



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Matière

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière
Filière de Physique
Spécialité Physique des Matériaux

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Imene ABDOU
Ouarda FARHAT

Le : 20-9-2020

Etude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés de l'ENICAB Biskra

Jury :

Dr	Samira ZERMANE	M.C. « B »	Université Med Khider-Biskra	Président
Dr	Ghania BENCHABANE	M.C. « B »	Université Med Khider-Biskra	Rapporteur
Dr	Nawel BENYAHIA	M.C. « B »	Université Med Khider-Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019-2020

Dédicace

A mes parents

Aux êtres qui me sont les plus chers,
Devant tous les sacrifices que vous avez consentis pour moi, aucune dédicace ne
saurait exprimer la grandeur des sentiments que j'ai pour vous.

A ma sœur Nedjma,
A mes frères Ilyess, Housseem et Zineddine,

A ma chère tante Safia,

A toute ma famille,

A tous mes amis sans exception.

Imene ABDOU

Dédicace

Je dédie ce travail à :

L'être qui m'est le cher au monde, à celle qui a ou donné pour que je sois ce que je suis
aujourd'hui, **ma mère.**

Celui qui à fait tous on possible pour me voir réussir dans ma vie, **mon père.**

A Mon mari Sadam,

A ma sœur Romaïssa

A mon frère Khaled,

A tous la famille et les amis.

Ouarda FARHAT

Table des matières

Remerciements.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Etude Bibliographique

1. Introduction.....	4
2. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre.....	4
2.1. Propriétés physiques.....	4
2.2. Propriétés mécaniques.....	5
3. Déformation plastique des métaux.....	6
3.1. Généralités.....	6
3.2. Types de déformation.....	6
3.2.1. Déformation élastique.....	6
3.2.2. Déformation plastique.....	7
3.3. Mécanismes de déformation plastique.....	7
3.3.1. Déformation par glissement.....	7
3.3.2. Déformation par maclage.....	8
3.4. Ecrouissage.....	9
4. Procédé de tréfilage.....	10
4.1. Principe du tréfilage.....	10
4.2. Outils et équipements industriels du tréfilage.....	10
4.2.1. Fil machine.....	11
4.2.2. Filière	12
4.2.3. Lubrifiant.....	13
4.2.4. Conditionnement du fil tréfilé.....	14
4.3. Types de machines de tréfilage.....	15
4.3.1. Machine simple ou machine mono passe.....	15
4.3.2. Machines multiples.....	15
5. Recuit de restauration et de recristallisation après déformation à froid.....	16
5.1. Introduction.....	16
5.2. Restauration.....	17
5.3. Recristallisation.....	17
5.3.1. Etape de germination.....	18
5.3.2. Etape de croissance.....	19

5.4. Lois de la recristallisation.....	19
--	----

Chapitre II : Matériau étudié et Techniques expérimentales

1. Introduction.....	22
2. Présentation du matériau étudié.....	22
3. Préparation des échantillons.....	24
3.1. Découpage.....	24
3.2. Enrobage.....	24
3.3. Polissage.....	25
3.4. Attaque chimique.....	25
4. Traitement thermique.....	26
5. Techniques de caractérisations utilisées.....	27
5.1. Microscopie optique.....	27
5.2. Essais de traction.....	28
5.3. Mesure de la résistivité électrique.....	30

Chapitre III : Résultats et Interprétations

1. Introduction.....	33
----------------------	----

Partie 1 : Etude et caractérisation des fils de cuivre à l'état initial

2.1. Essai de traction.....	33
2.2. Mesure de la résistivité électrique.....	37
2.3. Analyse micrographique.....	39

Partie 2 : Etude et caractérisation des fils de cuivre à l'état recuit

3.1. Introduction.....	40
3.2. Essai de traction.....	40
3.3. Mesure de la résistivité électrique.....	44

Conclusion Générale.....	48
--------------------------	----

Références Bibliographiques.....	50
----------------------------------	----

Remerciements

Nous remercions en premier lieu **Dieu** le tout puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement et particulièrement notre encadreur Dr, **Ghania BENCHABANE**, Maitre de Conférences à l'Université de Mohamed Khider Biskra, qu'elle trouve ici l'expression de notre très cordiale gratitude pour les conseils, le soutien et les encouragements qu'elle nous a dispensé au cours de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt porté à ce mémoire :

Mme, **Samira ZERMANE**, qui nous a honorés par sa présence en qualité de président de jury.

Mme, **Nawel BENYAHIA**, qu'elle trouve ici notre sincère reconnaissance de bien vouloir accepté de juger le travail.

Nous remercions infiniment Mme **Amina LOUCIF**, ingénieur et responsable du laboratoire physique de l'Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB).

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **Zohair SIDI BRAHIM** et Monsieur **Zine Elabidine HOULLI**, ingénieurs de Laboratoire physique de l'ENICAB qui ont effectués le quasi totalité des prélèvements des échantillons en production et également pour leur apport lors de la réalisation des essais mécaniques de traction et des mesures de la résistivité électrique.

Nous sommes également très reconnaissantes à Monsieur **Ismail GATALA**, le responsable du Hall Technologique à l'université de Mohamed Khider BISKRA.

Nous remercierons aussi Monsieur **Farouk DJERADI**, ingénieur de Laboratoire d'Hall Technologique à l'université de Biskra, pour ses conseils et son aide et Monsieur **Boubaker TRIR**, pour son accueil au laboratoire de métallurgie de l'université de Biskra.

Nos vifs remerciements vont aux membres de laboratoire de physique à l'université de Biskra, particulièrement Madame **Saïda SGHIROU**, pour son apport lors de la réalisation des essais expérimentaux (préparation des échantillons, MO).

Nous n'oublions pas d'exprimer nos remerciements à tous les enseignants du Département de Sciences de la Matière, notamment les enseignantes de la spécialité de Physique des Matériaux et nos collègues de la promotion.

Nous souhaitons aussi remercier ici nos familles, nos parents, pour leur aide précieuse et leurs encouragements.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des figures

Figure I.1: Représentation schématique d'une macle.....	8
Figure I.2 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe).....	11
Figure I.3 : Lignes de tréfileuses pour Aluminium à L'ENICAB Biskra.....	11
Figure I.4 : Coupe de la filière.....	13
Figure I.5: Schéma d'une méthode de lubrification.....	14
Figure I.6 : Boite à savon (ENICAB Biskra).....	14
Figure I.7 : Déformation orientée du grain, (a) Grain avant écrouissage (b) Grain après écrouissage et (c) Grain recristallisé.....	17
Figure I.8: Différentes étapes de restauration d'un matériau déformé.....	18
Figure I.9 : Schéma de la recristallisation.....	18
Figure II.1: Fil machine et fils tréfilés de cuivre étudiés.....	22
Figure II.2: Les échantillons découpés.....	24
Figure II.3 : Echantillons coupés et enrobés.....	24
Figure II.4: Polisseuse mécanique de type PRESI MECAPOL P260.....	25
Figure II.5: Four de traitement thermique type WSU 100.....	26
Figure II.6: échantillons trempés à l'eau.....	26
Figure II.7: Microscope optique.....	27
Figure II.8: Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (ENICAB Biskra).....	28
Figure II.9 : Courbe de traction (matériau ductile).....	29
Figure II.10 : Dispositif de machine Résistomat de type 2303 bruster de l'ENICAB Biskra.....	31
Figure III.1 : Essai de traction du fil machine du cuivre à l'état initial.....	33
Figure III.2 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation des fils en cuivre à l'état initial.....	36
Figure III.3: Evolution de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation des fils en cuivre à l'état initial.....	36
Figure III.4: Evolution de la résistivité électrique des fils du cuivre en fonction du taux de déformation.....	39
Figure III.5: Evolution de la microstructure du fil en cuivre, a (fil machine $\epsilon = 0.00$ %), b fil fortement tréfilé à 88 %, c fil tréfilé à 88 % et recuit à 260°C pendant 30 minute.....	40

Figure III.6 : Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.....	42
Figure III.7 : Evolution de l’allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.....	42
Figure III.8: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation.....	43
Figure III.9 : Evolution de la résistivité électrique des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.....	46
Figure III.10 : Evolution de la résistivité électrique des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation ($\epsilon_1= 88.19 \%$, $\epsilon_2=95.16\%$, $\epsilon_3=97.15 \%$).....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales propriétés physiques des divers cuivres industriels non allié.....	5
Tableau I.2 : Principales propriétés mécaniques des divers cuivres industriels non allié.....	6
Tableau I.3 : Principaux systèmes de glissement observés.....	8
Tableau I.4 : Les systèmes de maclage pour différentes structures.....	9
Tableau I.5 : Energie de défauts d'empilement pour quelques métaux.....	9
Tableau I.6 : Classification des fils métalliques.....	12
Tableau II.1 : Composition chimique du fil de cuivre (massique %)......	22
Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du fil de cuivre [Fiche technique (ENICAB) Biskra].....	23
Tableau II.3 : Valeurs des taux de réduction des fils de cuivre tréfilés	23
Tableau III.1: Propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre fortement tréfilés à l'état initial.....	34
Tableau III.2 : Résultats des propriétés mécaniques des fils du cuivre fortement tréfilés de l'ENICAB de Biskra réalisés par des travaux ultérieurs.....	35
Tableau III.3: Propriétés électriques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre fortement tréfilés à l'état initial.....	38
Tableau III.4 : Résultats des propriétés électriques des fils du cuivre fortement tréfilés de l'ENICAB de Biskra réalisés par des travaux ultérieurs.....	38
Tableau III.5 : Résultats des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés et recuits à différentes températures.....	41
Tableau III.6 : propriétés électriques de fil machine et fils cuivre recuits et tréfilés avant et après le recuit.....	45

Introduction Générale

Introduction Générale

Le cuivre est le troisième métal le plus utilisé au monde après le fer et l'aluminium, et ce à cause de ces excellentes propriétés chimiques, physiques et mécaniques. Il est très utilisé dans le secteur de la construction et beaucoup plus particulièrement dans le matériel électrique et électronique, cette grande consommation est due essentiellement à sa grande conductivité thermique et électrique. A titre d'exemple, 95% des fils conducteurs d'un airbus sont en cuivre.

L'industrie de fabrication du fil a un grand intérêt économique en Algérie. Ceci se justifie et concrétise par l'installation de deux grandes entreprises de tréfilage à travers le territoire national. L'une, à Biskra « Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB) », spécialisée dans la fabrication des fils des différentes sections en aluminium et en cuivre, destinés à la fabrication des fils électriques; l'autre, à El-Eulma (Sétif) et portant le nom Tréfisoud qui produit des fils d'acier pour différentes utilisations industrielles (clôtures, baguette à souder...etc.) [1].

Le tréfilage est une opération nécessaire pour la production des fils électriques à différents diamètres. Au cours de ce processus, la mise en forme du matériau est réalisée par un mécanisme de déformation plastique. Le tréfilage est accompagné par la formation de défauts cristallins, tels que lacunes et dislocations, conduisant à l'élévation de la dureté, donc à l'augmentation de la résistivité, une caractéristique très importante pour la conductibilité et le rendement du câble [2].

L'étude de l'influence des traitements thermiques post-déformation sur des matériaux ayant subi une forte déformation revêt une importance toute particulière. En effet, de nombreux matériaux utilisés dans l'industrie subissent, après une mise en forme à froid, des traitements thermiques dont le but est d'éliminer ou d'atténuer les conséquences indésirables de l'érouissage préalable. On peut citer par exemple les recuits de détente, dont le but est de relaxer les contraintes résiduelles, ou les recuits de recristallisation, dont le but peut être d'adoucir de façon conséquente le matériau afin de le rendre apte à une étape ultérieure de mise en forme ou de réduire la taille des grains. De plus, la maîtrise de la stabilité thermique des pièces en service après une mise en forme à froid est capitale.

