

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم هندسة الطرائق

Génie des procédés des matériaux



Department of Process Engineering

The Date

Ref :...../U.M/F.S.T/ 2023

قسم هندسة الطرائق

التاريخ :

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie des procédés des matériaux

Thème

Impact des impuretés sur la qualité du cuivre

Présenté par

M^{me} REZIGA NOUR EL HOUDA

Soutenu publiquement le 24/09/2024

DEVANT LE JURY

Présidente M^{me} MOHAMED SEGHIR ZAHIRA M.C.B. Mostaganem

Examineur M^{me} FARES ZINEB M.A.A. Mostaganem

Encadreur M^{me} FEDDAL IMENE M.C.A. Mostaganem

ANNÉE 2023 /2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a éclairée sur le chemin du savoir et m'a donné la force et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je remercie chaleureusement mon encadrant, **M^{me} FEDAL IMENE**, pour avoir accepté de me guider et pour son soutien constant, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de cette démarche.

Mes remerciements s'étendent également à **MOHAMED SEGHIR ZAHIRA** qui a gracieusement accepté de présider ce jury, honorant ainsi mon travail par sa présence et son expertise dans le domaine du Génie des Procédés.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à **M^{me} FARES ZINEB**, pour avoir accepté d'évaluer ce travail avec bienveillance et rigueur.

Enfin, je tiens à remercier ma famille

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie des procédés, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour.

C'est de vous dont je parle, très chers parents.

Merci *mon père* pour tous tes efforts consentis pour ma réussite. Tu as mis tout ce que tu possédais

Pour m'apprendre le sens de l'honneur, de la dignité, de la morale, et du travail bien fait

Maman, maintenant que tu n'es plus là, je comprends encore plus profondément la portée de ton combat et de tes sacrifices. Tes conseils incessants, qui m'ont parfois semblé lourds, avaient en réalité un seul objectif : ma réussite et mon bonheur. J'espère de tout cœur être à la hauteur de tes attentes et honorer ta mémoire par mes accomplissements.

À mon encadreur *Mme FEDAL IMEN*, pour m'avoir dirigé dans ce travail de recherche et m'avoir fait

Bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.

À mon oncle Abderrahmane

A mon mari

A ma petite fille ELINE Ma chère Eline, tu es la lumière qui illumine mes jours et l'espoir qui fait battre mon cœur. En toi, je vois l'avenir, un monde rempli de possibilités et de bonheur. Que chaque pas que tu feras soit guidé par la sagesse et l'amour, et que tu puisses toujours sentir la force de ceux qui t'aiment profondément.

Merci pour ton soutien inestimable,

Merci infiniment pour ton accompagnement, retrouve ici ma profonde gratitude.

Resumé

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, structure cristalline uniforme, 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, uniform crystalline structure, 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 ميكانيكياً على العينات المقدمة لنا من GISB.

الكلمات المفتاحية: الخصائص الميكانيكية، الشوائب، الهيكل البلوري المنتظم، التوصيلية، الليونة

Table des matières

INTRODUCTION	1
--------------------	---

RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I

I.2. Cuivre.....	4
I.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du cuivre.....	5
I.2.1.1. Propriétés Chimiques	6
I.2.1.2. Caractéristiques physiques du cuivre	8
I.2.1.3. Caractéristiques mécaniques du cuivre	8
I.3. Utilisations du cuivre dans différents domaines	9
I.4. Types d'impuretés dans le cuivre	11
I.4.1. Impuretés métalliques	11
I.4.2. Impact des impuretés sur la qualité du cuivre.....	17
I.4.3. Effet des impuretés sur la conductivité électrique	17
I.4.4. Effet des impuretés sur la conductivité thermique.....	19
I.4.5. Effet des impuretés sur la résistance à la corrosion.	20
I.4.6. Effet des impuretés sur d'autres propriétés du cuivre (telles que la couleur et la ductilité).	20

CHAPITRE II

II.1. Mécanismes d'influence des impuretés sur la qualité du cuivre.....	23
II.2.2. Effet des impuretés sur la formation de défauts dans le cuivre	24
II.2.3. Effet des impuretés sur les propriétés de surface du cuivre.....	25
II.2. Méthodes d'élimination des impuretés du cuivre	26
II.2.1. Fusion.....	26
II.2.2. Affinage électrolytique.....	27
II.2.3. Affinage thermique	28
II.2.4. Autres méthodes d'élimination des impuretés (telles que l'évaporation et la sublimation).....	28
II.3. Évaluation de l'impact des méthodes d'élimination des impuretés sur la qualité du cuivre	28
II.3.1. Effet des méthodes d'élimination des impuretés sur la structure cristalline du cuivre. .	29

CHAPITRE III

III.1. Présentation de l'entreprise La Câblerie Algérienne	31
III.1.1. Groupe Industriel Sidi Bendehiba (GISB).....	31
III.1.2 Localisation de l'entreprise	32
III.1.3. Fonctionnement et produits	32
a) Clients.....	33
b) Organigramme.....	33
C. Normes relatives au cuivre	34
D. services de l'entreprise	34
III.2. Processus de production LA CABLERIE ALGERIENNE	35
III.3. Procédés de fabrication d'un Câble électrique.....	35
III.3.1. Traitement de la matière première pour la fabrication d'un câble électrique.....	36
III.4. Description de la production au niveau du site 2	38

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Le traitement thermique de recristallisation	52
IV.2 La métallographie du cuivre et de ses alliages	53
IV.2.1 Elimination par le dégazage	58

CONCLUSION

.....	61
-------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64
--	-----------

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales propriétés physico-chimiques du cuivre aux conditions de pression et température ordinaires.....	5
Tableau 2 Tableau 2: Principales impuretés métalliques du cuivre	13
Tableau 3 .Tableau 3. Résultats du% d'impuretés le 01 septembre 2024	58
Tableau 4 . Propriétés physiques, mécanique et électrique.	61

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 . Structure cristalline du cuivre métallique et distances interatomiques des atomes dans la maille.....	8
FIGURE 2 : variation de la conductivité électrique en fonction des taux d'impureté	21
FIGURE 3 :Quelques types simples de défauts.	28
FIGURE 4 . Schéma du procédé d'anode soluble	30
FIGURE 5 : localisation de GISB	37
FIGURE 6 : Organigramme de l'organisation de l'entreprise.	38
FIGURE 7 : Processus de production des câbles électriques.....	40
FIGURE 8 : Constitution d'un câble électrique : les trois éléments essentiels	40
FIGURE 9 : Four de Fusion	41
FIGURE 10 : Machine de tréfilage de fil machine	44
FIGURE 11 . Principe du tréfilage.	44
FIGURE 12 Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple.	45
FIGURE 13 . Machine multiple	46
FIGURE 14 : Processus de câblage.....	46
FIGURE 15 : Isolation des câbles électriques.	48
FIGURE 16 : Assemblage des câbles électriques.	49
FIGURE 17 . Processus de Bourrage et Gainage.....	49
FIGURE 18 : L'influence du temps de fusion sur l'élimination des impuretés des matériaux techno géniques de cuivre à des températures : (en vert) $T = 1500 \text{ K}$; et (en rouge) $T = 1700 \text{ K}$	57
FIGURE 19 : Les éléments ayant les concentrations les plus élevées dans le métal cuivre ...	60

LISTE DES ABREVIATIONS

Cu : Cuivre

Ag : Argent

Pb : Plomb

Fe : Fer

Ni : Nickel

O : Oxygène

ppm : Parties par million

wt% : Pourcentage massique (Weight Percent)

SEM : Microscopie électronique à balayage (Scanning Electron Microscopy)

EDS : Spectroscopie à dispersion d'énergie (Energy Dispersive Spectroscopies)

XRD : Diffraction des rayons X (X-ray Diffraction)

ICP-MS : Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)

T°C : Température en degré Celsius

HV : Dureté Vickers (Vickers Hardness)

EC : Conductivité électrique (Electrical Conductivity)

RE : Résistance électrique (Electrical Resistance)

MIC : Corrosion induite par des micro-organismes (Microbial Induced Corrosion)

PPM : Pureté du cuivre purifié à plus de 99,99% (Pure Purple Metal)

ppm O : Concentration d'oxygène en ppm

FCC : Structure cubique à faces centrées (Face-Centered Cubic)

FIB : Faisceau d'ions focalisé (Focused Ion Beam)

TEM : Microscopie électronique en transmission (Transmission Electron Microscopy)

HCP : Structure hexagonale compacte (Hexagonal Close-Packed)

INTRODUCTION

Introduction

Le cuivre est le premier métal utilisé par l'homme et a été doté de nombreux Des applications à travers les âges ; des outils aux armes en passant par les tuyaux... mais au début

Au XXe siècle, avec le développement massif de la science et de la technologie, l'intérêt des humains pour l'électricité a radicalement évolué. De nos jours, le cuivre est principalement prisé pour ses excellentes propriétés conductrices. Il sert également de référence en matière de conductivité électrique, avec une valeur standard équivalente à 100 % selon l'IACS (International Annealed Copper Standard). Grâce à ses caractéristiques électriques et mécaniques, le cuivre est devenu un métal indispensable pour le transport et la distribution de l'électricité.

La principale caractéristique du cuivre réside dans sa capacité à bien conduire l'électricité, combinée à une grande ductilité. En 1913, la Commission Electrotechnique Internationale a établi la conductibilité électrique du cuivre comme référence, avec une résistivité de 1,724 microhm.cm à l'état recuit servant d'étalon. La solidité des fils de cuivre et la fiabilité des connexions électriques qu'ils offrent sont des raisons majeures de leur utilisation généralisée dans l'industrie électrique, tant pour la distribution d'énergie que pour la fabrication de matériel et de composants électroniques.

Cependant, cette conductivité peut être compromise par certaines impuretés présentes dans la matière première, même à des niveaux acceptables selon la norme ASTM B49 (comme quelques ppm de soufre ou de plomb). Ces impuretés retardent la recristallisation des fils de cuivre, ce qui affecte leurs propriétés mécaniques, notamment en diminuant l'allongement à la rupture. Pour mieux sélectionner les fils de cuivre en fonction de leur utilisation finale et prédire leurs caractéristiques (propriétés mécaniques, microstructure, etc.), il est essentiel de comprendre les mécanismes de déformation et de recristallisation du cuivre en présence d'impuretés, un sujet encore peu exploré dans la littérature.

Pour obtenir du fil de cuivre, le processus commence par l'extraction du cuivre à partir de minerais. Ce dernier subit ensuite un affinage électrolytique, qui permet d'obtenir des cathodes de cuivre d'une pureté de 99,9 %. Ces cathodes sont ensuite fondues et coulées sous forme de lingots cylindriques.

Les lingots sont soumis à une extrusion à chaud, ce qui permet d'affiner leur structure et de réduire leur diamètre. Le produit obtenu est ensuite laminé à chaud à l'aide de cylindres

cannelés, produisant des fils de cuivre de 8 mm de diamètre, connus sous le nom de « fil machine ».

Ce fil machine entre ensuite dans une deuxième étape de transformation, le tréfilage, qui permet de réduire encore le diamètre du fil et de le mettre en forme pour le caténaire. Dans le cadre de notre étude, une simulation sera effectuée pour modifier le cuivre, éliminant certaines impuretés afin d'atteindre une pureté de 99,99 %. Cette recherche vise à optimiser les propriétés du cuivre pour des applications spécifiques, améliorant ainsi ses performances dans divers domaines. Cette recherche vise à étudier l'impact de différentes impuretés sur la qualité du cuivre,

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

1. **Propriétés physiques et chimiques du cuivre** : Ce chapitre aborde en détail les caractéristiques essentielles du cuivre, notamment sa conductivité électrique, sa ductilité, et ses propriétés mécaniques et thermiques.
2. **Mécanismes d'influence des impuretés sur la qualité du cuivre** : Dans ce chapitre, nous analysons comment différentes impuretés, même à de faibles concentrations, peuvent altérer les propriétés du cuivre, en se concentrant sur les effets de la recristallisation et de la déformation.
3. **Présentation de l'entreprise GISB Cabalerie Algérienne** : Ce chapitre décrit l'entreprise où j'ai effectué mon stage. Nous y examinons son fonctionnement, ses principaux composants, ainsi que son rôle dans l'industrie du cuivre.
4. **Résultats et discussion** : Dans ce dernier chapitre, nous présentons les résultats obtenus au cours de notre étude, suivis d'une discussion approfondie sur leur signification et leurs implications pour l'amélioration de la qualité du cuivre.

Ainsi, chaque chapitre contribue à une compréhension globale des enjeux liés au cuivre, depuis ses propriétés fondamentales jusqu'à son application dans l'industrie, tout en tenant compte des impacts des impuretés et des résultats de l'étude menée.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE CUIVRE

I. Introduction

Le cuivre est un matériau rougeâtre, connu pour sa conductivité électrique et thermique remarquable. Utilisé dès l'Antiquité, il occupe une place essentielle dans différents domaines contemporains. 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.

I.2. Cuivre

Élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique $Z = 29$; de masse atomique 63.546, C'est un métal rougeâtre, malléable et ductile, de conductivités thermique et électrique élevées. Il résiste à l'air et à l'eau mais se patine lentement en présence de carbonate [1]. Il est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre natif, de minerais oxydés ou sulfurés. En métallurgie, il entre dans de nombreux alliages comme le laiton (cuivre et zinc), le bronze (cuivre et étain) et le maillechort (cuivre, nickel et zinc). Ses propriétés de bon conducteur de la chaleur et de l'électricité en font un matériau très utilisé. Les sels de cuivre (sulfate, acétate et dérivés organiques) sont utilisés comme fongicides ou algicides en agriculture, pour les traitements chimiques de surface, la fabrication de peintures et de céramiques [2].

Il entre dans de nombreux alliages comme le laiton (cuivre et zinc), le bronze (cuivre et étain), le maillechort (cuivre, nickel et zinc). C'est un métal indispensable dans un grand nombre d'applications domestiques et industrielles.



FIGURE I.1 : Cuivre à l'état naturel [3].**I.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du cuivre**

Les principales propriétés physico-chimiques du cuivre aux conditions de pression et température ordinaires sont présentées sur le tableau 1.

Tableau 1 : Principales propriétés physico-chimiques du cuivre aux conditions de pression et température ordinaires [4].

Numéro atomique	29
Masse atomique	63,546 g/mol
Electronégativité de Pauling*	1,9
Masse volumique	8,9 g/cm³ 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⁻¹K⁻¹

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 g/mol [5].

Les deux isotopes naturels sont le *Cu* 63 (69%) et le *Cu* 65 (31%) [6]. A l'état métallique (*Cu*0), il a une couleur rouge-orangée, sa structure cristalline est cubique face centrée de paramètre de maille $a=3,61 \text{ \AA}$ (Fig.2) et de densité 8.9 g/cm^3 . Sa densité supérieure à 5 g/cm^3 le classe dans la famille des métaux lourds [7].

Sa configuration électronique est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}1s^1$ [5,8,9] Suivant la règle classique de remplissage des orbitales atomiques (règle de Klechkowski), la configuration devrait être $3d^9 4s^2$. Mais la configuration électronique de type $s^1 d^{10}$ est énergétiquement plus favorable que la configuration $s^2 d^9$.

Du fait de la capacité des électrons de la sous couche d à se délocaliser dans le réseau métallique, ses températures de fusion et de vaporisation sont élevées.

Les formes les plus courantes à l'état naturel étant sont les ions cupriques Cu^{+2} ($3d^9$) (Fig. 2) et cupreux Cu^+ ($3d^{10}$).

