

# PROPRIETES MECANQUES ET ELECTRIQUES DU CABLE ELECTRIQUE EN CUIVRE SOUS L'EFFET DES TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES

## MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF COPPER ELECTRIC CABLE UNDER THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENTS

**S.BENSAADA, M.T.BOUZIANE, F.MOHAMMED**

Laboratoire LARHYSS, Université de Biskra  
Bensaada52@yahoo.fr

### RESUME

Les câbles électriques en cuivre destinés pour le transport de l'énergie électrique nécessitent un compromis de caractéristiques mécaniques – résistivité électrique. Le tréfilage est accompagné par la formation de défauts cristallins, tels que lacunes et dislocations, conduisant à l'élévation de la dureté, donc à l'augmentation de la résistivité, une caractéristique très importante pour la conductibilité et le rendement du câble. L'intérêt particulier de ce travail est de proposer une nouvelle gamme de traitements thermomécaniques appropriés pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques et électriques du câble électrique en cuivre. Différentes méthodes expérimentales ont été utilisées à cet égard, à savoir la microscopie optique, la dureté Vickers HV et les essais de corrosion.

**MOTS CLES :** recristallisation ; grains ; textures ; déformation; résistivité; température.

### ABSTRACT

Electrical cables in copper for the transportation of electricity requires a compromise of mechanical - electrical resistivity. The drawing is accompanied by the formation of crystalline defects such as gaps and dislocations, leading to higher hardness, thus increasing the resistivity, a very important characteristic for conductivity and performance of the cable. The particular interest of this work is to propose a new range of appropriate thermomechanical treatment to improve mechanical and electrical characteristics of copper electrical wire. Different experimental methods were used in this regard, namely optical microscopy, Vickers hardness HV and corrosion tests.

**KEY WORDS:** recrystallization, grain, texture, deformation; resistivity; temperature.

## 1 INTRODUCTION

Les câbles électriques en cuivre destinés pour le transport de l'énergie électrique nécessitent un compromis de caractéristiques mécaniques – résistivité électrique.

Le cuivre occupe une place importante dans le transport de l'énergie électrique, à cause de sa bonne conductibilité électrique et thermique.

La solidité du fil de cuivre et la fiabilité des contacts électriques qu'il permet d'obtenir sont les raisons essentielles de son emploi généralisé dans toute l'industrie de la construction électrique, dans la distribution de l'énergie électrique, ainsi que dans la fabrication de

matériels électriques et de composants électriques [1]. A titre d'exemple, 95% des fils conducteurs d'un airbus sont en cuivre. Malheureusement, cette propriété est altérée par la présence de certaines impuretés par la matière première, et ce même à des concentrations tolérées par la norme (ASTM B49) pour la qualité du cuivre (par exemple quelques ppm de S ou de Pb). Les impuretés retardent la recristallisation des fils de cuivre (importante pour les propriétés mécaniques, en particulier la diminution de l'allongement à rupture) [2]. Pour affiner la sélection des fils de cuivre en fonction de leur usage final, c'est-à-dire pour prédire les caractéristiques du fil (propriétés mécaniques, microstructure,...), il est nécessaire de pouvoir appréhender les mécanismes de déformation et de

recristallisation du cuivre en présence d'impuretés, peu ou pas étudiés dans la littérature.

Le tréfilage est accompagné par la formation de défauts cristallins, tels que lacunes et dislocations, conduisant l'élévation de la dureté, donc à l'augmentation de la résistivité, une caractéristique très importante pour la conductibilité et le rendement du câble [3]. Aujourd'hui maîtriser les microstructures en vue d'optimiser telle ou telle propriété est réalisable par des traitements thermiques ou thermomécaniques appropriés. Donc des traitements thermomécaniques appropriés peuvent améliorer les caractéristiques mécaniques, électriques et cristallographique du câble (l'affinement du grain est d'une importance capitale pour ces caractéristiques).