Notre choix s'est porté sur le cuivre pur, sous forme du fil machine et des fils tréfilés à différents taux de déformation, utilisés pour le transport de l'énergie et fournis par

l'ENICAB de Biskra. Les fils machine sont prise des rouleaux avant le tréfilage, et les fils tréfilés ont été collectés à la sortir de chaque filière, sur le banc de fabrication.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence combinée du taux de déformation par tréfilage à froid et de la température de recuit sur la microstructure et les propriétés mécaniques et électriques des fils du cuivre.

Ce mémoire débute par une introduction générale, où nous avons fait un bref passage sur les domaines d'applications du cuivre, et nous avons montré nos objectifs. Il comporte trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre présente un aperçu sur le cuivre et ces caractéristiques physiques et mécaniques, ensuite une étude bibliographique sur la déformation plastique et le recuit de recristallisation. Nous présentons également dans ce chapitre le procédé de tréfilage (principe, outils et équipements industriels, machines de tréfilage, ...).
- ❖ Le deuxième chapitre présentera le matériau étudié ainsi que les techniques expérimentales de préparation, de mesure et de caractérisations utilisées.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré aux principaux résultats expérimentaux et les interprétations associées. Ces résultats concernent deux états : les fils tréfilés avant et après recuit de recristallisation où nous nous sommes intéressés à l'évolution de la microstructure, les propriétés mécaniques et électriques de ces fils.

Enfin, une conclusion générale sera donnée pour présenter un bilan des résultats obtenus.

Chapitre I

Etude Bibliographique

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à un petit aperçu sur le cuivre et ses propriétés physiques et mécaniques, puis une étude bibliographique sur la déformation plastique des métaux et alliages métalliques, les différents types de déformation plastique et les mécanismes provoquant ce processus. Nous présentons également le principe de base du procédé de tréfilage, outils et équipements industriels du tréfilage ainsi que les différentes machines utilisées pour ce procédé. Nous présentons aussi les effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et microstructurales du matériau qui a été mise en forme.

2. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre

Le cuivre est un élément chimique de numéro atomique 29, sa masse atomique est 63,54 g/mol. Le cuivre est un métal rouge à cassure rose. La température de sa fusion est 1083 °C. Il a un réseau cristallin cubique à faces centrées à équidistance $a=3,6074 \text{ \AA}$. La densité du cuivre est de 8,94 g/cm³ [3].

2.1. Propriétés physiques

Le cuivre est le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité après l'argent, d'où son usage comme chaudière à évaporer, cuves, fils et câbles pour transport d'énergie électrique, enroulements de dynamos, ...etc. La conductibilité du cuivre est influencée par la température, les traitements mécaniques et les inclusions. Pour le cuivre pur, elle peut diminuer pour des températures de 100°C jusqu'à 78 % de sa valeur à 20°C, de même que la déformation à froid provoque des distorsions de réseau, ce qui diminue la conductibilité. Les distorsions peuvent être égalisées par un traitement thermique à 450°C de même que les inclusions agissent aussi dans le même sens. Le tableau I.1 regroupe les principales propriétés physiques des cuivres industriels non alliés.

Tableau I.1 : Principales propriétés physiques des divers cuivres industriels non alliés [4].

Élément			
Cu (M = 63,54, Z = 29)			
Propriétés physiques			
Enthalpie de fusion	211850 J/kg		
Température de fusion	1065° à 1083°C		
Coefficient de dilatation (en $10^{-6} K^{-1}$)	de -190° à 16°C	14,1	
	de 25° à 100°C	16,8	
	de 20° à 200°C	17,3	
	de 20° à 300°C	17,7	
Capacité thermique massique (en J/(Kg.K))	20°C	386	
	100°C	393	
	200°C	403	
	900°C	528	
Conductivité thermique (en W/(m.K))	20°C	400	
	100°C	385	
	200°C	381	
	300°C	377	
Conductivité électrique (%IACS)	(état recuit)	20°C	100 à 102,5
		100°C	76
		200°C	58
	(état écroui)	20°C	97
Résistivité électrique ρ (en $\mu\Omega.cm$)	(état recuit)	20°C	1,724 à 1,682
		100°C	2,27
		200°C	2,95
	(état écroui)	20°C	1,78

2.2. Propriétés mécaniques

Le cuivre est un matériau assez ductile et tenace, mais il est mou et de plus il présente une faible limite élastique. C'est pour cette raison que dans beaucoup de cas, on l'utilise sous forme d'alliages. Le cuivre est malléable à froid et s'écrouit facilement. Il se prête aisément au corroyage, mais son usinage est mauvais. A cause de sa grande ténacité, au cours du travail à froid, on doit procéder à un recuit pour faire cesser l'écrouissage, mais on peut également effectuer le travail à chaud de manière que le recuit compense l'écrouissage. Un fort retrait rend mauvaises, ses propriétés de fonderie. Le cuivre se prête bien au brasage et fendage à l'étain. Le cuivre à faible teneur en oxygène est plus élastique, il est le matériau principal de la fabrication des conducteurs de courant. La fluidité du cuivre fondu lui permettrait d'être facilement coulé, mais les soufflures (gaz dissous SO₂, CO₂, ...) inévitables, rendent l'opération difficile. Le cuivre peut être forgé et laminé vers 600°C, mais nécessite des recuits au rouge sombre avec un refroidissement à l'eau [5]. Le tableau I.2 regroupe les principales propriétés physiques des divers cuivres industriels non alliés.

Tableau I.2 : Principales propriétés mécaniques des divers cuivres industriels non alliés [4].

Propriétés mécaniques					
Etat de livraison	Symbole AFNOR	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	Allongement (A %)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	230	45	50
¼ dur	H11	190	270	25	80
½ dur	H12	250	300	14	100
¾ dur	H14	320	350	6	110
<p><i>L'état de recuit signifie 0% d'écroutissage : état AFNOR O</i> <i>¼ dur : 10% d'écroutissage : état AFNOR H11</i> <i>½ dur : 25% d'écroutissage : état AFNOR H12</i> <i>¾ dur : 50% d'écroutissage : état AFNOR H14</i> <i>R_{p0,2} limite élastique à 0,2% d'allongement</i> <i>R_m résistance mécanique</i></p>					

3. Déformation plastique des métaux

3.1. Généralités

On donne le nom déformation à la modification des dimensions et de la forme d'une substance sous l'action des forces appliquées. La déformation est provoquée par l'application des forces extérieures ou par des processus physiques et mécaniques variés, dont le corps est le siège (par exemple, modification du volume des cristaux isolés sous l'effet de transformation de phase ou du gradient thermique) [6].

3.2. Types de déformation

3.2.1. Déformation élastique

On appelle une déformation élastique une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimée. La déformation élastique ne provoque pas de modification permanente perceptible de structure et de propriétés du métal, la charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversible des atomes ou le pivotement des blocs de cristal. En traction d'un monocristal, les atomes s'éloignent l'un de l'autre, et en compression, ils se rapprochent. Un tel écart à partir d'un état d'équilibre compromet le bilan des forces d'attraction et de répulsion électrostatique. C'est pourquoi après la

suppression de la charge, les forces d'attraction et de répulsion remettent les atomes déplacés à l'état d'équilibre de départ et les cristaux reprennent leur forme et leurs dimensions initiales.

3.2.2. Déformation plastique

La déformation plastique des corps cristallins peut se produire grâce aux mouvements de défauts topologiques à 1 dimension, les dislocations. Ces perturbations unidimensionnelles de l'arrangement des atomes permettent le glissement de plans cristallins : à l'image d'un tapis qu'on déplace par création puis propagation d'un pli, il est énergétiquement plus favorable pour un cristal de se déformer en créant puis en propageant des dislocations en son sein. Un tel déplacement n'implique en effet à chaque étape que peu de liaisons interatomiques et nécessite donc moins d'effort qu'un glissement instantané et rigide d'une moitié du cristal sur l'autre [7].

Lorsque les contraintes tangentielles dépassent une certaine valeur (limite d'élasticité), la déformation devient irréversible. La suppression de la charge n'élimine que la composante élastique de la déformation, alors que la partie de la déformation plastique subsiste.

Dans les cristaux, la déformation plastique peut se produire par glissement ou maclage. Le glissement des parties isolées d'un cristal l'une par rapport l'autre se produit sous l'effet des contraintes tangentielles, lorsque ces contraintes atteignent une valeur critique déterminée [8].

3.3. Mécanismes de déformation plastique

Lorsqu'un matériau polycristallin est soumis à l'action d'une contrainte mécanique extérieure, une déformation plastique se produit. Celle-ci est générée principalement par un mécanisme de glissement des dislocations sur des plans cristallins précis et/ou par un maclage mécanique.

3.3.1. Déformation par glissement

Toutes les dislocations dans un matériau ne sont pas mobiles. Des analyses microscopiques d'échantillons déformés montrent d'ailleurs que les glissements de dislocations se produisent généralement dans des plans bien déterminés de la maille cristalline. En fait, les plans de glissement se révèlent presque toujours être les plans de plus forte densité atomique, et les directions de glissement les directions cristallographiques les plus denses. Le tableau I.3 présente quelques-uns des principaux systèmes de glissement observés.

Tableau I.3 : Principaux systèmes de glissement observés [7].

Structure cristalline	Plans de glissement	Directions de glissement
cubique faces centrées (c.f.c)	{111}	$\langle 110 \rangle$
cubique centré (c.c)	{110}, {112}, {123}	$\langle 111 \rangle$
hexagonal compact (h.c)	{0001}	$\langle 11-20 \rangle$

3.3.2. Déformation par maclage

Le maclage est l'opération qui amène une partie du cristal à être cisailée entre deux plans (qui vont former les interfaces avec la partie non déformée (figure I.1) [7].

Lors de la déformation par maclage les atomes subissent donc une translation par cisaillement du réseau parallèlement au plan de macle et selon une direction dite de maclage (tableau I.4) telle que le réseau maclé soit symétrique du réseau primitif par rapport au plan de macle.

Le maclage est un mode de déformation très important dans les matériaux dont le nombre de systèmes de glissement est réduit, par exemple ceux de structure hexagonale compacte.

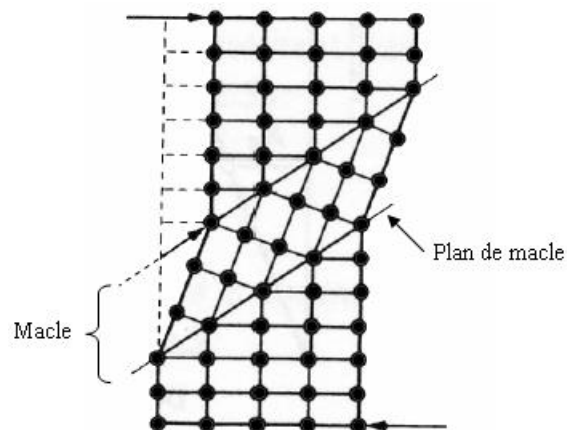
**Figure I.1:** Représentation schématique d'une macle.

Tableau I.4 : Les systèmes de maclage pour différentes structures [9].

Structure	Direction de macle	Plan de macle
CFC	$\langle 11\bar{2} \rangle$	{111}
CC	$\langle 1\bar{1}1 \rangle$	{112}
HC	$\langle 10\bar{1} \rangle$	{10 $\bar{1}2$ }

Le déclenchement d'un mécanisme ou de l'autre dépend de l'énergie de faute d'empilement du matériau. Dans les matériaux de structure c.f.c, la déformation plastique à froid s'effectue essentiellement par glissement des dislocations parfaites sur les plans denses {111} (nombre d'atomes par unité de surface plus élevé) et dans les directions denses $\langle 110 \rangle$ (distance interatomique la plus courte).

Ce mécanisme est majoritaire dans les matériaux à forte et moyenne énergie de faute d'empilement (aluminium $\sim 166 \text{ mJ.m}^{-2}$, cuivre $\sim 78 \text{ mJ.m}^{-2}$). Pour les matériaux à faible (argent $\sim 22 \text{ mJ.m}^{-2}$), le maclage mécanique (sur des plans {111} juxtaposés) surtout à basse température et le glissement des dislocations partielles concurrencent le glissement des dislocations parfaites.