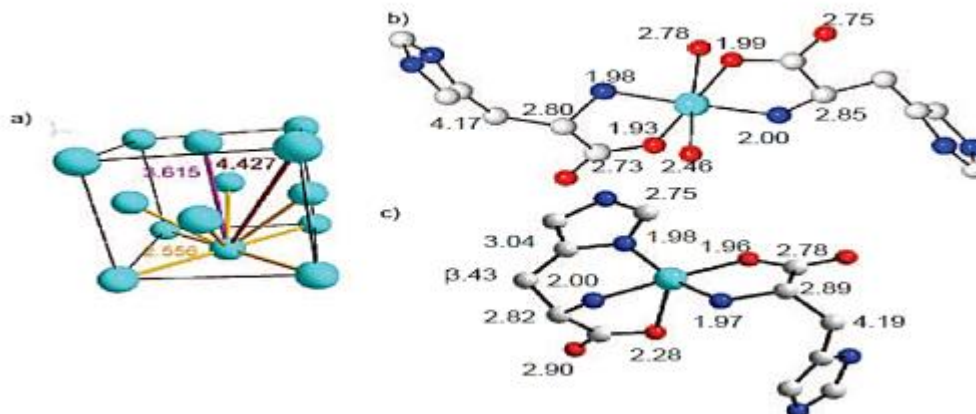


FIGURE I. 2. Structure cristalline du cuivre métallique et distances interatomiques des atomes dans la maille.

La majorité des caractéristiques du cuivre métallique sont influencées par le niveau de pureté et la provenance du métal. Les différences de caractéristiques sont provoquées par [10] :

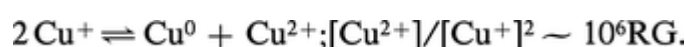
- Le niveau de cuivre, c'est-à-dire l'apport d'oxygène : Cuivre dégradé, cuivre dépourvu d'oxygène.
- Les impuretés natives (comme l'arsenic) ou les restes d'additifs (comme le phosphore) peuvent être présents dans des solutions solides ou des phases séparées aux joints de grains.
- Le traitement thermique et mécanique préalable du métal entraîne des états tels que le cuivre coulé, le cuivre laminé à chaud, le cuivre travaillé à froid (dur), le cuivre recuit (doux) et le cuivre fritté.

I.2.1.1. Propriétés Chimiques

Dans le tableau périodique des éléments, le cuivre est précédé de l'argent et de l'or dans le sous-groupe B de la première colonne. Il est le neuvième des dix éléments de transition entre le calcium et le gallium, le premier à avoir une sous-couche complète de $3d$ [11].

Le cuivre est généralement monovalent, selon l'arrangement des électrons, et les sels cuivreux sont en effet semblables aux sels d'argent, auxquels ils sont souvent mêlés dans la nature. La structure covalente est dominée par l'oxyde, le sulfure et les halogénures cuivreux. Dans le système cubique, ils se cristallisent comme dans la blende. La fusibilité des halogénures est aisée et elles sont semi-conductrices [11].

L'ion Cu^+ est incolore et diamagnétique. En raison de son rayon important (0,091 nm), il ne donne pas d'hydrates et ses complexes sont peu stables. D'une façon générale, les sels cuivreux sont instables en solution en raison de l'équilibre :



Les sels cuivriques cristallisés anhydres présentent différentes teintes, mais la solution ammoniacale d'un sel cuivrique reste d'un bleu foncé éclatant, une teinte caractéristique des ions $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_n]^{2+}$; les hydrates sont de couleur bleue ou verte. Les complexes cuivriques tels que les hydrates et les amines sont tous paramagnétiques lorsqu'ils possèdent un électron unique et une structure dsp^2 [11].

a. Réactivité

Le cuivre est relativement peu réactif. Il ne réagit pas avec l'eau, mais peut réagir avec des acides oxydants tels que l'acide nitrique et l'acide sulfurique concentré [12].

- Avec **l'eau** : Le cuivre ne réagit pas avec l'eau, ce qui le rend résistant à la corrosion dans des conditions normales.
- Avec **les acides** : Il peut réagir avec des acides oxydants comme l'acide nitrique (HNO_3) et l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4).

Par exemple, avec l'acide nitrique, il forme du nitrate de cuivre et du dioxyde d'azote :



- Avec **l'air** : À température ambiante, le cuivre réagit lentement avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde de cuivre qui le protège de la corrosion supplémentaire.

b. Oxydation

Le cuivre s'oxyde en présence d'oxygène, formant une couche de patine (cuivre vert-de-gris) qui protège le métal sous-jacent de la corrosion [13].

c. Alliages

Le cuivre forme des alliages avec d'autres métaux, comme le laiton (alliage de cuivre et de zinc) et le bronze (alliage de cuivre et d'étain).

Les alliages sont principalement constitués de cuivre avec divers éléments ajoutés. Alliage Cuivre se sont des alliages de métaux non ferreux qui ne contiennent pas de Fer car le Cuivre peut se former Avec une large gamme d'autres métaux : Zinc, Etain et Aluminium [14].

- Alliage monophasé
- Les alliages biphasés (alliage duplex)

I.2.1.2. Caractéristiques physiques du cuivre

Après l'argent (6 %), le cuivre est considéré comme le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité. C'est pourquoi il est utilisé comme chaudière à évaporer, serpentins, cuves, fils et câbles pour le transport d'énergie électrique, enroulements de dynamos, etc.

Les variations de température, les traitements mécaniques et les inclusions ont un impact sur la conductibilité du cuivre. La conductivité du cuivre pur peut baisser jusqu'à 78 % à des températures de 100°C à 20°C, tandis que la déformation à froid entraîne des distorsions du réseau, ce qui réduit sa conductivité. Un traitement thermique à 450°C permet d'égaliser les distorsions, tout comme les inclusions agissent dans le même sens [15].

I.2.1.3. Caractéristiques mécaniques du cuivre

Les caractéristiques mécaniques du métal pur sont moyennes ; elles le situent loin derrière l'acier, mais avant les métaux mous (zinc, plomb, étain). Sa dureté est 3 dans l'échelle de Mohs, la résistance à la traction est faible et l'allongement important. Les propriétés mécaniques du cuivre sont assez favorables à la mise en forme à chaud et à froid [11].

Le cuivre, bien qu'il soit assez ductile et résistant, est mou et présente également une certaine dureté. Limite élastique faible. C'est pourquoi, dans de nombreux cas, on l'emploie sous forme d'alliages. Le cuivre est résistant à la chaleur et s'effondre aisément. Il est facile à corroyer,

mais son usinage est médiocre. En raison de sa grande persévérance, lors du travail à froid, il est nécessaire de faire un recuit afin de stopper l'écrouissage. Cependant, il est également possible de réaliser le travail à chaud afin que le recuit compense l'écrouissage. Un retrait élevé affecte négativement ses Caractéristiques de fonderie.

Le cuivre convient parfaitement pour le brasage et le fendage à l'étain. Le cuivre à faible oxygène présente une plus grande élasticité, ce qui en fait le matériau principal utilisé pour fabriquer des conducteurs de courant. La fluidité du cuivre fondu faciliterait la coulée, cependant les soufflures (gaz dissous SO₂, CO₂,...) inévitables compliquent l'opération. Le cuivre peut être fabriqué et laminé à une température de 600°C, mais il est nécessaire de le recuire au rouge sombre et de le refroidir à l'eau [15].

Le cuivre et ses alliages présentent cette intéressante particularité que leurs caractéristiques mécaniques s'améliorent lorsque la température baisse. De là leur utilisation comme matériaux cryotechniques dans l'industrie des gaz liquéfiés.

Du côté des hautes températures, au contraire, ils présentent deux inconvénients : la résistance à l'oxydation décroît avec la température et les caractéristiques mécaniques diminuent dès 200 °C pour le cuivre pur. Les cupronickels et les cupro-aluminiums sont, parmi les alliages de cuivre, ceux qui résistent le mieux aux températures élevées. Pour ces alliages, la température limite est de l'ordre de 400 à 500 °C selon le temps qu'ils demeurent à ces températures. Lorsqu'il faut associer résistance à la température et conductivité électrique, par exemple, on peut utiliser des matériaux composites [11].

I.3.Utilisations du cuivre dans différents domaines

Le cuivre est utilisé dans une variété d'industries comme la fabrication, la construction et le transport. Considéré comme un oligo-élément, le cuivre est essentiel à tous les organismes vivants. Le corps adulte contient entre 1,4 et 2,1 milligrammes de cuivre par kilogramme de poids corporel. La transition vers l'énergie verte devrait stimuler considérablement la demande de cuivre en raison de son utilisation dans l'expansion des réseaux électriques et la conception des technologies d'énergie propre, comme les véhicules électriques [16].

Le Cuivre et ses composés ont de nombreuses utilisations industrielles.

❖ Fabrication de nombreux alliages à base de Cuivre : Bronze (Etain), Laiton (Zinc), alliages cuivreux tels que Constantan, Monel (Nickel), Maillechort (Nickel et Zinc), alliages Devarda (Aluminium et Zinc), alliages de joaillerie (dont Or et Argent).

❖ Utilisé dans l'électricité, l'électronique, la plomberie, l'automobile, la fabrication d'équipements industriels et la fabrication de pièces de monnaie.

❖ Préparation de catalyseurs en synthèse organique (Cu, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, CuCl_2 , CuCl , Cu_2O , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$).

❖ Fabrication de Bain de couleur pour métaux, pigments pour verre, céramiques, émaux, peintures, encres et vernis ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, CuCl_2 , Cu_2O , CuO , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, CuSO_4).

❖ Industries pétrolières : désodorisant, désulfurant, agent de flottation (CuCl_2 , CuCl , CuSO_4).

❖ Industries textile : teinture textile, tannage du cuir (CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, CuCl_2 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$).

❖ Hydrométallurgie : Affinage des métaux (Cu_2O , CuO , CuCl_2).

❖ Galvanoplastie, traitement de surface (CuCl_2 , CuCl), zingage électrolytique des électrodes (CuCl , CuSO_4).

❖ Fabrication de produits phytopharmaceutiques : herbicides, fongicides (contre les moisissures) (Cu_2O , $\text{Cu}(\text{OH})_2$), bouillies bordelaises (CuSO_4 et hydroxide de calcium $\text{Cu}(\text{OH})_2$, sulfate de cuivre tribasique. [17]

De nombreux alliages contiennent du cuivre, tels que les radiateurs et les échangeurs de chaleur. Son excellente conductivité électrique (la meilleure parmi les métaux non précieux) et sa conductivité thermique en font un matériau privilégié dans les domaines des télécommunications, du bâtiment et des transports d'énergie [18].

De plus en plus de cuivre est utilisé dans les circuits intégrés et les circuits imprimés. Le cuivre est également employé dans les tubes à vide et dans les guides d'onde. Le cuivre peut être utilisé en architecture comme matériau de couverture imperméable, comme sur les toits par exemple [19].

Dans les combinaisons de nickel, le cuivre est employé en construction navale pour sa bonne tenue à la corrosion. Les composés cuivrés, minoritaires dans l'utilisation du cuivre, servent notamment dans les fongicides [20].

Parmi les alliages de cuivre, notons le laiton (cuivre et zinc, pour les douilles d'obus et les matériaux à mémoire de forme notamment) et le bronze (cuivre et étain, matériaux de frottement) [21].

Le cuivre est utilisé comme biocide par les celtes, les hindous, les pionniers américains et japonais, ainsi que par les habitants d'Afrique et d'Asie, pour traiter les plaies et les maladies de la peau et le traitement de beaucoup de maux. Parmi ceux-ci, nous pouvons noter les maux de tête, les brûlures, les vers intestinaux, les infections auriculaires... Il était aussi utilisé tout simplement pour l'hygiène en général [22].

I.4. Types d'impuretés dans le cuivre

Le cuivre, comme de nombreux autres métaux, peut contenir diverses impuretés. Ces impuretés peuvent affecter ses propriétés physiques, mécaniques et électriques.

I.4.1. Impuretés métalliques

Le cuivre, comme de nombreux autres métaux, peut contenir diverses impuretés. Ces impuretés peuvent affecter ses propriétés physiques, mécaniques et électriques.

a) Impuretés du plomb

La solubilité du plomb dans le cuivre dépend en grande partie de la teneur en oxygène du cuivre. Le cuivre contient 200 ppm d'oxygène et la solubilité du Pb à 800°C est d'environ 10 ppm. Au-dessus de 10 ppm, l'élément est présent sous forme d'inclusions et a un impact important Concernant la température de recristallisation [23].

En conditions anaérobies, la température de recristallisation augmente fortement avec l'augmentation de la teneur en Plomb (environ +47°C, 13 ppm de plomb).

En présence d'oxygène et après recuit avant 600°C. La température de recristallisation est proche de celle du cuivre pur (environ 116°C),

Le cuivre cristallise dans le système cubique à faces centrées ($a = 0,366$ nm). C'est, après l'argent, le meilleur conducteur de la chaleur et de l'électricité, mais cette conductivité est très affectée par les éventuelles impuretés (phosphore, arsenic et aluminium notamment). Les atomes étrangers déforment le réseau et rendent plus difficile le transport des électrons [25].

Si aujourd'hui l'influence de nombreux éléments d'alliages dans le cuivre est parfaitement connue (l'argent permet d'améliorer la tenue à chaud du cuivre pur ; Le tellure, le sélénium, le soufre ou encore le plomb (1%) améliorent l'usinabilité ; les alliages à l'étain et au cadmium permettent d'obtenir des combinaisons de propriétés mécaniques et électriques inaccessibles avec du cuivre pur...[CIC92])

Le comportement de nombreux éléments à des niveaux d'impuretés dans le cuivre est modifié par la présence d'oxygène. Plus précisément, le fer, l'étain, le zinc, le silicium et l'aluminium

Les impuretés sont toutes retirées de la solution sous forme d'oxydes stables lorsque l'oxygène est présent. Cela élimine l'effet négatif de ces éléments sur la conductivité et le ramollissement la température et donne un certain contrôle de la taille des grains pendant le travail mécanique en raison la présence des particules de la deuxième phase.

L'antimoine et le cadmium forment au moins deux oxydes stables. Ces oxydes se produisent comme précipités qui peuvent se former ou se dissoudre à des températures spécifiques et différentes, Il n'y a pas d'effets négatifs de ces oxydes aux niveaux d'impuretés et leurs formations ou la solution peut être contrôlée par le contrôle du traitement thermique et mécanique

Procédures de travail. Retirer Sb et Cd de la solution en tant qu'oxyde améliore l'électricité, la conductivité et les particules d'oxyde peuvent contribuer au contrôle de la croissance des grains pendant recuit après travail à froid.




Le bismuth et le plomb forment tous deux des films ou des globules à bas point de fusion pendant le refroidissement après coulée ou travail mécanique.

Ces phases à bas point de fusion conduisent à une leur faible résistance conduit à une courte durée de froid. Ces effets négatifs sont considérablement réduits par oxydation et par la formation d'oxydes complexes avec d'autres impuretés telles qu'Arsenic.


Phillips [26] offre des preuves confirmatoires des effets de l'oxygène sur le fer en solution dans le cuivre et ajoute que l'oxyde de fer est généralement uniformément réparti dans le cuivre parce que lorsque l'oxygène augmente, la solubilité du fer est réduite par la solidification et s'oxyde alors que le cuivre. Il confirme également le très lent taux de précipitation de l'antimoine comme oxyde par décomposition du Cu_2O .

Dans la catégorie de cuivre spécifiée pour le matériau de suremballage aucune de ces oxydations se produira en raison du niveau élevé de désoxydation résultant du phosphore addition.

Tableau 2 : Principales impuretés métalliques du cuivre [24].

Le métal		Effet sur le cuivre
Arsenic (As)		Présent parfois en petites quantités. Peut augmenter la résistance à la corrosion, mais à des concentrations élevées, il peut être toxique.
Antimoine (Sb)		Comme l'arsenic, il peut améliorer certaines propriétés, mais en excès, il peut réduire la ductilité.
Plomb (Pb)		Utilisé parfois pour améliorer l'usinabilité, mais peut réduire la résistance mécanique.

Fer (Fe)		<ul style="list-style-type: none">• Peut former des inclusions ou des composés dans le cuivre.• Peut réduire la conductivité électrique et la résistance à la corrosion.
Nickel (Ni)		Peut-être ajouté intentionnellement pour certaines applications, mais en tant qu'impureté, il peut affecter les propriétés du cuivre.
Zinc (Zn)		Présent dans le laiton (alliage de cuivre et de zinc), mais en tant qu'impureté dans le cuivre pur, il peut affecter ses propriétés.
Silicium (Si)		Peut être utilisé pour améliorer certaines propriétés, mais en excès, il peut réduire la conductivité électrique.