La déformation des métaux à température ambiante implique un écrouissage, lequel est considéré parfois le seul moyen d'élever la limite élastique et la dureté du matériau, mais lorsqu'on dépasse un certain taux de déformation (taux critique), il peut présenter des inconvénients en causant la fragilité au métal. Le taux critique d'écrouissage dépend essentiellement du matériau et des conditions d'emploi [4]

Une structure écrouie est caractérisée par des perturbations structurales ne se trouvant pas généralement en équilibre thermodynamique. Pratiquement une telle structure ne peut pas être adaptée à un usage industriel quelconque, car les propriétés d'emploi des métaux et alliages sont déterminés en très grande partie par la morphologie et le degré de dispersion des phases qui les constitue. Un apport d'énergie est nécessaire pour restaurer les propriétés et la structure que le métal possédait avant écrouissage [5].

La taille des grains obtenus après recuit de recristallisation, qui ne peut se produire qu'à partir d'un certain taux critique de déformation, influe beaucoup sur les propriétés du métal. Il faut éviter lors du formage à faible taux de déformation de procéder à un recuit de recristallisation, car on cherche toujours à obtenir une structure à grains fins, qui est plus résiliente est présente une rupture plus ductile qu'une structure à gros grains, qui n'est pas favorable pour des sollicitations mécaniques. Le choix de la température de recristallisation est fonction d'une part du taux d'écrouissage et d'autre part de la durée de recuit. Pour que les grains restent fins il faut choisir des températures de recuit non élevées et des durées de maintien courtes, car les températures élevées conduisent parfois au lieu d'une croissance normale des grains, la soudaine d'un petit nombre de grains qui envahissent très rapidement toute la masse recristallisée [6]. Le nombre de sites favorables à la germination est influencé principalement par le taux d'écrouissage. Cependant pour des taux d'écrouissage faibles il a été observé une germination avec distorsion des joints de grains [7] et pour des taux d'écrouissage élevés, les limites à grands angles produites par les bandes de cisaillement dans les grains initiaux, agissent comme lieu de germination [8].

Durant le processus de croissance des grains, le diamètre moyen des grains augmente simultanément avec la diminution du nombre de grains. Quels grains croissent et

quels grains disparaissent, cela est expliqué approximativement à partir du nombre de leurs interfaces [9], dont leur énergie interfaciale est supposée égale. Les arêtes des grains dont 3 se touchent respectivement, doivent former obligatoirement un angle de  $120^\circ$ . La courbure des interfaces entre les arêtes dépend du nombre d'interfaces figure.1, seulement pour le cas de 6 interfaces, les limites des grains sont rectilignes, pour un nombre d'interfaces inférieur, la courbure est convexe, donc voûter à l'extérieur et enfin pour un nombre d'interfaces supérieur, la courbure est concave. Une surface courbée à toujours tendance de se raccourcir en une surface plane. Les surfaces convexes croissent vers le centre des grains et les surfaces concaves à partir du centre. Une morphologie de croissance anormale pour certains grains est néfaste pour un matériau destiné à la mise en forme est conduit à une fragilisation [10].

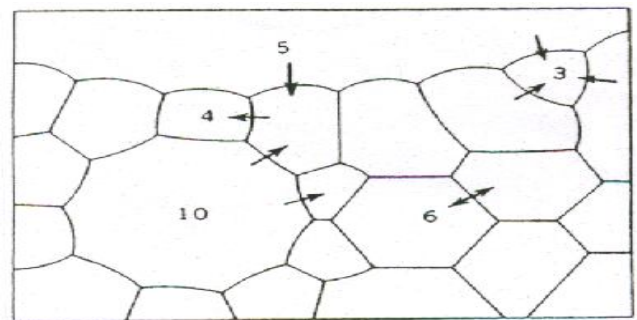


Figure 1: Structure schématique avec un angle de  $120^\circ$  dans des points triples, les courbures des interfaces ainsi que leur mouvement s'effectue selon le nombre des surfaces limites [9]

## 2 METHODES EXPERIMENTALES

Notre choix s'est porté sur le cuivre utilisés pour le transport de l'énergie et produit par l'ENICAB de Biskra, dont les caractéristiques sont données sur le tableau 1. Le cuivre occupe une place importante dans le transport de l'énergie électrique, à cause de sa bonne conductibilité électrique et thermique.

