

## DEPARTEMENT DE METALLURGIE

### Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

Thème

# ETUDE STRUCTURALE D'UN FIL DE LAITON DESTINE A L'ELECTROEROSION ET EFFETS DU TRAITEMENT THERMIQUE

*Proposé et dirigé par :*

**Mr. A.DAIMELLAH.**

*Etudié par :*

**Mr. Omar TERHA**

**Promotion 2012**

E.N.P 10, Avenue Hassen-Badi, EL HARRACH, ALGER.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو فحص متالوگرافي لسلك من النحاس الأصفر (CuZn37) بواسطة المجهر الضوئي، من أجل رؤية البنية المزدوجة ( $\beta + \alpha$ ) لهذا السلك. و بنية الأسلاك المستعملة، الأمر الذي سمح لنا برؤية آثار التآكل على السلك (الفوهة).  
الاختبار الذي أجريناه بالمعالجة الحرارية بواسطة فرن دثر يقودنا إلى افتراضات المعالجات الحرارية خلال إنتاج السلك.

**كلمات مفتاحية:** التآكل الكهربائي، سلك نحاسي اصفر، بنية مزدوجة، المعالجات الحرارية

## Résumé

L'objectif de cette étude est de caractériser la microstructure d'un fil en laiton (Cu-Zn37) par microscopie optique. Sur le fil usagé, on a observé les effets de l'électroérosion (les cratères).

Le test de traitement thermique qu'on a effectué dans un four à moufle nous a conduit à faire l'hypothèse que le fil a été traité lors de son élaboration.

**Mots clés :** électroérosion, fil en laiton, structure biphasée, traitement thermique.

## Abstract:

The objective of this study is to characterize the microstructure of brass wire (Cu-Zn37) by an optical microscope. The used wire, showed the effects of EDM (craters).

The heat treatment we conducted in a muffle furnace suggests that the wire was heat treated during its production.

**Keywords:** EDM, brass wire, structure two-phase, Heat Treating

## Remerciements

Avant tout, merci à DIEU tout puissant pour sa bonté et sa clémence de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur DAIMELLAH de m'avoir accordé toute son attention en m'accompagnant et me dirigeant de la meilleure manière qui soit.

Je tiens à remercier tous les membres du jury, à savoir Mr MESRATI d'avoir accepté de présider le jury, Mr HELLAL et Mr CHITROUB qui m'ont fait l'honneur de traiter et d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier vivement l'ORFFE (BCR) de nous avoir procuré le fil de laiton, objet de notre étude. Je remercie Messieurs ZOUATI et ABDALLAH d'avoir bien voulu participer au jury.

Je tiens à remercier mes deux collègues, AKSSAS Kaci et ZAID pour leur aide appréciable.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants du département Métallurgie qui ont contribué activement à ma formation. Qu'ils trouvent dans ce mémoire le bien de ce qu'ils m'ont appris.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. Ma profonde gratitude à tout le personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir accueilli au sein de leur établissement et de m'avoir octroyé la meilleure formation qui soit.

Sans oublier tous mes instituteurs et enseignants qui m'ont pris en main depuis le primaire.

## *Dédicace*

*Chaleureusement je dédie ce modeste travail :*

- *A mes très chers et tendres parents, que Dieu les protège ;*
- *A mes frères Saïd, rafik et Sofiane, mes sœurs Zohra, Safia et Nourelhoda, la petite fille de ma sœur aya ;*
- *A toute ma famille ;*
- *A mes chers amis le trio du feu ;*
- *A tous mes amis et collègues du département de métallurgie, de l'Ecole et de la cité BOURAOUÏ;*
- *A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient.*

**TERHA Omar.**

## Liste des figures

Figure I.1 : Ionisation .....	4
Figure I.2 : Fusion-vaporisation de la matière.....	4
Figure I.3 : Éjection de la matière.....	5
Figure I.4 : La polarité.....	6
Figure I.5 : Mouvements orbitaux.....	8
Figure I.6 : Electroérosion par enfonçage.....	8
Figure I.7 : Electroérosion à fil.....	9
Figure II.1 : Diagramme d'équilibre cuivre-zinc.....	15
Figure II.2 : Structure de la phase $\beta'$ du diagramme cuivre-zinc.....	17
Figure II.3 : Exemple d'évolution de la taille des grains recristallisés en fonction de la température de recuit.....	22
Figure II.4 : Variation de la grosseur du grain en fonction du taux d'écroutissage pour des recuit à température et temps de maintien fixes.....	23
Figure II.5 : Évolution de $R_m$ , $R_{p0,2}$ et $A\%$ en fonction de la température de recuit....	23
Figure II.6 : Charge de rupture en fonction des allongements pour les état ecroui et recuit ménagé.....	24
Figure II.7 : Influence de la vitesse de refroidissement sur les proportions et la répartition des phases $\alpha$ (en clair) et $\beta'$ (en sombre) dans un laiton U-Zn Pb2. X 300- attaque au perchlorure de fer.....	26
Figure II.8 : Tension de vapeur du zinc dans les laitons en fonction de la température.....	28
Figure III.1 : Polisseuse.....	31
Figure III.2 : Polisseuse de finition.....	32
Figure III.3 : Dispositif expérimental de l'observation microscopique.....	33
Figure III.4 : Four à moufle MF 120.....	34

