

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

***Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Métallurgie***

Thème

***Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques
d'un fil de cuivre tréfilé***

Proposé et dirigé par :

Pr. A. KASSER

Mr. S. ALIANE

Réalisé par :

Ilyas ALIANE

Amar AKKACHA

Promotion Juin 2013

Ecole Nationale Polytechnique, avenue Hassen BADI, El Harrach, Alger

Tél : (+213) 21.52.10.27, Mail : enp@enp.edu.dz

Résumé :

Ce projet porte sur l'étude des propriétés mécaniques et électriques d'un fil de cuivre élaboré par tréfilage et destiné à être utilisé dans les câbles électriques et téléphoniques. Notre but principal 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 différentes températures et différents maintiens. Les résultats ont montré que le matériau écroui par tréfilage se recristallise totalement en 20 secs de maintien à 800 °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.

Abstract:

This project consists in the study of mechanical and electrical properties of a copper wire made by a cold drawing process. This wire is intended to be used in electrical and telephonic cables. 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 temperatures and dwelling times have been carried out. The results have showed that the material that has been work hardened during cold drawing did recrystallise within only 20 seconds at 800 °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.

الملخص:

يتمثل هذا العمل في دراسة الخصائص الميكانيكية و الكهربائية لسلك من النحاس محضر بعملية القلذ لغرض استعماله في الكوابل الهاتفية و الكهربائية. هدفنا الرئيسي يكمن في متابعة و تمثيل تطورات الاستطالة و المقاومة النوعية بدلالة تطورات اعادة البلورة ، لهذا الغرض وَّضنا السلك المقلَّذ لعدة معالجات حرارية في درجات حرارة مختلفة و في ظرف أوقات علاج مختلفة أيضا لقد بينت النتائج أن المادة المتصلبة عن طريق عملية القلذ يتم اعادة بلورتها كليا خلال 20 ثانية من العلاج في 800°م. بعد معالجة التليين هذه، يستعيد المعدن كل خصائصه الميكانيكية و الكهربائية خاصة الاستطالة و المقاومة النوعية.

كلمات مفتاحية : القلذ ، المعالجة الحرارية ، اعادة البلورة ، الاستطالة ، المقاومة النوعية ، أوقات العلاج.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes parents
bien aimés et à mes deux petits
frères Youcef et Dalil.*

Ilyas.

*Je dédie ce travail à mes chers parents,
à mon frère Samir
et ma sœur Mélina.*

Amar.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, en premier lieu Mr A.KASSER notre promoteur, et Mr S.ALIANE, notre encadreur à CATEL pour nous avoir soutenu, aidé et fait profiter de leurs connaissances.

Pour avoir accepté de siéger en tant que jury à notre soutenance, nous tenons à remercier Mr DELLALI président de jury, ainsi que Mr ABADLI et Mr CHITROUB membres de jury et examinateurs.

Nous tenons aussi à remercier toute l'équipe de CATEL, d'avoir mis toutes les ressources humaines et matérielles à notre disposition, en particulier Mlle I.CHEHAOUI qui nous a épaulé du tout début à la fin de notre stage à CATEL.

Nous exprimons notre sincère gratitude à toute l'équipe du laboratoire de métallurgie de l'entreprise CABEL en particulier FARID.

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

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Partie A Etude bibliographique | |
| Chapitre I Présentation de l'entreprise | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Présentation de CATEL | 3 |
| I.2.1 Localisation | 3 |
| I.2.2 Historique..... | 4 |
| I.2.3 Dates clefs..... | 4 |
| I.2.4 Démarche qualité..... | 5 |
| I.2.5 Gamme de produits | 5 |
| I.2.6 Processus de production de câbles en cuivre..... | 7 |
| I.2.7 Marché de CATEL..... | 7 |
| I.2.8 Organisation de CATEL | 8 |
| Chapitre II Propriétés physiques, mécaniques et chimiques des cuivres industriels | |
| II.1 Cuivres industriels non alliés..... | 9 |
| II.1.1 Définitions | 9 |
| II.1.2 Le cuivre dans l'industrie | 9 |
| II.1.2.1 Evolution de la production mondiale | 9 |
| II.1.2.2 Consommation et principaux domaines d'utilisation..... | 10 |
| II.2 Les alliages de cuivre utilisés dans l'industrie | 11 |
| II.2.1 Alliages à faible teneur en éléments d'addition..... | 11 |
| II.2.2 Alliages à haute teneur en éléments d'addition | 12 |
| II.2.2.1 Les laitons | 12 |
| II.2.2.2 Les bronzes | 13 |

| | |
|---|----|
| II.3 Propriétés physiques et mécaniques du cuivre | 14 |
| II.4 Propriétés chimiques du cuivre | 16 |
| II.4.1 Le cuivre et l’oxygène | 16 |
| II.4.2 Résistance à la corrosion | 16 |
| II.4.2.1 Caractéristiques de base | 16 |
| II.4.2.2 Fatigue sous corrosion..... | 17 |

Chapitre III La déformation plastique à froid

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction | 18 |
| III.2 Généralités..... | 18 |
| III.3 Dislocation et mécanismes associés | 19 |
| III.3.1 Définition | 19 |
| III.3.2 Barrières de Peierls..... | 21 |
| III.3.3 Système de glissement | 22 |
| III.3.4 Maclage | 23 |
| III.4 Mécanismes de la déformation plastique dans les poly cristaux | 24 |

Chapitre IV les changements structuraux pendant la déformation et leur influence sur les propriétés électriques

| | |
|---|----|
| IV.1 La résistance et la résistivité électrique..... | 25 |
| IV.2 Influence de l’état physique du matériau sur la résistivité électrique | 26 |
| IV.2.1 Restauration | 26 |
| IV.2.1.1 Polygonisation..... | 26 |
| IV.2.1.2 Restauration de la résistivité électrique..... | 27 |
| IV.2.1.3 Restauration des propriétés mécaniques..... | 28 |
| IV.2.2 Recristallisation | 28 |
| IV.2.2.1 Recristallisation primaire | 29 |
| IV.2.2.2 Recristallisation secondaire..... | 31 |

Chapitre V Le tréfilage

| | |
|------------------------|----|
| V.1 Introduction | 32 |
|------------------------|----|

| | |
|--|----|
| V.2 Définition..... | 32 |
| V.3 Fil machine | 33 |
| V.4 Les machines et outils utilisés..... | 33 |
| V.4.1 Machines simples..... | 34 |
| V.4.1.1 Dévidoir | 34 |
| V.4.1.2 Filières | 36 |
| V.4.1.3 Mandrins..... | 37 |
| V.4.1.4 Lubrifiants..... | 38 |
| V.4.2 Machines multiples..... | 38 |
| V.5 Paramètres du tréfilage | 40 |
| V.5.1 Vitesse de déformation..... | 41 |
| V.5.2 Force de tréfilage..... | 41 |
| V.5.3 Frottements..... | 43 |
| V.5.4 Echauffement du fil..... | 43 |
| V.6 Ecrouissage et conséquences sur les caractéristiques des fils..... | 44 |

Partie B Etude expérimentale

Chapitre VI Techniques expérimentales

| | |
|--|----|
| VI.1 Caractérisation du fil machine | 45 |
| V.1.1 Composition chimique du fil machine | 45 |
| V.1.2 Méthode d'échantillonnage..... | 46 |
| V.1.3 Mesure du diamètre..... | 46 |
| V.1.4 Essai de traction..... | 47 |
| VI.2 Tréfilage et traitement thermique | 48 |
| VI.2.1 Processus CATEL | 48 |
| VI.2.1.1 Tréfilage | 48 |
| VI.2.1.2 Recuit..... | 52 |
| VI.2.2 Processus de fabrication du même fil en laboratoire | 53 |
| VI.2.2.1 Etirage..... | 53 |

| | |
|---|----|
| VI.2.2.2 Traitement de recristallisation..... | 55 |
| VI.3 Les essais mécaniques et électriques..... | 56 |
| VI.3.1 L'essai de résistance..... | 58 |
| VI.3.2 L'essai de traction | 58 |
| VI.4 Techniques de préparation à l'étude métallographique..... | 60 |
| VI.4.1 Découpage et enrobage..... | 60 |
| VI.4.2 Polissage | 61 |
| VI.4.3 Attaque chimique | 62 |
| VI.4.4 Observation au microscope optique..... | 62 |
| VI.4.5 Analyse quantitative..... | 62 |
| Chapitre VII Résultats et interprétations | |
| VII.1 Résultats d'essai sur le fil machine | 63 |
| VII.2 Résultats des tests effectués sur le fil de 2,5mm de diamètre | 65 |
| VII.2.1 Etude des échantillons CATEL..... | 65 |
| VII.2.1.1 Essai de résistance | 65 |
| VII.2.1.2 Essai de traction..... | 66 |
| VII.2.1.3 Microstructure | 67 |
| VII.2.2 Etude des échantillons reproduits au laboratoire | 69 |
| VII.2.2.1 Tréfilage..... | 69 |
| VII.2.2.2 Traitements de recuit | 70 |
| Conclusion et perspectives | 86 |
| Références bibliographiques | 88 |
| Annexes | 90 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-----------|
| Tableau I. Répartition des réserves mondiales de cuivre par continent | 10 |
| Tableau II. <i>Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre</i> | 15 |
| Tableau III. Potentiels d'équilibre standards mesurés par rapport à l'électrode à hydrogène | 17 |
| Tableau IV. Vitesse de corrosion du cuivre et de ses alliages en atmosphère sèche | 17 |
| Tableau V. Résistance à la fatigue sous corrosion du cuivre et de ses alliages | 17 |
| Tableau VI. Principaux systèmes de glissement observés | 22 |
| Tableau VII. Association filière – mandrin | 37 |
| Tableau VIII. Composition chimique du cuivre donnée par UNITED METALS en %massique | 45 |
| Tableau IX. Filières utilisées pour 4 diamètres de sortie différents | 50 |
| Tableau X. Résultats des essais sur le fil machine | 63 |
| Tableau XI. Résultats obtenus pour des diamètres calculés via un Palmer | 63 |
| Tableau XII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés en connaissant le poids métrique | 64 |
| Tableau XIII. Résultats de l'essai de résistance sur les échantillons de CATEL | 65 |
| Tableau XIV. Résultats de l'essai de traction sur les échantillons de CATEL | 66 |
| Tableau XV. Coefficients d'allongement μ | 69 |
| Tableau XVI. Résultats de traction des échantillons recuits à 700°C | 81 |
| Tableau XVII. Résultats des fractions recristallisées pour les micrographies obtenues | 83 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Le plan d'accès au site de CATEL | 3 |
| Figure I.2. Etapes de production du câble en cuivre | 7 |
| Figure I.3. Organigramme de CATEL..... | 8 |
| Figure III.1. Schéma d'une courbe de traction | 18 |
| Figure III.2. La propagation d'un pli le long d'un tapis, analogue au mouvement d'une dislocation coin..... | 19 |
| Figure III.3. Schématisation d'une dislocation vis et coin dans un cristal..... | 20 |
| Figure III.4. Déplacement d'une dislocation coin dans un cristal..... | 20 |
| Figure III.5. Circuit de Burgers autour de la dislocation puis reproduit dans le cristal parfait | 21 |
| Figure III.6. Cylindre de glissement..... | 23 |
| Figure III.7. Système de maillage | 23 |
| Figure IV.1. Élément conducteur de section S et de longueur L | 25 |
| Figure IV.2. Coalescence de sous joints..... | 27 |
| Figure IV.3. Évolution des propriétés du cuivre lors de la restauration et de la recristallisation | 28 |
| Figure IV.4. Cinétique de recristallisation du cuivre à 450°C après une déformation par laminage..... | 30 |
| Figure V.1. Principe du tréfilage..... | 32 |
| Figure V.2. Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple..... | 34 |
| Figure V.3. Dévidoirs | 35 |
| Figure V.4. Profil d'une filière | 36 |
| Figure V.5. Outillage pour tréfilage | 37 |
| Figure V.6. Outillage pour tréfilage | 39 |
| Figure V.7. Machine multiple à accumulation..... | 39 |
| Figure V.8. Dispositif d'accumulation du fil..... | 40 |

| | |
|---|-----------|
| Figure V.9. Machine multiple à glissement (à cône)..... | 40 |
| Figure V.10. Passage d'un fil dans une filière | 41 |
| Figure V.11. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière..... | 42 |
| Figure VI.1. Bobines de fil machine stockées dans le parc de CATEL | 45 |
| Figure VI.2. Palmer utilisé pour la mesure du diamètre..... | 46 |
| Figure VI.3. Balance pour le calcul de la masse métrique | 47 |
| Figure VI.4. Machine de traction à CABEL | 48 |
| Figure VI.5. Dévidoir..... | 49 |
| Figure VI.6. Ebaucheuse M81..... | 49 |
| Figure VI.7. La tréfileuse T-3 | 50 |
| Figure VI.8. Filière de diamètre de sortie de 1,70 mm..... | 51 |
| Figure VI.9. Cabestan | 51 |
| Figure VI.10. Les fours de recuit de l'ébaucheuse et de la T-3 | 52 |
| Figure VI.11. Laminoir à double cylindre semi-automatique | 53 |
| Figure VI.12. Schéma illustratif du banc d'étirage..... | 54 |
| Figure VI.13. Schéma de la tenaille..... | 54 |
| Figure VI.14. Schéma du principe de réduction effectué par la filière..... | 54 |
| Figure VI.15. Ensemble filière porte-filière | 54 |
| Figure VI.16. Four utilisé | 56 |
| Figure VI.17. Ouverture du four | 56 |
| Figure VI.18. Traitements de recristallisation d'une éprouvette de cuivre tréfilé | 56 |
| Figure VI.19. Trempe d'une éprouvette de cuivre après traitement de recristallisation .. | 57 |
| Figure VI.20. Pont de résistance | 57 |
| Figure VI.21. PV d'essai de résistance sur un fil de cuivre de 2.5mm de diamètre | 58 |
| Figure VI.22. Machine de traction reliée à un ordinateur | 59 |
| Figure VI.23. Diagramme d'essai de traction | 60 |
| Figure VI.24. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage..... | 61 |

| | |
|---|-----------|
| Figure VI.25. Echantillons d'un fil de cuivre de diamètre 2,5mm après enrobage | 61 |
| Figure VI.26. Polisseuse utilisée..... | 61 |
| Figure VI.27. Microscope métallographique OPTIKA M-789..... | 62 |
| Figure VII.1. Courbes de traction des échantillons de CATEL..... | 66 |
| Figure VII.2. Echantillons enrobés..... | 67 |
| Figure VII.3. Micrographies de l'échantillon de CATEL avant recuit | 68 |
| Figure VII.4. Micrographies de l'échantillon CATEL après recuit..... | 68 |
| Figure VII.5. Micrographie de l'échantillon non recuit | 71 |
| Figure VII.6. Courbe de traction de l'échantillon labo non recuit..... | 72 |
| Figure VII.7. Recuit à 800°C avec 5 secondes de maintien..... | 73 |
| Figure VII.8. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 5s de maintien .. | 73 |
| Figure VII.9. Recuit à 800°C avec 10 secondes de maintien..... | 74 |
| Figure VII.10. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 10s de maintien | 74 |
| Figure VII.11. Recuit à 800°C avec 15 secondes de maintien..... | 75 |
| Figure VII.12. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 15s de maintien | 75 |
| Figure VII.13. Recuit à 800°C avec 20 secondes de maintien..... | 76 |
| Figure VII.14. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 20s de maintien | 76 |
| Figure VII.15. Recuit à 800°C avec 25 secondes de maintien..... | 77 |
| Figure VII.16. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 25s de maintien | 78 |
| Figure VII.17. Recuit à 700°C avec 20 secondes de maintien..... | 79 |
| Figure VII.18. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 20s de maintien | 79 |
| Figure VII.19. Recuit à 700°C avec 30 secondes de maintien..... | 79 |
| Figure VII.20. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 30s de maintien | 80 |
| Figure VII.21. Recuit à 700°C avec 35 secondes de maintien..... | 80 |

| | |
|---|-----------|
| Figure VII.22. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 35s de maintien | 80 |
| Figure VII.23. Recuit à 700°C avec 40 secondes de maintien..... | 81 |
| Figure VII.24. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 40s de maintien | 81 |
| Figure VII.25. Courbes de recristallisation obtenus pour les différents recuits réalisés | 84 |

INTRODUCTION GENERALE

Les différents besoins de l'être humain font très souvent appel à l'utilisation de l'énergie électrique pour l'élaboration et le fonctionnement des différents programmes et produits conçus.

Nous vivons entourés en permanence de câbles électriques qui assurent la transmission d'énergie et d'informations dans les installations de tous les secteurs. Nous sommes tellement habitués à leur présence que nous les percevons à peine. Pourtant, sans eux, les tâches quotidiennes comme éclairer une pièce, allumer un ordinateur ou mettre en marche une installation, ne pourraient pas être effectuées.

Le matériau le plus utilisé pour fabriquer les câbles électriques est le cuivre dont la caractéristique principale est sa très bonne conductivité électrique associée à une ductilité élevée. Avec ses alliages, le cuivre est employé dans plusieurs autres applications, notamment grâce à ses autres bonnes propriétés comme la bonne tenue à la corrosion. On le trouve également dans les échangeurs thermiques, les tuyauteries et dans les produits électriques et électroniques d'une façon générale.

Pour arriver au stade du fil, le cuivre est d'abord extrait des minerais puis subit une première transformation qui est l'affinage électrolytique avec lequel on obtient des cathodes de cuivre d'une pureté de 99,9%. Ces cathodes sont ensuite fondues puis coulées sous forme de lingots cylindriques. Ces lingots sont alors extrudés à chaud pour affiner leur structure et réduire leur diamètre. Le produit extrudé est finalement laminé à chaud en utilisant des cylindres cannelés pour obtenir des fils ayant un diamètre de 8mm appelés : fil machine. Ce fil va passer à la deuxième étape de transformation qui est le tréfilage, et qui fait justement l'objet de notre étude.

Ce travail est divisé en sept (07) chapitres :

Le premier est consacré à une présentation générale de l'entreprise CATEL au sein de laquelle on a effectué notre stage avec une explication de son principe de fonctionnement et de ses principaux constituants.

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.

La déformation plastique à froid a été détaillée dans le troisième chapitre, où l'on a fait une description des dislocations et de ses mécanismes et citer les mécanismes de déformation plastique dans les poly cristaux.

Les changements structuraux pendant la déformation et leur influence sur les propriétés mécaniques et électriques sont explicités dans le quatrième chapitre où l'on a expliqué l'influence de l'état physique du matériau, notamment la restauration et la recristallisation, sur la résistivité électrique.

Dans le cinquième chapitre, on a cité les différents procédés du tréfilage en précisant les outils et les paramètres qui lui sont associés.

Les différentes techniques expérimentales utilisées au laboratoire de l'ENP et à l'entreprise ainsi que le procédé de tréfilage appliqué au sein de la tréfilerie CATEL sont énumérés et détaillés dans le sixième chapitre.

Les résultats obtenus lors de notre étude sont relatés et interprétés dans le septième et dernier chapitre.

Partie A

Etude Bibliographique

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1 Introduction [CATEL]

Nous procéderons dans ce chapitre à la présentation de l'entreprise CATEL où nous avons effectué notre stage, ainsi que tous nos essais de traction et de résistivité électrique.

I.2 Présentation de CATEL

Bien que créée seulement en 1998 par scission de l'E.N.I.C.A.B, l'entreprise CATEL exerce un métier s'appuyant sur une activité qui remonte à plus de 70 ans, lorsque fut née l'activité CÂBLERIE DE TÉLÉCOMMUNICATION.

I.2.1 Localisation

Les câbleries de télécommunication d'Algérie « CATEL » est située à une quinzaine de kilomètres à l'est d'Alger, dans la zone industrielle de Oued Smar. Elle s'étend sur une superficie globale de 37.657m².

La figure I.1 ci-dessous montre la localisation de « CATEL » sur une carte géographique.

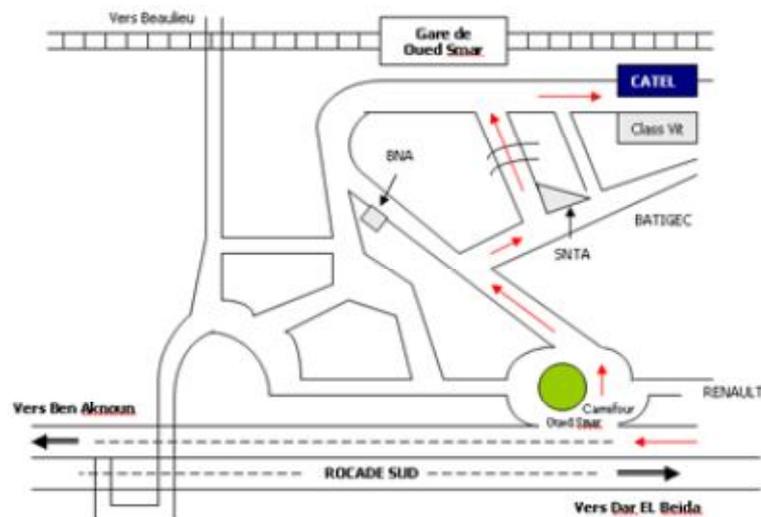


Figure I.1. Le plan d'accès au site de CATEL.

I.2.2 Historique

L'usine a été créée en 1928 sur décision de la société française « Lignes Télégraphiques & Téléphoniques » de France. Elle fut nationalisée en 1968. Depuis, elle a été rattachée par la SN METAL et puis en 1969 par la SONELEC.

L'entreprise nationale des industries du câble ENICAB a rattaché en 1983 les activités de l'Ex LTT et a donné naissance, après sa restructuration en 1977, à la société CATEL qui a pour principales activités : Le tréfilage, la production et la commercialisation des Câbles de Télécommunications en cuivre. Elle a créé en 2005 en partenariat avec le Holding MATELEC Sal, la société CATEL FIBROPTIC, spécialisée dans la production et la commercialisation des câbles à fibre optique.

En 2007, elle a ouvert son capital au même Holding qui actuellement en détient 60%. Les 40% des actions restantes sont détenues par la SGP Cabeleq. Le capital actuel de CATEL est de 1.002.800.000 DA soit approximativement 10.000.000 € et celui de CATEL FIBROPTIC est de 250.000.000 DA soit approximativement 2.493.000 €

En 2010, CATEL compte dans ses rangs 326 fonctionnaires, en 2011 318, en 2012 301 et 298 travailleurs pour cette année.

I.2.3 Dates clefs

1928 : Création de l'unité câblerie téléphonique de Oued Smar par la société française LTT « Lignes Télégraphiques & Téléphoniques Nord Africaines » - Période coloniale.

1929 : Construction du premier câble téléphonique souterrain d'Afrique du Nord entre Oran, Alger et Constantine. L'effectif de l'usine était de 1500 travailleurs.

1933 : Période difficile pour LTT engendrée par la crise mondiale de 1929. L'effectif est passé de 1500 à 800 en 1950 puis tombé à 350 en 1965, après le recouvrement de l'indépendance de l'Algérie.

1968 : Nationalisation de l'usine LTT par le gouvernement algérien et rattachement de l'unité à la société nationale SN METAL.

1969 : Transfert de l'unité de la SN METAL à la société nationale SONELEC.

1983 : Restructuration organique de la SONELEC et naissance de l'entreprise ENICAB.

1989 : ENICAB accède à l'autonomie et devient une Entreprise Publique Economique.

1998 : Restructuration par scission de l'ENICAB et naissance de trois sociétés dotées de statut de SPA dont CATEL au capital de 50 MDA.

2003 : Notification par le CNCI du plan de mise à niveau. Obtention de la certification à la norme ISO 9001 version 2000.

2004 : Augmentation du capital social de l'entreprise qui passe de 50 MDA à 180 MDA.

2005 : Création d'une joint-venture avec le Holding MATELEC Sal, pour la production de câbles à fibres optiques.

2007 : CATEL a ouvert son capital au même Holding.

Augmentation du capital social de l'entreprise qui passe de 180 MDA à 1 002 MDA. Reconduction de la certification à la norme ISO 9001 version 2000.

2009 : Certification du câble de signalisation ZPAU par SGS Qualitest.

2010 : Certification à la norme ISO 9001 version 2008. Certification des câbles télécommunication à conducteur en cuivre et à fibre optique par LABEL Qualité France.

2011 : Reconduction de la certification de CATEL à la norme ISO 9001 version 2008. Engagement de l'entreprise dans la certification du SME 14001.

I.2.4 Démarche qualité

Dans un marché imprévisible et de plus en plus exigeant, CATEL s'est engagée volontairement dans la mise en place d'un système de management de la qualité pour améliorer les performances de son management et mettre en œuvre une véritable dynamique d'amélioration continue, afin de s'adapter aux exigences du marché et d'assurer sa pérennité.

Dotée de ce système, CATEL s'oriente en permanence vers la satisfaction de ses clients ainsi que l'anticipation de leurs besoins explicites et implicites. A travers cette démarche "d'amélioration continue", CATEL s'engage à fournir d'une manière régulière un produit conforme aux exigences de ses clients.

Depuis 2003, CATEL est certifiée conformément à la norme ISO 9001 version 2000, et depuis 2010 selon la norme ISO 9001 version 2008.

Afin d'accroître davantage la satisfaction de ses clients et répondre à une clientèle plus exigeante, ses produits en cuivre et en fibre optique sont certifiés par l'organisme français « Label Qualité ».

I.2.5 Gamme de produits

La société CATEL propose une gamme de produits très variée : Télécom Cuivre, Télécom Fibre Optique, Signalisation ferroviaire, Applications industrielles. Pour l'année 2012 CATEL a commencé la fabrication du câble d'énergie.

Télécom Cuivre

Série 88 : câble urbain souterrain

Série 89 : câble urbain souterrain

Série 98 : câble urbain autoporté

Série 99 : câble urbain autoporté

Paire 5/9 : câble unipolaire de raccordement aérien

Paire 5/1 : câble unipolaire de raccordement aérien

Paire 5/3 : câble unipolaire de raccordement aérien

Série 281 : câble de raccordement pour équipement centraux

Série 278 : câble de raccordement pour équipement intérieurs

Série SYT1 /NTHG : câble téléphonique pour installations privées

Série SYT2 /MFG : câble téléphonique armé

Télécom Fibre Optique

Câbles à fibres optiques monomode armés

Câbles à fibres optiques monomode non armés

Câbles à fibres optiques multimode armés

Câbles à fibres optiques multimode non armé

Signalisation ferroviaire

Série ZPGU : câble locale de signalisation

Série ZPFU : câble principal de signalisation de voie

Série ZPAU : câble principal de signalisation de voie

Série ZC03 : câble principal de signalisation d'aiguillage

Applications industrielles

Câble de détection d'incendie SYT rouge

Fil de câblage rigide : Série H07 V-U

I.2.6 Processus de production de câbles en cuivre

Le processus de production des câbles en cuivre est régi par cinq étapes :

Tréfilage : Tréfilage du fil en cuivre de 8 mm.

Isolation : protection du fil de cuivre nu par une couche de polyéthylène ou de PVC.

Assemblage : Assemblage des fils isolés en paires ou en quartes.

Assemblage des quartes en torons de huit, quatorze ou vingt-huit paires.

Assemblage des torons en câbles.

Gainage : Revêtement final du câble : enrobage à chaud en polyéthylène.

Conditionnement : Conditionnement du câble.

La figure I.2 ci-dessous représente le processus de production du câble en cuivre.

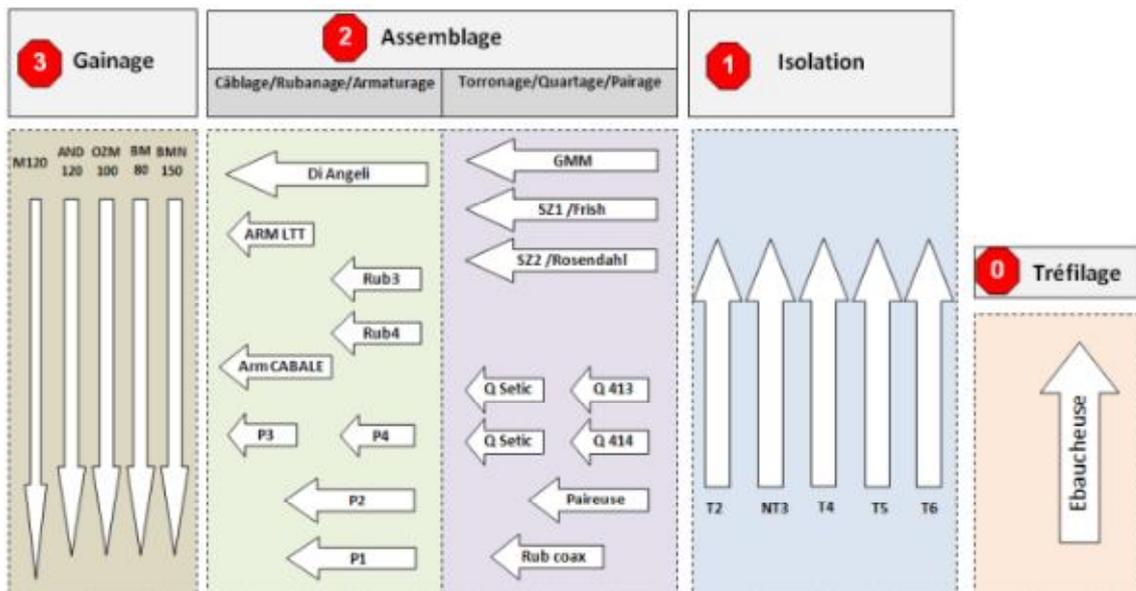


Figure I.2. Etapes de production du câble en cuivre.

I.2.7 Marché de CATEL

Le portefeuille clients de la société CATEL est constitué principalement d'Algérie Télécom, d'institutions de l'Etat, d'ESTEL (Filiale SNTF/Siemens Rail) et de la SONATRACH. Il englobe également plusieurs clients nationaux et étrangers, citons entre autres: INFRATELE, RETELEM, THALES, MARTEC, SNEF, Global Telecom System, Filphone, Beta Télécommunications et autres.