Les fils machine utilisés dans notre étude sont des fils produits par le procédé de coulée continue. Ils présentent une surface lisse et brillante de section circulaire de diamètre 10 mm. Le prélèvement des échantillons est effectuée sur le tréfilé (cuivre) lors des différentes étapes de tréfilage. Le prélèvement des échantillons est une opération d'une grande importance, car on doit tenir compte des hétérogénéités qui peuvent se présenter dans les échantillons, et en particulier entre les zones intérieures (cœur) et superficielles (peau). La direction du prélèvement a aussi une importance, car la structure n'est pas la même dans la direction longitudinale et transversale.

Afin que les échantillons ne subissent pas d'oxydation lors des traitements thermiques (recuit de recristallisation) un ensemble de recuit sous vide à été conçu à cet égard. La température de recuit de recristallisation choisi pour le cuivre est de  $250^\circ\text{C}$ .

Dans le but de mettre en évidence l'influence du taux de déformation sur les mécanismes de la recristallisation et des propriétés mécaniques, la déformation des échantillons est obtenue par laminage à froid en une seule passe, dont les taux d'écroutissage  $\epsilon$  (%) sont 10, 20, 30, 40, 50 et 60 % et leurs duretés HV sont respectivement 99,4, 101, 105,4, 109, 110,9 et 111,5. Les échantillons du cuivre avant déformation possèdent des duretés HV de 94.

Les techniques d'analyse utilisées dans ce travail sont :

- La microscopie optique.
- La dureté Vickers (HV).
- Essais de corrosion

Pour les observations aux microscopes optique, les échantillons sont polis sur une polisseuse mécanique avec papiers abrasifs de différentes granulométries du 180 au 1000, ensuite sur tissus feutrés avec addition du lubrifiant et de la patte diamantée de granulométrie 4, 1 et 1/2. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée, séchés, puis attaqués chimiquement par un réactif approprié Solutions concentrée de HNO<sub>3</sub> à 55% pour une durée d'attaque de quelques secondes.

Pour suivre l'évolution des propriétés mécaniques (mesure de HV) on a utilisé un duromètre Vickers du type Wolpert.

Et enfin pour les mesures électrochimiques on a utilisé un potentiostat relié à un ordinateur pour tracer les courbes de polarisation à l'aide d'un logiciel.

**Tableau 1 : Caractéristiques du cuivre et de l'aluminium produit par l'ENICAB Biskra**

Propriétés du cuivre	
Conductivity thermique (à 20°C)	3,93W/ (cm.k)
Coefficient de dilatation linéique (à 20°C)	17.10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Resistivity électrique (à 20°C)	1,7241.10-8E2.m
Coefficient de température (à 20°C)	3 93.10 <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Resistance a la température a la traction (à 20°C) Recuit	220Mpa
Ecroui dur	450Mpa
Limite d'élasticité (à 20°C) Recuit	55Mpa
Ecroui dur	90Mpa
Li <sup>è</sup> nite de striction	60 A 90Mpa
Module d'élasticité (à 20°C) Recuit	110 000Mpa
Ecroui dur	130 000Mpa
Conductivity thermique (à 20°C)	3,93W/ (cm.k)

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION

Après une déformation plastique à froid, le matériau emmagasine à l'intérieur des grains écrouis, principalement sous forme de dislocations, une certaine fraction d'énergie, le reste étant dissipé sous forme de chaleur. Il est bien connu que cette énergie (stockée) joue un rôle primordial dans les mécanismes de la recristallisation, en particulier elle influe considérablement sur la mobilité des joints de grains lors du recuit.

Les résultats de cette étude mettent en évidence, l'influence notable du taux de déformation sur la taille des grains lors du recuit Cuivre écroui et recuit à 250°C, c'est le stade initial qui est le plus sensible à la différence du taux de déformation. La recristallisation s'est produite instantanément et dans tous les échantillons quelque soit leur taux de déformation.