Figure III.5 : Dispositif expérimental pour mesurer la tension et l'intensité de courant.....	34
Figure IV.1 : Structure d'un fil neuf en laiton CuZn37, poli mécaniquement non attaqué.....	36
Figure (IV.2) : Structure d'un fil usagé en laiton CuZn37, poli mécaniquement non attaqué.....	36
Figure IV.3 : Structures d'un fil neuf en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.....	37
Figure IV.4 : Structure d'un fil neuf en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.....	38
Figure IV.5: Structure d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.....	39
Figure IV.6: Cratère sur la structure d'une section d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.....	40
Figure IV.7 : Structure d'une section d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.....	41
Figure IV.8 : Structure laterale d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.....	42
Figure IV.9 : Structure d'une surface latérale d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.....	43
Figure IV.10 : Cycle de traitement thermique de recuit d'un fil du laiton CuZn37.....	45
Figure IV.11 : Structure d'un fil neuf après le traitement recuit en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.....	46

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Précisions et dimensions typiques atteignables en $\mu$ EDM à fil .....	10
Tableau II.1 : Les principaux éléments d'addition de l'alliage CuZn37 .....	19
Tableau II.3 : Propriétés mécaniques et électriques pour certains types des fils en laiton CuZn37 .....	20
Tableau III.1 : Le choix des échantillons .....	30
Tableau III.2 : Principales étapes de polissage .....	31
Tableau IV.1 : Taux des phases dans le fil neuf .....	38
Tableau IV.2 : Tableau IV.2 : Les taux des phases dans le fil usagé (la section). .....	40
Tableau IV.3 : Taux des phases dans le fil usagé (la surface latérale). .....	43
Tableau IV.4 : Taux des phases dans le fil neuf après traitement thermique .....	46

# Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur l'électroérosion

I.1	Introduction .....	3
I.2	Principe.....	3
I.3	Les différents procédés d'EDM .....	7
I.3.1	L'électroérosion à plongée (DSEDM) .....	7
I.3.2	L'électroérosion à découpage (WEDM).....	8
I.4	Les performances de procédés EDM FIL .....	9
I.4.1	Le débit de matière .....	9
I.4.2	Qualité géométrique et métallurgique de la surface.....	10
I.4.3	Le diélectrique.....	11
I.5	Matériaux pour fils.....	11

## Chapitre II: Généralités sur les laitons et les traitements thermiques aux alliages cuivreux

II.1	Introduction .....	14
II.2	Diagramme d'équilibre.....	14
II.3	Laiton monophasé $\alpha$ .....	16
II.3.1	Propriétés particulières aux laitons monophasés $\alpha$ .....	16



II.3.2	Additions complémentaires dans les laitons monophasés .....	17
II.4	Laitons biphasés $\alpha+\beta$ .....	17
II.5	Alliage CuZn37 .....	18
II.5.1	Composition chimique .....	19
II.5.2	Propriétés physiques et caractéristique mécanique.....	19
II.6	Traitement thermique .....	20
II.6.1	Recuit.....	21
a.	Recuit de recristallisation .....	21
b.	Recuit ménagé .....	24
II.6.2	La trempe.....	24
II.6.3	Revenu .....	26
II.6.4	Atmosphères des traitements thermiques pour les laitons.....	27

### **Chapitre III: Dispositifs et techniques expérimentaux**

III.1	La métallographie.....	29
III.1.1	Prélèvement des échantillons.....	29
III.1.2	Préparation des échantillons .....	29
a.	Enrobage à froid .....	29
b.	Polissage .....	30
c.	Attaque chimique.....	31
d.	Observation microscopique .....	31
III.2	Les traitements thermiques .....	32

