

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : **Métallurgie**

Filière : **Génie Des Matériaux**

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en **Métallurgie**

**Effets du taux de tréfilage et des traitements de recuits sur les
caractéristiques mécaniques et électriques des fils de cuivre**

Présenté par :

Soheib BELLAL

Anouar MEBAREK AZZEM

Sous la direction de M. **Merzak LARIBI** (Professeur)

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Hamid YOUSFI,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI,	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Hamza BOUSSAADA,	Ingénieur de qualité	CABEL
Examineur	M. Mohamed CHITROUB	Professeur	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER,	Docteur	ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : **Métallurgie**

Filière : **Génie Des Matériaux**

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en **Métallurgie**

Effets du taux de tréfilage et des traitements de recuits sur les caractéristiques mécaniques et électriques des fils de cuivre

Présenté par :

Soheib BELLAL

Anouar MEBAREK AZZEM

Sous la direction de M. **Merzak LARIBI** (Professeur)

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Hamid YOUSFI,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI,	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Hamza BOUSSAADA,	Ingénieur de qualité	CABEL
Examineur	M. Mohamed CHITROUB	Professeur	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER,	Docteur	ENP

الملخص :

هدفنا الأساسي هو مراقبة وفهم التطور المجهرى للأسلاك النحاسية المستخدمة في الكابلات الكهربائية المقدمة في تشوه بارد، ثم درسنا تأثير معدل التشوه على الخواص الميكانيكية والكهربائية، هدفنا الرئيسي هو توصيف السلك من حيث الاستطالة والمقاومة كدالة للتشويه وإعادة البلورة. تحقيقاً لهذه الغاية، تم تنفيذ العديد من العلاجات الحرارية الصلب في أوقات مسكن مختلفة. أظهرت النتائج أن المادة التي تم تشديدها أثناء السحب البارد تتبلور خلال 10 دقائق فقط عند 250 درجة مئوية. بعد هذا العلاج الملمين، استعادت المادة خواصه الميكانيكية والكهربائية الرئيسية، خاصة استطالة واستطالة المقاومة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: سحب الأسلاك، التلدين، إعادة التبلور، الاستطالة، المقاومة، زمن الإمساك

ABSTRACT

Our mainly goal are the observation and comprehension of microstructural evolution of copper wire used in electrical cables submitted at cold deformation, and then we studied the effect of deformation rate on the mechanical and electrical properties, Our main purpose is to characterize the wire in terms of elongation and resistivity as a function of deformation and recrystallization. To this end, many annealing heat treatments at different dwelling times have been carried out. The results have showed that the material that has been work hardened during cold drawing did recrystallize within only 10 minutes at 250 °C. After this softening treatment, the material has recovered his main mechanical and electrical properties, especially its elongation and electrical resistance.

Key words: wiredrawing; annealing; recrystallization; elongation, resistivity, dwelling time.

RESUME :

L'objectif principal de cette étude est focalisé sur l'observation et la compréhension de l'évolution microstructurale des fils de cuivre destiné à être utilisé dans les câbles électriques au cours de la déformation par tréfilage à froid, ainsi que l'effet du taux de déformation sur le comportement mécanique et électrique de ces fils. Notre but est de faire une caractérisation de l'évolution de l'allongement et de la résistivité en fonction de la déformation et de la recristallisation. Pour cela nous avons procédé à plusieurs traitements de recuit du fil tréfilé à différents temps du maintien. Les résultats ont montré que le matériau écroui par tréfilage se recristallise totalement en 10 minutes de maintien à 250 °C. A l'issue de ce traitement d'adoucissement, le fil tréfilé reprend la totalité de ses propriétés mécaniques et électriques, notamment l'allongement et la résistance électrique.

Mots clés : tréfilage, recuit, recristallisation, allongement, résistivité, temps de maintien

“Dédicaces”

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, qui ont toujours prié pour moi et qui n'ont pas cessé de

M'encourager et de me soutenir.

A ceux qui m'ont soutenu et qui m'ont supporté durant toute cette année

A mes chers frères Abdou et Raouf, A mes chères sœurs Ibtissam et Abla

Spécialement à mon ami et mon frère Yahia,

A tous mes amis surtout Salah, Ouail, Ismail, Amina, Mohamed, Nouri et Aimen

A mon binôme Soheib BELLAL

Aux personnes qui m'ont aidé et encouragé et qui m'ont accompagné

Durant mon chemin de vie.

A.MEBAREK AZZEM

Je dédie ce mémoire aux plus affectifs admirables éducateurs : mes très

Chers parents

A mon père, qui Dieu lui accorde une longue vie pleine de santé

A ma mère qui ma source première de motivation et pour qui ce mémoire est dédié

A mon très cher frère et mes très chères sœurs

A mes grands-pères et grands-mères paternels et maternels

A tout ma grande famille « BELLAL »

A mon binôme : Anouar MEBAREK AZZEM

A tous mes amis surtout Larras Yamina, Rami Benbekhima, Nacer, Zinou.

A la promotion de génie des matériaux 2015/2016

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

Soheib BELLAL

“Remerciements ”

Nous remercions avant tout, Notre Dieu Tout Puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement et sincèrement le professeur Merzak LARIBI, qui nous a encadré tout au long de cette étude, ses enrichissantes observations faites dans le rapport, son implication, sa motivation et son professionnalisme nous ont beaucoup aidés dans ce travail.

Pour avoir accepté de siéger en tant que jury à notre soutenance, nous tenons à remercier M. Hamid YOUSFI président de jury, ainsi que M. Mohamed CHITROUB et M. Abd Elmadjid KASSER membres de jury et examinateurs.

Nous tenons aussi à remercier toute l'équipe de CABEL, d'avoir mis toutes les ressources humaines et matérielles à notre disposition, en particulier M. Farid BOUGHOUAOU et M. Hamza BOUSSAADA qui nous ont épaulés du tout début à la fin de notre stage à CABEL.

Nous tenons Mme GUENNOUN l'ingénieure de laboratoire métallurgie pour son esprit critique et disponibilité.

Nous remercions nos très chers camarades de classe pour nous avoir aidés dans nos expériences réalisées à l'école.

Table des Matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	16
-----------------------------	----

PARTIE A : Etude Bibliographique

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE L'ENTREPRISE CABEL	19
---	-----------

I.1 Introduction	20
------------------------	----

I.2 Historique	20
----------------------	----

I.3 La Production	20
-------------------------	----

I.3.1 ETAPE 1 : Fabrication des isolants.....	21
---	----

I.3.2 ETAPE 2 : Fabrication des fils et câbles nus.....	21
---	----

I.3.3 ETAPE 3 : L'isolation des fils et des câbles.....	21
---	----

I.4 Développement	21
-------------------------	----

I.5 CONTROLE QUALITE	21
----------------------------	----

I.6 Produits	22
--------------------	----

CHAPITRE II : LE CUIVRE	24
--------------------------------------	-----------

II.1 Introduction	25
-------------------------	----

II.2 Production et Extractive	25
-------------------------------------	----

II.3 L'élaboration métallurgique	26
--	----

II.3.1 Le blister	26
-------------------------	----

II.3.2 L'affinage	26
-------------------------	----

II.4 Propriétés de cuivre	28
---------------------------------	----

II.4.1 Propriétés physiques	28
-----------------------------------	----

II.4.2 Propriétés mécaniques	29
------------------------------------	----

II.4.3	Propriétés chimiques	30
II.5	Influence des impuretés	30
II.6	Effet des impuretés sur la température de recristallisation et les propriétés mécaniques	31
II.7	Le recyclage	32
II.8	Les produits et les applications	32
CHAPITRE III : Procédé de tréfilage du cuivre		34
III.1	Introduction.....	35
III.2	Description du procédé de mise en forme	35
III.3	Outils et équipements industriels du tréfilage	37
III.3.1	Les machines de tréfilage	37
III.3.2	Filière	39
III.3.3	Lubrification	41
III.4	Paramètre de tréfilage.....	41
III.4.1	Vitesse de déformation	42
III.4.2	Force de tréfilage.....	42
III.4.3	Frottements	43
III.4.4	Echauffement du fil.....	44
III.5	Les incidents au cours de tréfilage.....	44
III.5.1	La rayure	44
III.5.2	Les cassures.....	44
III.5.3	Introduction :.....	45
III.5.4	Le rôle principal d'un recuit	45
III.5.5	Paramétré de recuit	45
III.5.6	Recuit de recristallisation	46

III.5.7	Recuit et préchauffage du conducteur par effet joule	47
CHAPITRE IV : La Déformation Plastique et la Recristallisation.....		48
IV.1	Introduction	49
IV.2	Mécanismes de la déformation plastique	49
IV.2.1	Déformation plastique par glissements	50
IV.2.2	Déformation plastique par maclage.....	50
IV.3	Evolution de la microstructure de déformation	51
IV.4	Energie stockée	53
IV.5	Etape de restauration et de recristallisation	54
IV.5.1	La restauration.....	54
IV.5.2	La recristallisation	55

PARTIE B : Etude Expérimentale

CHAPITRE V : MATERIAUX ET METHODES D'ANALYSES UTILISES		58
V.1	Introduction	59
V.2	Matériau étudié :.....	59
V.3	Processus de tréfilage à CABEL	60
V.3.1	Dévidoirs	60
V.3.2	Les Tréfileuses	60
V.4	Etude métallographique.....	62
V.4.1	Préparation des échantillons pour l'analyse métallographie	62
V.4.2	Microscope Optique	64
V.5	Etude mécanique	65
V.5.1	Essai de Micro dureté	65
V.5.2	Essai de traction	67
V.6	Etude physique (électrique).....	69

V.6.1	Mesure de la résistivité	69
V.7	Traitement thermique	70
V.7.1	Recuit par L'effet Joule	70
V.7.2	Recuit dans un four	71
CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATION		
72		
VI.1	Introduction.....	73
VI.1.1	Calcul des taux de déformation (ϵ)	73
VI.2	Résultats des tests effectués sur le fil Machine	74
VI.2.1	Les essais mécaniques et électriques	74
VI.2.2	Etude métallographique <i>sur le fil machine</i>	76
VI.3	Caractérisations mécaniques.....	76
VI.3.1	Essai de traction	76
VI.3.2	Mesure de Microdureté	83
VI.4	Caractérisation électrique (mesure de la résistivité).....	87
VI.5	Etude Métallographie.....	91
VI.5.1	Microstructure des fils tréfilés sans recuit.....	91
VI.5.2	Etat recuit par l'effet joule	92
VI.5.3	Etat recuit dans un four électrique	93
Conclusion générale.....		99
Bibliographie.....		101

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

FIGURE I.1 LA CABLERIE ELECTRIQUE DE GUE DE CONSTANTINE	22
FIGURE I.2 LA FABRICATION DES FILS ET DES CABLES NUS.....	22

CHAPITRE II

FIGURE II.1 : TRAITEMENT DU MINERAI [6].....	26
FIGURE II.2 ÉLABORATION ET AFFINAGE [6].....	27
FIGURE II.3 EFFETS DES IMPURETES SUR LA TEMPERATURE DE RECRISTALLISATION DU CUIVRE	32

CHAPITRE III

FIGURE III.1 SCHEMA D'UN DISPOSITIF DE TREFILAGE	36
FIGURE III.2 SCHEMA ET MACHINE MULTI PASSES [8].	36
FIGURE III.3 MACHINE MULTIPLE CONTINUE [6].	38
FIGURE III.4 MACHINE MULTIPLE CONTINUE [6].	38
FIGURE III.5 MACHINE MULTIPLE A GLISSEMENT (A CONE) [6].	39
FIGURE III.6 COUPE DE FILIERE [8].	39
FIGURE III.7 FIL EL FILIERE PENDANT LA DEFORMATION [8].	40
FIGURE III.8 COUPE - GEOMETRIE CONVENTIONNELLE, ZONES CONSTITUANTES [8].	40
FIGURE III.9 PASSAGE D'UN FIL DANS UNE FILIERE [9].....	42
FIGURE III.10 DECOMPOSITION DES FORCES AU COURS DE L'ÉCOULEMENT EN FILIERE [26].	43
FIGURE III.11 RUPTURE EN CUP AND CONE D'UN FIL [9].	45
FIGURE III.12 LES PHASES DE RECUIT PAR EFFET JOULE.	47

CHAPITRE IV

FIGURE IV.1 SYSTEME DE MACLAGE.....	51
FIGURE IV.2 BLOCS DE CELLULES ET MURS DENSES DE DISLOCATIONS [7].	51
FIGURE IV.3 HIERARCHIE DE LA MICROSTRUCTURE DE DEFORMATION [7].	52
FIGURE IV.5 LES DETAILS D'UNE STRUCTURE CELLULAIRE [10].	53
FIGURE IV.4 STRUCTURE CELLULAIRE DANS LE CUIVRE DEFORME PAR LAMINAGE A FROID A 25% [10].	53
FIGURE IV.6 DIFFERENTS STADES DE RESTAURATION D'UN MATERIAU AYANT SUBI UNE DEFORMATION PLASTIQUE.....	55

FIGURE IV.7 CROISSANCE DES GRAINS [9].	56
--	----

CHAPITRE V

FIGURE V.1 DEVIDOIR.	60
FIGURE V.2 EBAUCHEUSE.	61
FIGURE V.3 MACHINE DE TREFILAGE DE FIL MACHINE.	61
FIGURE V.4 MOULE D'ENROBAGE.	63
FIGURE V.5 ECHANTILLON ENROBE A FROID.	63
FIGURE V.6 POLISSEUSE UTILISEE.	63
FIGURE V.7 TISSU FEUTRE.	64
FIGURE V.8 MICROSCOPE METALLOGRAPHIQUE OPTIKA M-789	65
FIGURE V.9 PRINCIPE DE L'ESSAI DE DURETE VICKERS HV.	65
FIGURE V.10 MICRO-DUOMETRE UTILISE.	66
FIGURE V.11 PRINCIPE D'UN ESSAI DE TRACTION D'UNE EPROUVETTE [7].	67
FIGURE V.12 LA COURBE DE TRACTION.	68
FIGURE V.13 MACHINE DE TRACTION.	69
FIGURE V.14 MACHINE D'ESSAI DE LA RESISTANCE.	70
FIGURE V.15 FOUR DE RECUIIT PAR L'EFFET JOULE.	70
FIGURE V.16 FOUR UTILISE	71

CHAPITRE VI

FIGURE VI.1 COURBE D'ESSAIS DE TRACTION SUR LE FIL MACHINE.	75
FIGURE VI.2 MICROSTRUCTURE DU FIL MACHINE (D=8 MM) A-LONGITUDINALE, B-TRANSVERSALE.	76
FIGURE VI.3 COURBE D'ESSAIS DE TRACTION POUR LES FILS NON RECUIIT	77
FIGURE VI.4 COURBE D'ESSAIS DE TRACTION POUR LE FIL NON RECUIIT DE TAUX DE DEFORMATION 72,4%.	77
FIGURE VI.5 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FONCTION DE TAUX DE DEFORMATION.	78
FIGURE VI.6 VARIATION DE L'ALLONGEMENT EN FONCTION DE TAUX DE DEFORMATION.	78
FIGURE VI.7 COURBES D'ESSAIS DE TRACTION APRES RECUIIT PAR EFFET JOULE.	79
FIGURE VI.8 VARIATION DE L'ALLONGEMENT EN FONCTION DE TAUX DE DEFORMATION.	80
FIGURE VI.9 COURBE D'ESSAIS DE TRACTION APRES RECUIIT DANS LE FOUR POUR DIFFERENT TEMPS.	81

FIGURE VI.10 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE ET L'ALLONGEMENT EN FONCTION	82
FIGURE VI.11 EVOLUTION DE LA MICRODURETE HV EN FONCTION DE LA DEFORMATION	84
FIGURE VI.12 EVOLUTION DE LA MICRODURETE HV EN FONCTION DE LA DEFORMATION POUR LES FILS TREFILE RECUIT PAR L'EFFET JOULE	85
FIGURE VI.13 EVOLUTION DE LA MICRODURETE HV EN FONCTION DE TEMPS POUR UN TAUX DE DEFORMATION DE 71.5%	86
FIGURE VI.14 COURBE DE L'ESSAI DE RESISTANCE POUR LE CUIVRE DUR (SANS RECUIT).....	87
FIGURE VI.15 COURBES DES ESSAIS DE LA RESISTANCE DES FILS TREFILES AVANT ET APRES RECUIT	89
FIGURE VI.16 EVOLUTION DU LA RESISTIVITE ELECTRIQUE EN FONCTION DE TEMPS DE MAINTIEN.	90
FIGURE VI.17 EVOLUTION DE LA RESISTIVITE EN FONCTION TYPE ET DE TEMPS DE RECUIT	90
FIGURE VI.18 MICROSTRUCTURE DE FIL TREFILE A $\epsilon = 72,425\%$	91
FIGURE VI.19 MICROSTRUCTURE DU FIL EN CUIVRE TREFILE A $\epsilon=57,5\%$ RECUIT PAR L'EFFET JOULE	92
FIGURE VI.20 MICROSTRUCTURE DU FIL EN CUIVRE TREFILE A $\epsilon=65\%$ RECUIT PAR L'EFFET JOULE	92
FIGURE VI.21 MICROSTRUCTURE DU FIL EN CUIVRE TREFILE A $\epsilon=71,5\%$ RECUIT PAR L'EFFET JOULE	93
FIGURE VI.22 MICROSTRUCTURE DU FIL EN CUIVRE TREFILE A $\epsilon=77,42\%$ RECUIT PAR L'EFFET JOULE	93
FIGURE VI.23 RECUIT A 250°C AVEC.....	94
FIGURE VI.24 RECUIT A 250°C AVEC 15 MINUTES DE MAINTIEN.....	94
FIGURE VI.25 RECUIT A 250°C AVEC 30 MINUTES DE MAINTIEN.....	94

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

TABLEAU II.1 LES PROPRIETES PHYSIQUES DE CUIVRE	29
TABLEAU II.2 LES PROPRIETES MECANIQUES DE CUIVRE.....	29
TABLEAU II.3 APPELLATIONS ET TENEURS EN IMPURETES DES DIVERS CUIVRES INDUSTRIELS NON ALLIES [7].....	31

CHAPITRE III

TABLEAU III.1 NOYAU, UTILISATION ET PROPRIETES.	40
--	----

CHAPITRE IV

TABLEAU IV.1 PRINCIPAUX SYSTEMES DE GLISSEMENT OBSERVES [14].	50
--	----

CHAPITRE V

TABLEAU V.1 COMPOSITION CHIMIQUE DE FIL MACHINE EN %MASSIQUE.	59
TABLEAU V.2 CARACTERISTIQUES DU CUIVRE PRODUIT PAR CABEL SPA D'ALGER.....	59
TABLEAU V.3 CHAINE DE TREFILAGE.....	60
TABLEAU V.4 FILIERES UTILISEES POUR 4 DIAMETRES DE SORTIE DIFFERENTS.	61
TABLEAU V.5 COMPOSITION CHIMIQUE ET DUREE DE L'ATTAQUE CHIMIQUE UTILISE [2].	64

CHAPITRE VI

TABLEAU VI.1 TAUX DE DEFORMATION (E) POUR DES FILS DURS.....	73
TABLEAU VI.2 TAUX DE DEFORMATION (E) POUR DES FILS RECUITS PAR L'EFFET JOULE.....	73
TABLEAU VI.3 RESULTATS DES ESSAIS DE RESISTIVITE SUR LE FIL MACHINE (PONT DE THOMSON- KELVIN)	74
TABLEAU VI.4 RESULTATS DES ESSAIS DE MICRODURETE SUR LE FIL MACHINE.....	74
TABLEAU VI.5 RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION SUR LE FIL MACHINE (MTS).....	74
TABLEAU VI.6 RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION SUR LES ECHANTILLONS	77
TABLEAU VI.7 RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION SUR LES ECHANTILLONS	79
TABLEAU VI.8 RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION SUR LES ECHANTILLONS :	81
TABLEAU VI.9 RESULTATS DE MICRODURETE POUR L'ETAT DUR.....	83
TABLEAU VI.10 RESULTATS DE MICRODURETE POUR L'ETAT RECUI PAR EFFET JOULE.....	84
TABLEAU VI.11 RESULTATS DE MICRODURETE POUR L'ETAT RECUI DANS LE FOUR	85

TABLEAU VI.12 RESULTATS DE L'ESSAI DE LA RESISTIVITE POUR LE CUIVRE DUR (SANS RECUIT)	87
TABLEAU VI.13 RESULTATS DE L'ESSAI DE RESISTANCE POUR LE CUIVRE RECUIT PAR EFFET JOULE	88
TABLEAU VI.14 RESULTATS DE L'ESSAI DE RESISTANCE POUR LE CUIVRE RECUIT DANS LE FOUR AVEC DIFFERENT TEMPS DE MAINTIEN SUR LES ECHANTILLONS DE DIAMETRE	89
TABLEAU VI.15 RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION, MICRODURETE ET LA RESISTANCE SUR LES <i>ECHANTILLONS DE CABEL</i>	96

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

Le cuivre est l'un des métaux les plus utilisés dans le monde, après le fer et l'aluminium. Il est utilisé avec ses plus des quatre cent alliages dans différents domaines en partant de la micro-technologie jusqu'à l'industrie lourde. Sa vaste utilisation est due à ses qualités spéciales. Il est caractérisé par sa très bonne conductivité électrique associée à une ductilité élevée. La rigidité du fil de cuivre et la fiabilité des contacts électriques qu'il permet d'obtenir sont les raisons essentielles de l'emploi généralisé du cuivre dans toute l'industrie de la construction électrique, dans la distribution de l'énergie électrique, ainsi que dans la fabrication de matériels électroniques. A titre d'exemple, 95% des fils conducteurs d'un Airbus sont en cuivre.

Aujourd'hui, l'industrie de fabrication du fil a un grand intérêt économique en Algérie. Ceci se justifie et concrétise par l'installation des grandes entreprises de tréfilage à travers le territoire national. L'une des entreprises est à AIN NAAJA, spécialisée dans la fabrication des fils de différentes sections en aluminium et en cuivre, destinés à la fabrication des fils électriques. La technique utilisée pour cela étant le tréfilage.

Le tréfilage consiste à réduire la section d'un fil métallique par passage à travers une ou plusieurs filières, sous l'effet d'une force de traction. Il est généralement suivi d'un recuit de recristallisation. Les modifications structurales entraînées par la déformation plastique à froid modifient les propriétés physiques et mécaniques des métaux.

Le recuit des fils tréfilés est un traitement thermique utilisé industriellement après le tréfilage et qui est destiné à détruire la structure écrouie, par restauration et recristallisation, ce qui permet d'obtenir une nouvelle structure sans défauts entraînant une diminution de la résistivité électrique, de la résistance mécanique et une augmentation de la ductilité.

Il est bon de fabriquer des fils électrique en cuivre par tréfilage tout en conservant une bonne conductivité électrique, et il serait meilleure d'obtenir les résultats souhaités sans gaspiller trop d'argent ni d'énergie. Le problème qui se pose alors, est le suivant : comment trouver un optimum qualité-coût-temps ? Quelle est la température optimale de la restauration et /ou la recristallisation du cuivre ? Quel est la durée suffisante pour un bon recuit ? Nous sommes motivés par le défi, que posent toutes ces questions.

Ce travail est entrepris dans le cadre de ce projet de fin d'étude, effectué à l'entreprise de tréfilage et câblage, CABEL-Alger. On a étudié l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques et électriques des fils tréfilés et recuits, ainsi que l'influence combinée du taux de

déformation par tréfilage à froid et de la température de recuit sur la cinétique de recristallisation. Une comparaison des propriétés a été faite selon le traitement de recuit subi en se basant notamment sur les techniques suivantes : la microscopie optique, la micro dureté Vickers, l'essai de traction et la mesure de la résistivité.

Notre travail comporte d'abord une partie bibliographique qui présente d'abord l'entreprise CABEL au sein de laquelle on a effectué notre stage avec une explication de son principe de fonctionnement et de ses principaux produits de l'entreprise.

Le second chapitre est consacré à la description des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des cuivres industriels. Le cuivre et ses différents alliages sont également exposés ainsi que les domaines de leurs applications industrielles.

Dans le troisième chapitre, on a parlé des différents procédés du tréfilage en précisant les outils et les paramètres qui influent sur le tréfilage et quelques problèmes et incidents qui surviennent régulièrement, enfin une partie est consacrée à la lubrification.

