
- S'il y a une teneur élevée en Sn, As ou Sb (deuxième groupe): dans ce cas, on préconise d'augmenter le temps d'oxydation qui peut atteindre jusqu'à 10000 ppm.
- Si les éléments résiduels appartiennent au troisième groupe, c'est-à-dire Ni, Cr, Bi, Te, il sera plus Difficile d'atteindre les normes techniques, l'oxydation devra atteindre jusqu'à 12000 ppm.

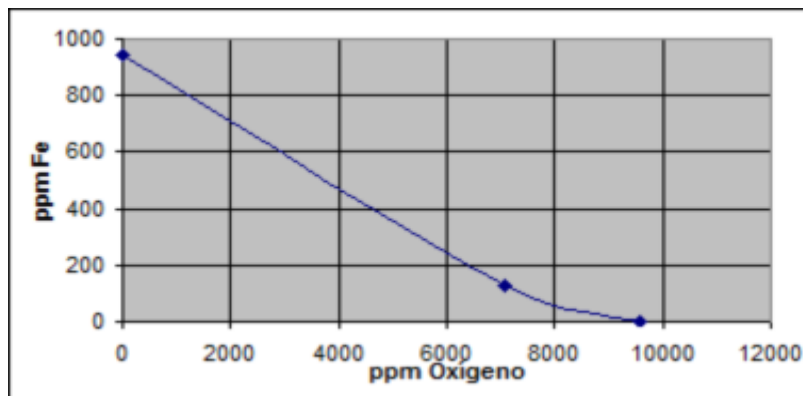


Figure III.2: Tendance des premiers éléments du groupe

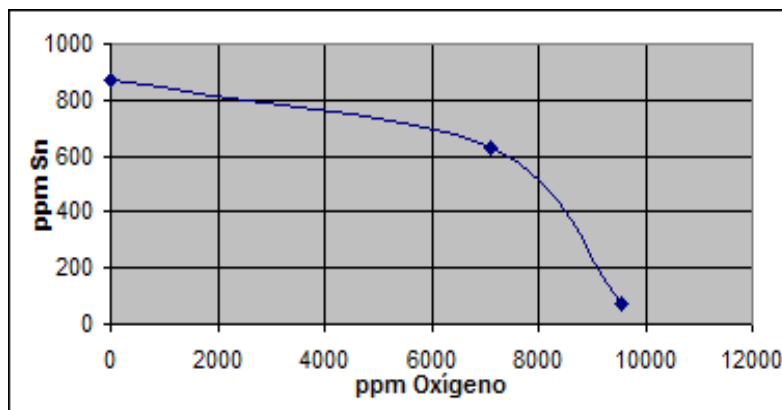


Figure III.3: Tendance des deuxièmes éléments du groupe

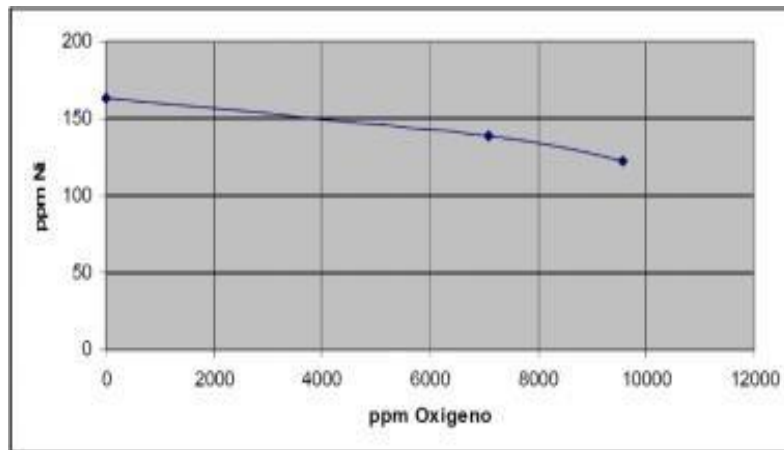


Figure III.4: Tendence des troisièmes éléments du groupe

5. Une fois que les éléments résiduels sont en dessous de leurs limites, la réduction se fait par la technique de perchage (immersion des troncs d'arbres humides dans le bain).
6. L'opération de réduction sera achevée une fois que la teneur en oxygène devrait atteindre 250 à 300 ppm.

III.3 Analyse de la composition chimique

Les ingénieurs du GISB utilisent des spectromètres, Pour évaluer la quantité de chaque élément chimique présent dans un échantillon et garantirons contrôle efficace des procédés et de la qualité.

✓ Spectromètre



Figure III.5: Spectromètre d'analyse de la composition chimique GISB

III.3.1 Avant traitement

Au moyen d'un spectromètre au laboratoire du GISB, nous avons effectué une analyse de la composition chimique de notre échantillon de classe C. Les résultats obtenus pour les teneurs des différents éléments sont donnés dans le tableau III.1

Type de matière : Cuivre (Four)

Tableau III.7: Bulletin d'analyses spectrométriques des impuretés affectant la qualité du cuivre.