III.3	Mesure de la résistivité électrique.....	33
-------	--	----

## **Chapitre IV: Résultats et interprétations**

IV.1	Résultat et interprétation de l'examen métallographique des fils en laitons CuZn37 « neuf et usage ».....	35
IV.1.1	Les Résultats métallographie des fils neuf et usage.....	35
IV.1.2	Interprétation des résultats micrographiques.....	43
IV.2	L'effet du traitement thermique.....	43
IV.2.1	La micrographie du fil apres traitement thermique.....	44
IV.2.2	Interprétation du l'effet traitement thermique.....	46
	Conclusion générale.....	48
	<b>Bibliographie</b> .....	49

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

---

Les scientifiques soviétiques Boris et Natalya Lazarenko ont eu l'idée de rendre l'effet destructif des décharges électriques utilisables en 1943. Ils ont alors mis au point une méthode pour l'usinage des métaux par électroérosion. En 1965, Les premières expériences de EDM sont réalisées au 'PHILIPS RESEARCH LAB' en Hollande.

L'usinage par électroérosion est une technique procédant par fusion, vaporisation et éjection de la matière. L'énergie est apportée par des décharges électriques passant entre deux électrodes, la pièce et l'outil. L'électroérosion est incontournable pour réaliser des formes complexes dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques.

L'électroérosion est utilisée dans divers secteurs de l'industrie, pour usiner des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs : aciers trempés, alliages métalliques réfractaires, certains composites, etc. Le plus gros utilisateur est le secteur de l'outillage : moules de verrerie, d'injection de matière plastique, matrices, poinçons, filières. Le procédé est aussi utilisé en aéronautique, pour des perçages ou usinages sur aubes ou disques de turbine. Les autres utilisateurs sont le domaine nucléaire, le domaine médical (prothèses, aiguilles), la mécanique générale et l'automobile pour des applications particulières (perçage d'injecteurs Diesel).

Dès l'âge du bronze, l'homme produit des alliages de cuivre et de zinc par réduction simultanée des minerais oxydés de ces deux métaux. Ces productions, dont certaines ont pu atteindre la pureté du laiton actuel.

La plupart des machines à électroérosion par fil utilisent des fils de laiton standard. On peut les procurer auprès de plusieurs fournisseurs qui prétendent tous avoir les meilleurs fils au meilleur prix. Or, les différents fils n'offrent pas le même degré de qualité et de pureté. S'il est vrai que certains fils coûtent moins chers, il n'en demeure pas moins que leur utilisation entraîne une vitesse de coupe plus lente, de fréquentes ruptures de fil et des besoins accrus de maintenance compte tenu des impuretés qui bloquent les guides et autres composantes. Il faut donc se méfier de ces économies pouvant réduire la marge bénéficiaire et s'avérer fort coûteuses en bout de ligne pour l'entreprise.

L'objectif principal de ce travail de projet de fin d'études, est de connaître la structure d'un fil en laiton avant et après l'usinage par électroérosion, et l'effet des traitements thermiques sur la structure du fil. Ceci nous mené à répartir ce projet en quatre chapitres :

## INTRODUCTION GENERALE

---

- Nous abordons dans le premier chapitre une étude bibliographique sur les notions et différents procédés de l'électroérosion, ainsi que les matériaux pour fils.
- Le deuxième chapitre est consacré au laiton d'une façon générale, et précisément à la nuance CuZn37 et les principaux traitements thermiques des alliages cuivreux.
- Le troisième chapitre est consacré aux principaux dispositifs et techniques expérimentaux utilisés pour la micrographie et le traitement thermique.
- Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus de la micrographie et le traitement thermique, ainsi que leur interprétation.

Le mémoire se termine par une conclusion et perspectives.

# CHAPITRE I :

## **Généralités sur l'électroérosion**

## I.1 Introduction

L'électroérosion est une technologie intéressante pour usiner des formes complexes dans des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. Ce procédé connu à la fin de 1940, est principalement utilisé pour fabriquer des outils: moules d'injection, matrices de frappe (estampage), matrices de découpage, outils d'extrusion, etc [1].

L'utilisation de l'EDM est très répandue dans l'industrie parce qu'elle a une bonne précision de l'usinage, les procédés d'usinage sont indépendants de la dureté du matériau à usiner tels que les métaux et les alliages métalliques, le graphite et même certains matériaux céramiques [2]. Les matériaux à usiner doivent être électriquement conducteurs.

