



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Réf. :

Présenté et soutenu par :

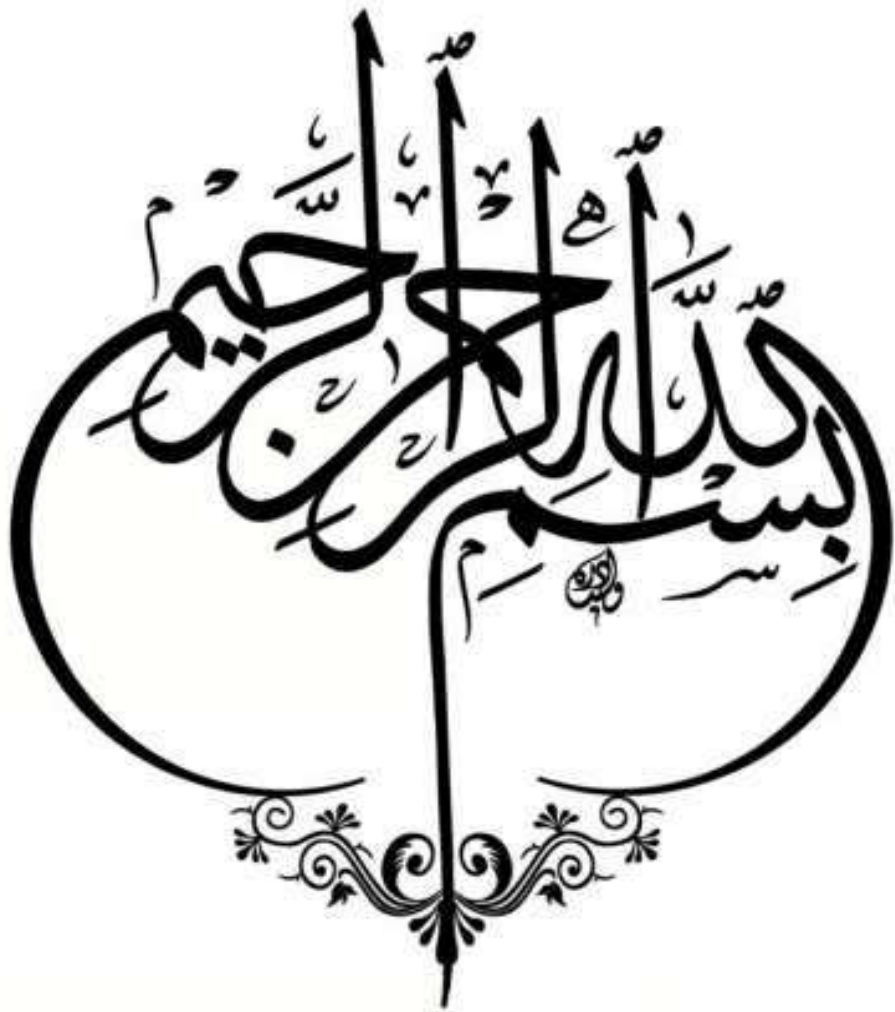
khouidem Siham

Le : dimanche 7 juillet 2019

L'effet de traitement thermique sur les propriétés des fils de cuivre

Jury :

Mlle. Smail Dalila	MAA	Université de Biskra	Président
Mme. Hamdi Ines	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mme. Digheche Kelthoum	MAA	Université de Biskra	Examineur



Dédicaces

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 tout son possible pour me voir
réussir dans ma vie, mon père*

Mes frères

Mes sœurs

A toute ma famille

Tous mes amis sans exception



Remerciement

*Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie vivement et particulièrement, mon directeur de mémoire .Mme **Hamdi Ines** Pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail, ses compétences scientifiques, sa rigueur et son soutien.*

*Mes remerciements vont également à Melle **Smail Dalila** maître assistante à l'Université de Biskra et Mme **Digheche Kelthoum** maître assistante à l'Université de Biskra d'avoir accepté de faire part de mon jury de soutenance en qualité de Président et examinateur respectivement.*

*Je remercie également Mme **Loucif Amina** , ingénieur et responsable du laboratoire de (E.N.C.A.B) Biskra et Monsieur **Zohair Sidi Brahim** et **Zine Elabidine Houili** , pour son accueil et son aide au Laboratoire de (E.N.C.A.B) Biskra .*

*Je remercie aussi Monsieur **Djeradi Farouk** , ingénieur de Laboratoire d'Hall mécanique à l'université de Biskra, pour ses conseils et son aide.*

*Je remercie également Monsieur **TRIR Boubaker**, pour son accueil au laboratoire de métallurgie de l'université de Biskra.*

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants du Départements de chimie industrielle et mes collègues de la promotion. Enfin à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale..... 02

Chapitre I : Généralité sur le cuivre

I.1.Le cuivre	04
I .1.2.Affinage du cuivre brut	04
I.1.2.1. L’affinage thermique	04
I .1.2.2. L’affinage électrolytique.....	04
I.1.3. Propriétés physiques et mécaniques	04
I.1.3.1. Caractéristiques physiques du cuivre	04
I .1.3.2.Caractéristiques mécaniques du cuivre	05
I .1.4. Alliages de cuivre	06
I .1.4.1.Cuivre faiblement allié.....	06
I .1.4.2.Cuivre fortement allié.....	07
I .1.5. Déformation plastique	08
I .1.5.1.Déformation	08
I .1.5.2.Mécanismes de la déformation plastique	08
I .1.5.3.Déformation par glissement	08
I .1.5.4.Déformation par maclage.....	10
I .1.6. Le tréfilage.....	11
I .1.6.1.Principe	11
I .1.6.2.Fabrication.....	11
I.1.7.Restauration	12
I .1.8.Recrystallisation.....	13
I.1.8.1 Germination.....	13
I.1.8.2.Croissance	13
I.1.9.Ecrouissage d’un matériau	14

I. 1.10.Essai de traction.....	15
I .1.10.1.But d’essai.....	15
I .1.10.2.Principe	15

Chapitre II : Traitements thermiques des métaux

II.1. Définition de traitements thermiques.....	17
II.1.1. Paramètre des traitements thermiques	18
II .2.Chauffage des pièces	18
II.2.1.Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques	20
II .3.Type de traitement thermique du cuivre	21
II .3.1.Les recuits	21
II .3.1.1.Application de recuit	22
II .3.1.2.Les recuits associés au cuivre	22
II .3.1.3.Le recuit d’homogénéisation	22
II .3.1.4.Le recuit de recristallisation	23
II .3.1.5.Le recuit de détente	23
II .3.2.Trempe.....	23
II 3.2.1.Les trempes sont effectuées.....	24
II .3.2.2.Milieus de trempe.....	24
II .3.2.3.La trempe et le revenu associés au cuivre	24
II .3.3.Revenu.....	24
II.3.3.1.Type de revenu.....	25
II.3.3.1.1.Revenu de relaxation ou de détente	25
II.3.3.1.2.Revenu de structure ou classique.....	25
II.3.3.1.3.Revenu durcissant (R).....	25

Chapitre III : Matériau étudié et technique expérimentales

III.1. Le tréfilage.....	27
III.1.1.La machine simple	27
III.1.2.Procédés de tréfilage à l’E.N.I.C.A.B.....	27

III.2.Choix de matériaux	28
III.3.Traitement thermique	29
III.4.Préparation des échantillons.....	29
III. 5.Méthodes expérimentales.....	30
III.5.1. Microscope optique (MO)	30
III.5.2 Analyse micro-dureté Vickers (Hv).....	31
III.6.Essais de traction	32
III.6.1.Eprouvette de traction	32
III.6.2.Application de l'essai de traction.....	33

Chapitre VI : Résultats et interprétation

IV.1.Etude métallographique	35
IV.1.1.Microscope optique de file cuivre tréfile non recuit	36
IV.1.2.Microstructure des files cuivre tréfile recuit	37
IV.2.Micro-dureté des fils de cuivre tréfilés	39
IV.2.1. Effet de la température et le temps de maintien.....	39
IV.2.2. Effet de la déformation plastique (le diamètre des fils recuits)	40
IV.2.3. Essai de traction	41
IV.2.3.1. Essai de traction pour les échantillons non recuit.....	41
IV.2.3.2. Essai de traction pour des échantillons recuit.....	42
Conclusion générale	44
Références bibliographiques.....	46

Résumé

Liste des figures

Figure I.1: Schéma illustrant la loi de Schmid	09
Figure I.2: Système de mâclage.....	10
Figure I.3 : Schéma de principe d'une filière	11
Figure I.4 : Schéma déférentes des étapes de restauration	12
Figure II.1 : Le cycle thermique de la température en fonction du temps.....	17
Figure II.2 : Chauffages de pièce.....	19
Figure II.3 : La courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce	20
Figure II.3 : Cycle combiné de traitement thermique de trempe et revenu	25
Figure III.1 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe)	27
Figure III.2: Tréfileuse de fil de cuivre	28
Figure III.3: Four de traitement thermique type Nabertherm D-280.....	29
Figure III.4 : Les différents échantillons utilisés dans cette étude	30
Figure III.5 : Polisseuse marque Buehler metaserv 250 du laboratoire (E.N.I.C.B).....	30
Figure III.6: Microscope optique de type Olympus.	31
Figure III.7 : Micro-duremètre Vickers de type HVS -1000 Z.....	32
Figure III.8: L'éprouvette des fils machine et fils tréfilés de cuivre (E.N.I.C.A.B).....	32
Figure III.9 : Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (E.N.I.C.A.B. Biskra.).....	33
Figure IV.1 : La microstructure de cuivre à l'état brut $\varnothing=8\text{mm}$	35
Figure IV.2 : La microstructure de cuivre à l'état brut $\varnothing=4.12\text{mm}$	36
Figure IV.3 : La microstructure de cuivre à l'état brut $\varnothing=2.75\text{mm}$	36
Figure IV.4 : La microstructure de cuivre section cylindrique recuit à $T=300^{\circ}\text{c}$ pendant : (a) 1h, (b) 2h ; $T=400^{\circ}\text{c}$ pendant : (c) 1h, (d) 2h ; $T=600^{\circ}\text{c}$ pendant : (e) 1h, (f) 2h	38

Liste des figures

Figure IV.5 : La microstructure de cuivre forme horizontal recuit à $T=300^{\circ}\text{C}$ pendant : (a)1h ; $T=400^{\circ}\text{C}$ pendant : (b) 1h ; $T=600^{\circ}\text{C}$ pendant :(c) 1h.....	38
Figure IV.6 : La micro-dureté Hv en fonction de la température.....	39
Figure IV.7 : Valeurs de la micro-dureté en fonction de diamètre de fil de cuivre.....	40
Figure IV.8 : Courbe essaie de traction des échantillons non recuit (a) $\varnothing=8$ mm ;(b) $\varnothing=2.75$ mm et (c) $\varnothing=1.76$ mm.	42
Figure IV.9 : Courbe essaie de traction $\varnothing=8$ mm après traitement de recuit (a)= 400°C ; (b)= 600°C	43
Figure IV.10 :Courbe essaie de traction $\varnothing=2.75$ mm après traitement de recuit (a)= 400°C ;(b)= 600°C	45
Figure IV.11 : Courbe essaie de traction $\varnothing=1.76$ mm après traitement de recuit à 400°C ...	45

Liste de tableau

Tableau I.1: Principales propriétés physiques et mécaniques des divers cuivres industriels non alliés.....	05
Tableau I.2 : Principaux systèmes de glissement observés.....	09
Tableau II.1 : Type de recuit.....	21
Tableau II.2 : Les conditions pratiques de réalisation du recuit d'homogénéisation.....	22
Tableau II.3 : Les conditions pratiques de réalisation du recuit de recristallisation.....	23
Tableau III.1 : Composition chimique du fil de cuivre (massique %).....	28
Tableau III.2 : Caractéristiques physiques du fil de cuivre.....	28
Tableau IV.1 : Les valeurs de la micro-dureté en fonction de la température.....	39
Tableau IV.2 : valeurs de la micro-dureté en fonction de diamètre de fils de cuivre.....	40
Tableau IV.3 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés non recuit.....	41
Tableau IV.4 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés recuit à 400°C.....	43
Tableau IV.5 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés recuit à 600°C.....	43

Introduction Générale

Introduction générale

Aujourd'hui, le cuivre c'est un métal très important dans le domaine industriel et il est l'objet de plusieurs travaux de recherches scientifiques. Leurs excellentes propriétés mécanique et électrique ont permis de l'utiliser dans différents domaines ; l'industrie d'automobile, le câblage électrique.