I.2.8 Organisation de CATEL

L'organisation actuelle de CATEL peut être schématisée dans la figure I.3 ci-dessous :

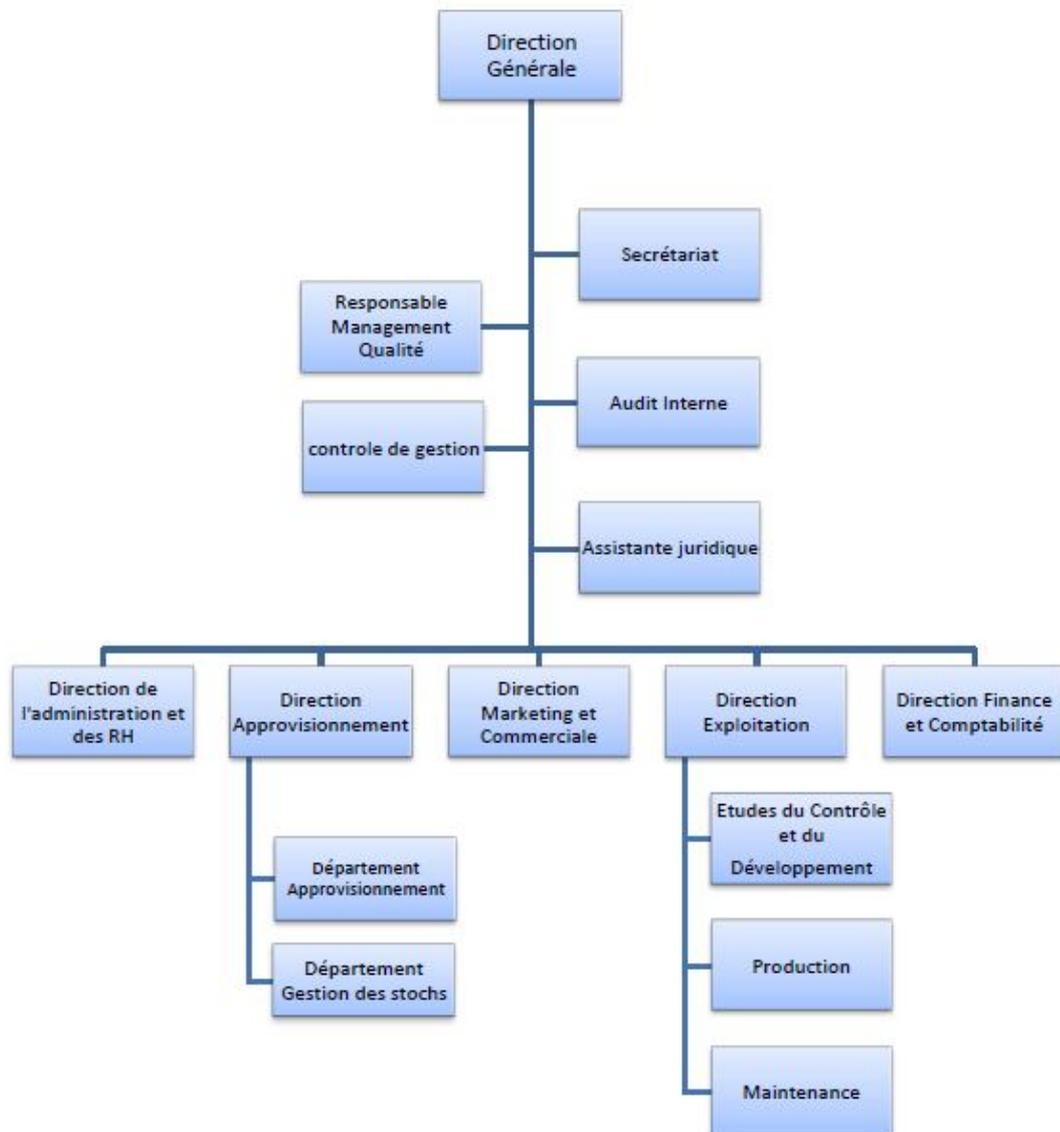


Figure I.3. Organigramme de CATEL [CATEL].

Chapitre II

Propriétés physiques, mécaniques et
chimiques des cuivres industriels

II.1 Cuivres industriels non alliés

II.1.1 Définitions

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

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

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

◆ Le cuivre Cu-c, exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, Cu-c1 (cuivre pur) qui comprend 99,95 % de cuivre et Cu-c2 (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques (ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité) [1].

II.1.2 Le cuivre dans l'industrie

II.1.2.1 Evolution de la production mondiale

Si l'on classe le cuivre en terme de tonnage vis-à-vis des autres métaux, il occupe la troisième place (acier : 790 Mt, aluminium : 22 Mt, cuivre : 13,5 Mt, manganèse : 9,6 Mt, zinc : 7,6 Mt).

Si l'on classe la production minière en terme de valeur, le cuivre prend aussi la troisième place, la première et la deuxième étant respectivement occupées par le fer et l'or.

En 1999, la production minière de cuivre a été assurée principalement par sept pays :

- Chili (34,6 %) ;
- États-Unis (12,6 %) ;
- Canada (4,8 %) ;
- Indonésie (6,2 %) ;
- Russie (4,0 %) ;
- Australie (5,7 %) ;
- Pérou (4,2 %).

Il faut noter cependant, dans les deux premiers pays producteurs, l'extrême concentration de l'industrie du cuivre. Le tableau I ci-dessous nous donne les réserves mondiales de cuivre par continent [2].

Tableau I. Répartition des réserves mondiales de cuivre par continent [2].

| Continent | Quantité (Mt) | Répartition (%) |
|------------------|---------------|-----------------|
| Amérique du nord | 55 | 16,3 |
| Amérique du sud | 130 | 38,6 |
| Europe | 49 | 14,5 |
| Afrique | 22 | 6,5 |
| Asie | 70 | 20,8 |
| Océanie | 11 | 3,3 |
| Total | 337 | 100 |

II.1.2.2 Consommation et principaux domaines d'utilisation

Il est difficile de fournir une idée précise sur la consommation de cuivre à l'échelle mondiale. En effet, la consommation apparente est le solde de la production interne et des importations moins les exportations, mais elle ne tient pas compte du stockage et du déstockage. Au niveau mondial, la demande annuelle est restée en constante progression:

- de 1,52 à 2 % de 1981 à 1985 ;
- de 2 à 2,5 % de 1986 à 1995 ;
- de 4,5 à 5 % de 1996 à 2000.

Les utilisations du cuivre tiennent compte de l'ensemble de ses propriétés fonctionnelles : les conductivités électrique et thermique, la résistance à la corrosion, la ductilité, l'aptitude à recevoir des revêtements divers, l'aptitude au soudage et au brasage, les propriétés fongicides.

En 1999, le secteur de la construction électrique est le premier consommateur (50 % des utilisations). Le deuxième secteur est le bâtiment (20 %) où des usages en toitures offrent des opportunités intéressantes. Le troisième secteur est celui des biens d'équipements (15 %). Le secteur du transport, avec 5 %, représente une part croissante de la consommation. Des usages divers et nouveaux apparaissent, notamment dans le

domaine de la haute technologie ; ils s'élèvent à 10 % (sels de cuivre, électronique, supraconducteurs, alliages à mémoire de forme, supraconducteurs à base d'oxyde de cuivre).

Au niveau mondial, pour pouvoir répondre à l'accroissement de la consommation du cuivre, la capacité effective de production des pays industrialisés s'élevait, en 1994, à 8 Mt/an pour les mines, à 9,5 Mt/an pour les fonderies et à 9,3 Mt/an pour les raffineries. En 1998, les productions de ces deux dernières industries sont passées respectivement à 10,2 et 10 Mt ; et l'on prévoit pour la seule fusion un accroissement qui atteindrait 1,4 Mt en 2002. La consommation mondiale de cuivre raffiné est de l'ordre de 11,5 Mt/an, dont 88 % sont consommés dans le monde industrialisé [2].

II.2 Les alliages de cuivre utilisés dans l'industrie

II.2.1 Alliages à faible teneur en éléments d'addition

La teneur en éléments d'addition est inférieure à 3%, les principaux alliages sont :

a- Cuivre à l'argent :

L'apport moyen est de 0,08%. La température de recristallisation et donc d'adoucissement du cuivre est augmentés de 100 à 150°C. Ceci permet de conserver les caractéristiques mécaniques à une température où le cuivre pur s'adoucit. Les applications sont dans l'étamage, l'émaillage et les fils conducteurs.

b- Cuivre au cadmium :

Ajouté dans la teneur de 0,7 à 1%, le Ca améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques, la limite de fatigue et le fluage, la conductibilité électrique est d'environ 90% de celle du cuivre pur. Cet alliage trouve ses applications dans les fils conducteurs, les bagues de collecteurs, les supports de balais...

c- cuivre au tellure :

La masse de tellure ajoutée est de 0,3 à 0,7%. Pratiquement immiscibles à l'état solide, la dissémination des tellures formés augmente l'usinabilité, sans fragilité particulière. La conductibilité reste élevée (98% de celle du cuivre). Ces alliages sont utilisés pour les pièces à haute conductibilité ; tuyères pour soudage au gaz, segment de collecteur...

d- Cuivre au chrome :

La teneur en chrome est de 0,6 à 1%, cet alliage est utilisé lorsque la conductibilité et la résistance doivent être élevées : électrodes de soudage, éléments de frein...

e- Cuivre au zirconium :

Le zirconium donne des caractéristiques intéressantes avec des additions infimes. La solution Cu-Zr est saturée à 980°C avec 0,15% de Zr seulement. Ces alliages doivent être élaborés sous vide ou en atmosphère sans oxygène.

f- Cuivre au nickel et silicium :

Cet alliage contient environ 2,5% de Ni et 0,5% de Si. La conductibilité électrique de cet alliage est réduite à 35% de celle du cuivre. Cet alliage trouve son emploi en mécanique : tête et pied de bielle, guide de soupape, poussoir et mâchoires de machines électriques à forger.

g- Cuivre au nickel et phosphore :

Les teneurs sont : 1 à 1,2% de Ni et 0,2 à 0,3% de P. conductibilité électrique approchant 60% celle du cuivre. Il est utilisé pour les soudures par point, les électrodes de soudure à l'arc et les tuyères pour soudure.

h- Cuivre au nickel et béryllium :

Le béryllium, même pour de très faibles teneurs d'addition, engendre une grande variation des propriétés. La limite de solubilité du Be dans le Cu est de 2,7 % à 866°C, presque nulle à 0°C. Ces alliages sont connus pour avoir des conductibilités thermique et électrique très élevées, une meilleure résistance à la corrosion ainsi qu'une excellente aptitude au moulage [3].

II.2.2 Alliages à haute teneur en éléments d'addition

Ce sont spécialement les alliages Cuivre-Zinc appelés Laitons et les alliages Cuivre-Etain appelés Bronzes, il existe d'autres alliages comme Cu-Al, Cu-Pb et Cu-Ni mais ils sont nettement moins importants et peu utilisés comparés aux Bronzes et Laitons [3].

II.2.2.1 Les Laitons

Les laitons sont des alliages à base de cuivre et de zinc renfermant de 5 à 45 % de ce dernier.

a- Les laitons simples :

Ce sont ceux qui sont constitués uniquement de cuivre et de zinc.

Au-dessous de 36% de zinc, notamment dans la gamme de 30 à 36 %, ces laitons présentent une aptitude très élevée au formage à froid permettant, par exemple, des emboutissages profonds.

Au-dessus de 36% de zinc, les aptitudes au formage à chaud (filage, matriçage) et à l'usinage deviennent prépondérants.

b- Les laitons au plomb : (Zn = 33 à 42 %, Pb = 1 à 3,5%)

Ces alliages sont particulièrement destinés à l'usinage à grande vitesse de coupe. Selon leurs teneurs en zinc et en plomb, ces laitons peuvent satisfaire des exigences de mise en œuvre très variées :

- décolletage pur : Cu-Zn 40 Pb3,
- décolletage et légères déformations à froid : Cu-Zn 36 Pb3,
- matriçage avec reprises d'usinage Cu-Zn 39 Pb2,
- frappe à froid avec reprises d'usinage Cu-Zn 35 Pb2.

c- Les laitons spéciaux :

Leur teneur en cuivre est comprise entre 52 et 70% et ils renferment, outre le zinc, différents éléments d'additions, seuls ou associés, dans les proportions suivantes :

$$\begin{array}{lll} \text{Al} \leq 5 \%, & \text{Ni} \leq 5 \%, & \text{Fe} \leq 3 \% \\ \text{Mn} \leq 4 \%, & \text{Sn} \leq 2 \%, & \text{Pb} \leq 3 \%. \end{array}$$

Selon leur nature et leurs teneurs, ces additions améliorent les caractéristiques mécaniques, l'aptitude au frottement, la résistance à la corrosion, etc.

Les caractéristiques mécaniques des laitons sont fortement influencées par la teneur en zinc (et en éléments d'additions pour les laitons spéciaux), par l'érouissage et, à l'état recuit, par la grosseur du grain [4].

II.2.2.2 Les bronzes

Les bronzes sont essentiellement des alliages de cuivre et d'étain. Ils contiennent de 5 à 20% d'étain. Les additions les plus fréquentes sont :

- le zinc : 1 à 7%,
- le plomb : 3 à 7 % pour les usages généraux, jusqu'à 30 % pour les alliages de frottement,
- le phosphore : 0,01 à 0,5 %. provenant de l'excès utilisé pour la désoxydation et qui, aux plus fortes teneurs, améliore les propriétés de frottement.

En raison de leur excellente aptitude au moulage, les bronzes sont surtout des alliages de fonderie. Néanmoins, certaines nuances à moins de 10 % d'étain, sont utilisées à l'état corroyé sous forme de barres, tôles, bandes, rubans, fils et tubes [4].

II.3 Propriétés physiques et mécaniques du cuivre

Le cuivre Cu-al 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 $8,89.10^3$ et $8,92.10^3$ kg/m³ à 20°C (selon la teneur en oxygène) et une résistivité électrique variant entre 1,724 à 1,682 $\mu \Omega$.cm à 20°C. Les propriétés essentielles de ce matériau sont ses conductivités électrique (C) et thermique, qui sont particulièrement élevées (respectivement de l'ordre de 101 % IACS et de 391 W/ (m.K) à 20°C) ; cette dernière est très influencée par la teneur en oxygène. Le coefficient de dilatation linéaire (de 20° à 300°C) est de $17,6.10^{-6}$ K⁻¹, c'est-à-dire 50% plus important que l'acier. Les propriétés mécaniques dépendent surtout de l'écrouissage et de la pureté du matériau [5].

Les principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre sont résumées dans le tableau II.

Tableau II. Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre [5].

| Elément | | | | |
|---|-----------------|-------------|----------------------|----------------------|
| Cu (M = 63,54, Z = 29) | | | | |
| Propriétés physiques | | | | |
| Enthalpie de fusion | 211850 J/kg | | | |
| Température de fusion | 1065° à 1083°C | | | |
| Coefficient de dilatation (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹) | de -190° à 16°C | | 14 ,1 | |
| | de 25° à 100°C | | 16,8 | |
| | de 20° à 200°C | | 17,3 | |
| | de 20° à 300°C | | 17,7 | |
| Capacité thermique massique (en J/ (Kg.K)) | 20°C | | 386 | |
| | 100°C | | 393 | |
| | 200°C | | 403 | |
| | 900°C | | 528 | |
| Conductivité thermique (en W/(m.K)) | 20°C | | 400 | |
| | 100°C | | 385 | |
| | 200°C | | 381 | |
| | 300°C | | 377 | |
| Conductivité électrique (%IACS) | (état recuit) | 20°C | 100 à 102,5 | |
| | | 100°C | 76 | |
| | | 200°C | 58 | |
| | (état écroui) | 20°C | 97 | |
| Résistivité électrique ρ (en μΩ.cm) | (état recuit) | 20°C | 1,724 à 1,682 | |
| | | 100°C | 2,27 | |
| | | 200°C | 2,95 | |
| | (état écroui) | 20°C | 1,78 à 1,70 | |
| Propriétés mécaniques | | | | |
| Etat de livraison | Rp 0, 2 | Rm (MPa) | Allongement (A %) | Dureté Vickers HV |
| Recuit | 70 | 230 | 45 | 50 |
| ¼ dur | 190 | 270 | 25 | 80 |
| ½ dur | 250 | 300 | 14 | 100 |
| 4/4 dur | 320 | 350 | 6 | 110 |
| <i>L'état de recuit signifie 0% d'écrouissage</i> | | | | |
| <i>¼ dur : 10% d'écrouissage</i> | | | | |
| <i>½ dur : 25% d'écrouissage</i> | | | | |
| <i>4/4 dur : 50% d'écrouissage</i> | | | | |
| <i>Rp0,2 limite élastique à 0,2% d'allongement</i> | | | | |

II.4 Propriétés chimiques du cuivre

Le cuivre ne s'altère pas dans l'air sec à la température ambiante. Si on le chauffe, il s'oxyde, devient rouge brun (Cu_2O), puis noir (CuO). Cette oxydation se produit sans incandescence.

Il s'altère lentement dans l'acide chlorhydrique, est dissous rapidement dans l'acide nitrique et décompose l'acide sulfurique concentré et chaud.

Bien qu'il ne décompose pas l'eau, il se recouvre dans l'air humide, d'une couche imperméable de *vert-de-gris* qui le protège contre une corrosion éventuelle.

La fusibilité du cuivre est médiocre, il ne convient pas pour la fabrication d'objets moulés, car il se solidifie rapidement et donne une masse bulleuse.

C'est, après l'argent, le métal qui conduit le mieux la chaleur et l'électricité d'où son utilisation dans la confection de batteries de cuisine, chaudières à évaporer, cuves de brasseries, alambics, serpentins, fils et câbles pour lignes de transport d'énergie électrique...[3].

II.4.1 Le cuivre et l'oxygène

La solubilité de l'oxygène dans le cuivre est de 0,007% à 300°C et 0,01% à 950°C. Au dessus de la saturation il y a formation de Cu_2O , qui s'isole au joint de grains et diminue la forgeabilité. En faible teneur, il améliore la conductibilité électrique ; il est nécessaire pour l'obtention de lingots sans retassure. L'oxygène influence la solubilité de l'hydrogène ; l'expérience montre que le meilleur équilibre oxygène-hydrogène se situe aux environs de 0,00003% d'hydrogène et 0,045-0,055% d'oxygène. Lorsque l'on désire un minimum d'oxygène dans le cuivre, on désoxyde par perchage et l'on continue par incorporation d'éléments donnant des produits de réaction solides (phosphore, calcium, béryllium, etc.) [3].

II.4.2 Résistance à la corrosion

II.4.2.1 Caractéristiques de base

En général, les alliages à haute teneur en Cu ont une résistance à la corrosion analogue à celle du cuivre non allié qui présente une remarquable tenue dans de nombreux milieux corrosifs.

Le cuivre figure parmi les métaux les plus nobles, au sens thermodynamique, après les métaux précieux, comme l'indique le tableau III où sont reportés les potentiels d'oxydoréduction standard (E°) des principaux métaux [6] :

Tableau III. Potentiels d'équilibre standards mesurés par rapport à l'électrode à hydrogène [6].

| Métal | E° | Métal | E° |
|-----------|----------|-----------|----------|
| Magnésium | - 2,37 V | Etain | - 0,14 V |
| Aluminium | - 1,66 V | Plomb | -0,13 V |
| Titane | -1,63V | Hydrogène | 0V |
| Zinc | - 0,76 V | Antimoine | +0,15V |
| Chrome | - 0,74 V | Bismuth | + 0,31 V |
| Fer | - 0,45 V | Cuivre | + 0,34 V |
| Cadmium | - 0,40 V | Argent | + 0,80 V |
| Cobalt | - 0,28 V | Platine | +1,18V |
| Nickel | - 0,26 V | Or | + 1,69 V |

Dans les alliages, les éléments d'addition comme Ni, Al, Sn, As améliorent considérablement la *résistance* du *cuivre* à différents types de corrosion. D'autres comme Fe et Zn peuvent l'altérer ou l'améliorer suivant les cas.

Le tableau IV donne les vitesses de corrosion atmosphériques (corrosion sèche) du cuivre et de ses principaux alliages [6].

Tableau IV. Vitesse de corrosion du cuivre et de ses alliages en atmosphère sèche [6].

| Alliage | Vitesse (mg/dm ² /jour) | Alliage | Vitesse (mg/dm ² /jour) |
|-------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Cu-al/Cu-b1 | 0,31 | CuSn8P | 0,56 |
| CuA18 | 0,40 | CuNi20Zn5 | 0,60 |
| CuSi3Mn | 0,43 | CuNi29Sn1 | 0,62 |
| CuZn29Sn1 | 0,47 | CuZn3O | 0,71 |
| CuZn15 | 0,48 | CuZn22Al5Mn3Fe3 | 2,00 |

II.4.2.2 Fatigue sous corrosion

Le cuivre et les alliages cuivreux présentent une résistance à la fatigue sous corrosion peu différente de leur limite de fatigue dans l'air. Le tableau V ci-dessous donne les résultats d'essais comparatifs de résistance à la fatigue poursuivis jusqu'à 10 à 100 millions de cycles en eau douce et en eau salée [6].

Tableau V. Résistance à la fatigue sous corrosion du cuivre et de ses alliages [6].

| Alliage | Etat | Nombre de cycles ×10 ⁶ | Air R (MPa) | Eau douce R (Mpa) | Eau salée R (MPa) |
|--------------|--------|-----------------------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| Cu-b1 | Recuit | 100 | 70 | 70 | - |
| CuZn35 | Recuit | 50 | 120 | 85 | 85 |
| CuSn5 | Recuit | 12 | 140 | 140 | 140 |
| CuAl13Fe4Mn3 | Filé | 50 | 280 | 210 | 210 |
| CuAl10Ni5Fe5 | Forgé | 50 | 355 | - | 300 |
| | Coulé | 100 | 220 | 200 | 150 |
| CuNi20MnFe | Recuit | 50 | 125 | 125 | 125 |

Chapitre III

La déformation plastique à froid

III.1 Introduction

L'étude de la déformation plastique a sans doute eu pour origine le souci de maîtriser le formage et l'utilisation des matériaux, et dans un premier temps, des métaux. De ce fait, elle a été longtemps empirique et ce n'est que depuis quelques dizaines d'années qu'ont été élaborés les concepts nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques se produisant lors des écoulements plastiques [7].

III.2 Généralités

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux d'un point de vue macroscopique et phénoménologique, et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelée limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible ; si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau retrouve sa forme initiale. A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge: c'est la déformation plastique comme le montre la figure III.1 ci-dessous. La déformation plastique est donc irréversible. En général, elle est isochore: le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique [8].

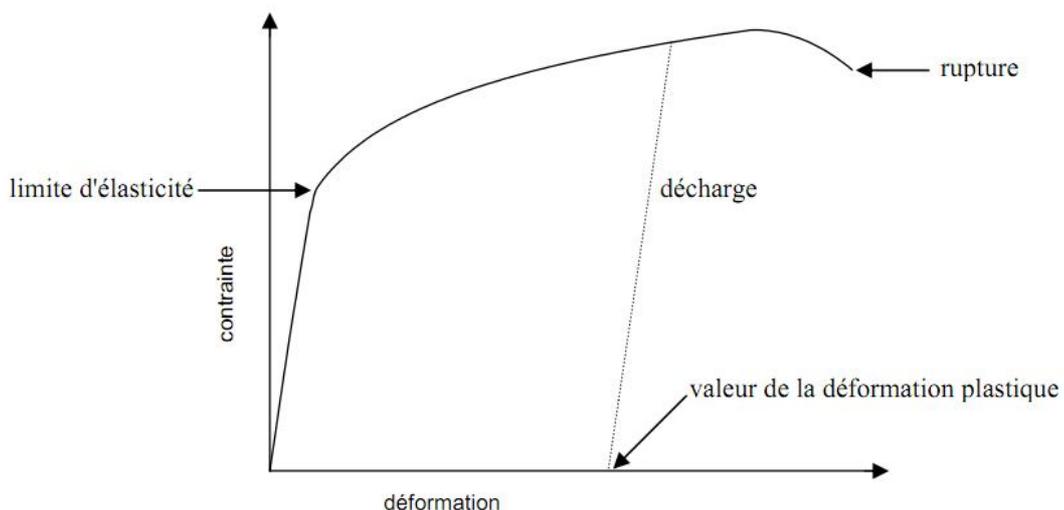


Figure III.1. Schéma d'une courbe de traction [8].

La déformation plastique à froid conduit à l'écroutissement du matériau, donc à son durcissement. Cet écroutissement dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et du mode de déformation. En effet, la déformation à froid entraîne une importante augmentation de la densité de dislocations dans le matériau, il s'en suit une augmentation de la dureté du matériau et une diminution de son allongement [9].

III.3 Dislocation et mécanismes associés

III.3.1 Définition

La déformation plastique des corps cristallins peut se produire grâce aux mouvements de défauts topologiques à une dimension qui sont les dislocations. Ces perturbations unidimensionnelles de l'arrangement des atomes permettent le glissement de plans cristallins : à l'image d'un tapis qu'on déplace par création puis propagation d'un pli (Figure III.2), il est énergétiquement plus favorable pour un cristal de se déformer en créant puis en propageant des dislocations en son sein. Un tel déplacement n'implique en effet à chaque étape que peu de liaisons interatomiques et nécessite donc moins d'effort qu'un glissement instantané et rigide d'une moitié du cristal sur l'autre [8].

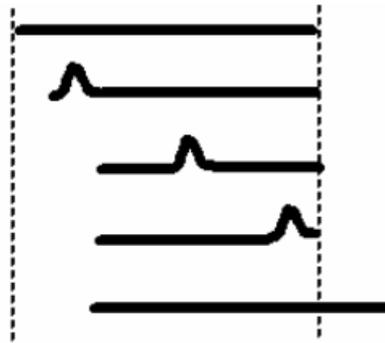


Figure III.2. La propagation d'un pli le long d'un tapis, analogue au mouvement d'une dislocation coin [8].

Les dislocations constituent en quelque sorte des vecteurs de la déformation plastique ; lorsqu'elles se déplacent, le cristal se déforme par cisaillement. La déformation élémentaire propagée lors du déplacement d'une dislocation peut être représentée par un vecteur b . Ce vecteur b est appelé vecteur de Burgers. On dit que la dislocation est coin si le vecteur de Burgers est perpendiculaire à la ligne de dislocation, qu'elle est vis s'il est parallèle et qu'elle est mixte dans les autres cas. La figure III.3 ci-dessous schématise le déplacement d'une dislocation coin et celle d'une dislocation vis dans un cristal [8].

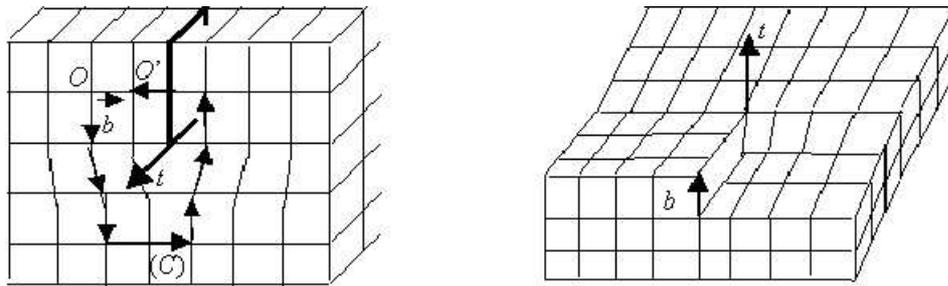


Figure III.3. Schématisation d'une dislocation vis et coin dans un cristal [10].

Lorsque la dislocation traverse le cristal de part en part, la partie inférieure de celui-ci glisse de la distance b par rapport à la partie supérieure. Ainsi, lorsqu'une dislocation traverse le cristal jusqu'à sa surface, elle y laisse une marche de hauteur b comme le montre la figure III.4 qui suit [8].

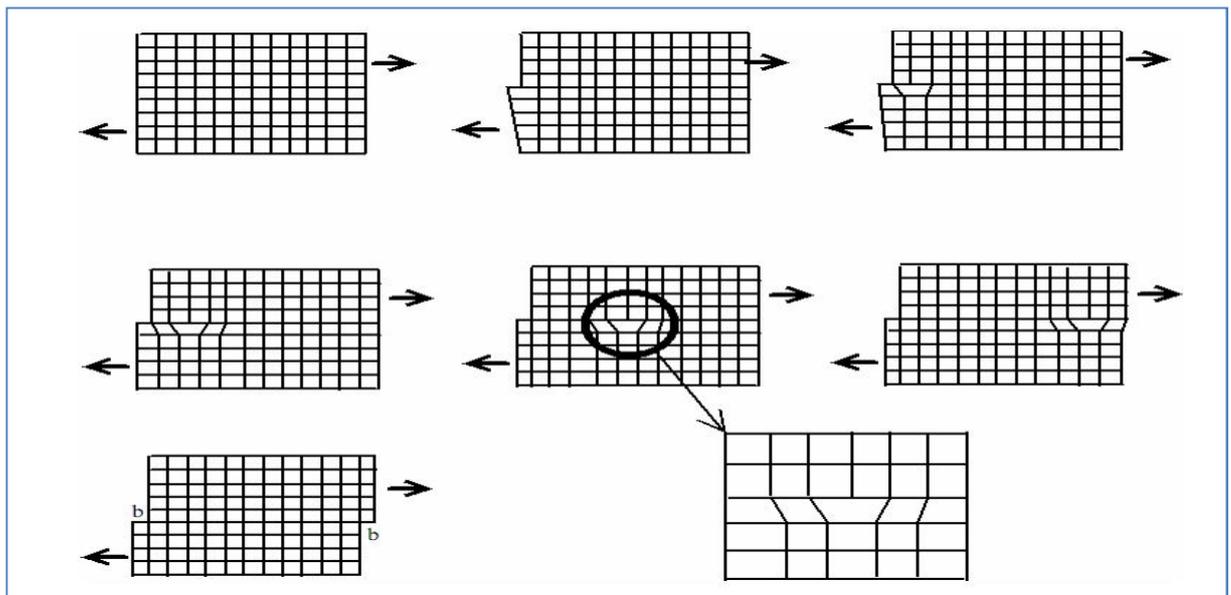


Figure III.4. Déplacement d'une dislocation coin dans un cristal [8].