Le tableau (I.5), donne des valeurs de (γ_{fe}) pour quelques métaux, elles varient considérablement suivant la méthode de mesure.

Tableau I.5 : Energie de faute d'empilement pour quelques métaux [10].

Métal	Al	Cu	Ag	Au	Ni	Co	An	Mg	Zr	Acier(340)
γ_{fe} (mJ.m^{-2})	166	78	22	45	128	15	140	125	240	21

3.4. Ecrrouissage

La déformation des métaux à température ambiante implique un écrrouissage, lequel est considéré parfois le seul moyen d'élever la limite élastique et la dureté du matériau, mais lorsqu'on dépasse un certain taux de déformation (taux critique), il peut présenter des inconvénients en causant la fragilité au métal. Le taux critique d'écrrouissage dépend essentiellement du matériau et des conditions d'emploi [11].

Une structure écrouie est caractérisée par des perturbations structurales ne se trouvant pas généralement en équilibre thermodynamique. Pratiquement une telle structure ne peut pas être adaptée à un usage industriel quelconque, car les propriétés d'emploi des métaux et alliages sont déterminés en très grande partie par la morphologie et le degré de dispersion des phases qui les constitue. Un apport d'énergie est nécessaire pour restaurer les propriétés et la structure que le métal possédait avant écrouissage [12].

4. Procédé de tréfilage

4.1. Principe du tréfilage

Le tréfilage est une technique de mise en forme à froid des métaux, permet d'obtenir des fils métalliques de section et de forme bien déterminée. Le principe du tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil ». Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant à faire passer le métal à travers un orifice calibre, appelé « filière » (qui peut être assimilée à un cône) sous l'action d'une traction continue, cette technique utilise l'aptitude à la déformation plastique du métal [13].

4.2. Outils et équipements industriels du tréfilage

Comme nous l'avons évoqué, le principe de tréfilage est basé sur la plasticité du métal pour réduire le diamètre du fil, la machine de tréfilage est appelée tréfileuse, l'ensemble du matériel principal de tréfilage comporte trois éléments :

- un dispositif de dévidage du fil.
- un boîtier de tréfilage.
- un dispositif de récupération du fil écroui.

Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant.

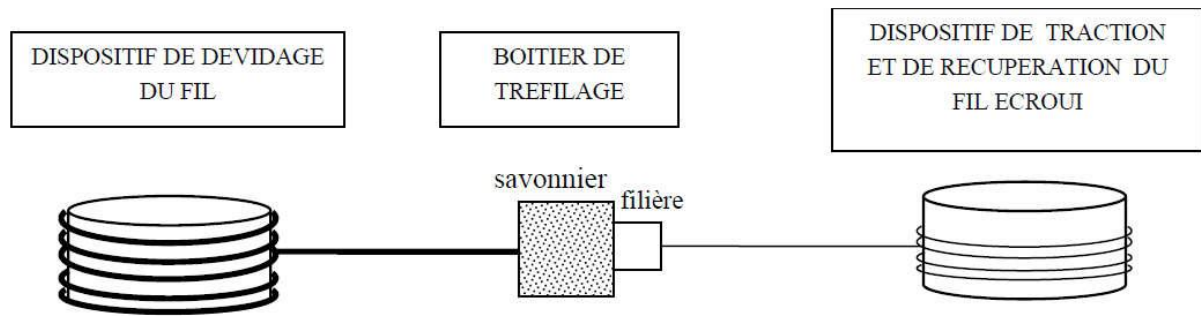


Figure I.2 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe) [14].



Figure I.3 : Lignes de tréfileuses pour Aluminium à L'ENICAB Biskra

4.2.1. Fil machine

Le matériau de départ utilisé, à l'ENICAB de Biskra, pour le tréfilage est appelé fil machine, de diamètre de l'ordre de 8 mm pour le cuivre et 9.5 mm pour l'aluminium et ses alliages. Le fil machine provient du laminage à chaud (la coulée en continue) et peut subir une préparation de surface : décapage et revêtement pour accentuer sa rugosité de surface et améliorer sa traficabilité. On note que les fils métalliques peuvent, en général, être classés en quatre catégories suivant leur diamètre (Tableau I.6).

Tableau I.6 : Classification des fils métalliques [15].

Dénomination	Diamètre en (mm)
Fil machine	Cuivre 8- Aluminium 9.5
Gros fil	1.63 à 5
Fil intermédiaire	0.40 à 1.63
Fil fin	0.10 à 0.40
Fil ultrafin	Inférieur à 0.10

4.2.2. Filière

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théoriques ou expérimentaux. Elles sont généralement en carbure de tungstène, tout au moins pour la portée de travail. Elles peuvent aussi être éventuellement en diamant, ou en céramique [16].

De plus, la filière est un bloc en général cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme que l'on désire du produit à tréfiler. Elle est composée de quatre parties (figure I.4) :

- Le cône d'entrée qui contribue à entraîner le lubrifiant dans la filière.
- Le cône de travail partie essentielle dans laquelle le métal subit sa déformation par compression.
- La portée, qui guide le fil après déformation.
- Le cône de sortie.

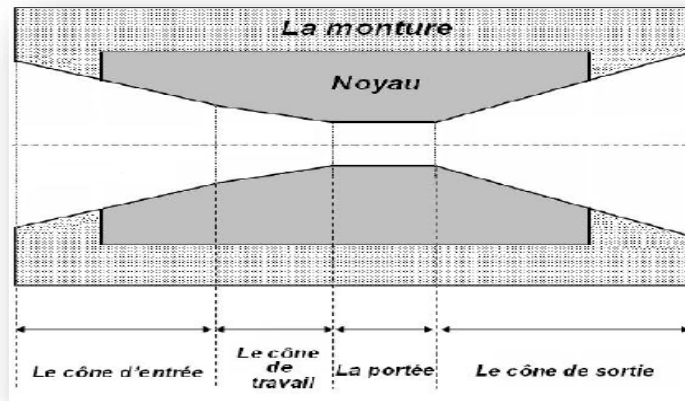


Figure I.4 : Coupe de la filière [17].

4.2.3. Lubrifiant

Le lubrifiant joue un rôle essentiel au cours du procédé de tréfilage étant donné les pressions très élevées que subit le fil lors de sa réduction.

Ses fonctions sont:

- De limiter les frottements entre le fil et la filière et ainsi diminuer les contraintes lors du tréfilage
- D'améliorer l'état de surface du fil.
- D'évacuer les éventuels déchets à l'entrée de la filière.
- De refroidir la filière pour éviter sa déformation thermique et réduire son usure pour parvenir à satisfaire toutes ces conditions il doit posséder une bonne résistance à la température et à la pression ainsi qu'une stabilité chimique dans le temps.

Le fil, les filières et les cabestans sont complètement immergés (ou arrosés) dans un bain d'huile (figure I.5) ou d'émulsion d'huile qui joue le rôle de lubrifiant et échangeur thermique.

Dans le cas de tréfilage à sec, ce sont des « savons secs métalliques » qui sont utilisés. Issus d'une réaction de saponification, les lubrifiants industriels sont en fait des mélanges complexes de matières grasses, de charges minérales, d'additifs variés et de produits réactionnels. Un bon lubrifiant est un savon qui favorise la formation d'un film superficiel suffisamment épais et homogène pour éviter toute interaction directe entre la filière et le fil (Figure I.6)

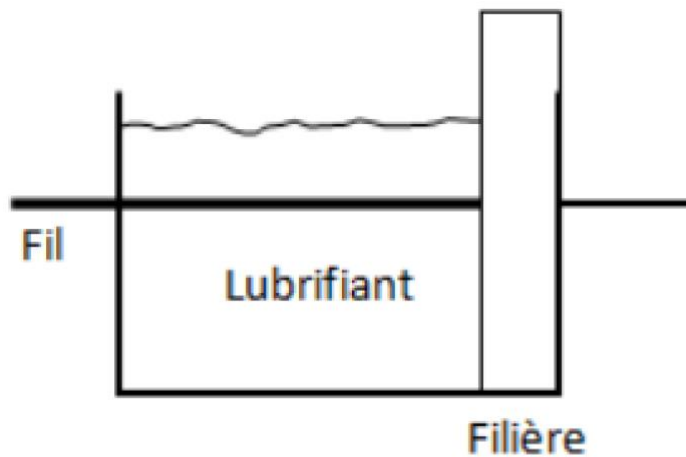


Figure I.5: Schéma d'une méthode de lubrification



Figure I.6 : Boîte à savon (ENICAB Biskra)

4.2.4. Conditionnement du fil tréfilé

Après tréfilage, le fil peut être conditionné de deux façons différentes :

- Enroulé sur une bobine à flasque par couches successives de spires jointives, ou non.
- Dépose « en rosace » sur une bobine fixe à axe vertical disposée sur un support qui tourne lentement, et dont l'axe est excentré par rapport à celui de la bobine. Deux avantages à ce procédé :

- Il n'est pas nécessaire d'arrêter la machine lors du changement de bobine.
- Les bobines ne sont pas compactes et la prise de température est plus rapide traitements de recuit en four statique.

4.3. Types de machines de tréfilage

On rencontre plusieurs types de tréfileuse dont on peut citer :

4.3.1. Machine simple ou machine mono passe

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction.

Elle ne comporte qu'une bobine et ne peut effectuer qu'un passe de tréfilage, c'est-à-dire une réduction de section de 35 au maximum. À chacun des blocs sont associés un ensemble de dévidage et un dispositif de réception.

On distingue :

- Les blocs simples, à axe de bobine verticale.
- Les bancs de couche, à axe de bobine horizontal.

4.3.2. Machines multiples

Elles permettent des réductions de section importantes sont obtenues par des réductions successives grâce à un enchaînement de filières. 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. Il existe trois types de machines multiples [13] :

- ✚ **les machines continues ou à passage direct:** Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répons. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses en effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil.
- ✚ **les machines à accumulation :** il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Les passes sont calculées pour que chaque filière débite plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante d'où une accumulation du fil sur la bobine. Cette dernière favorise le refroidissement du fil, problématique du point de vue métallurgique pour les aciers au carbone, et permet de pas interrompre la production de bobines aval en cas de problème sur les bobines amont.

✚ **les machines à glissement** : dans ces machines dédiées au tréfilage humide, il n'y a ni équilibrage des vitesses, ni accumulation de fil. Le glissement du fil sur les bobines compense les différences de vitesses. Ces équipements permettent de tréfiler du fil «en ébauche » c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 8mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes .le fil peut ensuite être tréfilé en « reprise » à sec des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fil très propres.

5. Recuit de restauration et de recristallisation après déformation à froid

5.1. Introduction

La déformation plastique à froid conduit à l'écroissage du matériau, donc à son durcissement. Cet écroissage dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En effet, la déformation à froid entraîne une importante augmentation de la densité de dislocations dans le matériau. Il s'ensuit une hétérogénéité de la microstructure et de la texture cristallographique à l'intérieur des grains. Pour conférer au matériau les propriétés mécaniques souhaitées, celui-ci est recuit après déformation. Ce recuit conduit à une réorganisation de la microstructure par diminution ou suppression des obstacles les plus importants aux mouvements des dislocations. Lors du traitement thermique après déformation, deux phénomènes plus ou moins concurrents ont lieu : la restauration et la recristallisation. Ces deux types d'évolution structurale ont la même force motrice c'est-à-dire l'énergie élastique emmagasinée au cours de la déformation à froid [4].

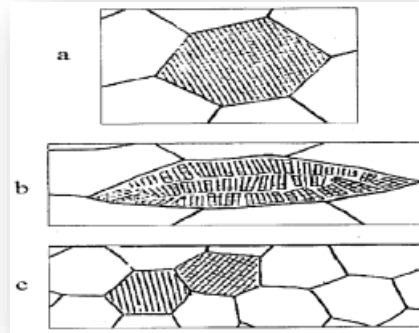


Figure I.7 : Déformation orientée du grain (a), Grain avant écrouissage (b) Grain après écrouissage et (c) Grain recristallisé [18].