Généralement, Le tréfilage est une technique industrielle consiste en un allongement de la matière ; la mise en forme par déformation plastique à froid ou bien à chaud provoque la dégradation de la propriété physique, mécanique, et électrique des matériaux.

D'où les traitements thermiques est une méthode qui joue un rôle très important pour l'amélioration des propriétés mécanique et physique des matériaux.

Dans cette étude nous intéressons d'étudier les fils électriques en cuivre pur à 99,99 %, qui possèdent des propriétés mécaniques intéressantes. Ces fils sont utilisés par l'entreprise nationale de câblerie électrique de Biskra (E.N.I.C.A.B). On a étudié l'effet de traitement thermique et le temps de maintien sur l'évolution des propriétés mécaniques et les caractéristiques de restauration et de recristallisation de fil machine et fils tréfilé. Pour réaliser ce travail les techniques expérimentales ont été nécessaires pour mener à bien cette étude. Les techniques utilisées sont : la microscopie optique, la micro-dureté, Essai mécanique de traction.

En plus d'une introduction où on présente l'objectif de notre travail, d'une résumé l'essentiel des résultats, le thème comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre : est un aperçu général sur le métal de cuivre.

Le deuxième chapitre : nous présentons des études sur les traitements thermiques des métaux dont l'objectif de connaître leurs effets sur les propriétés physiques et mécaniques.

Le troisième chapitre : décrit le matériau étudié, la procédure expérimentale et les techniques de caractérisations.

Le quatrième chapitre : Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

Et enfin l'étude se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le cuivre

I.1.Le cuivre

Le cuivre est un élément chimique du 1^{er} groupe de la classification de médaillée, son numéro atomique est 29, sa masse atomique 63,54 g/mol. Le cuivre est métal rouge à cassure rose. La température de sa fusion : 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. Le cuivre possède les plus grandes conductibilités thermique que est électrique (à l'exception de l'argent). La résistivité électrique du cuivre est 0.0178 ohm.mm²/m [1].

I .1.2.Affinage du cuivre brut

I.1.2.1. L'affinage thermique

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

On obtient alors un cuivre de qualité thermique titrant à 99.5%, qui contient encore 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.

I .1.2.2. L'affinage électrolytique

Permet d'obtenir du cuivre d'une pureté supérieure à 99,95%. Le cuivre brut, coulé en anodes sous forme de plaques est électrolysé dans une solution de sulfate de cuivre acide. Le cuivre pur se dépose sur des cathodes qui sont refondues ultérieurement en lingot [2].

I.1.3. Propriétés physiques et mécaniques

I.1.3.1. Caractéristiques physiques du cuivre

Le cuivre est le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité après l'argent (6 %), d'où son usage comme chaudière à évaporer, serpentins, 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.

I.1.3.2. Caractéristiques mécaniques du cuivre

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'écroute 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'écroutissage, mais on peut également effectuer le travail à chaud de manière que le recuit compense l'écroutissage. Un fort retrait rend mauvaises, ses propriétés de fonderie. Le cuivre se prête bien au brasage et fondage 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 [3].

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

Element 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	20°C	400
	100°C	385

(en W/(m.K))	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		
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
<i>L'état de recuit signifie 0% d'écrouissage : état AFNOR O ¼ dur : 10% d'écrouissage : état AFNOR H11 ½ dur : 25% d'écrouissage : état AFNOR H12 ¾ dur : 50% d'écrouissage : état AFNOR H14 Rp_{0,2} limite élastique à 0,2% d'allongement R_m résistance mécanique</i>					

I.1.4. Alliages de cuivre

I.1.4.1. Cuivre faiblement allié

Aux teneurs employées (généralement 1 % au maximum), toutes ces additions (Ag, P, As, B, Te, Cd, Sn ou Mg), à l'exception du tellure, sont et restent solubles dans le cuivre de base : elles sont employées pour améliorer une propriété spécifique d'usage [5].

➤ **Cuivre à l'argent (0,08 %)**

Température de recristallisation plus élevée, tenue au fluage améliorée.

➤ **Cuivre au cadmium (0,7 à 1 %)**

Propriétés mécaniques très augmentées par rapport au Cu pur. Applications : fils et ressorts conducteurs (Exemples : « bronzes téléphoniques » pour les lignes électriques : Cu – Cd1 Sn 0,15 ou Cu – Cd 0,9 Sn 0,4).

➤ **Cuivre au tellure (0,3 à 0,7 %)**

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

➤ **Cuivre au chrome (0,5 à 0,9 %)**

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

➤ **Cuivre au béryllium (2 %)**

Alliage à durcissement structural, à propriétés mécaniques très élevées conservées jusqu'à 300°C. Nombreuses applications en électromécanique (variante Cu – Co 2,5 Be 0,5, à résistance mécanique plus faible, mais conductivité plus élevée) [6].

I.1.4.2. Cuivre fortement allié

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

- ✓ **Les laitons** : composés de cuivre et de zinc (Cu-Zn).
- ✓ **Les bronzes** : composés de cuivre et d'étain (Cu-Sn) et d'autres éléments parmi lesquels peut être le zinc mais combiné à d'autres éléments.

Les alliages de cuivre sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et technologiques et une bonne tenue à l'usure et à la corrosion [3].

- **Laitons**

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

- **Bronzes**

Il s'agit des alliages de cuivre et d'étain et des alliages ternaires cuivre, étain, zinc. La dénomination bronze est parfois abusivement employée pour désigner d'autres alliages tels que les cupro-aluminiums et les cuivres au béryllium.

- **Cupro-aluminiums**

Ce sont les alliages de cuivre et d'aluminium contenant de 4 à 14 % d'aluminium et la plupart du temps des additions de fer, nickel ou manganèse qui améliorent leurs propriétés.

- **Cupro-nickels**

Le nickel est soluble en toutes proportions dans le cuivre. En pratique, les alliages de cuivre et de nickel contiennent de 5 à 44 % de nickel et certains autres éléments comme le fer, l'aluminium, le manganèse et le silicium [7].

I .1.5. Déformation plastique

I .1.5.1. Déformation

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) [8].

I .1.5.2.Mécanismes de la 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. Le déclenchement d'un mécanisme ou de l'autre dépend du matériau et les conditions expérimentales de la déformation [9].

I .1.5.3.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.2 présente quelques-uns des principaux systèmes de glissement observés.

Tableau I.2 : Principaux systèmes de glissement observés.

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

La (figure I.1) schématise un échantillon monocristallin soumis à une force \mathbf{F} en traction simple : seule la composante projetée sur un système de glissement activable peut induire une déformation plastique. D'après les notations de la (figure I.1), la scission résolue σ sur un plan de glissement donné et dans la direction de glissement a pour expression :

$$\sigma = \frac{F}{s_0} \cos \lambda \cos \mu \quad (\text{I.1})$$

Le terme $(\cos \lambda \cos \mu)$ est appelé facteur de Schmid pour le système de glissement considéré. Il permet de calculer la contrainte macroscopique nécessaire à l'activation d'un système de glissement en fonction de la direction de l'effort appliqué [10] :

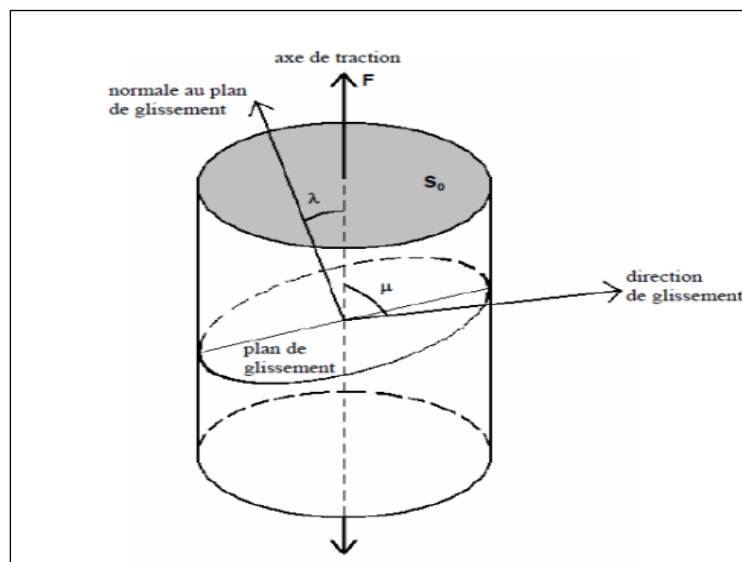


Figure I.1: Schéma illustrant la loi de Schmid [10].

I.1.5.4. Déformation par maclage

Le mûclage 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.2). Il s'agit d'une opération qui requiert d'importantes concentrations de contrainte. Le glissement et le mûclage sont les deux principaux mécanismes permettant d'accommoder la déformation plastique, mais alors que le glissement produit des déplacements qui sont des multiples entiers de la distance interatomique, lors du mûclage, les atomes se déplacent de moins d'une distance interatomique. De plus, ce déplacement coordonné des atomes induit une désorientation cristallographique de la région mûclée par rapport au reste du cristal. Toutefois, les mécanismes de mûclage peuvent aussi s'interpréter à partir du mouvement des dislocations, en considérant le déplacement de dislocations partielles. En changeant localement l'orientation du cristal, le mûclage est susceptible d'autoriser l'activation de nouveaux systèmes de glissement. Par conséquent, l'importance du mûclage sur la déformation totale est particulièrement marquée dans les matériaux où le nombre de systèmes de glissement est réduit, comme ceux de structure hexagonale compacte [10].

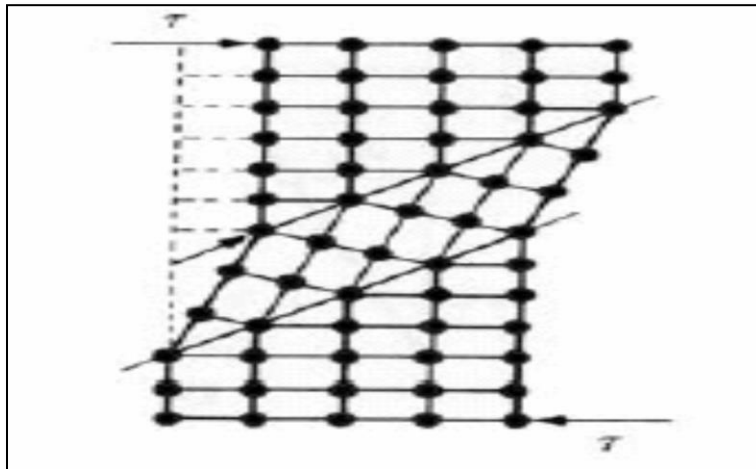


Figure I.2: Système de mûclage [10].

I.1.6. Le tréfilage

C'est une opération qui consiste à déformer un métal par traction pour le transformer en fils. Pour cela, on fait passer dans une filière de forme et de dimensions déterminées, le métal qui se déforme plastiquement, et en le faisant passer dans des filières de plus en plus étroites, il est possible de lui imposer un allongement total très supérieure à celui obtenu par traction simple sans passage dans une filière. Les filières sont en aciers où en chrome et pour les fils fins en diamant.

I.1.6.1.Principe

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique en forçant son passage dans une filière, le métal s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. La filière forme un cône de demi-angle au sommet appelé «angle de filière ». Du fait de la symétrie axiale du procédé, la déformation est dite axisymétrique [11].

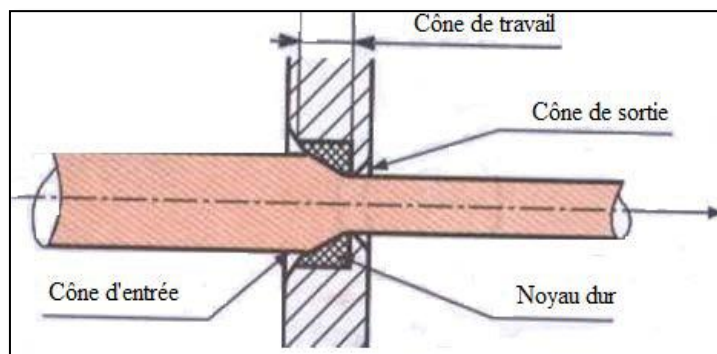


Figure I.3 : Schéma de principe d'une filière [11].

I.1.6.2.Fabrication

Les fils de cuivre sont fabriqués à partir d'ébauches laminées à chaud (8 mm environ) dites fil machine.

❖ Machines à tréfiler

Le tréfilage du cuivre est habituellement effectué sur des machines à tréfiler multiples. Celles-ci peuvent être :

- **Sans glissement** : ce qui peut être obtenu de deux manières différentes
 - ✓ En accumulant du fil sur chaque cabestan ;
 - ✓ En n'en accumulant pas mais en asservissant la vitesse des cabestans les uns par rapport aux autres ;
- **À glissement** (moins chères que les précédentes et convenant bien au cuivre) [12].