## I.2 Principe

La base de l'usinage par électroérosion est l'enlèvement de matière généré par une décharge électrique entre l'électrode pièce et l'électrode outil, immergées dans un liquide isolant (le diélectrique). La pièce doit donc nécessairement être conductrice [3]. On applique entre les électrodes une tension qui est plus grande que la tension de claquage, fixée par le pouvoir isolant du diélectrique et la distance des électrodes [4]. La tension de claquage dépend :

- de la distance pièce/électrode (le Gap)
- du pouvoir isolant du diélectrique
- de l'état de pollution du Gap

Le processus de décharge électrique commence là où le champ électrique est le plus intense, c'est à dire là où la distance pièce/électrode est la plus petite [3]. On observe trois phases :

- *l'initiation de la décharge*

Appelée phase d'ionisation (*figure I.1*), sous l'action du champ électrique, il se forme, par ionisation du diélectrique, un canal conducteur entre les deux électrodes. L'ionisation a lieu là où le champ électrique atteint une intensité maximale. Cette phase ne dure qu'un temps très bref (10 à 100 ns) par rapport à la décharge. Le canal

## GENERALITES SUR L'ELCTROEROSION

conducteur est formé d'un plasma, gaz qui subit une ionisation à très haute température (3 000 à 12 000 K). Ce plasma est constitué par des atomes métalliques évaporés aux électrodes.

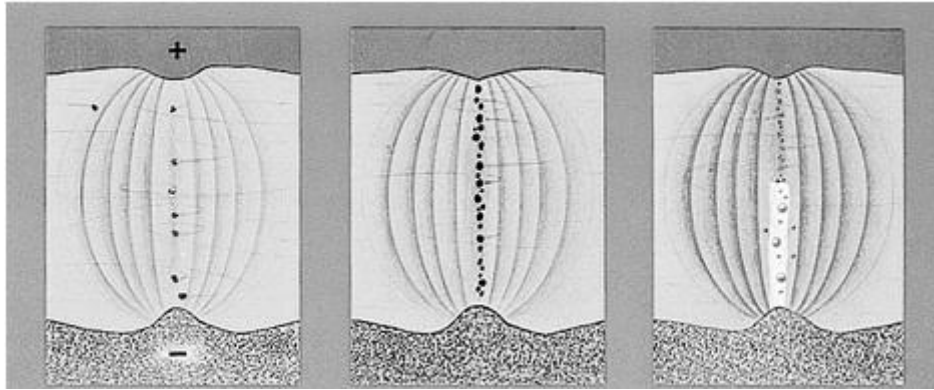


Figure I.1: Ionisation [7].

- *la fusion et la vaporisation de la matière*

Pendant cette phase active, l'intensité du courant croît et la tension diminue. Pendant quelques microsecondes à quelques millisecondes, les particules attirées par les deux électrodes vont y libérer leur énergie cinétique et y provoquer un échauffement très important. Les particules positives et négatives se dirigent respectivement vers la cathode et l'anode. La décharge est fortement concentrée dans un canal de petite section, et il en résulte des densités de courant très élevées, de l'ordre de  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> (*figure I.2*).

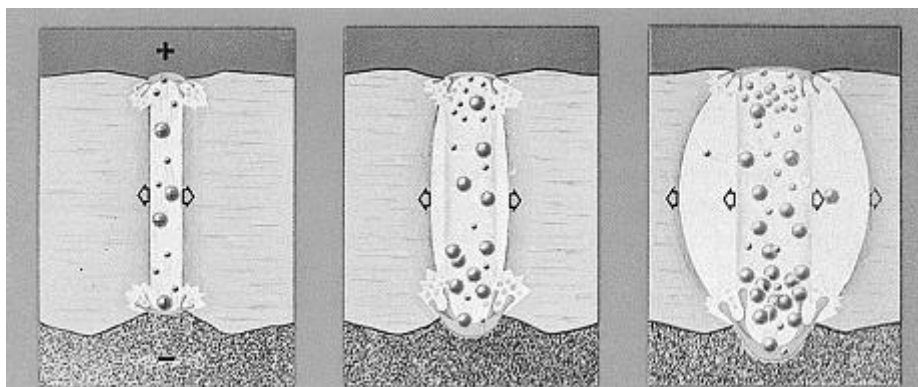
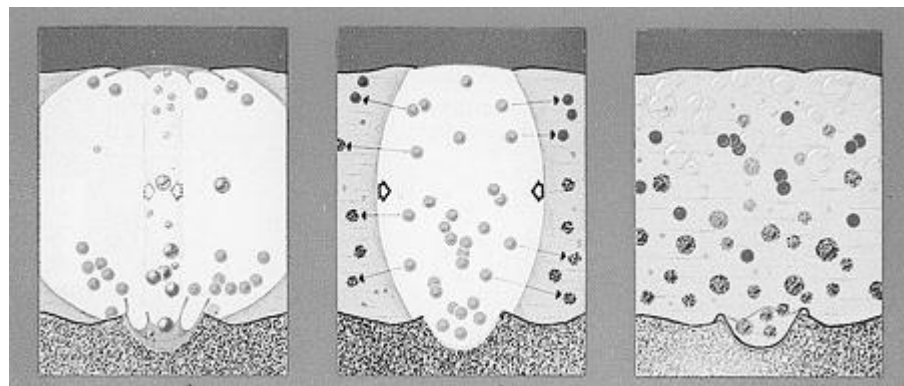


Figure I.2: Fusion-vaporisation de la matière [7].