Dans Le quatrième chapitre, nous avons donné la théorie de la déformation plastique et leur relation avec les dislocations et de ses mécanismes. On a aussi expliqué l'influence de la déformation sur la microstructure et on a fait une description des phénomènes de la restauration et de la recristallisation.

La partie expérimentale comporte un chapitre dédié aux différentes techniques expérimentales utilisées à L'entreprise et au laboratoire de l'E.N.P, comme la préparation des échantillons et les appareils utilisés pour les mesures ainsi que le procédé de tréfilage appliqué au sein de la tréfilerie CABEL. Nous avons aussi expliqué les techniques d'analyse que nous avons utilisées dans la recherche.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux.

Le mémoire est finalement clôturé par une conclusion générale.

Partie A

Etude Bibliographique

CHAPITRE I

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

DE L'ENTREPRISE CABEL

I.1 Introduction :

Nous procéderons dans ce chapitre à la présentation de l'entreprise CABEL - Les Câbleries Electriques d'Alger Spa, où nous avons effectué notre stage, ainsi que tous les essais de traction, de résistivité électrique et les traitements de recuit.

I.2 Historique :

En 1942, l'usine de fabrication des fils et câbles nus, LATRAF démarre son activité au Gué de Constantine. C'est la première usine de câbles en Algérie.

Très peu de temps après, vient la création de CABLAF, spécialisée dans la fabrication des câbles électriques, à partir des conducteurs nus produits par LATRAF. En 1968, à la nationalisation, l'ensemble des biens de ces sociétés est transféré à la SONELEC.

En 1983, la restructuration de la SONELEC donne naissance à l'entreprise nationale des industries des câbles (E.N.I.CAB), à laquelle furent rattachées les trois unités suivantes :

- La câblerie téléphonique d'Oued Smar.
- La câblerie électrique de Gué de Constantine.
- La câblerie électrique de Biskra.

Dans le cadre de la restructuration, CABEL Spa (Les Câbleries électriques d'Alger) a été créée en 1998. Le capital actuel de CABEL est de 1 688 000 000 DZD. Toujours au même endroit CABEL Spa s'étale sur une surface d'environ 9,5 hectares, située dans la zone industrielle de Gué de Constantine, route Nationale n°38, à 15 Km du port d'Alger et à 15 Km de l'aéroport international d'Alger Houari Boumediene.

CABEL Spa fabrique et commercialise des câbles électriques en conformité avec les normes internationales IEC et étrangères NF-VDE-BSI.

I.3 La Production :

La fabrication d'un câble ou d'un fil isolé passe par 3 étapes :

- La fabrication des isolants.
- La fabrication des fils et des câbles nus.
- Isolation des fils et des câbles.

I.3.1 ETAPE 1 : Fabrication des isolants.

Les matériaux d'isolation relatifs aux divers câbles isolés sont réalisés dans deux ateliers distincts :

- Atelier des élastomères où sont fabriqués tous les types d'isolants y compris les cas spécifiques.
- Atelier des PVC où sont fabriqués les isolants primaires et les gaines des fils et câbles isolés au PVC.

I.3.2 ETAPE 2 : Fabrication des fils et câbles nus.

Les fils et câbles sont fabriqués dans deux ateliers distincts :

- Atelier de tréfilage : produisant tous les diamètres nécessaires à la construction des câbles en cuivre, aluminium et alliage d'aluminium.
- Atelier de câblage : fabriqué toutes les sections de câbles demandés, allant jusqu'à 1000 mm².

I.3.3 ETAPE 3 : L'isolation des fils et des câbles.

L'isolation des éléments de câbles se fait à l'aide de matériaux plastiques et d'élastomères (PVC, PR et EPDM).

I.4 Développement :

CABEL Spa dans son ambitieux programme d'investissement, s'est fixé comme objectif la production de nouveaux câbles (câbles de garde à fibres optiques, câbles secs moyenne et haute tension).

I.5 CONTROLE QUALITE :

Toute composante entrant dans le processus de fabrication est soumise au contrôle qualité. Tous les produits fabriqués sont soumis en laboratoire interne à tous les essais normalisés exigés avant leurs mises en consommation. Ceci permet de garantir la qualité des produits et d'assurer le consommateur sur leur conformité.



Figure I.1 La câblerie électrique de Gué de Constantine

Le métier de câblage est très spécifique, exige une grande expérience. L'entreprise compte aujourd'hui 425 personnes dont 52 cadres expérimentés.

Par ailleurs, le département des ressources humaines veille en permanence à l'amélioration de l'organisation de gestion pour répondre au mieux aux exigences de ses clients et assurer un développement continu.

I.6 Produits :

CABEL Spa fabrique et commercialise des câbles électriques en conformité avec les normes internationales CEI (Commission Internationale de l'Electrotechnique), NF (Normes Françaises), VDE (Normes Allemandes).



Figure I.2 La fabrication des fils et des câbles nus

Gammes fabriquées en série :

- câbles domestiques rigides, semi rigides et souples 450/750 Volt (isolés au PVC)
- câbles industriels rigides, semi rigides et souples 0,6/1kVolt, armes et non armes (isolés au PVC, PR, EPDM et élastomère)
- Câbles torsades de réseaux et de branchement 0,6/1kVolt (isolés au PR)
- Câbles de commandes (isolés au PVC, PR et élastomère) armes et non armes
- Fils et câbles divers (sans halogène, hydraulique, etc...)
- Câbles nus de très haute tension (en cuivre, aluminium, Almélec, Almélec-Acier)Fils électriques isolés :
 - *Fils électriques isolés aux matières plastiques*
 - *Fils électriques émaillés*
- Câbles électriques isolés au caoutchouc
- Câbles électriques isolés aux matières plastiques
- Câbles électriques isolés pour hautes températures
- Câbles électriques à haute tension
 - *Câbles électriques isolés par usage*
- Câbles électriques isolés sur spécification du client
 - *Fils et câbles pour l'électronique et les télécommunications*
- Conducteurs torsadés pour télécommunications et électronique
- Câbles électriques coaxiaux
 - *Matériel pour réseau informatique*
 - *Matériel de transport par câble aérien*
- Câbles aériens, monocâble
- Câbles aériens, double câble
 - *Equipements électriques et électroniques pour véhicules automobiles*
- Assemblages de câbles et faisceaux pour automobiles

CHAPITRE II

LE CUIVRE

Ce premier chapitre se veut une présentation du cuivre, des techniques de son élaboration, de ses caractéristiques et de ses applications industrielles diversifiées.

II.1 Introduction :

Le cuivre est un métal rougeâtre caractérisé par son excellente conductivité électrique et qui est donc surtout utilisé pour les câbles électriques. C'est un métal ductile et résistant à la corrosion. Il tire son nom du latin Cuprum, lui-même dérivé de Cyprum, le nom latin de l'île de Chypre d'où il était extrait à l'époque.

La production mondiale de cuivre s'élevait en 2004 à 14.6 millions de tonnes (3eme métal le plus produit après le fer et l'aluminium). Les principaux pays producteurs de minerai sont le Chili et les Etats-Unis.

II.2 Production et Extractive :

Le Cuivre métallique existe à l'état natif, il est essentiellement présent dans la nature sous forme de composés et en particulier de sulfures comme la chalcopirite (CuFeS_2) et la chalcocite (Cu_2S). Il se présente sous forme de sels contenant 30 à 90 % de cuivre, eux-mêmes mélangés aux stériles et quelquefois à d'autres métaux, dont certains peuvent être plus rares que le cuivre, comme l'or et l'argent. Un minerai est considéré comme riche à partir de 1,8 % de cuivre pur. Selon la forme des gisements et leur profondeur, il existe 2 types d'exploitation :

- a. Les mines à ciel ouvert Où les travaux d'excavation et de terrassement puissent se faire dans des conditions économiquement rentables.
- b. Les mines souterraines.

Les minerais de cuivre se présentent généralement sous deux formes :

- Les minerais sulfurés.
- Les minerais oxydés.

Cette différenciation définit le processus à suivre pour l'obtention du cuivre pur, pyrométallurgie pour les minerais sulfurés, hydrométallurgie pour les minerais oxydés.

Les minerais oxydés donnent lieu, de leur côté, à un traitement particulier par voie chimique, dit procédé de lixiviation.

La première étape du traitement des minerais sulfurés en vue de l'obtention de concentrés consiste en des opérations successives de tamisage, concassage, broyage et triage, qui les transforment en poudre grossière, sur laquelle on projette de l'eau. Par un traitement de flottation dans l'eau puis de décantation, qui consiste à faire remonter à la surface la partie la plus riche du minerai pour le séparer des boues qui restent au fond du bain, on obtient un concentré contenant 25 à 40 % de cuivre (Figure II.1).

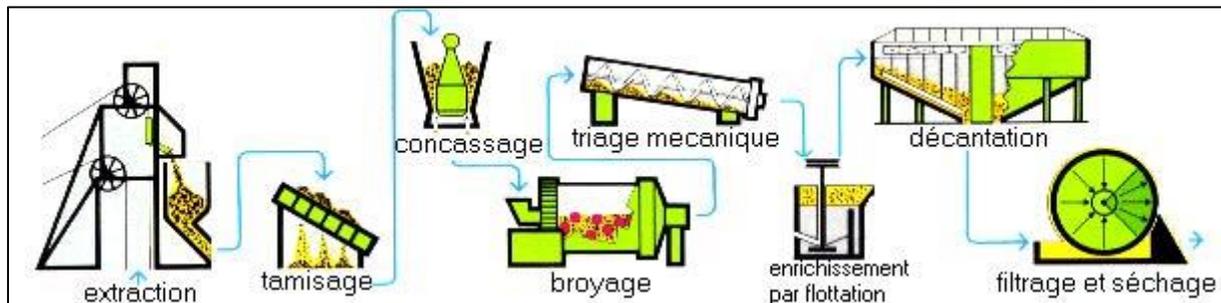


Figure II.1 : Traitement du minerai [6].

II.3 L'élaboration métallurgique :

II.3.1 Le blister :

C'est le premier traitement à haute température. Dans un premier temps, à l'état liquide en présence de fondants, on sépare par gravité et par grillage les stériles plus légers des sels de cuivre plus lourds, pour obtenir la matte fortement chargée en soufre, contenant 40 à 60 % de cuivre.

Dans un deuxième temps, un convertissage à environ 1 300° dans un four rotatif permet de séparer le cuivre des autres constituants contenus dans la matte. Cette opération aboutit à la production de blisters contenant 98 à 99,5 % de cuivre, qui se présentent sous forme de plaques. Les blisters sont encore impropres à une utilisation dans l'industrie, parce que leur pureté est insuffisante, et doivent subir par conséquent une nouvelle opération d'affinage.

II.3.2 L'affinage :

Il existe deux procédés d'affinage :

II.3.2.1 L'affinage thermique :

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

de cuivre. On obtient alors un cuivre de qualité thermique, qui contient encore de 0,02 à 0,04 % d'oxygène et un peu d'hydrogène, Aujourd'hui Ce procédé n'est presque plus utilisé [1].

II.3.2.2 L'affinage électrolytique :

Qui transforme le blister, préalablement coulé sous forme d'anode, en cathode par le procédé de l'anode soluble. Le cuivre obtenu est pur mais il n'est pas encore utilisable en l'état à cause de sa porosité et de la présence possible d'inclusions d'électrolyte [1].

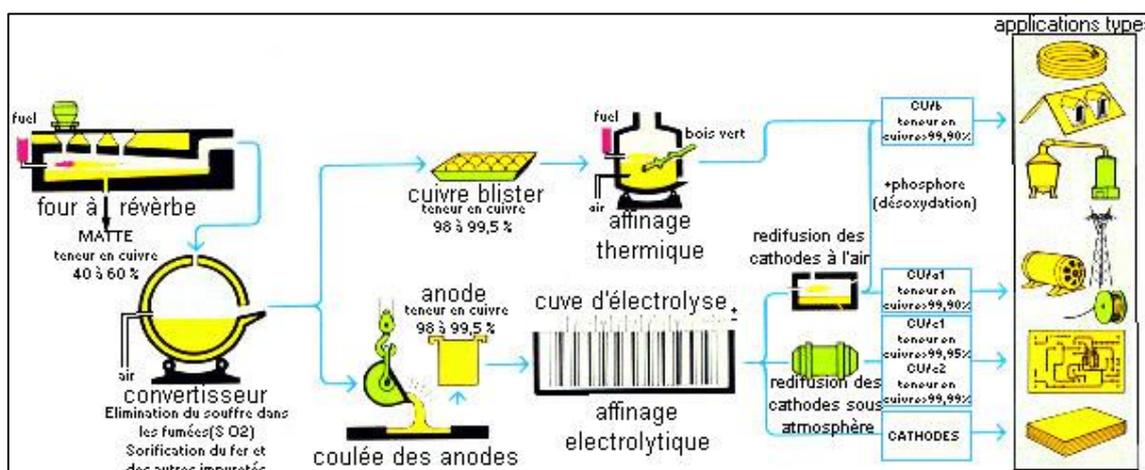


Figure II.2 Élaboration et affinage [6].

- Quel que soit le procédé d'affinage, on refond les lingots obtenus par affinage thermique et les cathodes obtenues par affinage électrolytique, afin de disposer des ébauches directement utilisables dans la transformation du cuivre. L'opération de refusions conduit, sans précaution particulière, à la dissolution dans le métal liquide de faibles quantités d'oxygène désirables ou non suivant le type d'application. On est amené, dans certains cas, à disposer de nuances de cuivre sans oxygène que l'on obtient :

- soit par ajout d'un désoxydant lors de la refusions.
- soit par une protection efficace contre l'oxygène quand le métal est à l'état liquide.

On distingue ainsi trois nuances de cuivre industriel suivant la présence ou non d'oxygène et son procédé d'élimination :

a. Le cuivre Cu-a :

Contenant de l'oxygène, existe sous forme de trois nuances normalisées dépendant du procédé d'affinage : **Cu-a1**, **Cu-a2** et **Cu-a3**.

- Le cuivre **Cu-a1**, obtenu par affinage électrolytique, contient une teneur en cuivre supérieure ou égale à 99,90% en masse. C'est le cuivre le plus pur chargé en oxygène et aussi le plus couramment utilisé. Il a de hautes conductivités électrique et thermique

et est destiné à des usages électriques (ou thermiques). Il est difficilement soudable et ne peut être utilisé sous vide.

- Les deux autres nuances (**Cu-a2**): $\text{Cu} \geq 99,90\%$ et **Cu-a3** : $\text{Cu} \geq 99,85\%$) sont obtenues par affinage thermique, seule la première étant de conductivité électrique garantie. Ces cuivres sont cependant moins utilisés que le cuivre **Cu-a1**, en raison de présence d'un taux d'impuretés plus élevé.

b. Le cuivre Cu-b :

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

c. Le cuivre Cu-c :

Exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, **Cu-c1** (cuivre pur) qui comprend 99,95 % de cuivre et **Cu-c2** (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. C'est l'équivalent des cuivres de marque OFHC (Oxygen Free High Conductivity) d'origine américaine. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques (ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité) [7].

II.4 Propriétés de cuivre :

II.4.1 Propriétés physiques :

Le cuivre Cu-ETP est un matériau diamagnétique de structure cristalline cubique à faces centrées (c.f.c.) ; son paramètre de maille est égal à 3,608Å à 18°C. Il a une température de fusion de 1084°C, une masse volumique variant entre 8,89.103 et 8,92.103 kg/m³ à 20°C (selon la teneur en oxygène) et une résistivité électrique variant entre 1,724 à 1,682 μΩ.cm à 20°C. Les propriétés physiques sont rassemblées dans le Tableau II.1 :

Tableau II.1 Les propriétés physiques de cuivre

Elément			
Cu (M = 63,54, Z = 29)			
Température de fusion	1065° à 1083°C		
Coefficient de dilatation (en 10^{-6} K^{-1})	de 25° à 100°C	16,8	
	de 20° à 200°C	17,3	
Capacité thermique massique (en J/(Kg.K))	20°C	386	
	200°C	403	
Conductivité thermique (en W/(m.K))	20°C	400	
	200°C	381	
Conductivité électrique	Etat écroui	20°C	97
	Etat recuit	20°C	100 à 102,5
Résistivité électrique ρ (en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Etat écroui	20°C	1,78
	Etat recuit	20°C	1,724 à 1,682

II.4.2 Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques sont rassemblées dans le Tableau II.2 :

Tableau II.2 Les propriétés mécaniques de cuivre.

Etat de livraison	Symbole AFNOR	Rp _{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (A %)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	320	45	50
¼ dur	H11	190	370	25	80
½ dur	H12	250	300	14	100
¾ dur	H14	320	350	6	100

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

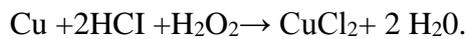
Rm résistance mécanique

II.4.3 Propriétés chimiques :

Le cuivre ne réagit pas avec l'eau, mais réagit lentement avec l'oxygène de l'air en formant une couche d'oxyde de cuivre noir. Contrairement à l'oxydation du fer par une atmosphère humide, cette couche d'oxyde empêche toute corrosion en masse.

Dans des solutions contenant des sulfures, le cuivre se corrode. Le cuivre se dissout lentement dans les solutions aqueuses d'ammoniaque contenant de l'oxygène, parce que l'ammoniaque forme avec le cuivre des composés hydrosolubles.

Le cuivre réagit avec une solution acide de peroxyde d'hydrogène qui produit le sel correspondant :



Lorsque le cuivre est en contact avec des métaux présentant un potentiel électrochimique différent (par exemple le fer), en particulier en présence d'humidité, la fermeture d'un circuit électrique fera que la jonction se comportera comme une pile électrochimique. Dans le cas par exemple d'une canalisation en cuivre raccordée à une canalisation en fer, la réaction électrochimique entraîne la transformation du fer en d'autres composés et peut éventuellement endommager le raccord [13].

II.5 Influence des impuretés :

Les impuretés, issues des matières premières et/ou ajoutées (oxygène) au cours du procédé d'élaboration, sont considérées comme un facteur déterminant de la qualité du cuivre industriel. La plupart des études antérieures ont conclu que la présence des impuretés ralentit la cinétique de recristallisation [16].

Les principales impuretés mentionnées dans la littérature sont Te, Se, Bi, Sb, As, Sn, Pb, Fe, Ni, S et Ag, représentant une teneur totale d'éléments étrangers hors oxygène d'environ 65ppm dans le cuivre industriel Cu-a1. Certaines d'entre elles (P, Fe et Si) sont dramatiques pour les propriétés électriques. Ce qui impose d'en conserver une teneur très faible. D'autres, par contre, influent peu sur les propriétés électriques mais sont déterminantes pour les propriétés mécaniques du fil : c'est le cas du soufre et du plomb, qui dégradent l'allongement à rupture à partir de 5 ppm et de 1 ppm respectivement [7].

Tableau II.3 Appellations et teneurs en impuretés des divers cuivres industriels non alliés [7].

Norme française	Cu-a1	Cu-a12	Cu-a3	Cu-b1	Cu-b1	Cu-c1	Cu-c1
Norme ISO 431	Cu-ETP <i>Electrolytic Tough Pitch</i>	Cu-FRHC <i>Fire-Refined High-Conductivity Tough Pitch</i>	Cu-FRTP <i>Fire Refined Tough Pitch</i>	Cu-DHP <i>Deoxidized copper, High residual Phosphorus</i>	Cu-DLP <i>Deoxidized copper, Low residual Phosphorus</i>	Cu-OF <i>Oxygen Free</i>	Cu-OFE <i>Oxygen Free Electronic copper</i>
Teneur en masse (ppm)	O ₂ 50 à 400	O ₂ 50 à 400	O ₂ 150 à 400	P 130 à 500	P 130 à 500	P 30	P 30
Ag :							
S, Fe, Ni :	5-20	5-20	5-20				
As, Se, Sn,	5-15	5-15	10-20				
Pb :	1-5	1-5	1-5				
Te, Au,	<1	1-5	1-5				
Bi :							

II.6 Effet des impuretés sur la température de recristallisation et les propriétés mécaniques :

Concernant l'effet des impuretés sur la température de recristallisation, l'étude effectuée par Coutsouradis et al.[16] est révélatrice, elle indique une variation de la température de recristallisation en fonction des impuretés présentes dans le matériau (Figure II.3). L'étude a été réalisée sur des cuivres de haute pureté (99,999%), dopés avec différentes combinaisons d'impuretés à des teneurs incluant celles atteintes par les méthodes courantes de raffinage, la teneur d'oxygène était d'environ 200 ppm. Les températures de recristallisation ont été déduites de la détermination de l'allongement d'une "spirale" en fonction de la température finale de recuit pour des fils écrouis à 97,4%, après recuit préalable à 850°C.

Ces auteurs ont constaté que la présence de certaines impuretés augmente la température de recristallisation. Cette augmentation est particulièrement importante dans le cas du plomb, du soufre et du bismuth.

La solubilité du plomb dans le cuivre dépend fortement de la teneur en oxygène. Pour un Cuivre contenant 200 ppm d'oxygène, cette solubilité est de l'ordre de 10 ppm à 800°C. Au-delà de 10 ppm, le plomb se trouve sous forme d'inclusions.

Le plomb a une influence considérable sur la température de recristallisation lorsque sa teneur dépasse 2ppm. En l'absence d'oxygène, la température de recristallisation croît fortement avec la teneur en plomb (environ +47° pour 13ppm de plomb). Mais en présence

d'oxygène, après un recuit préalable à 600°C, ils retrouvent une température de recristallisation proche de celle du cuivre pur (environ 116°C) [7].

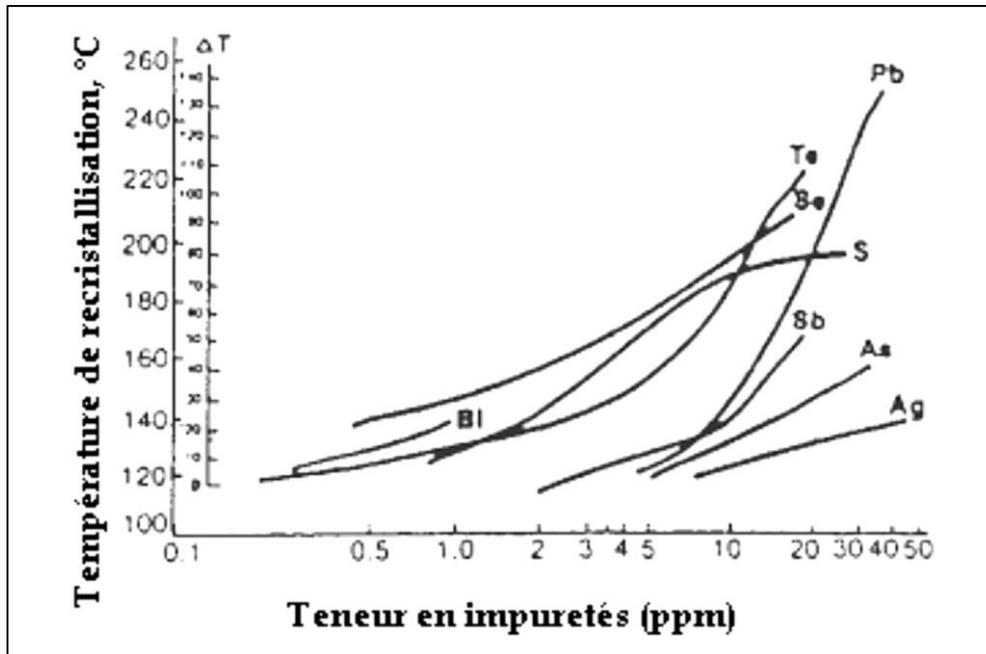


Figure II.3 Effets des impuretés sur la température de recristallisation du cuivre [7].

II.7 Le recyclage :

Le cuivre pur se recycle très facilement : il peut être fondu ou dissous dans un acide pour être à nouveau électrolysé. En particulier, les « circuits imprimés » présents dans tous les appareils électroniques sont fabriqués à partir de déchets de cuivre dissous, puis redéposés par électrolyse. On obtient ainsi des « foils » qui sont en fait des films très minces de cuivre dont l'épaisseur minimale est de 0.01mm. L'échantillon fourni dans le kit a été produit par cette technique et a une épaisseur de 0.11mm [9].