I.1.7. Restauration

Pendant la restauration, une partie de l'énergie de déformation interne emmagasinée est libérée avec le déplacement des dislocations (en l'absence d'une contrainte d'origine extérieure). par suite d'une augmentation de la diffusion atomique à haute température .le nombre de dislocation diminue et certaine des configurations de dislocations.

Au cours de traitement de restauration, la position des joints de grains ne varie pas. Ce processus ne change pas encore le comportement mécanique car les propriétés mécaniques sont peu sensibles aux défauts ponctuels. La figure I.4 présente des étapes de ces modifications .dans beaucoup de cas, selon le type de matériau et la déformation appliquée .certaines de ces étapes se produisent pendant la déformation par restauration dynamique [13].

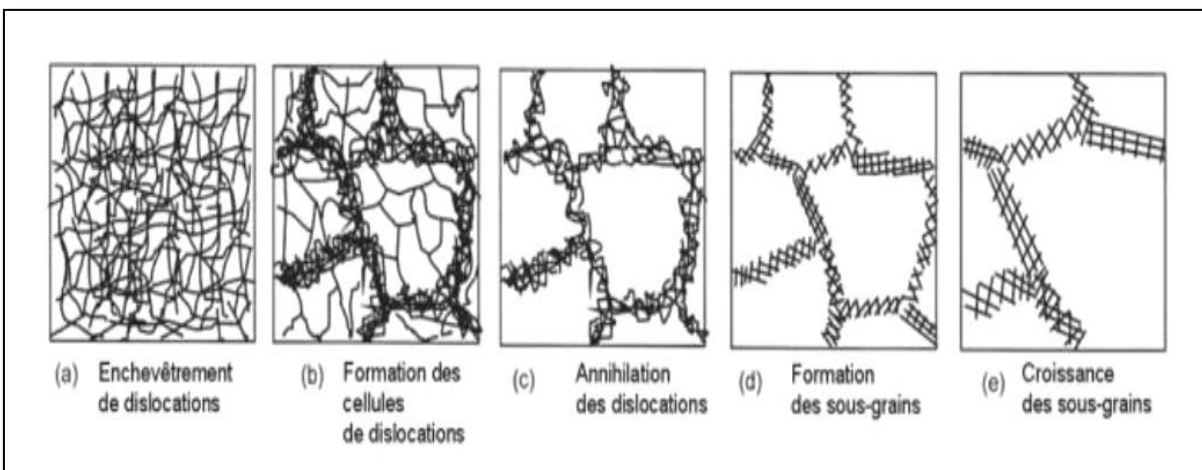


Figure I.4 : schéma déférentes des étapes de restauration [13].

I.1.8.Recrystallisation

La recristallisation correspond à la formation de nouveaux grains dans un matériau déformé et à la migration de joints de grains de forte désorientation dont la force motrice est principalement l'énergie de déformation stockée. La recristallisation primaire est habituellement divisée en deux stades : la germination et la croissance des germes dans la matrice écrouie. La vitesse de recristallisation (volume recristallisé par unité de temps) s'écrit :

$$V=N.G \quad (I.2)$$

Où N est le nombre de nouveaux germes par unité de temps et G leur vitesse de croissance volumique. Comme ces deux quantités dépendent du temps, la cinétique de recristallisation n'est pas une fonction simple du temps. Expérimentalement, le problème consiste à mesurer séparément N et G [4].

I.1.8.1. 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 [14].

I.1.8.2. Croissance

Les germes étant formés, le processus de recristallisation se poursuit 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 [15].

I.1.9. Ecrouissage d'un matériau

L'écrouissage se traduit par le durcissement d'un métal ou d'un alliage provenant de la déformation plastique, il correspond à une modification structurale.

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne, ces évaluations de propriétés et de microstructure, appelées écrouissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécanique.

Dans le premier cas, l'écrouissage a lieu façon très local au fond de la fissure dans un matériau endommagé par exemple, et permet d'absorber l'énergie de sollicitation mécanique.

Dans le deuxième cas, c'est l'ensemble du matériau subissant l'opération de mise en forme par grandes déformations plastiques qui sont susceptible de s'écrouir. L'écrouissage dépend du matériau, de la quantité de déformation appliquée et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En particulier, on distingue la déformation à froid (température inférieur à environ 1/3 de la température absolue de fusion) et la déformation à chaud ($T_{\text{déf}} > T_f/3$). Généralement on peut dire que l'écrouissage engendre une augmentation des caractéristiques de ductilité (allongement, striction...). L'écrouissage est produit par une déformation effectuée au-dessous de la température de recristallisation. Le plus souvent obtenu à

froid, un durcissement par déformation est possible à chaud mais largement réduit par la restauration et la recristallisation [16].

I. 1.10.Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant [17].

I.1.10.1.But d'essai [7]

Ces essais permettent de tracer une courbe de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :

- ✓ La déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire, connaissant les dimensions de l'éprouvette.
- ✓ La limite élastique souvent notée R_e , ou bien la limite d'élasticité à 0,2% $R_{e0,2}$.
- ✓ La déformation plastique.
- ✓ La résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée R_r .

I.1.10.2.Principe

L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 , et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement $\Delta L=L-L_0$. [7].

Chapitre II

Généralité des Traitements Thermiques

II.1. Définition de traitements thermiques

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [18].



Figure II.1 : Le cycle thermique de la température en fonction du temps [18].

II.1.1. Paramètre des traitements thermiques

Les principaux paramètres des traitements thermiques sont, pour un alliage de composition et pureté données, la température et le temps (température maximale, durée de maintien, vitesse de refroidissement).

- **La température :** à une influence essentielle (exponentielle) sur la vitesse de diffusion à l'état solide. Une température élevée permet l'homogénéisation des compositions par réduction des ségrégations de fonderie. Elle permet également la réduction des contraintes résiduelles et la recristallisation.
- **La durée de maintien :** du produit aux températures élevées est, en général, peu critique, le principal problème étant alors que le produit ait le temps d'atteindre dans sa masse la température visée. Par contre, pour les températures moins élevées, un temps long et même très long est souvent nécessaire pour permettre la diffusion et obtenir l'équilibre.
- **La vitesse de refroidissement :** Une vitesse très lente de refroidissement permettra à l'équilibre atteint à haute température d'évoluer en fonction du diagramme d'équilibre. Au contraire, une grande vitesse de refroidissement ne le permettra pas et l'on conservera à la température ambiante, à l'état Métastable, les phases obtenues à température élevée [19].

II .2.Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

Par transmission de la chaleur On distingue trois possibilités :

- **Par conductibilité :** La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.
- **Par convection :** Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.
- **Par rayonnement :** La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement.

▪ **Par production de la chaleur dans la pièce**

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction) comme la montre les figures II.2

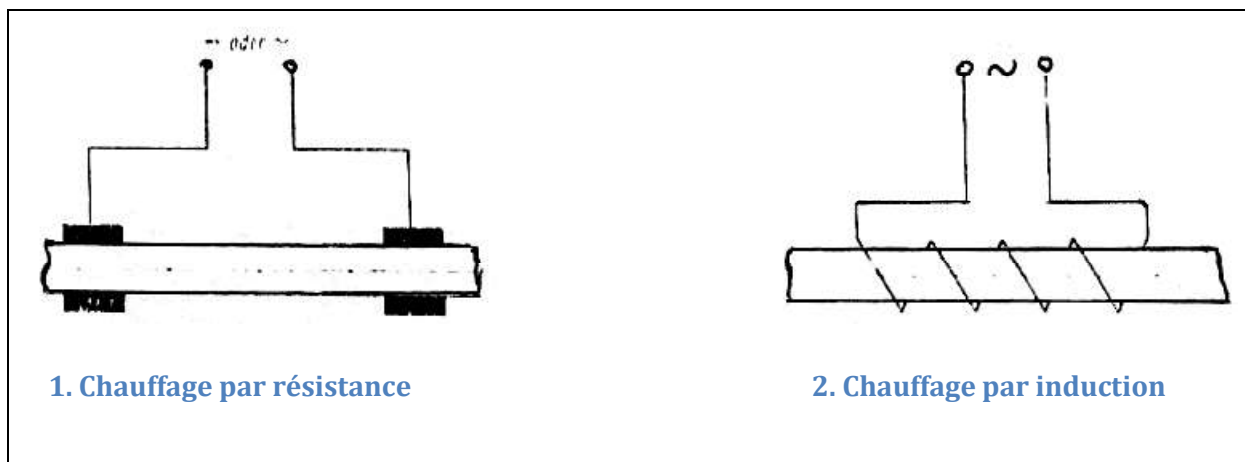


Figure II.2 : Chauffages de pièce.

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

- **Durée de préchauffage :** C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit atteinte à la surface de la pièce.
- **Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation :** C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.
- **Durée de maintien :** C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

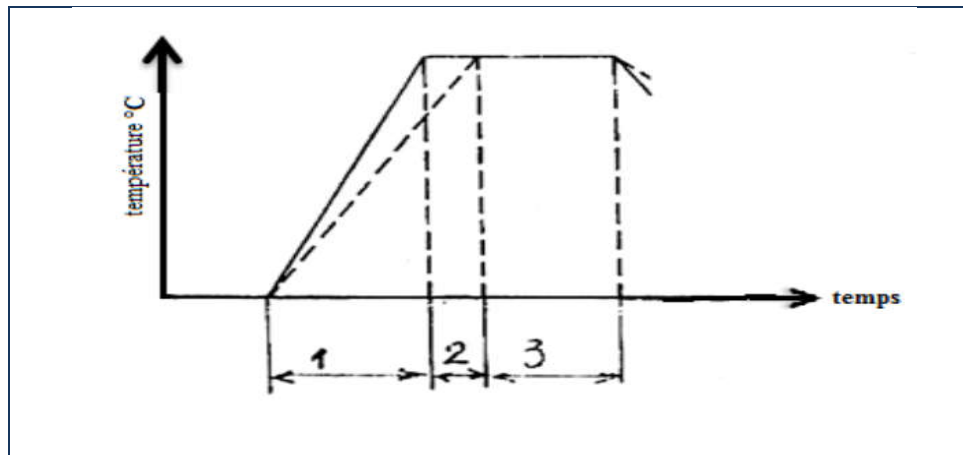


Figure II.3 : la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce.

II.2.1. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'appareil de chauffage doit permettre :

- ✓ D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température déterminée et avec une précision de l'ordre de plus ou moins 5°C.
- ✓ D'éviter une dénaturation du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.
- ✓ De présenter des possibilités de préchauffage lorsque la température à atteindre est élevée.

En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée [20].

II .3.Type de traitement thermique du cuivre

Divers traitements thermiques classiques, tels que les recuits, la trempe, le revenu s'appliquent au cuivre et à ses alliages qui se présentent généralement sous forme de produits moulés ou formés à froid ou à chaud. Ces traitements ont pour but de :

- Rétablir l'équilibre physico-chimique de l'alliage (recuits d'homogénéisation, de recristallisation et de détente);
- Donner à l'alliage les caractéristiques optimales de ses propriétés mécaniques (trempe et revenu).

II .3.1.Les recuits

Un recuit est traitement thermique comportant un chauffage et un maintien à une température voisine d'AC₁ ou supérieure à AC₃, suivi d'un refroidissement ambiant, le métal soit dans un état structural proche de l'état d'équilibre stable.

II .3.1.1.Application de recuit

- ✓ Eliminer les contraintes résiduelle sur une pièce mécano-soudée, moulée ou usinée en acier, fonte, alliage, d'aluminium ou autres matériaux : recuit de dimensionnement, de stabilisation ou relaxation.
- ✓ Supprimer l'écrouissage sur une pièce découpée ou mise en forme par déformation à froid (recuit de recristallisation).
- ✓ Adouci un matériau par modification de sa structure : recuit d'adoucissement, recuit isotherme d'un acier allié.
- ✓ Homogénéiser la répartition des constituants à l'échelle de la structure micrographique (recuit d'homogénéisation).
- ✓ Affiner le grain : recuit de régénération.
- ✓ Dissoudre les carbures dans une font grise lamellaire ou à graphique sphéroïdal (recuit de diffusion).

Tableau II.1 : Type de recuit.