La croissance du grain n'a pas évoluée de la même cinétique pour tous les échantillons et elle est accompagnée d'une diminution de la dureté HV (élévation de la ductilité). Les valeurs maximales du degré d'affinement du grain sont obtenues dans le cas des échantillons à taux de déformation supérieur à 30% et enfin une compétition entre la germination et la croissance du grain a été observée à cette température.

Les figures 2 et 3 montrent respectivement l'état structural des échantillons a) à l'état brut, b) écroui, c) et d) recuit à 250°C pendant 30 minutes et pendant 120 minutes. Aux premiers stades du recuit, la germination et l'affinement du grain sont plus prononcé pour les taux de déformation élevés et elles sont accompagnées d'une chute de la dureté HV figure 4. Après 30 minutes de recuit, les grains obtenus sont de taille hétérogènes et relativement plus fins pour le cas des échantillons à taux de déformation élevé. Cependant le prolongement de la durée de recuit jusqu'à 120 minutes a conduit à une croissance du grain pour tous les échantillons. Les courbes de polarisation potentiodynamique du cuivre pur en milieu acide Hcl (1ml) figures 5, 6 et 7 mettent en évidence la polarisation potentiodynamique du cuivre dont la polarisation anodique augmente dans le sens de la vitesse de dissolution active. La courbe de polarisation anodique du cuivre comporte donc dans le domaine actif situé entre E<sub>corr</sub> et E<sub>corr</sub>+50mv, une dissolution active du cuivre selon l'équation  $Cu \rightarrow Cu+2+2e^-$ .

Les électrons libérés de la dissolution active sont repris par H<sup>+</sup> selon l'équation  $2H^++2e^- \rightarrow H_2$

Le type de corrosion est uniforme avec une vitesse lente.