II.8 Les produits et les applications :

Après le traitement des minerais et l'opération d'affinage, le cycle de production du cuivre est terminé. Commence alors le travail de première transformation du métal qui débouche sur la fabrication de produits semi-ouvrés ou de produits finis qui se divisent en cinq domaines principaux :

- Fils et câbles en cuivre :

Leur fabrication commence par la réalisation d'une ébauche, en coulée continue, sur une roue à gorge dans laquelle se solidifie le cuivre qui est par la suite laminé à chaud. On obtient ainsi un fil rond de gros diamètre : c'est le fil machine. Ce fil est tréfilé à froid par passage dans des filières de diamètre de plus en plus petit jusqu'à obtention du diamètre final choisi. On peut ainsi atteindre un diamètre d'une dizaine de micromètres.

- Barres et profilés :

Les barres et profilés sont obtenus à la presse à filer. On part d'une billette cylindrique chauffée à haute température que l'on fait passer à travers une filière qui donne la section voulue sous forme d'une ébauche de grande longueur. Les ébauches sont ensuite étirées à froid afin d'obtenir les cotes finales, l'opération d'étirage ayant l'avantage de durcir le métal par écrouissage.

- Tube :

L'ébauchage à chaud des tubes est effectué soit dans une presse à filer équipée d'un piston perceur, soit sur un laminoir perceur dont le principe consiste à laminier les couches périphériques du métal entre des cylindres et un mandrin. Après ébauchage à chaud, la section est réduite, à froid, en épaisseur et en diamètre. Pour les amener à leur dimension finale. Les produits sont généralement livrés en longueurs droites écrouis ou en couronne à l'état recuit.

- Laminés :

On part de plateaux de plusieurs tonnes qui sont laminés à chaud pour donner des ébauches de grande longueur et d'épaisseur réduite à quelques centimètres. Les opérations suivantes sont des laminages à froid entrecoupés de recuits intermédiaires qui ont pour but de permettre au métal de subir les transformations ultérieures dans de bonnes conditions. Les produits finis laminés sont ensuite éventuellement cisailés pour l'obtention des formes finales en tôles, rubans ou bandes minces.

- Pièces moulées :

Pour obtenir directement des produits de formes complexes ou volumineuses, on a recours à la fonderie. Il existe plusieurs technologies de moulage comme la coulée continue, le moulage au sable ou en coquille pour trois types d'alliages essentiellement : les laitons, les bronzes et les cupro-aluminiums [1].

CHAPITRE III

LE PROCEDE DE TREFILAGE DU CUIVRE

III.1 Introduction

Le tréfilage est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, par déformation plastique, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'effet combiné d'application d'un effort de traction et d'un effort radial de compression et en présence d'un lubrifiant.

Il est caractérisé par différents paramètres, à savoir la vitesse et la température de tréfilage, la géométrie des filières et les conditions de frottement, la structure et les propriétés du matériau

Les matériaux le plus utilisés dans le cadre d'applications industrielles sont l'acier, le cuivre, l'aluminium et le tungstène. Les applications des produits mise en œuvre par tréfilage peuvent être utilisées en soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatiques.

III.2 Description du procédé de mise en forme :

Le tréfilage est l'un des procédés de mise en forme à froid les plus utilisés dans le milieu industriel, en particulier dans le secteur électrique et pour la fabrication de fils métalliques. Le processus consiste à étirer un fil, en plusieurs passes, en réduisant progressivement son diamètre à travers des filières, sous l'action d'une traction continue. La déformation du métal, résulte de l'application d'un champ de contrainte pour provoquer un écoulement plastique, de façon à obtenir une géométrie donnée. Cette mise en forme du fil au cours de l'étirage à travers les filières provoque une modification générale des propriétés mécaniques.

Les variations de ces propriétés en fonction de l'écrouissage sont exploitées de façon à obtenir pour une géométrie donnée, des propriétés mécaniques souhaitées, un état de surface déterminé et une qualité de fil requise.

L'ensemble du matériel de tréfilage comporte trois éléments, schématisés figure III.1 :

- Un dispositif de dévidage du fil,
- Une tréfileuse mono ou multi passes, mono ou multi fils.
- Un dispositif de récupération du fil écroui

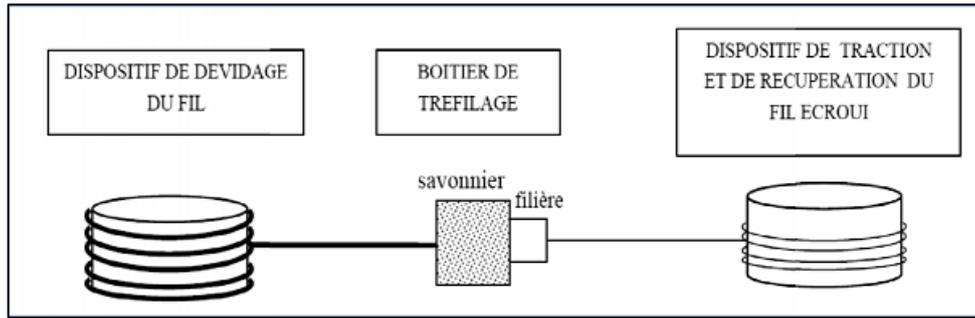


Figure III.1 Schéma d'un dispositif de tréfilage

Dans une machine de tréfilage multi passes (figure III.2), le fil est tracté, entre chaque filière, par des cônes (cabestans) qui transmettent la force nécessaire au tréfilage par frottement. Le fil, les filières, et les cabestans sont complètement immergés (ou arrosés) dans un bain d'huile ou d'émulsion d'huile qui joue le rôle de lubrifiant et d'échangeur thermique.

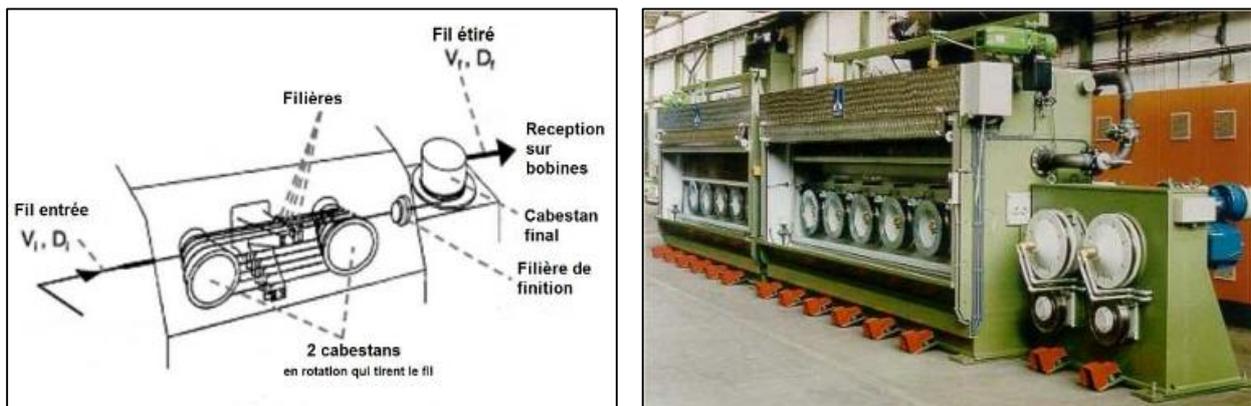


Figure III.2 Schéma et machine multi passes [8].

Le matériau de départ utilisé pour le tréfilage est appelé fil machine, de diamètre de l'ordre de 8mm pour le cuivre et ses alliages et 9.5 mm pour l'aluminium et ses alliages. Le fil machine provient du laminage à chaud d'une barre de coulée produite par coulée continue et se présente, généralement, sous forme de bobines

Le fil provision, à l'entrée de la tréfileuse. Passe par un outil (filière). A la sortie d'une filière le fil est enroulé autour du cabestan afin de le tracter. Quand l'effort de traction nécessaire au passage dans l'outil est atteint.

Dans une machine multi passes, la vitesse linéaire du fil augmentant au fur et à mesure que le fil s'allonge, chaque cabestan doit avoir une vitesse linéaire plus importante que le précédent.

Il existe différents types de machines selon les sections de fils en cuivre souhaitées, par exemple :

- Les tréfileuses de tête qui permettent une réduction du diamètre du fil machine jusqu'à un diamètre compris entre 1 et 5 mm. Généralement ces tréfileuses sont monofilaires ou bifilaires, pouvant réaliser jusqu'à 13 passes de tréfilage,
- Les tréfileuses fils moyens et fins, généralement multi fils à 21 passes permettent de réduire le fil provision jusqu'à un diamètre minimum de 0,15mm,

Les tréfileuses pour fils extrafins permettent d'atteindre des diamètres inférieurs à 40µm.

Des traitements thermiques sont mis en œuvre, après tréfilage, pour supprimer l'effet de l'érouissage et adoucir le fil (recuit) ou pour avoir des caractéristiques particulières (allongement, structure micrographique...). Les opérations de recuit sont effectuées, généralement en ligne pour le cuivre grâce à un recuiseur par effet joule.

III.3 Outils et équipements industriels du tréfilage :

III.3.1 Les machines de tréfilage :

III.3.1.1 Machine simple :

C'est la configuration de base Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception., Elle peut effectuer qu'une seule réduction c'est-à-dire une réduction de section de 35 % au maximum.

Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant, à chacun des blocs sont associés un ensemble de dévidage et un dispositif de réception.

On distingue :

- les blocs simples, à axe de bobine vertical ;
- les bancs de couche, à axe de bobine horizontal.

III.3.1.2 Machines multiples :

Sur ces machines, des réductions de section importantes sont obtenues par des réductions successives effectuées sur le même appareil.

Dans ce cas, le fil passe d'une bobine à une autre en traversant une filière, et il subit à chaque fois une réduction de section et un accroissement de vitesse (loi de conservation du débit de matière).

Il existe trois types de machines multiples :

- **les machines continues ou à passage direct** : Ce sont les équipements les plus modernes, Ces bancs travaillent avec une grand vitesse et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil. Ce type de machine est particulièrement utilisé pour le tréfilage des aciers inoxydables, car ceux-ci ne nécessitent pas un refroidissement entre passes aussi poussé que d'autres types d'aciers (figure III.3).

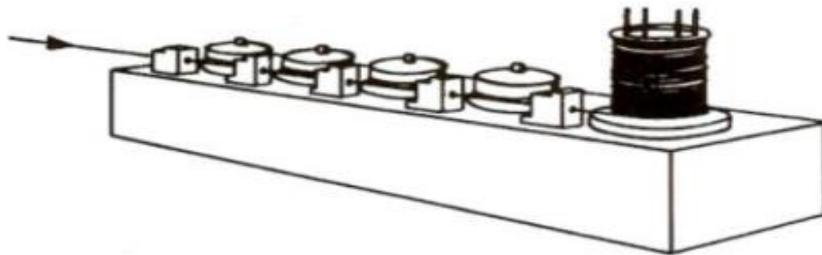


Figure III.3 Machine multiple continue [6].

- **Les machines à accumulation** : 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 et on trouve le manque d'équilibrage automatique (figure III.4).

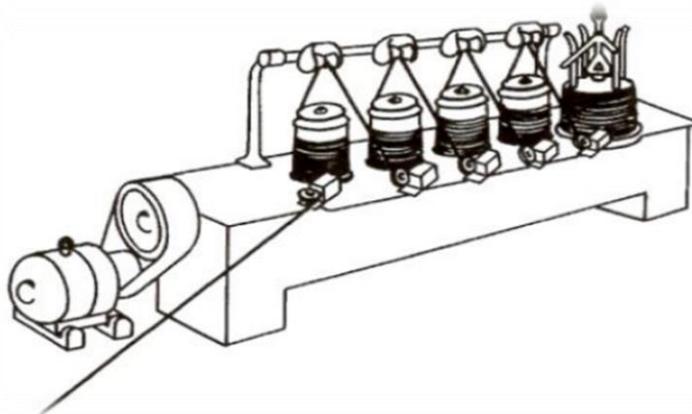


Figure III.4 Machine multiple continue [6].

- **Les machines à glissement** (figure III.5) : utilisé pour le tréfilage humide travaillé son équilibrage de vitesses et accumulation de fil. Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche", c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 5,5mm à 1 ou 2 mm en plusieurs passes.

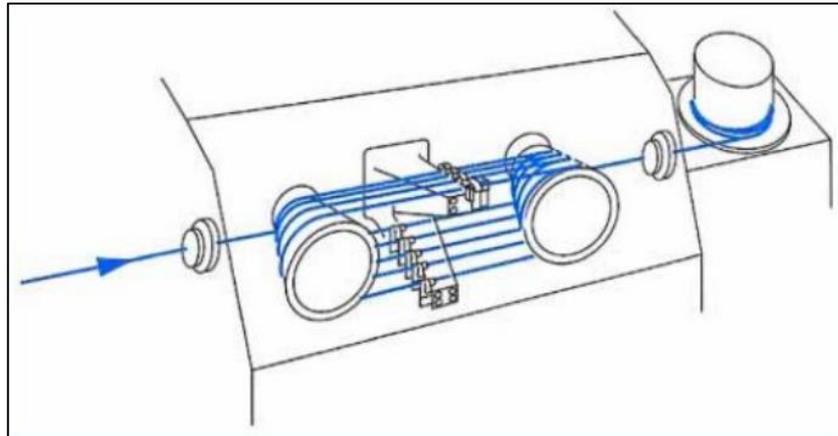


Figure III.5 Machine multiple à glissement (à cône) [6].

III.3.2 Filière :

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage, Elle est constituée d'un noyau dur, généralement en carbure de tungstène (pour des gros fils $>1.8\text{mm}$) lié au cobalt ou en diamant, fretté dans une monture généralement en acier (figure III.6).

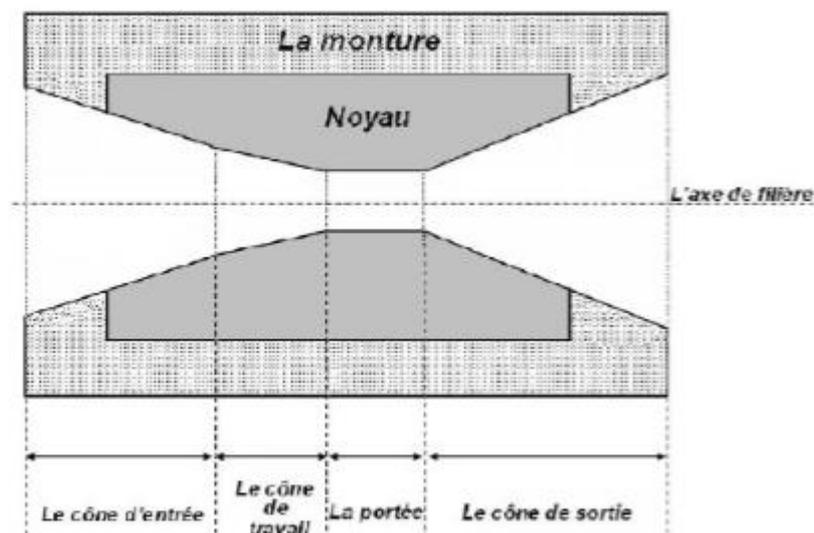


Figure III.6 Coupe de filière [8].

Pour les fils plus fins, les noyaux des filières sont constitués (tableau III.1) :

- ❖ De diamants monocristallins (MD), cristallisés sous des pressions et températures très élevées, utilisés pour le cuivre pour des petits diamètres inférieurs à 0,50 mm.
- ❖ D'une masse synthétisée très dure de cristaux de diamant, noyaux poly cristallins (PCD), utilisés pour des diamètres supérieurs à 0,50 mm. Généralement utilisés pour le tréfilage du cuivre et des alliages d'aluminium.

Tableau III.1 Noyau, utilisation et propriétés.

Matière constitutive du noyau	Matériau tréfilé	Utilisation et propriétés
Carbure de tungstène (WC)	Aluminium	Faible quantité Peu abrasif
Diamant Poly cristallins (PCD)	Alliage d'aluminium Cuivre $d \geq 0.5\text{mm}$	Grande quantité
Diamant naturel ou synthétique (ND ou SD)	Cuivre $d < 0.5\text{mm}$	Coefficient friction inférieur à celui du PCD

D'une façon générale, la géométrie d'une filière est définie par quatre zones principales, constituées d'une succession de formes de révolution (figures III.7 et III.8) :

- Un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant.
- Un cône de travail, de demi-angle α , dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation inhomogène progressive du fil.
- Une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil,
- Un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant,
- Le « Back relief » permet de ne pas blesser mécaniquement le fil lors de l'arrêt de la Machine et le léger recul du fil dans la filière.

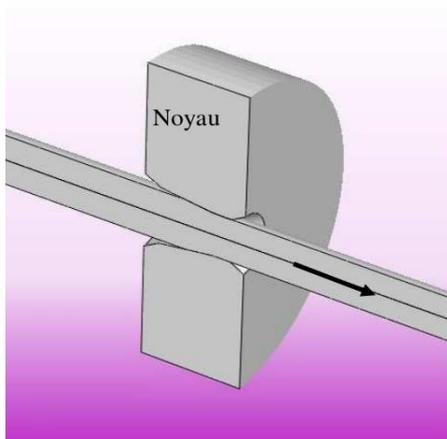


Figure III.7 Fil et Filière pendant la Déformation [8].

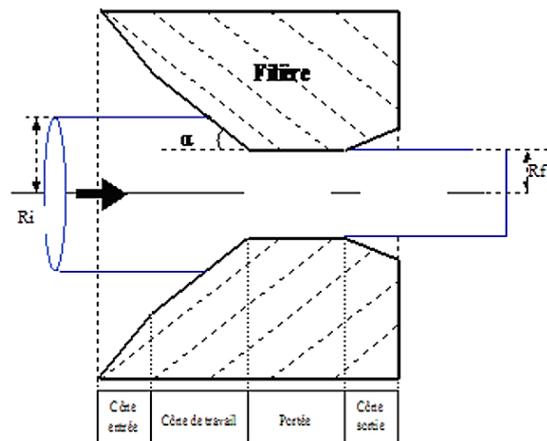


Figure III.8 Coupe - Géométrie conventionnelle, zones constituantes [8].

Les grandeurs géométriques et mécaniques utilisées pour décrire le tréfilage :

$$\text{Section}_i \cdot L_i = \text{Section}_f \cdot L_f$$

Nous avons alors, L'allongement du fil λ :

$$\lambda = \frac{L_i}{L_f} = \left(\frac{R_i}{R_f}\right)^2 \dots\dots\dots \text{Equation III.1}$$

Avec L_i , L_f : les longueurs initiales et finales de fil et R_i , R_f rayons initial et final de fil.

– La réduction du fil r

$$r = 1 - \left(\frac{R_i}{R_f}\right)^2 \dots\dots\dots \text{Equation III.2}$$

– La déformation :

$$\varepsilon = \ln(\lambda) - \left(\frac{R_i}{R_f}\right) \dots\dots\dots \text{Equation III.3}$$

III.3.3 Lubrification :

La déformation brutale dans une filière de tréfilage nécessite l'emploi d'un lubrifiant pour limiter le frottement et l'usure et assurer un régime de lubrification stable. Et diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, son rôle est de former un film mince suffisamment épais sur le fil pour éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface.

Un bon lubrifiant de tréfilage doit donc posséder comme propriétés :

- une viscosité suffisante.
- une bonne résistance à la mise en pression
- une bonne résistance à la température
- une bonne résistance au cisaillement
- une bonne stabilité chimique dans le temps.

En pratique, selon les tréfileuses, le lubrifiant est soit une huile minérale, soit une graisse soluble

III.4 Paramètre de tréfilage

Vu que le tréfilage est un procédé de mise en forme par déformation plastique, il est caractérisé par un certains nombres de paramètres, à savoir en premier lieu la nature, la structure, et la qualité du matériau à tréfiler ; ensuite la vitesse et la température de tréfilage ; la géométrie des filières, et les conditions de frottement.

III.4.1 Vitesse de déformation :

Les vitesses de déformation du métal dépendent essentiellement de la vitesse d'entrée du fil dans la filière, du taux de réduction et de l'angle de la filière. Ces vitesses varient de quelques dizaines de s^{-1} à plusieurs centaines de s^{-1} . La vitesse de déformation au point de contact du fil avec la filière qui est donnée par la relation (4) [9] :

$$\dot{\varepsilon} = 2 \frac{V_e (r_e)^2}{(r_s)^3} \sin \alpha \dots \dots \dots \text{Equation III.4}$$

Les paramètres de l'équation (4) sont définis sur la figure III.9 :

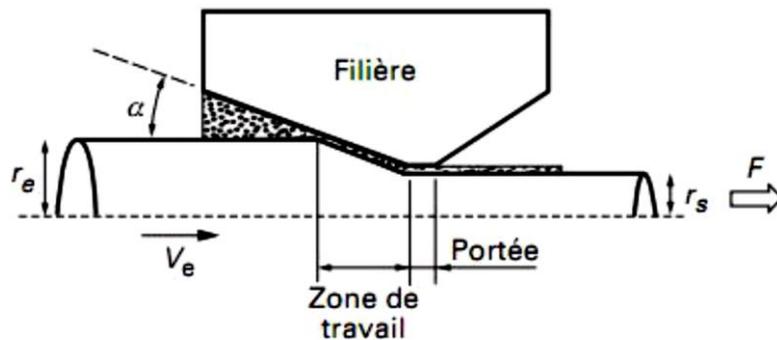


Figure III.9 Passage d'un fil dans une filière [9].

III.4.2 Force de tréfilage

La force nécessaire pour tréfiler le fil est donc la somme de la force nécessaire pour déformer plastiquement le fil et de la force nécessaire pour vaincre le frottement.

Le contact lubrifié fil-filière, se traduit par un cisaillement, représenté par :

- coefficient de frottement (μ).
- Le fil est caractérisé,
- contrainte d'écoulement plastique (σ_0) et les diamètres d'entrée (D_0) et de sortie (D_1).

Les modèles de Siebel et Bonzel (équation (5)), donnent la contrainte de tréfilage (σ) en fonction de la déformation appliquée ε [9].

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{3\alpha}{4\varepsilon} \right) \text{ avec } \varepsilon = \ln \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^2 \dots \dots \dots \text{Equation III. 5}$$

La figure III.10 ci-dessous montre les forces en présence pendant le tréfilage :

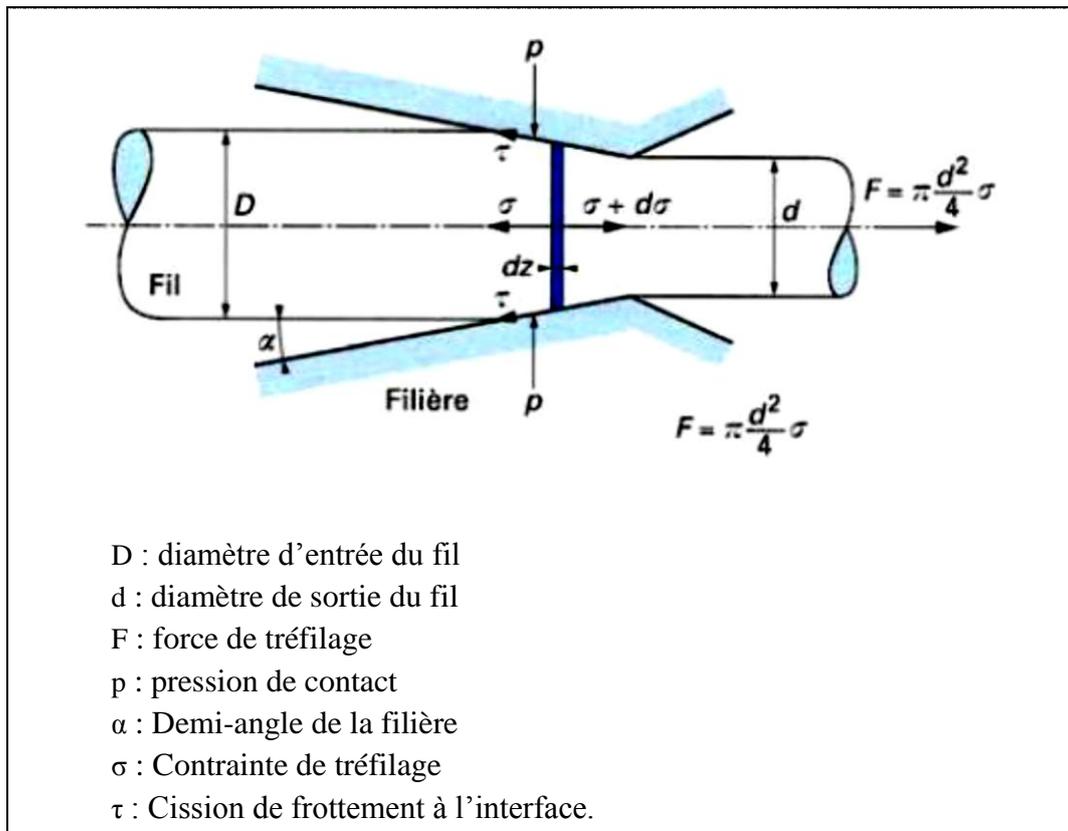


Figure III.10 Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [26].