5.2. Restauration

La restauration est définie comme étant un processus thermique, qui se produit dans le matériau déformé, sans migration des joints à grand angle. Au cours de cette étape, on n'a pas de création de nouveaux grains, mais seulement une réduction du nombre de défauts atomique, lacunes et dislocations et réarrangements de ceux-ci en nouvelles configurations plus stables. La restauration permet un rétablissement partiel des propriétés physiques ou mécaniques du matériau écroui [19].

La restauration se déroule en plusieurs étapes (Figure I.8). Dans un premier temps les dislocations se regroupent et se condensent dans les parois délimitant des cellules dans lesquelles la densité de dislocations est plus faible. Dans un second temps, il y a réduction du nombre de dislocations de signes opposés dans les parois par annihilation et réorganisation de ces dislocations en réseaux bidimensionnels formant des sous joints, c'est l'étape de polygonisation. Enfin certains de ces sous-grains évoluent par mouvements des sous-joints pour atteindre une structure minimisant l'énergie stockée. Chaque grain présente donc une sous-structure constituée de cellules ou de sous-grains désorientés de quelques degrés par rapport à l'orientation initiale du grain.

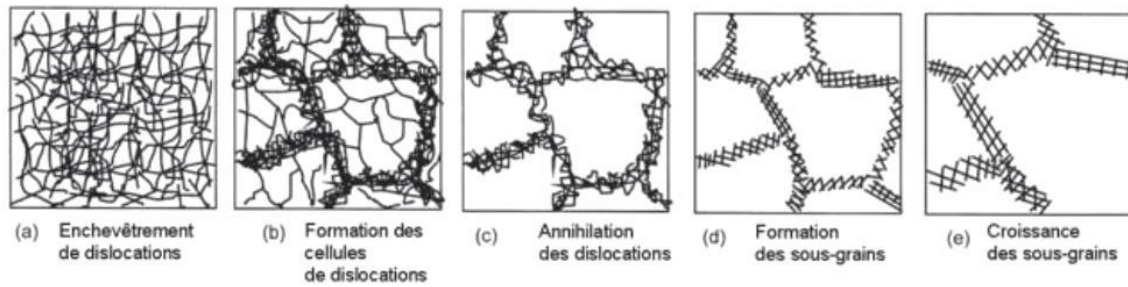


Figure I.8 : Différentes étapes de restauration d'un matériau déformé [20].

5.3. Recristallisation

La recristallisation se caractérise par le développement de nouveaux grains, très pauvres en dislocations, aux dépens des grains écrouis. L'énergie motrice de cette transformation structurale est l'énergie d'écroutissage.

La recristallisation est habituellement divisée en deux stades : la germination et la croissance des germes dans la matrice écrouie.

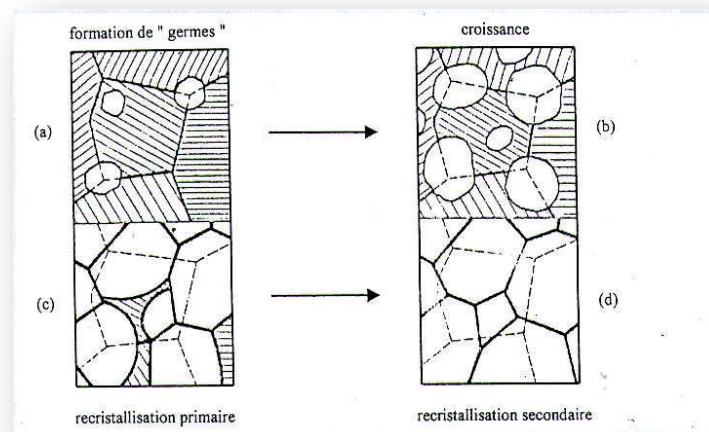


Figure I.9 : Schéma de la recristallisation [21].

5.3.1. Etape de germination

Pendant longtemps, le problème de la germination n'a été étudié que par microscopie optique, mais les germes ainsi observés ont déjà grossi de façon appréciable. Le microscope électronique sur lames minces a permis une étude plus fine de la germination elle-même. L'idéal serait l'observation directe de la recristallisation dans le microscope

lui-même, ce qui nécessiterait des objets assez épais, donc des microscopes électroniques fonctionnant sous très haute tension, mais dans ce cas, le microscope créerait des défauts d'irradiation pouvant participer à la germination. Il faut en outre comprendre pourquoi les germes apparaissent préférentiellement dans les régions de forte déformation, tels que les croisements de bandes de glissement ou de bandes de déformation, les joints de grains, les inclusions, etc. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer l'apparition des germes au sein de la structure déformée. Actuellement, on n'admet que les mécanismes basés sur l'existence de germes de forte désorientation au sein même de la matrice déformée sont les plus probables; de multiples observations expérimentales viennent confirmer cette hypothèse. Les germes qui auront atteint une taille critique vont se développer au sein du réseau hors d'équilibre avec une cinétique contrôlée par la migration des joints de grains [22].

5.3.2. Etape de croissance

Les germes étant formés, le processus de recristallisation se poursuit par une migration des joints au travers de matrice déformée, induite par l'énergie libre volumique (balayée lors du déplacement du joint) et l'énergie de joint de grains.

La vitesse V d'un joint de grains lors de l'étape de croissance est donnée par l'équation :

$$V = M.P \quad (I.3)$$

Où M représente la mobilité du joint de grains et P la pression exercée sur le joint.

La majeure partie de la force motrice dérive des interactions entre les joints de grains et les dislocations incorporées dans le joint, puis détruites. Les impuretés peuvent affecter la mobilité des joints de grains, apportant au niveau atomique un désordre non-favorable [23].

5.4. Lois de la recristallisation

Les lois de recristallisation peuvent être résumées comme suit [24] :

- La recristallisation ne se produit qu'après une certaine déformation minimale, dite écrouissage critique.
- Plus la déformation est faible, plus la température de recristallisation est élevée : la température de recristallisation est la température minimale à laquelle le métal doit être recuit pour que la recristallisation se produise en un temps donné.

- La température de recristallisation est d'autant plus basse que le temps de recuit est plus long (pour une même déformation).
- La taille des grains après recristallisation décroît lorsque le taux de déformation augmente ou lorsque la température de recuit décroît.
- Plus la dimension des grains initiaux est grande, plus la déformation requise pour produire la recristallisation, dans des conditions de température et de temps données, est élevée.
- Les nouveaux grains ne croissent pas aux dépens de grains déformés d'orientation voisine.
- A une température donnée, la vitesse de recristallisation (volume recristallisé par unité de temps) part d'une valeur nulle, croît et passe par un maximum : d'où la forme caractéristique des courbes de cinétique de recristallisation, qui commencent par une "période d'incubation".
- La température de recristallisation est d'autant plus basse que la pureté du métal est plus élevée.

Chapitre II
Matériau étudié et
Techniques expérimentales

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le matériau utilisé dans le cadre de notre étude et les traitements thermiques imposés à ce dernier. Pour suivre l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques et électriques des fils de cuivre étudiés, nous avons utilisé les techniques de caractérisation suivantes : la microscopie optique, l'essai de traction et des mesures de la résistivité électrique.

2. Présentation du matériau étudié

Pour réaliser cette étude nous avons opté pour le cuivre pur sous forme du fil machine de diamètre initial égal à 8.00 mm et de trois fils tréfilés, de diamètre ($d_1= 2.75\text{mm}$, $d_2= 1.76\text{mm}$ et $d_3=1.35\text{mm}$), fournis par l'Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB) (figure II.1). Le tableau II.1 présente la composition chimique du fil machine, et le tableau II.2 présente les caractéristiques physiques de ce matériau.



Figure II.1: Fil machine et fils tréfilés de cuivre étudiés

Tableau II.1 : Composition chimique du fil de cuivre (massique %).

Cuivre	Bismuth	Antimoine	Arsenic	Fer	Nickel	Etain	Soufre	Zinc	Plomb
Cu	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Sn	S	Zn	Pb
99.9	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0.002	0.002	0.004	0.005

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du fil de cuivre [Fiche technique (ENICAB) Biskra].

Diamètre du fil machine (mm)	L'allongement A (%)	Conductivité thermique (watt/degré)	Conductivité électrique IACS%	Résistance à la traction (N/mm²)
8 (±0.38)	40	8.3	101	230

Le fil machine est directement prélevé des bobines des fournisseurs de l'ENICAB. Quant aux fils tréfilés, ils ont été sélectionnés et prélevés depuis la chaîne de tréfilage par le personnel de l'ENICAB. Les taux de réduction des fils de cuivre tréfilés sont calculés d'après l'équation (II.1), les diamètres de fils tréfilés et leurs taux de déformation sont enregistrés dans le tableau II.3.

$$\varepsilon = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

ε : Taux de réduction en (%).

S_0 : Section initial du fil machine en (mm²).

S : Section finale du fil tréfilé en (mm²).

Tableau II.3 : Valeurs des taux de réduction des fils de cuivre tréfilés.

Diamètre du fil (mm)	ε (%)
8	0
2.75	88.19
1.76	95.16
1.35	97.15

3. Préparation des échantillons

3.1. Découpage

Le découpage des échantillons a été manuellement à l'aide d'une scie à métaux avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement.

Les échantillons destinés à l'essai de traction sont découpés à une longueur de 30 cm et ceux des autres caractérisations sont découpés à 2 cm de longueur (Figure II.2).



Figure II.2: Les échantillons découpés.

3.2. Enrobage

La manipulation des échantillons prélevés a nécessité leur enrobage à froid dans des résines époxydes, durcissant à froid (durcissement à l'air dans des moules plastiques). Cet enrobage permet de faciliter le polissage manuel de petits échantillons (Figure II.3). La température d'enrobage ne présente aucun risque de modification structurale de la surface des échantillons.



Figure II.3 : Echantillons coupés et enrobés.

3.3. Polissage

Pour les observations au microscope optique, les échantillons enrobés sont polis sur une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260 (Figure II.4) avec papiers abrasifs de différentes granulométries (240, 300, 600, 800, 1000, 1200 et 1500), Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et enfin séchés. Le polissage est effectué au laboratoire de physique de l'université de Biskra.



Figure II.4: Polisseuse mécanique de type PRESI MECAPOL P260.

3.4. Attaque chimique

Avant l'étude micrographique, il nous faut procéder à une attaque chimique, dans le but de rendre les grains, les joints de grains, et autres composants de la microstructure visibles à l'aide d'un microscope optique.

A chaque matériau, correspond un réactif d'attaque bien défini, et dans les conditions d'utilisation sont bien définies. L'attaque chimique utilisée pour notre matériau est le réactif HNO₃ (acide nitrique) concentrée à 65 %, pour une durée d'attaque de quelques secondes.

4. Traitement thermique

Le traitement thermique des échantillons étudiés ont été réalisés dans un four électrique programmable de type «WSU 100» au niveau de laboratoire physique de l'ENICAB de Biskra figure (II.5).

Les températures de recuit appliquées aux échantillons sont : $T_1=150\text{ C}^\circ$, $T_2=250\text{ C}^\circ$ et $T_3=300\text{ C}^\circ$ pendant une heure pour chaque température, puis trempés à l'eau.

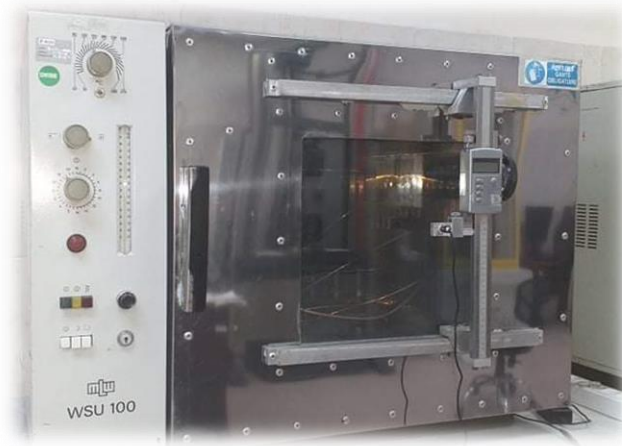


Figure II.5: Four de traitement thermique type WSU 100.