La façon la plus utilisée pour déterminer le vecteur de Burgers est la convention FS/RH (Finish Start, Right Hand) (Figure III.5):

1. On choisit arbitrairement le sens de la ligne de dislocation \vec{t} (Figure III.5)
2. On réalise un circuit fermé (appelé circuit de Burgers) en tournant positivement autour de la dislocation (le pouce de la main droite orienté dans le sens de \vec{t} , les doigts montrent le sens positif du circuit, d'où l'appellation "right hand").
3. On reconstruit dans le cristal parfait, à partir d'un point S (START) le même circuit qu'en 2. Ce circuit présente un défaut de fermeture, le point F (Finish) est différent de S. Le vecteur \vec{FS} est le vecteur de Burgers \vec{b} [10].

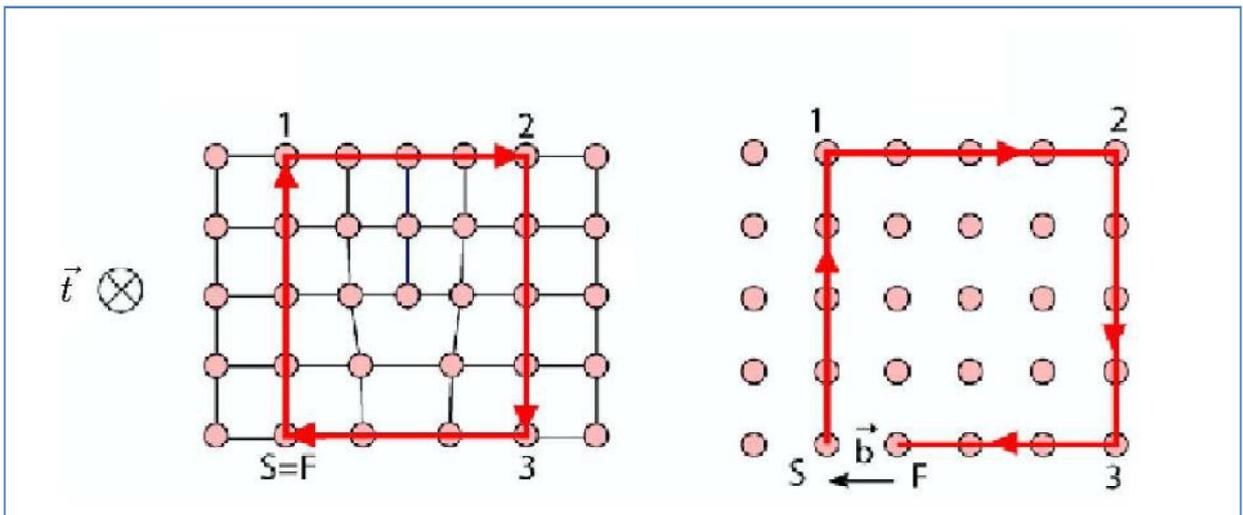


Figure III.5. Circuit de Burgers autour de la dislocation puis reproduit dans le cristal parfait [10].

III.3.2 Barrières de Peierls

D'une façon générale, le déplacement des dislocations au sein du réseau cristallin est conditionné par le franchissement de barrières d'énergie dites « barrières de Peierls ». Le réseau cristallin étant périodique, les atomes du réseau se trouvent initialement dans un état d'énergie minimum. Le passage d'une dislocation entraîne une modification locale de la position des atomes et donc une augmentation de leur état énergétique. Les atomes se retrouvent à nouveau dans leur état d'énergie minimum lorsque la dislocation s'est déplacée d'un vecteur de Burgers. Pendant son mouvement, l'énergie d'une dislocation passe par des maximums locaux. Il lui faut vaincre ces barrières d'énergie pour avancer. Par conséquent, on a un phénomène similaire au frottement. Cette force de frottement induite est appelée « force de Peierls » ou force de friction. De ce fait, lorsqu'un métal subit une déformation plastique, il s'échauffe.

Contrainte et agitation thermique se partagent le travail pour franchir ces « barrières de Peierls », l'énergie prélevée sur les vibrations thermiques du réseau étant d'autant plus faible que la contrainte locale est forte. A contrainte égale, la probabilité de franchissement d'une « barrière de Peierls » diminue donc avec la température. Par conséquent, le rôle de la friction de réseau sur la mobilité des dislocations sera d'autant plus marqué qu'on se trouvera loin du point de fusion [8].

III.3.3 Système de 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 ci-dessous présente quelques-uns des principaux systèmes de glissement observés [8].

Tableau VI. Principaux systèmes de glissement observés [8].

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

Le glissement est un mouvement conservatif, c'est-à-dire qu'il se fait sans transport de matière, donc sans nécessiter de diffusion. On vérifie facilement qu'il en est ainsi (figure III.6) en considérant le mouvement d'un segment de dislocation balayant une aire dA . Puisque la surface de coupure définissant la dislocation est arbitraire, on peut considérer que dA en fait partie. Si le vecteur de Burgers est contenu dans dA , c'est-à-dire si dA fait partie du cylindre de glissement, alors le déplacement des lèvres de la coupure est un glissement pur, n'entraînant pas de variation de volume [7].

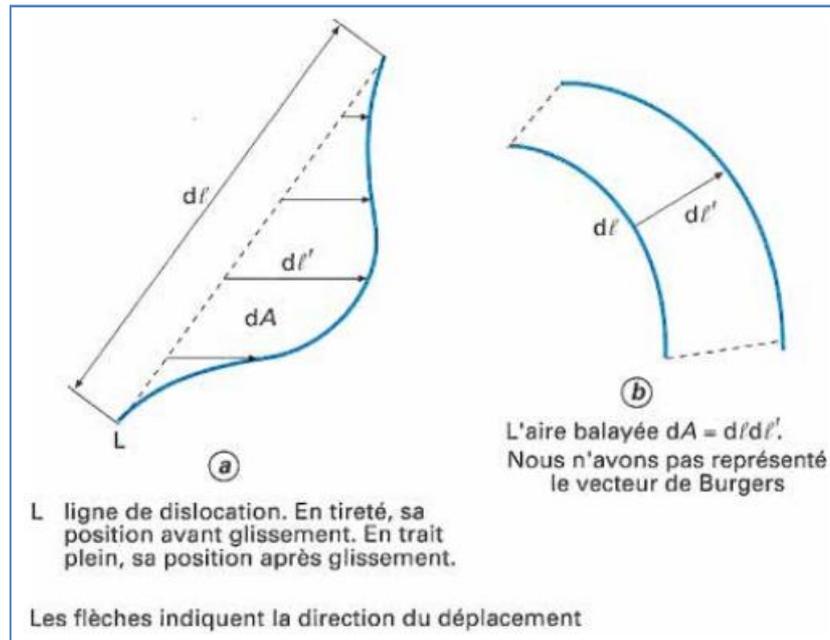


Figure III.6. Cylindre de glissement [7].

III.3.4 Maclage

Parfois, les matériaux cristallins réagissent au cisaillement auquel ils sont soumis par un mécanisme particulier, différent du glissement des dislocations, qui est le maclage. Ce dernier consiste en l'opération qui amène une partie du cristal à être cisailée entre deux plans qui vont former les interfaces avec la partie non déformée (figure III.7). Il s'agit là d'une opération qui requiert d'importantes concentrations de contraintes [8].

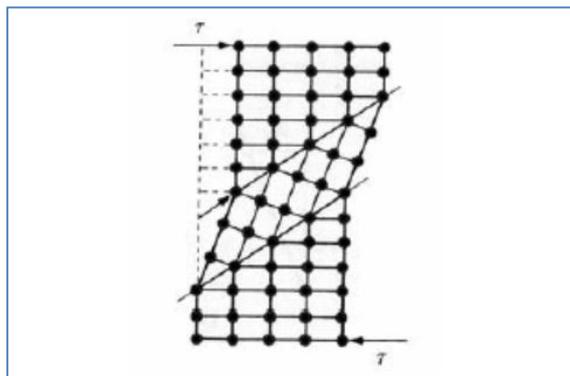


Figure III.7. Système de maclage [8].

Contrairement au phénomène de glissement qui produit des déplacements qui sont des multiples entiers de la distance interatomique; le maillage s'effectue avec des déplacements d'atomes inférieurs aux distances interatomiques. De plus, ce déplacement coordonné des atomes induit une désorientation cristallographique de la région maillée par rapport au reste du cristal. Cependant, les mécanismes de maillage peuvent aussi s'interpréter à partir du mouvement des dislocations, en considérant le déplacement de dislocations partielles. En changeant localement l'orientation du cristal, le maillage est susceptible d'autoriser l'activation de nouveaux systèmes de glissement. Par conséquent, l'importance du maillage sur la déformation totale est particulièrement marquée dans les matériaux où le nombre de systèmes de glissement est réduit, comme ceux de structure hexagonale compacte (HC) [7,8].

III.4 Mécanismes de la déformation plastique dans les poly cristaux

Les poly cristaux sont constitués par des agrégats de grains cristallisés orientés différemment et limités par des joints de grains de formes irrégulières.

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 maillage mécanique. Le déclenchement d'un mécanisme ou de l'autre dépend de l'énergie de faute d'empilement γ_{SFE} du matériau.

Dans les matériaux de structure C.F.C comme le cas du cuivre, la déformation plastique à froid s'effectue essentiellement par glissement des dislocations parfaites sur les plans denses $\{111\}$ (nombre d'atomes par unité de surface plus élevé) et dans les directions denses $\langle 110 \rangle$ (distance interatomique la plus courte). Ces plans et ces directions sont les plus denses du système cubique à faces centrées dans lequel cristallise le cuivre. Ce mécanisme est majoritaire dans les matériaux à forte et moyenne énergie de faute d'empilement (aluminium $\gamma_{SFE} \sim 170 \text{ mJ.m}^{-2}$, cuivre $\gamma_{SFE} \sim 80 \text{ mJ.m}^{-2}$). Quant au maillage, il peut constituer un deuxième mode de déformation dans certains cas où il intervient après une déformation par glissement.

Pour les matériaux à faible γ_{SFE} (argent $\gamma_{SFE} \sim 27 \text{ mJ.m}^{-2}$), c'est le maillage mécanique qui intervient (sur des plans $\{111\}$ juxtaposés) surtout à basse température [11,12].

Chapitre IV

Les changements structuraux pendant la
déformation et leur influence sur les
propriétés électriques

IV.1 La Résistance et la résistivité électrique

Le courant électrique dans un fil conducteur consiste en l'écoulement de charges électriques. Par convention, le sens du courant est le sens de déplacement de charges positives. L'intensité I du courant électrique est définie comme la charge électrique passant par unité de temps à travers une section du fil. Elle est mesurée en ampères (A).

Le potentiel électrique U en un point est, par définition, l'énergie potentielle électrique d'une charge unité en ce point. Le potentiel électrique se mesure en volts (V).

Une des premières découvertes expérimentales sur le courant électrique dans les fils conducteurs fut la *loi d'Ohm* (relation (1)) [13].

$$\Delta U = R I \quad (1)$$

Où ΔU est la différence de potentiel entre les extrémités du fil et R , exprimée en ohms (Ω), est la résistance du fil. Etant donné un fil conducteur maintenu à température constante, la résistance R ne dépend pas du courant qui y circule.

La figure IV.1 représente un élément conducteur de section S et de longueur L .

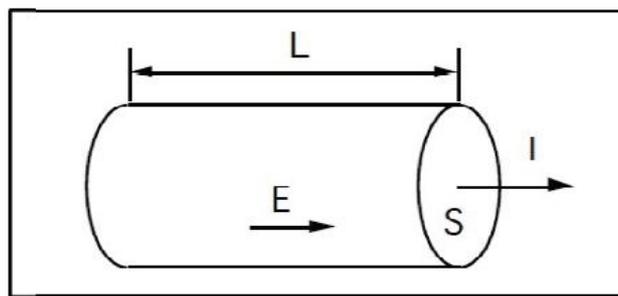


Figure IV.1. Élément conducteur de section S et de longueur L [13].

La résistance du fil conducteur est fonction de sa longueur L et de sa section S selon la formule (2) ci-dessous:

$$R = \rho L / S \quad (2)$$

La constante ρ apparaissant dans (2) est appelée *résistivité*; ρ est une caractéristique intrinsèque du matériau conducteur. La résistivité s'exprime en ohmmètre [$\Omega.m$].

Elle varie de $1,7.10^{-8} \Omega.m$ pour un très bon conducteur (cuivre), à $10^{16} \Omega.m$ pour un bon isolant (quartz) à température ambiante.

Abordons maintenant succinctement l'étude du courant électrique au niveau microscopique. Appliquer une différence de potentiel ΔU entre les extrémités du fil revient à créer un champ électrique d'intensité E constante donnée par la relation (3) [13]:

$$E = \Delta U / l \quad (3)$$

IV.2 Influence de l'état physique du matériau sur la résistivité

IV.2.1 Restauration.

Le phénomène de restauration est défini comme étant un processus qui permet l'annihilation progressive de défauts de structure provoqués par l'écrouissage. Elle est effectuée à une température inférieure à celle de la recristallisation ($0,2$ à $0,3T_f$) [14].

IV.2.1.1 polygonisation :

Au cours du processus d'élimination des dislocations de signes contraires, seules les dislocations de même signe vont demeurer avec une répartition homogène, ensuite dans un stade de plus haute température, ces dislocations se réarrangent en parois normales à leurs vecteurs de Burgers (normales aux plans de glissements), et le cristal sera alors formé de petits blocs légèrement désorientés, les sens par rapport aux autres. Ce processus s'effectue par glissement et montée, qui porte le nom de polygonisation (Figure IV.2).

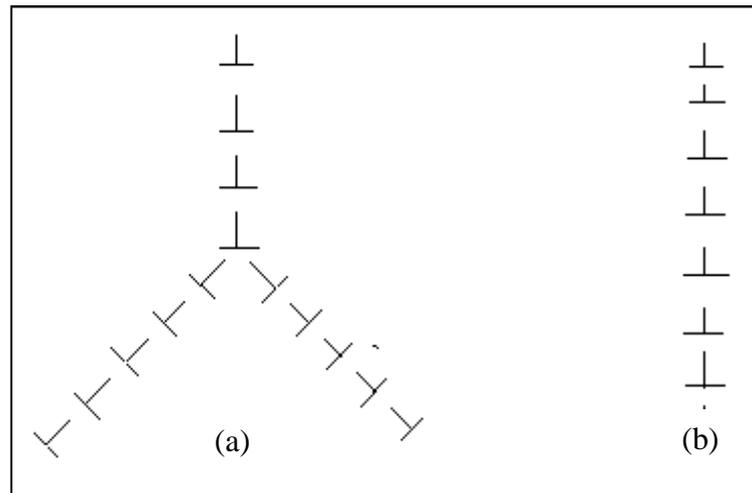


Figure IV.2. Coalescence de sous joints [14].

Dans un stade final de la polygonisation, la dimension des sous-blocs augmente par coalescence de deux ou plusieurs parois, ceci est particulièrement le cas de configuration de parois en Y (Figure IV.2), ou l'énergie de la paroi finale (b) est plus faible que celle des parois en Y (a).

Le processus de polygonisation se produit à une température supérieure à celle de la restauration, mais inférieure à la température de la recristallisation. Au cours de ce processus, on peut constater, dans certains métaux, la modification des propriétés physiques et mécaniques, de ce fait on distingue deux catégories de métaux :

- Les métaux à faible ou moyenne énergie de défauts d'empilements ; les dislocations ne montent pas facilement : les propriétés mécaniques n'évoluent qu'au cours de la recristallisation. C'est le cas de nombreux métaux et notamment le cuivre.
- Les métaux à forte énergie de défauts, ou le réarrangement des dislocations est facile, d'où modification notable des propriétés mécaniques avant la recristallisation, c'est le cas de certains métaux comme l'aluminium [14].

IV.2.1.2 restauration de la résistivité électrique

L'écroutissage introduit des défauts ponctuels et des dislocations ; Parallèlement, au cours du phénomène de restauration, on observe une diminution de la résistivité électrique (Figure IV.3) qui est presque entièrement restaurée [15].

En gros, quand la température s'élève, on observe la diminution de la résistivité en plusieurs stades attribuables à la migration et à l'élimination des lacunes, et pour le stade des plus hautes températures, à la réduction de la densité des dislocations au cours de la recristallisation [16].

IV.2.1.3 Restauration des propriétés mécaniques

L'évolution des propriétés mécaniques au cours du chauffage dépend essentiellement du comportement des dislocations, autrement dit, elle est liée à l'énergie des défauts d'empilement, par conséquent l'existence de deux catégories de métaux :

- Les métaux dont l'évolution des caractéristiques mécaniques n'est notable qu'à partir de la température de recristallisation (relativement élevée) : cas du cuivre (Figure IV.3).
- Les métaux dont le changement des propriétés mécaniques est remarquable avant la recristallisation, c'est le cas de l'aluminium [14].

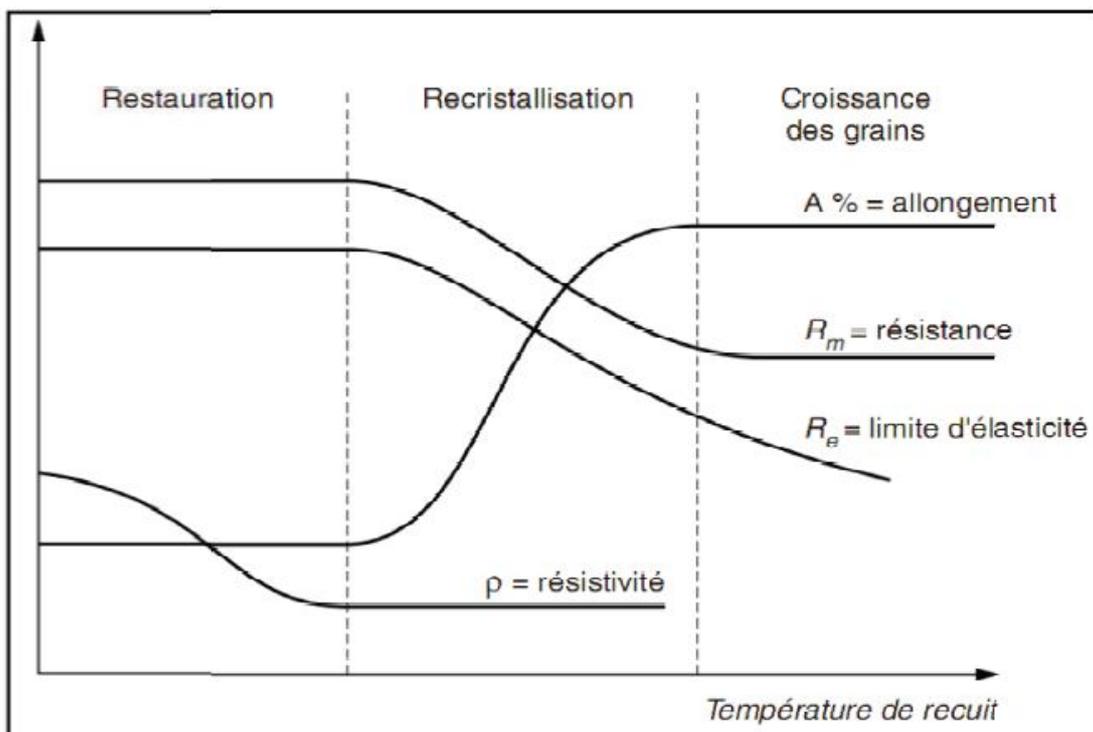


Figure IV.3. Évolution des propriétés du cuivre lors de la restauration et de la recristallisation [15].

IV.2.2 Recristallisation

La recristallisation est caractérisée par le développement de nouveaux grains au départ d'une matrice se trouvant dans un état structural moins parfait. Les conditions de chauffage et de maintien en température sont déterminées en fonction de la composition de l'alliage et du taux d'écroutissage. Les impuretés et les éléments d'addition ont pour effet d'augmenter la température de recristallisation tout en diminuant la mobilité des nouveaux joints des grains [13].

Cette transformation est accompagnée d'une diminution importante de R_m et R_e et d'une augmentation de l'allongement $A\%$ comme le montre la Figure IV.3. La recristallisation est précédée par la formation de nouveaux grains par germination et croissance dans un métal écroui [15].

IV.2.2.1 Recristallisation primaire

La recristallisation primaire résulte de la formation et de la croissance des germes de nouveaux cristaux qui dépend d'une matrice qui est dans un état structural moins parfait.

Les germes apparaissent avec une orientation différente de celle de la matrice où ils sont nés ; ils croissent progressivement au dépend des anciens grains déformés, jusqu'à ce qu'ils arrivent au contact les uns des autres, et à ce stade, la recristallisation primaire proprement dite est achevée [14].

IV.2.2.1.1 Lois de la recristallisation primaire

La recristallisation primaire obéit à plusieurs lois, qui se résument en :

- a- Un écrouissage minimal est nécessaire pour que la recristallisation se produise, il est dit « écrouissage critique ». Cet écrouissage critique est généralement très faible, de l'ordre de quelques pourcents.
- b- La température de recristallisation est d'autant plus élevée que la déformation est faible, cette première pourra être définie comme étant la température minimale à partir de laquelle la recristallisation se produit en un temps donné.
- c- Pour un même taux déformation, la température de recristallisation est d'autant plus basse que le temps de maintien est plus long.
- d- La température de recristallisation est d'autant plus basse que la pureté du métal est élevée.
- e- Les courbes de cinétique de recristallisation commencent par une droite constante qui caractérise la période d'incubation, comme montré dans la figure IV.4. La vitesse de recristallisation est caractérisée par la fraction recristallisée par unité de temps [14].

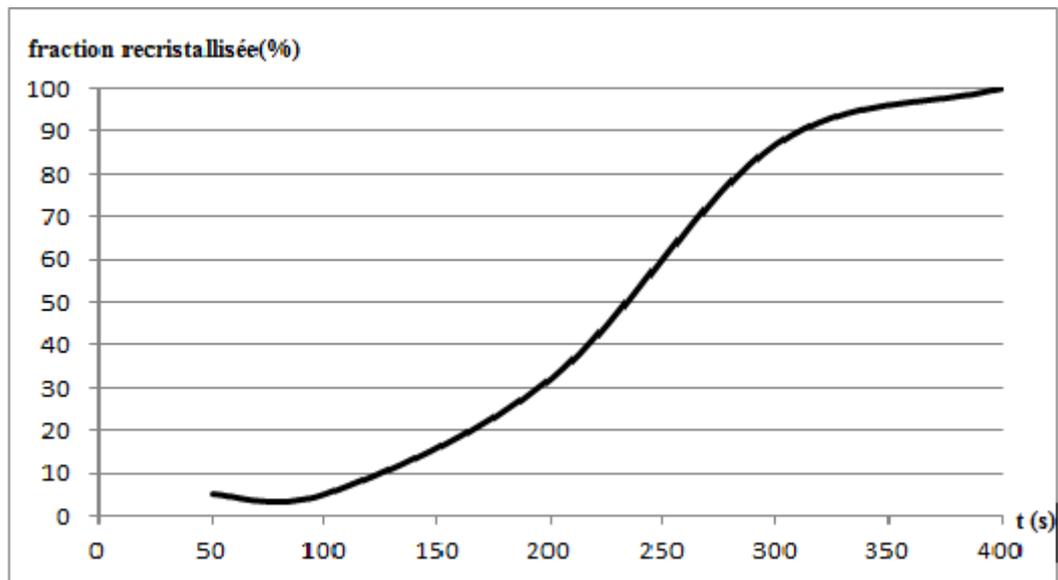


Figure IV.4. Cinétique de recristallisation du cuivre à 450°C après une déformation par laminage [14].

IV.2.2.1.2. Température de recristallisation :

La température de recristallisation est malaisée à préciser, car elle est influencée par plusieurs facteurs notamment : le degré de pureté, la durée de maintien et le degré d'écroutissage.

Elle n'est pas rigoureusement définie pour chaque métal ou alliage. Le recuit peut s'effectuer dans un domaine plus ou moins grand de température, ayant pour limite inférieure la température de recristallisation, et pour limite supérieure la température donnant la grosseur du grain désirée.

Dans le cas général, la température de recuit de recristallisation est donnée par :

$$T_r = 0,4 \text{ à } 0,5 T_f$$

Où : T_r la température de recuit de recristallisation.

T_f la température de fusion du métal ou alliage [14].

IV.2.2.2. Recristallisation secondaire :

Lorsqu'on poursuit le recuit après recristallisation totale, cette dernière est suivie d'un remaniement de la structure, au cours duquel, certains grains grossissent au dépend d'autres qui disparaissent. Le métal recristallisé possède donc un excès d'énergie sous forme de joints de grains, et la force motrice est alors l'énergie interfaciale des joints.

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, ceux-ci atteignent alors une taille moyenne d'équilibre qui est fonction de plusieurs paramètres dont les principaux sont

- a- La pureté du métal : les inclusions finement disséminées telles que les oxydes modifient la cinétique de grossissement du grain. Si leur répartition n'est pas uniforme, la taille finale du grain peut être hétérogène.
- b- La température de recuit : c'est le facteur le plus important. Pour un métal, dans des conditions d'écroutissage déterminées, le grain grossit d'autant plus vite que la température est élevée.
- c- Le taux d'écroutissage : ce paramètre intervient indirectement, en affinant d'abord le grain de recristallisation de manière qu'après grossissement dans des conditions déterminées (température et temps de recuit). Le grain est encore d'autant plus fin que l'écroutissage est plus fort.
- d- La durée de maintien : la majeure partie du grossissement du grain s'effectue assez rapidement (dans les premières minutes), et le phénomène n'évolue ensuite que très lentement. Les longues durées de maintien donnent néanmoins des grains sensiblement plus gros [14].

Chapitre V

Le tréfilage

V.1 Introduction

De nos jours, le tréfilage reste un procédé très important dans l'industrie. Ce procédé de mise en forme est utilisé pour la fabrication de fils métalliques, il consiste en la diminution du diamètre des fils par une, ou plusieurs passes de réduction jusqu'à l'obtention de la section désirée. Par ailleurs, le tréfilage a été par le passé, et continue d'être le sujet de plusieurs recherches qui ont pour but l'amélioration des caractéristiques mécaniques et électriques des fils [17,18].

Le principe du tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil ». Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant à faire passer le métal à travers un orifice calibré, appelé « filière », sous l'action d'une traction continue [19].

V.2 Définition

En tant que procédés, le tréfilage et l'étirage sont comparables. Ils consistent à déformer une ébauche au travers d'une filière et font appel au même mode de déformation plastique. Le tréfilage est plus spécifique aux fils, l'étirage aux tubes et aux barres [13,20].

La figure V.1 ci-dessous montre le principe général du fonctionnement du tréfilage.

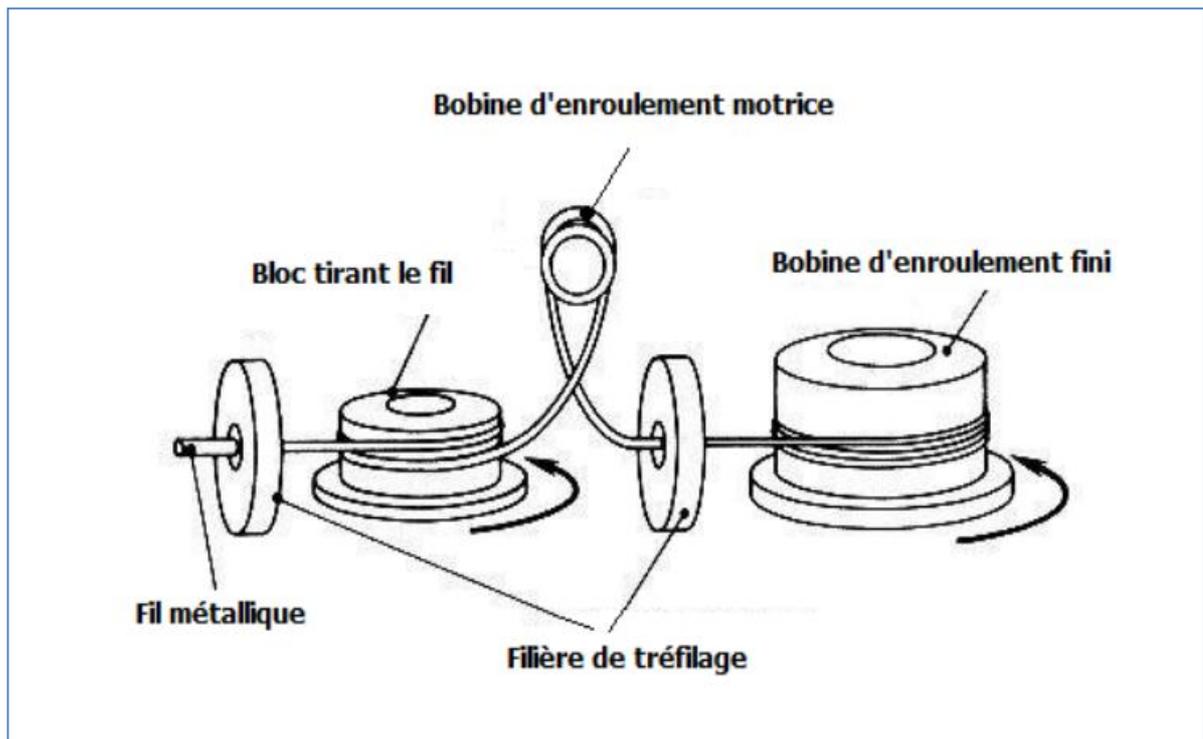


Figure V.1. Principe du tréfilage [3].

Le tréfilage comme l'étirage peuvent avoir plusieurs objectifs :

- réduire à des dimensions plus faibles une ébauche filée ou laminée ; en effet, le filage ou le procédé CLC (Coulée et Laminage Continu) ne permettent pas d'obtenir directement de petits fils, de petites barres ou des tubes à parois minces ;
- calibrer des produits filés de manière à réaliser des tolérances dimensionnelles plus étroites que celles possibles par filage ;
- augmenter les caractéristiques mécaniques des ébauches obtenues à chaud.

Les demi-produits obtenus par tréfilage sont destinés à des applications électriques et mécaniques. Dans les applications électriques on trouve les câbles nus de transport d'énergie, les câbles isolés de distribution d'énergie ainsi que des câbles souples et de la filerie domestique. Les applications mécaniques regroupent des produits aussi variés que les rivets civils et aéronautiques, les aiguilles à tricoter ou le fil de soudure. La palette des produits y est très large [20].