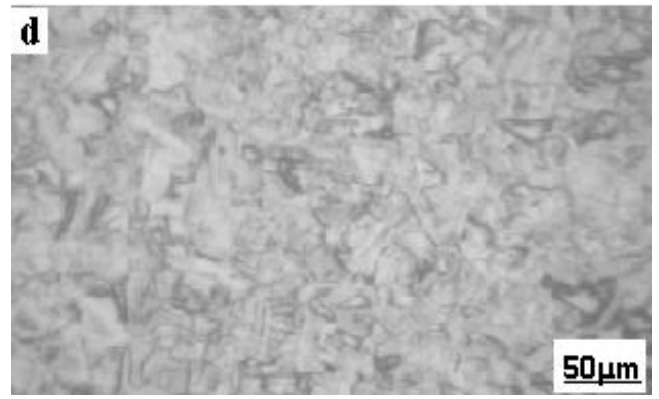
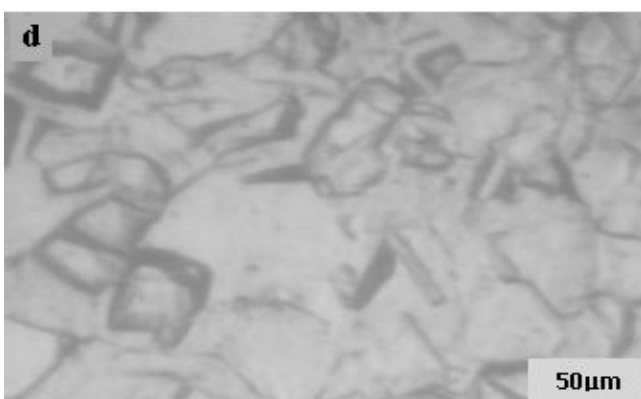
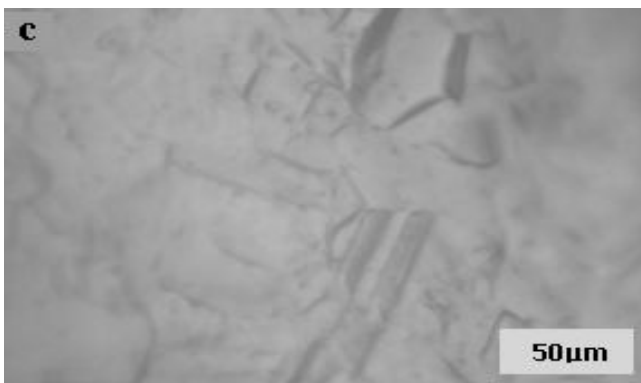
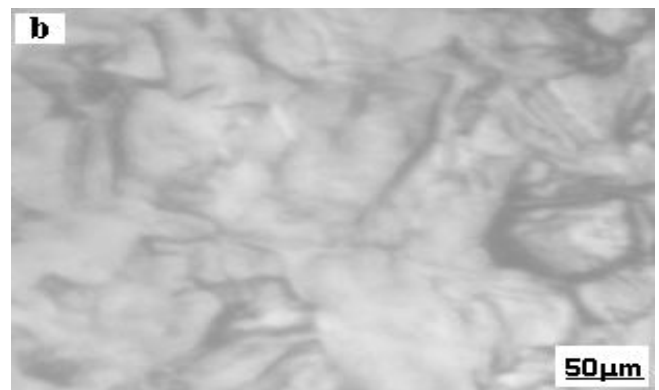
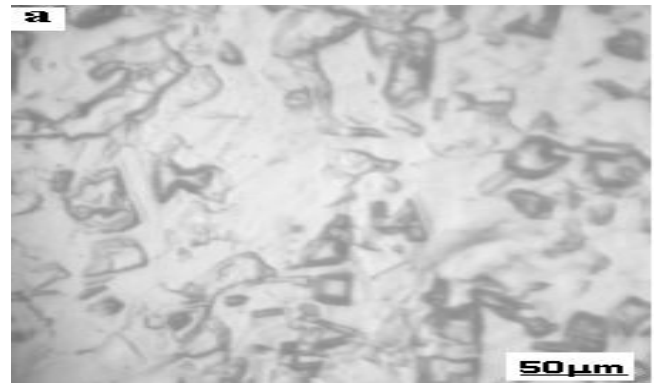
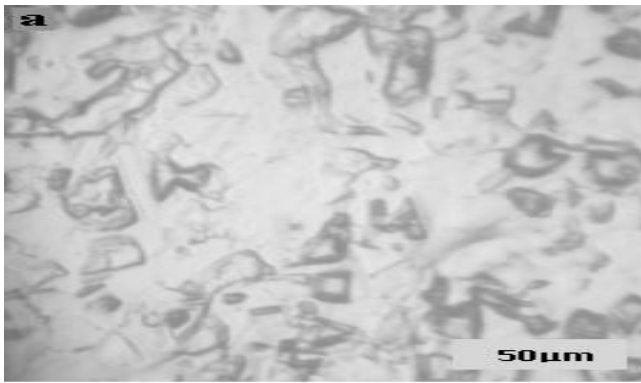


Figure 2: Evolution structurale du cuivre a- état brut, b- écroui ( $\epsilon=10\%$ ), c- recuit à  $250^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes et d- recuit à  $250^{\circ}\text{C}$  pendant 120 minutes.

Figure 3. Evolution structurale du cuivre a- état brut, b- écroui ( $\epsilon=30\%$ ), c- recuit à  $250^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes et d- recuit à  $250^{\circ}\text{C}$  pendant 120 minutes.