Les éléments			Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
Compositions Chimiques	Valeur spécifique	Max(%)	....	0,005	....	....	....	0,001	....
	Valeur mesurée	(%)	0,038	0,16	0,021	0,0002	0,0001	0,004	0,042
Les éléments			Si	Mg	Cr	Te	As	Sb	Cd
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	....	....	....	0,0002	0,0006	0,0004	....
	Valeur Mesuré	(%)	0,0005	0,0001	0,0002	0,0002	0,005	0,017	0,0003
Les éléments			Bi	Ag	Co	Al	S	Be	Zr
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	0,0001	0,002	...	....	0,0015	....	....
	Valeur Mesuré	(%)	0,0001	0,001	0,0002	0,003	0,0001	0,0001	0,0002
Les éléments			Au	Ti	Se	B	Pt	Cu	O
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	....	....	0,0002	....	....	99,9	400ppm
	Valeur Mesuré	(%)	0,0005	0,0003	0,0001	0,002	0,002	99,6884	/

Remarque :

- classe C (Cu +Ag = 99,70 %)

- Mauvaise Qualité
- D’après ces résultats on remarque que le pourcentage des impuretés suivants Zn, Pb, Sn, Fe, As, Sb et Al est élevé par rapport la norme.
- on remarque aussi que le pourcentage de Cu =99,68% est **non conforme**.

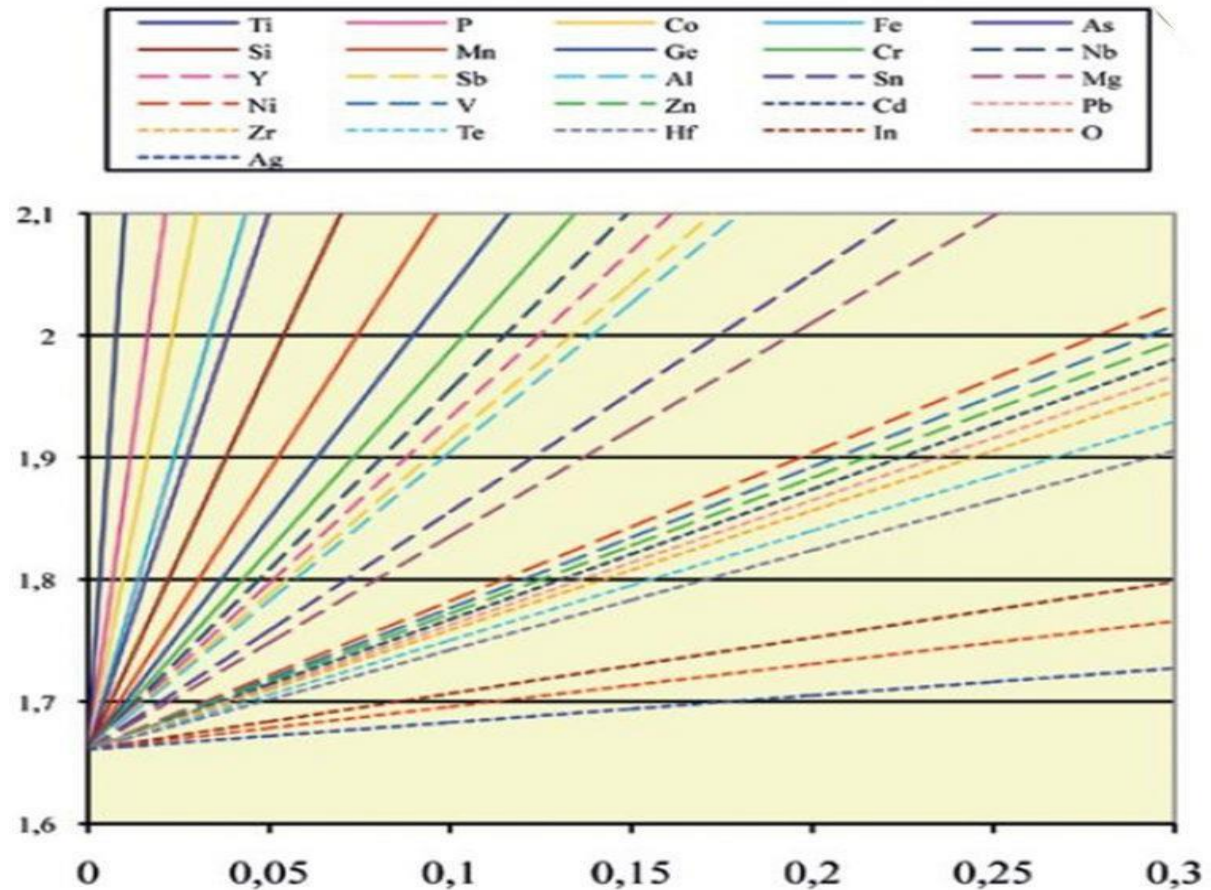


Figure III.6: Les éléments ayant les concentrations les plus élevées dans le métal cuivre

Solutions :

- On fait un traitement par ajoutant 1% d’oxygène (d’après pyro-raffinage) en utilisant les tuyaux d’air et 6 baquettes d’arbres.