V.3 Fil machine

Le tréfilage utilise comme produit de départ le fil machine qui est défini comme un produit de section pleine, laminé sur un train approprié et enroulé à chaud en couronnes à spires non rangées. La forme de la section peut être circulaire, carrée, hexagonale, octogonale, demi-ronde, rectangulaire ou autre.

La forme la plus couramment utilisée est la forme circulaire dans les diamètres varient entre 5,5 et 30 mm [19].

V.4 Les machines et outils utilisés

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

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

V.4.1 Machine simples

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

— **les organes d'entraînement** (moteur, boîtes de vitesses) ;

— **les bobines d'enroulement** : servant de cabestan pour la traction du fil à travers la filière, comportant en général à leur base une zone appelée chasse dont le profil est tel que chaque nouvelle spire chasse la précédente pour prendre sa place au cours de l'enroulement et permette ainsi une bonne accumulation des diverses spires en vue d'un dévidage ultérieur correct ; tout en faisant diminuer progressivement la contrainte de traction du fil ;

— **les supports de filières** ou **mandrins** précédés, dans le cas des tréfilages à sec, d'un réservoir de lubrifiant (par exemple : stéarate) que le fil traverse pour l'entraîner vers la filière ; des dispositifs de refroidissement énergétique de la filière sont prévus sur ces supports [19].

Pour ce qui est des machines simples, c'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction (35% au maximum). Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception comme schématisée dans la figure V.2 [13].

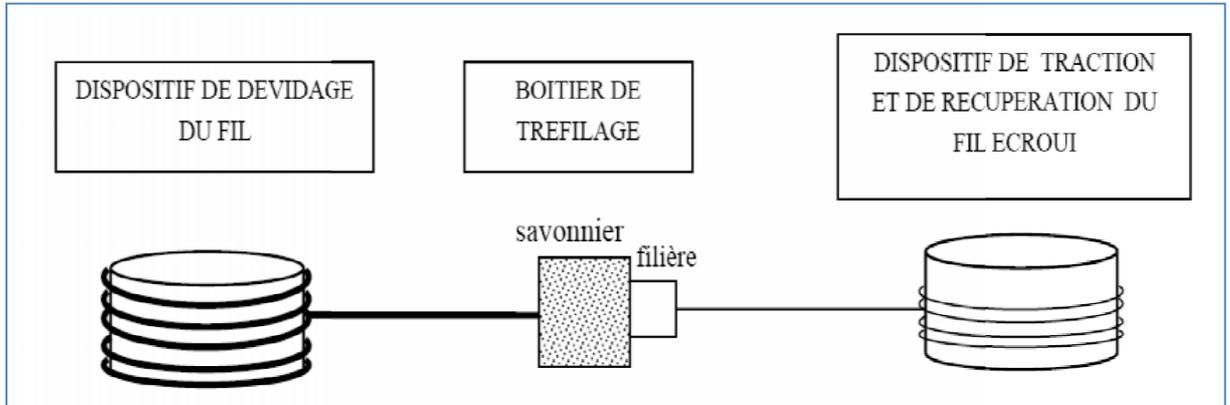


Figure V.2. Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple [13].

V.4.1.1 Dévidoir

La matière première, c'est-à-dire le fil machine, est présenté sous forme de bobines ou plus rarement de fils enroulés dans des octabins (cartons octogonaux sur palette dans lesquels on enroule les fils avec un diamètre de 1 m) à l'entrée de la ligne d'extrusion. La première fonction des dévidoirs est de permettre une alimentation continue de la ligne en conducteur, fil ou câble. Selon les applications, on utilise des dévidoirs différents (figure V.3).

Dans le cas de la fibre optique ou de fils sensibles mécaniquement, chaque dévidoir est constitué d'un axe perpendiculaire au sens de la ligne sur lequel est fixée une bobine. Le fil étant fragile, l'axe est entraîné en rotation par un moteur (en général à courant alternatif), dont la vitesse est réglée par un pantin pneumatique permettant d'assurer une tension constante. [21]

Pour un fonctionnement régulier de l'ensemble du tréfilage, diverses dispositions ingénieuses sont utilisées, dans le but :

- de faciliter la manutention ;
- d'éviter l'emmêlement des fils et leur rupture ;
- d'obtenir l'arrêt immédiat de la machine dans le cas d'emmêlement et pour la sécurité de l'opérateur.

Suivant la place dont dispose l'atelier, les dévidoirs sont :

- à axe horizontal ;
- à axe vertical, ce dernier système imposant des galets de renvoi qui pratiquent un décalaminage préalable [19].

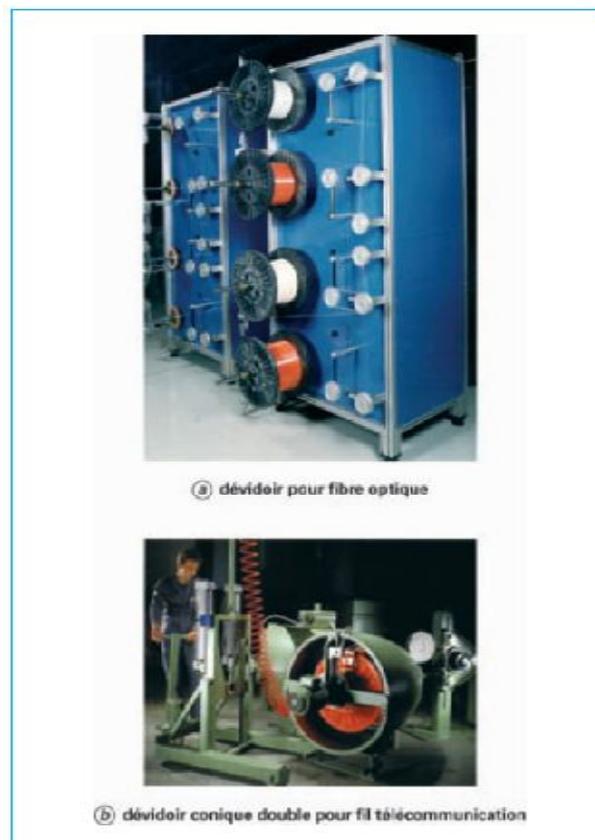


Figure V.3. Dévidoirs [19].

Pour la production de câbles de section plus importante, le dévidoir est parfois conique. La bobine est fixe à l'intérieur d'un cône. Le fil sort de ce cône à la défilée, par son extrémité la plus petite. L'avantage de ce système est la possibilité de production en continu à coût réduit [21].

V.4.1.2 Filières

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théoriques ou expérimentaux. Elles sont généralement en carbure de tungstène, tout au moins pour la portée de travail. Elles peuvent aussi être éventuellement en diamant, ou en céramique [20,22].

La surface intérieure des filières (figure V.4) est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrices généralement rectilignes :

- le cône d'entrée, qui permet l'entraînement du lubrifiant ayant un angle entre 18° et 20° ;
- le cône de travail D ayant un angle compris entre 6° et 14° ;
- portée cylindrique, dont la longueur est comprise entre $1/3$ et $1/2$ du diamètre à obtenir ;
- cône de sortie ou chanfrein de dégagement [19].

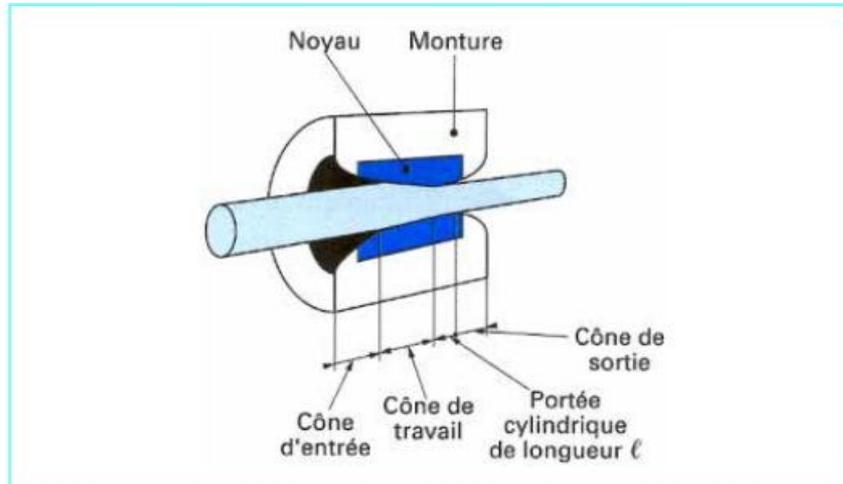


Figure V.4. Profil d'une filière [19].

La forme de la partie active de la filière composée du cône de travail (ou cône d'étirage) peut varier suivant plusieurs facteurs comme la nature et l'état du métal à tréfiler ou le taux de réduction de section [19].

V.4.1.3 Mandrins

Ils sont assortis aux filières et au produit à étirer (tableau VII):

- mandrin flottant utilisé essentiellement pour l'étirage des tubes en couronne (figure V.5c) ;
- mandrin long permettant un taux d'écroissage important, trois fois supérieur à un mandrin court mais nécessitant une opération de dé mandrinage (retrait du mandrin de l'intérieur du tube, qui oblige généralement à gonfler le tube) ;
- mandrin fixe à longue portée permettant d'obtenir des tolérances dimensionnelles très serrées ;
- mandrin fixe de forme *poire* assurant un aspect de surface intérieur très brillant (figure V.5b) [20].

Tableau VII. Association filière – mandrin [20].

| Mandrin | Filière | | |
|----------------------|---|---|---|
| | Parabolique | Conique à angle 28° | Conique à angle 10° |
| Long | Aspect de surface extérieur brillant Écroissage très important | | Déconseillé Aspect de surface défectueux |
| Flottant | | Étirage de tubes en couronne | |
| Fixe à longue portée | Aspect de surface extérieur brillant | Respect des tolérances dimensionnelles serrées | |
| Fixe de forme poire | Déconseillé Non-respect des tolérances dimensionnelles | Aspect de surface intérieur brillant | |
| Sans | Déconseillé Destruction de l'aspect de surface intérieur | Déconseillé Destruction de l'aspect de surface intérieur | Réduction des diamètres sans réduction d'épaisseur |

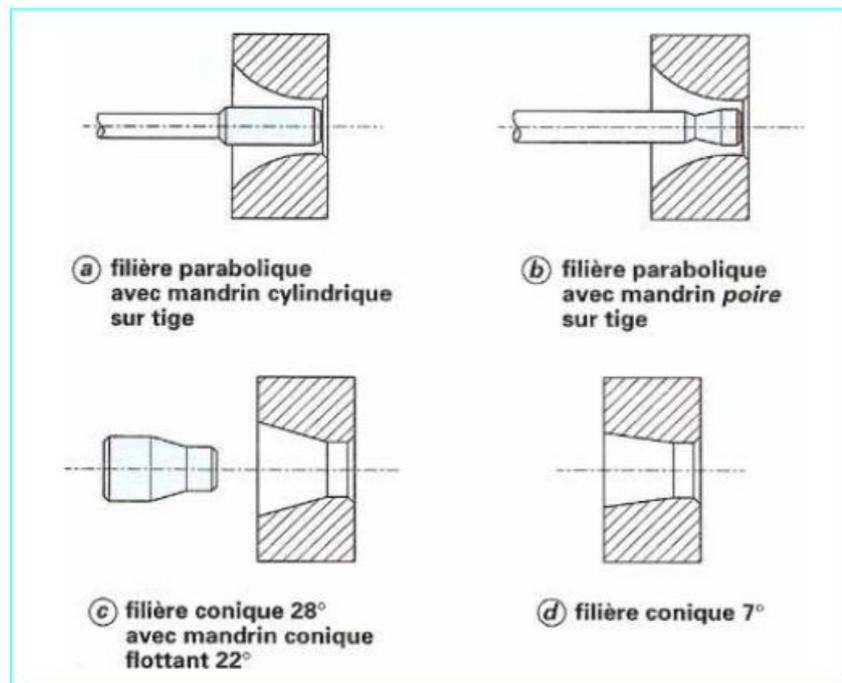


Figure V.5. Outillage pour tréfilage [20].

Il est également possible d'étirer sans mandrin, c'est-à-dire à creux, ce qui permet de réduire le diamètre sans trop changer l'épaisseur, mais cela au détriment de la surface intérieure qui a une tendance à plisser longitudinalement.

Il est possible aussi d'étirer avec deux filières, la première filière étirant à creux. Cette technique permet d'obtenir en une seule passe un très bel aspect de surface extérieur et un respect des tolérances serrées. Il faut cependant s'assurer du parfait alignement des deux filières [20].

V.4.1.4 Lubrifiants

L'utilisation d'un lubrifiant est capitale au cours du procédé pour limiter le frottement et l'usure. Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil [22].

En général, pour les gros et moyens diamètres, ce sont des savons qui sont utilisés (tréfilage à sec) : il s'agit de corps pulvérulents composés d'une matière grasse (sel métalliques d'acides gras) et de charges minérales. Le rôle de ces lubrifiants est de former un film suffisamment épais sur le fil de manière à éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface. Ils permettent ainsi des réductions successives [23].

V.4.2 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).

On distingue trois types de machines multiples.

- **Machines continues** ou à passage direct (figure V.6) dans lesquelles les vitesses des bobines sont automatiquement équilibrées de façon que chacune débite la quantité de fil nécessaire à la suivante. Chaque bobine se comporte comme une bobine simple sans qu'il y ait glissement du fil par rapport à la bobine. Sur chacune, un certain nombre de tours de fil est empilé à l'enfilage, ce qui permet le refroidissement du fil entre chaque passe [19].

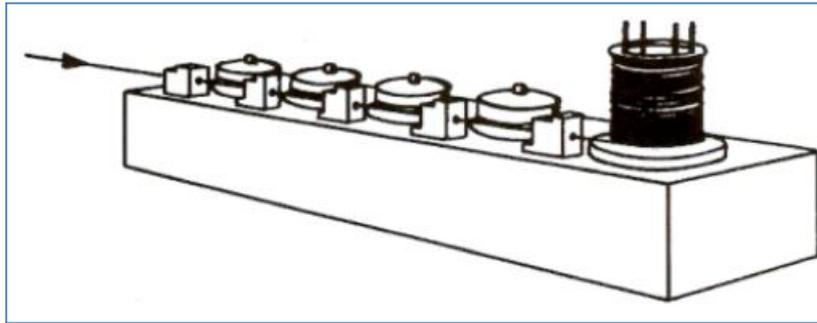


Figure V.6. Machine multiple continue [19].

- **Machines à accumulation** (figure V.7) : dans ces machines, il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Les séries de filières, ou 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 chaque bobine. Cette accumulation de fil permet :

- de refroidir le fil ;
- de ne pas interrompre la production des bobines aval dans le cas d'un arrêt des bobines amont.

Le dispositif classique provoquant une torsion du fil au cours de son dévidage de la bobine amont (figure V.8a), des modifications ont été apportées pour obtenir un dévidage sans torsion (figure V.8b) qui a, par ailleurs, l'avantage d'augmenter la quantité de fil accumulée et donc d'accroître la possibilité de refroidissement [19].

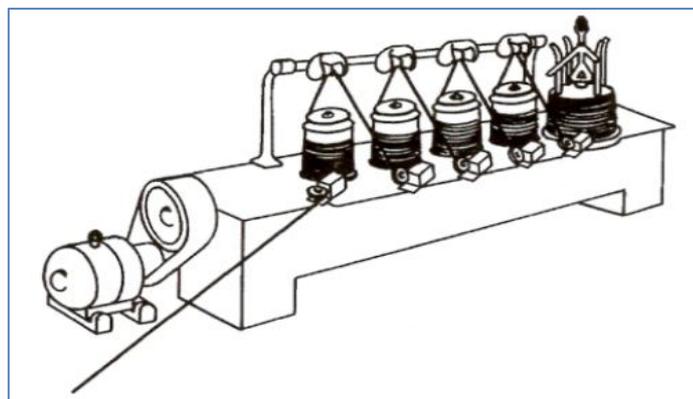


Figure V.7. Machine multiple à accumulation [19].

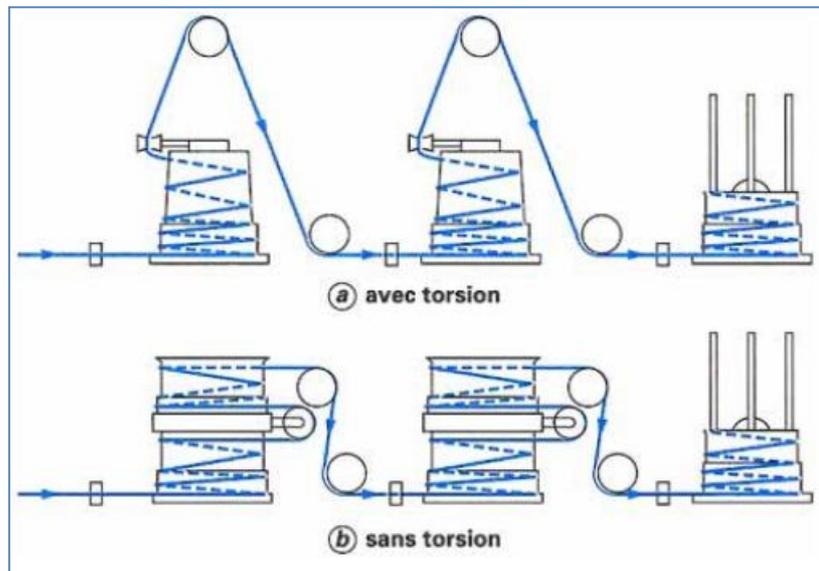


Figure V.8. Dispositif d'accumulation du fil [19].

- **Machines à glissement** (figure V.9) : dans ces machines, il n'y a ni équilibrage des vitesses entre les passes ni accumulation. Pour compenser les différences de vitesses, il y a un léger glissement du fil sur les bobines. Ce type de machine est surtout utilisé pour les tréfilages dits humides ou immergés (de fils fins $\varnothing < 1$ mm) l'ensemble bobine et filière étant arrosé ou immergé dans le liquide lubrifiant qui joue le rôle d'élément de refroidissement du fil [19].

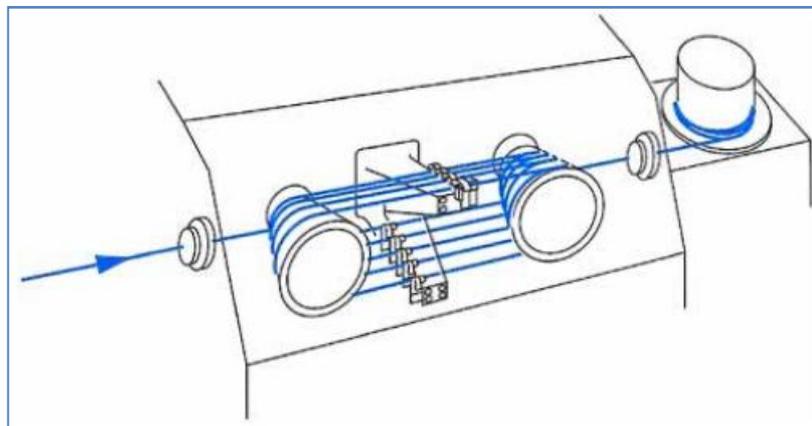


Figure V.9. Machine multiple à glissement (à cône) [19].

V.5 Paramètres du tréfilage

L'identification et l'analyse des principaux facteurs intervenant lors du tréfilage sont nécessaires si l'on veut optimiser l'opération du tréfilage. Ces paramètres influent surtout sur le phénomène d'usure des filières [24].

V.5.1 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} . En partant du modèle de borne supérieure d'Avitzur on peut obtenir une expression approchée de la vitesse de déformation au point de contact du fil avec la filière en fin de la zone de travail ; qui est donnée par la relation (4) [25] :

$$\dot{\varepsilon} \approx 2 V_e \frac{r_e^2}{r_s^3} \sin \alpha \quad (4)$$

Les paramètres de l'équation (4) sont définis sur la figure V.10

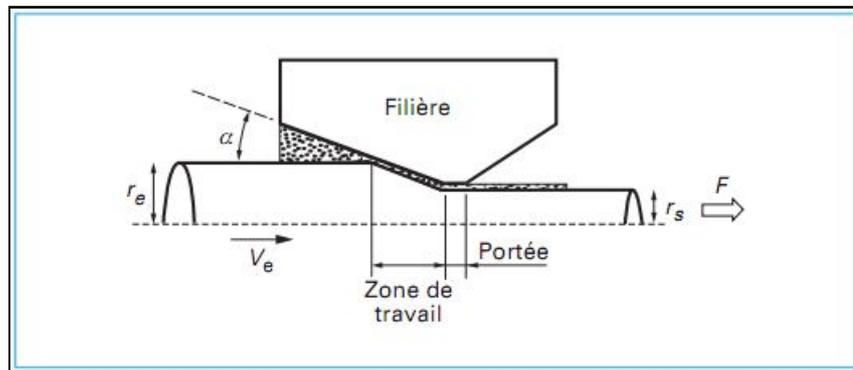


Figure V.10. Passage d'un fil dans une filière [25].

V.5.2 Force de tréfilage

Le fil est tiré au travers de la filière par une force de traction. L'écoulement plastique du métal est rendu possible par l'action combinée de la traction axiale et de la compression radiale imposée par la filière. A l'interface fil-filière, s'exerce en plus de la pression latérale imposée par la filière, un cisaillement fonction des conditions de frottement. 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 [22].

À défaut de solution mathématique rigoureuse, des formules ont été établies, donnant des valeurs approchées des forces nécessaires au tréfilage. Ces formules cumulent :

- l'effort principal de déformation ;
- l'effort de frottement sur la paroi ;
- les pertes par cisaillement interne dues à l'inclinaison provisoire des fibres du métal lors de son passage à travers la filière.

Le contact lubrifié fil-filière, se traduit par un cisaillement, représenté par un coefficient de frottement (μ). Le fil est caractérisé, par sa contrainte d'écoulement plastique (σ_0) et les diamètres d'entrée (D_0) et de sortie (D_1). Différents modèles ont été proposés pour évaluer l'effort de tréfilage à appliquer (F), pour tirer le fil à travers la filière. Les modèles de Siebel et Bonzel (équation (5)), donnent la contrainte de tréfilage (σ) en fonction de la déformation appliquée ε [26].

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

La figure V.11 ci-dessous montre les forces en présence pendant le tréfilage.

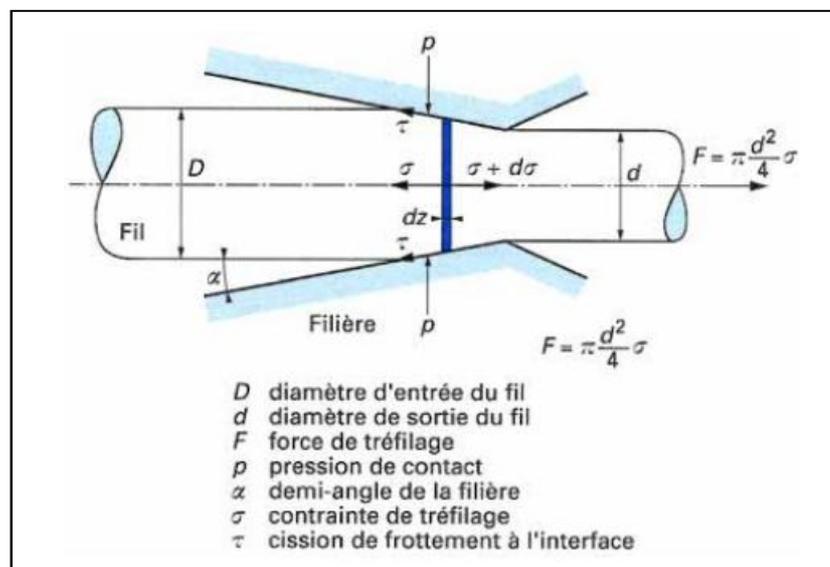


Figure V.11. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [26].

La force de tréfilage F est obtenue par multiplication de σ par l'aire de la section finale du fil S (équation (6)) [26].

$$\mathbf{F = s \sigma} \quad (6)$$

La formule permet d'estimer la force et la puissance de tréfilage, si l'on se donne la vitesse de tréfilage, et ainsi la conception des tréfileuses [19].

V.5.3 Frottements

Contrairement à d'autres procédés où il est moteur, le frottement est un phénomène qui gêne le procédé du tréfilage. 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) [23].

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. Néanmoins cette méthode nécessite d'avoir un matériel de tréfilage moderne et sophistiqué. La technique la plus connue est le "split-die", développée par Mc Lellan en 1952-53 puis améliorée par Wistreich qui consiste à utiliser une filière coupée en deux et à mesurer conjointement la force qui tend à séparer les deux parties ainsi que la force axiale lors du 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. Ce type de calcul peut toutefois être entaché d'erreurs qui découlent d'une connaissance qu'approchée de la contrainte d'écoulement ou d'hypothèses plus ou moins discutables sur le frottement et le travail redondant. Cette approche fournit quoi qu'il en soit de bonnes estimations [23].

V.5.4 Echauffement du fil

L'énergie de tréfilage est dissipée et chauffe fil et filière. Aux vitesses pratiques, l'opération peut, avec une très bonne approximation, être considérée comme adiabatique et, à la sortie de la filière, l'échauffement $\Delta\theta$ du fil s'uniformise rapidement à une valeur donnée par la formule (7) suivante [19].

$$\Delta\theta \approx \frac{F_u}{\rho c} \quad (7)$$

Avec :

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

Pour certains matériaux, les températures des fils peuvent être élevées, par exemple pour les aciers à 0.8% de carbone, après une réduction de 95%, le fil atteint une température de 310°C. Il s'agit là d'un échauffement élevé, c'est pour ça que pour certains matériaux, il est important d'avoir un système de refroidissements entre les passes pour éviter une dégradation, ou une modification de la structure des fils pendant le tréfilage [19].

V.6 Ecouissage et conséquences sur les caractéristiques des fils

La déformation du fil au cours de l'étirage à travers la filière provoque une modification générale de ses propriétés. La variation des caractéristiques mécaniques : résistance, limite d'élasticité, allongement, striction, retient tout particulièrement l'attention du tréfileur. [19]

En règle générale, on entend par degré d'écrouissage ou taux d'écrouissage la réduction de section relative. Les équations (8,9 et 10) suivantes sont les règles générales utilisées au tréfilage.

- L'allongement $A(\%)$: $A(\%) = (L_{i+1} - L_i) / L_i$ (8)

Où, L_i est la longueur initiale du fil.

Et L_{i+1} la longueur du fil à la sortie de la filière.

- Le coefficient d'allongement μ : $\mu = L_{i+1} / L_i$ (9)

- La taux de déformation ε : $\varepsilon = \ln L_{i+1} / L_i$ [3]. (10)

Au fur et à mesure que le fil s'écrouit, une variation des caractéristiques est constatée :

- Sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite.
- Sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.
- L'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement.

Ces conséquences sont exploitées en tréfilage, pour obtenir des fils avec des caractéristiques de résistance à la traction, de limite d'élasticité et d'allongement définies en fonction de l'utilisation ultérieure [26].

Partie B

Etude Expérimentale

Chapitre VI

Techniques expérimentales

VI.1 Caractérisation du fil machine

Le fil machine est importé par CATEL sous forme de bottes de cuivre a1 de 8mm de diamètre (figure VI.1).



Figure VI.1. Bottes de fil machine stockées dans le parc de CATEL.

VI.1.1 Composition chimique du fil machine

La composition chimique du cuivre est donnée par le fournisseur, ce cuivre est pur à 99.96%. Le tableau VIII ci-dessous donne la composition chimique du cuivre fournie par le fournisseur UNITED METALS.

Tableau VIII. Composition chimique du cuivre donnée par UNITED METALS en %massique.

| | Ag | As | Bi | Cd | Co | Cr | Fe | Mn | Ni |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----|--------|
| % | 0.0025 | 0.0005 | 0.0002 | - | - | - | 0.001 | - | - |
| | O | P | Pb | S | Sb | Se | Si | Sn | Te |
| % | 0.04 | - | 0.0005 | 0.0015 | 0.0001 | 0.0002 | - | - | 0.0002 |

$\%As + \%Cd + \%Mn + \%P + \%Sb$ ne doit pas excéder 0.0015%

$\%Bi + \%Se + \%Te$ ne doit pas excéder 0.003%

$\%Co + \%Fe + \%Ni + \%Si$ ne doit pas excéder 0.002%.

VI.1.2 Méthode d'échantillonnage

Avant de procéder au tréfilage, des échantillons de cuivre issus des bottes stockées dans le parc sont envoyés au laboratoire de l'usine pour subir des essais mécaniques et électriques afin de vérifier l'allongement (essai de traction), mais aussi la résistance électrique (essai de résistance). La méthode d'échantillonnage ainsi que les intervalles englobant les valeurs minimales et maximales de l'allongement et de la résistance électrique du fil machine sont données par la norme NF 1977. Cette norme stipule que le nombre d'échantillons à prélever correspond à 10% des bottes présentes dans le parc. De ce fait, un échantillon pour 10 bottes a été prélevé.

Le jour où on a procédé à l'échantillonnage, on a compté 58 bottes de fil machine. Un prélèvement de 6 échantillons de 1,80 m de longueur a été effectué pour pouvoir aisément réaliser nos essais de traction et de résistance électrique.

VI.1.3 Mesure du diamètre

Après avoir prélevé des échantillons sur les bottes du fil machine, et avant de commencer à faire les essais mécaniques et électriques, on a procédé à la vérification du diamètre des échantillons car l'écart acceptable sur le diamètre du fil ne doit pas dépasser les 0,4 mm et ceci selon la norme NF 1977 ($d = 8 \pm 0,4$ mm).

On a procédé à la mesure du diamètre de deux manières différentes :

a- Expérimentalement à l'aide d'un Palmer (figure VI.2) :

On prend 3 points du barreau, sur chaque point on mesure le diamètre sur 2 endroits différents puis on calcule la moyenne, le diamètre obtenu et le diamètre moyen du barreau de cuivre.