Aluminium (Al)		<ul style="list-style-type: none"> • Peut former des oxydes et des inclusions dans le cuivre. • Peut affecter la conductivité électrique et la résistance mécanique
-----------------------	---	---

b) Impuretés du soufre

Le soufre a longtemps été considéré comme un élément néfaste à la recristallisation, Sa limite de solubilité dans le cuivre est d'environ (2 ppm à 600°C, 20 PPM à 800°C). UN L'ajout de 10 PPM de soufre au cuivre pur augmente la température de recristallisation de 60 °C [27].

Smart et al [28]. Considérer la solubilité du soufre dans le cuivre autrement pur. Ils estiment que la solubilité est de 2 ppm à 600 °C, de 10 ppm à 700 °C et de 20 ppm à 800 °C.

Saavarita [29] confirme les chiffres Smarts et ajoute 25ppm à 850 C et 36ppm à 950 C. Il estime que la solubilité à la température eutectique de 1067 C est comprise entre 64 et 76 ppm. Cela est conforme au rapport de l'Archbutt que le soufre ne Provoquer une courte durée de vie pendant le laminage, puisque tout le soufre sera en solution solide à température de roulement.

Le soufre présente une teneur en soufre supérieure à 18 ppm et est très faible pendant la lamination.

c) Impuretés de l'oxygène

Le cuivre réagit avec l'oxygène pour former un oxyde. Dans le cas du cuivre, deux oxydes sont possibles : CuO et Cu₂O. A l'état solide c'est l'oxyde CuO qui est stable mais l'oxyde Cu₂O est soluble dans le cuivre liquide [27].

- Le premier, Cu₂O, appelé communément oxyde rouge de par sa couleur lorsqu'il est observé à l'œil nu, et très souvent désigné par le terme oxydules car présent sous forme de précipités globulaires contenus dans la matrice de cuivre.

- Le deuxième, CuO, ou oxyde noir qui se forme généralement au contact de l'air sur la surface du cuivre.

La présence d'impuretés dans le cuivre est causée par l'oxygène, le fer, zinc et aluminium. Les impuretés métalliques ont un effet néfaste sur le cuivre. Ils retardent la recristallisation et augmentent l'érouissage, affectant ainsi le tréfilage.

Archbutt [31] indique un eutectique cuivre-oxygène contenant 3,4% d'oxygène qui forme à 1064 C. Il s'agit bien sûr d'un eutectique de l'oxyde de cuivre et de cuivre. Solubilités pour l'oxygène dans cuivre de 0,015 % à 1050C et 0,007 % à 600 °C. avec un excès d'oxygène présent comme

On signale également Cu_2O . La rareté à froid a été signalée dans les alliages contenant 0,02 % d'oxygène et la rareté à chaud était observé à des teneurs en oxygène supérieures à 0,36 %. Considération de ces niveaux élevés d'oxygène Les niveaux de formation dépassent la portée de ce travail.

La teneur en oxygène du cuivre est généralement de (175 et 450 ppm). La teneur en oxygène au-dessus de cette plage consultative ne sera pas prise en compte des effets néfastes sur le comportement mécanique. Choisir un taux de recuit (durée) avec de bonnes propriétés mécaniques dans l'oxygène. temps de recuit plus court) et déformation pour éviter d'éventuels problèmes Affaiblissement du matériau lors du moulage. Pendant le raffinage, le cuivre est rempli de (0,6 ~ 0,9 % d'oxygène) et le cuivre obtenu est Pur car les oxydes qui forment les oxydes des impuretés sont séparés Inutilisable à cause de la porosité [27].

d) L'effet du bismuth

Le bismuth est l'une des impuretés les plus problématiques dans le cuivre, même à des concentrations extrêmement faibles.

L'effet du bismuth se fait sentir à de faibles concentrations (0,9 PPM, sa limite de solubilité est La concentration dans le cuivre à 650°C est de 100ppm [27].

Le bismuth ($Z = 83$) est un métal qui possède une structure cristallographique de type rhomboédrique à l'état solide. Il est fragile à la température ambiante et sa température de fusion est environ 271°C. Le bismuth utilisé lors de cette étude est un bismuth pur se présentant sous la forme de granulés (fournisseur Cerac). La pureté est certifiée d'au moins 99,999% [30].

e) Phosphore

Archbutt [31]. donne une solubilité solide pour le phosphore dans le cuivre de 0,5 % à 200 °C. Un Cu_3P eutectique fond à 707 °C et le Cu_3P contient 8,27 % de phosphore. Smart [32] a étudié l'effet du phosphore sur un cuivre par ailleurs très pur dans concentrations allant jusqu'à 200 ppm.

Il signale que ce niveau de phosphore demeure dans solution à toutes les températures dans la gamme 300C à 800C. Phosphore en solution diminue la conductivité de 0,73 % pour chaque 10 ppm jusqu'à 60 ppm et augmente-la Température de ramollissement à 110 °C pour une addition de 60 ppm.

Smart indique également que le phosphore est utilisé comme désoxydant pour l'électrolyse du cuivre à trois niveaux.

I.4.2. Impact des impuretés sur la qualité du cuivre

On considère que les impuretés, provenant des matières premières et/ou ajoutées (oxygène) lors de la production, jouent un rôle essentiel dans la qualité du cuivre industriel.

L'oxygène, volontairement ajouté dans le cuivre à l'origine pour garantir de bonnes propriétés électriques et le plomb régulièrement présent dans les déchets de cuivre et difficilement affiné thermiquement pour lequel les tests effectués sur la coulée continue ont montré qu'il jouait un rôle avéré dans la fissuration en sortie de roue de coulée dans la gamme 20-200ppm [33].

Dans la littérature, on trouve principalement des impuretés telles que le Te, le Se, le Bi, le Sb, l'As, le Sn, le Pb, le Fe, le Ni, le S et l'Ag, ce qui représente une quantité totale d'éléments étrangers hors oxygène d'environ 65ppm dans le cuivre industriel Cu-a1. Certaines d'entre elles (P, Fe et Si) présentent des propriétés électriques dramatiques [33], ce qui nécessite d'en maintenir une quantité très limitée. Certains, en revanche, ont peu d'impact sur les caractéristiques électriques, mais jouent un rôle crucial dans les caractéristiques mécaniques du fil : c'est le cas du soufre et du plomb, qui altèrent l'allongement à rupture à partir de 5 ppm et 1 ppm chacune.

I.4.3. Effet des impuretés sur la conductivité électrique

Le cuivre a la conductivité la plus élevée des matériaux d'ingénierie. L'argent ou d'autres éléments peuvent être ajoutés afin d'améliorer la solidité, adoucir la résistance ou d'autres propriétés, sans perte majeure de conductivité [30].

L'influence sur conductivité électrique dépend des impuretés présentes titre d'exemple, la présence de (0,04%de phosphore). Réduit la conductivité d'un échantillon de cuivre jusqu'à 80% (selon IACS).

La variation de conductivité électrique en doit pas dépasser (0,1%) pour considérer l'échantillon comme un cuivre de très haute conductivité électrique [34]. Les impuretés issues des matières premières Et/ou ajoutées en particulier l'oxygène au cours du procédé d'élaboration sont considérées comme un facteur détermination de la qualité du cuivre industriel.

La conductivité électrique augmente avec l'ajout d'oxygène jusqu'à une teneur de 200 ppm en poids (pour Cu-ETP), puis décroît pour des teneurs supérieures (Figure 3). La teneur en oxygène correspondant au maximum de conductivité augmente avec le taux d'impuretés du cuivre. Ceci montre que très vraisemblablement à faible taux, l'oxygène forme des oxydes avec les impuretés, ce qui les retire de la matrice et conduit à une augmentation de la conductivité électrique. Puis, quand toutes les impuretés ont été "pompées", l'oxygène s'insère dans le réseau et fait diminuer la conductivité.

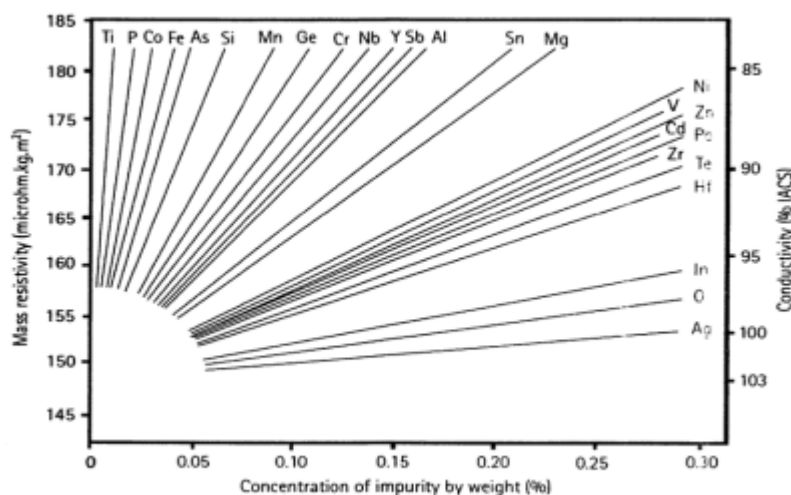


Figure 3 : variation de la conductivité électrique en fonction des taux d'impureté [35].

I.4.4. Effet des impuretés sur la conductivité thermique

Cette propriété est très similaire de la conductivité électrique. Des alliages du cuivre peuvent être utilisés pour cette propriété, ou une bonne résistance à la corrosion compense une perte de conductivité avec l'augmentation de l'alliage [30].

Même une faible concentration d'impuretés dans un métal pur peut entraîner une diminution significative de sa conductivité thermique. Cela s'explique par le fait que les impuretés perturbent les vibrations homogènes des atomes, ce qui entraîne une dispersion des électrons qui diminue la conductivité [36].

Il est fascinant de constater que de nombreux facteurs influencent la conductivité thermique et la conductivité électrique de la même manière. Essentiellement, ces facteurs entravent ou facilitent le transfert d'énergie à l'intérieur d'un métal.

La diffusion ou le "scattering" des électrons est causée par les impuretés qui perturbent la régularité du réseau cristallin du cuivre. La diffusion diminue la flexibilité des électrons, ce qui entraîne une baisse de la conductivité thermique. La résistivité thermique du matériau est augmentée par les impuretés. La présence d'impuretés augmente la diffusion des électrons, ce qui entraîne une diminution de la conductivité thermique. L'impact des impuretés est souvent plus marqué à des températures basses, car à ces températures, les électrons sont moins énergétiques et la diffusion causée par les impuretés joue un rôle important dans la résistance thermique.

- **La température :** Avec l'augmentation de la température, les vibrations thermiques de l'atome augmentent, ce qui accroît inévitablement la dispersion des électrons. Cette intensification de la diffusion restreint le flux électrique (réduisant ainsi la conductivité électrique) et perturbe de la même façon le transfert d'énergie thermique (réduisant la conductivité thermique).
- **Défauts structurels et impuretés :** Tout écart par rapport au réseau cristallin parfait d'un métal, y compris les impuretés et les défauts, peut créer des centres de diffusion pour les porteurs de charges thermiques et électriques, réduisant ainsi les deux conductivités.

- **Structure cristalline** : La disposition des atomes dans un métal régit le mouvement des électrons libres et des phonons, qui à leur tour régulent la conductivité thermique et électrique.

Lorsque les ingénieurs comprennent ces facteurs d'influence communs, ils peuvent manipuler certaines conditions afin d'optimiser la conductivité thermique et électrique pour des applications spécifiques.

I.4.5. Effet des impuretés sur la résistance à la corrosion.

Les réactions entre un métal et son environnement sont responsables du processus de corrosion. Les corrosions des métaux et alliages sont essentiellement électrochimiques en milieu aqueux : un échange de charges électriques libres (électrons) se produit à l'interface métal/électrolyte. Il est impératif que cet échange entraîne en même temps l'action de deux réactions fondamentales : l'oxydation anodique et la réduction cathodique. Les deux réactions fondamentales se produisent simultanément et à la même vitesse. De cette manière, on respecte les principes d'électro-neutralité et de préservation de la matière [37].

Tous les alliages du cuivre résistent à la corrosion par l'eau douce et la vapeur. Les alliages du cuivre sont également résistants à la corrosion dans la plupart des atmosphères rurales, marines et industrielles. Le cuivre résiste aux solutions salines, aux environnements boueux, aux minéraux non-oxydants, aux acides organiques et solutions caustiques. La plupart des ammoniacales, halogènes, sulfures, solutions contenant des ions d'ammoniaque et des acides oxydants, comme l'acide nitrique, attaquent le cuivre. Le cuivre a également une faible résistance aux acides anorganiques. La résistance des alliages du cuivre à la corrosion vient de la formation d'un film adhérent à la surface du matériel [30].

I.4.6. Effet des impuretés sur d'autres propriétés du cuivre (telles que la couleur et la ductilité).

Le cuivre pur a une couleur dorée rougeâtre qui s'oxyde rapidement en un vert terne. Comme le cuivre contient souvent des impuretés naturelles ou est allié avec plus d'un élément, il est difficile de préciser l'effet spécifique que chaque élément d'alliage a sur la couleur de l'alliage résultant. Le cuivre de brai électrolytique contient de l'argent et souvent des traces de fer et de soufre et a une couleur rose tendre. Le cuivre doré est une couleur brun rougeâtre et contient du zinc, du fer et du plomb. Le laiton est souvent utilisé comme métal ornemental, car il a une apparence très similaire à celle de l'or et est beaucoup moins cher.

Les cuvettes contiennent des quantités variables de zinc, de fer et de plomb et peuvent varier de l'or rougeâtre à verdâtre à brunâtre. Le nickel-argent, qui contient du nickel, du zinc, du fer, du plomb et du manganèse, peut avoir un aspect blanc grisâtre à argenté [38].

La principale caractéristique du cuivre cathodique est sa concentration en impuretés, car celle-ci détermine les propriétés mécaniques, c'est-à-dire la ductilité des fils de cuivre dérivés. Cependant, les résultats des essais mécaniques standard d'évaluation de la ductilité montrent qu'il n'existe pas de corrélation claire entre la teneur en impuretés des cathodes et la ductilité des fils de cuivre. L'impureté principale affectant la ductilité des fils de cuivre est l'oxygène, qui est principalement incorporée lors de la fusion des cathodes et du moulage des tiges. De plus, pour discriminer l'effet de la concentration en oxygène dans la ductilité du cuivre, les sondes ou fils utilisés doivent avoir la même déformation antérieure et ne doivent pas avoir été recuits [38].

Chapitre II

Mécanismes d'influence des impuretés sur la qualité du cuivre

II.1. Mécanismes d'influence des impuretés sur la qualité du cuivre

Les impuretés déjà présentes ou ajoutées aux matières premières, c'est-à-dire l'oxygène, durant le processus de fabrication, sont considérées comme un facteur déterminant de la qualité mécanique du cuivre industriel. Une majorité des études précédentes [39], [40] ont conclu que la présence d'impuretés ralentit la cinétique de recristallisation et modifie le comportement de recuit des fils de cuivre électrolytique de qualité supérieure (ETP). L'étude menée par Coutouradis et al. [41] est éclairante ; elle montre une variation de la température de recristallisation (T_{rec}) en fonction du type et de la teneur en impuretés présentes dans le matériau. Ces auteurs ont noté que la présence de certaines impuretés (par exemple, S, Pb, Bi) augmente T_{rec} .

II.1.1. Effet des impuretés sur la structure cristalline du cuivre

Les impuretés peuvent se loger dans le réseau cristallin du cuivre, modifiant ainsi la structure et provoquant des distorsions. Ces distorsions peuvent affecter la taille des grains et induire des défauts cristallins, tels que les dislocations, les lacunes ou les interstitiels.

Malheureusement, peu d'études ont traité de leur effet sur la microstructure et la texture cristallographique qui déterminent le comportement mécanique. Cependant, une compréhension plus approfondie de l'effet des impuretés sur la ductilité du matériau nécessite une meilleure description des microstructures et des textures qui se forment après chaque étape de déformation et de recristallisation, ainsi qu'une connaissance approfondie des paramètres qui les influencent (désorientation inter- et intra-granulaire, énergie stockée, etc.).