Type de recuit	Traitement associés au nom de recuit dans le langage pratique
Recuit d'adoucissement	Dimensionnement
Recuit blanc	Stabilisation
Recuit de globalisation ou de sphéroïdisation	Relaxation
Recuit de grossissement du grain	Normalisation (traitement de référence des aciers)
Recuit d'homogénéisation	Recristallisation (application aux alliages écrouis)
Recuit isotherme	Ferritiastion (application aux fontes)
Recuit de malléabilisation	Restauration (application aux alliages légers)
Recuit de régénération ou d'affinage structural	Graphitisation (application aux fontes)
Recuit complet	Globalisation (application aux aciers)

II .3.1.2.Les recuits associés au cuivre

Selon le but visé, il faut considérer différents types de recuits pratiqués industriellement tels que celui d’homogénéisation, de recristallisation et de détente.

II .3.1.3.Le recuit d’homogénéisation

Le recuit d’homogénéisation s’opère après la coulée sur des pièces brutes ou sur des lingots destinées à subir ultérieurement un formage par déformation mécanique à froid ou à chaud.

Les effets de ce traitement sont :

- Une diminution de la dureté (H);
- Une augmentation de la résilience (K);
- Une augmentation du pourcentage d’allongement (% A) ;

Tableau II.2 : Les conditions pratiques de réalisation du recuit d’homogénéisation du cuivre.

Type d’alliage	Température d’homogénéisation	Durée du maintien
Bronze (8 à 12% Sn)	700 °C à 750 °C	0,5 à 2 heures
Cupro-nickel	800 °C à 900 °C	1 à 2 heures

II .3.1.4.Le recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation a pour but la formation et la croissance de nouveaux cristaux qui modifient profondément la structure d’écrouissage. Les propriétés mécaniques d’un alliage cuivreux, soumis à déformation mécanique à froid, sont particulièrement modifiées par écrouissage. On peut observer :

- Une augmentation de la dureté (H) ;
- Une augmentation de la résistance maximale en traction (Rm);
- Une augmentation de la limite d’élasticité (Re);
- Une diminution du pourcentage d’allongement (% A);
- Une diminution de la résilience (K).

Le but du recuit de recristallisation est de redonner au matériau les propriétés mécaniques qu’il a perdu par écrouissage.

Le cycle du recuit de recristallisation pour le cuivre est le suivant :

- Un chauffage rapide pour favoriser la formation de petits grains;
- Un maintien à la température de recristallisation pendant une durée de 30 minutes à 2 heures;
- Un refroidissement à l'eau ou à l'air selon le type d'alliage de cuivre ;

Tableau II.3 : Les conditions pratiques de réalisation du recuit de recristallisation du cuivre.

Type d'alliage	Température de recristallisation
Cuivre électrolytique	375 °C à 600 °C
Bronze à moins de 8% Sn	500 °C à 675 °C
Laiton (Cu-Zn)	450 °C à 700 °C
Cupro-aluminiums	600 °C à 700 °C
Cupro-nickel	680 °C à 875 °C

II .3.1.5.Le recuit de détente

Des contraintes résiduelles favorisent ultérieurement la formation de fissures dans les pièces obtenues par déformation à froid. Le recuit de détente, s'opérant à basse température généralement comprises entre 150 °C et 300 °C, pendant une durée de 1 à 2 heures, permet d'éliminer ces contraintes internes [18,19 et 21].

II .3.2.Trempes

Le rôle d'une trempe est généralement, à l'inverse des recuits, de permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique Les différentes trempes sont fondées sur les principes suivants:

- ✓ Conserver à plus basse température une phase qui n'est stable qu'à plus haute température et qui, lors d'un refroidissement suffisamment rapide, n'a pas le temps d'évoluer vers la structure d'équilibre ;
- ✓ Éviter certaines transformations conduisant à des structures d'équilibre, qui n'ont pas le temps de se produire au cours du refroidissement trop rapide, ce qui favorise alors d'autres transformations conduisant à des structures le plus souvent hors d'équilibre.

II 3.2.1.Les trempes sont effectuées

Conserver un élément en sursaturation pour augmenter la résistance mécanique ou préparer un durcissement ultérieur par revenu, ce qui est la base du traitement de durcissement par précipitation d'un grand nombre d'alliages ;

Obtenir une phase hors d'équilibre aux propriétés plus favorables que la structure d'équilibre, soit par conservation de la phase initiale (austénite retenue par hypertrempe d'un acier inoxydable, par exemple) [22].

II .3.2.2.Milieux de trempe

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- ✓ Gazeux : air, gaz (N_2 , Ar, H_2 , He, etc.);
- ✓ Liquide : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant);
- ✓ Mixte : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent) [23].

II .3.2.3.La trempe et le revenu associés au cuivre

Le durcissement des alliages cuivreux peut s'effectuer de deux manières, la trempe par formation de martensite ou la trempe par dissolution d'un constituant à l'état liquide.

Le cycle de revenu dans le cuivre

- ✓ Un chauffage à une température comprise entre 200 °C et 500 °C;
- ✓ Un maintien à cette température pendant une durée de 3 à 4 heures;
- ✓ Un refroidissement à l'eau ou à l'air. Refroidissement rapide par trempe à l'eau [18].

II .3.3.Revenu

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et (A%), K d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal. Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu [24].

Le revenu est un traitement thermique effectué essentiellement après trempe. Il consiste en

- ✓ Un chauffage à une température T_R en dessous de la température $A C_1$;
- ✓ Un maintien isotherme à la température T_R de durée t_R ;
- ✓ Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement;

Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre [25].

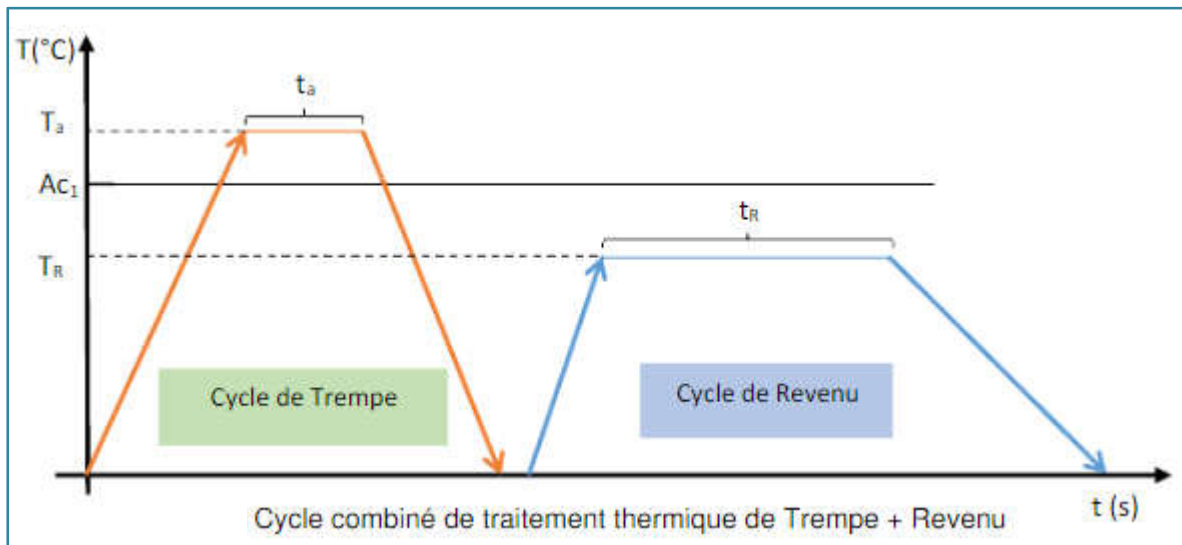


Figure II.3 : Cycle combiné de traitement thermique de trempe et revenu [25].

II.3.3.1. Type de revenu

II.3.3.1.1. Revenu de relaxation ou de détente

Il s'effectue entre 180°C et $220^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes dues à la trempe. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle.

II.3.3.1.2. Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 450°C et Ac_1 . On observe une augmentation des caractéristiques K , $A\%$ et Z et une diminution plus importante de H , R_m , et Re . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [26].

II.3.3.1.3. Revenu durcissant (R)

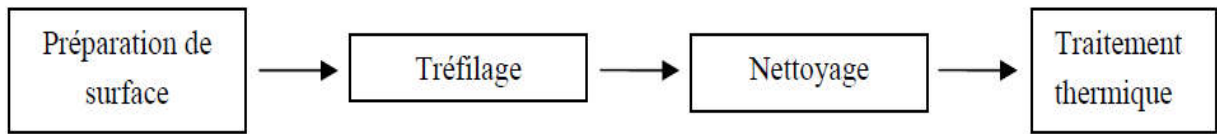
Est une opération dans laquelle la température joue le rôle essentiel, la durée n'étant pas en général très critique, (R) appelé aussi vieillissement (aging) ou traitement de précipitation, généralement entre 300°C et 500°C selon les alliages, pour des durées de 30min à 4 h [19].

Chapitre III

Choix des matériaux et méthodes des caractérisations

III.1. Le tréfilage

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires :



III.1.1. La machine simple

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception (figure III.1).

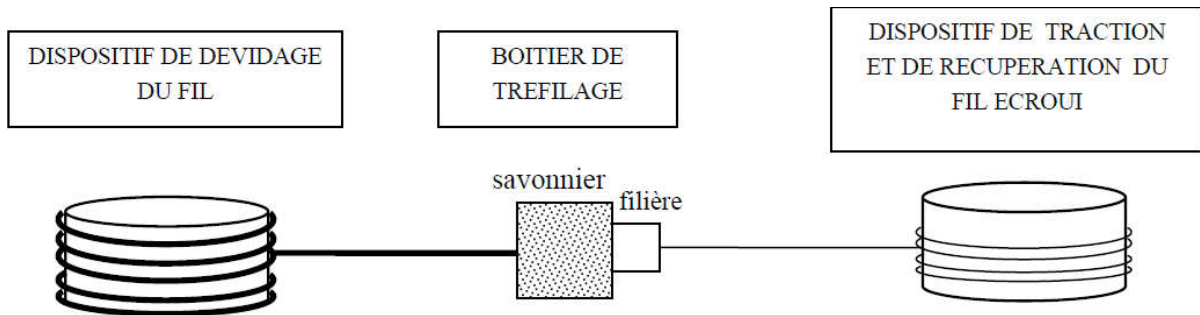


Figure III.1 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe) [27].

III.1.2. Procédés de tréfilage à l'E.N.I.C.A.B

La fabrication des fils souhaités, exige de faire passer les fils à plusieurs bancs de tréfilage multi passes (selon un ordre donné) et qui sont de trois modes :

- Banc multiple continu.
- Banc multiple à accumulation.
- Banc multiple à glissement [11].

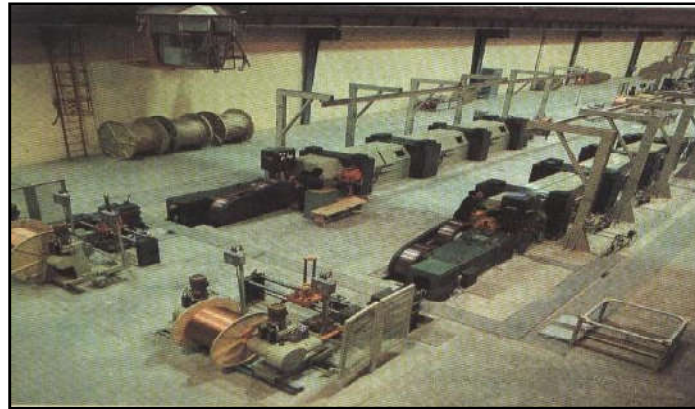


Figure III .2: Tréfileuse de fil de cuivre [11].

III.2.Choix de matériaux

Pour réaliser cette étude nous avons opté pour le cuivre pur à 99.99% sous forme de fil machine $\varnothing=8\text{mm}$ et fils trèfles $\varnothing=1.76\text{ mm}$, 2.75 mm , 4.12 mm . Utilisé dans l'industrie de câble à l'entreprise (E.N.I.CA.B) Biskra. Le tableau III.1 présente la composition chimique du fil machine, et le tableau 2 présent les caractéristiques physiques de ce matériau.

Tableau III.1 : Composition chimique du fil de cuivre (massique %) [11].

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 III.2 : Caractéristiques physiques du fil de cuivre. [Fiche technique (E.N.I.CA.B)].

Diamètre du fil machine (mm)	L'allongement A (%)	Conductivité thermique (watt/degré)	Conductivité électrique IACS%	Résistance à la traction (N/mm^2)
8 (\mp 0.38)	40	8.3	101	230

III.3. Traitement thermique

Le traitement thermique des échantillons ont été réalisés dans un four électrique programmable est de type « Nabertherm D-2804 » figure (III.3).