III.4.3 Frottements :

Il génère une augmentation de la force de tréfilage et de la température au cours de l'opération et peut causer plusieurs défauts comme les rayures sur les fils et il est aussi responsable en partie de l'usure de la filière. Pour le minimiser il faut faire un ajustement optimal des paramètres de tréfilage (réduction du fil, angle de filière, et/ou une bonne utilisation des lubrifiants) [9].

Le frottement peut être estimé de manière expérimentale, lors d'essais de tréfilage, par mesures directe ou indirecte :

- la mesure directe consiste à mesurer la force axiale et la force normale de tréfilage.
- la mesure indirecte consiste à mesurer la force axiale de tréfilage et à calculer le coefficient de frottement grâce à un modèle mécanique et à la connaissance de la contrainte d'écoulement du fil.

III.4.4 Echauffement du fil

L'énergie de tréfilage est dissipée et échauffe fil et filière, à la sortie de la filière, l'échauffement $\Delta\theta$ du fil s'uniformise rapidement à une valeur donnée par la formule (6) suivante :

$$\Delta\theta = \frac{F_u}{\rho c} \dots \dots \dots \text{Equation III. 6}$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fil.
- c : capacité calorifique massique fil.

III.5 Les incidents au cours de tréfilage :

Les opérations de tréfilage sont confrontées à de nombreux problèmes, de nature techniques ou matériels, cela se traduit par l'apparition d'imperfections au niveau du produit tréfile, influant ainsi sur sa qualité.

Au tréfilage, un certain nombre de défauts sur fil peuvent apparaître :

III.5.1 La rayure :

La rayure est facilement détectable, le fil a un aspect brillant et possède une ligne continue sur sa surface périphérique. Elle est due, au frottement fil/filière, mais d'autres paramètres peuvent provoquer cette rayure :

- Par une lubrification incomplète ou un mauvais choix de lubrifiant
- Par des traces d'humidité sur la bobine, dans le lubrifiant
- Le fil machine revêtu. ayant séjourné trop longtemps dans l'atelier
- Non-respect des dimensions, dû à des outillages non adaptés
- Filière mal nettoyée au polissage, trace de poudre diamantée ou de carbure de tungstène

III.5.2 Les cassures

Au cours de procédé de tréfilage, des cassures se produisent, Les cassures sont dues à plusieurs causes:

- Ecrouissage trop important :en dépassant la limite d'écrouissage du métal
- Réduction trop importante si on applique une force de traction supérieure à la résistance a la rupture du fil, alors les forces résistantes sont supérieures la force de traction du fil.
- Mauvais réglage de la machine,

- un angle du cône de travail trop ouvert, provoque une rupture en « cup and cone »

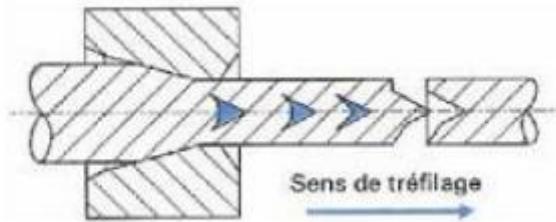


Figure III.11 Rupture en cup and cône d'un fil [9].

III.5.3 Introduction :

Les traitements thermiques ont pour but, d'une part, de permettre la transformation des produits en homogénéisant la composition et la structure de fonderie et en supprimant l'érouissage dû aux déformations à froid, et d'autre part, de conférer aux produits obtenus les caractéristiques nécessaires à leur mise en œuvre et à leur utilisation .

III.5.4 Le rôle principal d'un recuit :

- homogénéiser un alliage du point de vue tant chimique que micrographique, par exemple, le cas des alliages moulés, hétérogènes et de taille de grains non uniforme.
- modifier sa structure micrographique, par exemple par coalescence d'une phase ou par affinement du grain (normalisation)
- restaurer la structure d'un alliage après érouissage, soudage, ou traitement thermique antérieur
- diminuer les contraintes internes (relaxation).

III.5.5 Paramétré de recuit :

III.5.5.1 Température de recuit :

Elle joue le rôle primordial, vis-à-vis de la germination et de la croissance de grain. Plus la température est élevée, plus le grain est gros, et plus l'adoucissement est important .Elle influe sur la cinétique de recristallisation. L'augmentation de la température provoque la diminution de la période d'incubation représentée

III.5.5.2 Durée de recuit :

Elle a une influence sur la température de recristallisation et sur celle d'adoucissement .plus le recuit est long, et plus ces températures sont basses. La durée du recuit a également une

influence sur le diamètre du grain obtenu. Mais cette influence st bien moindre que celle de la température.

III.5.5.3 Vitesse de refroidissement :

Elle n'a pratiquement qu'une influence négligeable sur la taille du grain .EN effet elle ne réduit ou n'augmente que très peu la durée du recuit à température élevée, facture peu critique, elle est donc en général sans importance.

III.5.5.4 Le taux de déformation :

La vitesse de recristallisation dépend le taux de déformation, parce que la déformation change la quantité d'énergie emmagasinée et le nombre des germes effectif.au dessous d'une déformation minimale, la recristallisation n'aura pas lieu .Au-dessus de cette valeur, la vitesse de recristallisation augmente jusqu' à une valeur maximale

III.5.5.5 Vitesse de chauffage :

La vitesse de chauffage pour amener l'échantillon à la température de recuit peut également être importante parce qu'une vitesse de chauffage élevée peut réduire le taux de restauration.

III.5.6 Recuit de recristallisation :

C'est un traitement dans la zone de recristallisation située au-dessus de la température de fusion ($T_r=0.4T_f$). La structure distordue et écrouie par le travail mécanique à froid est remplacée par une nouvelle structure à grains fins équi-axes et libres de toute dislocation. Cette transformation est accompagnée d'une diminution importante de R_m , R_e , H et d'une augmentation de $A\%$ et K .

La recristallisation est régit par les lois suivantes :

- La température de recristallisation s'abaisse quand le taux de déformation augmente.
- La taille du grain recristallisé diminue, pour une même température de recuit, si le taux de déformation augmente.
- La recristallisation ne débute pour une même température qu'à partir d'un taux critique de déformation.

Il peut y avoir un grossissement des grains de recristallisation primaire par migration des joints de grains : les gros grains absorbant en général les petits. Ce phénomène est appelé recristallisation secondaire.

Le choix de la température de recristallisation est fonction d'une part du taux d'écroutissage et d'autre part de la durée de recuit. Pour que les grains restent fins il faut choisir des températures de recuit non élevées et des durées de maintien courtes, car les températures élevées conduisent parfois au lieu d'une croissance normale des grains, la soudaine d'un petit nombre de grains qui envahissent très rapidement toute la masse recristallisée [6].

III.5.7 Recuit et préchauffage du conducteur par effet joule :

A la fin de cette opération de tréfilage, le métal du conducteur est fortement écroui devient dur et sa résistivité électrique augmente. Il subit donc un recuit afin d'avoir les caractéristiques suffisantes en termes de résistivité et d'élongation. Enfin, il doit avoir une meilleure adhérence de l'isolant.

Pour recuire le conducteur, il faut le chauffer. A cette fin, il passe entre deux poulies conductrices soumises à une tension électrique (une poulie à la masse, l'autre à une tension Le passant dans le genre par effet Joule une augmentation de température [9].

Le recuit est effectué à la volée en 3 phases (Figure III.12) :

Zone 1 : phase de préchauffage du fil.

Zone 2 : phase de recuit du fil.

Zone 3 : phase de nettoyage, refroidissement puis séchage du fil.

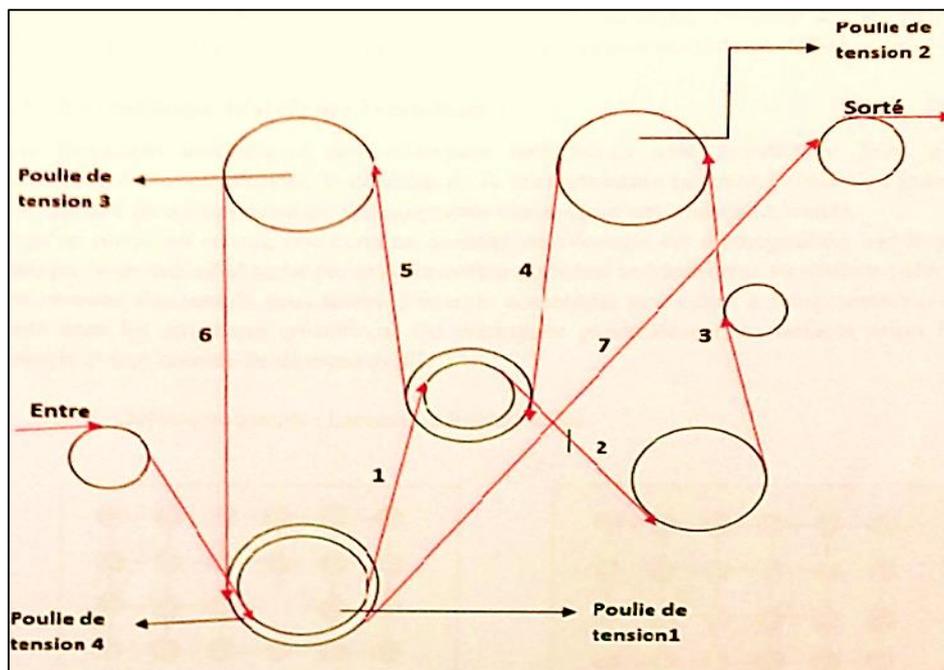


Figure III.12 Les phases de recuit par effet joule (1, 2, 3,4 et 5) zone de préchauffage, 6 zone de recuit, 7 zone de nettoyage, refroidissement puis séchage du fil.

CHAPITRE IV

LA DEFORMATION PLASTIQUE ET LA RECRISTALLISATION

IV.1 Introduction :

Afin de mieux comprendre les phénomènes de déformation et d'écrouissage qui se produisent lors du trefilage, ce chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la déformation plastique des métaux et alliages métalliques dont on prend en considération la théorie de la déformation et les différents types de déformation plastique.

Nous allons montrer également l'effet de la déformation à froid sur le comportement microstructural du matériau, ainsi que sa relation avec le corroyage, écrouissage, glissement de dislocations et maclage. En plus la déformation plastique des matériaux cristallins est souvent liée à la mobilité des dislocations. Contrairement au matériau ductile, cette mobilité est réduite dans les matériaux fragiles, du fait de la nature du matériau, ou bien d'une trop grande densité de défauts en volume empêchant la propagation de ces dislocations.

IV.2 Mécanismes de la déformation plastique :

La déformation plastique des métaux et des alliages polycristallins leur cause des changements dans les propriétés physiques, mécaniques, et structurales, telle que l'augmentation de la résistivité électrique. 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 de l'énergie de faute d'empilement γ_{SFE} du matériau.

Les lacunes contribuent à la résistivité électrique du matériau, et sont acteurs dans le phénomène de diffusion par lequel s'effectuent de nombreux processus physiques et mécaniques, ils jouent un rôle primordial dans la mobilité des dislocations, le mouvement des joints de grains ou autres types d'interfaces dans les solides.

Le durcissement d'écrouissage est fondé sur le principe : Tout ce qui empêche le mouvement des dislocations se traduit par une diminution de la déformation plastique et donc un effet durcissant. Ainsi pour diminuer la mobilité des dislocations, on doit accumuler les obstacles dans le matériau. Les dislocations contribuent aussi à l'augmentation de la résistivité électrique du matériau de manière non négligeable au même ordre que les lacunes et les défauts d'empilements.

IV.2.1 Déformation plastique par glissements :

Des analyses microscopiques d'échantillons déformés ont montré 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 VI.1 ci-dessous présente quelques-uns des principaux systèmes de glissement observés.

Tableau IV.1 Principaux systèmes de glissement observés [14].

Structure cristalline	Plans de glissement	Direction de glissement
Cubique face centrée (c.f.c)	{111}	<110>
Cubique centré (c.c)	{110}, {112}, {123}	<111>
Hexagonal Compact (h.c)	{0001}	<11-20>

Le glissement est un mouvement conservatif, c'est-à-dire qu'il se fait sans transport de matière, donc sans nécessiter de diffusion.

IV.2.2 Déformation plastique par maclage:

Dans les métaux de structure cubique, les deux modes de déformations les plus répandus sont le glissement et le maclage mécanique. La valeur de l'énergie de défaut d'empilement γ_{SFE} est le paramètre qui détermine le choix du mode de déformation. Dans les métaux à faibles valeurs de γ_{SFE} , la difficulté pour les dislocations de se déplacer par le processus de glissement-deviée (cross-slip), réduit la capacité d'un matériau à changer sa forme durant la déformation plastique, uniquement par des glissements, cela exige alors la production de maclage. Le maclage est un mode de déformation beaucoup plus compliqué que le glissement.

Dans le macle, les atomes du matériau se déplacent de telle manière que le réseau non transformé et le réseau maclé deviennent symétriques par rapport à un plan. dit « plan de macle » (figure VI.1). Ce mécanisme requiert d'importantes concentrations de contrainte. Le glissement et le maclage 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 maclage, les atomes se déplacent de moins d'une distance interatomique. Le déplacement coordonné des atomes induit une désorientation cristallographique de la région maclée par rapport au reste du cristal .

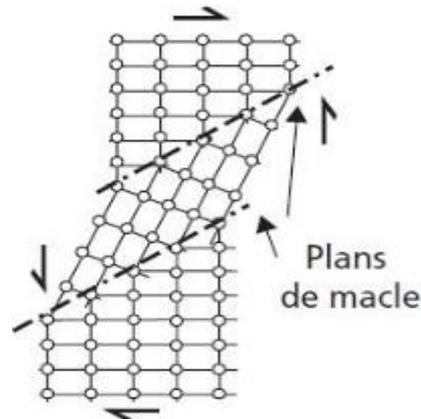


Figure IV.1 Système de maclage

Par conséquent l'importance du maclage sur la déformation totale est particulièrement marquée dans les matériaux où le nombre de système de glissement est réduit, comme ceux de structure hexagonale .

IV.3 Evolution de la microstructure de déformation :

Des observations ont montré que l'évolution de la microstructure est commune à différents métaux et alliages de moyenne et de forte énergie de faute d'empilement (Al, Cu, Ni, Ni-Co), déformés selon des modes différents (laminage, torsion) .

Lors d'une déformation à froid, la microstructure évolue en fonction du taux de déformation. Au cours du premier stade de déformation, les grains se subdivisent, changent de forme et s'allongent selon la direction de sollicitation. Une sous-structure de dislocations apparaît à l'intérieur des grains, dépendant de leur orientation cristallographique. La subdivision des grains donne lieu à une configuration cellulaire (blocs de cellules) constituée de "parois" à forte densité de dislocations entourant des volumes à faible densité de dislocations (Figure IV.2).

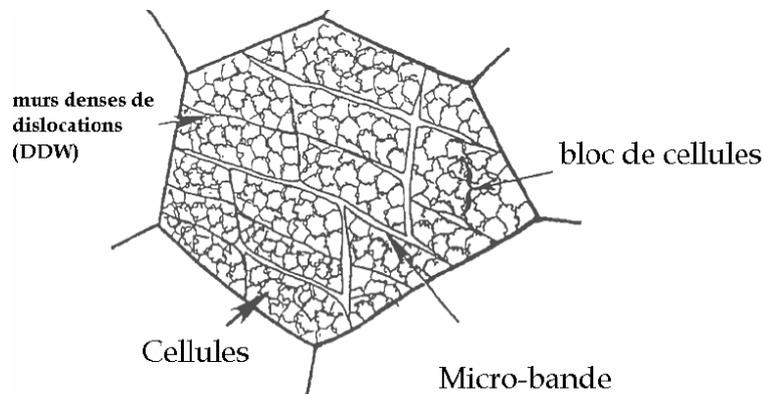


Figure IV.2 Blocs de cellules et murs denses de dislocations [7].

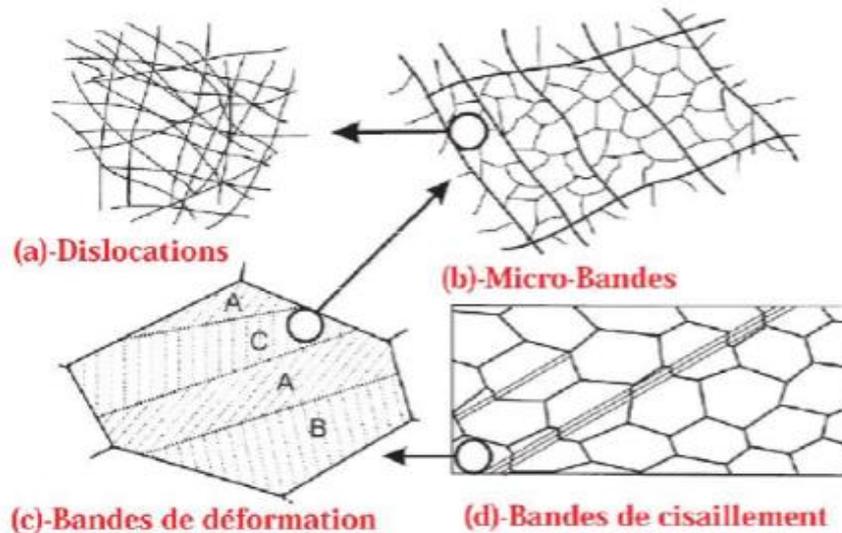


Figure IV.3 Hiérarchie de la microstructure de déformation [7].

Sur la figure IV.3 on présente la hiérarchie de la microstructure dans un métal polycristallin déformé par glissement. Les différents éléments sont montrés sur une échelle de taille croissante (a) Dislocations, (b) Bandes de dislocations, (c) Bandes de déformation et de transition avec le grain, (d) L'échantillon et les bandes de cisaillement à l'échelle granulaire.

Les dislocations peuvent exister sous forme « enchevêtrements » ou « forêts » (Fig IV.3.a), ou former des structures aléatoires libres, plus particulièrement après faible déformations. Dans les métaux, dans lesquels ne se forment pas des cellules.

Cellule et sous-grains : Dans la plus part des métaux la majorité des dislocations produites lors du processus de déformation forment des joints de cellules ou sous-grains (Fig IV.3 b), ce sont des plus petits volumes dans la microstructure déformée. Les figures (IV.4 et IV.5) montrent des micrographies de cellules de dislocations dans le Cuivre déformé, obtenues par microscopie électronique à transmission. Certains murs de dislocations peuvent être alignés ou avoir différentes désorientations.

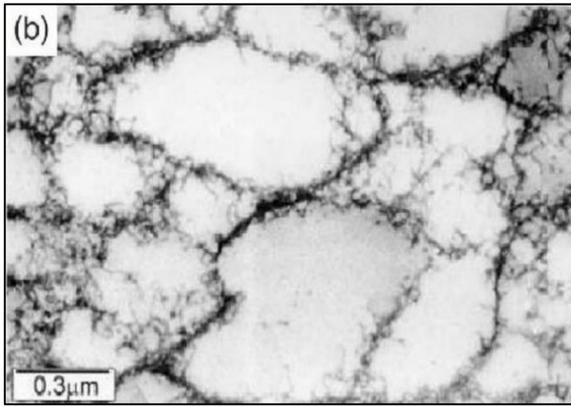


Figure IV.4 Structure cellulaire dans le cuivre déformé par laminage à froid à 25% [10].

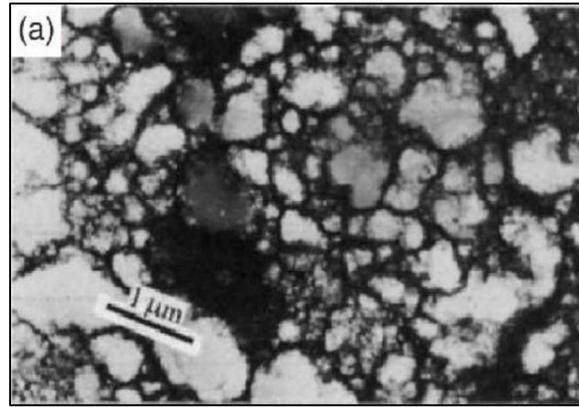


Figure IV.5 Les détails d'une structure cellulaire [10].

Des bandes de transition, constituées par un ensemble de microbandes, séparent des zones adjacentes fortement désorientées d'un même grain. Elles sont souvent parallèles à la direction de déformation principale et accommodent des désorientations supérieures à 20° sur des épaisseurs de 1 à 2 μm.

Des bandes de cisaillement, typiquement à 30 ou 40° de la direction de sollicitation, sous forme de longues bandes d'épaisseur 0,1 à 2 μm et de longueur 10 à 100 μm. La localisation de la déformation dans ces bandes est d'autant plus importante que la température et l'énergie de faute d'empilement sont faibles [10].

IV.4 Energie stockée :

Lors de la déformation plastique d'un matériau, une certaine quantité de l'énergie introduite (1 à 10%) est emmagasinée dans la microstructure déformée, principalement sous forme de dislocations [7]. Il est bien connu que cette énergie joue un rôle primordial dans les mécanismes de recristallisation ; en particulier, elle influence considérablement la mobilité des joints de grains lors de recuits thermiques. L'énergie stockée est approximativement donnée par l'équation suivante [7] :

$$E = E_{\text{dislocations}} + E_{\text{sous-joints}} \dots \dots \dots \text{Equation IV.1}$$

avec :

$$E_{\text{dislocations}} = c \rho G b^2 \dots \dots \dots \text{Equation IV.2}$$

Et :

$$E_{\text{sous-joint}} = \alpha \gamma_s / R, \dots \dots \dots \text{Equation IV.3}$$

où :

- ρ : est la densité de dislocations,
- G : le module de cisaillement,
- b : le vecteur de Burgers,
- c : une constante sans dimension de l'ordre de 0,5,
- R : le rayon des sous-grains,
- α : un facteur géométrique,
- γ_s : l'énergie des sous-joints. Cette dernière est directement liée à la désorientation (θ) entre les sous-grains par l'équation de Read-Shockley.

$$\gamma_s = \gamma_m (\theta/\theta_m) [1 - \ln(\theta/\theta_m)] \dots\dots\dots \text{Equation IV.4}$$

où γ_m et θ_m sont l'énergie de joint de grains et la désorientation maximale pour un joint à faible angle ($\theta_m \leq 15^\circ$).

Malgré son importance, il n'existe que peu d'études expérimentales consacrées à la détermination de l'énergie stockée. Les plus nombreuses ont été réalisées par microcalorimétrie (mesure directe de l'énergie). Cette technique ne donne accès qu'à une valeur moyenne de l'énergie sur l'ensemble de l'échantillon, indépendamment de l'orientation des grains. Or, on peut penser qu'elle n'est pas répartie de façon homogène dans le matériau.

IV.5 Etape de restauration et de recristallisation :

IV.5.1 La restauration :

La restauration se fait en plusieurs étapes (figure IV.6). Dans un premier temps, on assiste à une réorganisation de la sous-structure de dislocations. En favorisant la montée des dislocations par élévation de la température, on diminue la densité totale de dislocations par annihilation.

Les dislocations et les parois se structurent pour former des sous-joints, c'est l'étape de polygonisation. Puis, les 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.

Cette restauration peut être influencée par le taux de déformation, la température de recuit et les caractéristiques du matériau (énergie de faute d'empilement, éléments en solution solide et précipités). La restauration est d'autant plus rapide et se fait à température d'autant plus basse que l'énergie stockée est plus élevée. Cette énergie augmente avec la déformation et dépend de l'orientation du grain considéré. La texture développée pendant la déformation ne change pas de manière appréciable pendant la restauration.