De manière générale, dans le cas de la phase (Cu), cristallisant dans le système CFC (Cubique à Faces Centrées), la direction cristallographique privilégiée qui s'aligne sur le gradient thermique lors de la croissance au cours de la solidification est la direction $\langle 100 \rangle$ [KUR86]

Dans le cas des matériaux fcc tirés en fil, la texture est principalement composée de "fibres" $\langle 0 0 1 \rangle // ND$ et $\langle 1 1 1 \rangle // ND$ (où $\langle h k l \rangle$ représente la direction cristallographique parallèle à l'axe du fil, et ND la direction normale à la section du fil) [42]. La proportion relative de ces deux composants varie d'un matériau à l'autre et dépend de l'énergie de défaut de superposition, γ_{SFE} . Ces résultats sont généralement en accord avec le fait que la texture prédominante dans l'aluminium (haut γ_{SFE}) est la fibre $\langle 1 1 1 \rangle // ND$,

tandis que dans l'argent, c'est la fibre $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ //ND (faible γ SFE). Brown [43] a rapporté qu'en présence d'un mécanisme de glissement prédominant (en raison d'un γ SFE élevé) dans un matériau fcc, la texture de déformation tend vers une texture pure $\langle 1\ 1\ 1 \rangle$ //ND.

Concernant le cuivre, Hibbard [44] a observé des textures de fibres $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ //ND et $\langle 1\ 1\ 1 \rangle$ //ND dans des fils de cuivre et des alliages de cuivre de type fcc. Il a également noté que la proportion relative de la fibre $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ //ND diminue lorsque la déformation augmente. Il a été conclu que la fibre $\langle 1\ 1\ 1 \rangle$ //ND est le composant de texture de déformation le plus stable.

II.2.2. Effet des impuretés sur la formation de défauts dans le cuivre

Un défaut cristallin est une interruption de la périodicité d'un cristal. La périodicité d'un cristal représente la répétition régulière des positions atomiques dans les trois directions de l'espace [45]. Les motifs réguliers sont interrompus par des défauts cristallographiques. Il peut s'agir de défauts ponctuels (dimension 0), linéaires (dimension 1), planaires (dimension 2) ou volumiques (dimension 3).

Les impuretés peuvent introduire différents types de défauts dans le cuivre, tels que les lacunes (manques d'atomes dans le réseau cristallin), les dislocations (défauts linéaires), et les précipités (petites particules d'impuretés) ou Formation de défauts interstitiels et substitutionnels[46]. : Les impuretés peuvent occuper des positions interstitielles (entre les atomes de cuivre) ou substitutionnelles (remplaçant les atomes de cuivre), ce qui peut entraîner des distorsions dans le réseau cristallin et affecter les propriétés globales du matériau [47].

Un défaut ponctuel (figure 4, gauche) consiste en une absence d'atome dans un site normalement occupé (lacune), ou au contraire en sa présence dans un site normalement vacant(interstitiel) ou propre à un autre type d'atome (substitution).

- Constituée d'une ligne d'atomes dont l'environnement immédiat est altéré, la dislocation est une combinaison en proportions variables de deux archétypes : la forme coin (figure 1, centre), due à la présence de plans réticulaires incomplets, et la forme vis (figure 4, droite) qui résulte du cisaillement de la structure.

- La surface externe et les joints de grains des solides polycristallins métalliques et céramiques (figure 1, gauche) constituent les limites du réseau cristallin. Ils sont formés d'atomes dotés d'une coordinence incomplète ou altérée qui les rend peu stables et réactifs [48].
- La ségrégation d'atomes étrangers ou de lacunes, qui survient par exemple au refroidissement, aboutit fréquemment à la formation d'amas. Une précipitation massive génère des microstructures composites, comme par exemple la perlite dans les aciers, alternance de lamelles de fer à faible taux de carbone et de cémentite Fe₃C.
- Le désordre de position consiste généralement en une distribution aléatoire d'éléments différents dans des sites équivalents. Dans la forme ordonnée de l'alliage AuCu, les atomes d'or et de cuivre occupent des sites distincts, mais ils se répartissent de façon quelconque sur ces mêmes sites dans la forme désordonnée. Le désordre peut également survenir par amorphisation, ou perte de l'ordre à longue distance comme dans les verres[49].

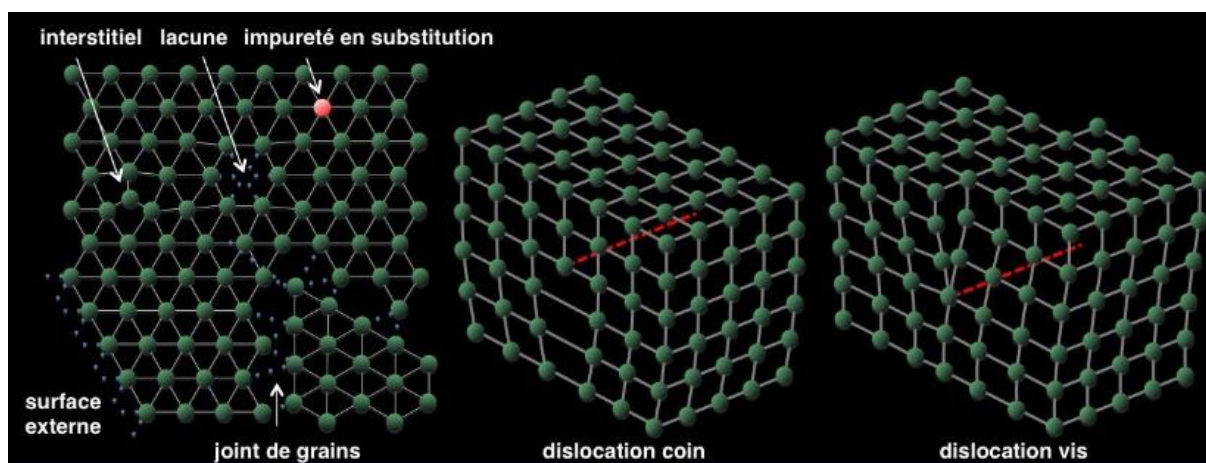


Figure II.1. Quelques types simples de défauts.

II.2.3. Effet des impuretés sur les propriétés de surface du 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 intergranulaire 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 intergranulaire : La corrosion intergranulaire 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.2. Méthodes d'élimination des impuretés du cuivre

L'élimination des impuretés est une technologie bien établie qui est utilisée pour la purification et la concentration des métaux de base dans les solutions aqueuses (p. ex. nickel, cuivre cobalt et zinc). La technologie est robuste et dépend de la précipitation contrôlée des ions métalliques dans la solution, généralement par des ajustements du pH et le dosage des réactifs.

II.2.1. 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 [50]. Les procédés concernés par la production du cuivre sont les prétraitements des charges, leur fusion, la mise sous forme d'alliage, puis leur coulée. Les facteurs qui peuvent favoriser la formation de produits chimiques listés dans l'Annexe C de la Convention de Stockholm comprennent : la présence de métaux catalytiques (dont le

civre est un des meilleurs exemples); des matières organiques présentes dans les charges comme dans des huiles, des plastiques et des revêtements de surface; la combustion incomplète du combustible, et des températures entre 250°C et 500°C. Les meilleures techniques disponibles comprennent : un tri préalable, le nettoyage des matières chargées, le maintien des températures au dessus de 850°C, l'emploi de post brûleurs avec trempe rapide, l'adsorption sur charbon actif et le dépoussiérage par filtres en tissu. Les niveaux de performances pour les émissions des PCDD/PCDF dans l'air, associés aux meilleures techniques disponibles et aux meilleures pratiques environnementales pour les fonderies de cuivre secondaire sont $< 0,5\text{ng I-TEQ/Nm}^3$ (à des concentrations d'oxygène opératoires) [51].

II.2.2. 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 (leblister). 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 [52].

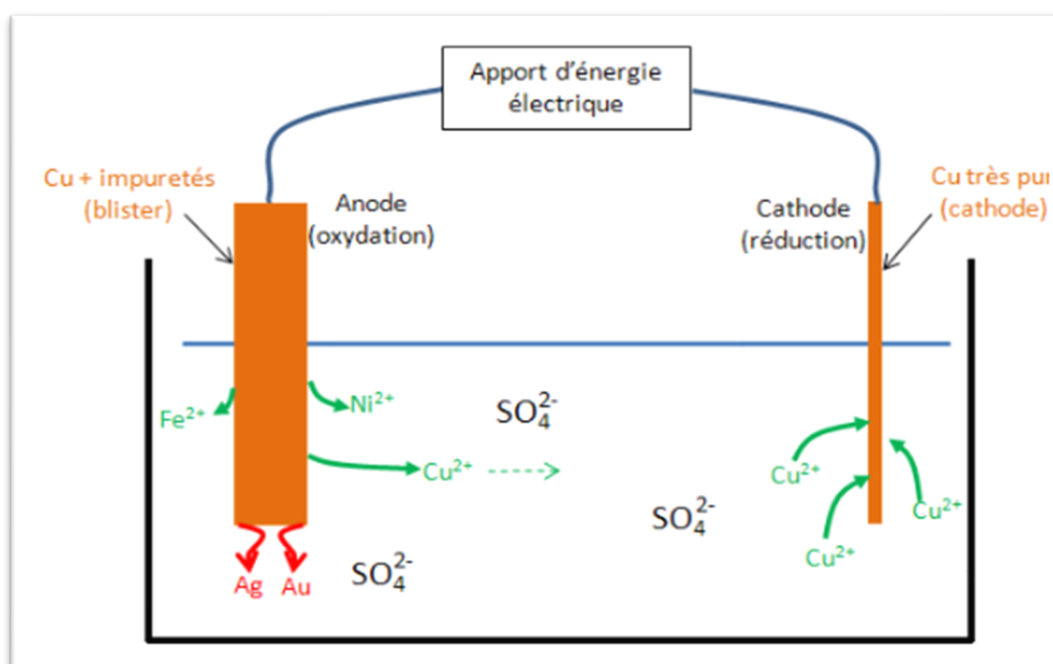


Figure II.2. Schéma du procédé d'anode soluble

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 des éventuelles inclusions d'électrolyte résultant du procédé. Les cathodes électrolytiques obtenues sont donc

généralement refondues. Contrairement à l'affinage thermique réalisé sur la coulée pour le traitement des déchets riches en cuivre [53].

II.2.3. 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 éliminer 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 de 0,02 à 0,04% d'oxygène et un peu d'hydrogène, et qui, de ce fait, n'a que peu d'applications dans l'industrie [54].

II.2.4. Autres méthodes d'élimination des impuretés (telles que l'évaporation et la sublimation).

Tout métal extrait de son minerai est généralement impur par nature. Ce métal impur extrait et appelé métal brut. Le raffinage est une méthode qui permet de retirer les impuretés afin d'obtenir des métaux de haute pureté. Les impuretés sont éliminées du métal brut par diverses méthodes basées sur les propriétés du métal et celles des impuretés. Voici quelques méthodes utilisées pour la purification du métal brut :

II.3. Évaluation de l'impact des méthodes d'élimination des impuretés sur la qualité 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 [55,56]. 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 [57,58,59,60].

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 arsénato-antimoniques (AAAc), qui peuvent ensuite réagir avec As(III), Sb(III) et Bi(III) pour former des arsénato-antimonates [55,60]. As(V), Sb(III) et Bi(III) peuvent former des arsénates [61], et Sb(V) joue un rôle substantiel dans la formation des boues flottantes [9,10,11], qui sont des composés amorphes et chimiquement indéfinis pouvant contenir Sb(III), Sb(V), Bi(III), As(V) et As(III) [62,63]. Les boues flottantes sont

généralement évitées en contrôlant la concentration totale d'antimoine dans l'électrolyte en dessous de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ [63] en maintenant la concentration d'arsenic dans l'électrolyte au-dessus de $6-7 \text{ g L}^{-1}$ et un rapport molaire $\text{As}/(\text{Sb}+\text{Bi})$ supérieur à $1,5-2$ dans les anodes [64].

D'autres techniques ont été proposées pour contrôler les concentrations d'antimoine dans les électrolytes de cuivre, y compris la précipitation [65], l'adsorption [66,67] 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 [68], bien que les concentrations de ces éléments puissent augmenter en raison de la forte teneur en impuretés des anodes de cuivre [69]. Les résines utilisées sont généralement des résines chélatantes, 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 [70].

II.3.1. Effet des méthodes d'élimination des impuretés sur la structure cristalline du cuivre.

La méthode d'élimination des impuretés affecte directement la structure cristalline du cuivre. En éliminant la plupart des impuretés, [71] le raffinage électrolytique peut obtenir du cuivre de haute pureté avec des grains plus uniformes et plus réguliers, améliorant ainsi la conductivité électrique et thermique [72]. Le travail thermique et le recuit des métaux favorisent la recristallisation et la croissance de grains plus gros, augmentant ainsi la ductilité mais réduisant éventuellement la dureté. Le traitement de désoxydation élimine les inclusions d'oxyde et rend la structure cristalline plus uniforme et plus solide. [73,74]. En bref, ces procédés améliorent la pureté du cuivre, réduisent les défauts de réseau et optimisent ses propriétés mécaniques et électriques.

CHAPITRE III

GROUPE INDUSTRIEL SIDI BENDEHIBA

La majorité de nos industries sont basés sur le pétrole vu que l'Algérie est un pays pétrolier, mais pendant ces dernières années notre pays a connu une révolution industrielle, spécialement dans le secteur privé et parmi les plus remarquables industries on a le groupe industriel SIDI BENDHIBA et ses filiales.

Le groupe est convaincu que prendre soin de sa clientèle est le meilleur moyen d'atteindre ses propres objectifs c'est pourquoi il a pour ambition d'aider ses clients à réunir les quatre conditions essentielles dans le secteur d'énergie : efficacité, fiabilité, sécurité et le respect de l'environnement. L'objectif de ce chapitre, est de présenter les principaux concepts de l'un des filiales du groupe GISB où on a fait le stage c'est LA CABLERIE ALGERIENNE qui est classée parmi les plus importants dans la production des câbles électriques.

1. Présentation de l'entreprise La Câblerie Algérienne

Est une marque du Groupe Industriel Sidi Bendehiba spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des fils et des câbles électriques BT/MT/HT/THT, c'est une excellente entreprise en constante évolution et harmonie avec exigences qualité de ses clients, utilise les technologies les plus récentes dans son domaine lui permettant de mettre leurs dispositions des produits de haute performance. La Câblerie Algérienne, est devenue un leader et un partenaire incontournable dans l'industrie du câble. Malgré une forte concurrence internationale, l'entreprise dispose d'atouts et de spécificités qui lui permettent de conserver une place importante sur le marché.

1.1 Le Groupe Industriel Sidi Bendehiba (GISB)

Est un conglomérat diversifié situé dans la zone d'activité de Mesra, dans la wilaya de Mostaganem. Tirant parti de son emplacement stratégique, GISB bénéficie de la proximité du port de Mostaganem, à seulement 15 minutes de distance. Actif dans le secteur de l'énergie depuis 2009, le groupe est principalement structuré autour de la Câblerie Sidi Bendehiba (CSB), spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de câbles électriques de haute qualité, répondant aux exigences des marchés nationaux et internationaux.

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 une superficie de 113000 m².

1.2 Localisation de l'entreprise

OUNDOUS GISB-LA CABLERIE ALGERIENNE diversifié implanté dans la zone d'activité de Mesra, Wilaya de Mostaganem. GISB à profiter d'avantages géographiques une implantation dans une ville portuaire à proximité du port de Mostaganem (23 mn :17Km) et du port d'Oran (01Hr15min : 93Km).



Figure 11 : localisation de GISB

1.3 Fonctionnement et produits

La Câblerie Algérienne Sidi Bendehiba est une entreprise industrielle spécialisée dans la fabrication de divers types de câbles. Une large gamme de câbles certifiés et homologués est conçue pour répondre aux besoins spécifiques de tous nos clients, quelle que soit leur demande.

Grâce à une importante capacité de production, à une logistique efficace et à un service après-vente de qualité, l'entreprise reste fidèle à ses valeurs et à son engagement envers la satisfaction de ses clients.