Les échantillons sont homogénéisés à température 900°C pendant 30 min et trempés à l'eau après homogénéisation, la température de recuit appliquée aux échantillons $\varnothing=4.12$ mm est de T : 300 °C, 400 °C, 600 °C ; Pendant des temps qui sont : 1h et 2h. L'échantillon $\varnothing=1.76$, 2.75mm c'est la même température mais pour un temps 1h ensuite il refroidit à l'air libre.

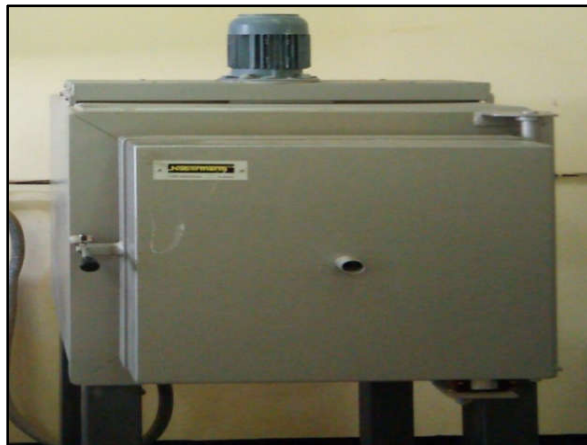


Figure III.3: Four de traitement thermique type Nabertherm D-2804.

III.4. Préparation des échantillons

Pour les observations au microscope optique, les échantillons (figure III.4) sont polis sur une polisseuse mécanique de type Buehler metaserv 250 (figure III.5) du laboratoire physique de la câblerie de Biskra (E.N.I.C.B) et de type Buehler Phoenix Alpha du laboratoire métallurgie avec papiers abrasifs de différentes granulométries du 230, 600, 800, 1000, 1200, puis polis sur le tissu feutré avec addition du lubrifiant et de la patte diamantée. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée, séchés, puis attaqués chimiquement par le réactif suivant: acide nitrique (HNO_3) 96 % pendant 2 et 3 sec.

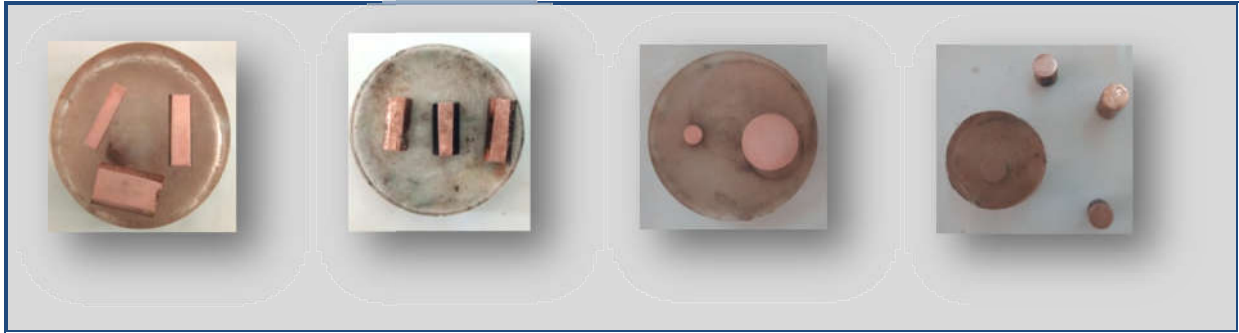


Figure III.4 : les différents échantillons utilisés dans cette étude.



Figure III.5 : Polisseuse marque Buehler metaserv 250 du laboratoire (E.N.I.C.B).

III. 5.Méthodes expérimentales

III.5.1. Microscope optique (MO)

Nous avons utilisé le microscope optique pour suivre l'évolution de la microstructure des échantillons. L'appareil utilisé est un microscope optique de type Olympus figure (III.6) du laboratoire de métallurgie du département de Génie Mécanique à l'université de Biskra. Contenant objectifs : x 20, x 50, x 100, x 120 ; et équipé d'un appareil photo numérique. Cette technique nous permet ainsi d'observer la morphologie des grains durant chaque stade (tréfilage, traitement thermique).



Figure III.6: Microscope optique de type Olympus.

III.5.2. Analyse micro-dureté Vickers (Hv) :

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la déformation, sa mesure est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un pénétrateur, sous l'action d'une charge appliquée. La dureté est le rapport de la force appliquée F à la surface en cours S de l'empreinte.

$$H = F/S \quad (III.1)$$

Nous avons utilisé un micro-duremètre Vickers de type HVS -1000 Z (figure III.7), équipé d'un oculaire pour permettre de positionner l'empreinte, qui est nécessaire pour déterminer HV à partir d'un double clique sur le bouton de HV de l'appareil, où bien à l'aide de la formule suivante :

$$Hv = 1854.4 P/d^2 \quad (III.2)$$

P : charge appliquée.

d : longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode de Vickers et sous une charge de 200g. Chaque mesure correspond à une moyenne de 3 points et ce ci d'après la norme française AFNOR [28].



Figure III.7 : Micro-duremètre Vickers de type HVS -1000 Z [29].

III.6.Essais de traction

III.6.1.Eprouvette de traction

On a réalisé cet essai pour deux types des échantillons ; le premier type c'était de fils de cuivre tréfilés ($\varnothing=8$ mm, $\varnothing=2.75$ mm et $\varnothing=1.76$ mm) non recuit, et le deuxième type c'était de fils de cuivre tréfilés ($\varnothing=8$ mm, $\varnothing=2.75$ mm et $\varnothing=1.76$ mm) recuit à 400°C et 600°C , la longueur initiale L_0 de 50mm (Figure III.8).



Figure III.8: L'éprouvette des fils machine et fils tréfilés de cuivre (E.N.I.CA.B).

III.6.2. Application de l'essai de traction

Des essais de traction sont réalisés à la température ambiante sur des fils machine $\varnothing=8\text{mm}$ de cuivre et fils tréfilés $\varnothing=1.76\text{mm}$, 2.75mm avec une vitesse de déplacement de 2mm/min . Les essais sont effectués au niveau du laboratoire physique de la câblerie de Biskra, sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100 (figure III.9), dotée d'une capacité de mesure 100 Kg et de longueur à propos ($L_0 = 50\text{ mm}$).



Figure III.9 : Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (E.N.I.C.A.B. Biskra.).

Chapitre IV

Résultats et interprétation

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons déterminer l'effet de température et le temps sur les propriétés d'un fil de cuivre 99.99%.

Les résultats expérimentaux rapportés dans ce chapitre, sont obtenus par différentes techniques expérimentales ; le microscope optique, l'essai de traction, et la mesure de micro duret Hv.

IV.1. Etude métallographique

IV.1.1. Microscope optique de file cuivre tréfile (non recuit)

Les figures IV.1.2 et 3 présentent la microstructure d'un fil de cuivre durant le tréfilage à froid ($\varnothing=8\text{mm}$, 4.12mm et 2.75mm). Ces figures illustrent des particules qui ont des formes et tailles différentes les grains obtenus sont de taille très hétérogènes et plus fins.

D'après ces figures on peut constater que les grains s'allongent avec l'augmentation du taux de déformation, suivant l'axe de tréfilage.

IV.1.1.1. Echantillon de $\varnothing=8\text{mm}$

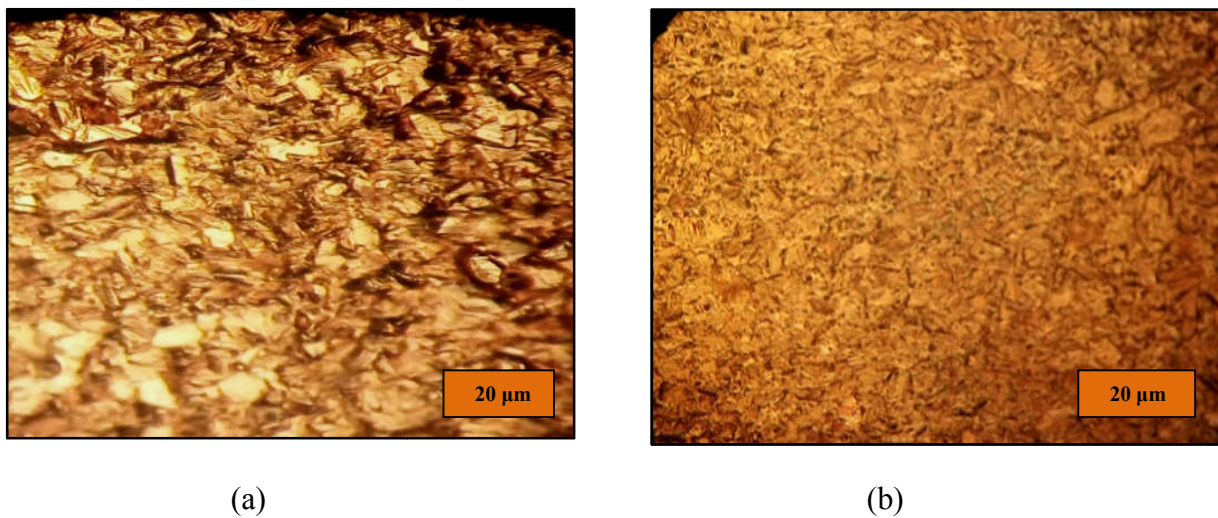
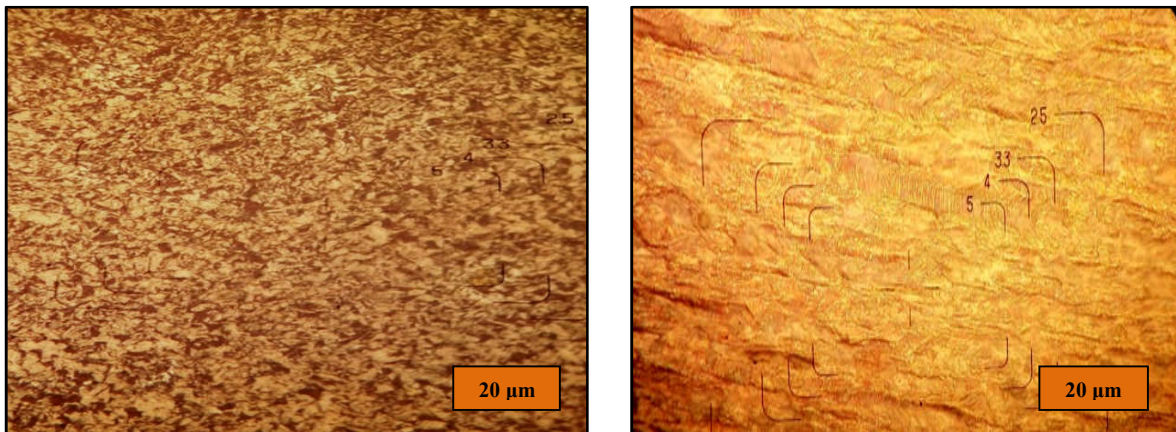


Figure IV.1 : La microstructure de cuivre (a) section cylindrique, (b) forme horizontal.

IV.1.1.2. Echantillon de $\varnothing=4.12\text{mm}$

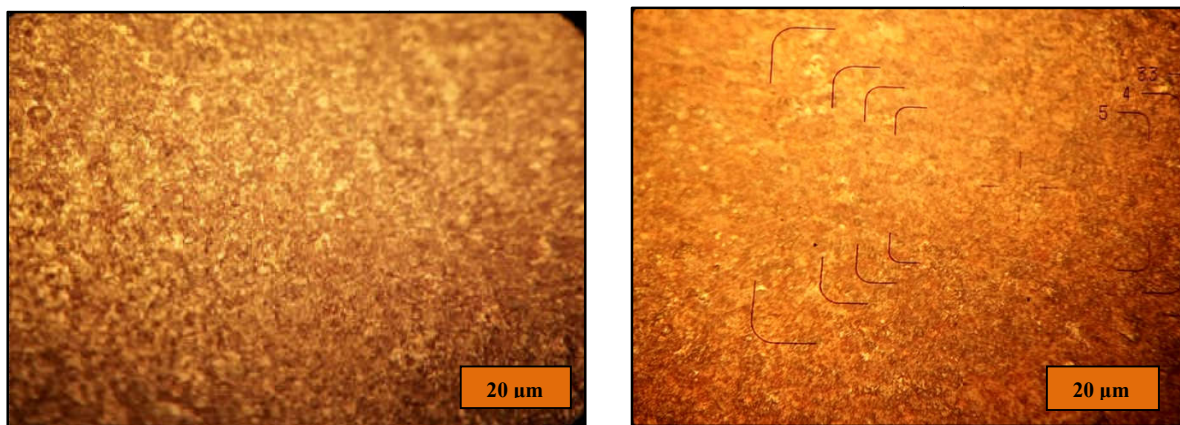


(a)

(b)

Figure IV.2 : La microstructure de cuivre à l'état brut (a) section cylindrique, (b) forme horizontal.