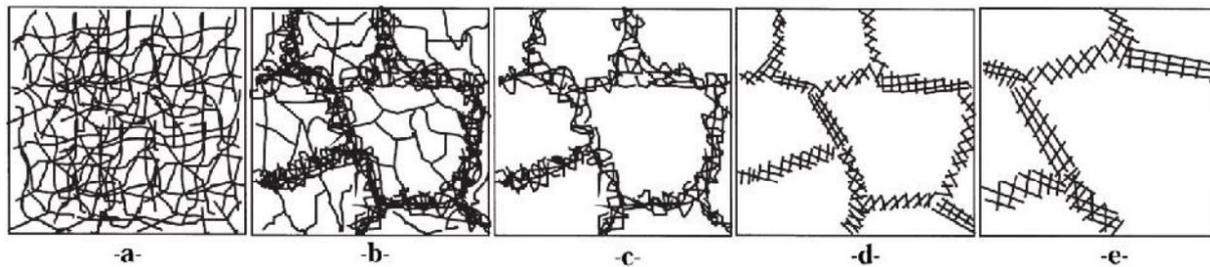


Figure IV.6 Différents stades de restauration d'un matériau ayant subi une déformation plastique.(a) enchevêtrement des dislocations, (b) formation de cellules,(c) annihilation des dislocations dans les cellules,(d) formation des sous-grains, (e) croissance des sous-grains [10].

IV.5.2 La recristallisation :

La recristallisation se caractérise par le développement de nouveaux grains aux dépens des grains écrouis. Elle a pour but de remplacer la structure écrouie par une nouvelle structure à grains reformés d'orientation tout à fait différentes c'est-à-dire que certaines orientations sont renforcées [14].

La recristallisation d'un métal comprend généralement deux stades : la germination et la croissance de ces germes .

La recristallisation peut se subdiviser en :

IV.5.2.1 *Recristallisation primaire : (germination et croissance de germes)*

On peut dire que les lois de la recristallisation primaire peuvent être résumées comme suit :

- 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).

- 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.

IV.5.2.2 *Croissance de grains :*

C'est la continuation du processus de croissance lorsque tout métal écroui a disparu, conduisant à un accroissement continu de la dimension moyenne des grains.

IV.5.2.3 *recristallisation secondaire:*

A la fin de la recristallisation primaire le métal est constitué de grains de taille et de forme très divers, toute la matrice écrouie a été remplacée par de nouveaux grains. L'élimination de la dislocation d'écrouissage a conduit à une diminution sensible de l'énergie libre du métal.

Au cours de la recristallisation secondaire, la structure est momentanément constituée de deux familles de grains de grosseurs différentes, jusqu'à ce que les nouveaux cristaux aient envahi toute la masse, alors les joints de grains en croissance migrent dans la direction de leur centre de courbure (figure IV.7)

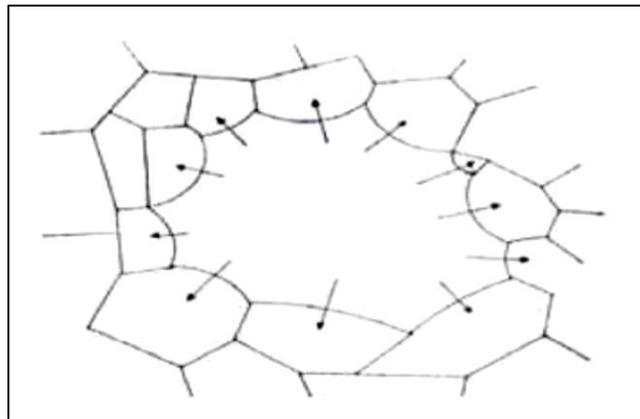


Figure IV.7 Croissance des grains [9].

La vitesse de recristallisation (volume recristallisé par unité de temps) s'écrit :

$$V = N \cdot G \dots \dots \dots \text{Equation IV.5}$$

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 [15].

Partie *B*

Etude Expérimentale

CHAPITRE V

MATERIAUX ET METHODES

D'ANALYSES UTILISES

V.1 Introduction :

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction générale, notre travail porte sur l'étude des fils de cuivre tréfilé à froid. Les fils de cuivre occupent une place importante dans le transport de l'énergie électrique, à cause de sa bonne conductibilité électrique et thermique.

Cette étude portera sur la caractérisation microstructurale, mécanique et électrique de l'état déformé des fils tréfilés en fonction du taux de déformation.

V.2 Matériau étudié :

Les fils machine utilisés dans notre étude sont des fils produits par le procédé de coulée continue. Ils présentent une surface lisse et brillante de section circulaire de diamètre 8 mm et de composition chimique tableau V.1 et leurs caractéristiques chimiques, mécaniques et électriques sont illustrées dans le tableau V.2 suivant :

Tableau V.1 Composition chimique de fil machine en %massique.

ppm	Cu	O ₂	Ag	As	Sb	Bi
%	99,73388	0,21	0,015	0,005	0,004	0,002
Fe	Se	Te	Co	Ni	Sn	Pb
0,01	0,002	0,002	0,00008	0,0028	0,005	0,005
Zn	Cb	S	Cr	Mn	P	Si
0,0004	0,0004	0,015	0,0002	0,00001	0,00001	0,00002

Tableau V.2 Caractéristiques du cuivre produit par CABEL SPA d'Alger

Diamètre initial (mm)	Résistance à la Traction R _m (MPa)	Allongement relatif A (%)	La Conductivité IACS %	La Résistivité électrique ρ (Ω.m)
8±0.15	200-250	43-39	101.53	1,7241.10 ⁻⁸

Les échantillons étudiés ont subi une déformation à froid par tréfilage, effectué en plusieurs passes, On note que la réduction de la section du fil a été effectuée par des tréfileuses à glissement horizontal. A partir d'une gamme de tréfilage, on a choisi des fils de divers diamètres qui représentent différents taux de déformations.

- Diamètre initiale : d₀= 8 mm.

Tableau V.3 Chaîne de tréfilage.

Echantillons	D (mm)	Taux de déformation(r%)
1	2.83	64.62
2	2.48	69.12
3	2.13	73.62
4	1.75	78.12
5	1.36	82.62

V.3 Processus de tréfilage à CABEL :

Le tréfilage est une opération qui consiste à diminué le diamètre de fil machine au travers de plusieurs filières jusqu'à l'obtention du diamètre désiré (ou exigé par la commande), donc le fil machine passe par plusieurs étapes :

V.3.1 Dévidoirs :

La première fonction des dévidoirs est de permettre une alimentation continue de la ligne de production en fil machine (figureV.1). Avant la consommation totale de chaque botte, son extrémité est soudée au début de la botte suivante pour assurer une alimentation en continu.



Figure V.1 Dévidoir.

V.3.2 Les Tréfileuses :

Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche"(figure V.2), c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 8mm à un diamètre compris entre 3,5 et 1,2mm en plusieurs passes. La vitesse d'étirage de cette machine est de 31,5 m/s.



Figure V.2 Ebaucheuse.

Le passage du fil par la première filière se fait manuellement via une appointeuse, le bout du fil est chauffé, puis on le fait passer manuellement par la première filière de 6,6mm. Le tableau V.4 ci-dessous donne des exemples sur les jeux de filières à utiliser pour l'obtention de 4 diamètres différents :

Tableau V.4 Filières utilisées pour 4 diamètres de sortie différents.

D entrée (mm)	diamètre des filières utilisées (mm)											D sorties (mm)
	6,6	5,5	4,623	3,921	3,375	2,937	2,557	2,225	1,982	1,766	1,573	
8	6,6	5,5	4,623	3,921	3,375	2,937	2,557	2,225	1,982	1,766	1,573	1,38
8	6,6	5,5	4,623	3,921	3,375	2,937	2,557	2,225	1,982			1,78
8	6,6	5,5	4,623	3,921	3,375	2,937	2,557					2,54
8	6,6	5,5	4,623	3,921								3,5

Les échantillons étudiés ont subi une déformation effectuée en plusieurs passes par la tréfileuse à glissement horizontale. La lubrification au cours du tréfilage est faite avec un mélange d'eau et d'huile (figure V.3).



Figure V.3 Machine de tréfilage de fil machine.

V.4 Etude métallographique

V.4.1 Préparation des échantillons pour l'analyse métallographie :

L'analyse micrographique a pour principal but la mise en évidence de la structure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies et attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces pour nos échantillons étudiés en cuivre à haute pureté, nécessite différentes étapes :

La collecte des fils de cuivre de différentes sections, et qui a été effectuée au niveau de CABEL SPA d'Alger.

V.4.1.1 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 1 cm de longueur.

V.4.1.2 Enrobage :

L'enrobage à froid consiste à mettre l'échantillon dans un moule (figure V.4) et d'ajouter le mélange *résine-durcisseur*, et ensuite laisser la résine se solidifier pendant quelques minutes. Les fils de cuivre ont subi deux types d'enrobage « en coupe transversale et longitudinale » (figure V.5).

Cette technique permet :

- Faciliter la manipulation de l'échantillon lors du polissage et de l'observation microscopique.
- Préserver l'échantillon des altérations chimiques extérieures.
- Différencier par des méthodes pratiques les échantillons comme par exemple mettre des étiquettes ou écrire au feutre permanent sur l'enrobage.



Figure V.4 Moule d'enrobage

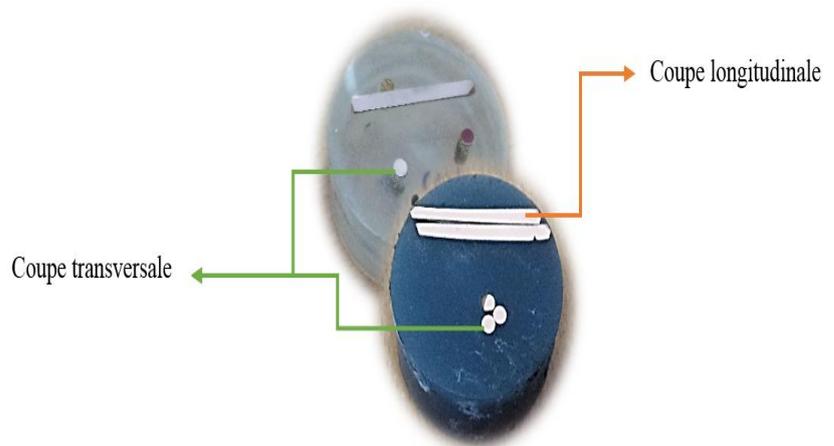


Figure V.5 Echantillon enrobé à froid

V.4.1.3 Pré Polissage :

Les échantillons destinés à la métallographie et à l'essai de micro dureté sont polis sur du papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries. Dans notre, on a utilisé les papiers 120, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 et 1200. Vu la difficulté de polir le cuivre



Figure V.6 Polisseuse utilisée.

V.4.1.4 Polissage de finition

Le polissage de finition se fait à l'aide de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant, sur le second disque de la polisseuse recouvert d'un tissu feutre (figure V.7). La granulométrie utilisée est de 21 μm .



Figure V.7 Tissu feutre.

V.4.1.5 *Attaque chimique :*

Avant l'étude micrographique, il nous faut procéder à une attaque chimique (tableau V.5), dans le but de rendre les grains, les joints de grains, et autre composants de la microstructure visibles à l'aide d'un microscope optique.

Tableau V.5 Composition chimique et durée de l'attaque chimique utilisé [2].

Dénomination	Composition	durée de l'attaque
Persulfate d'ammonium	- $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$: 100g - Eau distillé : 1 Litre	1mn environ
Chlorure ferrique acide	- FeCl_3 : 35g - HCl : 250g - alcool éthylique à 95°: 1Litre ⇒ faire dissoudre FeCl_3 dans HCl , puis ajouter l'alcool	20 à 30s

V.4.2 **Microscope Optique :**

L'observation des microstructures a été réalisée à l'aide d'un microscope métallographique de marque OPTIKA M-789, ce dernier est connecté à un ordinateur muni d'un logiciel de traitement d'image (OPTIKA-VIEW). La figure V.8 Montre une image de ce microscope.

Cette technique nous permet ainsi d'observer les différents stades de restauration et recristallisation, et de commenter la morphologie des grains durant chaque stade.



Figure V.8 Microscope métallographique OPTIKA M-789

V.5 Etude mécanique

V.5.1 Essai de Micro dureté :

Les essais de microdureté Vickers consistent à estimer la valeur de la microdureté HV, à partir de la longueur de la diagonale d'une empreinte laissée, par le pénétrateur (figures V.9) sur la surface de l'échantillon.

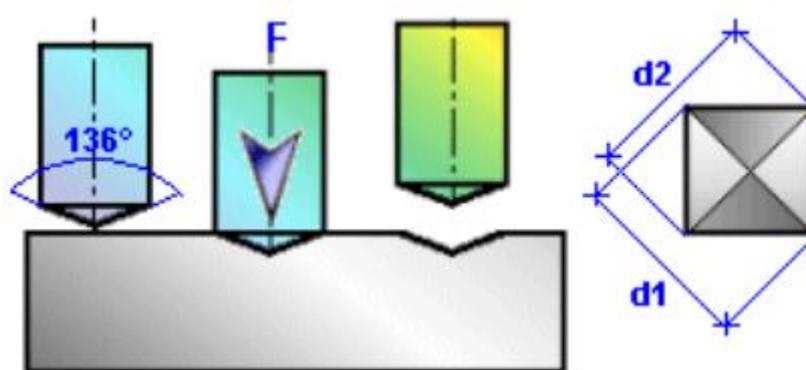


Figure V.9 Principe de l'essai de dureté Vickers HV.

Le pénétrateur s'enfonce dans l'échantillon sous une charge constante ($P=0.3$ kg), la pénétration se fait de manière monotone à vitesse constante pendant une durée de 15 sec ou 20

sec réglable à volonté. Cette analyse est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution de l'une des propriétés mécaniques après chaque stade de traitement thermique ou thermomécanique

Pour cela, nous avons mesuré la microdureté Vickers, avec un Microduromètre statique de type Vickers (figure V.10). Cet appareil est équipé d'un oculaire (15x) et des objectifs (10x, 50x) pour permettre de positionner l'empreinte et régler les lignes de mire afin de mesurer la valeur de la diagonale d .



Figure V.10 Micro-duromètre utilisé.

On peut aussi calculer la micro dureté HV manuellement, par l'application de la formule suivante :

$$HV = 1854.4 \frac{P}{d^2}$$

Ou :

HV : micro dureté HV.

P : la charge est en donnée en gammes-force

d : la diagonale en micron

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Pour nos échantillons en cuivre pur. On a utilisé l'objectif (50 x). On note que chaque mesure correspond à une moyenne de 5 points au minium.

V.5.2 Essai de traction :

L'essai de traction est l'un des plus utilisés pour caractériser le comportement mécanique statique d'un matériau. Il est simple de mise en œuvre et il permet d'accéder à des paramètres particulièrement importants, très largement utilisés dans la communauté académique et industrielle pour qualifier les matériaux.

Par exemple :

- la rigidité du matériau, c'est le module d'élasticité.
- le seuil entre ses domaines élastique et plastique, c'est la limite d'élasticité.
- la capacité de durcissement du matériau par déformation plastique, c'est le coefficient d'écrouissage.
- sa résistance mécanique maximale, c'est la résistance à la traction.
- sa capacité de déformation avant de rompre, c'est l'allongement à rupture.

En pratique on soumet des éprouvettes, en prise dans les mors d'une machine d'essai électromécanique (Figure V.13), à un effort uni-axial F croissant appliqué à une vitesse donnée et l'on mesure son allongement ΔL (figure V.11). Les éprouvettes de longueur utile initiale L_0 et de section initiale S_0 sont généralement cylindriques (de diamètre donné)

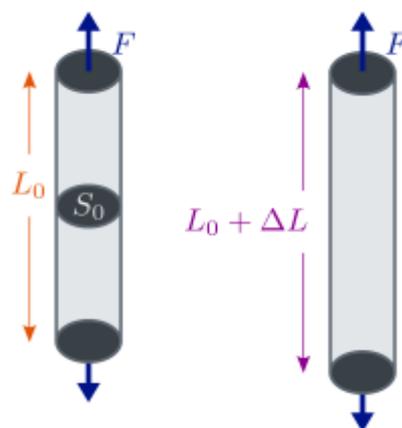


Figure V.11 Principe d'un essai de traction d'une éprouvette [7].

Désignations et symboles des courbes de traction

L'exploitation d'une courbe de traction (Figure V.12) permet d'obtenir les valeurs suivant les caractéristiques mécaniques d'emploi du matériau :

- Un domaine linéaire OA où l'éprouvette s'allonge de manière élastique et réversible en deçà d'une valeur critique de la contrainte appelée limite élastique (exprimée en méga Pascal MPa) et définie comme le rapport entre la force (exprimée en Newton N) et la section (exprimée en mm^2).
- Un domaine parabolique (AS) caractéristique d'une déformation plastique et irréversible, au-delà de cette valeur critique. La déformation est uniformément répartie et conduit à un allongement de l'éprouvette
- Un domaine de décroissance de la charge (RS) lorsque la déformation se localise au-delà du point de striction (S).
- le point de rupture R

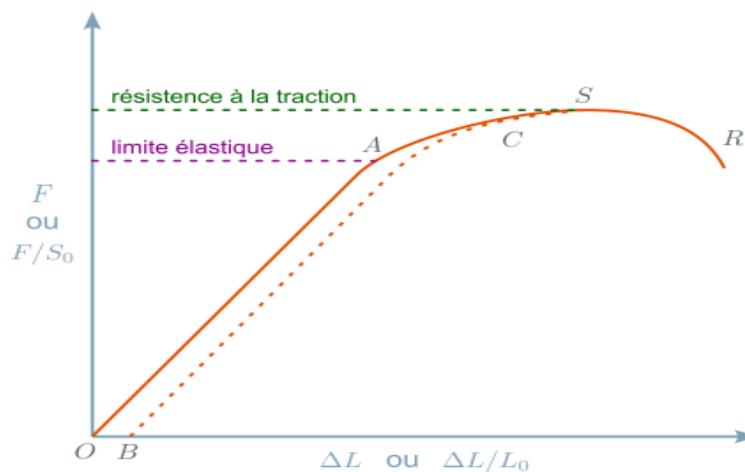


Figure V.12 La courbe de traction.



Figure V.13 Machine de traction.

V.6 Etude physique (électrique)

V.6.1 Mesure de la résistivité :

La résistivité d'un métal est l'inverse de sa conductivité elle dépend de plusieurs paramètres physiques tels que la température, la composition chimique du métal, de la déformation plastique et des traitements mécaniques. Le principe de la détermination de la résistivité repose sur la mesure de la résistance électrique d'un échantillon linéaire ayant une section faible par rapport à la longueur.

Expérimentalement la résistance d'un fil métallique homogène est directement proportionnelle à sa longueur (l) et inversement proportionnelle à son cuve de section (S).

$$\rho = \frac{SR}{l}$$

Où :

ρ : est la résistivité d'un conducteur.

R : est la résistance du conducteur en Ohms.

l : est la longueur du conducteur en mètres.

S : est la surface de la section transversale, mesurée en millimètres carrés.

Les mesures de la résistivité que nous avons réalisées ont été effectuées à l'aide d'un banc de mesure de résistivité du type au niveau pont de Thomson-Kelvin de l'entreprise CABEL (Figure V.14).



Figure V.14 Machine d'essai de la résistance.

V.7 Traitement thermique :

V.7.1 Recuit par L'effet Joule :

Le recuit du cuivre à CABEL se fait immédiatement après le tréfilage, la tréfileuse et le four de recuit sont reliés et forment une seule bâtisse. Après le passage du fil par la dernière filière, et l'obtention du diamètre désiré, le fil entre dans le four de recuit, ce dernier marche à l'électricité, le fil est donc soumis à une différence de potentiel quand il passe entre l'anode et la cathode du four, il se chauffe instantanément par effet joule.



Figure V.15 Four de recuit par l'effet joule.

Les figures V.15 montrent respectivement le four de recuit de l'ébaucheuse. Pour chaque diamètre de sortie, on doit s'assurer de la conformité des propriétés électriques et mécaniques du fil, un certain nombre d'échantillons passe donc dans le laboratoire pour subir les essais adéquats. Après recuit le fil fini est alors bobiné, après vérification de ses propriétés Mécaniques et électriques, il est transporté à un autre atelier pour l'isolation, L'assemblage puis le gainage. Le processus de fabrication du câble est donc terminé et N'attend plus que son expédition.

V.7.2 Recuit dans un four :

Les traitements thermiques ont été réalisés à l'aide d'un four électrique de marque 'BINDER' (figure V.16). La température de recuit appliquée aux échantillons est 250°C, pour un temps s'étalant de 5 minute jusqu'à 30, ensuite ils sont trempés à l'air libre.



Figure V.16 Four utilisé

CHAPITRE VI

RESULTATS

ET INTERPRETATION

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents résultats de la caractérisation des fils de cuivre sans recuit (appelé : dur), avec recuit par effet joule et avec recuit dans le four. Différents temps de maintien et différents taux de déformation effectués lors des différentes expériences que nous avons entrepris seront étudiés. L'effet d'un recuit par effet joule et d'un recuit dans un four classique et leur comparaison (d'un point de vue économique et pratique) sur la recristallisation seront présentés.

Nous avons effectué les essais mécaniques et physiques suivants :

- L'analyse métallographique
- La Traction
- La Microdureté
- La Résistivité électrique

VI.1.1 Calcul des taux de déformation (ϵ) :

La Loi utilisée pour le calcul le taux de déformation (ϵ) est:

$$\epsilon = \frac{(d_0 - d_i)}{d_0} \dots \dots \dots \text{Equation(VI.1)}$$

Où :

- d_0 : diamètre initiale du fil machine en mm
- d_i : diamètre finale de fil tréfilé en mm

Tableau VI.1 Taux de déformation (ϵ) pour des fils durs

d (mm)	taux de déformation (ϵ) (%)
8	0
2,245	71,9375
2,208	72,4
1,806	77,425
1,605	79,9375

Tableau VI.2 Taux de déformation (ϵ) pour des fils recuits par L'effet joule

d (mm)	Taux de déformation (%)
3,407	57,4125
2,8	65
2,208	72,4
1,774	77,825
1,36	83

D'après les tableaux (VI.1 et VI.2), nous remarquons que le taux de déformation est croissant à cause de la réduction du diamètre de la section du fil tréfilé.

VI.2 Résultats des tests effectués sur le fil Machine :

VI.2.1 Les essais mécaniques et électriques :

Pour le fil machine, nous avons procédé au calcul du diamètre, à l'essai de résistance électrique et à l'essai de traction pour déterminer l'allongement et l'observation microscopique pour déterminer la microstructure.

Les tableaux (VI.3, VI.4 et VI.5) ci-dessous donnent les résultats de l'essai de résistance électrique, de la microdureté et de l'essai de traction effectuée sur l'échantillon.

Tableau VI.3 Résultats des essais de résistivité sur le fil machine (pont de Thomson-Kelvin)

D (mm)	La résistance (Ohm/Km)	la résistivité (Ohm.m)	la conductivité (%)
8	0,33402	$1,6790 \times 10^{-8}$	102.68

- La résistivité : $\rho = R.S/L$ en prenant la longueur L égale à 1 m.
- La conductivité étant égale au rapport de la résistivité max sur la résistivité calculée et ρ_{\max} à 20°C = $1,7241.10^{-8} \Omega.m$ selon la norme IACS.

Tableau VI.4 Résultats des essais de Microdureté sur le fil machine

les essais de microdureté						Hvmoy
Hv 1	Hv 2	Hv 3	Hv 1	Hv 2	Hv 3	
65,4	61	60,3	61,9	61,4	61,3	61,88

Tableau VI.5 Résultats des essais de traction sur le fil machine (MTS)

Diamètre (mm)	POIDS (g)	Contrainte à la rupture (MPa)	allongement (%)	Force maximale (kgf)	SECTION (mm ²)
8,041	451,5	208,256	37,811	1144,468	50,787

Avec :

- L'allongement $A = (L_0 - L_a) / L_0$

Où :

- L_a : longueur de l'éprouvette après l'essai de traction,
 - L_0 : longueur initiale de l'éprouvette (250mm).
- La section : $S = \pi.D^2/4$.
 - La contrainte : $\sigma = F/S$ où F étant la charge à la rupture.