Les différents câbles produits par la Câblerie Industrielle Sidi Bendehiba sont les suivants :

- ✓ Câbles basse tension (BT) domestiques : comprenant deux catégories, les câbles rigides et les câbles souples.
- ✓ Câbles BT aériens de distribution et de branchement : incluant des torsades de distribution et des torsades de branchement.
- ✓ Câbles de commande.
- ✓ Câbles industriels.

1.4 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

1.5 Organigramme






Figure 12 : Organigramme de l'organisation de l'entreprise.

1.6 Normes relatives au cuivre

- **NF EN 1652** (indice de classement français A 51-201) : plaques, tôles bandes et disques pour usages généraux.
- **NF EN 1654** (indice de classement français A 51-203) : bandes pour ressorts et connecteurs.
- **NF EN 1057** (indice de classement français A 51-120) : tubes ronds sans soudure en cuivre Pour l’eau et le gaz dans les applications sanitaires et de chauffage.
- **NF EN 1977** (indice de classement français A 51-118) : fil machine en cuivre.
- **NF EN 12166** (indice de classement français A 51-304) : fil pour usages généraux.

1.7 Les services de l’entreprise

LES SERVICES		
<p>Laboratoire d'essais et de contrôle qualité</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Tests de conformité -Essais électriques -Tests mécaniques -Tests environnementaux
<p>R&D (Recherche et Développement)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Innovation produit -Amélioration des performances -Développement de matériaux
<p>Conseil en normalisation et certification</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Formation des techniciens -Certification de compétence

<p>Assistance technique sur site</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Audit de câblage -Supervision d'installation -Maintenance préventive
---	--	---

2. Processus de production LA CABLERIE ALGERIENNE

Est dotée de deux sites pour fabriquer des câbles électriques :

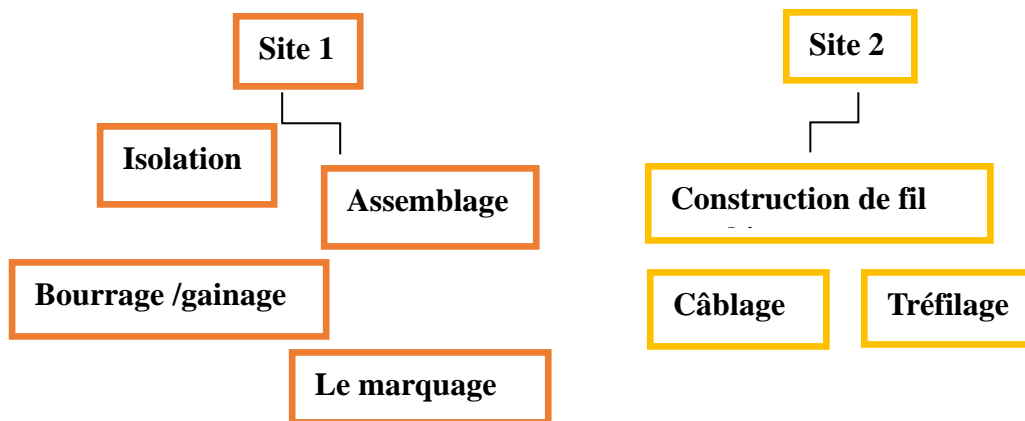


Figure 13 : Processus de production des câbles électriques.

3. Le Procédés de fabrication d'un Câble électrique

Un câble électrique est constitué de trois éléments nécessaires :

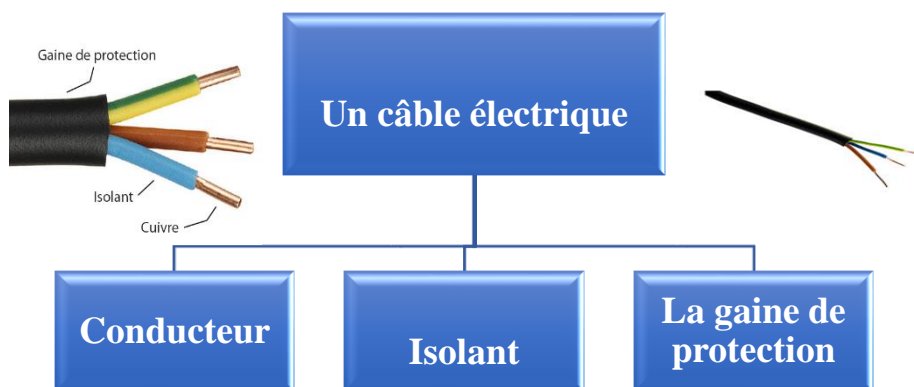


Figure 13 : Constitution d'un câble électrique : les trois éléments essentiels

3.1 Traitement de la matière première pour la fabrication d'un câble électrique

Le processus de fabrication d'un câble électrique commence par le traitement des matières premières, qui sont principalement le cuivre, l'aluminium, ainsi que les matériaux isolants. Voici les étapes principales

Description de procédé de site 2 :

La fusion du cuivre secondaire utilise des procédés pyrométallurgiques. Après la réception des déchets du cuivre, on fait un traitement (séparation et classification). Ensuite on met des quantités du cuivre dans la presse pour former des cubes de cuivre (compactage) à placer dans le four qui a une température de fusion entre 1200 °C et 1250°C pour faire fondre ces cubes et purifier les impuretés. Durant la fusion on ajoute des pièces de verre qui deviennent une pâte qui ramasse les impuretés légères et on ajoute aussi des troncs d'arbres pour diminuer le taux d'oxygène. Le cuivre liquide sortira par un chemin vers un laminoir où il se refroidira et solidifiera pour réduire son diamètre et obtenir un fil de machine à 8

Si un haut-fourneau est utilisé, ce cuivre est chargé dans un convertisseur où la pureté est ajustée à environ 80-90%, puis dans un four à réverbère où l'on peut atteindre une pureté du cuivre de l'ordre de 99%. Dans ces fours d'affinage, un fondant est ajouté au cuivre et de l'air est insufflé par le haut, afin d'oxyder les impuretés.

Après un système de refroidissement on obtient le cuivre en forme de lingot. Cette forme sortie pour être tréfilée dans un laminoir afin d'être amenée pour obtenir un conducteur de diamètre 8mm.



Figure 14 : Four de Fusion

3.2 Tests Avant la Coulée du Cuivre

a) Taux d'Oxygénation

Pour mesurer le taux d'oxygénation du cuivre, nous utilisons un analyseur d'oxygène. Si le pourcentage d'oxygène (O₂) dans le cuivre est trop élevé, il est nécessaire de procéder à un

dégazage. Pour ce faire, nous ajoutons des composants à base de carbone, tels que des troncs d'arbres, afin de réduire la concentration d'oxygène.

b) Composition Chimique du Cuivre

Pour analyser la composition chimique du cuivre, ainsi que le pourcentage de chaque élément et des impuretés, nous utilisons un spectrophotomètre. Cet appareil réalise une analyse spectrale, permettant d'obtenir des informations précises sur la composition du cuivre.

c) Tests Après le Laminoir

Après le passage du cuivre dans le laminoir, un échantillon de 1 mètre de fil est prélevé pour effectuer plusieurs contrôles :

1. **Poids** : Mesurer le poids de l'échantillon pour s'assurer qu'il respecte les spécifications requises.
2. **Calcul du Diamètre** : Le diamètre du fil est calculé à l'aide d'une formule appropriée, garantissant que les dimensions sont conformes aux normes.
3. **Résistance Électrique** : Cette grandeur physique mesure l'opposition qu'un élément dans un circuit électrique (qu'il s'agisse d'un composant ou d'un fil) oppose au passage du courant. Elle est exprimée en ohms (Ω).
4. **Résistivité** : La résistivité d'un matériau indique sa capacité à résister à la circulation du courant électrique. Elle est définie comme la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section, exprimée en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$).
5. **Conductivité Électrique** : La conductivité est l'inverse de la résistivité. Pour un matériau homogène, la conductivité est égale à la conductance d'un conducteur cylindrique fait de ce matériau, divisée par sa section, puis multipliée par sa longueur.
6. **Résistance à la Traction** : Cette mesure évalue la capacité d'un matériau à supporter des charges et des forces sans se rompre, même en cas de concentration de contraintes ou de déformation.
7. **Allongement à la Rupture** : Noté A%, l'allongement à la rupture est une caractéristique sans dimension qui définit la capacité d'un matériau à s'étirer avant de se

3.3 Description de la production au niveau du site 2

La production sur le site 2 comprend plusieurs étapes clés visant à assurer une fabrication efficace et de qualité. Elle commence par la réception des matières premières, suivie de leur traitement et de leur préparation en vue des différentes opérations de transformation. Les processus de production sont rigoureusement contrôlés, avec un accent particulier sur le respect des normes de sécurité et de qualité.

1. Première étape : le tréfilage

Il s'agit d'une opération destinée à réduire progressivement le diamètre du fil, à l'aide d'une succession de filières diamant de plus en plus petite. Ainsi, le fil est travaillé jusqu'à obtenir le diamètre final souhaité. La vitesse d'étirage de cette machine est de 31,5 m/s.

Le tréfilage est un procédé de mise en forme à froid qui consiste à réduire progressivement, sous l'action d'une traction continue, le diamètre d'un fil machine [Cuivre (8 mm), Aluminium/Almélec (9.5mm.)], à travers des outils appelés << filières >>. Dans une machine de tréfilage multi- passes, le fil est tiré, entre chaque filière, par des cabestans. Le fil, les filières, et les cabestans sont complètement arrosés dans un bain d'émulsion (huile/eau ou huile) qui joue le rôle de lubrifiant et d'échangeur thermique. D'un point de vue mécanique, l'étirage d'un fil provoque une déformation plastique du matériau conduisant ainsi à une modification générale de ses propriétés mécaniques, c'est pour ça qu'on utilise le recuit (en cas de cuivre). 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. Tel que Les fils en almélec à un traitement thermique au four pour but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques (ductilité).

Le passage du fil par la première filière se fait manuellement via une appointeuse, le bout du fil est chauffé Les échantillons étudiés ont subi une déformation effectuée en plusieurs passes par la tréfileuse à glissement horizontale. La lubrification au cours du tréfilage est faite avec un mélange d'eau et d'huile.



Figure 15 : Machine de tréfilage de fil machine

La figure 16 ci-dessous montre le principe général du fonctionnement du tréfilage.

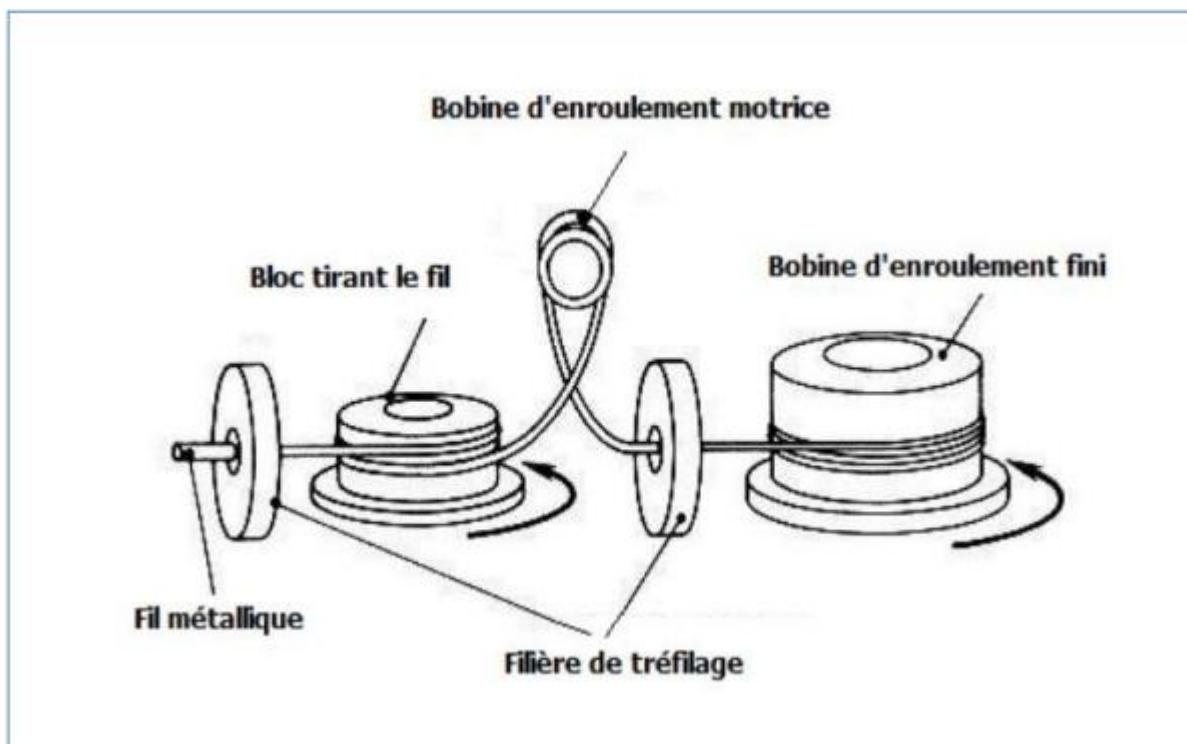


Figure 16. Principe du tréfilage [3].

Le cuivre arrive du four de l'usine dans de grandes bobines de 5 tonnes. Ce cuivre de 8 mm de diamètre est appelé techniquement « fil machine ».

Le fil machine est enroulé sur un ou des cabestans, qui, par frottement, exercent une traction sur le fil. Le fil passe dans une filière, en amont du cabestan, qui impose au fil une déformation par réduction de section. La filière est abondamment lubrifiée, pour assurer le maintien d'un bon état de surface du fil métallique et pour assurer le refroidissement et contrer l'échauffement provoqué par l'écroutissage du métal.

Dans la dernière étape du tréfilage fin, tous les fils sont soumis à un traitement thermique appelé recuit. Le but de cette étape est d'augmenter la ductilité et la conductivité du cuivre.

Les machines et outils utilisés

On citera l'ensemble du matériel de tréfilage permettant la transformation du fil machine en fil dit écroui (ou, dans l'ancienne appellation, clair) ; cette transformation nécessite en général trois éléments :

- Dispositif de dévidage du fil machine;
- Machine à tréfiler ;
- Dispositif de récupération du fil écroui [19].

A. Machines simples

Qu'elles soient simples ou multiples, les organes principaux des machines de tréfilage sont :

- les organes d'entraînement (moteur, boîtes de vitesses)
- les bobines d'enroulement
- les supports de filières ou mandrins précédés,

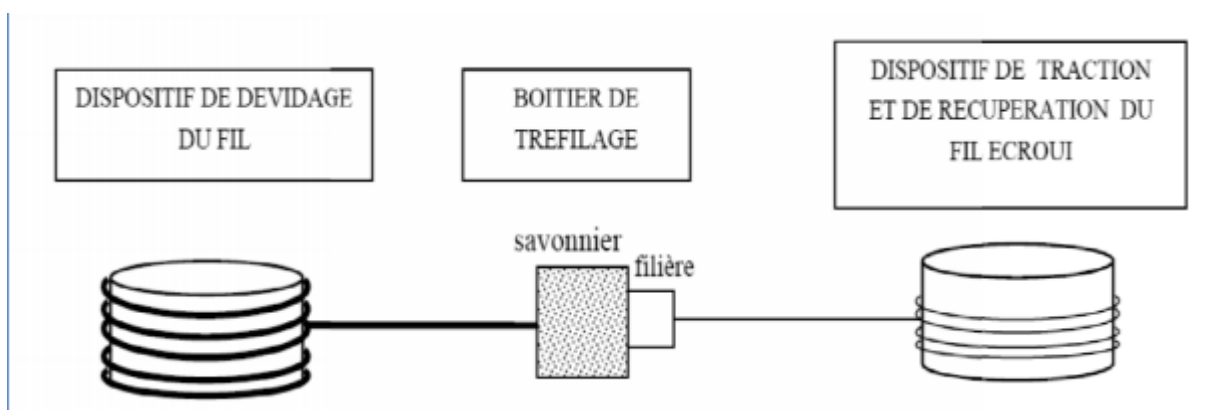


Figure V.2. Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple [13].