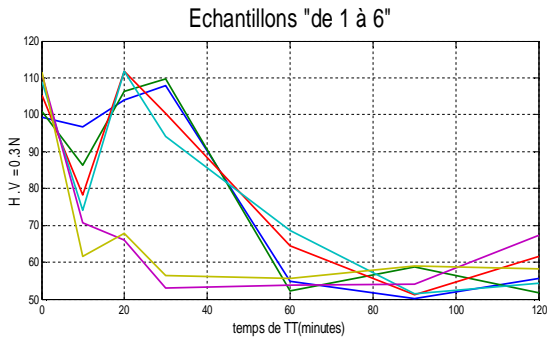


Figure 4: Evolution de la micro dureté HV temps en fonction de la durée de recuit de recristallisation (a) échantillon 1 ( $\epsilon= 10\%$ ), (b) échantillon 2, ( $\epsilon= 20\%$ ), (c) échantillon 3 ( $\epsilon= 30\%$ ) (d) échantillon 4 ( $\epsilon= 40\%$ ), (e) échantillon 5, ( $\epsilon= 50\%$ ), (f) échantillon 6 ( $\epsilon= 60\%$ )

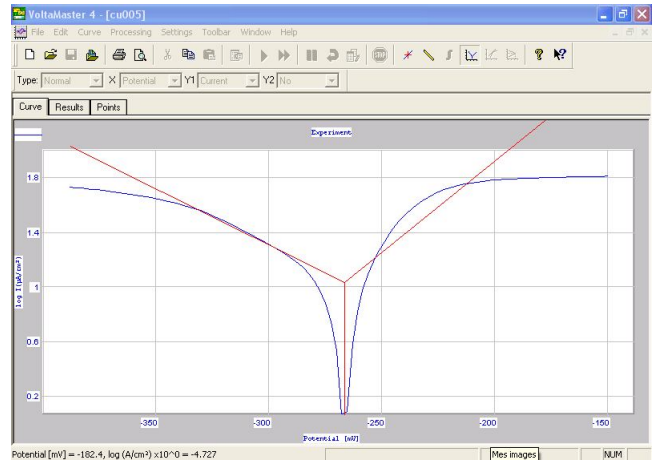


Figure 7: Courbe d'extrapolation droite de Tafel Cu de  $I(mA/cm^2)$  en fonction d  $E (Mv)$

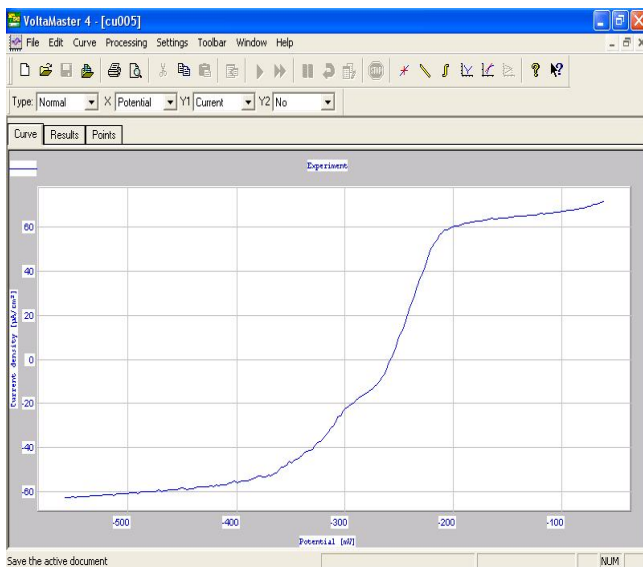


Figure 5 : Courbe de polarisation linéaire du Cu de  $I (mA/cm^2)$  en fonction de  $E (Mv)$

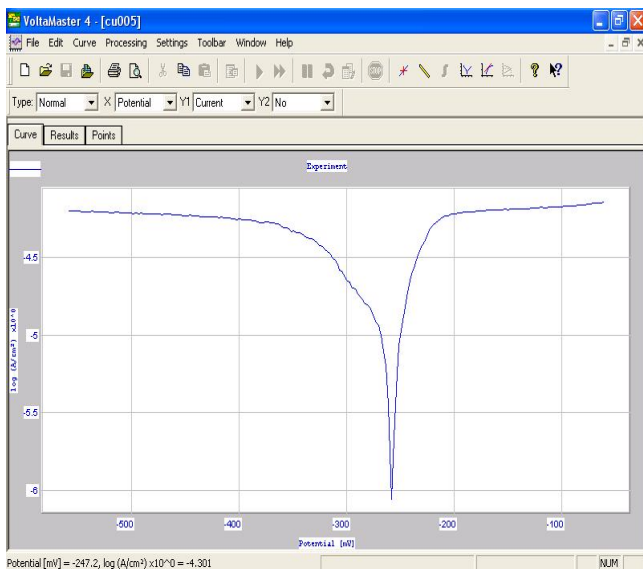


Figure 6: Courbe de polarisation logarithmique du Cu de  $\log I(mA/cm^2)$  en fonction d  $E (Mv)$