IV.1.1.3. Etat brut $\varnothing = 2.75\text{mm}$



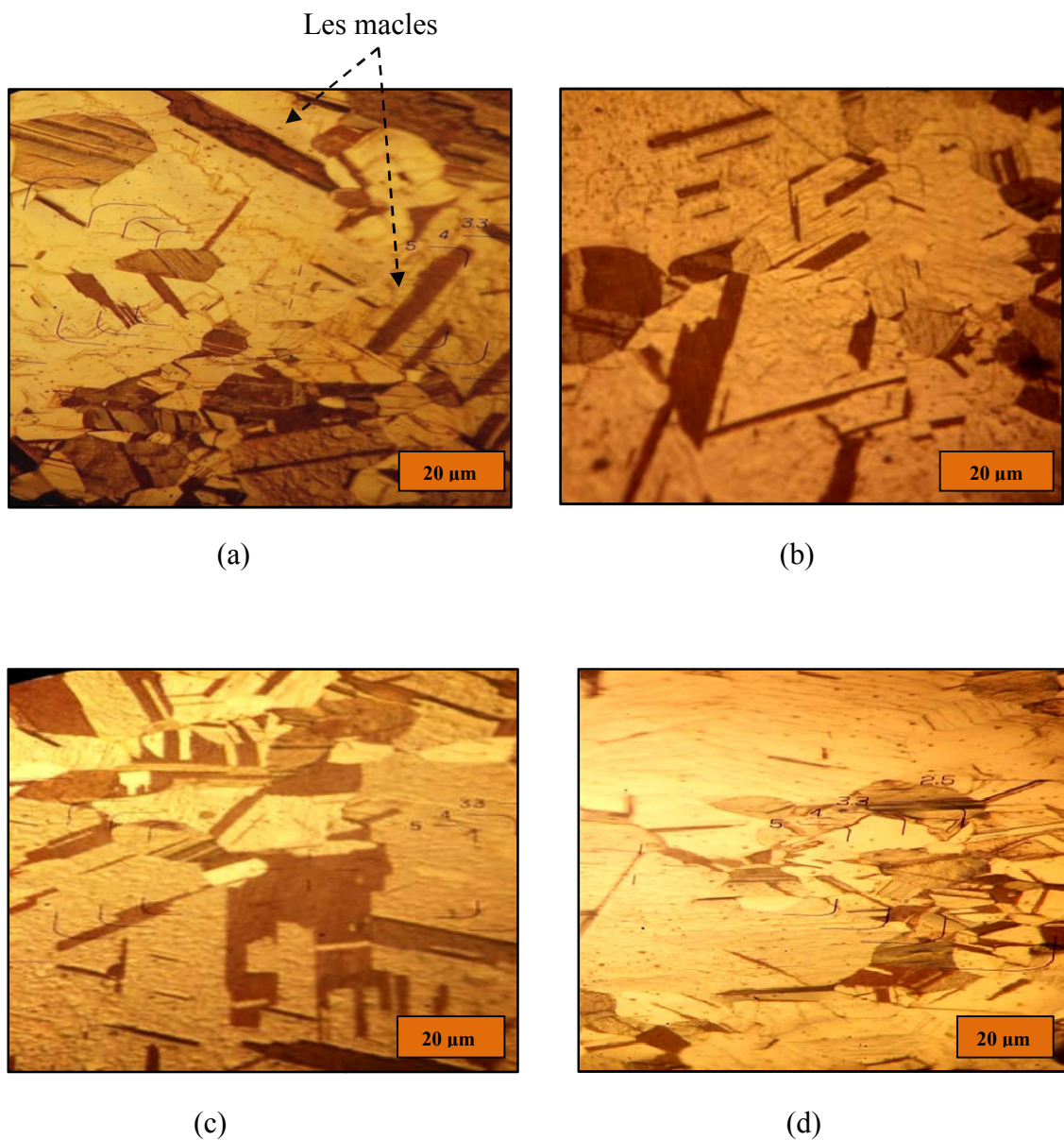
(a)

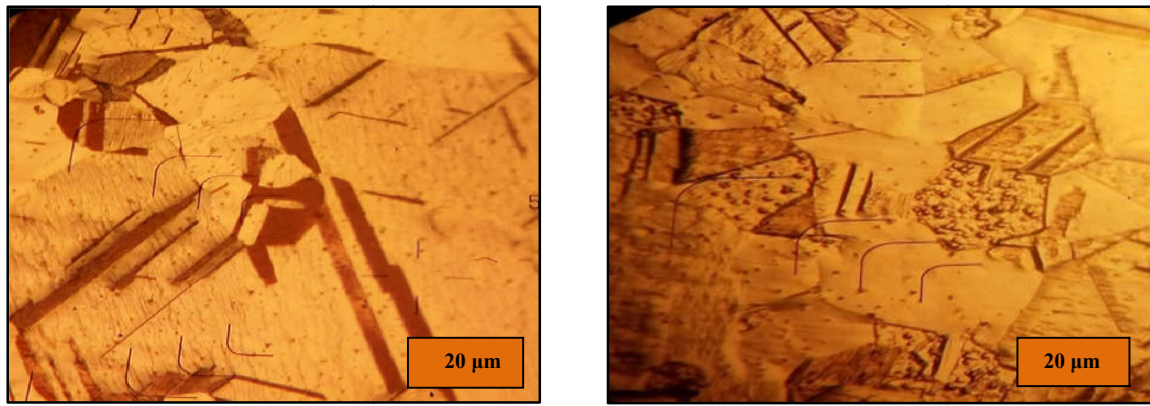
(b)

Figure IV.3 : La microstructure de cuivre (a) section cylindrique, (b) forme horizontal.

IV.1.2. Microstructure des files cuivre tréfile (recuit)

La figure IV.4 représente la microstructure d'un fil de cuivre tréfilés recuit à différente température (300°C, 400°C et 600°C) en temps de maintien de 1h et 2 h. On peut constater que le cuivre suit un phénomène de recristallisation lors de ces températures, et on peut remarquer aussi lors d'une déformation important et température élevées la recristallisation apparaitre dans un temps de maintien minimal. Et il y a une augmentation des tailles des grains avec l'augmentation des températures de recuit ce changement de structure est dû d'un phénomène de coalescence et grossissement (la figure VI.5 confirme cette remarque).

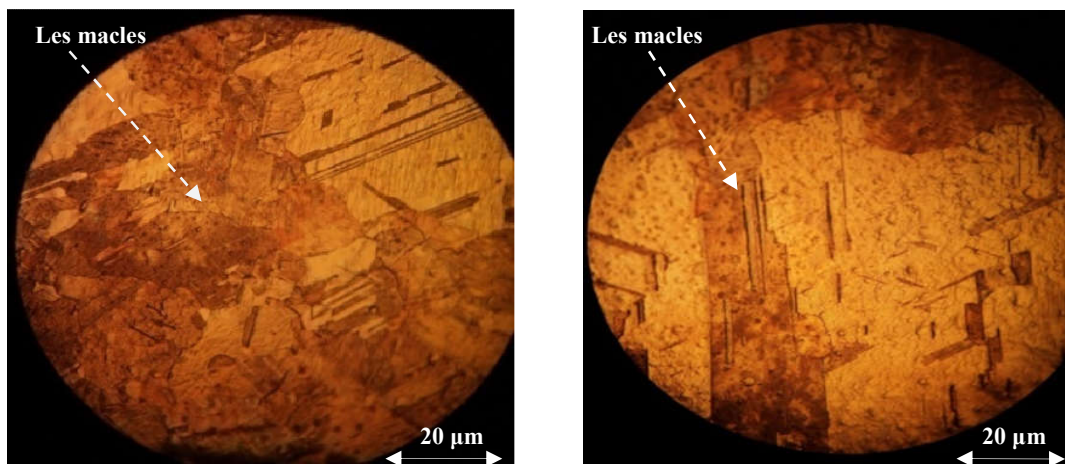




(e)

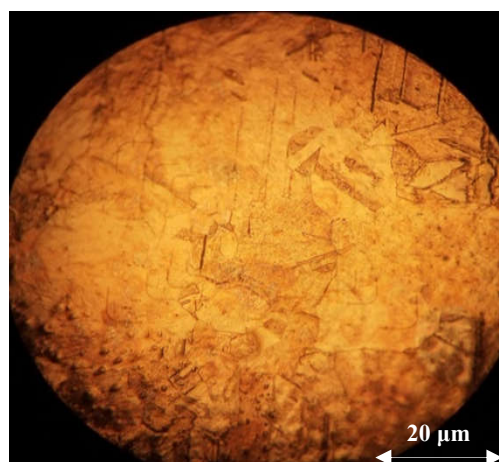
(f)

Figure IV.4 : la microstructure de cuivre section cylindrique recuit à $T=300^{\circ}\text{C}$ pendant : (a) 1h, (b) 2h ; $T=400^{\circ}\text{C}$ pendant : (c) 1h, (d) 2h ; $T=600^{\circ}\text{C}$ pendant : (e) 1h, (f) 2h.



(a)

(b)



(c)

Figure IV.5 : la microstructure de cuivre forme horizontal. Recuit à $T=300^{\circ}\text{C}$ pendant : (a) 1h ; $T=400^{\circ}\text{C}$ pendant : (b) 1h ; $T=600^{\circ}\text{C}$ pendant : (c) 1h.

IV.2.La micro-dureté des fils de cuivre tréfilés

IV.2.1. Effet de la température et le temps de maintien

La figure IV.6, illustre la variation de la micro-dureté des fils tréfilés recuit en fonction de température, au deux temps de maintien différents. Les courbes montrent que les valeurs de la micro-dureté diminuent de 300°C à 400°C et augmentent à 600°C. Et lors de l'augmentation de temps de recuit la micro-dureté diminue. Donc on peut dire que l'augmentation de la température (domaine de températures basses) la micro-dureté diminue à cause de la formation des macles qu'elles sont favorisées de former dans ce domaine de températures, par contre la micro-dureté de l'échantillon recuit à 600°C augmente par rapport aux échantillons recuits à 300 et 400°C (tableau IV.1) ; c'est le domaine où les macles sont moins nombreuses.

D'autre part, l'augmentation du temps de maintien suit par une diminution des valeurs de la micro-dureté ; ce qui montre qu'il y a une restauration.

Tableau IV.1 : Les valeurs de la micro-dureté en fonction de la température.

t \ T (°C)	300	400	600
t1=1h	60.5	55,6	71,8
t2=2h	52.3	45,5	47,6

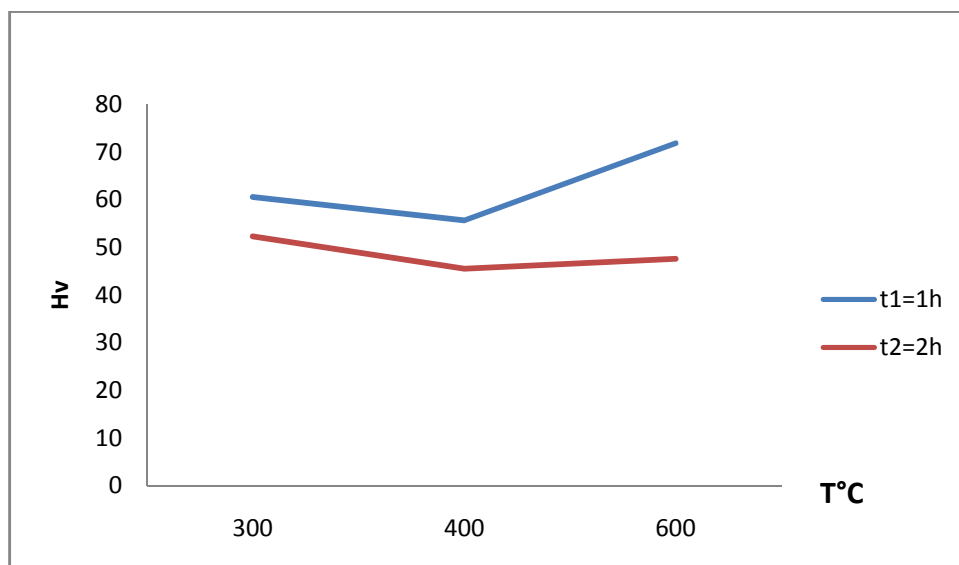


Figure IV.6 : La micro-dureté Hv en fonction de la température.