III.3.2 Elimination des impuretés métallique

Pour traiter cet échantillon, nous suivons trois étapes :

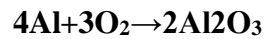
a) Oxydation à 1200°C

L’oxydation des impuretés est essentielle pour obtenir un métal pur, notamment pour l’extrusion. Ce processus repose sur le fait que la plupart des impuretés s’oxydent plus

facilement que le cuivre lorsqu'on introduit de l'oxygène. Ces oxydes formés peuvent s'évaporer ou former des scories.

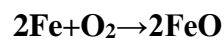
1. Aluminium (Al)

Il s'oxyde très facilement pour former Al_2O_3 (alumine).



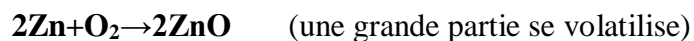
2. Fer (Fe) :

Le fer s'oxyde facilement en oxyde de fer(II) (FeO) et d'autres oxydes.



3. Zinc (Zn)

Il s'oxyde en ZnO (oxyde de zinc)



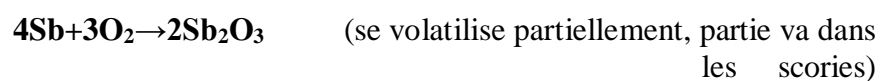
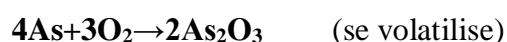
4. Étain (Sn) et Plomb (Pb)

Ils s'oxydent en SnO_2 (dioxyde d'étain) et PbO (oxyde de plomb).



5. Arsenic (As) et Antimoine (Sb)

Ils s'oxydent en oxydes tels qu' As_2O_3 (trioxyde d'arsenic) et Sb_2O_3 (trioxyde d'antimoine) ou Sb_2O_5 .



❖ On peut Calculer la Quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les impuretés dans 70 Tonnes de cuivre, comme suit :

Exemple

-Masse totale de cuivre = 70 000 Kg

-Pourcentage de Zn = 0,038 %

-Masse de Zn = 70 000 Kg * 0,038 % = 26,6 Kg

-Masse molaire Zn : M (Zn) = 65,38 g/mol

-Réaction : **2Zn + O₂ = 2ZnO**

-Nombre de moles : n = m (Zn) / M (Zn) n = 26600 / 65,38 = 406,85 mol

-Moles d'O₂ nécessaire : 406,85 / 2 = 203,43 Mol

-Masse d'O₂ : **mO₂ = nO₂ * M O₂**

mO₂ = 203,43 * 32

m O₂ = 6,50 Kg

Tableau III.8 : Quantités d'oxygène nécessaire pour oxyder les impuretés

Impuretés	Zn	Pb	Sn	Fe	As	Sb	Al
Masse Molaire (g/mol)	65,38	207,2	118,71	55,85	74,92	121,76	26,98
Pourcentage(%)	0,038	0,160	0,021	0,004	0,005	0,017	0,003
Masse (kg)	26,6	112	14,7	2,8	3,5	11,9	2,1
Nombre de mole (mole)	406,85	540,54	123,83	50,13	46,72	97,73	77,84
Quantité d'O₂ (mole)	203,43	252,27	61,91	25,06	11,68	24,43	19,46
Masse d'O₂ (kg)	6,50	8,07	1,98	0,80	1,12	2,35	1,87

Résultat

D'après Tableau III.2.on trouve que la Quantité totale d'oxygène nécessaire pour ces impuretés est :

m (totale) O₂ = 22,69 Kg

b) Purification

Pour éliminer plus facilement les impuretés oxydées (scories) du cuivre en fusion, on ajoute des fondants la silice comme agent de décrassage (SiO_2). Ce fondant transforme les oxydes d'impuretés en silicates plus faciles à séparer car ils flottent à la surface.

Voici le devenir de chaque impureté que nous avons mentionnée :

1. Fer (Fe)**2. Aluminum(Al)****3. Plomb(Pb)****• Rôle de la silice (verre)**

L'ajout de matière vitreuse, composée principalement de dioxyde de silicium (SiO_2), joue un rôle essentiel dans le processus d'élimination des scories. Le silice agit de plusieurs façon :

- Réduction du point de fusion des scories
- Augmentation de la viscosité des scories
- Formation de silicates stables

Tableau III.9: Résultats de réaction des impuretés après purification

Impureté	Oxyde formé	Devenir principal à 1200° (avec O ₂)
Fe	FeO	Scories flottantes (silicates de fer)
Zn	ZnO	Se volatilise en gaz (vapeur de ZnO)
Al	Al ₂ O ₃	Scories flottantes (silicates d'Al)
Pb	PbO	Scories flottantes
Sn	SnO ₂	Scories flottantes
As	As ₂ O ₃	Se volatilise en gaz
Sb	Sb ₂ O ₃	Se volatilise partiellement en gaz, une partie dans les scories.