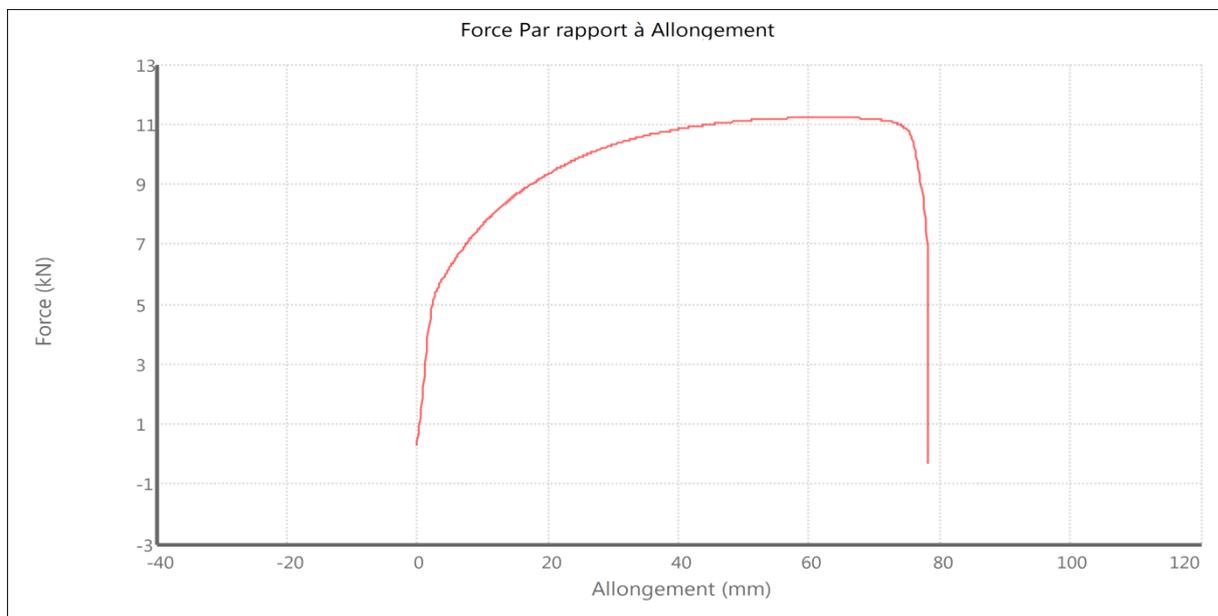


Figure VI.1 Courbe d'essais de traction sur le fil machine.

Les résultats illustrés dans les tableaux (VI.3, VI.4 et VI.5), prouvent que le Fil machine de cuivre sur lequel nous avons procédé à l'échantillonnage est bien conforme aux normes car :

- son diamètre ne dépasse pas les $8 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$,
- son allongement est compris entre 30 et 40%,
- sa conductivité est entre 100% et 103,5%

VI.2.2 Etude métallographique *sur le fil machine.*

Les échantillons ont été observés au microscope métallographique après les opérations d'enrobage et de polissage et attaque chimique. L'examen a permis d'obtenir les micrographies (à grossissement de 500) suivantes.

La figure VI.2 montre la variation de la microstructure du fil machine :

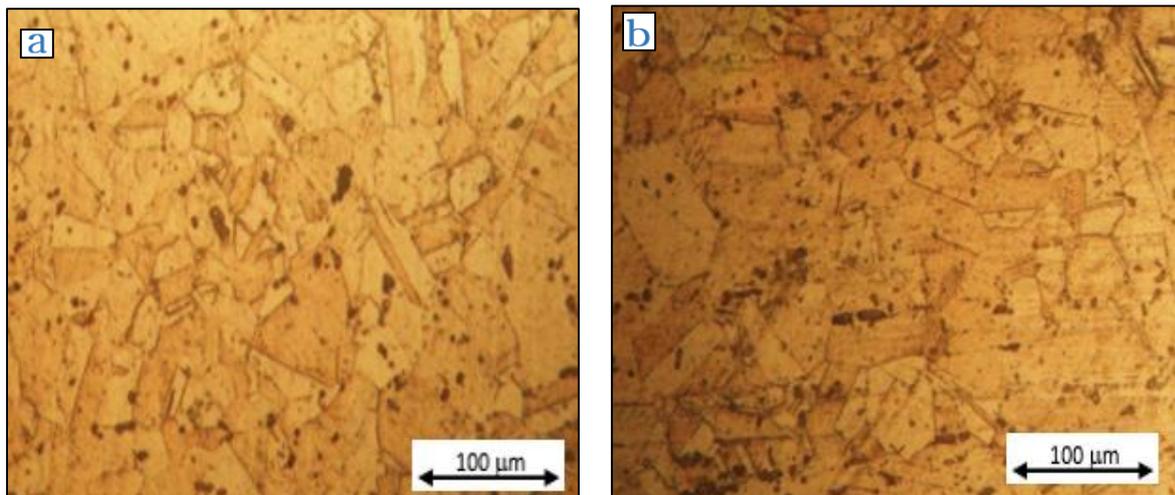


Figure VI.2 Microstructure du Fil machine (d=8 mm) a-longitudinale, b-transversale.

Les microstructures (Figure VI.2) du fil machine montrent une forme équiaxe des grains (la dimension des grains est presque la même dans toute la section du fil).

VI.3 Caractérisations mécaniques

VI.3.1 Essai de traction :

Les résultats de l'essai de traction ont été faits au laboratoire de métallurgie de CABEL-SPA sur une machine de type MTS, de charge maximale 50 KN. Nous avons utilisé des éprouvettes en fils de cuivre à différents taux de déformation avec et sans recuit. La longueur des éprouvettes utilisées est égale à 25cm.

VI.3.1.1 Essai de traction pour les fils tréfilés durs :

On a pris des échantillons de différents diamètres sans recuit (donc totalement écroui) de taux de déformation respectif : 71.96%, 77.38%, 79.93% et 72,4% (utilisé pour les essais de recuit dans le four). Nous avons effectué sur ces échantillons des essais de traction. La figure VI.3 et La figure VI.4 montrent les courbes de traction respectives des échantillons après l'essai de traction.

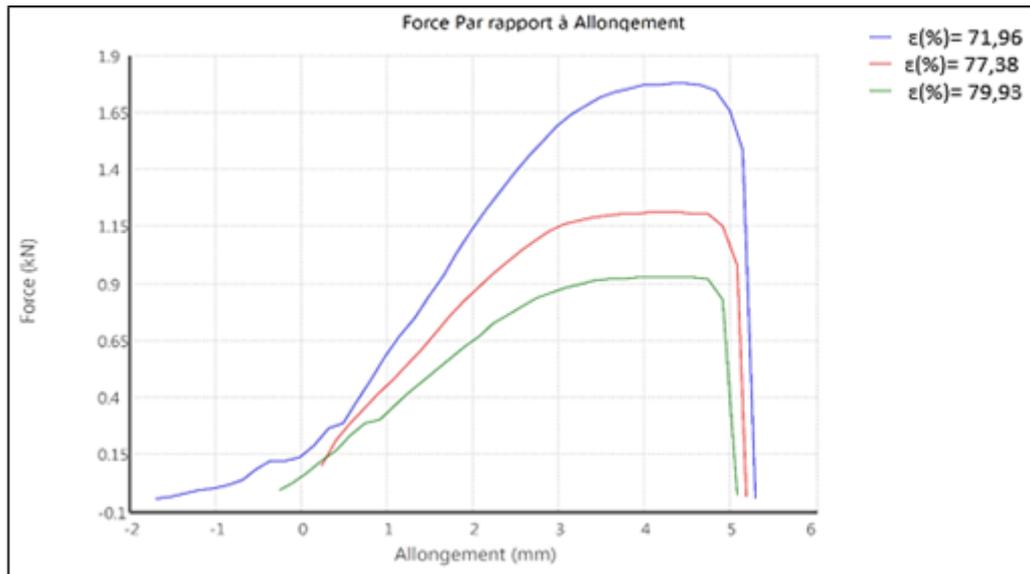


Figure VI.3 Courbe d’essais de traction pour les fils non recuit de taux de déformation respectifs : 71.96%, 77.38%, 79.93%

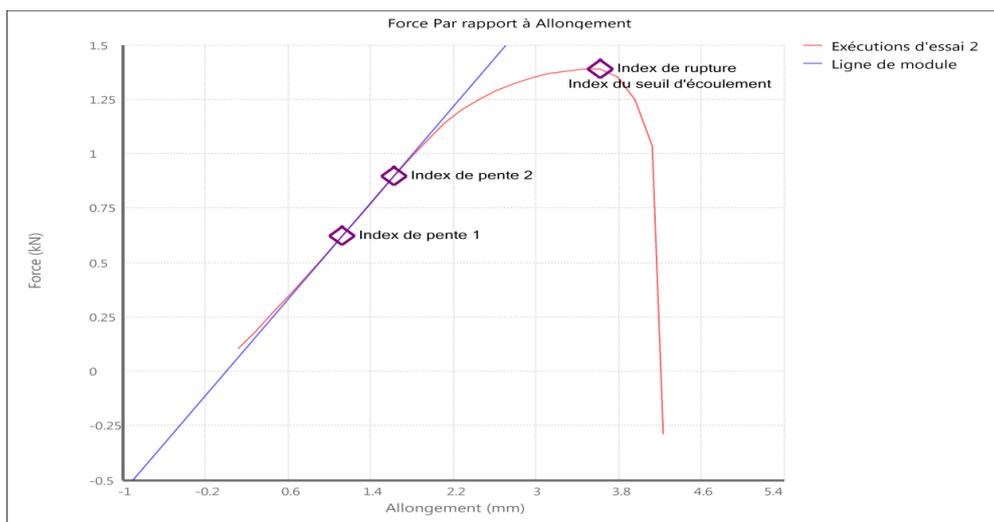


Figure VI.4 Courbe d’essais de traction pour le fil non recuit de taux de déformation 72,4%

Les résultats de l’essai de traction sont donnés dans le tableau VI.6 ci-dessous :

Tableau VI.6 Résultats de l’essai de traction sur les échantillons

ø (mm)	ε (%)	A(%)	Rm (MPa)
8	0	37,811	208,256
2,243	71,9625	1,794	457,832
2,208	72,4	1,619	460,907
1,809	77,3875	1,76	479,812
1,605	79,9375	1,763	467,135

Les deux figures suivantes représentent la variation de la résistance à la rupture et l'allongement en fonction de taux de la déformation

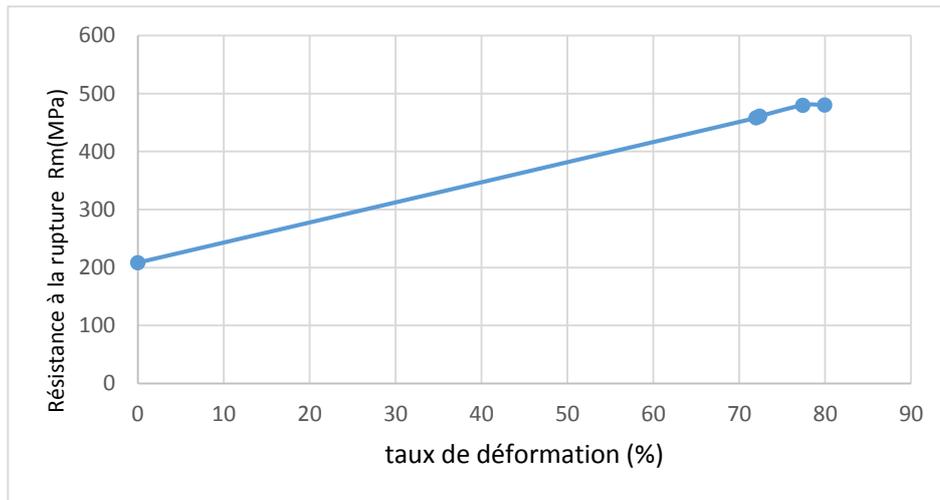


Figure VI.5 Variation de la résistance à la rupture en fonction de taux de déformation

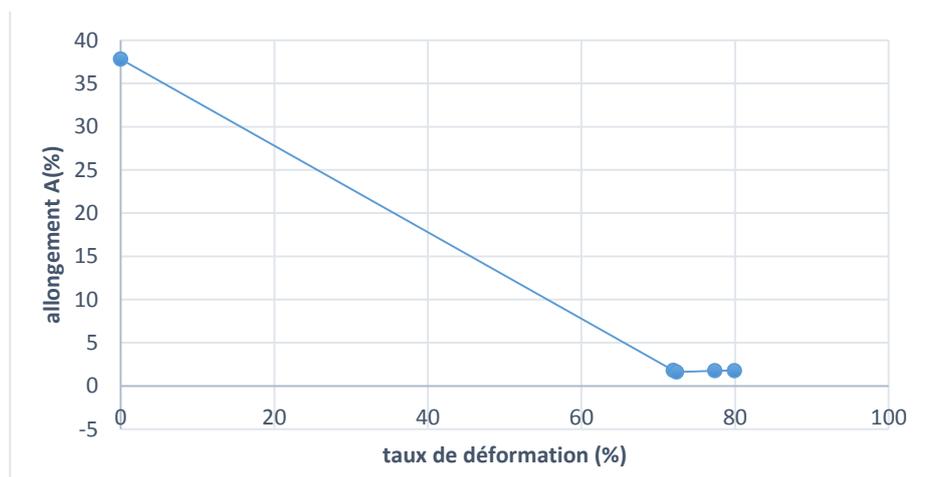


Figure VI.6 Variation de l'allongement en fonction de taux de déformation

Les propriétés mécaniques telles que l'allongement et la résistance à la rupture sont des facteurs importants dans l'industrie des câbles. Lorsqu'un matériau a été déformé plastiquement sa limite élastique augmente et sa ductilité diminue. Plus la déformation plastique est grande, plus le matériau s'oppose à cette déformation. Le matériau est alors dit écroui. L'écrouissage mène à une diminution de l'allongement lors d'un essai de traction, car l'allongement est dépendant de la capacité de se durcir lors d'une déformation (figure VI.6).

La figure VI.5 présente les variations de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation. On remarque, sur cette courbe, que la résistance à la rupture augmente avec l'augmentation du taux de déformation de fil.

Ce constat est expliqué par l'érouissage induit par le tréfilage dans le fil. En effet, plus la déformation (le taux de tréfilage) est importante plus l'érouissage induit est important plus sera donc important l'effort de toute déformation ultérieure.

VI.3.1.2 *Essai de traction pour les fils Recuit par effet joule :*

La figure VI.7 montre les courbes de traction respectives des échantillons tréfilés avec différents taux de déformation pour les échantillons recuit par effet joule.

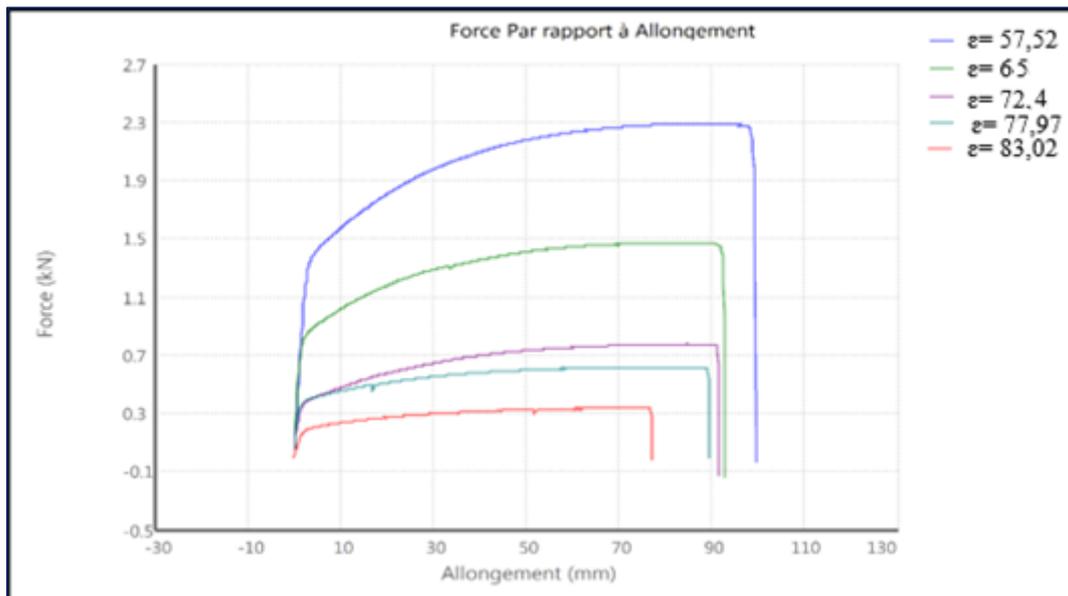


Figure VI.7 Courbes d'essais de traction après recuit par effet joule

Les caractéristiques mécaniques déduites de ces courbes sont regroupées sur le tableau VI.7 :

Tableau VI.7 Résultats de l'essai de traction sur les échantillons

d (mm)	ϵ (%)	A(%)	Rm (MPa)
3,398	57,525	38,759	255,62
2,833	65	36,1	236,778
2,208	71,5	35,611	224,943
1,762	77,975	34,737	218,163
1,358	83,025	30,816	210,878

Ces résultats sont acceptables, car l'allongement est conforme à la norme : soit un Allongement compris entre (30 et 40%).

La figure VI.8 montre la variation d'allongement en fonction du taux de déformation. On remarque, sur ces courbes que l'allongement diminue avec l'augmentation des taux de déformation des fils.

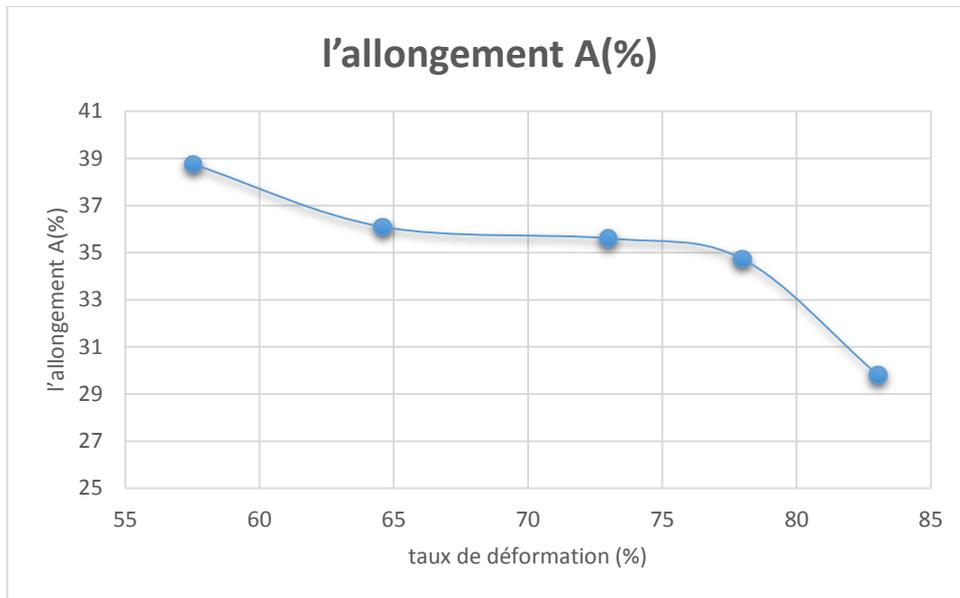


Figure VI.8 Variation de l'allongement en fonction de taux de déformation

Les résultats du tableau (VI.6 et VI.7) sont assez logiques car un échantillon de cuivre écroui a un allongement médiocre car l'écrouissage rend le matériau dur donc rapidement cassable alors que l'échantillon recuit a un allongement nettement plus grand. Ce qui est normal car le traitement de recuit rend le cuivre malléable et donc il s'allongera beaucoup plus avant de casser

Les résultats des essais de traction (Tableau VI.7 et Figure VI.8) des fils déformés et recuits montrent clairement un retour des propriétés mécaniques vers l'état ductile des fils. Ce retour est important pour les fils fortement tréfilés. Ce résultat inattendu, certainement dû à la cinétique de recristallisation qui conduit à un retour progressif des propriétés mécaniques vers celles d'un état proche de l'état initial

VI.3.1.3 Essai de traction pour les fils recuit dans four

La figure VI.9 représente les courbes de traction des fils écrouis de diamètre 2,208 mm. Le fil de cuivre de $d = 2.208$ mm est obtenu par tréfilage successif du fil machine de diamètre initial 8 mm sans recuit par effet joule) avec différents temps de maintien : 5 min, 10 min, 15 min et 30 min dans un four électrique.

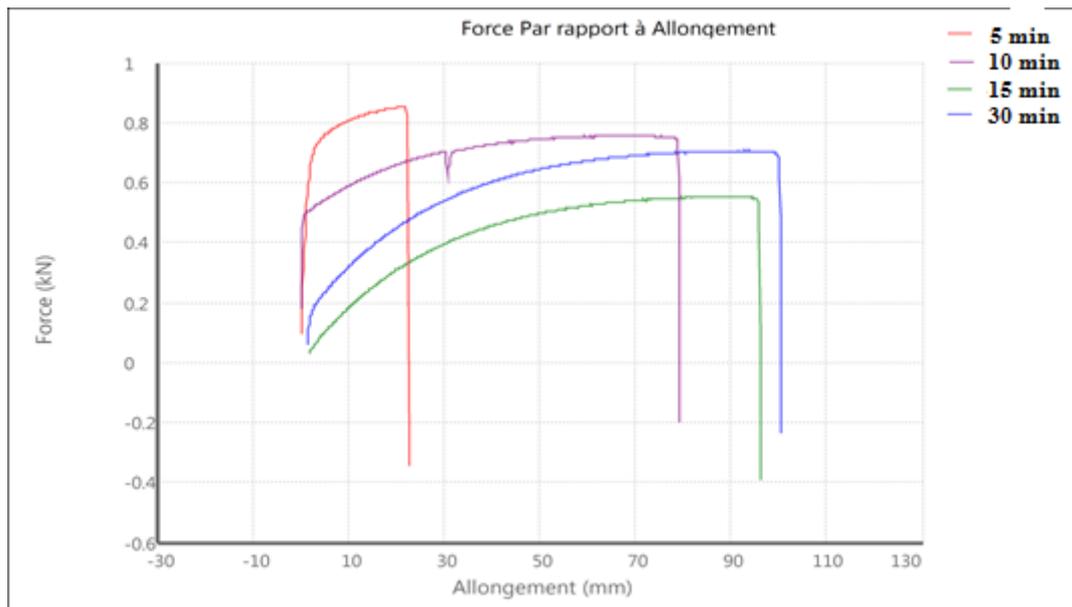


Figure VI.9 Courbe d'essais de traction après recuit dans le four pour différent temps de maintien 5min, 10min, 15min et 30min

Les caractéristiques mécaniques déduites de ces courbes sont regroupées sur le tableau VI.8 :

Tableau VI.8 Résultats de l'essai de traction sur les échantillons :

temps (min)	A(%)	Rm (MPa)
0	1,619	410,907
5	8,677	227,456
10	36,165	187,278
15	37,414	165,756
30	39,071	159,688

La figure VI.10 ci-dessous montre la variation de l'allongement et de la résistance à la rupture en fonction du temps de recuit

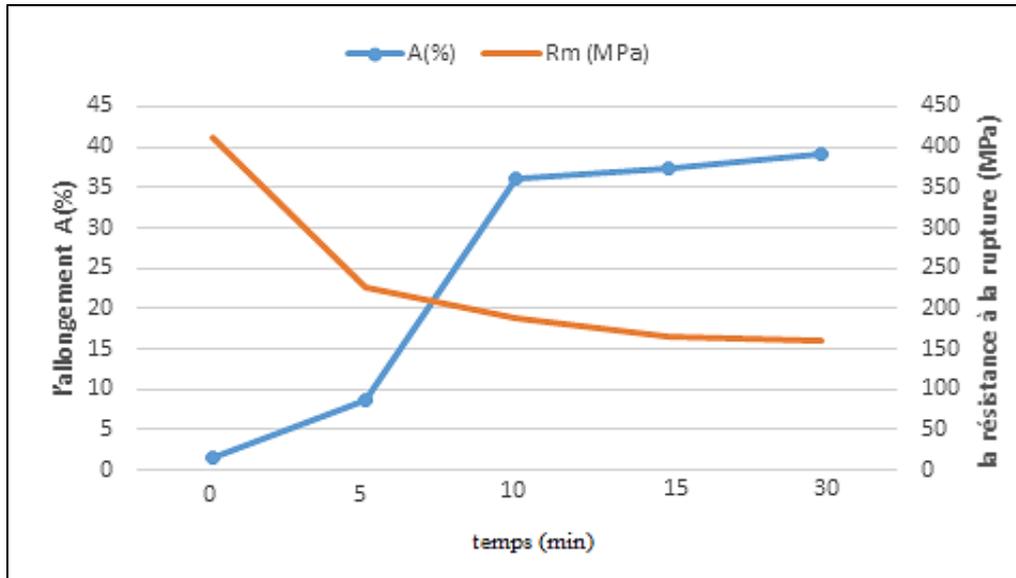


Figure VI.10 Variation de la résistance à la rupture et l'allongement en fonction de temps de maintien

La figure VI.10 montre trois stades d'évolution de la résistance à la rupture :

La première entre 1min et 5min où la résistance à la rupture n'est pas sensible à la température de chauffage, c'est le stade de la restauration, il n'y a pas création des nouveaux grains, mais seulement réduction de nombre de défaut et réarrangement de ceux-ci en nouvelles configurations

Le deuxième stade entre 5min et 15min où la résistance à la rupture décroît rapidement c'est la recristallisation primaire qui supprime pratiquement l'écrouissage et redonne au métal ses caractéristiques initiales.