- ***L'éjection de la matière***

Le circuit électrique est coupé, la bulle de vapeur se trouve entourée de liquide et de solides froids. À ce moment, la température dans la bulle de plasma est de 3 000 à 20 000 K. Des échanges thermodynamiques violents ont lieu. La fin de la décharge est traduite par un effet hydrodynamique : la cavité croît jusqu'à ce que sa pression interne soit minimale, puis sous l'effet de la pression hydrostatique du diélectrique, son volume diminue (**figure I.3**). Elle se scinde alors en deux parties. Le front de fusion des matériaux des électrodes régresse. Les deux bulles implosent. Une partie du métal encore à l'état liquide est éjectée sous l'impact du liquide diélectrique qui a acquis une grande énergie cinétique durant l'implosion de la cavité. Le métal fondu éjecté se retrouve au sein du diélectrique sous la forme de petites sphérules et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée solidifie sur place [4].



**Figure I.3 : Éjection de la matière [7].**

- **Influence de la polarité**

En général, les matériaux constituant l'électrode pièce à usiner et l'électrode outil sont de natures différentes. L'enlèvement de matière inégal sur l'électrode (usure) et sur la pièce (usinage) recherché par l'électroérosion, résulte à la fois des propriétés différentes des matériaux constituant la pièce et l'électrode et de la polarité à laquelle l'une et l'autre sont portées (**figure I.4**). Si l'on utilise le même matériau pour la pièce et l'électrode (ce qui est

## GENERALITES SUR L'ELCTROEROSION

---

rarement le cas), la polarité et la durée des impulsions font que l'enlèvement de matière sera plus important sur la pièce que sur l'électrode.

L'influence de la polarité peut être expliquée qualitativement en s'appuyant sur le mécanisme d'initiation à la décharge et sur le mode d'action de l'étincelle. Les particules négatives ou électrons, qui relativement légères se déplacent à vitesse très élevée vers l'électrode positive, d'autre part des particules positives provenant de l'ionisation des atomes du diélectrique avec une masse supérieure à celle des électrons et donc d'une mobilité inférieure.

Au début de la décharge ou lorsque la décharge a une durée très courte (quelques microsecondes au maximum), il y a d'avantage de particules négatives qui bombardent la surface de l'électrode positive que l'inverse, la mobilité des particules positives est inférieure à celle des électrons. L'élévation de température et par conséquent l'enlèvement de matière consécutif, est plus grand sur l'électrode positive. Pour des décharges de plus longue durée, le nombre relatif de charges positives augmente, ces particules libèrent à vitesse égale, une énergie supérieure sur l'électrode négative. L'enlèvement de matière est donc plus grand sur l'électrode négative [5].

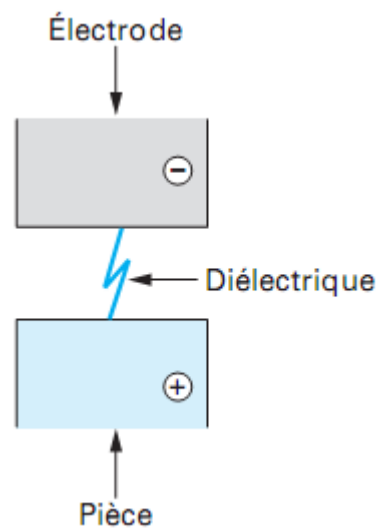


Figure I.4 : La polarité [7].

## I.3 Les différents procédés d'EDM

Il existe beaucoup de types de machines et d'applications qui utilisent le principe de l'électroérosion. Ci-dessous, nous passons en revue les procédés EDM les plus connus.

### I.3.1 L'électroérosion à plongée (DSEDM)

(DSEDM: Die Sinking Electrical Discharge Machining)

Type original ou conventionnel de système EDM nommé également die-sinking ou érosion par enfonçage. Les machines à plongée sont appelées sinker, ram-rype, conventional, plunge ou encore vertical EDM [5].