B. Machines multiples

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

On distingue trois types de machines multiples.

- Machines continues ou à passage direct
- Machines à accumulation
- Machines à glissement

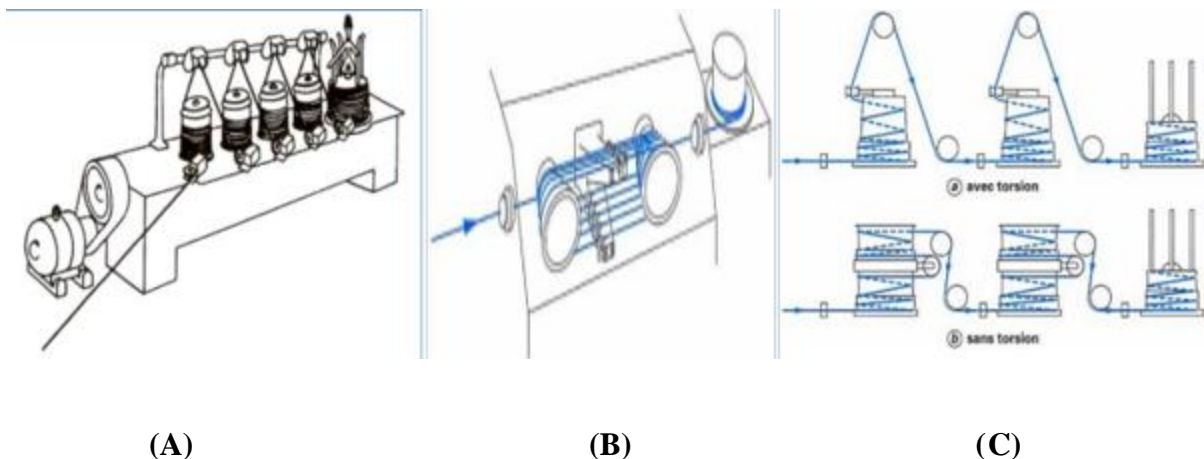


Figure 18. Machine multiple

(A) : Machines continues ou à passage direct

(B) : Machine multiple à glissement (à cône)

(C) : Dispositif d'accumulation du fil

Deuxième étape : Câblage

Est un 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'aluméc), à la fin de cette opération on vérifie le diamètre de câblage, le diamètre du conducteur, le sens de câblage, la résistance, le poids et le pas.



Figure 16 : Processus de câblage

Description de procédé de site 1 :

Après les trois étapes précédentes, on passe au Site 1 où on a quatre étapes pour fabriquer un produit fini.

1) Isolation

Le processus suivant dans la fabrication d'un câble électrique est l'isolation. Ici, nous allons poser un recouvrement isolant sur le conducteur afin d'éviter les fuites de courant. Les matériaux d'isolation peuvent être de différente nature : PVC, XLPE.

Le matériau isolant est posé directement sur le conducteur, formant une couche qui empêche le contact direct avec d'autres conducteurs ou objets extérieurs.

Voici des détails sur deux matériaux d'isolation couramment utilisés :

	PVC (Polychlorure de Vinyle)	XLPE (Polyéthylène Réticulé)
Propriétés	largement utilisé pour l'isolation des câbles en raison de sa flexibilité, sa résistance à l'humidité, et son coût relativement bas. Il est également résistant aux produits chimiques et possède de bonnes propriétés ignifuges	Contrairement au PVC, il ne fond pas sous l'effet de la chaleur, ce qui le rend idéal pour les applications à haute température.
Applications	Il est souvent utilisé pour les câbles basse et moyenne tension, notamment dans les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels.	Utilisé dans les câbles moyenne et haute tension, ainsi que dans des environnements où des températures élevées sont courantes.
Températures	Il peut supporter des températures allant de -15°C à environ 70°C, ce qui le rend idéal pour les environnements standard.	Le XLPE peut supporter des températures de fonctionnement jusqu'à 90°C, avec une tolérance jusqu'à 250°C pour de courtes périodes en cas de surcharge.
Avantages	Faible coût, bonne résistance à l'humidité, flexibilité.	Excellente résistance thermique, capacité à supporter des tensions plus élevées, résistance à l'humidité et aux produits chimiques.
Inconvénients	Faible tolérance aux températures élevées et aux UV	Coût plus élevé que le PVC, moins flexible,

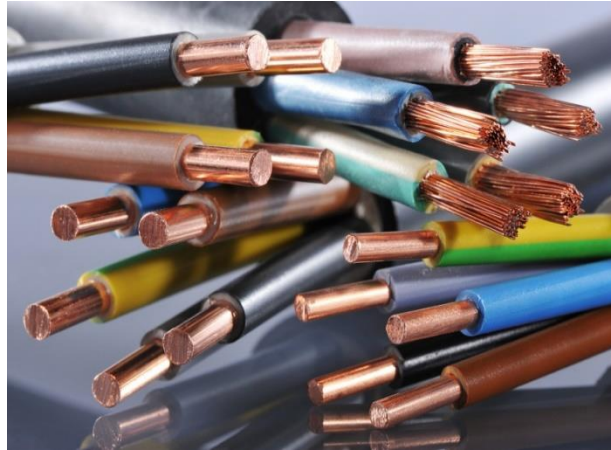


Figure : Isolation des câbles électriques.

2) Assemblage :

L'étape suivante consiste à assembler plusieurs câbles électriques isolés pour former un seul câble multiconducteur. Contrairement au processus précédent, il est possible d'assembler des câbles électriques de sections ou diamètres différents. Ce processus permet d'intégrer différents conducteurs en fonction des besoins spécifiques du câble final, que ce soit pour des raisons techniques ou économiques.

L'assemblage des câbles peut se faire par plusieurs méthodes, selon le type de câble :

- **Torsadage concentrique** : Les conducteurs sont enroulés en spirale autour d'un noyau central.
- **Assemblage parallèle** : Certains câbles sont assemblés parallèlement les uns aux autres sans torsion. Cela est typique pour les câbles à rubans ou les câbles plats.
- **Formation en faisceau** : Les câbles sont regroupés dans des faisceaux qui sont ensuite enveloppés d'une gaine protectrice.



Figure : Assemblage des câbles électriques.

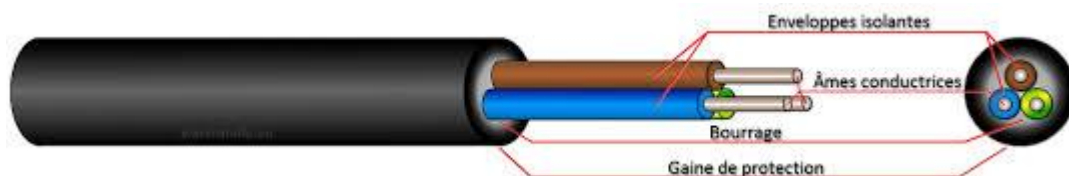
C. Bourrage et Gainage

Le bourrage a pour objectif principal de donner une forme ronde au câble assemblé. Cette étape est essentielle pour assurer une structure homogène et faciliter le gainage extérieur du câble. Une forme ronde améliore non seulement l'apparence finale du câble, mais également sa tenue mécanique et sa facilité de manipulation, que ce soit lors de l'installation ou du déroulement sur des bobines.

Lors de l'assemblage des conducteurs, il peut y avoir des espaces vides entre eux, surtout si les conducteurs ont des diamètres ou des sections différents. Le bourrage permet de combler ces espaces en insérant des matériaux de remplissage, généralement en polymère ou en matériaux similaires. Ce remplissage assure une forme régulière, souvent ronde, et évite les irrégularités qui pourraient affecter la performance du câble ou sa protection.

Les câbles portent un recouvrement polymérique extérieur pour leur protection ; Appelée gaine extérieure. Cette gaine protège les phases isolées du câble

La gaine extérieure est un élément clé dans la durabilité et la performance globale du câble. En plus d'assurer la protection contre les agressions extérieures, elle contribue également à la conformité du câble aux normes de sécurité électrique et mécanique. Une gaine mal conçue ou de mauvaise qualité pourrait entraîner des défaillances du câble, augmentant ainsi les risques d'accidents électriques ou de dysfonctionnements dans les installations.



FigureII.14. Processus de Bourrage et Gainage

D. Marquage

Pour que les clients de la Câblerie Sidi Bendehiba puissent identifier correctement les câbles, un marquage précis est appliqué sur chaque câble. Ce marquage inclut les informations essentielles telles que le nom du fabricant, la désignation du câble, le nombre de conducteurs, la section des conducteurs, ainsi que d'autres informations pertinentes, comme les normes de conformité, la tension nominale, ou encore la date de fabrication.

L'étape de Marquage	
Informations clés	Méthodes de marquage
Fabricant : Indique clairement la provenance du câble, garantissant aux clients qu'ils reçoivent un produit conforme à leurs attentes.	Impression thermique : Utilisée pour des câbles à revêtement en plastique, cette méthode permet une impression nette et résistante à l'usure.
Dénomination du câble	Gravure laser : Pour les câbles plus robustes ou destinés à des environnements difficiles, le marquage laser est privilégié, car il offre une durabilité accrue sans altérer la structure du câble.
Nombre de conducteurs et section	Jet d'encre : Un procédé courant qui permet un marquage rapide et efficace, particulièrement adapté aux grandes productions.
Tension nominale	
Marquage mètre par mètre	

Après les étapes d'isolation, de bourrage et de gainage, plusieurs tests sont effectués sur le câble pour garantir sa qualité et sa conformité aux normes. Ces essais incluent des vérifications visuelles et des analyses techniques.

Tests sur le câble :

1. Aspect visuel :

- Une inspection à l'œil nu permet de vérifier l'état général du câble, en s'assurant qu'il n'y a pas de défauts visibles tels que des fissures, des éraflures, ou des irrégularités sur la surface du câble.

2. Mesure de la section :

- La section de l'âme (conducteur), de l'enveloppe isolante et du câble complet est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Pour plus de précision, six mesures différentes sont effectuées, puis une moyenne est calculée.

3. Allongement résiduel :

- Ce test est réalisé après avoir soumis l'échantillon à un allongement sous charge. L'échantillon est placé pendant 15 minutes dans une étuve électrique, puis la charge est retirée. Après 5 minutes de repos, on mesure la longueur à laquelle l'éprouvette s'est rétractée. Ce test est effectué uniquement sur les câbles isolés avec du **XLPE** (polyéthylène réticulé).

4. Épaisseur :

L'épaisseur de l'enveloppe isolante, du bourrage et de la gaine est mesurée pour s'assurer que chaque couche respecte les spécifications techniques.

5. Allongement à chaud :

Un échantillon de l'enveloppe isolante en forme d'éprouvette (souvent en forme d'haltère) est placé dans une étuve électrique. Après avoir appliqué une charge, on mesure la déformation sous l'effet de la chaleur.

Tests sur la graisse :

Pour garantir la qualité de la graisse utilisée dans certains câbles (par exemple pour la lubrification ou la protection interne), plusieurs tests sont également réalisés :

1. Point de goutte :

Le test du point de goutte permet de déterminer à quelle température la graisse commence à fondre et à couler. Cela se fait à l'aide d'un appareil spécifique appelé testeur de point de goutte.

2. Pénétration :

Ce test, réalisé avec un pénétromètre, mesure la consistance de la graisse en déterminant la profondeur à laquelle une aiguille standard pénètre sous une charge donnée.

3. Séparation de l'huile :

Ce test permet d'évaluer la stabilité de la graisse. Une quantité de graisse est placée dans un bécher et on observe si l'huile se sépare du mélange, ce qui indiquerait une dégradation de la qualité du produit.

CHAPITRE IV

Résultats Et Discussions

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats obtenus après le traitement thermique de recristallisation ainsi que l'étude de la qualité du cuivre obtenu. Lors de mon stage au sein du Groupe Industriel Sidi Bendhiba (GISB), un échantillon de cuivre a été prélevé pour la réalisation des expériences. Dans ce travail, une analyse approfondie de la composition physique et chimiques du cuivre a été effectuée.

IV.1 Le traitement thermique de recristallisation

Pour le but d'améliorer les propriétés du cuivre et de restaurer la structure cristalline après déformation. Des échantillons de cuivre ont été soumis à différentes températures de traitement pour déterminer la température optimale de recristallisation.

Température d'utilisation	La température pendant le traitement thermique varie entre 1200°C et 1500°
Temps de traitement	Chaque échantillon est maintenu à température constante pendant 5 à 6 heures, puis refroidi lentement pour éviter des changements brusques dans la structure du matériau.
Four de fusion  Four réverbère de recyclage déchets de cuivre capacité 70 TONNES	Un four de fusion est un dispositif qui chauffe les déchets de cuivre jusqu'à leur point de fusion afin de les fondre. Ces fours utilisent généralement du gaz naturel, de l'électricité ou d'autres combustibles comme source d'énergie. Les fours de fusion sont généralement conçus pour être économes en carburant et faciles à utiliser afin de garantir un processus de fusion des déchets de cuivre efficace.

2. Four de Raffinage

Les fours de raffinage sont utilisés pour affiner la ferraille de cuivre fondue afin d'éliminer les impuretés et d'améliorer la pureté du cuivre. Ces fours peuvent utiliser différentes méthodes de raffinage, comme le raffinage par le feu, le raffinage électrolytique, etc., pour garantir que la qualité du produit final réponde aux exigences.

3. Équipement de refroidissement

Dans le processus de fusion et de raffinage, des équipements de refroidissement sont nécessaires pour contrôler la température et assurer la sécurité des équipements et de l'environnement de travail. Ces équipements peuvent inclure un système de refroidissement à eau, un système de refroidissement par air, etc., afin de réduire efficacement la température des équipements et des pièces.

4. Équipement de filtration

Dans le processus de raffinage, des équipements de filtration sont utilisés pour éliminer les scories et autres impuretés afin de garantir la pureté du produit final. Ces équipements de filtration peuvent être des tamis, des filtres, etc., qui permettent de séparer efficacement les impuretés et d'améliorer la qualité du produit.

5. Système de contrôle

Les équipements modernes de fusion et de raffinage de la ferraille de cuivre sont généralement équipés de systèmes de contrôle avancés pour surveiller et réguler les paramètres de fonctionnement des fours et des fours de raffinage. Ces systèmes de contrôle améliorent la productivité, assurent la sécurité des équipements et optimisent l'utilisation des ressources.

En utilisant ces installations avancées de fusion et de raffinage de la ferraille de cuivre, les producteurs peuvent recycler et réutiliser efficacement la ferraille de cuivre tout en garantissant la production de produits en cuivre de haute qualité, ce qui permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi de créer certains bénéfices économiques.

IV.2 La métallographie du cuivre et de ses alliages

Lors du traitement du cuivre et de ses alliages, la métallographie est généralement utilisée pour mesurer la taille des grains, ainsi que pour effectuer des contrôles de la pureté en

qualifiant et en quantifiant la teneur en oxyde de cuivre. Pour certains laitons, il peut être nécessaire de déterminer la répartition du plomb, car elle peut influencer le processus d'usinage.

Pour les alliages coulés, la métallographie est généralement utilisée pour l'évaluation de la structure générale, pour évaluer la répartition des eutectiques ou du plomb et pour évaluer la présence de cavités de retrait ou de porosité.

IV.3 PYRO-RAFFINAGE DU CUIVRE DE SECONDE FUSION

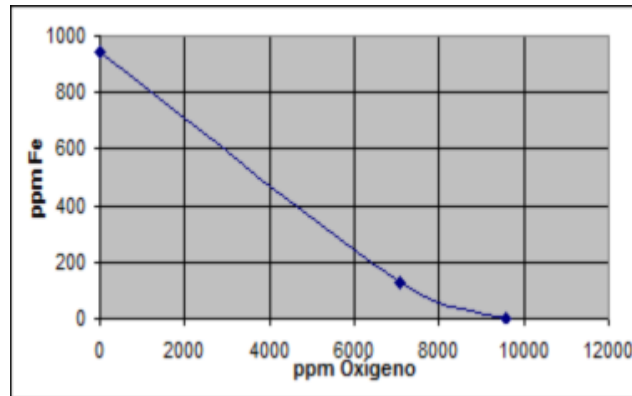
1. Chargement du four avec du cuivre de seconde fusion (tout venant et récupéré) par étapes en fonction de la progression de la fusion du bain.
2. Une fois que le matériau est fondu, vérification du niveau du bain de fusion du métal pour faciliter l'opération de décrassage et éviter le débordement.