IV.2.2. Effet de la déformation plastique (le diamètre des fils recuits)

La figure IV.7 montre la variation de la micro-dureté en fonction de déformation plastique (diamètre des fils de cuivre), la courbe montre que les valeurs de la micro-dureté augmentent avec l'augmentation de diamètre des échantillons (déformation plastique).

Tableau IV.2 : Valeurs de la micro-dureté en fonction de diamètre de fils de cuivre.

\varnothing (mm)	8	4.12	2.75
Hv	117.9	115.1	79.2

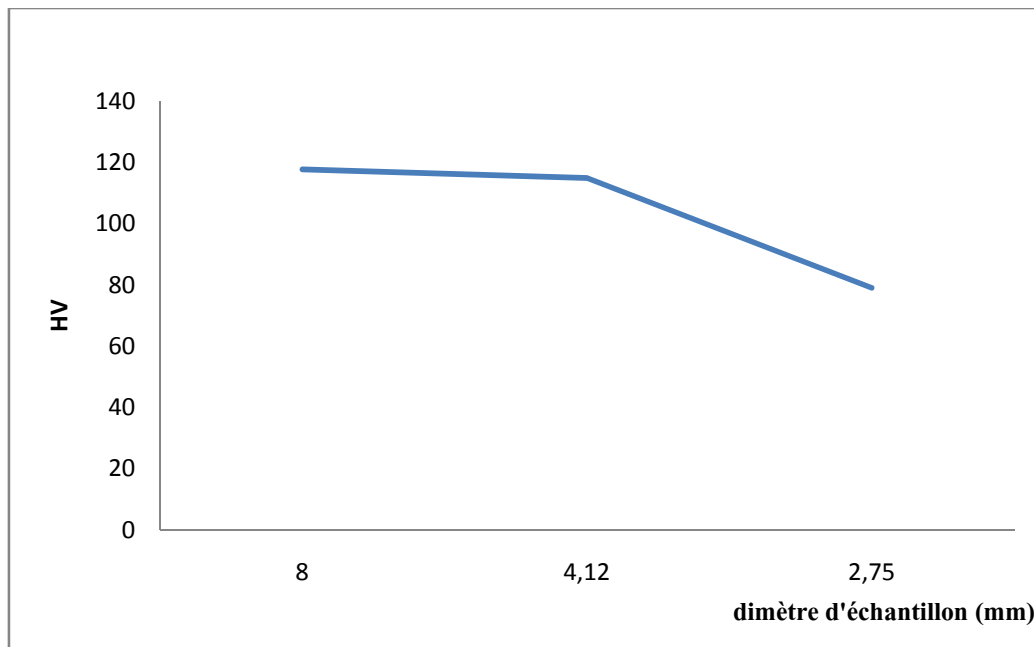


Figure IV.7 : Valeurs de la micro-dureté en fonction de diamètre de fil de cuivre.

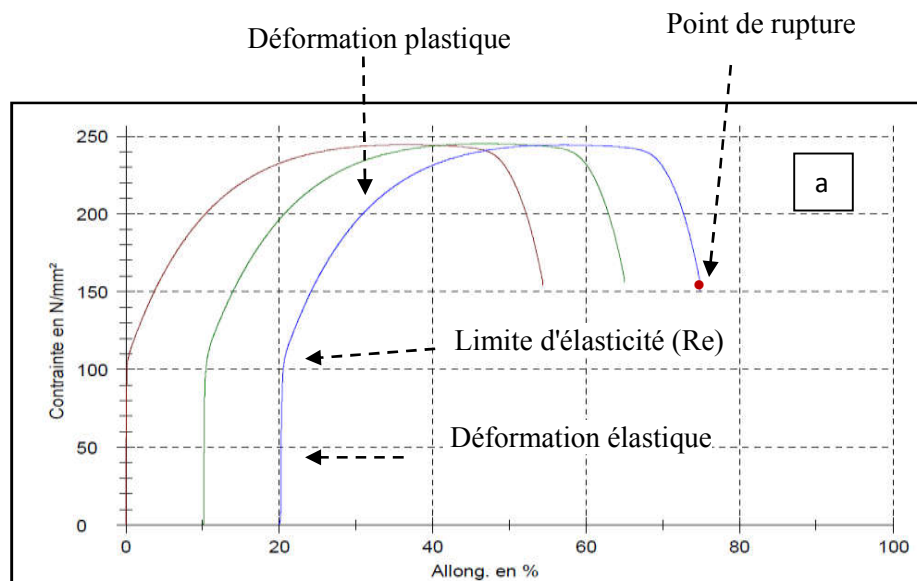
IV.2.3. Essai de traction

IV.2.3.1. Essai de traction pour les échantillons (non recuit)

La figure IV.8 présente l'effet de déformation plastique sur l'allongement et la résistance à la rupture. On peut remarquer que lors de l'augmentation de taux de déformation l'allongement diminue et c'est le contraire pour la résistance à la rupture, ces résultats montrent que le fils de cuivre tréfilés suivent le phénomène d'écrouissage (tableau IV.3).

Tableau IV.3 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés non recuit.

Fils tréfilés non recuit	Allongement à la rupture%	Resistance à la traction MPa
8 mm	54,31	244,45
2.75mm	45,27	256,68
1.76mm	40,83	258,00



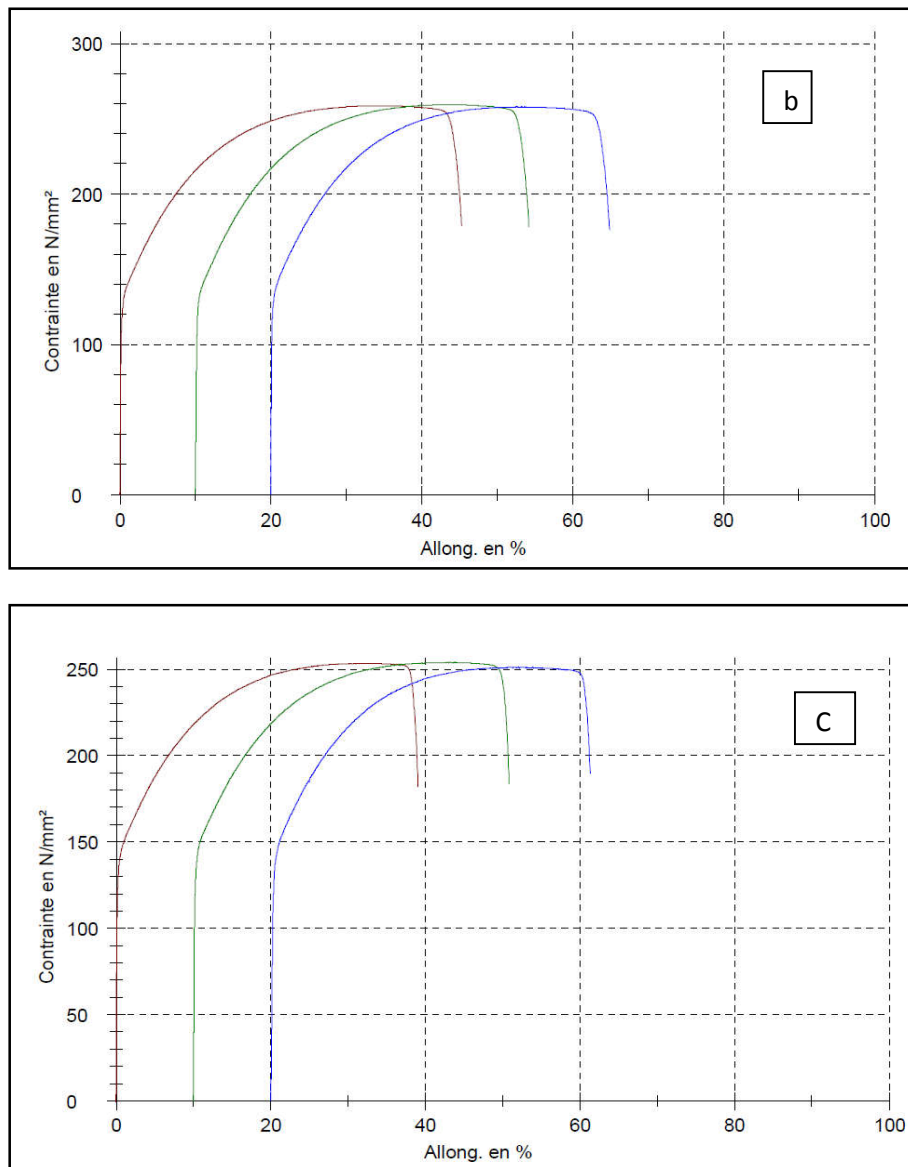


Figure IV.8 : Courbe essaie de traction des échantillons non recuit (a) $\text{Ø}=8$ mm ;(b) $\text{Ø}=2.75$ mm et (c) $\text{Ø}=1.76$ mm.

IV.2.3.1. Essai de traction pour des échantillons recuit

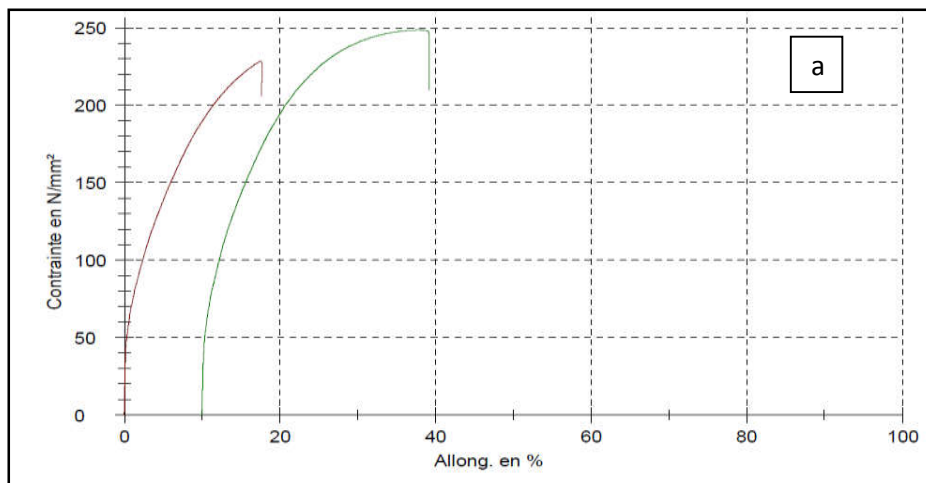
La figure IV.8 présente l'effet de traitement de recuit sur l'allongement et la résistance à la rupture. On peut remarquer que l'allongement augmente et la résistance à la rupture diminue avec l'augmentation de la déformation plastique au traitement de recuit à 400°C (c'est le cas d'écroutissage) et c'est l'inverse pour le traitement de recuit à 600°C (cas de recristallisation), (tableau IV4 et 5).

Tableau IV.4 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés recuit à 400°C.

Fils tréfilés recuit	Allongement à la rupture%	Resistance à la traction MPa
8 mm	22,61	253,06
2.75mm	29,31	256,59
1.76mm	30,31	258,00

Tableau IV.5 : Valeurs d'essai de traction sur des fils tréfilés recuit à 600°C.