La reproduction de forme par défonçage consiste à utiliser un outil de forme et à le déplacer selon une direction. La matière est enlevée progressivement, et l'électrode outil reproduit petit à petit sa forme dans la pièce (Si la pièce est un moule, l'électrode a la forme de l'objet moulé). Son intérêt principal est de reporter la difficulté d'usinage direct de la pièce, liée au matériau ou à la forme à produire, sur l'usinage de l'électrode. L'usinage est normalement réalisé en trois phases: l'ébauche, la semi-finition et la finition. Souvent, plusieurs électrodes de différentes sous-dimensions sont nécessaires pour cela. Les mouvements orbitaux (*figure I.5*) permettent l'ajustement de la taille de la cavité et même l'utilisation d'une seule électrode toutes les étapes. Les machines standards actuelles sont dotées de 4 axes X, Y, Z et C interpolés (*figure I.6*), ce qui permet d'usiner des formes plus complexes que la simple reproduction de l'électrode outil. Les électrodes sont le plus souvent en cuivre ou en graphite [3,5,6].

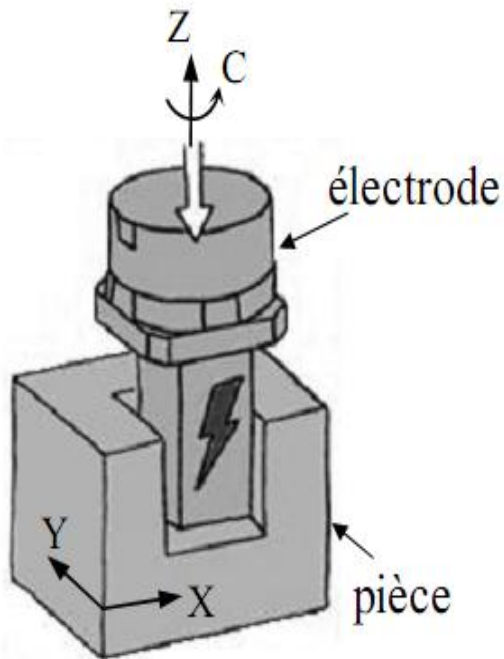


Figure I.6 : Electroérosion par enfonçage [5].

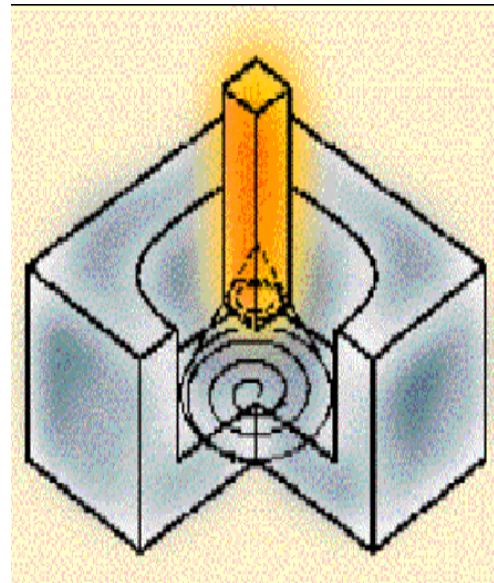


Figure I.5 : Mouvements orbitaux [3].

## I.3.2 L'électroérosion à découpage (WEDM)

(WEDM: Wire Electrical Discharge Machining)

Ce procédé d'EDM très répandu, utilise une électrode fil (naturellement flexible) qui se déplace à travers la pièce à usiner (*figure I.7*). Le mouvement relatif entre l'électrode fil et la pièce, est contrôlé par une CNC programmée pour découper la géométrie désirée.

La découpe est toujours traversante. Un flux de diélectrique (de l'eau déionisée) circule le long du fil entre les deux guides pour évacuer les déchets érodés. Son intérêt principal est de permettre de réaliser des coupes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm ; le plus souvent 0,2 ou 0,25 mm). Pour commencer un usinage, il faut soit entrer dans la pièce depuis le bord, soit percer un trou d'enfilage. Les machines actuelles sont dotées de 5 axes X, Y, U, V et Z interpolés, permettant d'usiner des pièces coniques en inclinant le fil [5,7].

- *La micro-électroérosion à découpage ( $\mu$ WEDM)*

Le  $\mu$ WEDM utilise des électrodes fil en tungstène jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre. Ce processus se concentre en principe sur des pièces de dimensions de 0.1 à 1 mm, dont l'épaisseur et le matériau sont impossibles à usiner par les procédés conventionnels de l'industrie des semi-conducteurs. Ces machines utilisent un système de transport du fil, spécialement développé pour des fils de diamètre d'une dizaine de micromètres, avec un générateur capable de contrôler de très faibles énergies [5].