Figure II.6: échantillons trempés à l'eau.

5. Techniques de caractérisations utilisées

5.1. Microscopie optique

Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique de type « Unitron », ce dernier nous a permis d'utiliser des grossissements pouvant aller jusqu'à 400 fois. Un appareil numérique de marque Nikon est monté sur le microscope, permettant l'acquisition numérique des images observées (figure II.7).

Cette technique nous a permis d'observer la morphologie des grains durant chaque stade (tréfilage et traitement thermique).

Nous avons réalisé cette analyse au niveau du laboratoire de physique de l'université de Biskra.



Figure II.7: Microscope optique

5.2. Essais de traction

L'essai de traction est le procédé expérimental le largement plus utilisé dans l'étude du comportement mécanique des métaux et alliages. Il consiste à appliquer à une éprouvette, un effort de traction et à mesurer l'allongement correspondant, ou bien à imposer un allongement et à mesurer l'effort de traction.

Dans une machine d'essai de traction, les éprouvettes sont solidement maintenues par leur tête entre les mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette de telle manière que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités.

Les essais de traction sont réalisés à la température ambiante sur les fils de cuivre étudiés avec une vitesse de déplacement de 2mm/min. Les essais sont effectués au niveau du laboratoire physique de l'ENICAB de Biskra, sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100 (figure II.8), dotée d'une capacité de mesure 100 Kg et d'un extensomètre de longue course ($L_0 = 200$ mm); elle est commandée et pilotée par un ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données.



Figure II.8: Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (ENICAB Biskra).

Des appareils adaptés à la machine, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et l'allongement correspondant de l'éprouvette (figure II.9).

Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles.

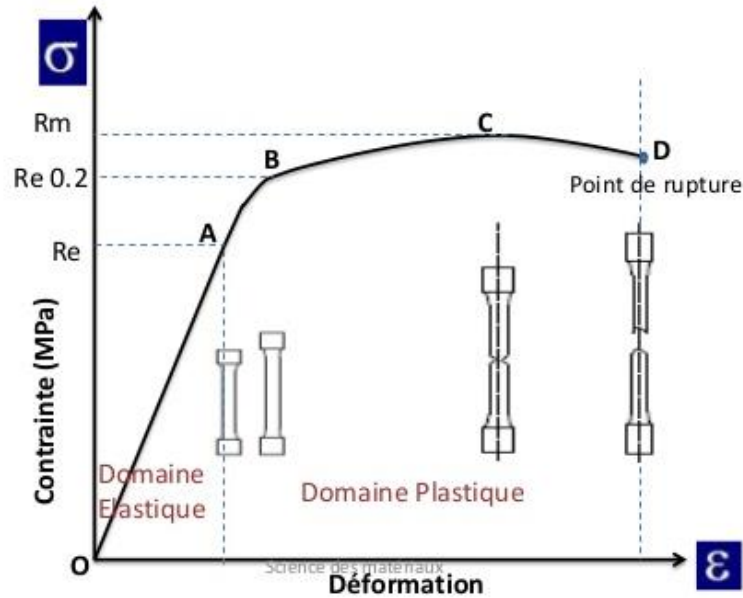


Figure II.9 : Courbe de traction (matériau ductile).

Les principales valeurs caractéristiques de traction que nous pouvons en déduire sont donc :

a. Limite élastique R_e :

La limite élastique en traction d'un matériau est la valeur de contrainte à laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. Elle est également appelée le point d'élasticité et définit la transition entre la région élastique et la région plastique.

Elle est donnée par l'effort de la limite élastique F_e divisé par la section initial S_0 de l'éprouvette.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{II.2})$$

b. Résistance à la rupture R_m

La résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée R_m , qui est la contrainte maximale atteinte en cours d'essais, elle est donnée par le quotient de l'effort de rupture F_m divisé par la section initial S_0 de l'éprouvette.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{II.3})$$

c. L'allongement à la rupture $A\%$

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

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

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

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

5.3. Mesure de la résistivité électrique

Les mesures de résistivité électrique ont été faites sur un pont de marque RESISTOMAT de type 2303 (figure II.10). Ces techniques dépendent dans une certaine mesure de la géométrie de l'échantillon.

Pour déterminer la résistance des échantillons en fils de longueur on utilise une source stable fournissant un courant régulier connu et deux sondes mesurant la chute de tension entre les deux points dont l'espacement est exactement connu ($L=100\text{cm}$). Grâce à cela, cette résistance peut être convertie en résistivité.

La résistivité électrique est calculée par la formule suivante :

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{R.S}{L} \left(\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}} \right) \quad (\text{II.5})$$

R: résistance électrique (Ω).

S: section du fil électrique (mm^2).

L : longueur du fil électrique (100 cm).

Les mesures ont été réalisées au laboratoire d'analyse physique de l'ENICAB Biskra.



Figure II.10 : Dispositif de machine RESISTOMAT de type 2303 bruster de l'ENICAB Biskra.

Chapitre III

Résultats et Interprétations

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de regrouper tous les résultats obtenus de notre travail. La première partie de ce chapitre consiste à caractériser le fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés à l'état initial ou nous avons suivi l'évolution de leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques et électriques. Dans la deuxième partie nous avons étudié l'influence combinée du taux de déformation par tréfilage à froid et de la température de recuit sur les mêmes propriétés.

Partie 1 : Etude et caractérisation des fils du cuivre à l'état initial

2.1. Essai de traction

La figure III.1 présente l'essai de traction réalisé sur le fil machine à l'état initial. Le tableau III.1 regroupe les résultats des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés avec différents taux de déformation à l'état initial.

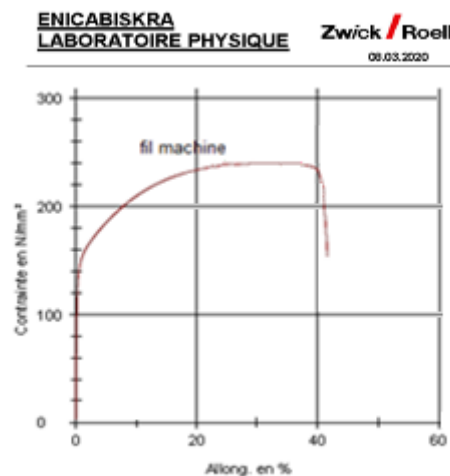


Figure III.1 : Essai de traction du fil machine du cuivre à l'état initial.

Tableau III.1: Propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre fortement tréfilés à l'état initial.

Propriétés mécaniques	Taux de déformation (%)			
	Fil machine	ϵ 1 (88.19)	ϵ 2 (95.16)	ϵ 3 (97.15)
Re 0.2 (N/mm ²)	130.29	135.93	115.01	121.80
Allongement à la rupture(%)	41.57	35.80	33.87	40.16
Résistance à la traction (N/mm ²)	239.77	257.84	255.75	252.32
Charge de rupture (kN)	12.20	1.53	0.62	0.36

Selon des travaux ultérieurs réalisés sur les fils tréfilés du cuivre de l'ENICAB de Biskra [1, 25], la déformation plastique par tréfilage entraîne un écrouissage du matériau qui se traduit par :

- Une augmentation de la dureté et la résistance à la rupture.
- Une diminution de la ductilité des fils tréfilés, c'est-à-dire l'allongement à la rupture.
- Une augmentation de la résistivité électrique.

Ces travaux ont montré également que le recuit des fils tréfilés du cuivre permet de déclencher le mécanisme de recristallisation ce qui conduit à l'élimination des contraintes résiduelles, diminuer la dureté et la résistance à la rupture et améliorer la ductilité du matériau (tableau III.2).

D'après le tableau III.1, on trouve que la limite élastique du fil machine de cuivre est égal à 130.29 N/mm², alors celle des fils fortement déformés varie entre 115.01 à 135.93 N/mm².

Tableau III.2 : Résultats des propriétés mécaniques des fils du cuivre fortement tréfilés de l'ENICAB de Biskra réalisés par des travaux ultérieurs.

Etat de fil	Taux de déformation ε (%)	Propriétés mécaniques		Référence
		Résistance à la traction (N/mm ²)	Allongement à la rupture (%)	
Fil tréfilé	90.58	464	2	[26]
Fil tréfilé et recuit à 160°C	91.66	257	31.2	[1]
Fil tréfilé	88	464	2	[25]
Fil tréfilé et recuit à 260°C	88	250.24	33.5	

Les propriétés mécaniques telles que l'allongement à la rupture et la résistance à la traction sont des facteurs importants dans l'industrie des câbles.

La figure III.2 montre l'évolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation. On observe que les valeurs de la résistance à la traction des trois fils fortement tréfilés sont proches les unes des autres et elles sont plus grandes que la résistance à la traction du fil machine (non déformé). Ceci est expliqué par l'écroutissage induit par le processus de tréfilage. En effet, plus la déformation est importante plus l'écroutissage induit est important plus sera donc important l'effort de toute déformation ultérieure.

La figure III.3 représente la variation de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation. D'après cette figure on observe que les valeurs de l'allongement à la rupture des trois fils fortement tréfilés sont relativement proches à celle du fil machine.

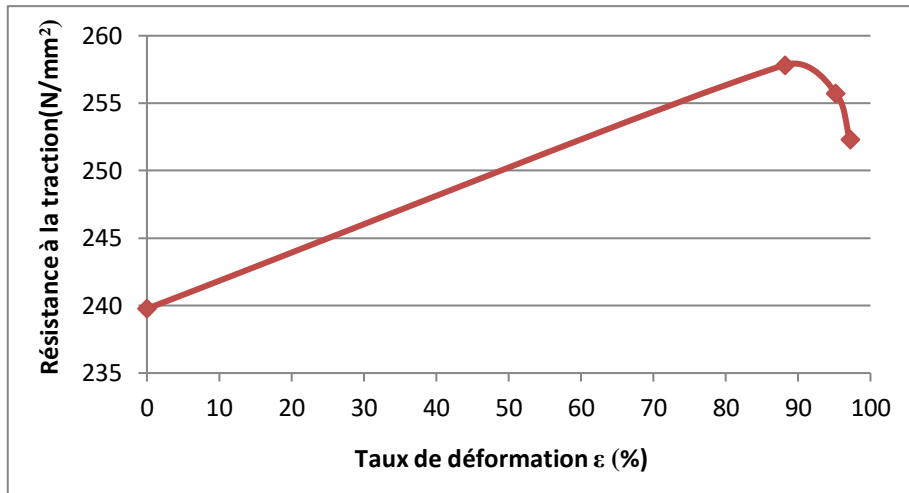


Figure III.2 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation des fils en cuivre à l'état initial.

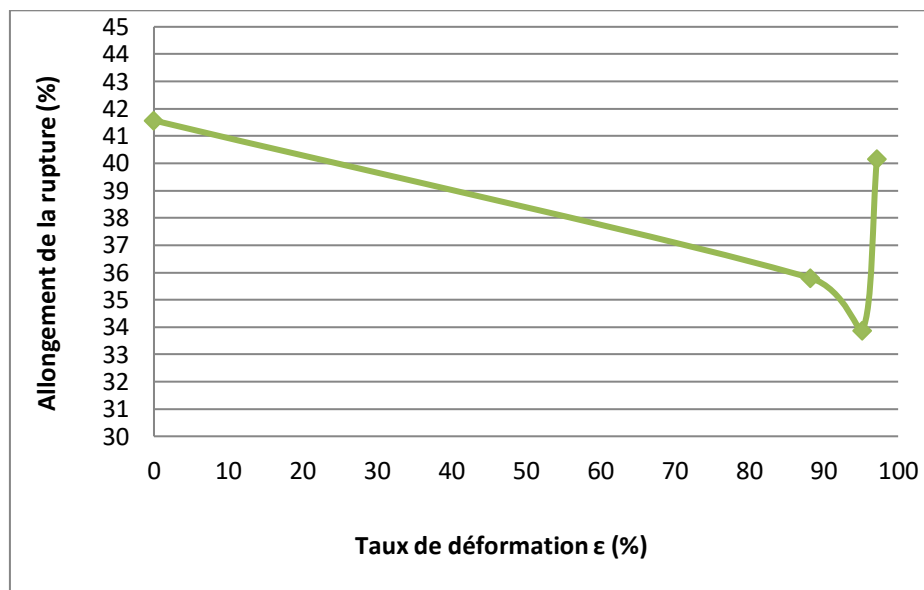


Figure III.3: Evolution de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation des fils en cuivre à l'état initial.