Fils tréfilés recuit	Allongement à la rupture%	Resistance à la traction MPa
8 mm	33,45	255,97
2.75mm	26,15	250,49



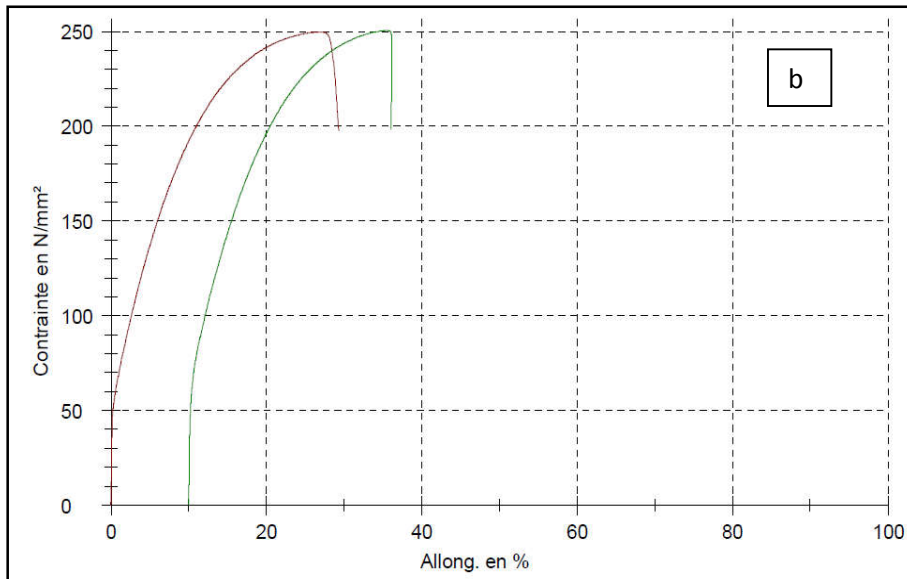
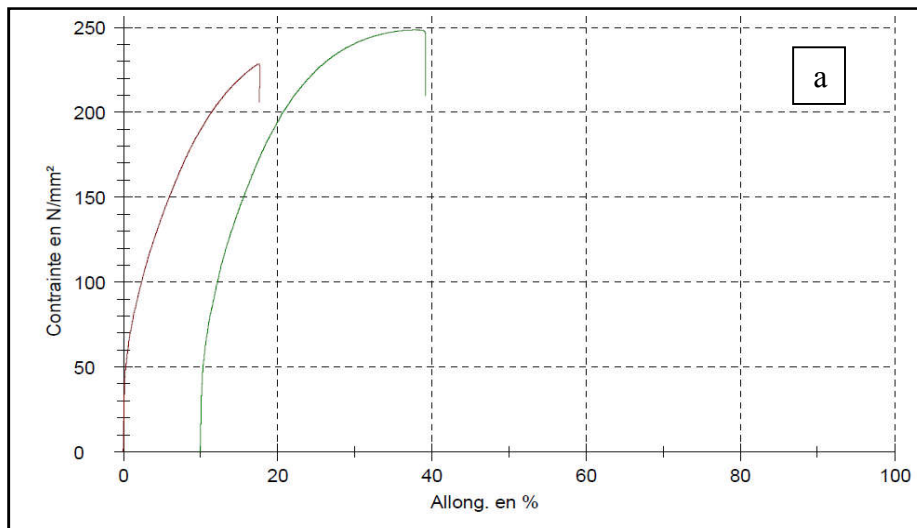


Figure IV.9 : Courbe essai de traction $\varnothing=8$ mm après traitement de recuit
(a)=400°C ;(b)=600°C.



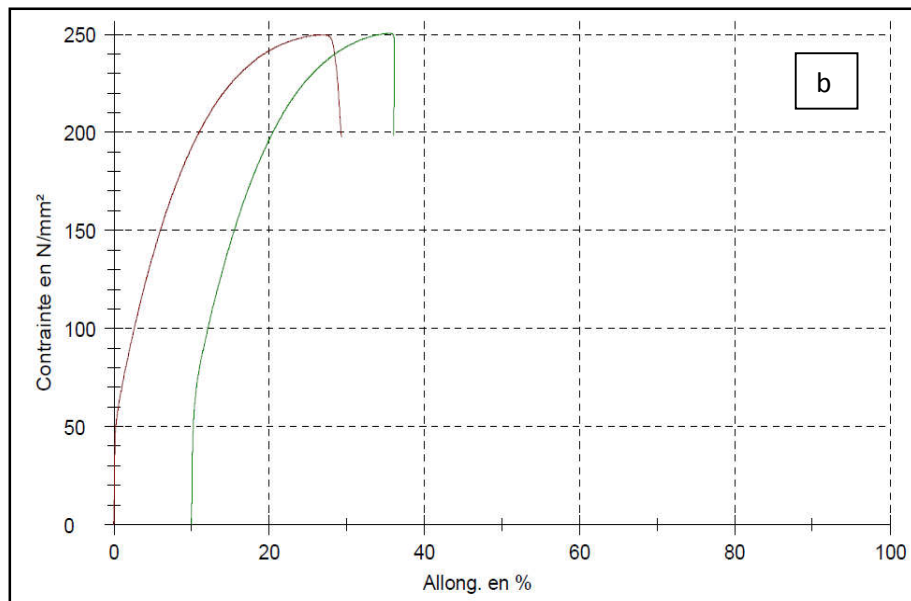


Figure IV.10 : Courbe essai de traction $\varnothing=2.75$ mm après traitement de recuit (a)= 400°C ;(b)= 600°C

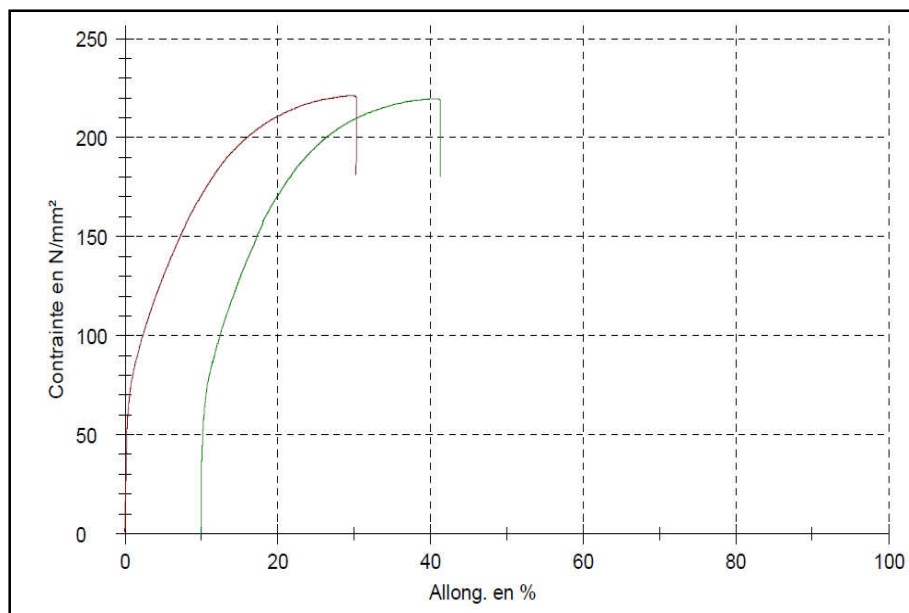


Figure IV.11 : Courbe essai de traction $\varnothing=1.76$ mm après traitement de recuit à 400°C .

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était l'étude l'effet du traitement thermique sur les propriétés de cuivre qui sont fabriqués par l'ENICAB Biskra. Nous avons essayé de comprendre l'effet des différentes températures et le temps de maintien sur les propriétés de fil machine et fils tréfilé.

Pour aboutir à nos objectifs, nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales essentiellement, la microscopie optique, les essais mécaniques de traction, mesures la micro-dureté.

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

- Les microstructures des fils de cuivre tréfilé non recuit montrent que les grains ont des formes et tailles très hétérogènes fins.
- Les microstructures des files cuivre tréfile recuit à différente température (300°C, 400°C et 600°C) en temps de maintien de 1h et 2 h constatent que le cuivre suit un phénomène de recristallisation.
- La recristallisation apparaitre dans un temps de maintien minimal.
- Dans le plan longitudinal des fils tréfilés, la tailles des grains augmente avec l'augmentation des températures de recuit c'est le phénomène de coalescence et grossissement.
- Dans la micro-dureté des fils de cuivre tréfilés diminue à cause de la formation des macles dans le domaine des températures basses (300°C et 400°C). et c'est l'inverse à T=600°C.
- La micro-dureté augmente avec l'augmentation de diamètre des échantillons (diminue avec l'augmentation de taux de déformation plastique).
- pour les échantillons non recuit l'allongement augmente et la résistance à la rupture diminue avec l'augmentation de la déformation plastique ; c'est le phénomène d'écroutissage.
- Pour des échantillons recuit l'allongement et la résistance à la rupture diminue avec l'augmentation de la déformation plastique de recuit à 400°C (phénomène d'écroutissage). et c'est l'inverse de recuit à 600°C (phénomène recristallisation).

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1].Lakhtine. I : Métallographie et traitements thermiques des métaux ; 4^{ème} Edition .Mir Moscou ,1986.
- [2].Ghomari. F : Cours Science des matériaux de construction ; Departement de genie civil, universités Aboubekr Belkaid Tlemcen.
- [3].Bensaada .S, Bouziane M.T : science des matériaux T2 ; Edition OPU, avril 2012.
- [4].Jakani.S : Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé ; Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, Français, 2004.
- [5]. Arnaud.D, Barbery.J, Biais. R, Fargette,B, Naudot. P : Propriétés du cuivre et de ses alliages ; Techniques de l'ingénieur (M430).
- [6].Michel.Dupeux : Aide-mémoire Science des matériaux ; 2^{ème} édition. Dunod Paris, 2008.
- [7]. Colombiéc.Michel ,Coll : Matériaux métalliques ; 2^{ème} édition Dunod ,2008.
- [8]. Laouini, Abd Eldjalil : Réalisation d'un appareil de fluage des métaux ; Mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra ,2012.
- [9].Benchabane. G : Les mécanismes de recristallisation et de croissance des grains dans les métaux et alliages métalliques légers ; Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2009.
- [10].Richeton.T : Dynamique et complexité de la déformation plastique: étude par émission acoustique ; Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble-INP Français ,2006.
- [11].Beribeche. Abd Elatif: Comportement des fils métalliques lors d'un essai de fluage ; Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2014.
- [12].Guy.Trapied : mise en forme du cuivre et des alliages de cuivre ; Techniques de l'ingénieur (M 660).

- [13].Bessais.L : Étude et caractérisation de la réaction de recristallisation des fils d'aluminium tréfilés industriellement à E.N.I.CA.Biskra ; Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2017.
- [14].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.
- [15].Gerber.P : Etude des liens entre hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation Application au cuivre et ses alliages ; Thèse de doctorat Université, Paris13 Français, 2002.
- [16]. Qods.F : Comportement mécanique des métaux polycristallins aux grandes déformations en torsion ; expériences et simulations, Thèse de doctorat, Université Paul Verline de Metz, 2006.
- [17]. Dominique.françois : Essais mécaniques des métaux ; Techniques de l'ingénieur (M120).
- [18].Raymond.Langevin : Guide d'auto-Apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique ; (CPMT. PERFORM) Québec, 2015.
- [19]. Barbery J : Traitements thermiques du cuivre et de ses alliages ; Techniques de l'ingénieur (M 1295).
- [20]. Bensaada.S : Traitements thermiques Classification et désignation des aciers et fontes ; Université Mohamed Khider Biskra, PDF.
- [21]. Association technique de traitement thermique (attt) : Guide de choix des traitements thermiques; Dunod, 2004.
- [22].Poupeau .P : Traitements thermiques des métaux et alliages ; Technique de l'ingénieur (M 1105).
- [23].Kherif .R : Traitement thermique d'un acier à outils de travail à chaud ; Mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra ,2017.

[24].Arfaoui .Ali,Chaker .Med Amir :TraitementsThermiques thermochimiques ; Matériaux Métalliques ISET Kasserine Tunisie ,2010.

[25]. Tlili . Adnene : Cours matériaux métallique ; www.academia.edu.

[26]. Messaoui.mosbah : support de cours matériaux métalliques ; Département de Génie Mécanique, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa Tunisie ,2015.

[27]. Carole .Levrau : Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec des savons secs ; Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris Français ,2006.

[28].Hamdi.I : Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000) ; Thèse de doctorat, Université Mohamed khider Biskra ,2014.

[29]. fellah. L : L'effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre ; Thèse de doctorat, Université Mohamed khider Biskra, 2015.

Résumé

Le but de notre travail consiste à étudier l'effet de traitement thermique (le recuit à différent température) et la tempe de maintien sur la variation de la microstructure et les propriétés mécanique de cuivre tréfilés à froid. Ainsi que l'effet de la température et le temps sur les processus de restauration et de recristallisation. Les résultats montrent que pour les fils non recuit la résistance à la rupture diminue avec l'augmentation l'allongement et déformation plastique (écrouissage) et c'est l'inverse pour les fils recuit (recristallisation). Et la micro-dureté à un recuit de 600°C est très importante, l'augmentation du temps de maintien suivre par une diminution des valeurs de la micro-dureté (restauration).

ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية (في درجات حرارة، وزمن الحفظ) على تطور البنية المجهرية والخصائص الميكانيكية للنحاس المقلد على البارد. وكذلك تأثير درجة الحرارة والوقت على عمليات الاستعادة وإعادة التبلور. أظهرت النتائج أنه بالنسبة للأسلاك الغير معالجه بالتلدين فإن قوة الكسر تتناقص مع زيادة الاستطالة والتشوه البلاستيكي (الصلد) ويحدث العكس للأسلاك المعالجه بالتلدين (التبلور). والصلابة الدقيقة عند درجة حرارة تصل إلى 600 درجة مئوية مهمة للغاية، بزيادة الوقت تنخفض قيم الصلابة الدقيقة وهنا تحدث عملية الارجاع.