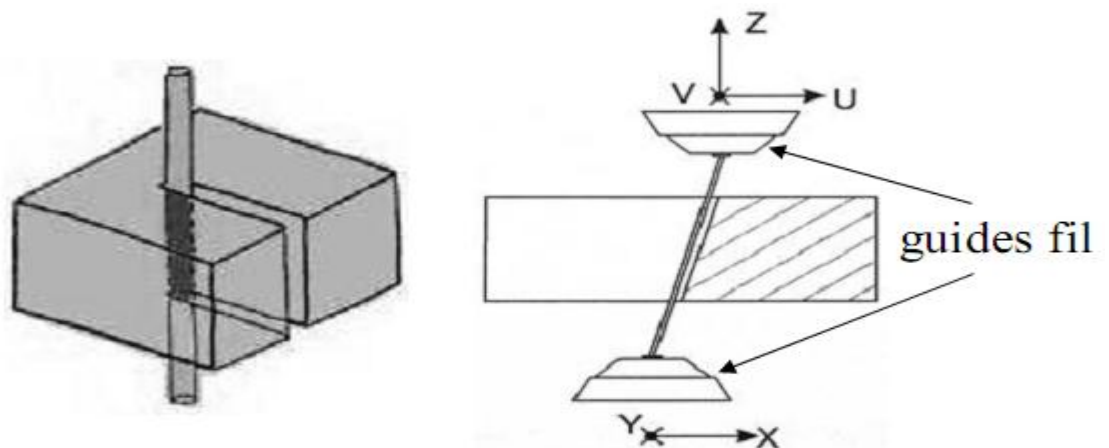


Figure 1.7 : Electroérosion à fil [5].

## I.4 Les performances de procédés EDM FIL

Les critères de performance sont définis par : Le débit de matière, la qualité géométrique et métallurgique de la surface, les matériaux pour fils et le diélectrique.

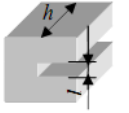
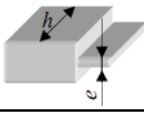
### I.4.1 Le débit de matière

La vitesse de découpe dépend du matériau à usiner, de l'épaisseur de la pièce, du diamètre et de la nature du fil, des conditions d'arrosage, de la machine. Lors de l'ébauche directe en pleine matière, les technologies modernes permettent de découper des surfaces allant jusqu'à 320  $\text{mm}^2/\text{min}$  pour les aciers à outils, et 430  $\text{mm}^2/\text{min}$  pour les alliages d'aluminium (dans des conditions optimales d'arrosage). Cela permet au procédé de concurrencer de plus en plus les techniques classiques telles que le fraisage [7].

## I.4.2 Qualité géométrique et métallurgique de la surface

*Le tableau I.1* donne les valeurs typiques de dimensions minimales et de précision, que l'on peut obtenir en érosion à découpage [5].

**Tableau I.1: Précisions et dimensions typiques atteignables en  $\mu$ EDM à fil [5].**

Rugosité moyenne arithmétique $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.1 – 0.2	0.2 – 0.3
Rugosité moyenne $R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.5 – 2.5	1 - 5
mortaise 	Largeur $l$ de cavité minimum [ $\mu\text{m}$ ] Rapport de forme $h/l$ maximum [%]	50-60 20-40
tenon 	Épaisseur $e$ minimum [ $\mu\text{m}$ ] Rapport de forme $h/e$ maximum [%]	20-40 20-40 15-25
Diamètre de perçage minimum [ $\mu\text{m}$ ]	-	20
Rayon interne minimum [ $\mu\text{m}$ ]	20	-
Rapport de forme maximum [%]	60-80	10-25
Les plus petits diamètres d'électrode [ $\mu\text{m}$ ]	30	10

La découpe par fil met en jeu une énergie plus faible que le défonçage. Par conséquent, les perturbations métallurgiques sont plus faibles. Cependant, elles ne sont pas absentes, et il peut être nécessaire d'enlever la couche perturbée si l'application l'impose.

On ne trouve aucune force d'usinage directe grâce à l'absence de contact entre l'outil et la pièce à usiner. En découpage par électroérosion, lors de l'utilisation des fils de  $\varnothing 20$ , 25, 30 ou 50  $\mu\text{m}$ , l'effet des forces du processus devient important, en regard des faibles forces de tension du fil et de la faible masse du fil.