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).

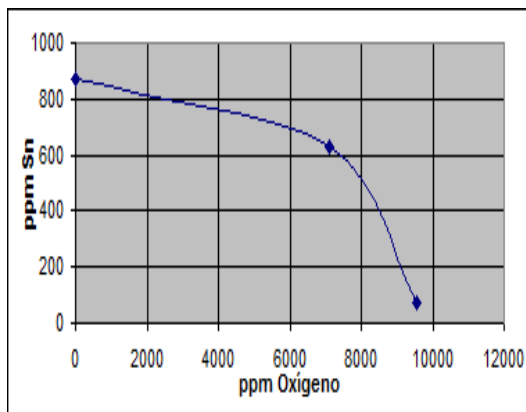
3. Par le biais des lances, on procède à l'étape d'oxydation on soufflant de l'air comprimé. Les brûleurs sont fonctionnels selon la température de fonctionnement (~1200°C)
4. Le temps d'oxydation et l'utilisation des lances dépendent des impuretés dans le bain de fusion:
 - Si les éléments résiduels appartiennent au premier groupe (Fe, Zn, Cd, Si, Al, Pb), avec la silice comme agent de décrassage, 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.

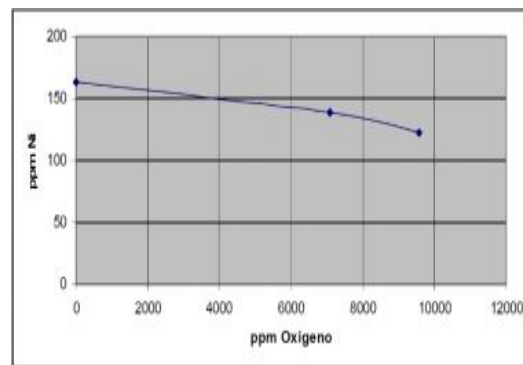
(A)



(B)



(C)



A : TENDANCES DES PREMIERS ELEMENTS DU GROUPE

B : TENDANCES DES DEUXIEME ÉLÉMENTS DU GROUPE

C : TENDANCES DES TROISIEMES ÉLÉMENTS DU GROUPE

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).

5. L'opération de réduction sera achevée une fois que la teneur en oxygène devrait atteindre 250 à 300 ppm.

IV.4 Analyse de la Composition Chimique

Pour évaluer la quantité de chaque élément chimique présent dans un échantillon et garantir un contrôle efficace des procédés et de la qualité, les ingénieurs du GISB utilisent des spectromètres d'émission optique à étincelles. Cet équipement permet de mesurer avec précision les concentrations de chaque élément chimique dans le matériau analysé.

Dans ce cadre, un échantillon de cuivre recyclé, provenant de déchets affinés localement, a été prélevé. Ce cuivre a ensuite été traité au sein du GISB, où il a subi divers procédés pour

améliorer sa qualité. L'analyse chimique réalisée sur cet échantillon a permis d'obtenir des données précises sur sa composition, essentielles pour assurer la conformité aux normes de qualité et optimiser les processus de production.

La teneur en cuivre du matériau étudié était de 99,45 %. Les impuretés présentes en concentrations plus élevées dans le matériau étaient l'Ag, le Bi, le Pb, le Se, l'O, l'As et le Ni, tandis que les impuretés en concentrations plus faibles étaient le Zn, le Sn, le Te, le Sb et le S. D'autres impuretés avec des concentrations inférieures à 20 parties par million (ppm) n'ont pas été prises en compte pour l'analyse.

Initialement, l'échantillon a été fondu à des puissances de fusion de 19,5 kW, 13 kW, 7 kW et 6 kW, et à des températures respectives de 1800, 1700, 1500 et 1460 K, sous un traitement unique.

Une installation EBM d'une puissance de 60 kW était équipée d'un creuset cylindrique en cuivre refroidi par eau d'un diamètre de 50 mm, d'un système d'extraction et d'un mécanisme d'alimentation en matière première pour mener les investigations relatives à la fusion du matériau techno génique de cuivre. Le spectromètre ARL 4460 OES Thermo Scientific avec un polychromateur à vide Paschen-Runge fonctionnant en atmosphère d'argon a été utilisé pour déterminer la composition chimique des échantillons avant et après la méthode EBM.

1.1 L'élimination des impuretés métalliques

L'élimination des impuretés métalliques du concentré de cuivre est étroitement liée à l'oxydation et à la dissolution des sulfures, y compris les sulfures de Cu, As, Mo et Zn. Les comportements de lixiviation de ces phases métalliques dans des conditions de lixiviation alcaline peuvent être efficacement prédits à l'aide de diagrammes thermodynamiques. Ces diagrammes illustrent la stabilité et la solubilité des différentes phases, permettant ainsi de comprendre comment ces éléments interagissent en solution. En analysant les conditions d'oxydation et de dissolution, on peut optimiser le processus de lixiviation pour maximiser l'élimination des impuretés tout en préservant la teneur en cuivre souhaitée. Les connaissances théoriques acquises grâce à cette approche facilitent le développement de stratégies de lixiviation plus efficaces et respectueuses de l'environnement dans le traitement du cuivre.

1. Les analyses de l'oxygène

Des échantillons de cuivre ont été effectués à l'aide d'un déterminateur d'oxygène/hydrogène ELTRA OH-900. La microstructure des échantillons de cuivre obtenus a été révélée à l'aide

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

d'une solution à 4 % d'acide nitrique dans de l'alcool éthylique. La solution a été appliquée pour attaquer les échantillons pendant une durée de 30 secondes.

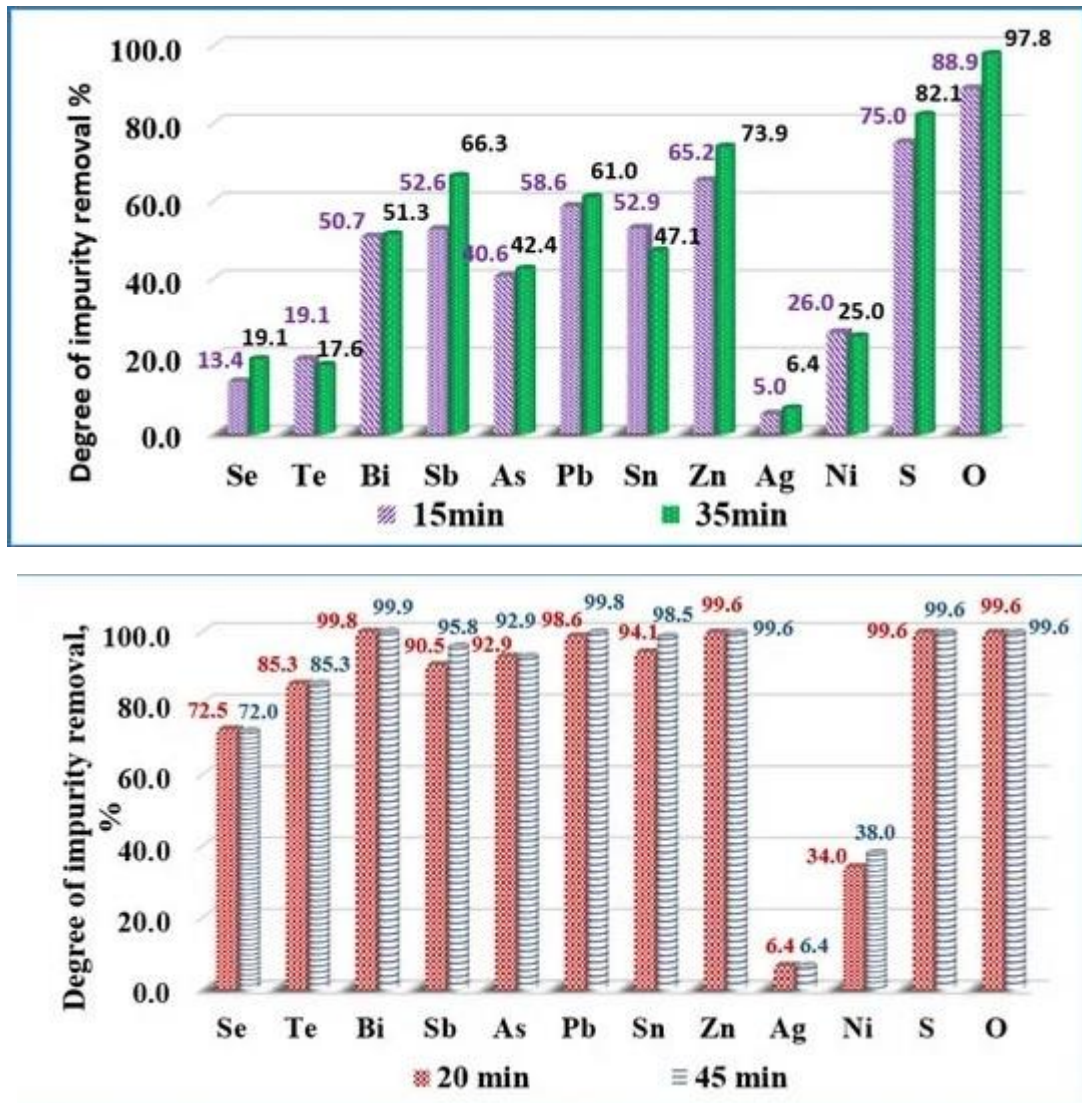


Figure IV.13 : L'influence du temps de fusion sur l'élimination des impuretés des matériaux techno géniques de cuivre à des températures : (en vert) T = 1500 K ; et (en rouge) T = 1700 K

Les observations ont indiqué qu'à 1700 K, le temps de rétention était de 20 min et 45 min, tandis qu'à 1500 K, le temps de fusion était de 15 min et 35 min. À 1800 K et 1460 K, le temps de fusion était de 25 min et 20 min, respectivement. Les impuretés métalliques telles que Sn, Sb, As, Zn, Pb et Bi ont complètement été transformées en état gazeux dans des conditions de fusion par faisceau d'électrons (EBM), atteignant un degré d'élimination presque de 100 %, tandis que Sb a atteint un degré d'élimination légèrement inférieur à 97 %.

Les impuretés non métalliques telles que O et S ont également atteint un degré d'élimination supérieur à 99 %. Cependant, le degré d'élimination de Te et S'était de 85,3 % et 73 %, ce qui est considérablement inférieur à celui des autres impuretés. Te et Se forment des composés inter-métalliques avec le cuivre, ce qui rend leur oxydation plus difficile, entraînant un degré d'élimination plus bas.

IV.2.1 Elimination par le dégazage



La solution mise en place à GISB consiste en une unité de dégazage à membrane de type MDU 2-8x80" avec 2 contacteurs et un débit progressif compris entre 5 et 20 m³/h. L'avantage à long terme de l'utilisation du MDU est l'amélioration de la qualité de l'eau dans le réseau de chauffage urbain ainsi qu'une réduction significative de la corrosion et donc moins de maintenance sur le réseau de transmission.

À l'aide d'un spectromètre dans le laboratoire du GISB, une analyse approfondie de la composition chimique de nos échantillons a été réalisée. Cette analyse a permis de quantifier les concentrations des différents éléments présents dans le cuivre. Les résultats obtenus, qui montrent les teneurs de chaque élément, sont présentés dans le tableau suivant.

Ces données sont essentielles pour évaluer la qualité du cuivre et déterminer l'impact des impuretés sur ses propriétés.

Tableau IV 6. Résultats du % d'impuretés le 01 septembre 2024

Composition	Arrivage(Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Echantillon (g)	0	0	0	0	0	0	0	0

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Chimique (%)	Valeur spécifique	Max(%)	....	0,005	....	....	....	0,001	....
	Valeur mesurée	(%)	0,013	0,3	0,02	0,0002	0,0001	0,003	0,05
Les éléments			Si	Mg	Cr	Te	As	Sb	Cd
Composition chimique (%)	Arrivage(Kg)		0	0	0	0	0	0	0
	Echantillon (g)		0	0	0	0	0	0	0
	Valeur Spécifie	Max(%)	....	....	....	0,0002	0,0005	0,0004	....
	Valeur Mesurée	(%)	0,0005	0,0001	0,0002	0,0003	0,0006	0,022	0,0004
Les éléments			Bi	Ag	Co	Al	S	Be	Zr
Composition chimique (%)	Arrivage(Kg)		0	0	0	0	0	0	0
	Echantillon (g)		0	0	0	0	0	0	0
	Valeur Spécifie	Max(%)	0,0001	0,002	...	....	0,0015	....	....
	Valeur Mesurée	(%)	0,002	0,004	0,0005	0,0003	0,0002	0,0001	0,0002
Les éléments			Au	Ti	Se	B	Pt	Cu	O
Composition chimique	Arrivage(Kg)		0	0	0	0	0	0	/
	Echantillon (g)		0	0	0	0	0	0	/
	Valeur Spécifie	Max(%)	....	....	0,0002	....	....	99,9	400ppm
	Valeur Mesurée	(%)	0,0005	0,0002	0,0004	0,0006	0,002	99,578	/

Le processus pyrométallurgie utilise principalement les différentes propriétés physiques des éléments ou ajoute des réactifs à la fonte à haute température pour séparer les impuretés. En fondant avec du concentré de cuivre, les cartes de circuits imprimés usagées (c'est-à-dire une partie des déchets d'équipements électriques et électroniques) ont été purifiées en utilisant la distribution différente des impuretés dans la matte et le laitier.

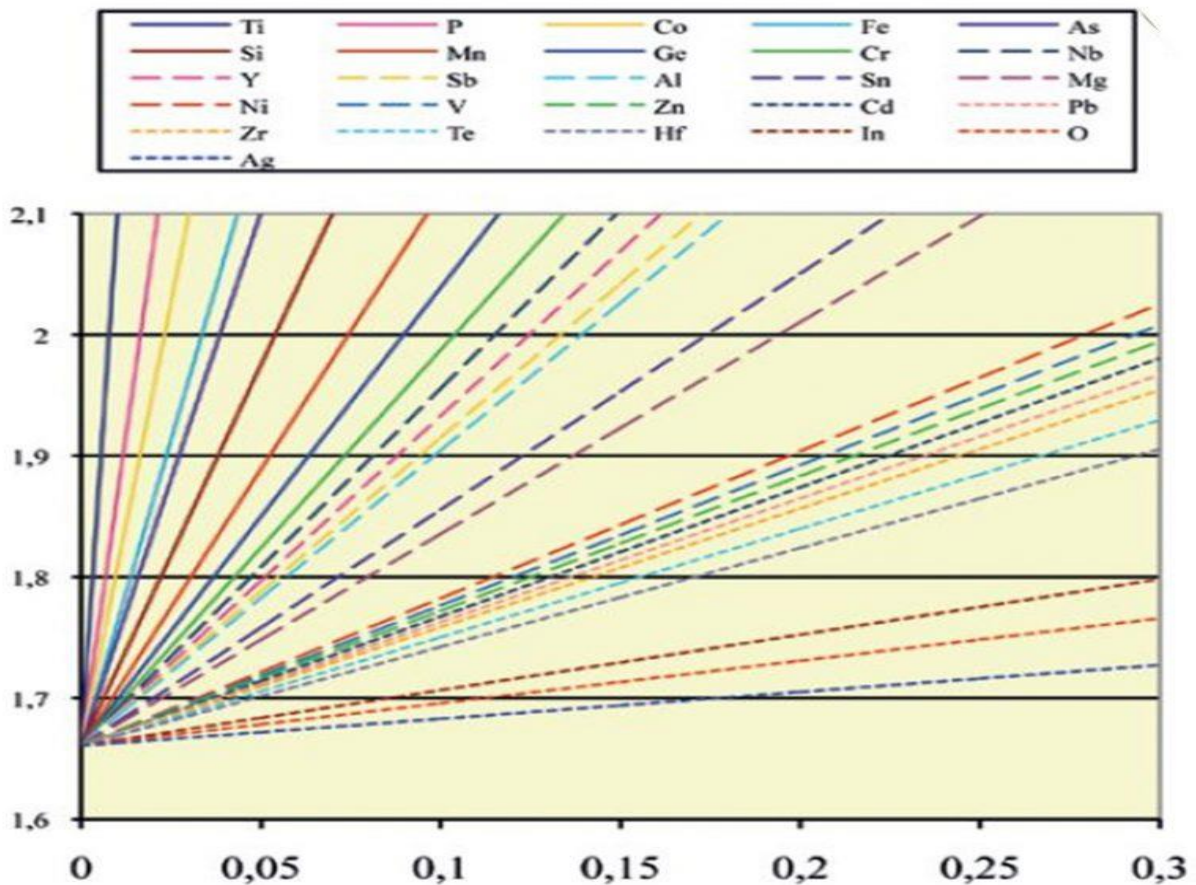


Figure IV.14 : Les éléments ayant les concentrations les plus élevées dans le métal cuivre

IV.5 Observation de la qualité

Qualité : mauvaise qualité

Cu+ Ag= 99,6%

Four réverbère (CSB) : Après 800 ppm d'oxygène et 4 paquettes des arbres.