Figure VI.2. Palmer utilisé pour la mesure du diamètre.

b- Théoriquement en calculant le poids métrique des échantillons :

Le poids métrique M/L est obtenu en pesant un barreau de cuivre de 1m avec une balance électronique (figure VI.3).

$$M = \rho.V \text{ donc } V = M/\rho \text{ et } V = S.L = \pi.D^2.L/4 \text{ donc } M = \rho. \pi.D^2.L/4$$

$$D = (4.M/\rho. \pi.L)^{1/2}$$

Où :

ρ est la masse volumique théorique du cuivre donnée par la norme IACS.



Figure VI.3. Balance pour le calcul de la masse métrique.

VI.1.4 Essai de traction

L'essai de traction, concernant le fil machine, s'est fait à CABEL (Câbleries électriques) à Gué De Constantine, car ils possèdent une machine de traction (figure VI.4) allant jusqu'à 3000KgF, contrairement à celle de CATEL qui ne peut supporter que des diamètres inférieurs à 4 mm.

Les éprouvettes pour l'essai de traction sont d'une longueur de 200mm. L'échantillon est placé entre les deux pinces de la machine, la première étant fixe, la deuxième étire l'échantillon jusqu'à sa rupture. La machine est reliée à un cadran qui donne la charge en KgF. La valeur lue sur ce cadran juste à la rupture de l'échantillon est la charge à la rupture (en KgF). La vitesse de traction de la machine est de 0,42 mm/s.



Figure VI.4. Machine de traction à CABEL.

Concernant l'allongement, on l'a calculé manuellement selon la relation suivante :

$$A\% = 100 \times (L_{ap} - L_{av}) / L_{av}. \quad \text{Où :}$$

L_{av} est la longueur de l'éprouvette avant l'essai soit 200 mm.

L_{ap} est la longueur de l'éprouvette après rupture.

VI.2 Tréfilage et traitement thermique

Pour répondre à certains objectifs de CATEL notamment la réduction de la facture énergétique, il a fallu suivre le processus de tréfilage, comprendre le principe de fabrication et essayer de reproduire ce même processus à l'échelle de notre laboratoire au niveau de l'ENP. Pour détailler cela, on divisera ce chapitre en deux parties. La première donnera des informations sur le processus observé à CATEL, tandis que la deuxième détaillera les étapes suivies au laboratoire du département pour reproduire le même phénomène.

VI.2.1 Processus CATEL

VI.2.1.1 Tréfilage

Le tréfilage est une opération qui consiste en la diminution de la section et donc du diamètre en déformant le fil machine au travers de plusieurs filières jusqu'à obtention du diamètre désiré. Avant d'obtenir le fil de cuivre de diamètre désiré (ou exigé par la commande) le fil machine passe par plusieurs étapes :

a) Dévidoirs

Le fil machine, est présenté sous forme de bottes à l'entrée de la tréfileuse (figure VI.5). La première fonction des dévidoirs est de permettre une alimentation continue de

la ligne de production en fil machine. Avant la consommation totale de chaque botte, son extrémité est soudée au début de la botte suivante pour assurer une alimentation en continu.



Figure VI.5. Dévidoir.

b) Tréfileuses

1- Ebaucheuse (M81) (figure VI.6):

L'ébaucheuse est consacrée uniquement pour le gros tréfilage, c'est-à-dire le tréfilage du fil machine de diamètre 8mm jusqu'à un fil de diamètre compris entre 3,5 et 1,2mm. La vitesse d'étirage de cette machine est de 31,5 m/s.



Figure VI.6. Ebaucheuse M81.

2- Tréfileuse (T-3) (figure VI.7):

Utilisée pour le tréfilage des fils issus de l'ébaucheuse, ceci pour les amener à des sections beaucoup plus petites, allant jusqu'à un diamètre de 0,4mm, la vitesse de tréfilage de cette machine est de 21,4 m/s.

Pour éviter l'oxydation du fil, de la vapeur d'eau est soufflée sur ce dernier à un débit de 4 Kg/h et à une pression de 0,2 bar.



Figure VI.7. La tréfileuse T-3.

c) Jeu de filières

La filière (figure VI.8) est l'élément fondamental du tréfilage, elle est faite de sorte que la section de sortie soit inférieure à la section d'entrée, mais à un taux de réduction calculé de sorte que le fil en cuivre ne soit pas soumis à une contrainte supérieure à sa résistance à la rupture, donc il faut que le fil passe par l'œillet mais ne casse pas en aval, le tableau IX ci-dessous donne des exemples sur les jeux de filières à utiliser pour l'obtention de 4 diamètres différents :

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

| D _{entrée} (mm) | Diamètre des filières utilisées | | | | | | | | | | | D _{sortie} |
|-----------------------------|---------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 8 | 6,60 | 5,50 | 4,623 | 3,921 | 3,375 | 2,937 | 2,557 | 2,225 | 1,982 | 1,766 | 1,573 | 1,38 |
| 8 | 6,60 | 5,50 | 4,623 | 3,921 | 3,375 | 2,937 | 2,557 | 2,225 | 1,982 | | | 1,78 |
| 8 | 6,60 | 5,50 | 4,623 | 3,921 | 3,375 | 2,937 | 2,557 | | | | | 2,54 |
| 8 | 6,60 | 5,50 | 4,623 | 3,921 | | | | | | | | 3,50 |

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.

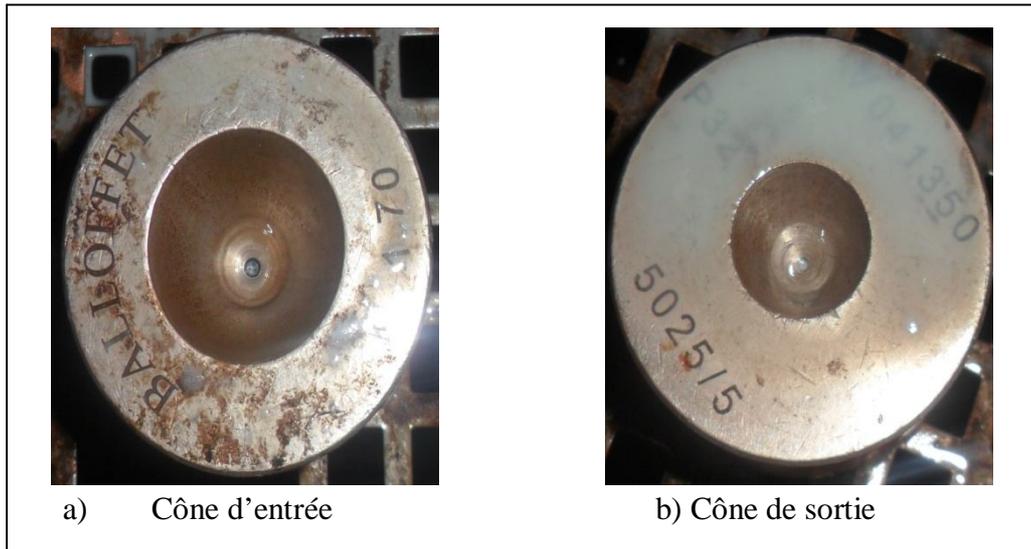


Figure VI.8. Filière de diamètre de sortie de 1,70 mm.

d) Cabestan

Les cabestans (figure VI.9) se trouvent entre deux filières, après la sortie du fil d'une filière, il est enroulé (bobiné) sur un cabestan puis renvoyé vers la filière suivante, ce système permet d'éviter une éventuelle cassure du fil.



Figure VI.9. Cabestan.

e) Lubrifiant

La lubrification est une opération très importante lors du tréfilage, il ne faut surtout pas la négliger du fait qu'elle diminue les frottements et limite l'usure des filières, ceci en diminuant les forces d'étirage mais aussi en évitant l'échauffement excessif aux grandes vitesses (ce qui est notre cas).

On peut assurer que sans lubrification, le fil cassera, il s'échauffera de plus en plus, les filières s'useront beaucoup plus vite, ce qui causera des pertes énormes pour l'entreprise.

Le lubrifiant utilisé est un mélange d'huile et d'eau, pour le gros tréfilage (ébaucheuse), la concentration d'huile est de 15%, tandis que pour le tréfilage de finition (T-3), le pourcentage d'huile est de 8% ce qui est logique car la section exposée aux frottements dans le tréfilage de finition est moindre.

VI.2.1.2 Recuit

L'opération de recuit permet au cuivre de recouvrer ses propriétés mécaniques et électriques, essentiellement son allongement. Le recuit du cuivre à CATEL se fait immédiatement après le tréfilage, la tréfileuse et le four de recuit sont juxtaposés 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. Le courant imposé est réglé, il est de 300A.

Les figures VI.10.a et VI.10.b montrent respectivement le four de recuit de l'ébaucheuse et de la T-3.



a) Four de recuit de l'ébaucheuse



b) Four de recuit de la T-3

Figure VI.10. Les fours de recuit de l'ébaucheuse et de la T-3.

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.

VI.2.2 Processus de fabrication du même fil en laboratoire

VI.2.2.1 Etirage

Le tréfilage effectué au laboratoire est un étirage manuel à une passe; de ce fait, on a eu recours aux outils suivants :

VI.2.2.1.1. Le laminoir à fil

Vu qu'on ne possédait pas une filière ayant un cône d'entrée assez large pour travailler directement avec le fil machine qui a un diamètre de 8mm, on a d'abord effectué un laminage sur une petite partie du fil jusqu'à avoir une section de diamètre de 6mm. L'opération de laminage a été faite à l'aide d'un laminoir semi automatique à double cylindres (Figure VI.11), comportant plusieurs cannelures.



Figure VI.11. Laminoir à double cylindre semi-automatique.

VI.2.2.1.2. Banc d'étirage

Pour fabriquer un fil en laboratoire, nous avons utilisé un banc d'étirage manuel (figure VI.12) équipé d'une tenaille en acier (figure VI.13). Celle-ci est liée à la chaîne du banc qui est placée horizontalement sur ce dernier et qui a pour rôle la transformation du mouvement de rotation produit par la manivelle en mouvement de translation de la tenaille tirant le fil.



Figure VI.12. Schéma illustratif du banc d'étirage.



Figure VI.13. Schéma de la tenaille.

VI.2.2.1.3. Filières et porte filière

Les filières ont pour rôle d'imposer une déformation au fil par réduction de section comme le montre le schéma de la figure VI.14 ci-dessous.

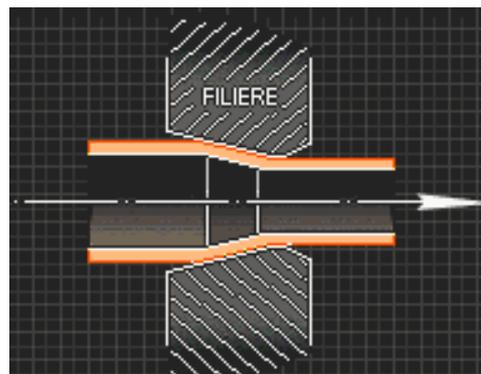


Figure VI.14. Schéma du principe de réduction effectué par la filière.

Les filières utilisées ainsi que le porte-filière sont en métal dur ; les filières possèdent des diamètres de sortie compris entre 6 et 2.6 mm. La figure VI.15 qui suit montre l'ensemble filière et porte-filière.



Figure VI.15 Ensemble filière porte-filière.

Pour fabriquer par étirage un fil de diamètre 2,5 mm à partir d'un fil machine de diamètre 8 mm, il a fallu utiliser un ensemble de 12 filières dont les diamètres de sorties sont : 6.00mm, 5.60mm, 5.20mm, 4.90mm, 4.60mm, 4.30mm, 4.00mm, 3.70mm, 3.40mm, 3.10mm, 2.90mm et 2.60mm.

VI.2.2.1.4. Lubrifiant

Pendant l'opération de tréfilage, on a utilisé de l'huile-moteur comme lubrifiant pour diminuer le frottement entre le fil et la filière. Cette opération a pour but d'augmenter la durée de vie des filières car l'échauffement dû au frottement constitue une des raisons principales de l'usure des filières.

VI.2.2.2 Traitement de recristallisation

Après tréfilage, le cuivre déformé plastiquement est fortement écroui et disloqué, ce qui entraîne une diminution importante de son allongement à la rupture qui est sa caractéristique principale. Pour cette raison on a recours aux traitements de recristallisation qui ont pour but le rétablissement de cette propriété.

Ces traitements consistent à introduire des échantillons de cuivre tréfilés de diamètre 2,5mm dans un four maintenu à différentes températures et d'y faire différents maintiens à chaque température, suivie tout de suite après d'une trempe à l'eau, ceci dans le but de suivre la cinétique du phénomène de recristallisation et de tracer les courbes correspondantes. Le matériel et les techniques utilisés sont exposés dans ce qui suit.

VI.2.2.2.1 Four de traitements

Vu les temps de maintien des traitements thermiques qui sont relativement courts (l'ensemble des durées de maintien est compris entre 5 et 250 secondes), il nous a fallu utiliser un four spécial comportant une ouverture sur l'une de ses parois (figure VI.17) d'où l'on a pu introduire nos échantillons. Il faut néanmoins noter que cette ouverture a été conçue de telle sorte qu'il n'y est pas de pertes de chaleur considérables pendant un maintien à une température donnée (la chaleur s'échappant de cette ouverture est compensée par celle produite par les résistances du four). Le four qu'on a utilisé (figure VI.16) est un four électronique de marque NABERTHERM équipé d'un thermocouple.



Figure VI.16. Four utilisé.



Figure VI.17. Ouverture du four.

VI.2.2.2 Technique utilisée pour les traitements de recristallisations

Pour procéder aux traitements de recristallisations, on a d'abord découpé des éprouvettes de 200 mm sur le fil tréfilé, puis à l'aide d'une pince, on introduit chaque éprouvette dans le four par l'ouverture qu'il possède (figure VI.18).



Figure VI.18. Traitements de recristallisation d'une éprouvette de cuivre tréfilé.

A la fin du temps de maintien, on retire notre éprouvette du four et on lui fait subir une trempe à l'eau comme montré sur la figure VI.19.



Figure VI.19. Trempe d'une éprouvette de cuivre après traitement de recristallisation.

Après trempe, on découpe deux échantillons d'une longueur de 10 mm de chaque éprouvette ayant subi le traitement de recristallisation et d'une éprouvette n'ayant subi aucun traitement pour faire les examens micrographiques qui mettront en évidence l'évolution de la microstructure du fil en section et en longueur.

VI.3 Les essais mécaniques et électriques

VI.3.1 L'essai de résistance

L'essai de résistance se fait via une machine appelée « pont de résistance » (figure VI.20), l'éprouvette de l'essai de résistance doit avoir une longueur supérieure à celle du pont, de sorte que le barreau (fil) puisse être fixé entre les deux extrémités du pont, un courant est envoyé à travers le fil, et la machine mesure la résistance électrique. La partie du barreau dans laquelle le courant passe est de 1m, la résistance est donc donnée en Ω / m .

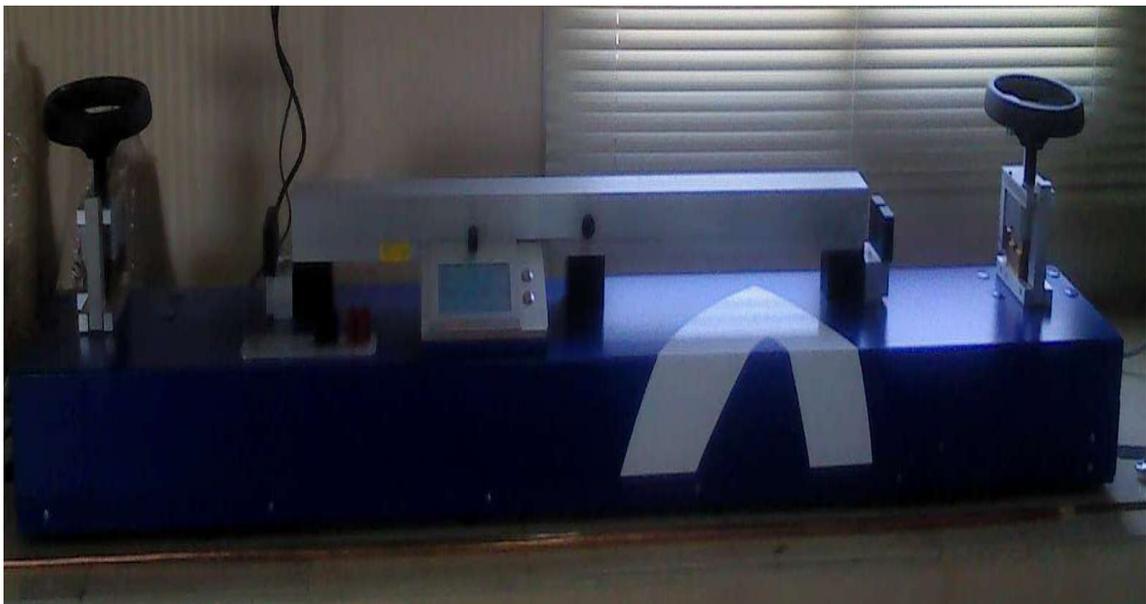


Figure VI.20. Pont de résistance.

Avant de commencer l'essai, l'opérateur doit insérer une valeur de la résistance donnée par la norme NF 1977. Cette valeur est caractéristique à chaque diamètre du fil. La machine, en fonction de cette valeur et de la valeur calculée, nous donne la qualité du cuivre utilisé. Dans notre cas le cuivre est de qualité supérieure.

A la fin de l'essai, on peut imprimer le PV de ce dernier par le biais d'une petite imprimante reliée au pont de résistance, il est sous forme d'une petite étiquette (figure VI.21) contenant les informations suivantes :

- L'identifiant (introduit par l'opérateur) : c'est le nom que donne l'opérateur à l'échantillon.
- La date de l'essai.
- La valeur de la résistance donnée par la norme (introduite par l'opérateur).
- La résistance mesurée.
- La température à laquelle l'essai a été effectué.
- L'heure à laquelle l'essai a été réalisé.
- L'écart entre la résistance mesurée est celle spécifiée par la norme.
- La durée de l'essai.

La figure VI.21 ci-dessous montre le PV d'essai de résistance d'un fil de cuivre de 2,5mm de diamètre.

| CATEL Linear Resistance Bridge | | Res. Fine 50 | |
|---|-------------|--------------|-------------|
| ID | 2.52mm | SN | 12104805178 |
| Date | 2013-04-22 | Heure | 11:42:27 |
| R_CU | 0.323 %/°C | GN1 | 20 °C |
| RN | 3.53 Ohm | Ecart | -1.45 % |
| Rmes | +3.4758 Ohm | Durée | 00:00:00 |
| Temp | +17.20 °C | | |
| Ecart max. - Conforme avec Norm. NF1977 | | | |

Figure VI.21. PV d'essai de résistance sur un fil de cuivre de 2.5mm de diamètre.

VI.3.2 L'essai de traction

L'essai de traction a une grande importance dans les essais mécaniques. Un fil de cuivre travaille à la traction quand il est soumis à l'action de deux forces égales et directement opposées qui tendent à l'allonger.

L'essai se fait sur des éprouvettes standardisées sur une machine d'essai de traction (figure VI.22).



Figure VI.22. Machine de traction reliée à un ordinateur.

Les éprouvettes sont d'une longueur de 250mm, la longueur de l'éprouvette normalisée pour l'essai de traction est de 200mm, les 50mm ont été laissés pour maintenir solidement l'éprouvette entre les deux mâchoires de la machine et sont soumises à l'action d'une charge (éloignement des mâchoires l'une de l'autre) jusqu'à un allongement provoquant la rupture.

La machine de traction est reliée à un micro ordinateur muni d'un logiciel qui permet d'enregistrer instantanément les valeurs de l'effort de traction et l'allongement correspondant. Il permet également de tracer au fur et à mesure le diagramme de l'essai de traction (figure VI.23).

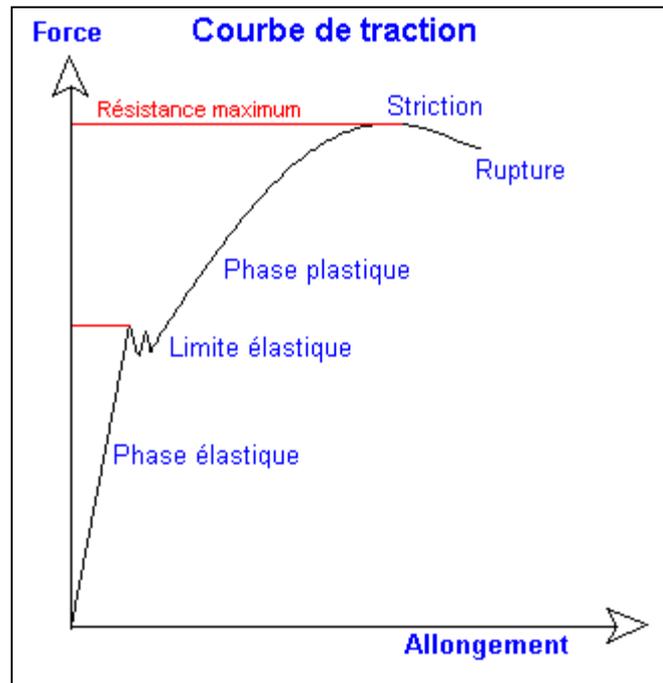


Figure VI.23. Diagramme d'essai de traction.

L'essai de traction permet de déterminer les caractéristiques mécaniques principales du cuivre :

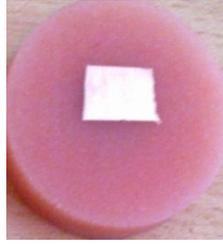
- La limite élastique.
- La résistance maximum.
- La résistance à la rupture.
- L'allongement à la rupture.
- La striction relative à la rupture.
- Le module d'élasticité.

Dans le cadre de notre étude, l'allongement est la caractéristique principale sur laquelle on se base pour déterminer si le cuivre est bon à utiliser ou pas. L'allongement est la capacité d'un matériau à se déformer et à s'allonger sans rupture. Il exprime en quelque sorte la ductilité du matériau.

VI.4 Techniques de préparation à l'étude métallographique

VI.4.1 Découpage et enrobage

Les échantillons destinés à la caractérisation microstructurale ont été découpés à l'aide d'une tronçonneuse à partir des prélèvements effectués sur les bottes. Pour faciliter la manipulation de nos échantillons, on a effectué un enrobage à froid. Les figures VI.24 et VI.25 montrent des échantillons après leurs enrobages.

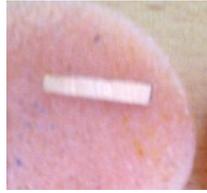


a)- coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VI.24. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage.



a)- coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VI.25. Echantillons d'un fil de cuivre de diamètre 2,5mm après enrobage.

VI.4.2 Polissage

Le polissage a pour but l'obtention d'une surface plane, de rugosité minimale et également l'élimination de la couche d'oxyde superficielle dont la microstructure n'est pas représentative du matériau étudié. Il est effectué en deux étapes : la première consiste en un polissage grossier avec des papiers abrasifs de granulométrie décroissante (120, 240, 400, 800, 1000 et 1200). La deuxième est celle du polissage de finition qui permet d'améliorer davantage l'état de surface en utilisant des feutres imbibés de suspensions d'alumine diluées dans l'eau. La granulométrie de la poudre d'alumine utilisée est de 0,05 μm . La figure VI.26 qui suit montre la polisseuse utilisée.



Figure VI.26. Polisseuse utilisée.

Après polissage, la surface des échantillons possède un aspect miroir. Une fois lavés et séchés, ils sont donc prêts à l'attaque chimique.

VI.4.3. Attaque chimique

Après le polissage de finition l'échantillon subit une attaque chimique afin de révéler sa microstructure. Le réactif utilisé est une solution composée de 120 ml d'eau distillée, 50 ml d'acide hydro-chlorhydrique (HCL) et de 10g de chlorure de fer (III). Après l'attaque, l'échantillon est immergé dans l'eau distillée puis séché à l'aide d'un séchoir.

VI.4.4. Observation au 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 VI.27 montre une image de ce microscope.



Figure VI.27. Microscope métallographique OPTIKA M-789.

VI.4.5. Analyse quantitative

Les micrographies obtenues après l'observation au microscope ont été exploitées à l'aide du logiciel de traitement d'image "Visilog" dans le but de calculer la fraction des grains recristallisés. Ce logiciel permet de calculer pour chaque micrographie la fraction de la surface des grains allongés par rapport à la surface totale.

Chapitre VII

Résultats et discussions

Dans le présent chapitre, nous allons exposer les différents résultats obtenus lors des différentes expériences que nous avons entrepris. On a d'abord réalisé des essais sur la matière première (fil machine de diamètre 8 mm) pour vérifier sa conformité avec la norme. Ensuite on a effectué une caractérisation du fil de cuivre tréfilé de diamètre 2.5 mm sans traitements de recristallisation puis avec plusieurs traitements à différentes températures et à différents temps de maintien. Ces traitements ont été entrepris dans le but de suivre l'évolution des propriétés du fil tréfilé en fonction de la recristallisation.

VII.1 Résultats d'essai sur le fil machine

Sur les 6 échantillons de fil machine découpés, nous avons procédé au calcul du diamètre, à l'essai de résistance électrique et à l'essai de traction pour déterminer l'allongement.

Le tableau X ci-dessous donne les résultats de l'essai de résistance électrique et de l'essai de traction effectués sur nos échantillons.

Tableau X. Résultats des essais sur le fil machine.

| Echantillon | Résistance (Ω/m). 10^{-3} | Charge (KgF) | Allongement % |
|-------------|--------------------------------------|--------------|---------------|
| 1 | 0,3264 | 1250 | 37,5 |
| 2 | 0,3303 | 1240 | 37 |
| 3 | 0,3256 | 1250 | 39 |
| 4 | 0,3267 | 1230 | 39 |
| 5 | 0,3232 | 1250 | 38 |
| 6 | 0,3263 | 1230 | 39 |
| Moyenne | 0,3260 | 1245 | 38,25 |

Puisque le calcul du diamètre s'est fait de deux manières différentes, et que celui-ci influe directement sur la section et donc la contrainte et la résistivité, cette dernière ayant un rapport direct avec la conductivité, on résumera nos résultats obtenus sous forme de deux tableaux XI, XII. Le premier donnant les résultats obtenus pour des diamètres calculés expérimentalement, le deuxième pour ceux calculés théoriquement.

Tableau XI. Résultats obtenus pour des diamètres calculés via un Palmer.

| Echantillon | Diamètre (mm) | Section (mm^2) | Contrainte (MPa) | Résistivité ($\Omega.m 10^{-8}$) | Conductivité % |
|-------------|---------------|--------------------|------------------|------------------------------------|----------------|
| 1 | 8,165 | 52,33 | 234,09 | 1,708 | 100,9 |
| 2 | 8,109 | 51,62 | 235,41 | 1,705 | 101,1 |
| 3 | 8,161 | 52,28 | 234,31 | 1,702 | 101,3 |
| 4 | 8,064 | 51,05 | 236,12 | 1,667 | 103,4 |
| 5 | 8,182 | 52,55 | 233,11 | 1,698 | 101,5 |
| 6 | 8,060 | 50,99 | 236,40 | 1,664 | 103,6 |
| Moyenne | 8,124 | 51,80 | 235,54 | 1,691 | 101,9 |

Tableau XII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés en connaissant le poids métrique.

| Echantillon | poids métrique (g/m) | Diamètre (mm) | Section (mm ²) | Contrainte (MPa) | Résistivité ($\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$) | Conductivité % |
|-------------|----------------------|---------------|----------------------------|------------------|--|----------------|
| 1 | 463,9 | 8,153 | 52,18 | 239,55 | 1,703 | 101,2 |
| 2 | 458,6 | 8,106 | 51,58 | 240,40 | 1,704 | 101,2 |
| 3 | 465,8 | 8,170 | 52,40 | 238,55 | 1,706 | 101,1 |
| 4 | 462,1 | 8,137 | 51,97 | 236,67 | 1,698 | 102,6 |
| 5 | 468,0 | 8,189 | 52,64 | 237,46 | 1,701 | 101,3 |
| 6 | 463,2 | 8,147 | 52,10 | 239,92 | 1,700 | 101,4 |
| Moyenne | 463,6 | 8,150 | 52,14 | 238,78 | 1,699 | 101,5 |

Avec :

La section : $S = \pi \cdot D^2 / 4$.

La contrainte : $\sigma = F/S$ où F étant la charge à la rupture.

La résistivité : $\rho = R \cdot S / L$ en prenant la longueur égale à 1 m.

La conductivité étant égale au rapport de la résistivité max sur la résistivité calculée et ρ_{\max} à 20°C = $1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ selon la norme IACS (annexe 1).

L'allongement $A = (L_{ap} - L_{ép}) / L_{ép}$ où :

L_{ap} : longueur de l'éprouvette après l'essai de traction,

$L_{ép}$: longueur initiale de l'éprouvette (200mm).

Pour la méthode du poids métrique :

$m = d \cdot V = d \cdot S \cdot L = d \cdot \pi \cdot L \cdot D^2 / 4$ donc: $D = \sqrt{4m / d \cdot \pi \cdot L}$:

m/L étant le poids métrique,

d étant la densité du cuivre qui est égale à 8890 Kg/m³.

Les résultats obtenus pour les deux méthodes de calcul de diamètre étant très proches, on peut dire que les deux sont acceptables.

Les résultats illustrés dans les tableaux X, XI, XII prouvent que le lot de cuivre sur lequel nous avons procédé à l'échantillonnage est bien conforme aux normes car :

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

VII.2 Résultats des tests effectués sur le fil de diamètre 2,5mm

Le fil de cuivre de \varnothing 2,5 mm est obtenu par tréfilage successif du fil machine de diamètre initial 8 mm.

VII.2.1 Etude des échantillons CATEL

On a pris deux échantillons de fil de 2,5 mm de diamètre. Le premier avant recuit (donc totalement écroui) et le deuxième après recuit (totalement recristallisé). Nous avons effectué sur ces deux échantillons un essai de résistance électrique, un essai de traction, puis une observation de la microstructure par microscopie optique.

VII.2.1.1 Essai de résistance

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau XIII ci-dessous.