c) Réduction

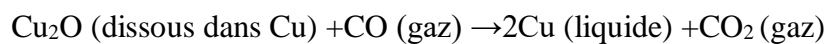
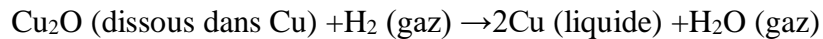
C'est une étape cruciale après le processus d'oxydation qui permet d'éliminer les impuretés. L'objectif est de réduire la teneur en oxygène du cuivre à des niveaux très bas, ce qui améliore ses propriétés mécaniques et électriques, on utilise Traditionnellement des troncs d'arbres.



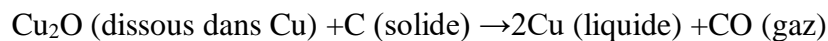
Figure III.7: Tronc d'arbre utilisé pour la réduction

Comment fonctionne le processus de réduction avec des troncs d'arbres saturés en carbone ?

- Lorsque le bois entre en contact avec le cuivre chaud (environ 1200°C), les matières organiques du bois se décomposent rapidement.
- L'eau présente dans le bois s'évapore, ce qui provoque un bouillonnement violent et une agitation du métal fondu, aidant à mélanger l'oxygène.
- La cellulose et la lignine (principaux composants du bois) se décomposent en monoxyde de carbone (CO), hydrogène (H₂), hydrocarbures, et du carbone solide (charbon) reste.

Réaction du monoxyde de carbone (CO)**Réaction de l'hydrogène (H₂)****Réaction avec charbon solide (C)**

Le carbone restant du bois peut réagir directement avec l'oxygène dissous :



Ou encore :



III.3.3 Après traitement

Après avoir effectué le traitement initial du cuivre, nous avons utilisé à nouveau le spectromètre pour obtenir les résultats suivants. (Tableau III.10)

Type de matière : Cuivre (Four)

Tableau III.10: Bulletin d'analyses spectrométriques des impuretés affectant la qualité du cuivre.

Les éléments			Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	...	0,005	...	...	...	0,001	...
	Valeur Mesuré	(%)	0,002	0,003	0,001	0,0002	0,0001	0,0003	0,0002
Les éléments			Si	Mg	Cr	Te	As	Sb	Cd
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	...	...	...	0,0002	0,0006	0,0004	...
	Valeur Mesuré	(%)	0,0005	0,0001	0,0002	0,0002	0,0004	0,002	0,0003
Les éléments			Bi	Ag	Co	Al	S	Be	Zr
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	0,0001	0,002	...	...	0,0015	...	...
	Valeur Mesuré	(%)	0,0001	0,001	0,0002	0,0003	0,0001	0,0001	0,0002
Les éléments			Au	Ti	Se	B	Pt	Cu	O
Compositions Chimiques	Valeur Spécifie	Max(%)	...	...	0,0002	...	...	99,9	400ppm
	Valeur Mesuré	(%)	0,0005	0,0003	0,0001	0,002	0,002	99,9648	/

Remarque :

- Classe A (Cu + Ag = 99,96 %)
- Très Bonne Qualité

- On remarque que le pourcentage des impuretés a diminué par rapport au premier essai (avant traitement).
- Le pourcentage de Cu =99,96% est **Conforme**.

III.4 Coulée

Après la fusion et l'élimination des impuretés métalliques du cuivre, on procède à la cristallisation et au laminage afin d'obtenir un fil de machine de 8 mm.



Figure III.8: processus de formation et de cristallisation du cuivre

III.4.1 Cristallisation

La roue de cristallisation est l'élément central d'une ligne de coulée continue de cuivre (CCR). Sa fonction principale est **la solidification** (diminue la température de 1200° C jusqu'à 750°C) rapide du cuivre en fusion en une barre continue de section et de microstructure uniformes, essentielle pour le laminage ultérieur et la production de barres à faible teneur en oxygène.