D'après ces résultats on remarque que le pourcentage des impuretés suivants Zn, Pb, Sn, P, Fe, Ni, As et Sb est élevé par rapport la norme.

D'autre part on remarque aussi que le pourcentage de Cu = 99,57 est non conforme.

Puisque pourcentage de cuivre est non conforme, nous le traitons en ajoutant d'oxygène en utilisant les tuyaux d'air et les baquettes d'arbres.

- Si les éléments résiduels appartiennent au premier groupe (Fe, Zn, Cd, Si, Al, Pb), avec la silice comme agent de décrassage, 8000 ppm d'oxygène suffiront.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

- 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.

Tableau IV.7. Propriétés physiques, mécanique et électrique.

Propriétés physiques et chimique		
Propriétés	Valeurs	Valeurs mesurée
Restivité électrique	≤ 0.017241	0.017373
LACS (%)	≥ 100	100.39
Diamètre (mm)	8.00 ± 0.38	7.94
ASPECT	Lisse sans bravure	Sans
Oxygène (O ²)	≤ 400	/
Cu (%) + Ag	99.9%	99.77%

Propriétés mécanique		
Propriétés	Valeurs	Valeurs mesurée
Distance à la traction	≥ 200	241
Allongement a la rupture	≥ 30	34



Figure IV.15 : produit semi finale machine cuivre 8mm.

Conclusion

CONCLUSION

L'impact des impuretés sur la qualité du cuivre constitue un enjeu majeur dans l'industrie métallurgique, en particulier pour des applications exigeant une conductivité électrique élevée, comme dans les secteurs de l'énergie et de l'électronique. Les impuretés, même présentes à l'état de traces, peuvent avoir des effets variés et parfois contradictoires sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du cuivre.

Certaines impuretés, telles que l'argent (Ag), peuvent améliorer la conductivité électrique du cuivre lorsqu'elles sont présentes en petites quantités. Cependant, leur accumulation excessive peut entraîner la formation d'inclusions qui altèrent la malléabilité et augmentent la fragilité du matériau. D'autres éléments, comme le plomb (Pb), ont des effets nettement néfastes. Le plomb, en plus de réduire la conductivité électrique, dégrade les propriétés mécaniques du cuivre et pose des problèmes environnementaux et sanitaires. Sa présence est donc de plus en plus réglementée.

Les études montrent également que des impuretés telles que le fer (Fe), le nickel (Ni) ou l'oxygène (O) peuvent également modifier la structure cristalline du cuivre. Ces altérations augmentent la formation de défauts dans le réseau cristallin, influençant négativement la conductivité et la résistance à la corrosion. Certaines impuretés, en formant des solutions solides ou des précipités dans la matrice du cuivre, peuvent néanmoins renforcer le matériau, mais cela se fait souvent au détriment d'autres propriétés clés comme la ductilité.

En industrie, maîtriser la pureté du cuivre devient crucial pour répondre aux exigences de plus en plus strictes des marchés, notamment dans les secteurs de l'électronique de pointe et des infrastructures énergétiques. Les méthodes de purification doivent être perfectionnées afin d'éliminer efficacement les impuretés néfastes tout en conservant celles qui améliorent les propriétés souhaitées. Les techniques analytiques avancées, telles que la spectrométrie de masse et la diffraction des rayons X, sont aujourd'hui indispensables pour caractériser et contrôler ces impuretés à un niveau atomique.

Pour l'avenir, il est crucial d'investir dans la recherche sur de nouveaux procédés de purification et sur l'élaboration d'alliages de cuivre à haute performance qui exploitent les avantages de certaines impuretés tout en réduisant les effets néfastes des autres. L'optimisation du contrôle des impuretés dans le cuivre ouvrira la voie à des matériaux plus performants, mieux adaptés aux défis technologiques actuels.

CONCLUSION

En somme, la gestion des impuretés dans le cuivre est un domaine en pleine évolution, dont la maîtrise conditionnera la qualité des applications industrielles futures. Ce travail met en lumière la nécessité d'un contrôle rigoureux de la composition chimique du cuivre pour garantir des propriétés optimales, et ouvre la voie à des innovations dans les procédés de fabrication et de purification.

Références Bibliographiques

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] S. Arris « Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes », Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahras (2013).
- [2] **Cooksey D.** (1994). Molecular mechanisms of copper resistance and accumulation in bacteria. *FEMS. Microbiol. Rev.*14 :6 ; 381.
- [3] **Zander, jonathan.** Native_Copper_Macro_Digon. (6 juillet 2009) [photo] **In** : Wikipedia: Disponiblesur:http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lection_pr%C3%A9sidentielle_am%C3%A9ricaine_de_2008> (Consulté le 29/07/2020).
- [4] **BADÉ, Yves.** Cuivrage. Ingénieur Électrochimiste du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). Techniques de l'Ingénieur, 23 juillet 2024. © Techniques de l'Ingénieur. Tous droits réservés.
- [5] Isabey, H. (1933). La Chimie du Cuivre. Éditions Scientifiques.
- [6] Emsley, J. (2003). The Elements. 3rd ed. Oxford University Press.
- [7] Flemming, C. A., & Trevors, J. T. (1989). Microbial Influences on Metal Mobility and Application of Microbial Interactions. *Critical Reviews in Biotechnology*, 9(2), 169-195.
- [8] Alloway, B. J. (1995). Heavy Metals in Soils. 2nd ed. Blackie Academic & Professional.
- [9] Cotton, F. A., Wilkinson, G., Murillo, C. A., & Bochmann, M. (1999). Advanced Inorganic Chemistry. 6th ed. Wiley-Interscience.
- [10] ASM International (2004). *Metals Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 10th Edition. ASM International. ISBN: 978-0871703781.
- [11] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/cuivre/2-proprietes-du-cuivre/>
- [12] Atkins, P., & Jones, L. (2010). *Chemical Principles: The Quest for Insight*. 5th Edition. W.H. Freeman. ISBN: 978-1429239257.
- [13] **Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.** (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th Edition. Wiley. ISBN: 978-1119405498.
- [14] Yakoubi Ali. « Les alliages de cuivre Département de l'ingénieure Mécanique » Université Moustafa Ben Boulaide-Batna 2021.

[15] Ghomari. F : Cours science des matériaux de construction ; Département de génie civil, universités Aboubeker Belkaid Tlemcen.

[16] <https://scrapad.com/fr/blog/utilisations-du-cuivre-et-ses-proprietes/>

[17] Information on registered substances, ECHA (Europeanchemicalsagency), (2003).

[19] 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

[20] Rakhmetova, A. A., Alekseeva, T. P., Bogoslovskaya, O. A., Leipunskii, I. O., Ol'khovskaya, I. P., Zhigach, A. N. (2010). Wound-healing properties of copper nanoparticles as a function of physicochemical 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).

[21] J. Hérenguel, « Le cuivre et ses alliages, Métallurgie Spéciale », INSTN, Enseignement 3eme du cycle

[22] Ren, G., Hu, D., Cheng, E. W., Vargas-Reus, M. A., Reip, P., Allaker, R. P. (2009). Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *International Journal of Antimicrobial Agents* [en ligne], 33(6), 587-590. (Page consultée le 19/08/2020). Disponible sur : [http:// www. 10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004](http://www.10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004)

[23] Ruparelia, J. P., Chatterjee, A. K., Duttagupta, S. P., Mukherji, S. (2008). Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles. *Acta Biomateriale* [en ligne], 4(3), 707- 716. (Page consultee le 01/05/2020) Disponible sur: [http:// www. 10.1016/j.actbio.2007.11.006](http://www.10.1016/j.actbio.2007.11.006).

[24] D. Champman et T. Norris, « Copper for busbars », p.8, 2014.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [25] Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2015). *Essentials of Materials Science and Engineering* (4th ed.). Cengage Learning.
- [26] K.E. Mackay et G.A. Smith, « Trans. Inst. Min. Vol.75 », p.269, 1966.
- [27] J. Hérenguel, « Le cuivre et ses alliages, Métallurgie Spéciale », INSTN, Enseignement 3eme du cycle
- [28] J S Smart Jr. The effects of impurities in copper, Butts A (Ed) Copper, Rheinhold Publishing Corp NY 1954 Ch 19 pp4102.
- [29] **Saarivirta MJ. Behaviour and effect of Sulphur on Oxygen -Free High-Purity copper. Trans ASM 57, 1964 ppl33**
- [30] Parker, J. M., & Parker, J. D. (2003). *Bismuth: Applications and Properties*. Journal of Materials Science, 38(10), 2083-2090.
- [31] Grant, N. J., & Kelly, W. C. (1985). *Effects of Oxygen and Lead on the Mechanical Properties of Copper*. Journal of Metals, 37(5), 27-32.
- [32] <https://www.totalmateria.com/fr/proprietes/proprietes-du-cuivre/>
- [33] Archbutt et al Effects of impurities in copper British non ferrous metals research association Monograph 1937
- [33] H. Pops, J. Holloman, Wire Journal International, Vol. 5, p. 70 (1994).
- [34] **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.***
- [34] U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE AND THE NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **Corrosion and Metal Artifacts– A Dialogue between Conservators and Archaeologists and Conservation Scientists**, N.B.S. Special Publication 479, Washington (D.C.), U.S. Government Printing Office, juillet 1977 .
- [35] <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-des-materiaux/conductivite-thermique-des-metaux/>
- [37] <https://www.matweb.com/reference/copper-alloys.aspx>
- [38] Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 21, Issue 7, pp.1474-1478

- [39] D. Coutsouradis, E. Diderrich, J. Smets, G. Crocq, L. Pauwels, *Metallurgical Reports C.R.M.*, no. 39, 1974, p101.
- [40] J. Hong, Z. Hu, M. Probert, K. Li, D. Lv, X. Yang, L. Gu, N. Mao, Q. Feng, L. Xie, J. Zhang, D. Wu, Z. Zhang, C. Jin, W. Ji, X. Zhang, J. Yuan et Z. Zhang, « Exploring atomic defects in molybdenum disulphide monolayers », *Nature Communications*, vol. 6, 2015, p. 6293 ([PMID 25695374](#), [PMCID 4346634](#), [DOI 10.1038/ncomms7293](#), [Bibcode 2015NatCo...6E6293H](#), [lire en ligne \[archive\]](#))
- [41] Ehrhart P., *Properties and interactions of atomic defects in metals and alloys*, Berlin, Springer, 1991, volume 25 of Landolt-Börnstein, New Series III, chapter 2, p. 88
- [42] H.-J. Shin, J.-S. Park, H.-J. Kim, and K.-T. Kim, "Microstructural evolution and mechanical properties of a Cu-Ni-Si alloy during aging," *Materials Science and Engineering A*, vol. 288, no. 2, pp. 175-183, 2000. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00762-7.
- [43] A.L. Etter, S. Scherrer, A. Bertsch, M. Jordan, J.-M. Mathieu, and P. Hoffmann, "Laser micro-machining of copper thin films by UV picosecond and femtosecond laser pulses," *Scripta Materialia*, vol. 47, no. 4, pp. 305-310, 2002. DOI: 10.1016/S1359-6462(02)00138-3.
- [44] J.S. Smart, W.D. Nix, and W.E. King, "Creep behavior of copper," *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME)*, vol. 236, pp. 1339-1348, 1966.
- [45] Lévy F., *Physique et Technologie des Semiconducteurs, Traité des matériaux*, t. 18, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1ère éd., 1995.
- [46] <https://www.polytechnique.mg/these/RAMBELOARISON-Kanto-Manantsoa.pdf>
- [47] G.A. Smith, "Some aspects of precipitation hardening in copper alloys," *Journal of the Institute of Metals*, vol. 99, pp. 273-280, 1971.
- [48] <https://fastercapital.com/fr/contenu/Corrosion-du-cuivre---Comprendre-les-defis-et-les-solutions.html>
- [49] https://www.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-FR-5.French.PDF
- [50] Barton J., Guillemet C., *Le Verre, Science et Technologie*, EDP Sciences, 2005.
- [51] Elliott S., *The Physics and Chemistry of Solids*, Wiley, 1998.

- [52] Marucco J.-F., *Chimie des Solides*, EDP Sciences, 2004.
- [53] Smyth D.M., *The Defect Chemistry of Metal Oxides*, Oxford University
- [54] Collongues R., *La Non-Stœchiométrie*, Masson, 1971.
- [55] G.A. Smith, *J. Inst. Met.* 32 (1971) 99.
- [56] D. Coutsouradis, E. Diderrich, J. Smets, G. Crocq, L. Pauwels, *Metallurgical Reports C.R.M.*, no. 39, 1974, p. 73.
- [57] K. Feyaerts, P. Huybrechts, J. Schamp, J. Van Humbeeck, B. Verlinden, *Wire J. Int.* 11 (1996) 68.
- [58] C.-H. Pitt, P.L. Taylor, D.L. Van Wagoner, *Metall. Trans.* 10A (1979) 809.
- [59] I.L. Dillamore, W.T. Roberts, *Metall. Rev.* 10 (1965) 22.
- [60] H.-J. Shin, H.T. Joeng, D.-N. Lee, *Mater. Sci. Eng. A279* (2000) 244.
- [61] N. Brown, *Trans. Met. Soc. AIME* 221 (1961) 236.
- [62] W.-R. Hibbard, *J. Trans. AIME* 77 (1950) 581.
- [63] J. Grewen, *Z. Metallkunde* 57 (1966) 581.
- [64] H. Inoue, N. Inakazu, H. Yamamoto, *Proceeding of International Conference on Texture of Materials*, 1981, p. 591.
- [65] I.L. Dillamore, H. Katoh, *Met. Sci.* 8 (1974) 73.
- [66] P. Beck, H. Hu, *Recrystallization Grain Growth and Textures*, The American Society of Metals, Metal Park, Ohio, 1966, p. 393.
- [67] K. Pawlik, J. Pospiech, K. Lücke, *Texture Microstruct.* 14–18 (1991) 25.
- [68] V. Branger, M.-H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle, *Proceeding of 21st Risø International Symposium*, 2000, p. 257.
- [69] A.L. Etter, M.-H. Mathon, V. Branger, T. Baudin, R. Penelle, *Scripta Mater.*
- [70] K. Helming, *Mater. Sci. Forum* 363 (1994) 157.
- [71] M. Benyoucef, S. Jakani, T. Baudin, M.-H. Mathon, R. Penelle, *Mater. Sci. Forum* 27 (2004) 467.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[72] S. Jakani, M.-H. Mathon, M. Beyoucef, Ph. Gerber, T. Baudin, C.-H. DeNovion, J. Neutron Res. 12 (2004) 249.

[73] Ph. Gerber, Ph.D. Thesis, University Paris 13, Institut Galilée, France, 2002.

[74] R.-D. Doherty, I. Samajdar, C.T. Necker, H.E. Vatne, E. Nes, in: N. Hansen, D. Juul Jensen, Y.L. Liu, R.-B. Roskilde (Eds.), Proceeding of 16th Risø International Symposium on Material Science, 1995, p. 1