Tableau XIII. Résultats de l'essai de résistance sur les échantillons de CATEL.

| Echantillon | $R_{\text{calculée}} (\Omega/\text{m}) \cdot 10^{-3}$ | Section (mm^2) | Résistivité ($\Omega \cdot \text{m} \cdot 10^{-8}$) |
|--------------|---|---------------------------|---|
| Avant recuit | 3,4788 | 4,91 | 1,708 |
| Après recuit | 3,4736 | 4,91 | 1,706 |

Les résultats obtenus pour la résistivité électrique montrent qu'elle est la même pour les deux échantillons, ce qui est normal car c'est une caractéristique intrinsèque du matériau. On peut aussi vérifier ces résultats en revenant au tableau II (page 15) qui donne la résistivité du cuivre pour un état recuit et un état écroui.

Par contre, on remarque en comparant les résultats obtenus pour la résistance dans le tableau X avec le tableau XIII que celle-ci augmente avec la diminution du diamètre, ce résultat peut être interprété mathématiquement ainsi :

$$R = \rho L / S = 4\rho L / \pi D^2,$$

La résistivité étant constante et puisque le diamètre diminue, la résistance va automatiquement augmenter. Par ailleurs, 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 tableau ci-dessus (avant et après recuit). Cependant, la différence entre les deux résistances est vraiment insignifiante. La raison réside peut être dans la haute pureté du cuivre utilisé (99,96% pur) qui fait que la distorsion du réseau cristallin n'est pas aussi affectée que si le cuivre utilisé était sous forme d'alliage. Aussi, en sachant qu'un courant électrique n'est rien d'autre qu'un mouvement d'électron, on peut donc dire que plus un métal est stable structuralement (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. Ce

phénomène est beaucoup plus accentué si le métal est un alliage donc moins pur, ce qui n'est pas le cas ici. Donc on peut facilement affirmer que nos résultats d'étude de la résistance sont très cohérents.

VII.2.1.2 Essai de traction

Les résultats de l'essai de traction sont donnés dans le tableau XIV ci-dessous :

Tableau XIV. Résultats de l'essai de traction sur les échantillons de CATEL.

| Echantillon | Allongement % | Charge à la rupture (MPa) |
|--------------|---------------|---------------------------|
| Avant recuit | 2,74 | 398,03 |
| Après recuit | 39,07 | 228,93 |

Les figures VII.1.a et VII.1.b montrent les courbes de traction respectives de l'échantillon avant et après recuit.

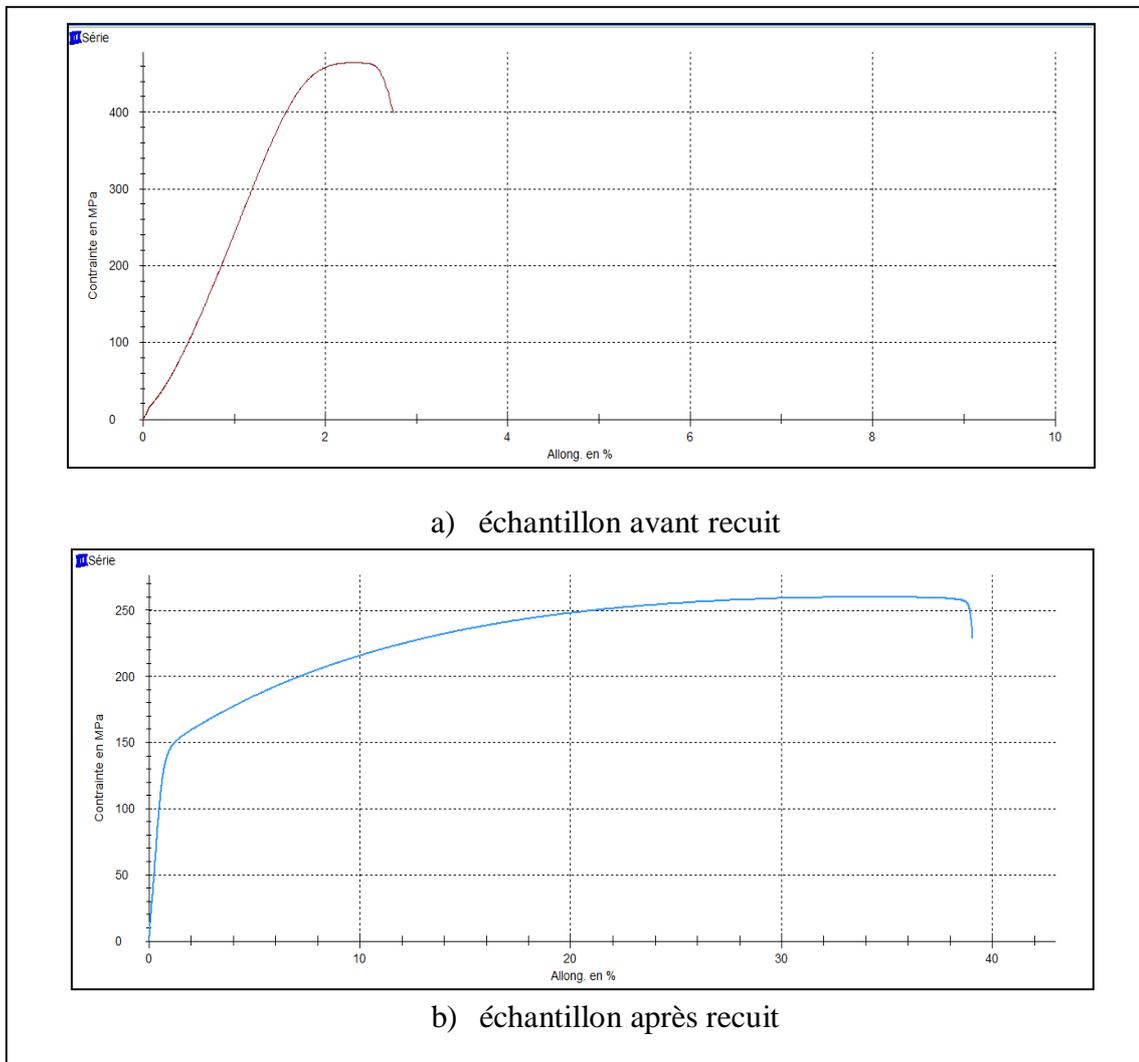


Figure VII.1. Courbes de traction des échantillons de CATEL.

Les résultats du tableau XIV 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.

Par contraste, on remarque que la charge à la rupture évolue inversement avec l'allongement. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il faut appliquer une grande charge pour pouvoir déformer du cuivre dur (écroui) et donc arriver à le rompre que pour déformer un cuivre malléable (recuit). Ce cas de figure peut être illustré par un exemple simple d'un matériau dur (métal) et d'un autre malléable (polymère). En effet il faut une grande force pour allonger un métal (cuivre par exemple) que pour un polymère (gaine en PE par exemple) alors que l'allongement de ce dernier à la rupture est de 20 fois celui du cuivre (d'après des résultats d'essais observés à CATEL).

VII.2.1.3 Microstructure

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 (VI.4). Pour cela deux échantillons ont été préparés. L'un en coupe longitudinale l'autre en coupe transversale puis enrobés dans une résine comme montrés dans la figure VII.2 ci-dessous. Nous avons donc 4 échantillons ; 2 pour le fil avant recuit et deux autres pour celui après recuit.

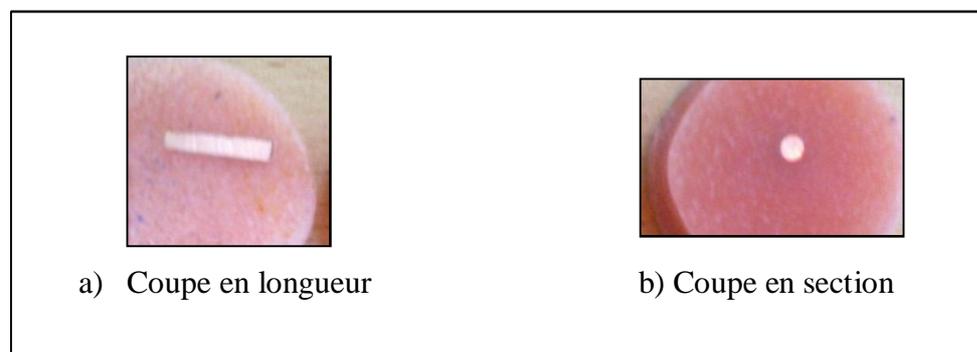


Figure VII.2. Échantillons enrobés.

Les micrographies du fil de cuivre avant recuit et après recuit sont illustrées respectivement dans les figures VII.3 et VII.4.

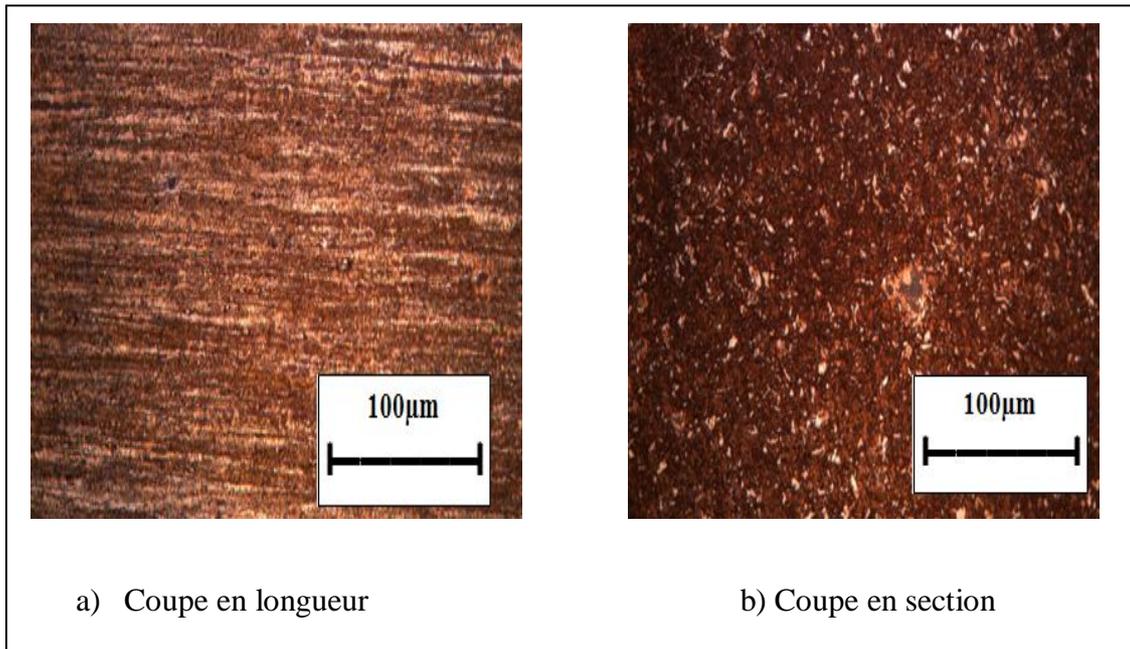


Figure VII.3. Micrographies de l'échantillon de CATEL avant recuit.

On voit bien que l'étirage par traction des fils provoque un allongement des grains (VII.3.a) dans le sens du tréfilage (coupe en longueur). En revanche dans la section transversale (VII.3b), les grains paraissent équiaxes, ce qui est logique, car le système de contrainte dans le sens radial est le même car imposé par la forme des filières, mais différent dans le sens longitudinal. Donc les grains équiaxes que nous percevons dans cette dernière section ne sont rien d'autre que les sections transversales des grains allongés dans le sens longitudinal qui ont la forme d'aiguille.

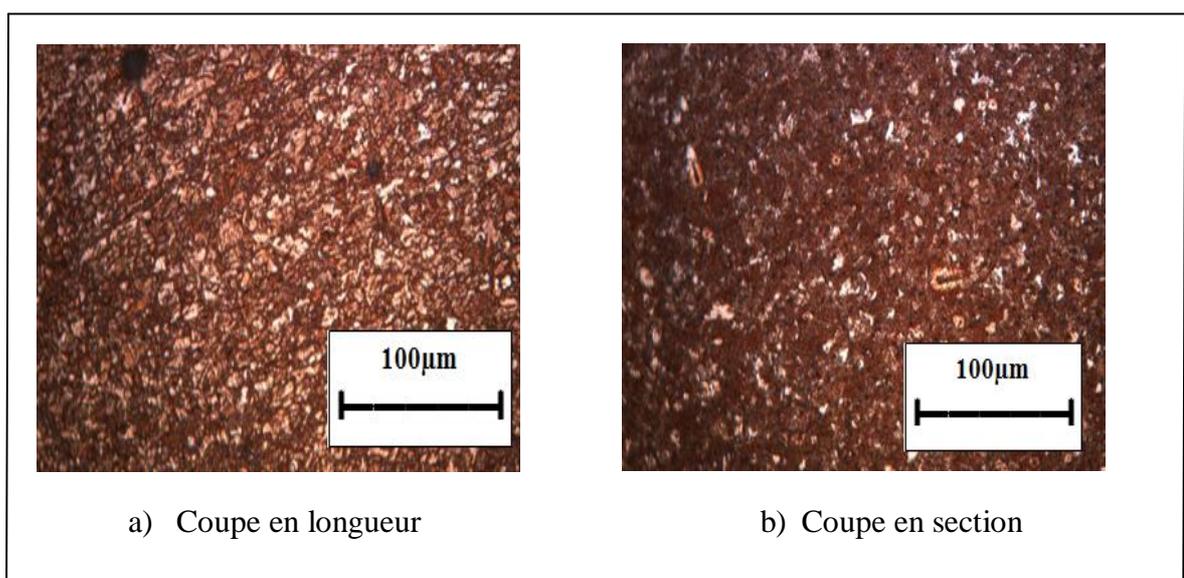


Figure VII.4. Micrographies de l'échantillon CATEL après recuit.

En comparant les microstructures des échantillons avant et après recuit, on remarque que les grains allongés (figure VII.3.a), après étirage se sont recristallisés et ont repris une forme régulière (figure VII.4.a). Ceci était prévisible car le recuit de recristallisation, comme son nom l'indique est appliqué après écrouissage pour rendre aux grains allongé et écrouis une taille fine et une forme équiaxe régulière.

Par contre, pour ce qui est de la coupe en section, on note que la microstructure n'a pas vraiment changé, car les grains ont gardé presque la même forme. Ceci s'explique par le fait que le tréfilage provoque un allongement du grain dans le sens du tréfilage (selon la longueur du fil), or la coupe en section ne nous permet pas de voir les grains en longueur. Finalement, on peut dire que la microstructure est la même et partout dans tous les sens à l'intérieur d'un fil qui a reçu un traitement de recuit de recristallisation.

VII.2.2 Etude des échantillons reproduits au laboratoire

VII.2.2.1 Tréfilage

Pour pouvoir tréfiler le fil machine manuellement au laboratoire, on est passé par un certain nombre de filières jusqu'à aboutir à la filière de 2.60mm. La première filière ayant un diamètre d'entrée de 6mm, et étant donné un fil machine de Ø 8 mm, on a donc du commencer par un laminage d'un petit bout du fil machine pour le ramener à un diamètre légèrement inférieur à 6mm pour qu'il puisse passer à travers cette filière.

Par ailleurs en respectant la loi de conservation du volume pendant la déformation plastique, on peut en déduire tous les autres paramètres relatifs à cette déformation. C'est ainsi que le coefficient d'allongement entre les passes pendant l'étirage peut être calculé par les formules suivantes : $\mu = L_{i+1}/L_i$ ou alors $\mu = S_i/S_{i+1}$. En appliquant donc cette dernière formule on aboutit à : $\mu = D_i^2 / D_{i+1}^2 = (D_i / D_{i+1})^2$. Où :

L_i : la longueur initiale du fil,

S_i : la section initiale du fil,

L_{i+1} : la longueur finale après étirage,

S_{i+1} : la section après étirage,

D_i : diamètre d'entrée (première filière),

D_{i+1} : diamètre de la filière suivante.

En utilisant l'équation ci-dessus, on calcule les coefficients d'allongement entre les passes comme montré dans le tableau XV ci-dessous.

Tableau XV. Coefficients d'allongement μ .

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| N° filière | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| D(mm) | 6,00 | 5,60 | 5,20 | 4,90 | 4,60 | 4,30 | 4,00 | 3,70 | 3,40 | 3,10 | 2,90 | 2,60 |
| μ | 1,148 | 1,160 | 1,126 | 1,134 | 1,144 | 1,156 | 1,169 | 1,184 | 1,203 | 1,142 | 1,244 | - |

Par ailleurs pour calculer la longueur finale après « n » passes d'étirage, on doit savoir le coefficient d'allongement total ou sommaire. Celui-ci noté μ_{Σ} est égal au produit des coefficients d'allongement calculés pour chaque passe. Il est aussi égal au rapport de la dernière longueur du fil sur la première. C'est ainsi que nous pouvons écrire les équations suivantes pour 12 passes d'étirage:

$$\mu_{\Sigma} = \mu_1 \times \mu_2 \times \dots \times \mu_{12} = L_{12} / L_0 \quad \text{où :}$$

L_0 étant la longueur initiale du fil machine avant tréfilage.

L_{12} la longueur finale du fil après 12 passes de tréfilage.

Le diamètre final après la 12^{ème} passe est égal à 2,5mm < 2,6 mm (qui est le diamètre de la filière). La différence (0,1 mm) étant due à l'effet de la force de traction qui tend à réduire davantage le diamètre du fil à la sortie de la filière. En utilisant les résultats du tableau ci-dessus, on trouve un coefficient total d'allongement égal à : $\mu_{\Sigma} = 5,319$

Donc, si on veut avoir un fil de \varnothing 2,5mm et d'une longueur de 2 m (200 cm), on doit tréfiler un échantillon de : $\mu_{\Sigma} = L_{12} / L_0 \rightarrow L_0 = L_{12} / \mu_{\Sigma} = (200 / 5,319)$ soit à peu près 38 cm de fil de diamètre 6mm.

Mais pour notre cas, nous avons du fil machine de \varnothing 8 mm. On peut facilement déduire la longueur du fil machine qu'il faut tréfiler pour aboutir à 38 cm de fil de 6 mm par la loi de conservation de volume : $S_6 L_6 = S_8 L_8$ donc $D_6^2 L_6 = D_8^2 L_8$ soit $36 L_6 = 64 L_8$. Donc $L_8 = 36 L_6 / 64$ où :

L_8 la longueur du fil machine souhaitée, et L_6 correspond au 38 cm trouvés ci-dessus.

$$L_8 = 21,4 \text{ cm.}$$

Pour obtenir un fil de \varnothing 2,5 mm et d'une longueur de 2m, on doit laminier un barreau de fil machine de \varnothing 8 mm et d'une longueur de 21,4 cm jusqu'à un \varnothing de 6 mm, puis le tréfiler jusqu'à 2,5 mm.

VII.2.2.2 Traitements de recuit

Après tréfilage, nous avons procédé à des traitements de recuit à différentes températures et à différents temps de maintien pour suivre l'évolution de la microstructure et de l'allongement. Mais avant de faire ces traitements, on a laissé un échantillon non recuit comme témoin pour les comparaisons ultérieures.

VII.2.2.2.1 Caractérisation de l'échantillon non recuit

a) Microstructure

L'observation au microscope de l'échantillon non recuit est illustrée dans la figure VII.5.

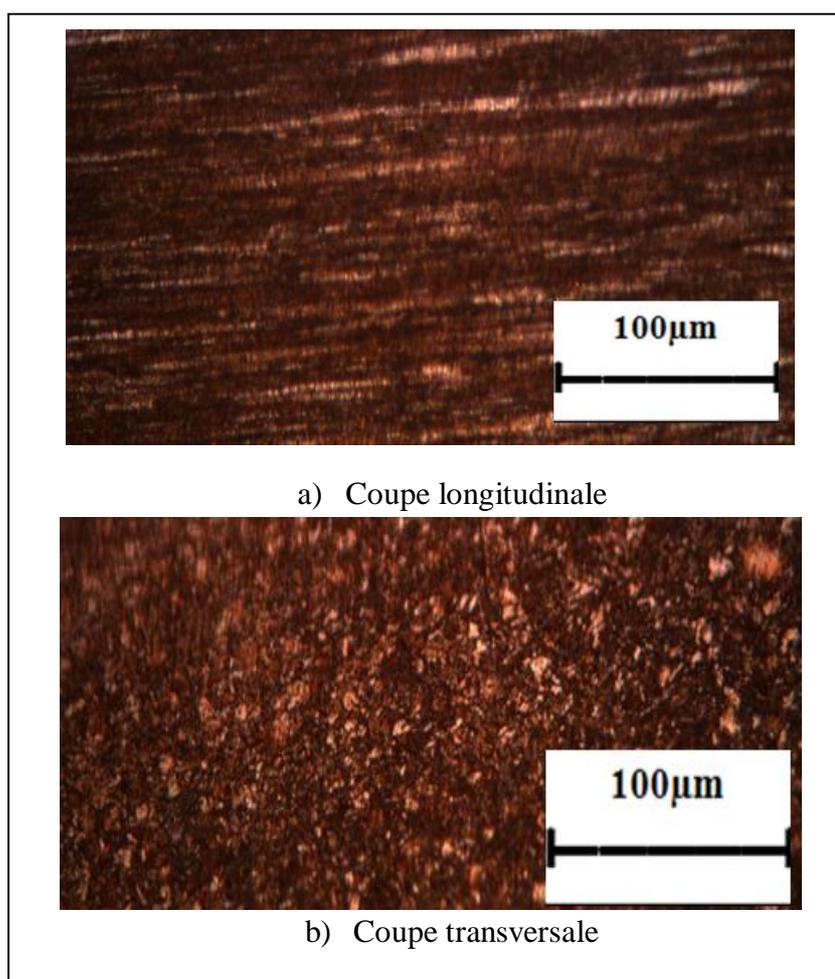


Figure VII.5. Micrographie de l'échantillon non recuit.

On voit bien que les grains sont allongés et ceci à cause de l'écroutissage provoqué par le tréfilage, alors que selon la section, aucun changement n'est observé. 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.

b) **Essai de traction**

Les résultats de l'essai de traction pour le fil étiré ont donné un allongement de 2,69% et une charge à la rupture de 396,76 MPa. Ces résultats sont similaires avec ceux des échantillons élaborés à CATEL qui ont donné un allongement de 2,74% et une charge à la rupture de 398,03 MPa. La courbe de traction est donnée par la figure VII.6.

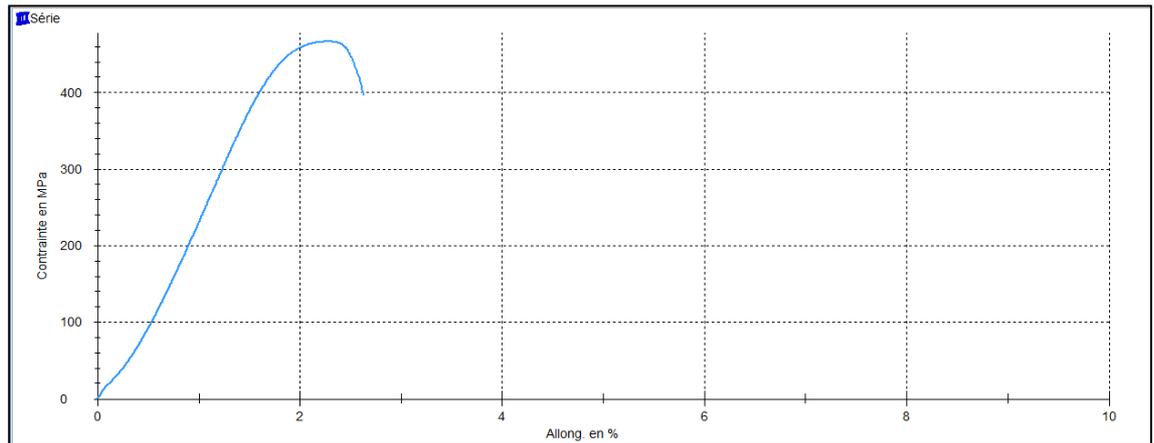


Figure VII.6. Courbe de traction de l'échantillon labo non recuit.

On peut donc conclure que le tréfilage manuel effectué à l'ENP est similaire à celui fait à CATEL car il a donné les mêmes résultats que ce soit du point de vue microstructure ou du point de vue allongement.

VII.2.2.2 Caractérisation des échantillons recuits à 800°C

A CATEL, 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 CATEL à environ 800°C.

Concernant le temps de chauffage, en sachant que la tréfileuse tire le fil à une vitesse de 31m/s et en sachant aussi que la distance mesurée du fil passant à travers les électrodes est de 3m, nous déduisons donc un temps de chauffage à CATEL égal à environ 0,1 sec.

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 à moufle par exemple (comme c'est le cas chez nous au laboratoire), 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'une section transversale circulaire d'un fil. C'est pour cette raison qu'afin de détecter le temps minimal nécessaire pour obtenir une recristallisation totale du métal écroui (100%) on a commencé par réaliser des recuits à partir d'un maintien de 5s.

- Recuit avec 5sec de maintien :

L'observation au microscope est donnée par la figure VII.7.

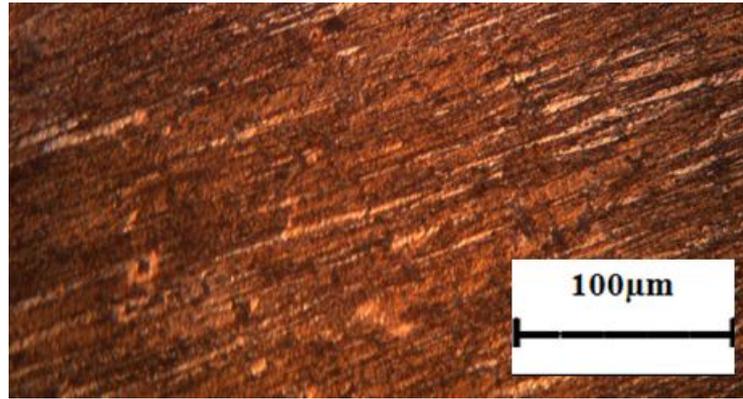


Figure VII.7. Recuit à 800°C avec 5 secondes de maintien.

On voit bien que le matériau est toujours complètement écroui. Il n'y a eu aucune recristallisation notable, les grains paraissent encore tous allongés. On peut attribuer ce résultat au fait que l'énergie absorbée à ce temps de maintien n'est pas encore suffisante pour activer la recristallisation.

Les résultats de l'essai de traction ont donné un allongement de 2,70% est une charge à la rupture de 397,97 MPa. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés auparavant pour l'échantillon témoin (non recuit), ceci confirme que notre échantillon est encore totalement écroui.

La figure VII.8 ci-dessous montre la courbe de l'essai de traction pour les conditions sus-citées.

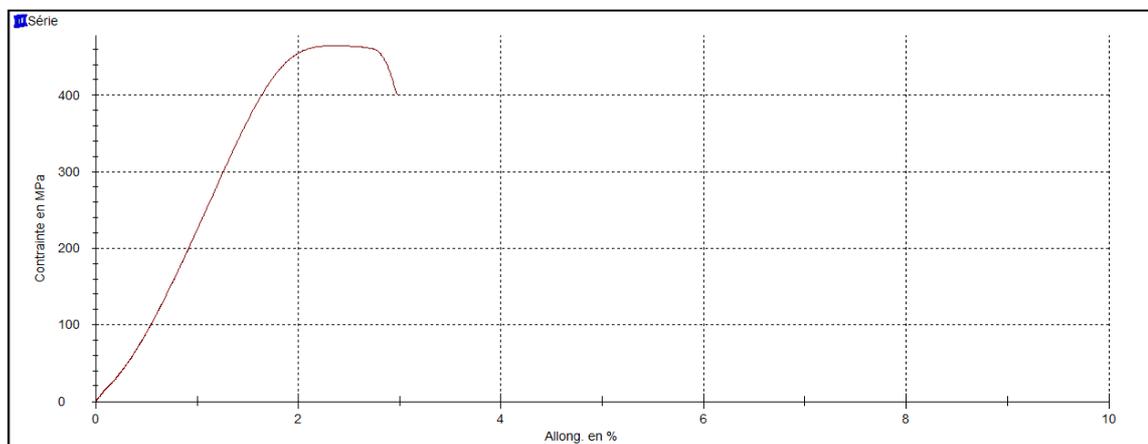


Figure VII.8. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 5s de maintien.

- Recuit avec 10s de maintien

Les figures VII.9 et VII.10 montrent respectivement l'observation microscopique et la courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec un temps de maintien de 10sec.

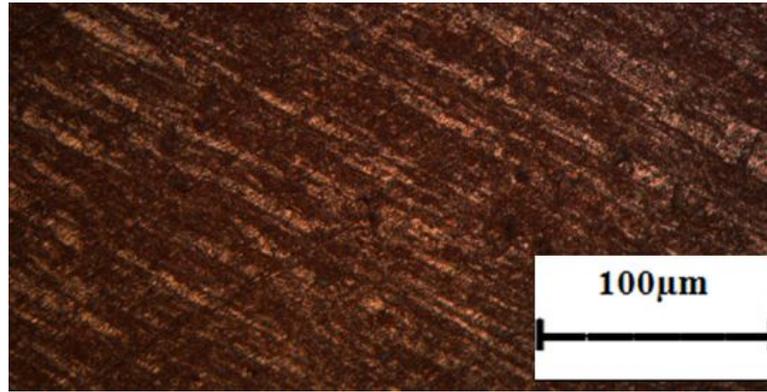


Figure VII.9. Recuit à 800°C avec 10 secondes de maintien.

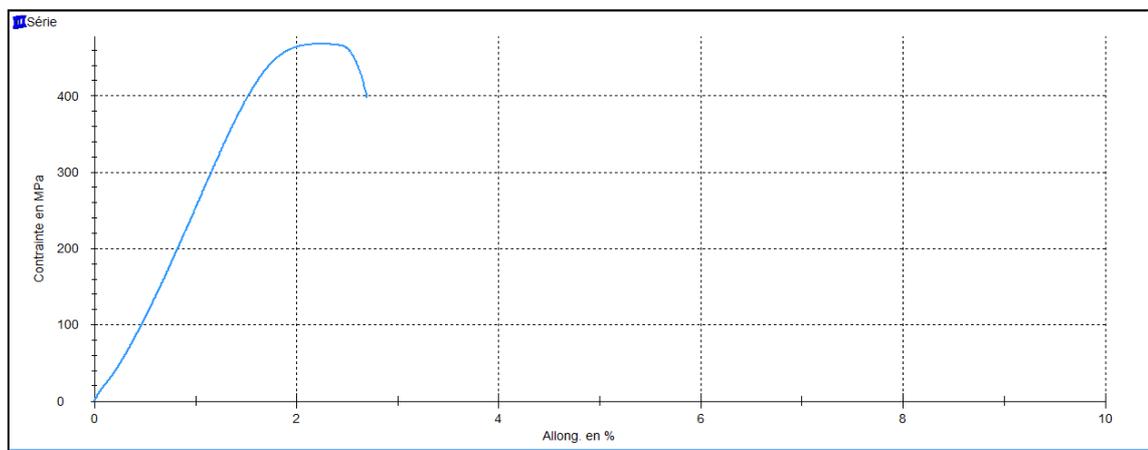


Figure VII.10. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 10sec de maintien.