III.4.2 Laminage

La barre produite est ensuite dirigée vers le laminoir

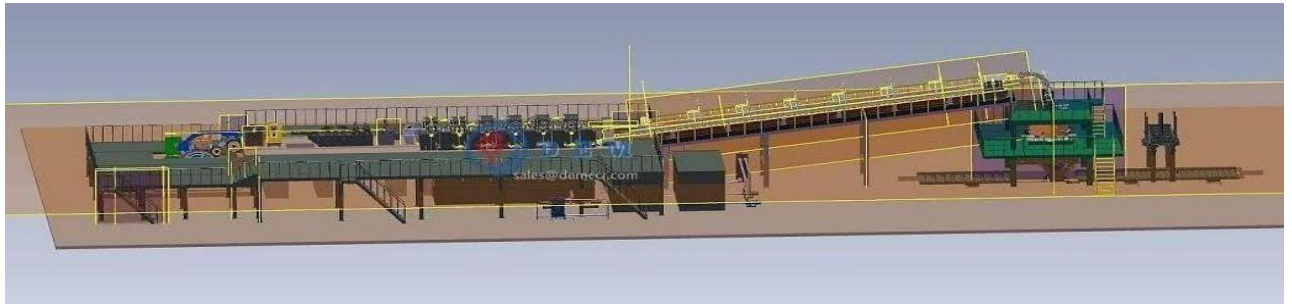


Figure III.9: processus de laminage

La structure simple, la production de haute efficacité, faible consommation énergétique et excellente qualité sont les principales caractéristiques de cette ligne de production. Il adopte le processus de coulée continue et de rouler. Il peut produire de la tige de cuivre brillant faible en oxygène de 8 mm en utilisant le moulage de lingots de cuivre.

Il est composé de la fonte du cuivre four d'affinage, quatre roues, auxiliaire de la machine de coulée continue de la machine, laminoir, tige de cuivre, revenant de refroidissement et make-up, émulsion de l'unité système de refroidissement, Circuit de lubrification et système de contrôle électrique.



Figure III.10: Les étapes de réduction section de cuivre laminé

- ❖ Après la coulée On obtient le cuivre en forme de lingot.
- ❖ Cette forme sortie pour tréfilez dans laminoir faire aménagée pour obtenir un fil machine de diamètre 8mm.



Figure III.11: Fil machine 8mm

III.5 Essais de laboratoire et résultats mécanique / physique

Le processus de fabrication d'un câble électrique complété. Mais il n'est pas encore achevé. On vérifie la qualité de tous les câbles en effectuant des contrôles et des analyses rigoureux après chaque étape avant sa commercialisation.

Après le Laminoir

-On prend échantillon de 1 m du ' fil machine ' afin d'effectuer les contrôles ci-dessous :