D'autre part, en comparant les valeurs des propriétés mécaniques (résistance à la traction et l'allongement à la rupture) des fils du cuivre étudiés (tableau III.1) avec les valeurs des mêmes propriétés réalisés par d'autres études sur les fils du cuivre fortement déformé fournis aussi par l'ENICAB de Biskra (tableau III.2) on remarque que:

- les valeurs de la résistance à la traction des trois fils tréfilés étudiés à l'état initial sont proches à celles du fil du cuivre fortement tréfilé et recuit à 160°C et le fil tréfilé et recuit à 260°C.
- les valeurs de l'allongement des trois fils tréfilés étudiés sont aussi proches à celles du fil du cuivre fortement tréfilé et recuit à 160°C et tréfilé et recuit à 260°C.

On conclue donc que les fils tréfilés qui nous ont été fournis par L'ENICAB de Biskra ont soumis à un traitement thermique d'adoucissement après le tréfilage à froid par cette entreprise. Ce recuit permet de déclencher le mécanisme de recristallisation et de supprimer l'effet de l'écrouissage, c'est-à-dire le retour progressif des propriétés mécaniques des fils tréfilés vers un état proche de l'état initial (fil machine). Les fils en cuivre deviennent plus doux, moins résistant et plus ductile.

2.2. Mesure de la résistivité électrique

La résistivité électrique est l'aptitude d'un câble à empêcher le passage du courant électrique à travers de lui, ce paramètre physique est intéressant dans la production des câbles. Le tableau III.3 résume les résultats des propriétés électriques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés avec différents taux de déformation à l'état initial. En comparant ces résultats avec ceux donnés par des travaux ultérieurs réalisés sur le même matériau [25,26], on trouve que nos valeurs sont légèrement inférieurs à celles donnés par le tableau III.4 pour l'ensemble des fils du cuivre ce qui confirme que les fils étudiés ont subi un traitement d'adoucissement après le tréfilage à froid à L'ENICAB de Biskra.

Ce constat est expliqué par l'effet de l'écrouissage, les défauts dus à la déformation appliquée par tréfilage provoquent le piégeage des électrons qui cause une augmentation de la résistivité du fil, alors le recuit du matériau écroui conduit à l'élimination de ces défauts ce qui implique la diminution progressive de la résistivité du fil.

La figure III.4 représente les variations de la résistivité électrique des fils du cuivre en fonction du taux de déformation. On remarque clairement une augmentation de la résistivité électrique en fonction du taux de déformation par tréfilage.

Dans notre cas, le métal a subi une forte déformation à froid, alors il est affecté par l'effet de l'érouissage qui perturbe profondément l'ordre du réseau cristallin et influe sur la résistivité électrique ce qui explique son augmentation progressive après chaque passe de tréfilage.

Tableau III.3: Propriétés électriques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre fortement tréfilés à l'état initial.

Taux de déformation ε (%)	Propriétés électriques	
	Résistivité électrique ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Conductivité électrique ($\text{m}/\Omega\text{mm}^2$)
Fil machine (0)	0.01614	61.9578
88.19	0.01685	59.3471
95.16	0.01686	59.3119
97.15	0.01687	59.2768

Tableau III.4 : Résultats des propriétés électriques des fils du cuivre fortement tréfilés de l'ENICAB de Biskra réalisés par des travaux ultérieurs.

Etat de fil	Taux de déformation ε (%)	Résistivité électrique ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Référence
Fil machine	0	0.01639	[26]
Fil tréfilé	90.58	0.01735	
Fil machine	0	0.01650	[25]
Fil tréfilé	88	0.01686	

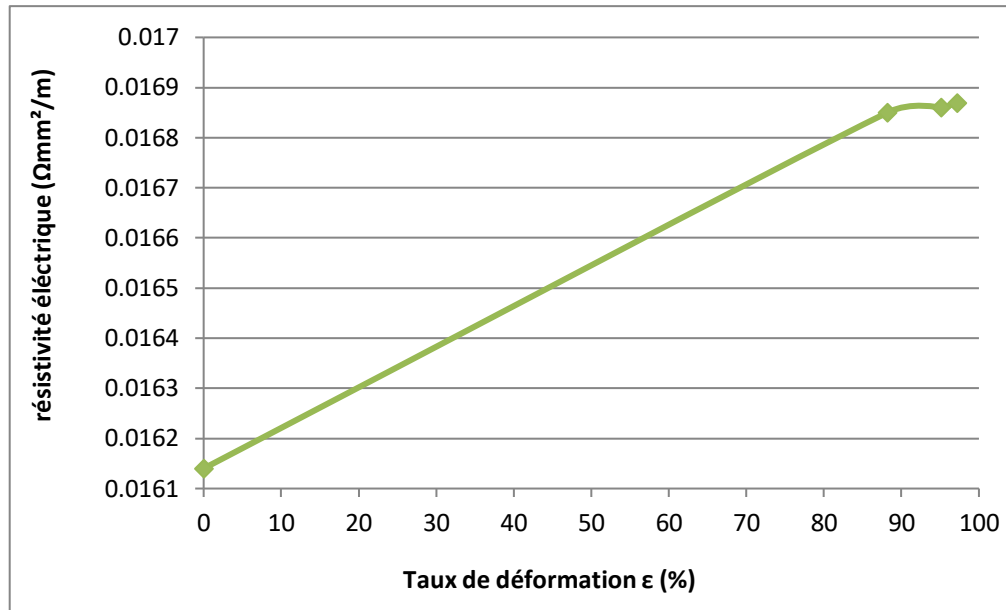


Figure III.4: Evolution de la résistivité électrique des fils de cuivre en fonction du taux de déformation.

2.3. Analyse micrographique

Plusieurs examens métallographiques effectués par le microscope optique sur le fil machine et les fils tréfilés de cuivre de l'ENICAB de Biskra ont relevé l'évolution de la forme et la morphologie des grains dans le matériau pendant le procédé de la mise en forme par tréfilage à froid [1, 27-28].

Par exemple, les examens réalisés par Baira montrent que la microstructure du fil machine présente une forme équiaxe des grains (figure III.5.a). En revanche, dans le plan longitudinal des fils tréfilés, les grains sont allongés suivant l'axe du tréfilage. Cet allongement augmente avec le taux de déformation et conduit à une microstructure fibrée (formation de texture) pour les plus forts taux de déformation (figure III.5.b). Le recuit à 260°C pendant 30 minutes permet de déclencher le mécanisme de recristallisation ce qui conduit à l'élimination totale de la microstructure écrouie des grains déformés. Les grains obtenus sont de taille hétérogènes et relativement plus fins pour le cas du fil fortement déformé (figure III.5.c) [25].

On note qu'à cause de la situation actuelle on n'a pas pu réaliser les observations microscopiques des fils en cuivre à l'état initial et à l'état recuit.

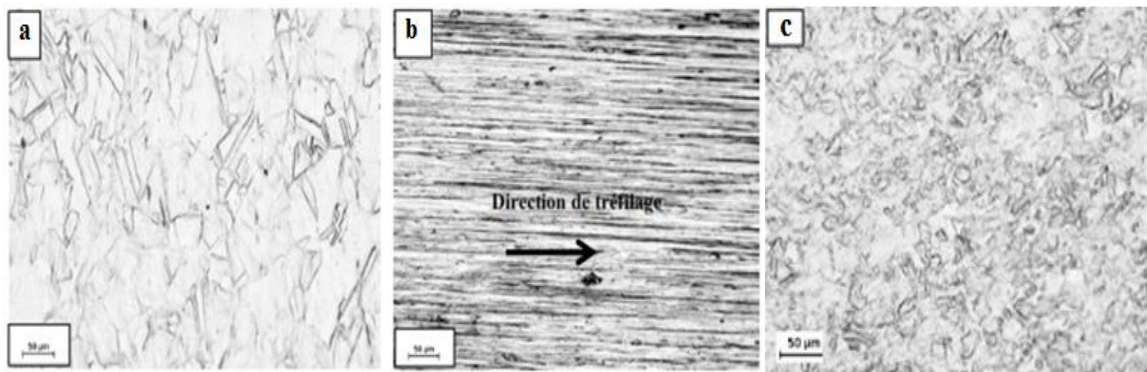


Figure III.5: Evolution de la microstructure du fil en cuivre

a (fil machine $\varepsilon= 0.00$ %), **b** fil fortement tréfilé à 88 %, **c** fil tréfilé à 88 % et recuit à 260°C pendant 30 minutes.

Partie 2 : Etude et caractérisation des fils du cuivre à l'état recuit

3.1. Introduction

Cette partie concerne les résultats obtenus après traitements thermiques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés à 150, 250 et 300 C° pendant un temps de maintien d'une heure. Cette étude a pour but d'étudier l'influence combinée du taux de déformation par tréfilage à froid et la température de recuit sur l'évolution des propriétés mécaniques et électriques de ces fils.

3.2. Essai de traction

Le tableau III.5 regroupe les valeurs des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre tréfilés après le recuit à différentes températures.

Tableau III.5 : Résultats des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés et recuits à différentes températures.

Température de recuit (°C)	Taux de déformation (%)	Propriétés mécaniques	
		Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)
150	0 (Fil machine)	37.26	239.46
	ϵ_1 (88.19)	37.23	254.84
	ϵ_2 (95.16)	34.22	255.11
	ϵ_3 (97.15)	31.36	252.67
250	0 (Fil machine)	41.99	232.75
	ϵ_1 (88.19)	47.70	250.44
	ϵ_2 (95.16)	36.11	253.25
	ϵ_3 (97.15)	41.62	250.64
300	0 (Fil machine)	42.66	233.02
	ϵ_1 (88.19)	21.68	247.28
	ϵ_2 (95.16)	37.13	250.37
	ϵ_3 (97.16)	28.15	247.96

Les figures III.6 et III.7 présentent respectivement l'évolution de la résistance à la traction et l'évolution de l'allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit. La figure III.8 présente l'évolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation.

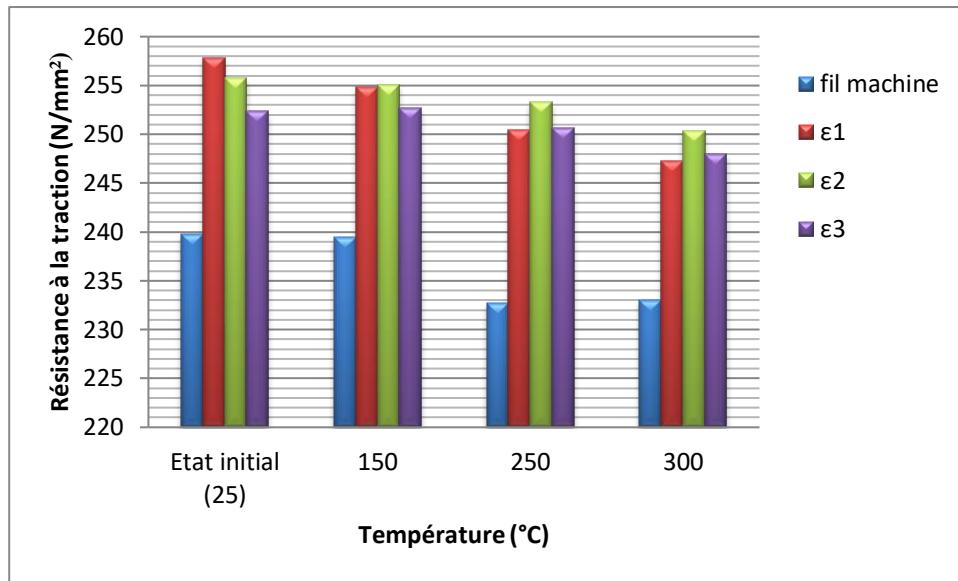


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.