#### 4 CONCLUSION

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'influence du taux de déformation sur la taille des grains lors du recuit du Cuivre et de l'aluminium purs écrouis et recuits. C'est le stade initial qui est le plus sensible à la différence du taux de déformation. La recristallisation s'est produite instantanément et dans tous les échantillons quelque soit leur taux de déformation. La croissance du grain n'a pas évoluée de la même cinétique pour tous les échantillons et elle est accompagnée d'une diminution de la dureté HV (élévation de la ductilité). Les valeurs maximales du degré d'affinement du grain sont obtenues dans le cas des échantillons à taux de déformation supérieur à 30% et enfin une compétition entre la germination et la croissance du grain a été observée à cette température.

Pour les premiers temps de recuit (10 et 20 minutes) et pour tous les taux de déformation, la structure évolue vers un état où la texture est beaucoup moins prononcée, ceci s'accompagne par un léger adoucissement de l'aluminium (chute de la dureté HV), ce stade peut être considéré comme la restauration. Après des temps de recuit plus longs plus de 20 minutes, l'effet du taux de déformation est appréciable, et on peut constater que l'affinement du grain est plus prononcé dans les échantillons à taux de déformation élevés. La diminution de HV s'effectue dans le même sens que l'affinement du grain. Donc des traitements thermomécaniques appropriés peuvent améliorer les caractéristiques mécaniques, électriques et cristallographiques du câble (l'affinement du grain est aussi d'une importance capitale dans ce contexte. Cependant le prolongement de la durée de recuit a conduit à un grossissement des grains pour tous les taux de déformation.

Les courbes de polarisation potentiodynamique du cuivre pur en milieu acide Hcl (1ml) mettent en évidence la polarisation potentiodynamique du cuivre dont la polarisation anodique augmente dans le sens de la vitesse de dissolution active. La courbe de polarisation anodique du cuivre comporte donc dans le domaine actif situé entre  $E_{corr}$  et  $E_{corr}+50mv$ , une dissolution active du cuivre selon l'équation  $Cu \rightarrow Cu^{+2} + 2e^-$ .

Les électrons libérés de la dissolution active sont repris par  $\text{H}^+$  selon l'équation  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Le type de corrosion est uniforme avec une vitesse lente.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.D.Verhoeven, Fundamentals of physical metallurgy, John Wiley and Sons (1975), p. 48-52.
- [2] V.Novikov, grain growth and control of microstructure and texture in polycrystalline materials, CRC press, Boca Roton, FL.USA, (1977), p.24-29.
- [3] K.E.Hensger, Strukturveränderung beim erwärmtten plastisch verformter metalle, MWT, Bergakademie Freiberg, (1977), p.87-95.
- [4] R.Jonck, le tréfilé 39, Stuttgart, (1982), p.47-54
- [5] B.Bredendick, Fertigungstechnik 2, Verlagstechnik, Leipzig, (1966), p.47-54.
- [6] F.Abdelloua, Influence de la déformation plastique sur la dilatation thermique des alliages à base de cuivre, mémoire de magistère, (2002), p.53-59.
- [7] J.Boiley et P.Hirsch, Proc.Royal soc.A267, (1962), p.11.
- [8] R.D.Doherty, in Recrystallization of metals, ed.by L.Himmel, New York. Gordon and Breach, (1963), p.311.
- [9] P.G.Schewmon, Transformations in metals, MC.Grow-Hill, New York, (1969), p.118.
- [10] J.C.M.Li in Recrystallization, Grain Growth and textures, ASM, metals park, P45 (1966)