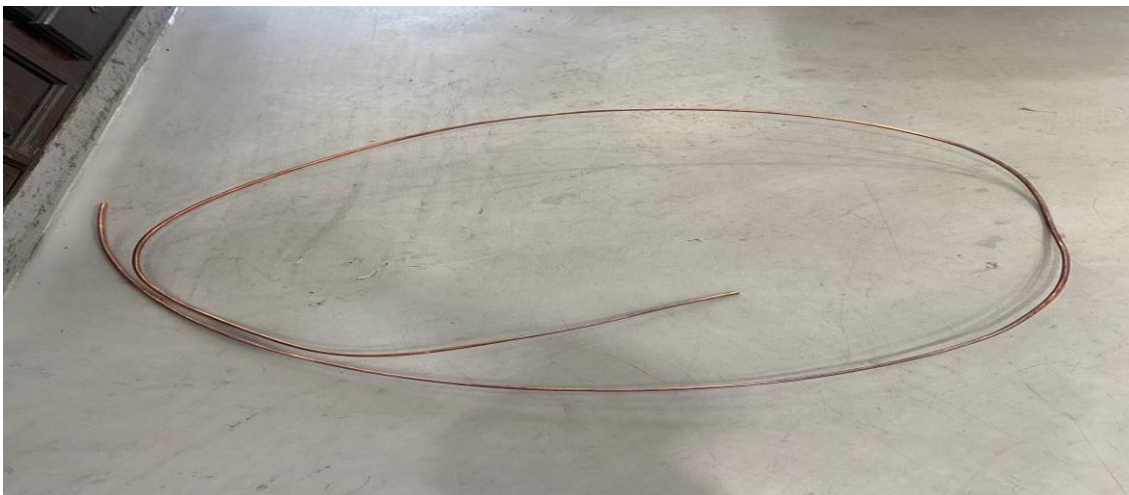


Figure III.12: Echantillon de 1 m du ' fil machine 8 mm

1. Poids

On mesure le poids à partir d'un Balance KERN-FKB 12000g

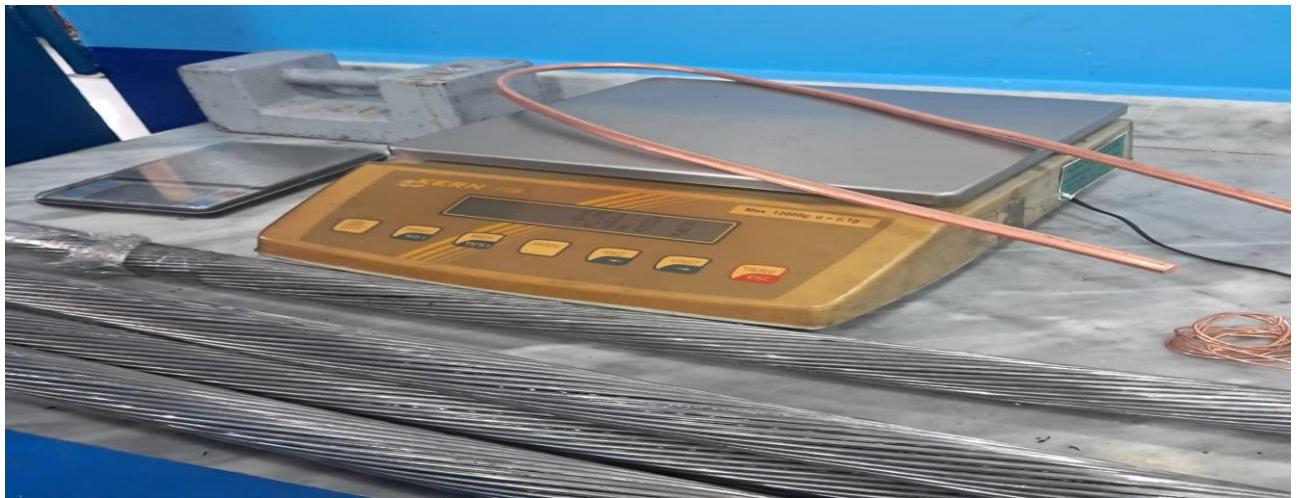


Figure III.13: Balance KERN-FKB 12000g

Mode opératoire

- ✓ Brancher la prise de courant (alimentation)
- ✓ Appuyer sur <Marche /Arrêt> pour mettre en marche la balance

La balance effectue automatiquement un test automatique pour vérifier toutes les fonctions importantes <zéro> est affiché à la fin de la procédure de démarrage (env.10secondes)

La balance est prête à l'emploi et se trouve en mode de pesage.

2. Diamètre



Figure III.14: Appareil de mesure du diamètre



Figure III.15: MILLIOHMMETRE MGR10

Mode opératoire

- Brancher la sonde de température PT100
- Brancher les 4 fils : +U,-U, +I,-I
- ✓ Les fils de (+) rouge et les fils de (-) noir
- ✓ Les fils de courant (I) sont plus épais que ceux de la tension (U)

4. Résistivité

Représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance 1 d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$).

$$\text{Résistivité} = \text{Résistance} \cdot \text{section} \cdot \text{longueur}$$

$$\text{-Section : } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

5. Conductivité électrique

C'est l'inverse de la résistivité. La conductivité d'un matériau homogène est égale à la conductance d'un conducteur cylindrique constitué de ce matériau, divisée par sa section, et multipliée par sa longueur.

$$\text{Conductivité} = 17,241 / \text{Résistivité}$$

$$\text{IACS} = (\text{la résistivité parfait} / \text{la résistivité mesuré}) * 100$$

6. Résistance à la Traction

Correspond à la capacité d'un matériau à résister à des charges, à des forces sans rompre en raison d'une concentration de contrainte ou de déformation.



Figure III.16: Appareil de traction mécanique JBA (10 KN)

La machine de traction utilisée est celle du laboratoire. Elle est donnée par la Figure III.16 .Un barreau est fixé entre les mors en cours de traction. Cette machine est équipée d'un extensomètre pour mesurer les déformations et développe des forces allant jusqu'à 10 KN.

Mode opératoire

- Connus: pour la manipulation de l'appareil
- Cliquer sur l'icône de connus dans le bureau (l'interface va s'afficher).
- Apparition d'une petite fenêtre, appuyer sur Six.
- Changer le type d'essai de MANUEL TRACTION STD>

Il apparaît une autre fenêtre qui demande de sélectionner la référence puis une autre pour l'éprouvette, cliquer sur Sélectionné la référence puis sélectionné la référence de l'éprouvette d'après une liste, et cliqué sur le bouton OK

- Fixer l'éprouvette entre les mâchoires qui conviennent
- Cliqué sur les boutons Tare pour remise à zéro des valousai (force et déformation).
- Cliqué sur le bouton Initier Test jusqu'à la traction de l'éprouvette.
- Répéter cette expérience 2 à 3 fois pour avoir une valeur moyenne.
- En fin, sauvegarder l'essai et afficher le rapport

7. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction. Elle est donnée par la relation :

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

Avec

L_u : la longueur ultime, longueur de l'éprouvette juste avant la rupture.

L_0 : la longueur initiale, longueur de l'éprouvette avant le début de l'essai de traction.

III.6 Résultats

On résume toute les résultats obtenu dans le Tableau III.5

Tableau III.11: Propriétés physique, mécanique et électrique.

Propriétés physique /chimique		
Propriétés	Valeurs	Valeurs mesurées
Résistivité électrique ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	$\leq 0,017241$	0,017015
IACS (%)	≥ 100	101,09
Diamètre (mm)	$8,00 \pm 0,38$	8,03
Aspect	Lisse sans bravure	Sans
Cu+ Ag (%)	99,99 %	99,96%

Propriétés mécaniques		
Propriétés	Valeurs	Valeurs mesurées
Résistance à la traction (MPA)	≥ 200	250
Allongement à la rupture %	≥ 30	42
	Conforme	

Conclusion

D'après les résultats obtenus de fil machines et les analyses qu'on a fait ont conclu que le fil Machine correspond à la date 27/05/2025 est le meilleur par rapport à l'autre résultat.