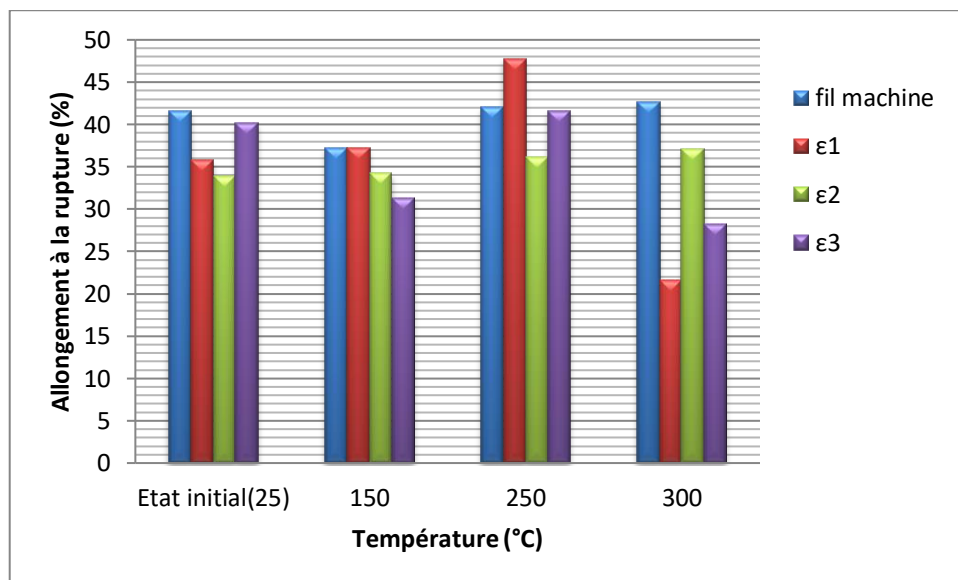


Figure III.7 : Evolution de l'allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.

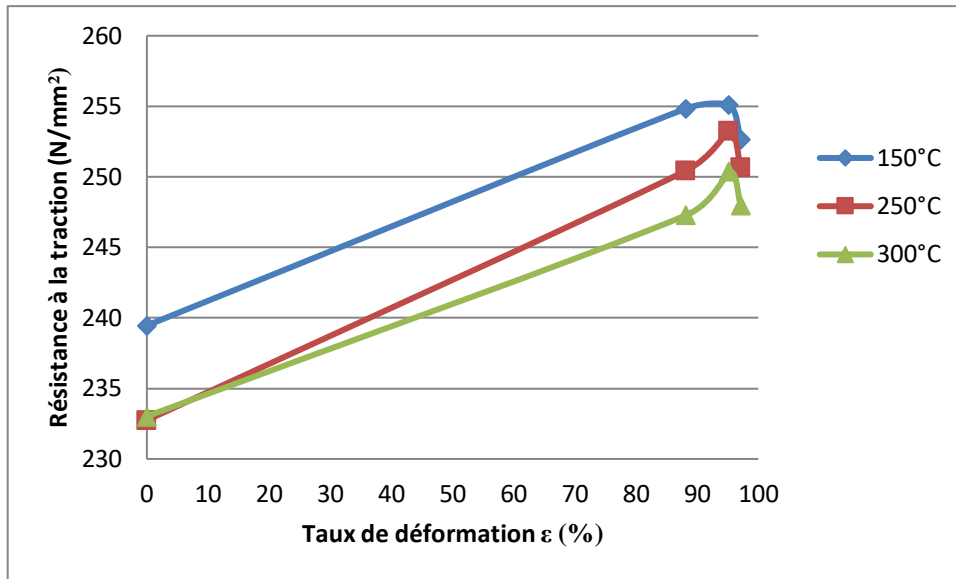


Figure III.8: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation.

D'après les résultats du tableau III.5 et les figures III.6 et III.7, on remarque que:

- Le recuit des fils du cuivre à 150°C ne provoque pas un changement notable sur l'évolution de l'allongement à la rupture et la résistance à la traction par rapport à l'état initial de l'ensemble des fils.
- Le recuit des fils du cuivre à 250°C entraîne une légère diminution de la résistance à la traction et une augmentation de l'allongement à la rupture pour l'ensemble des fils par rapport à l'état initial. La valeur de l'allongement à la rupture du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 250°C est de 33% plus élevée que sa valeur à l'état initial et elle représente la valeur la plus élevée de l'allongement à la rupture (47.70%) par rapport aux autres fils.
- Le recuit des fils du cuivre à 300°C conduit à une légère diminution de la résistance à la traction pour l'ensemble des fils par rapport à l'état initial. La valeur de la résistance à la traction du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 300°C est de 4% plus basse que sa valeur à l'état initial.

Les valeurs de l'allongement à la rupture du fil machine recuit et le fil tréfilé à 95.16% et recuit à 300°C sont légèrement supérieurs à celles des mêmes fils à l'état initial, par contre les valeurs de l'allongement à la rupture du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 300°C et le fil tréfilé à 97.15% et recuit à 300°C sont très inférieurs à celles des mêmes fils à l'état initial.

- Pour l'ensemble des fils tréfilés du cuivre, la résistance à la traction diminue d'une manière lente en fonction de la température de recuit. Par contre, l'allongement à la rupture tend généralement à augmenter avec la température de recuit (à l'exception les deux fils tréfilés et recuit à 300°C cités ci-dessus) et se rapproche à celle du fil machine à l'état initial

Ces résultats sont expliqués par l'effet d'adoucissement des fils qui a tendance à éliminer les dislocations et les tensions internes et aussi à cause du grossissement des grains sous l'effet de la température. Un matériau à grains fins et plus dur et plus résistant qu'un matériau à grains grossiers. En effet, le phénomène de croissance des grains est accéléré avec l'augmentation la température. Plus la température de recuit est élevée plus la vitesse de croissance des grains est accélérée, plus la taille des grains est grande et par conséquent le fil du cuivre devient moins résistant (figure III.8). Un tel phénomène s'explique par le fait que la vitesse de diffusion s'accroît avec la température.

3.3. Mesure de la résistivité électrique

Le tableau III.6 rassemble les résultats des propriétés électriques de fil machine de cuivre et les fils tréfilés avant et après le recuit en fonction du taux de déformation par tréfilage. La Figure III.9 représente l'évolution de la résistivité électrique des fils en cuivre en fonction de la température de recuit. On remarque que les valeurs de la résistivité électrique des trois fils tréfilés et recuits à différentes températures sont proches les unes des autres et elles sont supérieures à celles du fil machine.

La figure III.10 représente l'évolution de la résistivité électrique des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation. Cette figure met clairement en évidence que la résistivité électrique de l'ensemble des fils en cuivre augmente avec la température de recuit. Le fil tréfilé à 97.15 % et recuit à 300 °C possède la valeur la plus élevée de la résistivité électrique par rapport aux autres fils donc la plus faible valeur de la conductivité électrique puisque cette dernière est inversement proportionnelle à la résistivité électrique.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Baira et al. Ces auteurs ont étudié la variation de la résistivité électrique des fils du cuivre déformés et recuits à 260°C en fonction du taux de déformation par tréfilage. Ils ont trouvé que les valeurs de la résistivité électrique de l'ensemble des fils tréfilés et recuits pendant 10, 30 et 60 minutes sont

supérieures à celle des fils déformés (non recuit). Ils ont constaté également que la résistivité électrique reste toujours croissante avec le taux de réduction par tréfilage au cours de recuit des fils tréfilés [29].

Tableau III.6 : propriétés électriques du fil machine et les fils tréfilés en cuivre avant et après le recuit.

Etat de fil	Taux de déformation(%)	Propriétés électriques	
		Résistivité électrique ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Conductivité électrique ($\text{m}/\Omega\text{mm}^2$)
Etat initial	(0)Fil machine	0.01614	61.9578
	(88.19)	0.01685	59.3471
	(95.16)	0.01686	59.3119
	(97.15)	0.01687	59.2768
Recuit à 150 °C	(0)Fil machine	0.01615	61.9195
	(88.19)	0.01701	58.7889
	(95.16)	0.01683	59.4177
	(97.15)	0.01690	59.1715
Recuit à 250 °C	Fil machine	0.01652	60.5326
	(88.19)	0.01697	58.9275
	(95.16)	0.01680	59.5238
	(97.15)	0.01691	59.1366
Recuit à 300 °C	(0)Fil machine	0.01637	61.0873
	(88.19)	0.01699	58.8581
	(95.16)	0.01695	58.9970
	(97.15)	0.01709	58.5137

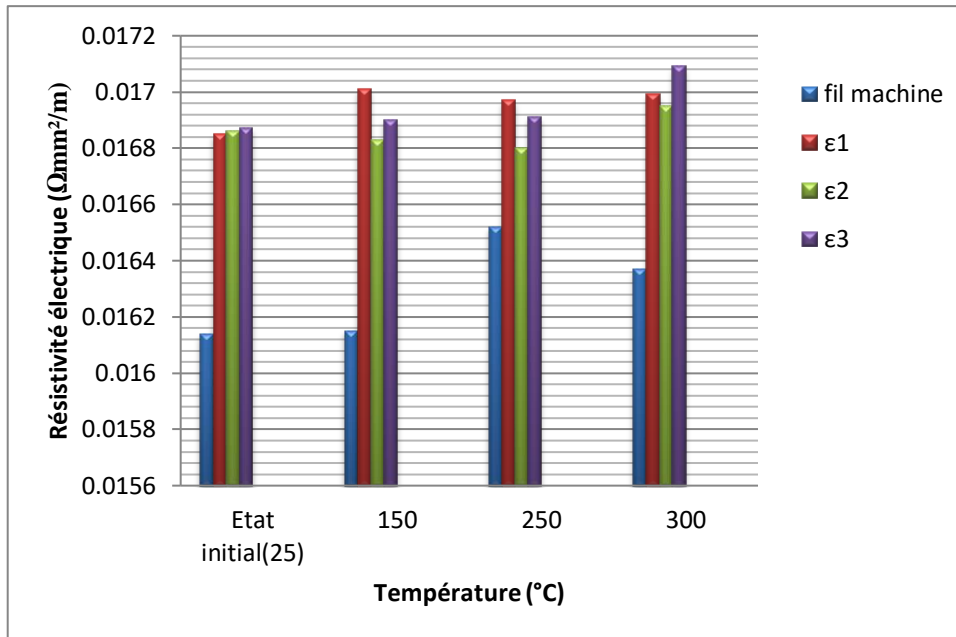


Figure III.9 : Evolution de la résistivité électrique des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.