La microstructure donnée par la figure VII.9 montre une fraction recristallisée de l'ordre de (2÷5)% environ. Donc en 10 secondes nous avons un début de recristallisation, et les 5 premières secondes peuvent être considérées comme étant une période d'incubation nécessaire pour provoquer un mouvement atomique préalable à la formation des premiers germes cristallins.

Pour l'essai de traction montré dans la figure VII.10, il a donné un allongement de 2,72% et une charge à la rupture de 395,59MPa, donc presque similaire au fil maintenu à 5 sec. La valeur de l'allongement a très légèrement augmenté et la charge a légèrement baissé comparée à celles de l'échantillon recuit pendant 5sec. Mais cette augmentation n'est pas très significative et elle n'est encore pas conforme aux exigences de l'entreprise qui demande un allongement de 30 à 40%.

- Recuit avec 15sec de maintien :

L'observation au microscope de l'échantillon recuit pendant 15 secondes ainsi que sa courbe de traction sont données respectivement par les figures VII.11 et VII.12.

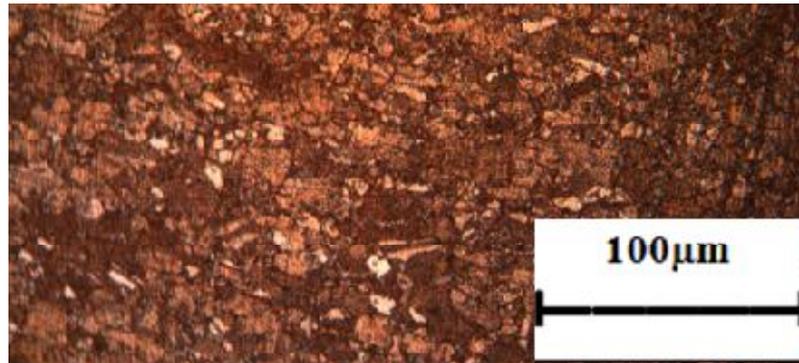


Figure VII.11. Recuit à 800°C avec 15 secondes de maintien.

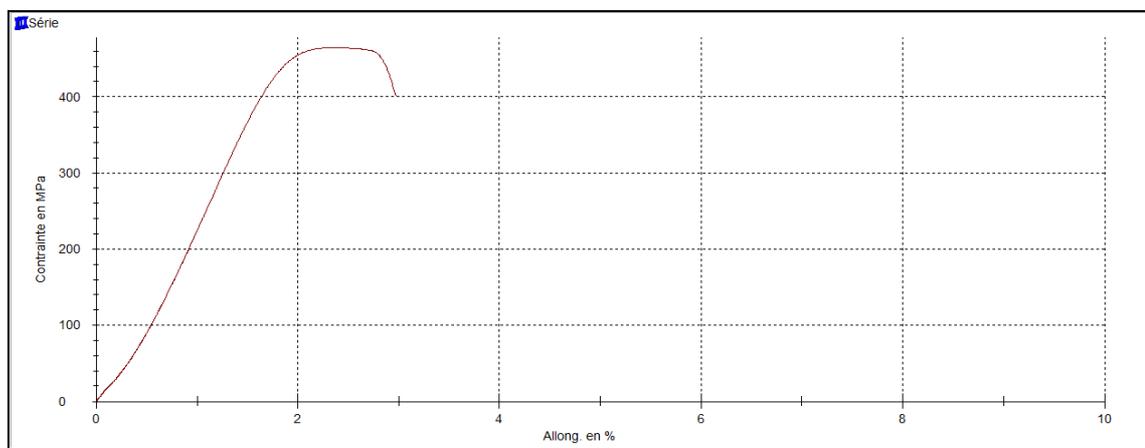


Figure VII.12. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 15sec de maintien.

On constate, en observant la microstructure donnée par la figure VII.11 que la fraction recristallisée est de l'ordre de 40% environ. Cependant, l'allongement et la charge à la rupture n'ont pas notablement changés. Les valeurs de ces derniers sont de 2,97% pour l'allongement et de 390,52MPa pour la charge à la rupture, ces résultats sont encore loin des valeurs escomptées.

- Recuit avec 20sec de maintien :

La figure VII.13 montre la microstructure de l'échantillon recuit à 800°C avec un temps de maintien de 20 secondes, la figure VII.14 montre la courbe de traction de celui-ci.



Figure VII.13. Recuit à 800°C avec 20 secondes de maintien.

On voit bien d'après cette microstructure 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.

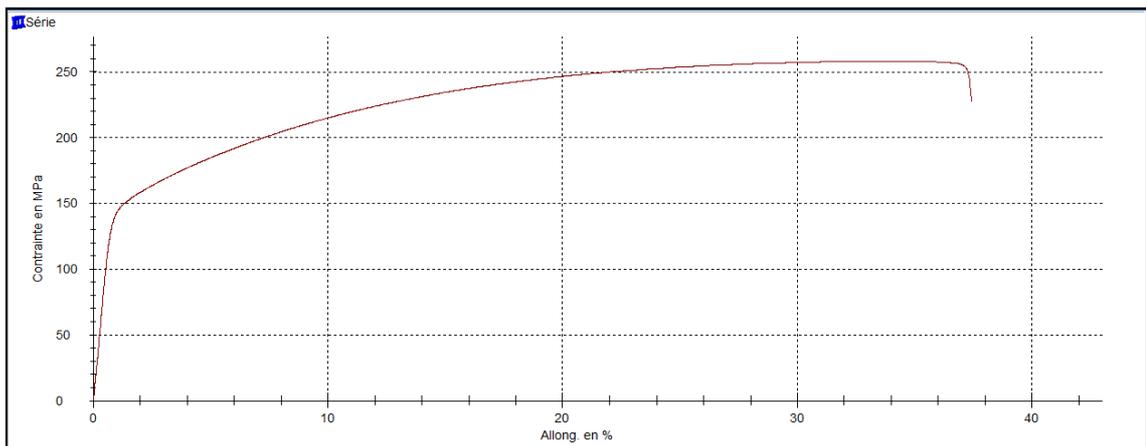


Figure VII.14. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 20s de maintien.

L'essai de traction a donné les résultats suivants :

- Un allongement de 37,43%,
- Une charge à la rupture de 226,76MPa.

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

En résumé, on peut dire en s'inspirant des résultats trouvés auparavant que l'allongement ne varie pas notablement tant qu'il subsiste une fraction non recristallisée dans le matériau (matériau partiellement écroui). Ce n'est que lorsque le matériau est complètement recristallisé qu'il recouvre son allongement qui reste la caractéristique principale requise par l'entreprise.

Ce qui est à noter, en comparant les microstructures de l'échantillon recuit à 800°C pendant 20 secondes élaboré en laboratoire avec celui recuit à CATEL (Figures VII.13 et VII.4.a respectivement), c'est que la taille des grains n'est pas la même. Ceux de l'échantillon recuit à CATEL sont beaucoup plus gros que ceux de l'échantillon recuit à 20 sec au laboratoire. Ceci est peut être du à un temps de maintien supérieur à celui nécessaire pour arriver à la recristallisation primaire. Pour vérifier cela, on a procédé à un autre recuit à 800°C mais cette avec un temps de maintien de 25 secs.

- Recuit à 800°C avec 25 secs de maintien :

La figure VII.15 ci-dessous montre la microstructure de l'échantillon recuit à 800°C avec un temps de maintien de 25 secondes.

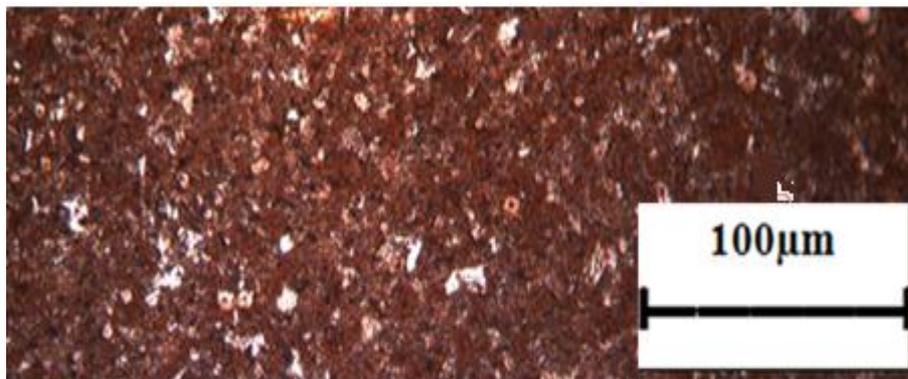


Figure VII.15. Recuit à 800°C avec 25 secondes de maintien.

Cette microstructure correspond à celle obtenue pour l'échantillon recuit à CATEL. 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.

Les résultats de l'essai de traction ont donné un allongement de 39.39% et une charge à la rupture de 226,76 MPa, ces résultats sont très proches de ceux trouvés pour l'échantillon recuit à CATEL ce qui confirme l'interprétation citée auparavant.

La courbe de traction est donnée par la figure VII.16.

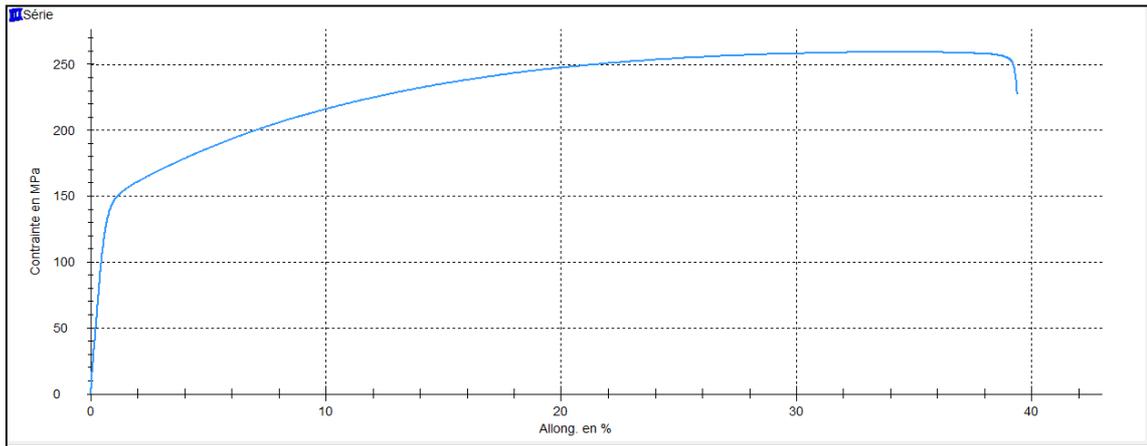


Figure VII.16. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 800°C avec 25s de maintien.

Le recuit à CATEL est donc équivalent à un recuit à 800°C dans un four avec un temps de maintien de 25s, alors que, d'après les résultats trouvés, un recuit avec 20s de maintien à la même température aurait suffi.

En supposant que la relation entre le maintien à CATEL et celui du four à l'école soit linéaire, le temps de maintien à CATEL étant égal à $(2,65 / 31,5)$ soit 0,084s où 2,65 m représente la longueur du fil passant entre l'anode et la cathode et 31,5 m/s la vitesse de tréfilage.

On peut énoncer ce qui suit :

Le temps de maintien de 0,084s correspond à notre temps de maintien de 25s. Un temps de 20s correspondrait à un temps de 0,062s à CATEL. Avec ce temps on pourrait augmenter la vitesse de tréfilage de 31,5 m/s à 42,7 m/s. Cette augmentation permettra à CATEL d'augmenter la quantité de cuivre produite par jour de 322,56 km.

Ces chiffres sont donnés à titre d'exemple car nous ne connaissons pas les interrelations entre les temps de maintien (ceci peut constituer un sujet d'étude), ils expliquent seulement l'importance des 5s de plus à l'échelle industrielle.

VIII.2.2.2.3 Caractérisation des échantillons recuits à 700°C

Après avoir effectué des recuits à 800°C, on a essayé de faire un traitement à 700°C 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.

- Recuit avec 20s de maintien :

La microstructure ainsi que les résultats de l'essai de traction sont donnés respectivement dans les figures VII.17 et VII.18.

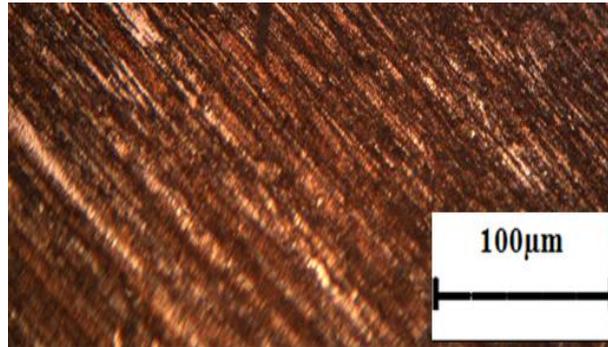


Figure VII.17. Recuit à 700°C avec 20 secondes de maintien.

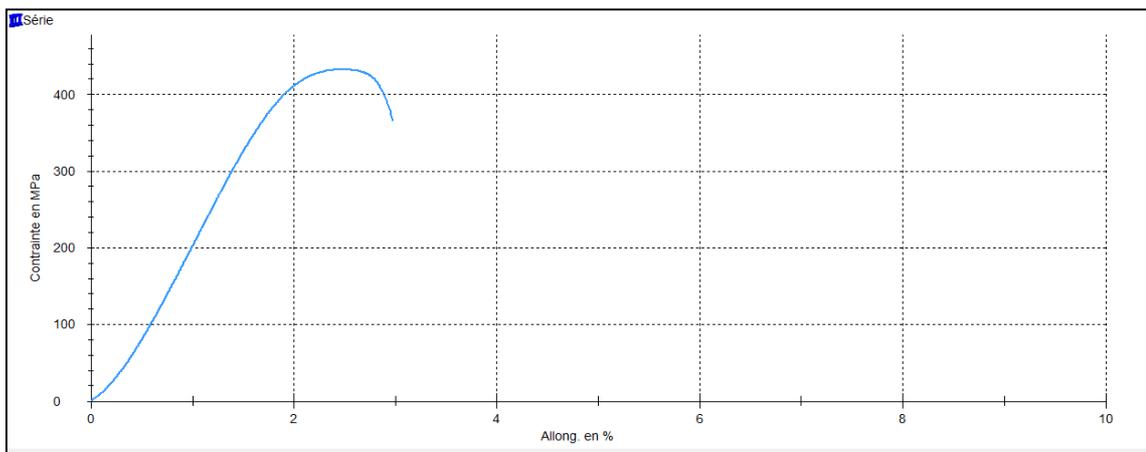


Figure VII.18. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 20s de maintien.

- Recuit avec 30sec de maintien :

Les figures VII.19 et VII.20 montrent respectivement la microstructure et la courbe de traction de cet échantillon.

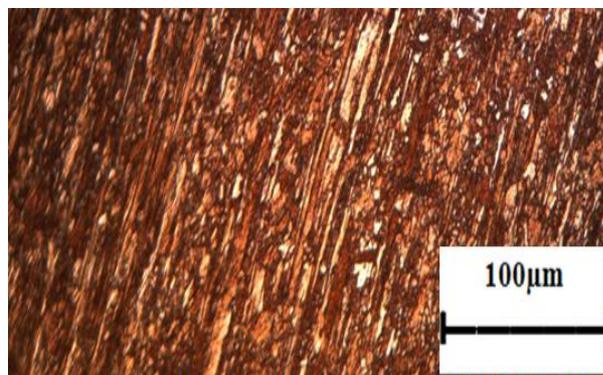


Figure VII.19. Recuit à 700°C avec 30 secondes de maintien.

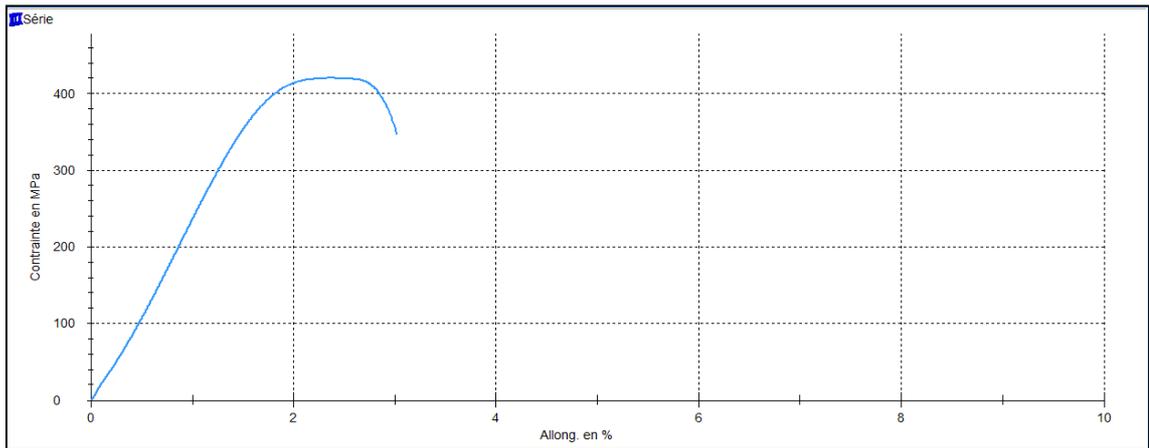


Figure VII.20. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 30s de maintien.

- Recuit avec 35s de maintien :

La micrographie ainsi que la courbe de traction sont illustrés dans les figures VII.21 et VII.22 respectivement.

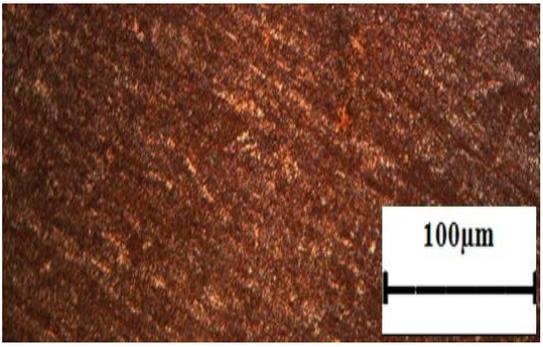


Figure VII.21. Recuit à 700°C avec 35 secondes de maintien.

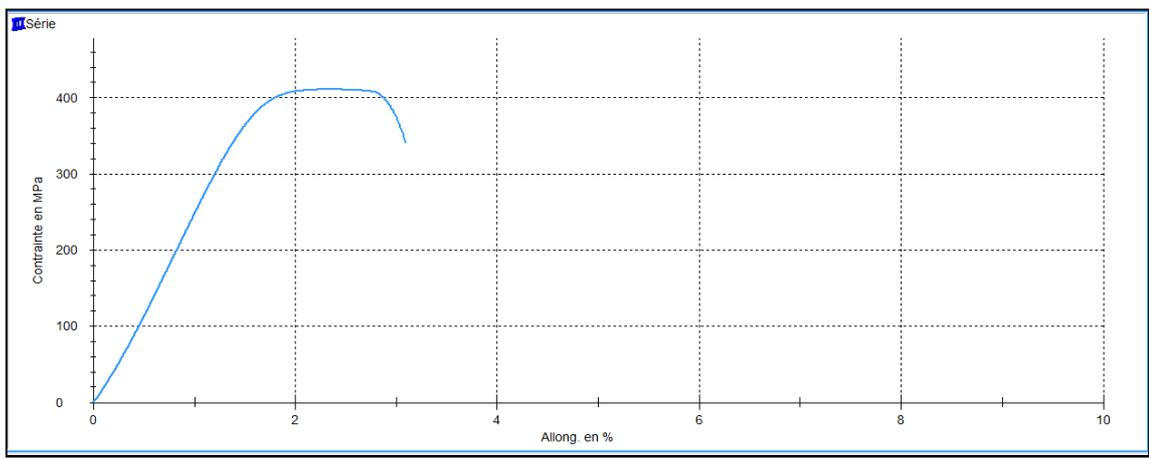


Figure VII.22. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 35s de maintien.

- Recuit avec 40s de maintien :

Les résultats sont donnés par les figures VII.23 et VII.24.

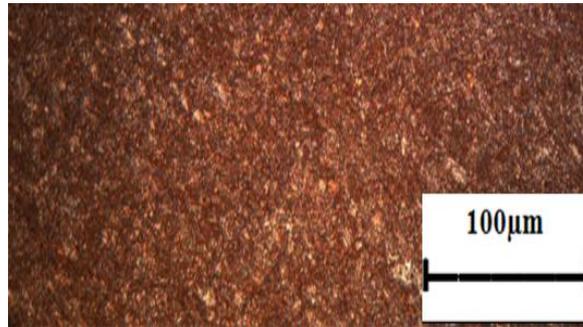


Figure VII.23. Recuit à 700°C avec 40 secondes de maintien.

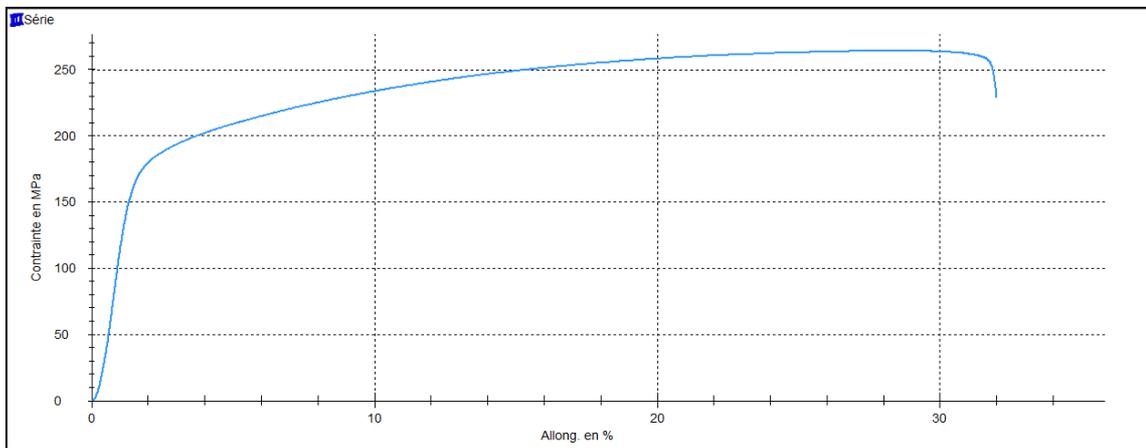


Figure VII.24. Courbe de traction de l'échantillon recuit à 700°C avec 40s de maintien.

On remarque, en étudiant ces résultats qu'ils sont similaires à ceux obtenus pour le recuit à 800°C, i.e. tant qu'il subsiste une fraction non recristallisée dans le matériau, l'allongement ne varie pas considérablement, mais quand le matériau est complètement recristallisé, il recouvre son allongement.

Le tableau XVI ci-dessus résume les résultats obtenus pour ces différents maintiens.

Tableau XVI. Résultats de traction des échantillons recuits à 700°C.

| Temps de maintien (s) | 20 | 30 | 35 | 40 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Allongement % | 2,90 | 3,02 | 3,09 | 32,00 |
| Charge à la rupture (MPa) | 366,29 | 346,79 | 341,04 | 228,68 |

L'allongement obtenu pour un recuit à 700°C et avec un temps de maintien de 40 secondes est conforme aux normes et aux exigences de l'entreprise.

On peut donc dire que l'entreprise pourra, éventuellement, réduire le courant électrique utilisé pour alimenter le four de recuit à une valeur qui donnera une température de 700°C. Cette réduction sera accompagnée d'une augmentation du temps de maintien dans le four de recuit de la tréfileuse et donc d'une diminution de la vitesse de tirage de la machine. Cette dernière entrainera certainement une diminution de la vitesse de production. Il faut donc trouver un compromis entre ces deux cas de figures :

- Augmenter la vitesse de production tout en gardant la même consommation d'énergie, ou bien,
- Réduire la facture d'électricité tout en réduisant aussi la cadence de production.

VII.2.2.2.4 Autres traitements de recuit réalisés

On a effectué d'autres recuits à des températures de 600°C, 500°C et 450°C. Ceci pour pouvoir étudier la variation de la fraction recristallisée pour les températures de chauffage étudiées.

Nous nous sommes arrêtés à une température de recuit de 450°C car le traitement de recristallisation du cuivre commence à une température de $0,4 T_f$ où T_f est la température de fusion du cuivre. Cette dernière étant égale à 1080°C, la recristallisation du cuivre commence donc à une température approximative de 430°C, au dessous de laquelle la recristallisation ne peut pas avoir lieu, ou se produit mais à des temps de maintien beaucoup plus élevés.

Les microstructures issues de ces traitements sont exposées dans les annexes.

VII.2.2.2.5. Courbes de recristallisations

Dans cette partie, nous avons exploité les micrographies obtenues après les différents recuits auxquels nous avons procédé pour tracer les courbes de recristallisation en fonction des temps de maintien. Les fractions recristallisées pour toutes les conditions étudiées sont regroupées dans le tableau XVII ci-dessous.

Tableau XVII. Résultats des fractions recristallisées pour les micrographies obtenues.

| Température (°C) | Temps de maintien (s) | Micrographies correspondantes | Fraction recristallisée (%) |
|------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 800 | 5 | Figure VII.7 | 0 |
| | 10 | Figure VII.9 | 3 |
| | 15 | Figure VII.11 | 40 |
| | 20 | Figure VII.13 | 95 |
| | 25 | Figure VII.15 | 100 |
| 700 | 20 | Figure VII.17 | 2 |
| | 30 | Figure VII.19 | 5 |
| | 35 | Figure VII.21 | 45 |
| | 40 | Figure VII.23 | 98 |
| 600 | 30 | Figure A.1 | 1 |
| | 40 | Figure A.2 | 5 |
| | 50 | Figure A.3 | 55 |
| | 60 | Figure A.4 | 83 |
| | 70 | Figure A.5 | 100 |
| 500 | 35 | Figure B.1 | 0 |
| | 45 | Figure B.2 | 6 |
| | 70 | Figure B.3 | 68 |
| | 95 | Figure B.4 | 100 |
| 450 | 65 | Figure C.1 | 7 |
| | 75 | Figure C.2 | 29 |
| | 90 | Figure C.3 | 65 |
| | 100 | Figure C.4 | 100 |

Il reste à noter qu'à la température de 400 °C, on n'a obtenu aucune recristallisation même avec un maintien de 360 secondes (figure D). De plus, en allant au-delà de ces temps de maintien, ça deviendrait industriellement irréalisable et économiquement pas très intéressant.

Les courbes de recristallisation sont tracées dans la figure VII.25 ci dessous.

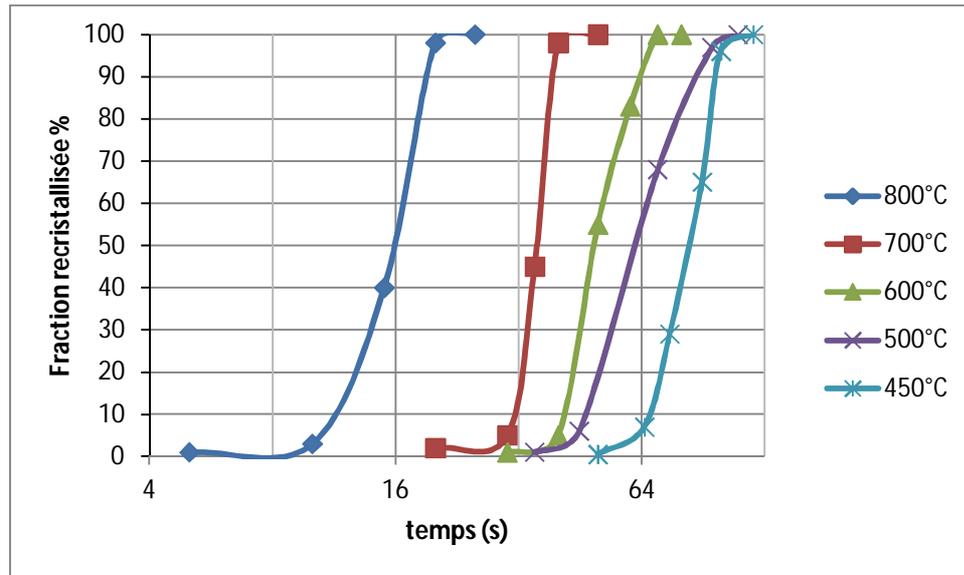


Figure VII.25. Courbes de recristallisation obtenues pour les différents recuits réalisés.

Les courbes obtenues pour les différentes températures de recuit ont approximativement la même allure. En effet on remarque que la recristallisation commence après un certain temps de maintien dit temps d'incubation et qui varie en fonction de la température. Ce phénomène s'accroît ensuite avec l'augmentation du temps de maintien jusqu'à la recristallisation totale (100%) où l'on remarque une stabilisation de la courbe et c'est là, qu'entre en jeu le mécanisme de recristallisation 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 mécaniques comme la limite élastique ainsi que la résistance à la rupture.

Ceci dit, on observe un décalage entre les courbes, ce qui était prévisible. Car la recristallisation est un phénomène thermiquement activé. C'est-à-dire que plus la température de recristallisation augmente, plus le temps pour obtenir une fraction recristallisée donnée diminue. Ceci est clairement visible sur la figure montrée ci-dessus ; où les courbes de recristallisation se déplacent à gauche à mesure que la température de recristallisation augmente.

En fonction des courbes de recristallisation ci-dessus, on peut tracer le graphe de la figure VII.26 qui représente la variation de t_{50} avec la température, t_{50} étant le temps nécessaire pour que 50% du matériau se recristallise. Cette figure en dit long sur la vitesse de recristallisation.