Conclusion Générale

- Ce travail s'est concentré sur l'influence des impuretés sur les propriétés mécaniques et électriques d'un fil de cuivre de 8 mm, un sujet d'une grande pertinence pour le secteur industriel et un produit clé du groupe industriel Sidi Bendhiba (GISB) de Mesra.
- Nous avons mené une analyse approfondie des mécanismes qui régissent la qualité du cuivre, en mettant en lumière l'impact des divers éléments indésirables présents dans sa composition. L'objectif était de comprendre comment ces impuretés, même à faibles concentrations, peuvent altérer les caractéristiques essentielles du cuivre industriel.
- Nos résultats ont montré que la présence d'impuretés, même en très faibles quantités, modifie de manière sensible les propriétés mécaniques du cuivre, telles que la résistance à la traction et l'allongement à la rupture. Ces altérations sont des indicateurs directs de la ductilité et de la robustesse du matériau.
- L'étude a également révélé une altération notable de la conductivité électrique due aux impuretés. C'est un critère de performance absolument fondamental pour les applications du cuivre dans les secteurs électrique et électronique.
- L'analyse de la recristallisation en présence de ces impuretés a confirmé que les défauts microstructuraux introduits ou exacerbés par ces éléments perturbent directement les chemins de conduction électrique et les mécanismes de déformation mécanique.
- Notre travail a souligné que la présence d'oxygène, bien qu'inévitable, doit être rigoureusement contrôlée. Un excès ou une insuffisance peut impacter négativement la cinétique de recristallisation et, par conséquent, la qualité finale du produit.
- La maîtrise et la gestion proactive de toutes les impuretés (métalliques ou gazeuses) sont absolument primordiales. Cela garantit non seulement la conformité aux normes industrielles mais aussi la performance optimale et la fiabilité à long terme des fils de cuivre produits.
- Ce travail apporte une contribution significative à une meilleure compréhension des leviers d'action pour optimiser les processus d'affinage et de traitement thermique, dans le but d'améliorer continuellement la qualité du cuivre industriel.

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Ghomari. F : Cours science des matériaux de construction ; Département de génie civil, universités Aboubeker Belkaid Tlemcen.
- [2] Isabey, H. (1933). La Chimie du Cuivre. Editions Scientifiques.
- [3] Alloway, B .J(1995).Heavy Metals in soils.2nd ed.Blackie Acadimic & professional.
- [4]Cotton,F.A.,Wilkinson,G.,Murillo,C.A.,&Bochmann,M.(1999).AdvancedInorganic Chemistry. 6th ed. Wiley-Interscience.
- [5] Lakhtine. I : Métallographie et traitements thermiques des métaux ; 4^{ème} Edition. Mir Moscou, 1986. [2] INERIS-Données technico-économiques sur les substances chimiques en France, Aout
- [6] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/cuivre/2-proprietes-du-cuivre/>
- [7] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.(2018). Materials Science and Engineering: AnIntroduction.10th Edition. Wiley. ISBN: 978-1119405498.
- [8] Yakoubi Ali.«Les alliages de cuivre Département de l'ingénieure Mécanique» Université Moustafa Ben Boulaide-Batna 2021.
- [9] Information on registered substances,ECHA(European chemicals agency), (2003).
- [10] Esperito Santo, C., Wen Lam, E., Elowsky ,C.G. et al .(2011). Bacterial killing by dry metallic copper surfaces. Appl Environ Microbiol,77(3),794-802
- [11] Rakhmetova, A. A., Alekseeva, T. P., Bogoslovskaya, O. A., Leipunskii,I.O.,Ol'khovskaya,I.P.,Zhigach,A.N.(2010).Wound-healing

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- properties of copper nano particles as a function of physico chemical parameters. Nanotechnologies [en ligne], 5(3-4), 271-276. (Page consultée le 19/08/2020). Disponible sur: [http:// www. 10.1134/s199507801003016x](http://www.10.1134/s199507801003016x).
- [12] Bensaada. S, Bouziane M.T : science des matériaux T2 ; Edition OPU, avril 2012.
- [13] Jakani, « Effet des impuretés sur le mécanisme de recristallisation du cuivre tréfilé », Thèse de doctorat, p.5, Paris XI, 2004.
- [14] Arnaud, Barbery. J, Biais. R, Fargette, B, Nau ot. P : Propriétés du cuivre et de ses al-liages ; Techniques de l'ingénieur (M430).
- [15] Michel. Dupeux : Aide-mémoire Science des matériaux ; 2eme édition. Dunod Paris, 2008.
- [16] [PABC 2002] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet et P. Cambrage, Métallurgie, du minerai au matériau, Paris, Éditions Dunod, 2002, 2e éd., 1177 p. (ISBN 978-2-10-006313-0), p. 781-794, 798-800, 822-829, 915-916
- [17] Ruparelia, J. P., Chatterjee, A. K., Duttagupta, S. P., Mukherji, S. (2008). Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles. Acta Biomaterialia [en ligne], 4(3), 707- 716. (Page consultée le 01/05/2020) Disponible sur: [http:// www.10.1016/j.actbio.2007.11.006](http://www.10.1016/j.actbio.2007.11.006).
- [18] D.Champman et T.Norris, «Copper for busbars», p.8, 2014.
- [19] J. Hérenguel, « Le cuivre et ses alliages, Métallurgie Spéciale »,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INSTN, Enseignement 3eme du cycle