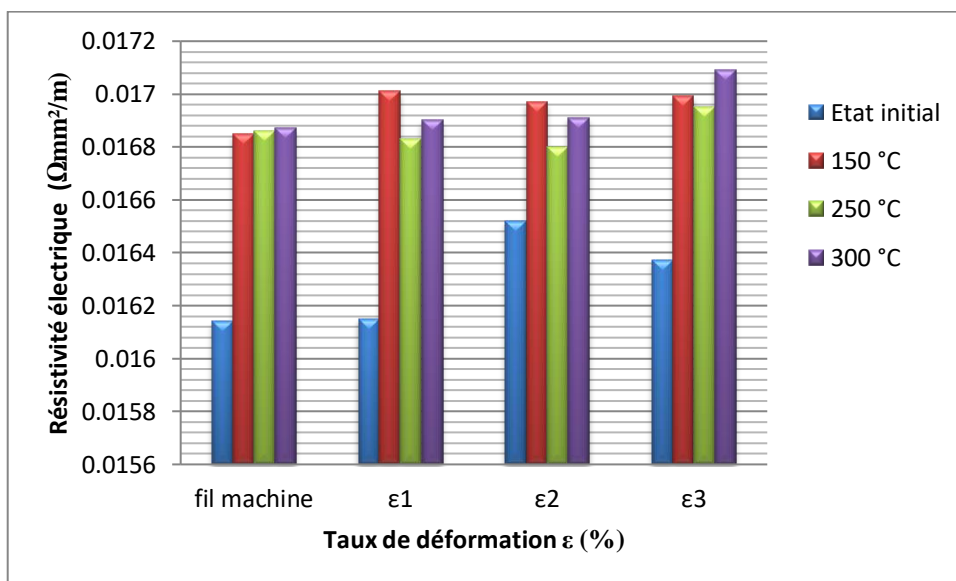


Figure III.10 : Evolution de la résistivité électrique des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation ($\epsilon_1= 88.19\%$, $\epsilon_2=95.16\%$, $\epsilon_3=97.15\%$).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier l'influence combinée du taux de déformation par tréfilage à froid et de la température de recuit sur l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques et électriques du fil machine en cuivre et des fils en cuivre fortement tréfilés industriellement à l'entreprise ENICAB de Biskra-Algérie.

Pour atteindre cet objectif nous avons utilisé essentiellement des méthodes expérimentales telles que l'essai de traction et la mesure de la résistivité électrique.

Les principaux résultats de ce travail peuvent se résumer de la manière suivante :

- La déformation plastique par tréfilage entraîne un écrouissage du matériau qui se traduit par une augmentation de la résistance à la traction et de la résistivité électrique par contre une diminution de l'allongement à la rupture.
- Les fils tréfilés (à l'état initial) qui nous ont été fournis par L'ENICAB de Biskra, ont subi un traitement thermique d'adoucissement après le tréfilage à froid. Ce recuit permet de déclencher le mécanisme de recristallisation et de supprimer l'effet de l'écrouissage, c'est-à-dire le retour progressif des propriétés mécaniques des fils tréfilés vers un état proche de l'état initial (fil machine). Les fils en cuivre deviennent plus doux, moins résistant et plus ductile. D'autre part, ce recuit conduit à l'élimination des défauts ce qui implique la diminution de la résistivité électrique de ces fils.
- Les traitements thermiques réalisés sur les fils en cuivre étudiés à 150, 250 et 300°C, ont conduit aux résultats suivants :
 - Ces recuits provoquent le phénomène de croissance des grains. Ce phénomène est accéléré avec l'augmentation de la température.
 - Les valeurs de la résistance à la traction de l'ensemble des fils diminuent d'une manière lente en fonction de la température de recuit. Par contre, les valeurs de l'allongement à la rupture tend généralement à augmenter avec la température de recuit et se rapprochent à celle du fil machine à l'état initial.
 - Les valeurs de la résistivité électrique de l'ensemble des fils en cuivre augmentent avec la température de recuit.
 - Les valeurs de la résistivité électrique des fils tréfilés et recuits à différentes températures sont proches les unes des autres et elles sont supérieures à celles du fil machine.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] ZIDANI, M., MESSAOUDI, S., BAUDIN, T., DERFOUF, C., et MATHON, M.H., *Effet du Taux Déformation et la Température de Recuit sur la Cinétique de Recristallisation des Fils de Cuivre Tréfilés à Froid*, Journées d'Etudes Nationales de Mécanique, Ouargla, Algérie, 07-08 Mars, 2011.
- [2] BENZAADA, S., BOUZIANE, M.T., MOHAMMED, F., *Propriétés Mécaniques et électriques du câble électrique en cuivre sous l'effet des traitements thermiques*, Courrier du Savoir, N°13, Avril 2012, pp.83-88.
- [3] LAKHTINE, I., *Métallographie et traitements thermiques des métaux*, 4ème Edition, Mir Moscou ,1986.
- [4] JAKARNI, S., *Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé*, Thèse de Doctorat, Université Paris Sud – Paris XI, France, 2004.
- [5] BENZAADA, S., BOUZIANE, M.T., *Science des matériaux T2*, Edition OPU, avril 2012.
- [6] LAOUINI, A. E., *Réalisation d'un appareil de fluage des métaux*, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra ,2012.
- [7] RICHTON, T., *Dynamique et complexité de la déformation plastique*, Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [8] POMMIER, S., *Polycopié de cours sciences des matériaux L3*, Université Paris VI, 2005-2006.
- [9] PHILIBERT, J., VIGNES, A., BRECHET, Y., COMBRADE, P., *Métallurgie de minerai au matériau*, Edition Masson, Paris, 1998.
- [10] CHASTEL, Y., Chapitre XIII, *Matériaux pour l'ingénieur*, p. 109 et p. 113, 2004.
- [11] JONCK, R., *le tréfilé 39*, Stuttgart, p.47-54,1982.

- [12] BREDNDICK, B., *Fertigungstechnik 2, Verlagstechnik*, Leipzig, p.47-54, 1966.
- [13] SIMONNET, G., *tréfilage de l'acier M645*, In *Traité des matériaux métalliques, techniques de l'ingénieur*, 1996.
- [14] LEVRAU, C., *Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec des savons secs*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de paris, France, 2006.
- [15] NIN, Y., JEAN-PAUL, L., *Tréfilage des fils cuivreux ultrafins*, M646, *Techniques de l'ingénieur*, 1995.
- [16] ALIANE, I., AKKACHA, A., *Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques d'un fil de cuivre tréfilé*, Mémoire de Projet de Fin d'Études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [17] DJAVANROODI, F., SEDIGHI, M., HASHEMI, P., EBRAHIMI, M., *Equal channel angular pressing of copper wire*, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part B, journal of Engineering Manufacture*, March 11,2014.
- [18] NOVIKOV, V., *Grain growth and control of microstructure and texture in polycrystalline Materials*, CRC Press, Boca Roton, USA, P.24- 29, 1977.
- [19] MACKAY, K.E., SMITH, G.A., *Influence of Oxygen Content on the Static Recrystallization of ETP Copper*, *Trans Inst Min Metall*.Vol.75, P. 269, 1966.
- [20] BERIBECHE, A., *Comportement des fils métalliques lors d'un essai de fluage*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [21] ABDELLIOAUA, F., *Influence de la Déformation Plastique sur la Dilatation thermique des alliages à base de cuivre*, Mémoire magister, Université Mohamed Khider Biskra, P.53 ,2002.

- [22] BENCHAREF, Z., *les mécanismes de mobilité du joint de grains lors des réactions de recristallisation et de précipitation discontinue dans l'alliage mg 8% mass Al*, mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2006.
- [23] GERBER, P., *Etude des liens entre hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation Application au cuivre et ses alliages*, Thèse de doctorat, Université Paris13, France, 2002.
- [24] BENAR, J., MICHEL, A., PHILIBERT, J., TALBOT, *Métallurgie générale*, Edition Masson, 2^{ème} édition, Paris, 1991.
- [25] BAIRA, F., *Etude de l'évolution de la microstructure et la texture et des propriétés mécaniques et électriques dans les fils de cuivre tréfilés industriellement et recuits*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [26] ZIDANI, M., DENDOUGA, F., MESSAOUDI, S., BESSAIS, L., BAUDIN, T., DERFOUF, C., HELBERT, A.L., *Characteristics of copper wire drawn distended for electrical cabling by electron back scattering diffraction*, Brno, Czech Republic, EU, 15-17 Mai, 2013.
- [27] FELLAH, L., *L'effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [28] MECHERI, N., *Effet des traitements thermiques sur les propriétés des fils de cuivre industriellement tréfilés*, Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [29] BAIRA, F., ZIDANI, M., BAUDIN, T., *Etude de la texture et des propriétés mécaniques et électriques des fils de cuivre tréfilés et recuits*, international conférence on Green Energy and Environnemental Enginining, 2018, vol 39, pp.1-6.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence combinée du taux de déformation par tréfilage à froid et de la température de recuit sur l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques et électriques des fils en cuivre. Ces fils, destinés au câblage électrique, ont été fournis par l'Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB). Les méthodes de caractérisation utilisées dans le cadre de ce travail sont : l'essai de traction et la mesure de la résistivité électrique. Le processus de tréfilage provoque une modification des propriétés mécaniques et électriques des fils en cuivre. La caractérisation de l'état initial des fils tréfilés a montré que ces fils ont subi un recuit de recristallisation après le tréfilage. Ce recuit sert à éliminer les effets de l'écroutissage, il permet d'adoucir les fils, d'améliorer leur ductilité et la diminution de leur résistivité électrique. Les traitements thermiques, réalisés sur les fils étudiés à 150 250 et 300 °C, ont provoqué le phénomène de croissance des grains. Ce phénomène est accéléré avec l'augmentation de la température. Ainsi, ces traitements ont conduit à une diminution de la résistance à la traction et une augmentation de l'allongement à la rupture et de la résistivité électrique de ces fils en fonction de la température de recuit.

Mots clés : fil de cuivre, déformation par tréfilage, recristallisation, essai de traction, résistivité électrique.

Abstract

The objective of this work is to study the combined influence of deformation level by cold wire drawing and the annealing temperature on the evolution of the microstructure and the mechanical and electrical properties of copper wires. These wires, used for electrical wiring, were provided by the Enterprise Industries Cables of Biskra (ENICAB). The characterization methods used in this work are: tensile tests and electrical resistivity measurements. The process of wire drawing changes the mechanical and electrical properties of copper wires. The characterization of the initial state of the drawn wires showed that these wires were exposed to the recrystallization annealing after drawing. This annealing is used to eliminate the effects of work hardening, it has softened the wires, improved their ductility and reduced their electrical resistivity. Heat treatments of the studied wires are carried out at 150, 250 and 300 ° C which caused the phenomenon of grain growth. This phenomenon is accelerated with the increase of temperature. Also, these treatments have resulted in decrease of tensile strength and an increase of elongation at break and of the electrical resistivity of these wires as a function of the annealing temperature.

Key words: copper wire, wire drawing deformation, recrystallization, tensile test, electrical resistivity.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة التأثير المشترك لنسبة التشوه عن طريق القلذ على البارد ودرجة حرارة التلدين على تطور البنية المجهرية والخواص الميكانيكية والكهربائية للأسلاك النحاسية. تم توفير هذه الأسلاك، المخصصة للكوابل الكهربائية، من قبل مؤسسة صناعة الكوابل بسكرة (ENICAB). طرق التوصيف المستخدمة في هذا إطار العمل هي: اختبار الشد وقياس المقاومة الكهربائية. تؤدي عملية القلذ إلى تغيير في الخواص الميكانيكية والكهربائية للأسلاك النحاسية. توصيف الحالة الابتدائية للأسلاك القلوذة بينت أن هذه الأسلاك خضعت لعملية إعادة التبلور بعد عملية القلذ. هذه المعالجة الحرارية تسمح بإزالة آثار التصلب وتؤدي إلى تليين الأسلاك، تحسين ليونتها والإنقاص من مقاومتها الكهربائية. أدت المعالجات الحرارية، التي أجريت على الأسلاك المدروسة عند 150 و 250 و 300 درجة مئوية، إلى ظاهرة نمو الحبيبات. هذه الظاهرة تتسارع مع زيادة درجة الحرارة. وكذلك، أدت هذه المعالجات إلى انخفاض في مقاومة الشد وزيادة في الاستطالة عند الكسر وفي المقاومة الكهربائية لهذه الأسلاك بدلالة درجة حرارة التلدين.

الكلمات المفتاحية : سلك النحاس، التشوه بالقلذ، إعادة التبلور، اختبار الشد، المقاومة الكهربائية.