Le troisième stade entre 15min et 30min c'est le stade de la recristallisation secondaire, la résistance à la rupture ne subit pas une très grande variation.

Contrairement à la charge de la rupture, l'allongement est inversement proportionnel à la déformation appliquée car cette dernière génère des zones qui facilitent la rupture de fil. Quand le temps de recuit augmente la résistance à la rupture diminue et l'allongement à la rupture augmente à cause de phénomène de recristallisation primaire et secondaire qui est caractérisée

par un grossissement des grains et qu'il est recommandé d'éviter, car il peut provoquer la chute de certaines propriétés mécanique comme la limite élastique ainsi que la résistance à la rupture.

Conclusion :

D'après ces résultats, on constate que :

- L'écroutissage augmente la résistance à la traction du cuivre puisque elle passe de 208 MPA (l'état initial) à plus de 467MPa à l'état écroui.
- L'écroutissage diminue l'allongement total à la rupture puisque il passe de 37% (l'état initial) à environ 1.7 %
- Le traitement thermique de recuit diminue la résistance à la rupture et augmente l'allongement
- Après un traitement de recuit, le métal est devenu ductile, ceci montre qu'il y a eu restauration et recristallisation du métal.

VI.3.2 Mesure de Microdureté :

Pour Les échantillons avec différents taux de déformation dure, recuit par effet joule et recuit dans le four, nous avons mesuré la microdureté Vickers. Pour chaque échantillon, on prend trois empreintes pour la coupe en longueur et la Coupe en section avec une charge 0.3 kg pendant une durée de 15 s.

Tous les résultats de mesure de microdurteté des échantillons sont représentés dans les trois tableaux suivants :

VI.3.2.1 L'état dure

Tableau VI.9 Résultats de microdureté pour l'état dur

D (mm)	taux de déformation ϵ (%)	microdureté			
		HV 1	HV 2	HV 3	HV moy
8	0	61,9	61,4	61,3	61,53
2,206	72,425	113,3	111	115,9	113,40
1,806	77,425	118,3	115,6	115,1	116,33

La figure VI.11 montre la variation de microdureté pour l'état dur (non recuit) en fonction du taux de déformation. On remarque que la microdureté augmente avec le taux de déformation

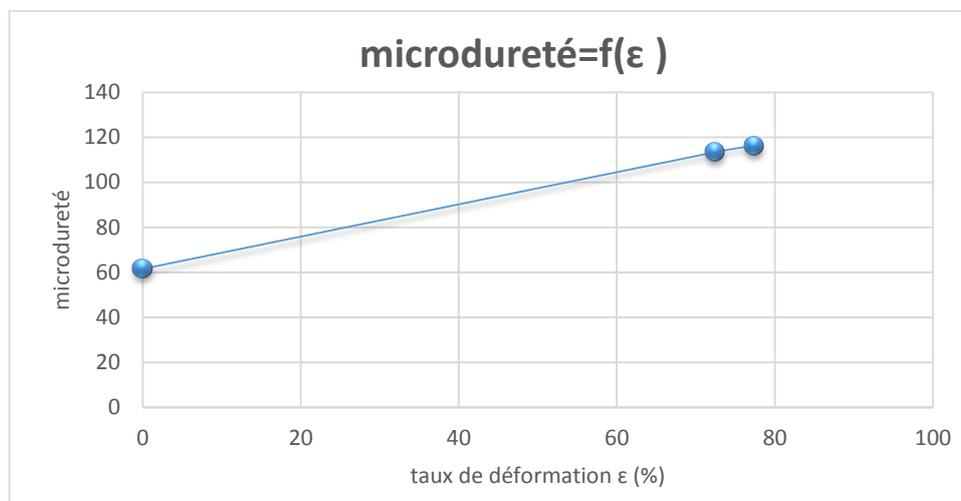


Figure VI.11 Evolution de la microdureté HV en fonction de la déformation

Ce phénomène est appelé durcissement par écrouissage. La déformation plastique à froid conduit à un durcissement plastique du matériau désigné par le terme « écrouissage » expliqué par l'augmentation dans le réseau des défauts supplémentaires introduits dans le matériau écroui à savoir les lacunes, interstitiels, dislocations, et éventuellement des macles.

L'écrouissage du matériau dépend de sa teneur en différentes espèces chimiques (impuretés au additives), du taux de déformation appliquée et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation).

VI.3.2.2 *L'état Recuit par effet joule :*

Tableau VI.10 Résultats de microdureté pour l'état Recuit par effet joule

D (mm)	taux de déformation ε(%)	microdureté			
		HV 1	HV 2	HV 3	HV moy
3,4	57,5	80,2	75,1	79,3	78,2
2,8	65	76,5	75,9	76,3	76,23
2,16	73	73	72,8	73,3	73,03
1,77	77,875	70,7	70,1	72,7	71,16

La figure VI.12 montre la variation microdureté pour l'état Recuit par effet joule en fonction du taux de déformation.

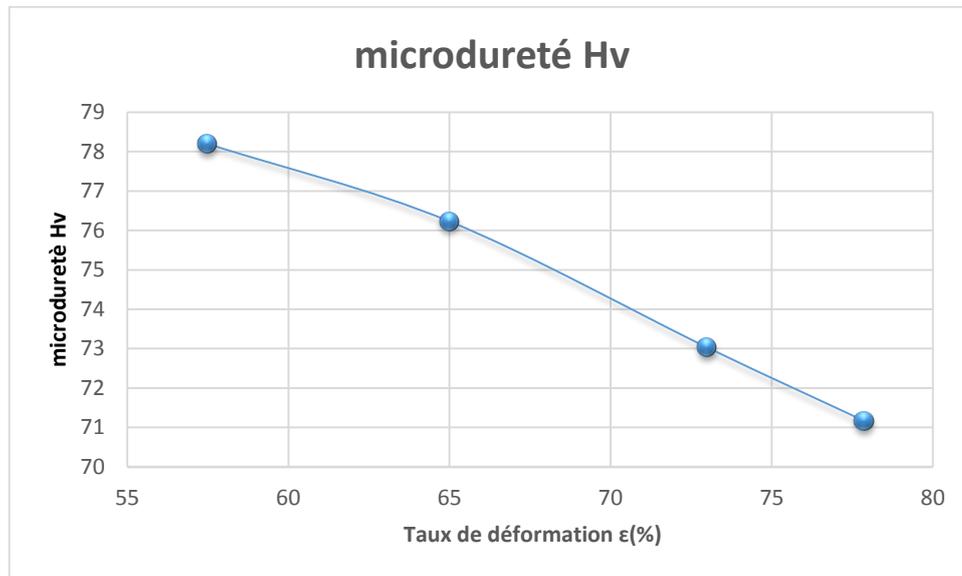


Figure VI.12 Evolution de la microdureté HV en fonction de la déformation pour les fils tréfilé recuit par l'Effet Joule

On remarque que pour le fil le plus déformé, l'amorçage des mécanismes et la chute de la valeur de la microdureté sont rapide par rapport à l'autre. Cela s'explique par le fait que les mécanismes de restauration et de recristallisation sont plus rapides dans le fil fortement déformé.

Par contre pour le fil faiblement déformé, il y a un seule phénomène qui se déroule à savoir la restauration, et elle prend un peu de retard pour commencer et s'achever.

VI.3.2.3 L'état Recuit dans le four :

Tableau VI.11 Résultats de microdureté pour l'état Recuit dans le four

Temps (s)	Microdureté			
	HV 1	HV 2	HV 3	HV moy
5	90,8	93	98,6	94,13
10	87,2	89,6	87,4	88,06
15	80,7	80,5	79,2	80,13
30	74,8	73,8	74,8	74,46

La figure VI.13 montre la variation microdureté pour l'état Recuit dans le four en fonction du taux de déformation.

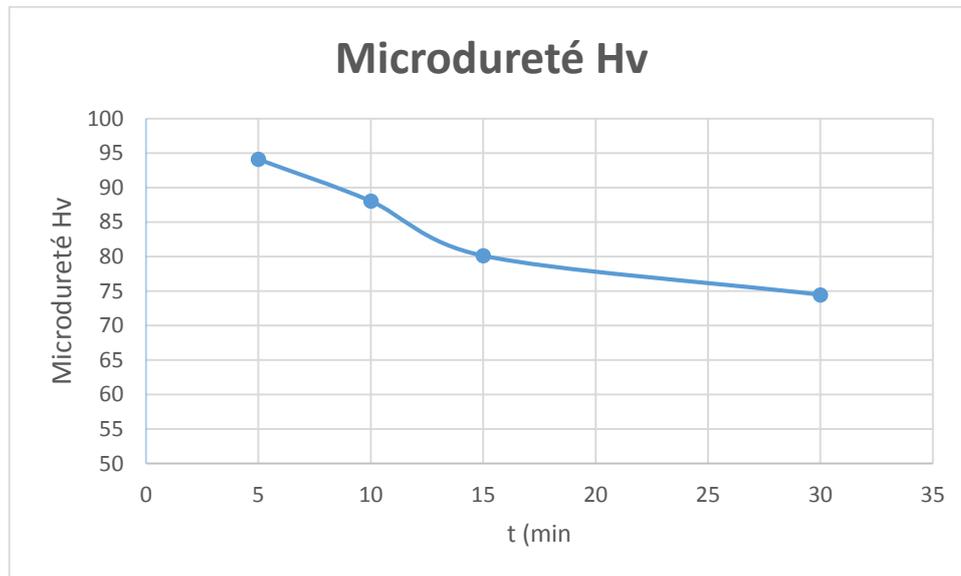


Figure VI.13 Evolution de la microdureté HV en fonction de temps pour un taux de déformation de 71.5%

On conclue de la Figure VI.13 que La microdureté des échantillons diminue avec le temps de recuit jusqu'à la stabilisation à une valeur constante pour chacun des fils tréfilés étudiés. Cette diminution est causée par l'élimination progressive des contraintes internes, la disparition des défauts cristallins, l'annihilation des dislocations de signes opposées et le réarrangement des dislocations dans des configurations à énergie minimale. Enfin, elle se stabilise après la recristallisation du matériau.

Donc le chauffage active et amorce les mécanismes de restauration et de la recristallisation par un apport d'énergie d'activation.

VI.4 Caractérisation électrique (mesure de la résistivité)

La mesure de la résistivité électrique a été effectuée sur les échantillons suivants :

- tréfilé dur.
- tréfilé et recuit par effet joule.
- tréfilé et recuit dans le four avec diffèrent temps de maintien.

Les résultats sont présentés dans les trois tableaux (VI.12, VI.13 et VI.14) suivants :

Tableau VI.12 Résultats de l'essai de la résistivité pour le cuivre dur (sans Recuit)

d (mm)	Taux de déformation ϵ (%)	La résistance sans recuit (Ohm/Km)	La résistivité (Ohm.m) $\times 10^{-8}$
8	0	0,33402	1,6790
2,245	71,9375	4,4097	1,7455
2,2	72,5	4,5858	1,7480
1,806	77,425	6,8316	1,7500
1,605	79,9375	8,638	1,7528

La figure VI.14 montre la variation de La résistivité pour l'état dur (non recuit) en fonction du taux de déformation.

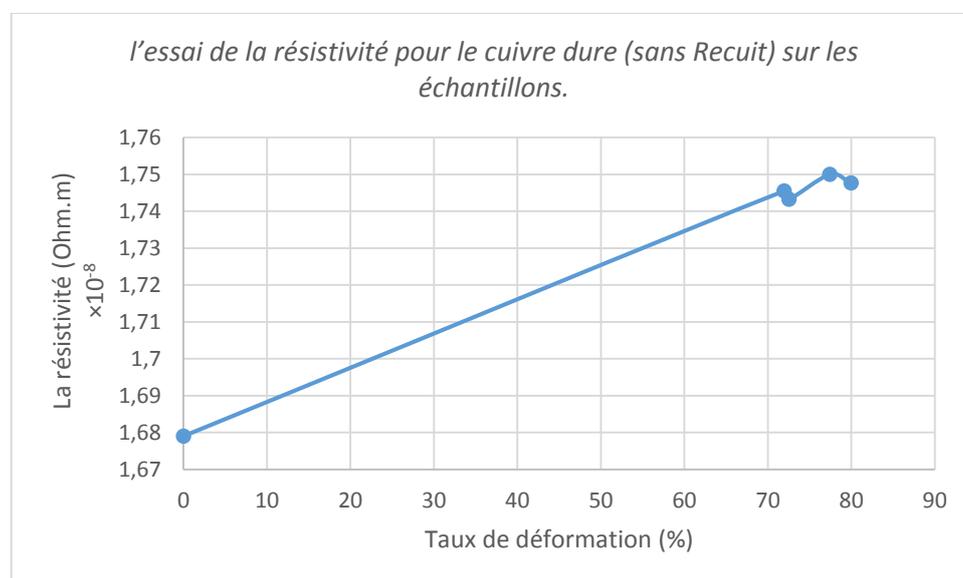


Figure VI.14 Courbe de l'essai de résistance pour le cuivre dur (sans Recuit)

On remarque que l'augmentation du taux de déformation entraine une augmentation de la résistivité pour les échantillons, En effet l'écrouissage déforme la structure et introduit des

défauts qui vont représenter des obstacles au déplacement des électrons ce qui rend difficile le passage du courant électrique.

En comparant les résultats obtenus pour la résistance dans le tableau VI.12. On remarque que celle-ci augmente avec la diminution du diamètre. Ce résultat peut être interprété mathématiquement ainsi :

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{4\rho L}{\pi D^2}$$

La résistivité étant constante et puisque le diamètre diminue, la résistance va automatiquement augmenter

Effet de recuit sur la résistivité :

Le Tableau VI.13 représente les résultats de l'essai de résistivité des fils tréfilés avec différents taux de déformation pour les échantillons recuit par effet joule.

Tableau VI.13 Résultats de l'essai de résistance pour le cuivre Recuit par effet joule

d (mm)	Taux de déformation ε (%)	la résistance avec recuit par L'effet Joule (Ohm/Km)	La résistivité (Ohm.m) $\times 10^{-8}$
3,407	57,41	1,8627	1,69815
2,826	64,67	2,7238	1,70848
2,2	72,5	4,6331	1,69773
1,774	77,82	6,8737	1,69898
1,36	83	11,7293	1,7039

La Figure VI.15 représente des courbes des essais de la résistivité des fils tréfilé dur et des fils recuit par effet joule.

On sait qu'un métal écroui devient un mauvais conducteur d'électricité car sa structure devient disloquée, hétérogène et instable donc sa résistance électrique augmente. Ceci est illustré par les résultats du la Figure VI.15 (avant et après recuit)

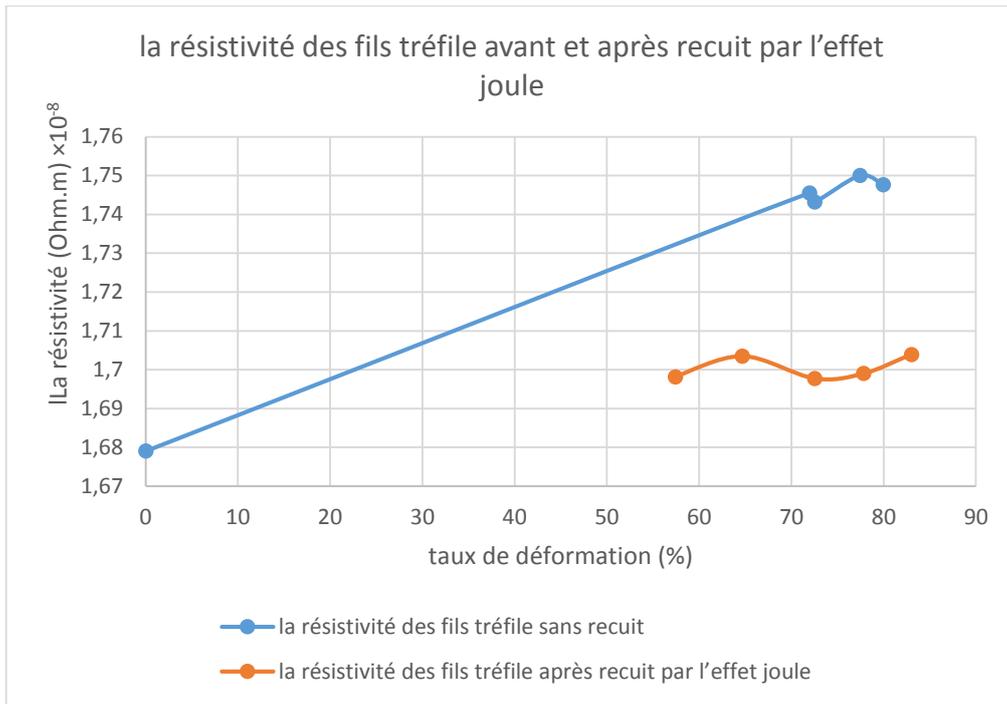


Figure VI.15 Courbes des essais de la résistance des fils tréfilés avant et après recuit par l’effet joule.

D'après les deux courbes de la résistivité sans et avec recuit, On remarque que le recuit permet de restaurer et recristalliser la structure initiale en diminuant le nombre de défauts et en donnant la structure de nouveaux grains. Ceci entraine une diminution des obstacles au mouvement des électrons, le passage du courant électrique est plus facile donc diminue la résistivité du métal.

Tréfilé et recuit dans le four avec différents temps de maintien :

Le Tableau VI.14 représente les essais du mesure de la résistivité électrique des fils écrouis de diamètre $d = 2.208$ mm, recuit à une température de 250 °C, avec différents temps de maintien (5 min, 10 min, 15 min et 30 min) dans un four électrique,

Tableau VI.14 Résultats de l’essai de résistance pour le cuivre Recuit dans le four avec différent temps de maintien sur les échantillons de diamètre ‘ $d=2,2$ mm’

t (min)	0	5	10	15	30
la résistance (Ohm/Km)	4,5326	4,4666	4,4196	4,4133	4,4081
La résistivité (Ohm.m) $\times 10^{-8}$	1,7324	1,7072	1,6892	1,6868	1,6848

La Figure VI.16 représente des courbes des essais de la résistivité des fils tréfilé Recuit dans le four avec diffèrent temps de maintien sur les échantillons de diamètre 'd=2,2 mm'

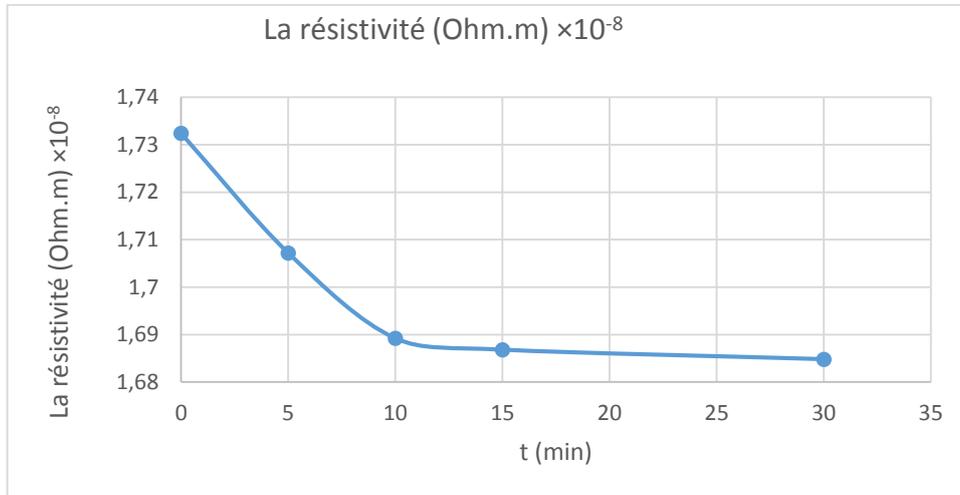


Figure VI.16 Evolution du la résistivité électrique en fonction de temps de maintien.

En sachant qu'un courant électrique n'est rien d'autre qu'un mouvement d'électron, on peut donc dire que plus le temps de maintien est plus grand, plus le métal est stable structurellement (structure recristallisée) plus les électrons se déplacent facilement, plus la résistance est faible. Inversement, plus un métal est écroui, plus les électrons éprouvent des difficultés à se mouvoir, plus la résistance de ce métal est grande.

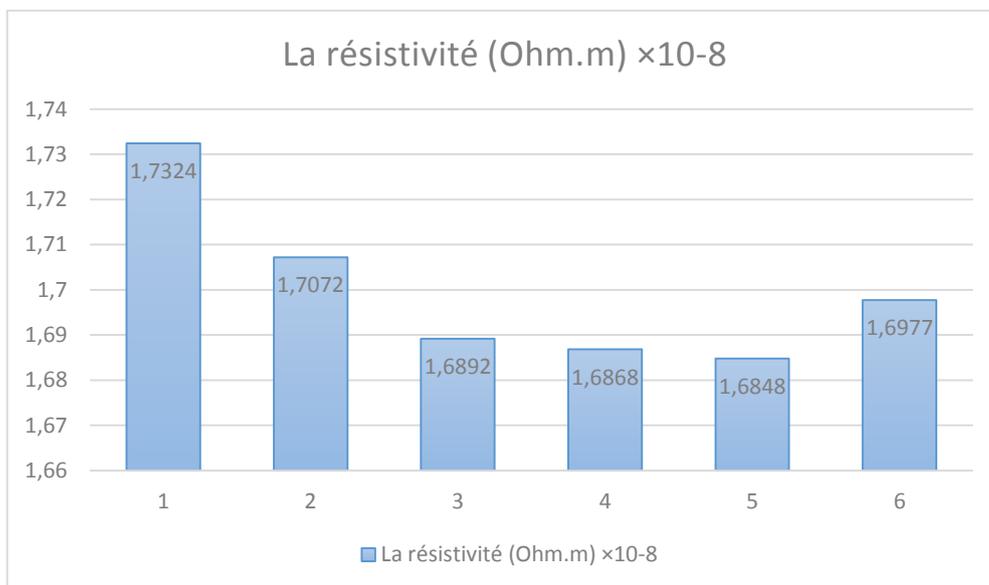


Figure VI.17 Evolution de la résistivité en fonction type et de temps de recuit 1) dur, 2) 5min, 3) 10min, 4) 15min, 5) 30min et 6) état recuit par l'effet joule

On remarque qu'à partir d'un temps de maintien du 8min dans le four électrique, ce recuit devienne équivalent avec le recuit par effet joule d'un point de vu électrique.

VI.5 Etude Métallographie :

La préparation et l'observation de la microstructure s'est faite au laboratoire de métallographie du département de métallurgie de l'ENP. Mais avant de passer à l'observation au microscope il faut d'abord procéder à la préparation métallographique des échantillons, Nous avons donc des échantillons de fil avant recuit et autres pour celui après recuit (recuit par effet joule / recuit dans le four) pour différents taux d'érouissage :

VI.5.1 Microstructure des fils tréfilés sans recuit

Les figures (VI.18 et VI.19) montrent la variation de la microstructure pour l'état dur en fonction de différents taux de déformation

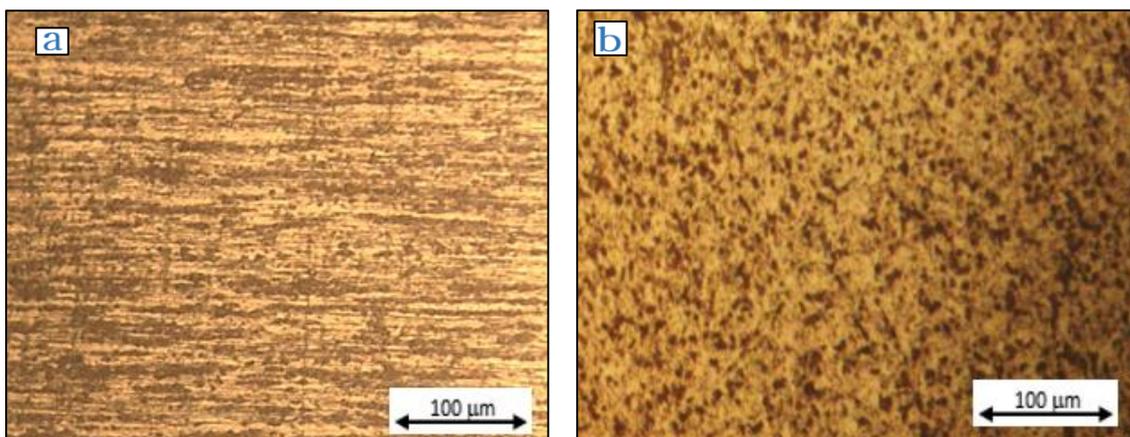


Figure VI.18 Microstructure de Fil tréfilé à $\epsilon = 72,425\%$ a-longitudinale, b-transversale.