[20] JSSmartJr. Theeffectsofimpuritiesincopper,ButtsA(Ed)Copper,Rheinh
old Publishing Corp NY 1954 Ch 19 pp4102.

[21] Saarivirta MJ .Behaviourand effect of Sulphuron Oxygen-Free High-
Purity copper. Trans ASM 57, 1964 ppl33

[22] Grant,N.J.,&Kelly,W.C.(1985).EffectsofOxygenandLeadontheMecha
nical Properties of Copper. Journal of Metals, 37(5), 27-32.

[23] <https://www.totalmateria.com/fr/proprietes/proprietes-du-cuivre/>

[24] Parker, J. M., & Parker, J. D. (2003). Bismuth: Applications and
Properties. Journal of Materials Science, 38(10), 2083-2090.

[25] Archbutt et al Effects of impurities in copper British non ferrous
metals research association Monograph 1937

[26] Hedges, T. S., & Spencer, H. (1986). The Effects of Impurities on
the Electrical Conductivity of Copper. Journal of the Institute of Metals
113(4), 225-230.

[27] H. Pops, J. Holloman, Wire Journal International, Vol. 5, p.
70(1994)

[28] Journal of Materials Engineering and Performance, Volume21, Issue7, pp.1474-
1478

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[29] Barton J., Guillemet C., Le Verre, Science et Technologie, EDP Sciences, 2005.

[30] Elliott S., The Physics and Chemistry of Solids, Wiley, 1998.

[31] Marucco J.-F., Chimie des Solides, EDP Sciences, 2004.

[32] Smyth D.M., The Defect Chemistry of Metal Oxides, Oxford University

[33] Collongues R., La Non-Stœchiométrie, Masson, 1971.

[34] G.A. Smith, J. Inst. Met. 32(1971)99.

[35] D. Coutsouradis, E. Diderrich, J. Smets, G. Crocq, L. Pauwels,

Metallurgical Reports C.R.M., no. 39, 1974, p. 73.

[36] K. Feyaerts, P. Huybrechts, J. Schamp, J. Van Humbeeck, B.

Verlinden, Wire J. Int. 11 (1996) 68.

[37] C.-H. Pitt, P.L. Taylor, D.L. Van Wagoner, Metall. Trans. 10A(1979)809.

[38] I.L. Dillamore, W.T. Roberts, Metall. Rev. 10(1965)22.

[39] H.-J. Shin, H.T. Joeng, D.-N. Lee, Mater. Sci. Eng. A279(2000) 244.

[40] N. Brown, Trans. Met. Soc. AIME 221 (1961)236.

[41] ASM International (2004). Metals Handbook, Volume 2: Properties

and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10th

Edition. ASM International. ISBN: 978-0871703781

[42] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/cuivre/2-proprietes-du-cuivre/>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [43] W.-R.Hibbard,J.Trans.AIME77(1950)581.
- [44] J.Grewen, Z.Metallkunde57(1966)581.
- [45] H. Inoue, N. Inakazu, H.Yamamoto, Proceeding of International Conference on Texture of Materials, 1981, p. 591.
- [46] I.L.Dillamore, H.Katoh, Met.Sci.8(1974) 73.
- [47] P. Beck, H. Hu, Recrystallization Grain Growth and Textures, TheAmerican Society of Metals, Metal Park, Ohio, 1966, p. 393.
- [48] K.Pawlik,J.Pospiech,K.Lücke,TextureMicrostruct.14–18(1991)25.
- [49] V. Branger, M.-H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle, Proceeding of 21st Risø International Symposium, 2000, p. 257.
- [50] A.L.Etter,M.-H.Mathon,V.Branger,T.Baudin,R.Penelle,ScriptaMater.
- [51] K.Helming,Mater.Sci.Forum363(1994)157.
- [52] [pop97]pops H. ,The metallurgy of copper wire.Innovations,1997. Available on-line <http://www.copper.org/>.
- [53] [PRO] History of Continuus-Properzi,available online www.properzi.com
- [54] [LAF13] La Farga,Melting and Casting,Copper Worldwide,vol. 3no.1,2013
- [55] [ARD04] J.O.G.Arderiu,Manufacture of copper microalloys ,La Farga ,Brevet n°6 797 082 ,2004