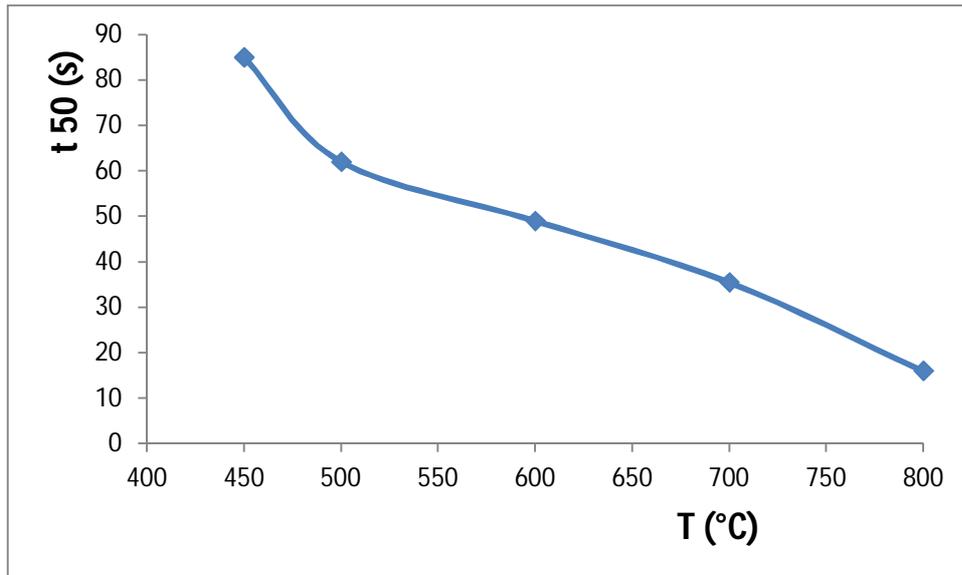


Figure VII.26. Evolution du temps de recristallisation en fonction de la température.

On peut lire facilement sur ce graphe que plus la température augmente plus le temps nécessaire pour la recristallisation diminue. Ce résultat est d'autant plus prévisible que logique car, il est clair que, pour un même taux de recristallisation, si on élève la température le temps de maintien diminue, et inversement.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION GENERALE

Le recuit de recristallisation est une étape primordiale lors du processus de fabrication des fils de cuivre Cu-a1. En effet, nous avons pu constater l'importance de ce traitement à travers les analyses que l'on a effectué sur différents échantillons de fils ayant subit un tréfilage à partir du fil machine. Ces analyses nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les observations micrographiques nous ont amené à comprendre que la microstructure du fil est altérée par la déformation imposée par le tréfilage, en effet on a pu observer un allongement des grains qui s'est fait dans le sens du tréfilage. Ces observations nous ont aussi permis de suivre l'évolution de la recristallisation en fonction du temps de maintien et de la température, et par conséquent on a pu tracer les courbes correspondantes sur lesquelles on a remarqué que plus la température de recuit est grande, plus la recristallisation totale est atteinte rapidement.
- 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.
- Les essais de résistivité ont confirmé que la conductivité électrique est une caractéristique intrinsèque du cuivre qui n'est pas influencée par la déformation causée par le tréfilage.

Perspectives

Ce travail, même si le thème principal est la caractérisation, pourra servir de base à une recherche plus méticuleuse qui étudiera une meilleure façon d'optimiser le recuit effectué à CATEL. Cette recherche pourra s'intéresser de près à la tréfileuse M81 sur laquelle nous avons pris nos échantillons ou même la T-3 (tréfileuse de petites sections).

En effet, 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.

Une telle étude et en s'inspirant des résultats trouvés dans ce présent document, pourra aider l'entreprise CATEL 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.

Références Bibliographiques

[CATEL]. Documents et archives de CATEL.

[1]. S. JAKANI. « Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé ». Mémoire de doctorat. Université Paris Sud-Orsay. (2004).

[2]. E. JDID, P. BLAZY. « Cuivre : ressources, procédés et produits ». Techniques de l'ingénieur. M2240. (2002).

[3]. J. LIGNON, R. MAILLEBUAU. « Etude des matériaux – II : matériaux non ferreux ». Technologies des fabrications mécaniques, fascicule 21. (1977).

[4]. J. B. GUILLOT. « Elaboration des matériaux ». Génie des matériaux, Ecole Centrale de Paris. (2001).

[5]. V. S. ANANTHAN, T.LEFFERS, N.HANSEN. « Materials, science and technology». Vol.7, p.1069. (1991).

[6]. B. ALONSO. « Résistance à la corrosion ». Centre d'Information du Cuivre, Laitons et Alliages CICLA. (2011).

[7]. G. SAADA. « L'état métallique – déformation plastique ». Techniques de l'ingénieur. M45. (1995).

[8]. T. RICHTON. « Dynamique et complexité de la déformation plastique étudié par émission acoustique ». Mémoire de doctorat. INP de Grenoble. (2006).

[9]. V. BRANGER, M.H.MATHON, T.BAUDIN. « Recrystallization, fundamental aspects and relations to deformation microstructure ». p.257. (2000).

[10]. M. A. GHORBEL. « Analyse numérique de la déformation des dislocations et applications à l'homogénéisation ». Mémoire de doctorat. ENPC. (2007).

[11]. P. COULOMB. « Les textures dans les matériaux cubiques ». Ed. Dunod. Paris. (1972).

[12]. K. ABADLI. « Etude de la texture des fils de cuivre en fonction de l'écroutissage engendré par le tréfilage ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger. (1982).

[13]. N. CHIHANI. « Etudes des propriétés électriques de tréfilés en alliages du système (SnZn), en vue de les remplacer par l'alliage (CuZn37) ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger. (2012).

[14]. Y. AKTOUF, M. HADJ-AISSA. « Comportement du cuivre et de l'aluminium au cours de l'écroutissage par tréfilage et au cours de la recristallisation ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger. (1989).

- [15]. M. COLOMBIE et Coll. « Matériaux métalliques ». 2^e édition. (2008).
- [16]. J. BERNARD, A. MICHEL, J. PHILBERT, TALBOT. « Métallurgie générale ». Ed. Masoon, 2^e édition. (1984).
- [17]. G. R. SIMONS, M. R. STOKES. « Computer simulation of an industrial wire drawing process ». Ed. Elsevier Science. P.937. (1993).
- [18]. N. YU, J. P. LE ROY. « Tréfilage des fils cuivreux ultra fins ». Techniques de l'ingénieur. M646. (1995).
- [19]. Groupe d'ingénieurs des tréfileries de CONFLANDEY. « Tréfilage de l'acier ». Techniques de l'ingénieur. M645. (1996).
- [20]. R. CHARPIGNY, R. NOSSENT. « Mise en forme de l'aluminium – tréfilage et étirage ». Techniques de l'ingénieur. M652. (1997).
- [21]. S. PUISSANT, P. Y. BONVIN. « Lignes d'extrusion en câbleries – étapes de fabrication ». Techniques de l'ingénieur. Am3641. (2006).
- [22]. M. D. HADID. « Evolution de la microstructure et des propriétés mécaniques et électriques lors d'un revenu après tréfilage d'un alliage d'aluminium ». Mémoire de magister. ENP Alger. (2012).
- [23]. C. LEVRAU. « Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs ». Mémoire de doctorat. ENSM Paris. (2006).
- [24]. B. LAPOSTOLLE. « Conditions de travail des filières de tréfilage ». Revue de métallurgie CIT. p1003. (1980).
- [25]. M. MANTEL, C. VACHEY. « Formage à grande vitesse – détermination d'une loi de comportement ». Techniques de l'ingénieur. M3025. (2006).
- [26]. I. MERDAS. « Caractérisation structurale et mécanique d'un fil d'acier après tréfilage ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger. (2009).

Annexes

1- La norme IACS (International Annealed Copper Standard) :

La Commission Electrotechnique Internationale se sert de données des années antérieures afin d'établir une valeur fixe pour la résistance au passage d'un courant électrique à l'intérieur d'un cuivre recuit étalon. Cette valeur repose sur une résistivité volumique de $1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ à $20^{\circ}C$. De même, sur la base de ces données, il est attribué au cuivre recuit étalon une masse volumique de 8890 Kg/m^3 .

Par conséquent la résistivité massique étant le produit de la résistivité volumique par la masse volumique, la résistivité massique du cuivre recuit étalon est de $0.15328 \Omega \cdot g/m^2$.

Cette norme spécifie aussi une conductivité du cuivre de 100 à 103%.

2- La norme ISO 9001 :

La présente Norme internationale ne vise ni l'uniformité des structures des systèmes de management de la qualité, ni l'uniformité de la documentation.

Les exigences en matière de système de management de la qualité spécifiées dans la présente Norme internationale sont complémentaires aux exigences relatives aux produits. Les informations sous forme de «NOTE» sont fournies pour clarifier l'exigence associée ou en faciliter la compréhension.

La présente Norme internationale peut être utilisée aussi bien par l'organisme en interne que par des parties externes, y compris des organismes de certification, pour évaluer sa capacité à satisfaire les exigences des clients, les exigences légales et réglementaires applicables au produit, ainsi que les exigences de l'organisme lui-même.

Les principes de management de la qualité présentés dans l'ISO 9000 et l'ISO 9004 ont été pris en compte au cours du développement de la présente Norme internationale.

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives au système de management de la qualité lorsqu'un organisme

a) doit démontrer son aptitude à fournir régulièrement un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables,

b) vise à accroître la satisfaction de ses clients par l'application efficace du système, y compris les processus pour l'amélioration continue du système et l'assurance de la conformité aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables.

Toutes les exigences de la présente Norme internationale sont génériques et prévues pour s'appliquer à tout organisme, quels que soient son type, sa taille et le produit fourni.

Lorsque l'une ou plusieurs exigences de la présente Norme internationale ne peuvent pas être appliquées en raison de la nature d'un organisme et de son produit, leur exclusion peut être envisagée.

Lorsque des exclusions sont faites, les demandes de conformité à la présente Norme internationale ne sont acceptables que si ces exclusions n'ont pas d'incidence sur l'aptitude ou la responsabilité des organismes à fournir un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables.

3- Le Système de Management Environnemental 14001 (SME 14001) :

Le Management environnemental permet d'améliorer les performances de tout organisme vis-à-vis de l'environnement.

La norme ISO 14001 définit les exigences auxquelles doit répondre un SME pour être reconnu à travers une certification. A travers la mise en place d'une politique d'actions à l'égard de l'environnement, l'organisme dispose ainsi d'un cadre lui permettant :

- d'identifier et de maîtriser l'impact environnemental de ses activités, produits ou services ;
- d'améliorer en permanence sa performance environnementale ;
- de mettre en œuvre une approche systématique pour définir des objectifs et cibles environnementaux, les atteindre et démontrer qu'ils ont été atteints.

L'ISO 14001 exige un engagement envers la conformité à la législation et à la réglementation applicables en matière d'environnement, ainsi qu'une démarche d'amélioration continue (principe d'un SME). Précisons que le SME peut être un moyen d'atteindre la conformité réglementaire. Il n'est pas nécessaire que cette conformité soit complète pour être certifié.

4- La norme EN 1977 :

La présente norme européenne a été adoptée par le CEN (Comité Européen de Normalisation) le 28 Février 1998, elle spécifie la composition, les propriétés mécaniques, électriques et physiques pour le fil machine en cuivre à haute conductivité destiné à la fabrication du fil étiré à froid, principalement pour la fabrication des conducteurs électriques. La norme s'applique au fil machine dans neuf nuances de cuivre et neuf cuivres à l'argent. Normalement la section droite est ronde, dans la plage des diamètres situés au dessus de 6mm.

- L'échantillonnage :

Le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité d'échantillonnage prélevé pour 60 t du fil machine.

Pour la détermination de la composition chimique autre que l'oxygène, et pour le mesurage de l'allongement, le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité pour 500 t de fil machine.

Pour la détermination de la résistivité électrique, le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité par 200 t de fil machine.

Les unités d'échantillonnage doivent être découpées dans le matériau fini et les échantillons pour essai ou les éprouvettes préparées à partir de ceux-ci ne doivent être soumis à aucun traitement ultérieur, autre l'usinage nécessaire à la préparation des éprouvettes.

- L'allongement :

L'essai d'allongement doit se faire sur la section transversale totale du fil machine en utilisant la méthode d'essai de traction.

La charge doit être appliquée graduellement et uniformément à une longueur dressée de l'unité d'échantillonnage, en utilisant une longueur originale entre repères de 200mm. La vitesse de séparation des coulisses de la machine ne doit pas être supérieure à 240 mm/min.

- Résistivité électrique :

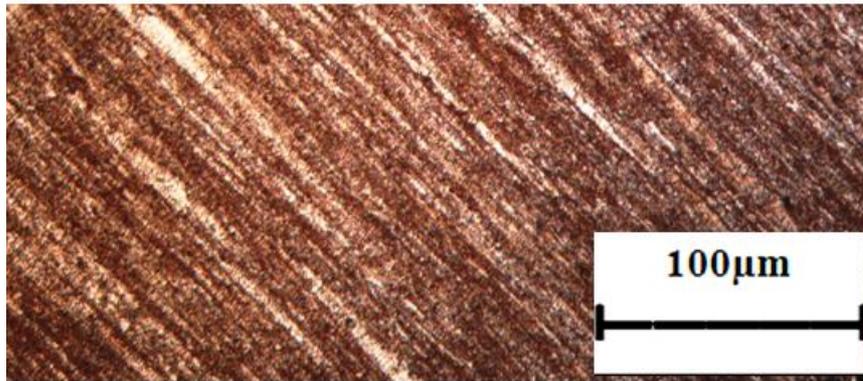
La résistivité volumique, rapportée à 20°C, doit être déterminée sur l'unité d'échantillonnage du fil machine soit :

- a- Par mesurage direct sur une unité d'échantillonnage nettoyé du fil machine, où
- b- Par mesurage d'une longueur de fil machine qui a été étiré depuis l'unité d'échantillonnage jusqu'à un diamètre de $2,00 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, embobinée sur un diamètre non inférieur à 200mm et recuit dans une atmosphère inerte à $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant au moins 30 min.

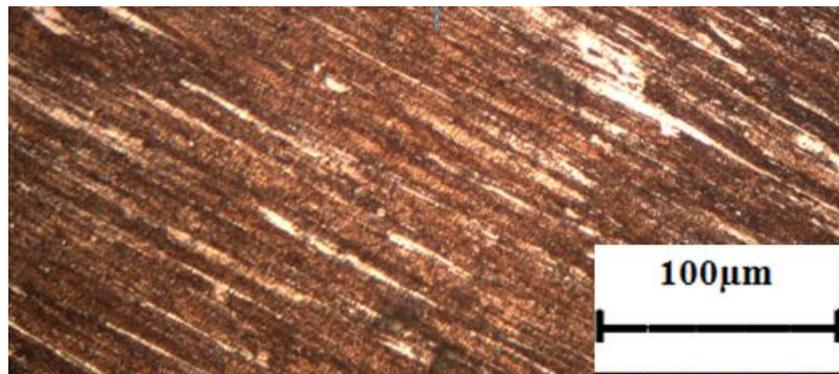
5- Micrographies :

Les micrographies des échantillons recuits à 600°C, 500°C, 450°C et 400°C ainsi que celles du fil machine sont données respectivement par les figures A, B, C, D et E.

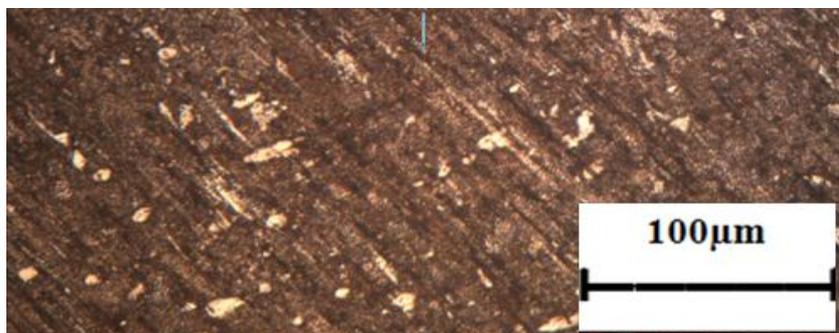
- Recuit à 600°C



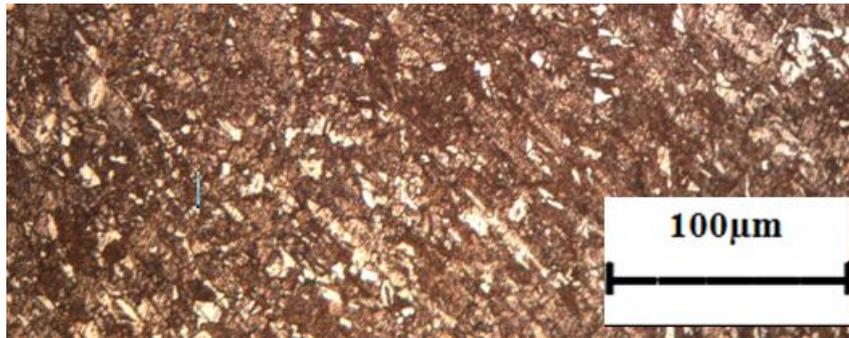
1. Coupe longitudinale 30secondes à 600°C.



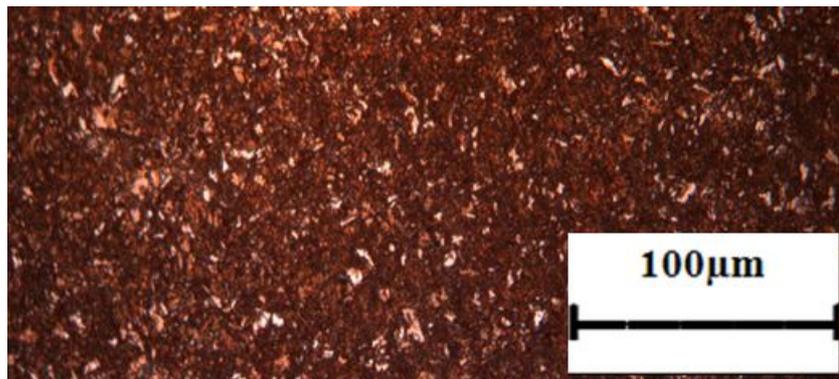
2. Coupe longitudinale 40secondes à 600°C.



3. Coupe longitudinale 50secondes à 600°C.



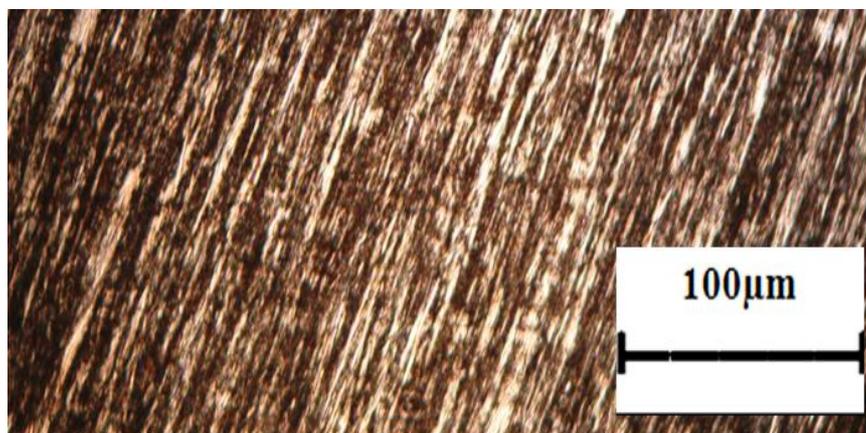
4. Coupe longitudinale 60secondes à 600°C.



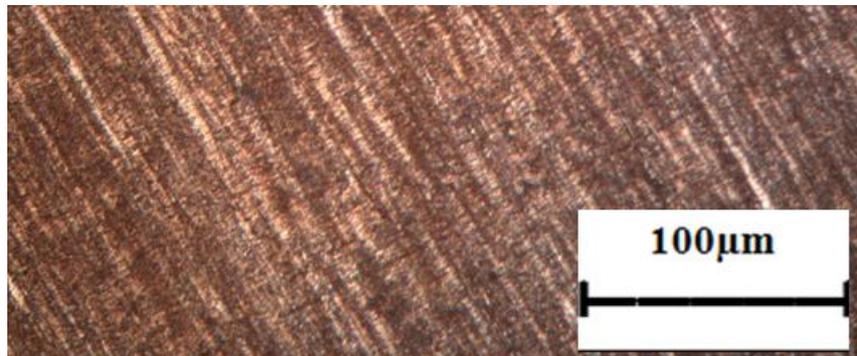
5. Coupe longitudinale 70secondes à 600°C.

Figure A. Micrographies à différentes durées de maintien à 600°C.

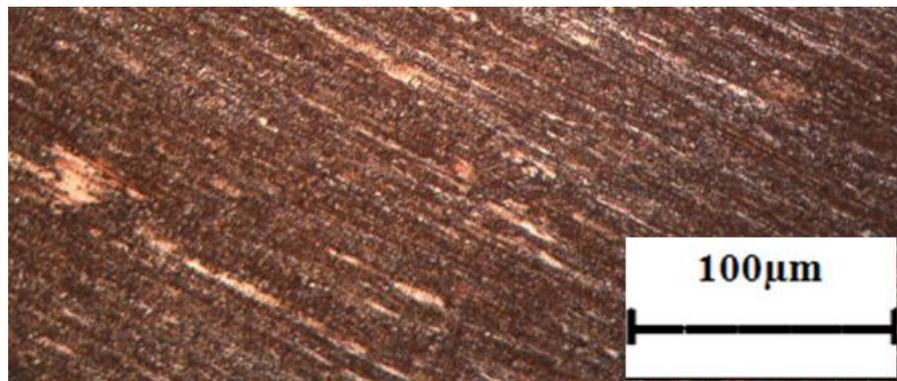
- **Recuit à 500°C**



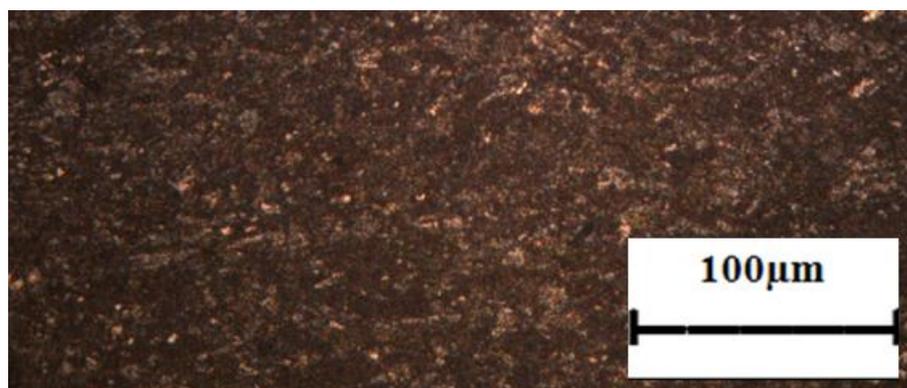
1. Coupe longitudinale 35secondes à 500°C.



2. Coupe longitudinale 45secondes à 500°C.



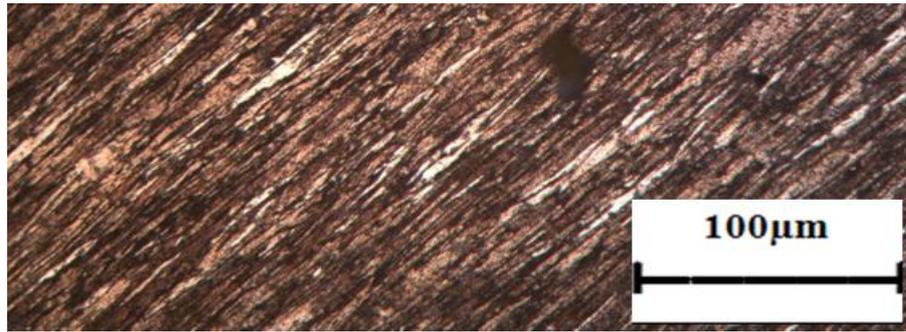
3. Coupe longitudinale 70secondes à 500°C.



4. Coupe longitudinale 95secondes à 500°C.

Figure B. Micrographies à différentes durées de maintien à 500°C.

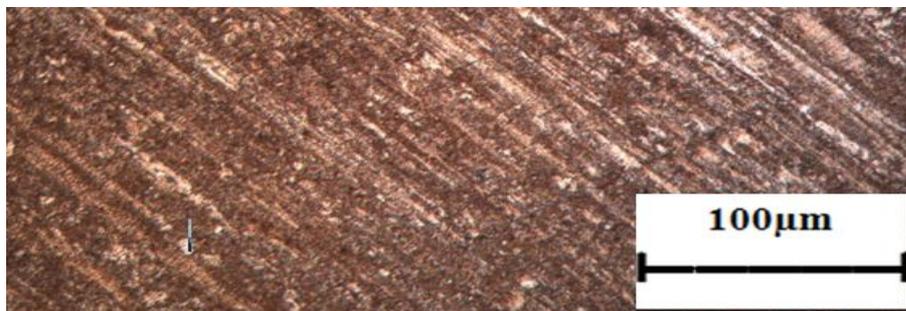
- Recuit à 450°C



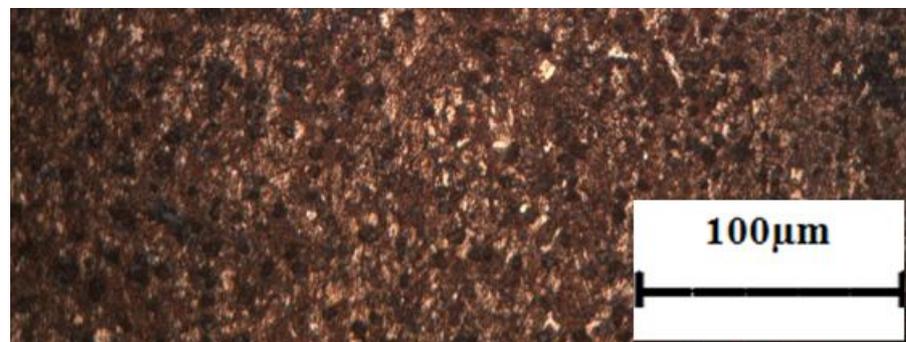
1- Coupe longitudinale 65secondes à 450°C.



2- Coupe longitudinale 75secondes à 450°C.



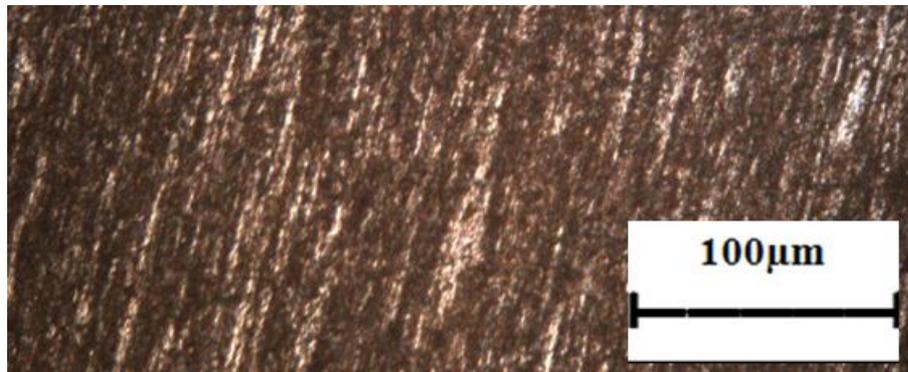
3- Coupe longitudinale 90secondes à 450°C.



4- Coupe longitudinale 100secondes à 450°C.

Figures C. Micrographies à différentes durées de maintien à 450°C.

- Recuit à 400°C



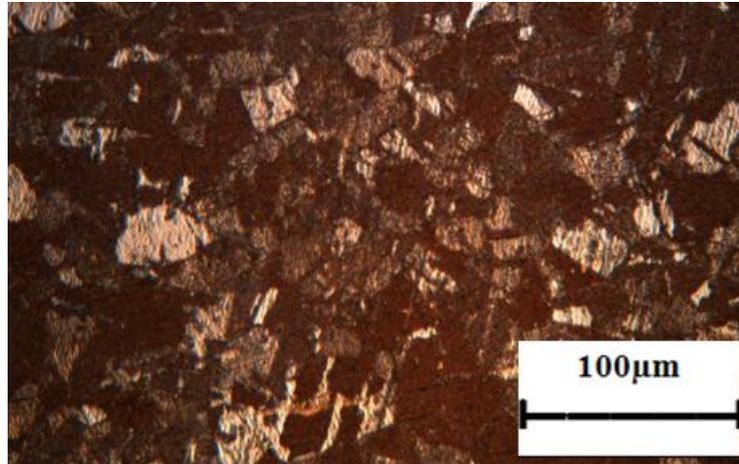
1- Coupe longitudinale 240secondes à 400°C.



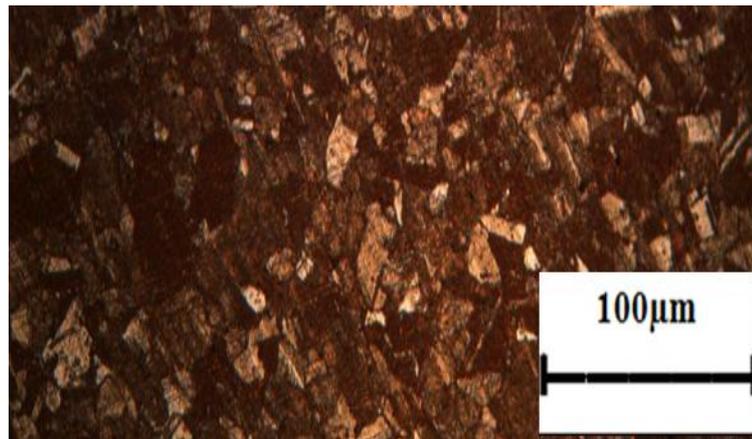
2- Coupe longitudinale 360secondes à 400°C.

Figure D. Micrographies des échantillons recuits à 400°C avec des temps de maintien de 240 et 360secondes.

- **Fil machine**



Coupe transversale.



Coupe longitudinale.

Figure E. Micrographie du fil machine de diamètre 8mm.