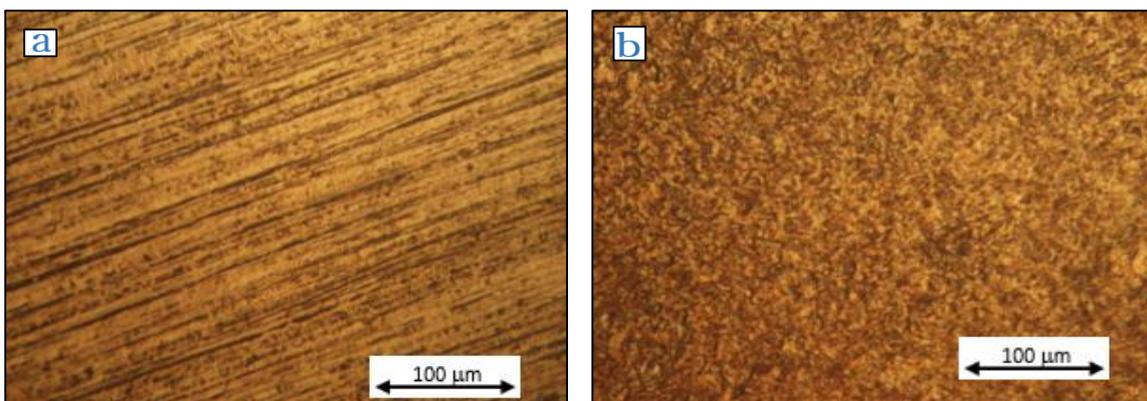


Figure VI.19 Microstructure de Fil tréfilé à $\epsilon = 77.42\%$ a-longitudinale, b-transversale

À 72,42% et à 77.42% de déformation, la structure est caractérisée par un allongement visible des grains dans le plan longitudinal des fils tréfilés.

À $\epsilon=77.42\%$, la structure des fils tréfilés est très s'allongée. La structure est appelée : « structure fibreuse très fine ».

On observe dans les micrographies (figure VI.18 et figure VI.19) une microstructure de grains allongés suivant l'axe du tréfilage. Car le système de contraintes dans le sens radial est le même car imposé par la forme des filières, mais il est différent dans le sens longitudinal. Cet allongement augmente avec le taux de déformation et conduit à une microstructure très fibrée pour les plus forts taux de déformation.

VI.5.2 Etat recuit par l'effet joule :

A CABEL, le recuit se fait par le passage d'un courant électrique de forte densité à Travers le fil qui est entraîné par deux roues qui jouent le rôle d'anode et de cathode. C'est donc un recuit continu qui se fait sur la machine d'étirage elle-même. La Température à laquelle est soumis le fil et qui est générée par ce courant correspond (D'après CABEL) à environ 800°C, avec un temps de chauffage de 0.1 sec: Le chauffage est instantané.

Puisque les changements de structure ne peuvent être observés que dans la coupe longitudinale (aucun changement suivant la section), on va donc s'intéresser uniquement aux coupes longitudinales pour la suite de nos résultats.

Les figures VI.20, VI.21, VI.22 et VI.23montrent la variation de la microstructure pour l'état recuit par l'effet joule en fonction de différents taux de déformation

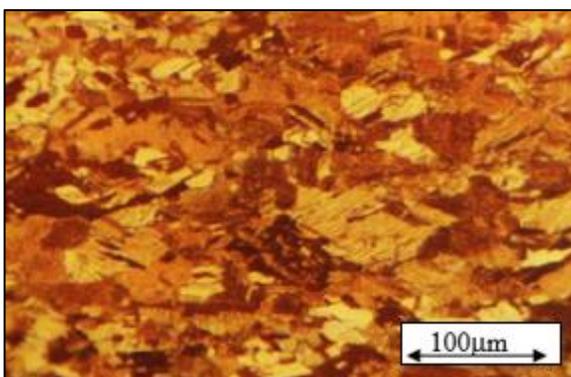


Figure VI.20 Microstructure du fil en cuivre tréfilé à $\epsilon=57,5\%$ recuit par l'effet joule

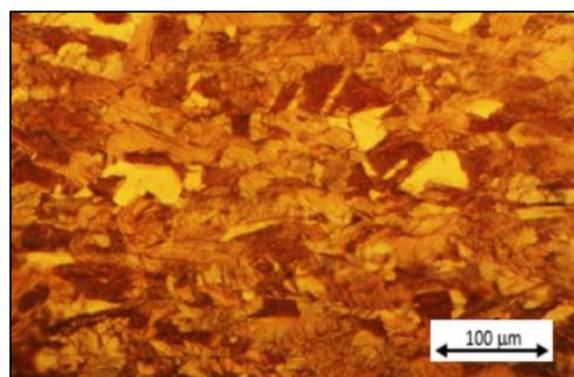


Figure VI.21 Microstructure du fil en cuivre tréfilé à $\epsilon=65\%$ recuit par l'effet joule

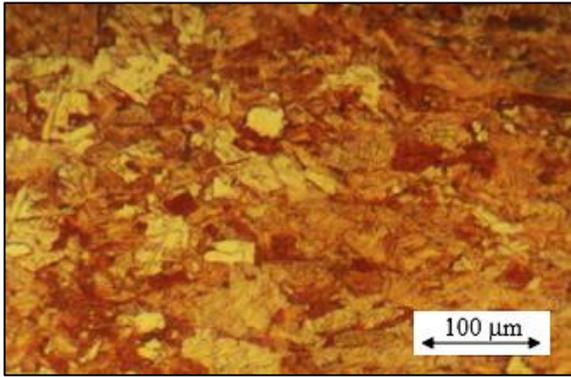


Figure VI.22 Microstructure du fil en cuivre tréfilé à $\epsilon=71,5\%$ recuit par l'effet joule

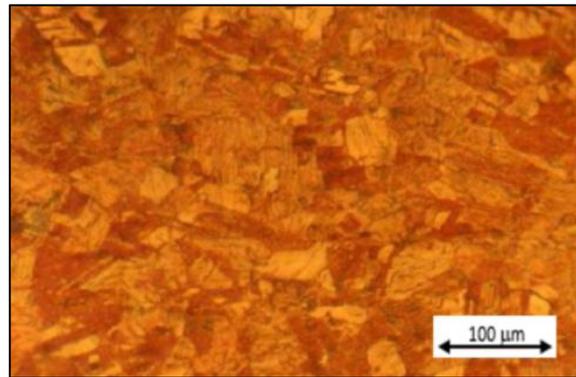


Figure VI.23 Microstructure du fil en cuivre tréfilé à $\epsilon=77,42\%$ recuit par l'effet joule

En comparant les microstructures des échantillons avant et après recuit, on remarque que les grains allongés (Figure VI.18 VI.19), après étirage se sont recristallisés et ont repris une forme régulière (figure VI.23). Les dimensions des grains deviennent plus grandes. On observe aussi une augmentation de la vitesse de recristallisation avec le taux de déformation.

La structure qu'avait le fil auparavant disparaît complètement car le recuit de recristallisation est appliqué après écrouissage pour rendre aux grains allongés et écrouis une taille fine et une forme équiaxe régulière

VI.5.3 Etat recuit dans un four électrique :

Lors d'un chauffage dans un four à moufle, il faut un peu plus de temps pour que la température s'homogénéise dans tout l'échantillon de cuivre. Car la chaleur a besoin de temps pour se propager depuis la surface jusqu'au cœur d'un fil. C'est pour cette raison qu'afin de détecter le temps minimal nécessaire pour obtenir une recristallisation totale du métal écroui, on a commencé par réaliser des recuits à partir d'un maintien de 5min.

Les micrographies du fil de cuivre (tréfilé à $\epsilon=71.5\%$) après recuit dans le four, avec différents temps de maintien (5 min, 10 min, 15 min et 30 min), sont illustrées respectivement dans les figures VI.24, VI.25, VI.26 et VI.27.

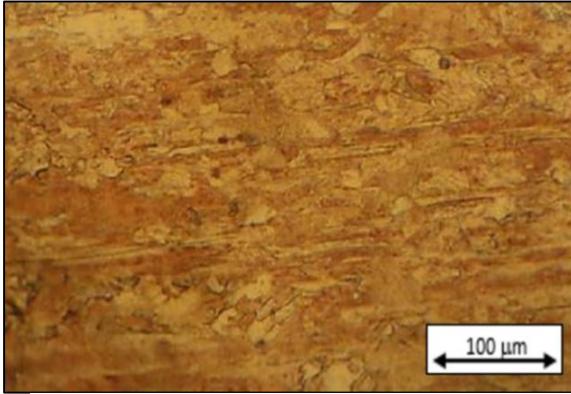


Figure VI.24 Recuit à 250°C avec 5 minutes de maintien

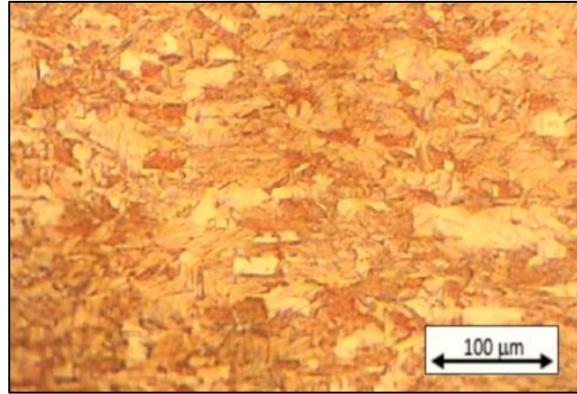


Figure VI.195 Recuit à 250°C avec 10 minutes de maintien.

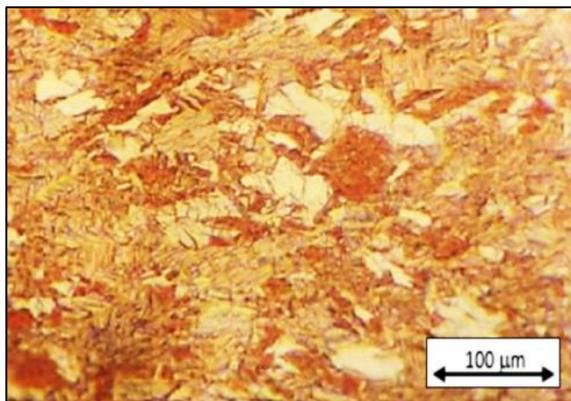


Figure VI.206 Recuit à 250°C avec 15 minutes de maintien

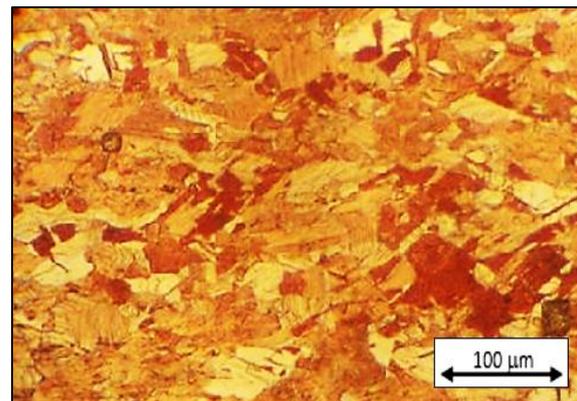


Figure VI.217 Recuit à 250°C avec 30 minutes de maintien

La microstructure donnée par la figure VI.24 montre une fraction recristallisée de l'ordre de (10÷15)% environ. Donc en 5 minutes, nous avons un début de recristallisation, et les 5 premières minutes peuvent être considérées comme étant une période d'incubation nécessaire pour provoquer un mouvement atomique préalable à la formation des premiers germes cristallins.

On voit bien d'après la microstructure donnée par la Figure VI.25 que l'étape de la recristallisation primaire est achevée, la fraction recristallisée est de l'ordre de (95-100)% avec un grain recristallisé extrêmement fin.

La microstructure donnée par la Figure VI.26 correspond à celle obtenue pour l'échantillon recuit à CABEL. Cela confirme que cet échantillon a dépassé le stade de la recristallisation primaire et qu'il est passé au stade suivant de la recristallisation qui est la recristallisation secondaire qui est caractérisée par le grossissement de certains grains au détriment d'autres.

En résumé, on peut dire en s'inspirant des résultats trouvés auparavant que Le recuit à 250°C permet de déclencher le mécanisme de recristallisation ce qui conduit à l'élimination partielle ou totale de la microstructure écrouie des grains déformés. Pour les recuits prolongés au-delà de 15 minutes, on a remarqué un grossissement des grains.

En comparant ces micrographies avec celles des recuits par effet joule, on constate l'apparition nette de grains bien formés signe d'une recristallisation plus complète à 250°C. Les grains déformés et les structures en fibres disparaissent pratiquement de toutes les micrographies. Dans ce cas, La température et le temps qui sont plus grands permettent une restauration, et la germination et croissance de nouveaux grains avec l'élimination de la structure déformée.

Globalement, le taux de déformation entraîne la diminution de la taille des grains après recuit. En effet le grand nombre de défauts entraîne un plus grand nombre de sites de germination.

Après avoir effectué des recuits à 250°C avec de temps de maintien de 5min, 10min, 15min et 30min, on a essayé de faire un traitement à 250°C avec un temps de maintien de 8min pour suivre l'évolution de la microstructure et de l'allongement, et voir s'il est possible d'envisager une autre solution pour augmenter la vitesse de production ou bien de réduire la consommation électrique.

Proposition techno-économique

Recuit avec 8 minutes de maintien :

La microstructure ainsi que les résultats de l'essai de traction sont donnés respectivement dans la figure VI.28 et sur le tableau VI.15.

Tableau VI.15 Résultats de l'essai de traction, microdureté et la résistance sur les échantillons de CABEL

Rm(MPa)	A (%)	Microdureté HV	$\rho(\text{Ohm.m}) \times 10^{-8}$
204,745	31.071	91,8756	1,6982

Le recuit à CABEL est donc équivalent à un recuit à 250°C dans un four avec un temps de maintien de 10 minutes. Alors que, d'après les résultats trouvés, un recuit avec 8 minutes de maintien à la même température aurait suffi.

La micrographie du fil de cuivre après recuit est illustrée sur la figure VI.28 :

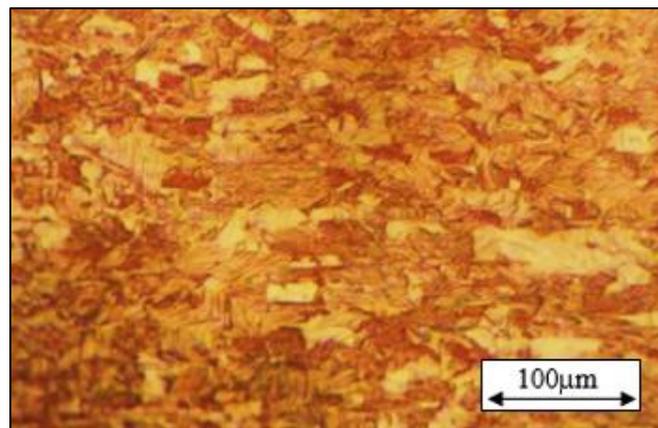


Figure VI.28 Recuit à 250°C avec 8 minutes de maintien.

Ce qui est à noter, en comparant les microstructures de l'échantillon recuit à 250°C pendant 8 minutes élaboré en laboratoire avec celui recuit à CABEL (Figures VI.22), c'est que la taille des grains n'est pas la même. Ceux de l'échantillon recuit à CABEL sont beaucoup plus gros que ceux de l'échantillon recuit à 8 minutes au laboratoire. Ceci est peut-être dû à un temps de maintien supérieur à celui nécessaire pour arriver à la recristallisation primaire.

Il faut savoir aussi qu'à CABEL, le recuit se fait par le passage d'un courant électrique de forte densité à travers le fil qui est entraîné par deux roues qui jouent le rôle d'anode et de cathode. La température à laquelle est soumis le fil est environ 800°C et le chauffage est instantané. C'est donc la section du fil de cuivre en entier qui atteint presque instantanément la température de 800°C. Par contre, lors d'un chauffage dans un four, il faut un peu plus de temps pour que la température s'homogénéise dans tout l'échantillon de cuivre. Car la chaleur a besoin de temps pour se propager depuis la surface jusqu'au cœur d'un fil. C'est pour cette raison qu'afin de détecter le temps minimal nécessaire pour obtenir une recristallisation totale du métal écroui, on a commencé par réaliser des recuits à partir d'un maintien de 5 minutes.

Ainsi, On peut énoncer ce qui suit :

Le temps de maintien de 0,084s (par effet joule) correspond au temps de maintien de 10 min (dans le four). Un Temps de 8min aussi peut déclencher le mécanisme de recristallisation et assure de bonnes propriétés mécaniques et électriques et il correspondrait à un temps de 0,067s que nous avons proposé à CABEL.

Avec ce temps (0,067 seconde), on pourrait augmenter la vitesse de tréfilage de 31,5 m/s à 37.87 m/s. Cette augmentation permettra à CABEL d'augmenter la quantité de cuivre produite par heure de 23 km.

Ces chiffres sont donnés à titre d'exemple car nous ne connaissons pas les interrelations entre les temps de maintien de l'effet joule et dans le four électrique. Un tel travail nécessite une connaissance serrée des paramètres de la tréfileuse (courant électrique, différence de potentiel, vitesse de tréfilage...). Il faut aussi avoir un programme de modélisation précis donnant la relation entre le temps de maintien dans le four de recuit de la tréfileuse et le temps de maintien dans un four de chauffage ordinaire pour chaque diamètre de fil tréfilé.

Ici, Nous Expliquons seulement l'importance des 0.02s gagné dans le temps de maintien. Il permet de réduire l'énergie utilisée pour le recuit par effet joule. Ainsi, les deux paramètres « temps » et « énergie » sont d'une importance majeure pour rendre le travail de l'entreprise plus rentable.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but d'une part l'étude de l'effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre par la compréhension de l'influence des paramètres : le taux de déformation, la température et le temps de recuit sur les mécanismes de la restauration et la recristallisation dans les fils électriques en cuivre tréfilés à froid. D'autre part, nous essayons de trouver un optimum temps-température afin d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des fils en cuivre tréfilés produites dans l'usine CABEL. Ce compromis pourrait aider l'entreprise CABEL à réduire sa facture d'électricité en réduisant la vitesse de production ou bien augmenter la vitesse de production tout en gardant la même consommation énergétique.

Nous avons explicité les connaissances nécessaires à la compréhension du mécanisme de déformation plastique en général et la déformation par le tréfilage à froid en particulier.

Afin de présenter l'évolution de la microstructure des fils déformés et après le traitement thermique de recuit, des techniques de caractérisation telles que l'essai de traction, la mesure de la résistivité électrique, la microscopie optique ainsi que la microdureté Vickers afin de mieux comparer les propriétés des états écrouis et recuits ont été utilisées.

La démarche adoptée consistait à caractériser tout d'abord les étapes de déformation à froid, puis à suivre l'évolution de la microstructure et la cinétique de recristallisation au cours des recuits.

Nous allons maintenant résumer les résultats obtenus lors de cette étude et dégager les questions encore ouvertes concernant les effets de déformation et du recuit :

- Le tréfilage provoque un développement d'une microstructure fibrée accompagnée d'une modification de certaines propriétés mécaniques comme l'augmentation de la microdureté et de la résistivité électrique liées également à la multiplication de défauts par écrouissage.
- Les caractéristiques mécaniques en traction confirment les observations microstructurales puisque la résistance mécanique est plus importante et l'allongement à la rupture diminue dans l'état écroui.
- Concernant la microstructure, on a constaté un affinement du grain et diminution des dimensions des grains dans une section transversale et une structure longitudinale fibreuse avec l'augmentation du taux de déformation.

- Le recuit change la structure et donne la possibilité d'obtenir la structure homogène polyédrique c'est-à-dire qu'on peut utiliser le recuit de recristallisation comme traitement thermique intermédiaire.
- La croissance du grain n'a pas évolué de la même cinétique pour tous les échantillons et elle est accompagnée d'une diminution de la microdureté HV.
- Le traitement thermique de recuit par effet joule a provoqué des changements de microstructure. En effet, nous avons observé l'apparition de nouveaux grains, signe d'une recristallisation néanmoins incomplète. Une nette diminution de la microdureté est constatée pour tous les taux de déformation.
- Enfin, la résistivité électrique atteint la valeur désirée puisqu'elle diminue du fait de la diminution du nombre de défauts.
- Les essais de traction nous ont fait valoir que la caractéristique d'allongement du fil est celle qui est la plus atteinte après le tréfilage. Néanmoins, les différents recuits qu'on a fait subir au fil nous ont montré que cette caractéristique peut être rétablie d'une manière à ce qu'elle soit conforme à la norme exigée, mais seulement après que l'on est atteint la fin de la recristallisation primaire où la totalité des grains sont recristallisés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Michel Colombié et coll. “MATÉRIAUX MÉTALLIQUES” (Pages 643-676). Dunod .Paris, 2008
- [2]. Ch.Bouchy, F.Gobin. “METALLURGIE, 1-métallurgie structurale” (Pages 92-116). Librairie armand colin. Paris (1971).
- [3]. Guy Murry. “MTALLURGIE : Métaux, Alliage, Propriétés” (pages 115-180).Dunod. France (2010).
- [4]. J.Philibert, A.Vignes, Y.Bréchet, P.Combrade. “MTALLURGIE : Du minerai au matériau” (pages 219-224). Dunod. Prais (2002).
- [5]. I.Lakhtine. “Métallographie et Traitements thermiques des métaux” (pages 441-443).éditions MIR. Moscou (1971).
- [6]. Ould Cherif Houcine. “Etude métallurgique et physique des fils électrique en cuivre en cuivre tréfilés et recuits”.Projet fin d’étude ENP (2006)
- [7]. SaâdJakani. “Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé”. THESE. Université Paris Sud - Paris XI, 2004.
- [8]. Guillaume VEGA. “Optimisation de la mise en forme par tréfilage : approche expérimentale, modélisation et simulation numérique”. THESE. Université de Lille1, 2009.
- [9]. Iyas ALIANE. Amar AKKACHA. “Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques d’un fil de cuivre tréfilé”.Projet de fin d’études. ENP (2013).
- [10]. Lahcene FALLAH, “ L’effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre ”, thèse, Biskra(2015).

- [11]. Mostafa Baidji. “Tentative d'identification des causes de rupture dans les fils tréfilés (AGS) ‘’, thèse, Biskra(2017).
- [12]. F. J. Humphreys, and M. Hatherly, “Recrystallization and Related Annealing Phenomena’’, second ed, Oxford: Elsevier Pergamon Press, 2004.
- [13]. Tourifarida. “Synthèse de nouveaux matériaux moléculaires par phosphorylation des dérivés amines et étude de leurs propriétés électrochimiques et complexantes ’’.thèse université Ferhat abbas-setif(2012).
- [14]. T. RICHTON. « Dynamique et complexité de la déformation plastique étudié par émission acoustique ». Mémoire de doctorat. INP de Grenoble. (2006).
- [15]. <http://copperalliance.fr/le-cuivre/extraction-et-metallurgie>
- [16]. K. E. Mackay and G. A Smith, “Trans. Inst. Min. Met., Vol. 75’’, p. 269(1966)
- [17]. D. Coutsouradis, E. Diderrich, J. Smets, G. Crocq, L. Pauwels, ‘’Metallurgical reports C.R.M’’. p. 73 (1974).