Pour les applications courantes utilisant un fil standard de 0,2 mm, l'épaisseur de la couche perturbée est de l'ordre de 2 à 5  $\mu\text{m}$  dans l'acier. Pour les carbures métalliques, des cratères grossiers peuvent être créés si les décharges ne sont pas correctement maîtrisées. L'état de surface dépend de la puissance utilisée. En ébauche rapide pleine matière, on peut obtenir un critère **Ra** (Rugosité moyenne arithmétique) atteignant 4 à 5  $\mu\text{m}$ . Pour obtenir une meilleure rugosité, il faut réaliser une ou plusieurs passes de surfacage : on peut alors obtenir une valeur de **Ra** de 0,2 à 1  $\mu\text{m}$  couramment, de 0,1  $\mu\text{m}$  par des finitions poussées [7,5].

## I.4.3 Le diélectrique

Le diélectrique utilisé est l'eau. Il est en effet nécessaire d'utiliser un fluide à très faible viscosité pour évacuer correctement les particules et remplir l'espace inter électrode, qui est très étroit. L'eau est le fluide le mieux indiqué, pour sa faible viscosité et son bas prix. Pour lui fournir son caractère diélectrique, on utilise des résines piégeuses d'ions pour la désioniser.

L'arrosage peut être réalisé sous pression, jusqu'à 2 Mpa, par exemple, pour forcer l'évacuation des débris, particulièrement dans le cas de découpes complexes de forte épaisseur. Certaines installations permettent la découpe de pièces entièrement immergées, ce qui assure un bon renouvellement du fluide diélectrique et donne un meilleur maintien de la température de la pièce [7].

## I.5 Matériaux pour fils

Deux événements peuvent interrompre les décharges ou les perturber : *la rupture du fil*, qui arrête le phénomène ; *un mauvais lavage de l'espace entre pièce et fil*, qui peut conduire à la création d'un courant continu. Pour éviter la rupture du fil, il faut utiliser *un matériau à haute résistance à la traction*. Cette qualité permet aussi une meilleure rigidité du fil entre les guide-fils.

Pour fournir l'énergie nécessaire, il faut *considérer la conductivité électrique du matériau*. Le cuivre est un matériau à haute conductivité, souvent pris comme référence. L'argent est légèrement plus conducteur, les autres matériaux sont nettement moins bons. Le premier matériau utilisé fut le cuivre. Il fut très vite remplacé par d'autres, qui avaient une moins bonne conductivité, mais donnaient de meilleurs résultats, par exemple le laiton, qui a une bonne résistance mécanique et un meilleur pouvoir de fusion et vaporisation, qualités qui prévalent sur la conductivité électrique.

Il y a en effet deux autres caractéristiques extrêmement importantes et qui permettent un bon lavage de la zone pièce-fil : la température de fusion, la pression de vapeur.

*Une température de fusion basse* est intéressante car elle favorise l'usure du fil, qui augmente la section utile pour évacuer les débris.

*La pression de vapeur* est très importante : on préfère que le fil soit vaporisé plutôt que fondu, car, dans ce cas, il se produit des gouttelettes des gaz sont plus faciles à évacuer que des sphérules solides [7].

Par conséquent, les matériaux pour les fils ont des caractéristiques utiles :

- haute résistance à la traction (limite élastique, charge de rupture) ;
- haute conductivité électrique ;
- basse température de fusion ;
- basse température requise pour maintenir une pression de vaporisation donnée.

### ❖ **Le type des électrodes (fils)**

Les matériaux pour fils sont devenus disponibles grâce aux nouveaux types des matériaux. Chaque type a ses propres caractéristiques distinctes, et les développements récents donnent à l'utilisateur une variété de choix.

- ***Cuivre***

Le cuivre était le matériau d'origine d'abord utilisé en électroérosion à fil. Il a une conductivité électrique excellente, une faible résistance à la traction, un point de fusion relativement (aux alliages de cuivre) élevé et une faible pression de vaporisation. Aujourd'hui l'utilisation des machines avec des alimentations conçus pour fil de cuivre est limitée.

- ***Laiton***

Le laiton était le premier matériau qui remplaça le cuivre au début de la recherche des meilleures performances de l'électrode outil (fil). Le fil de laiton pour EDM, généralement est un alliage de cuivre (de 63-65% de Cu) et de zinc (35-37% de Zn). L'addition de zinc au cuivre permet d'augmenter significativement la résistance à la traction ; la pression de vaporisation, diminuer le point de fusion.



Le laiton est rapidement devenu le matériau d'électrode le plus largement utilisé pour les fils fins de l'EDM.

- *Laiton enrobé*

Lorsque les fils de laiton ne peuvent pas être tréfilés efficacement avec n'importe quelle teneur en zinc, ce qui conduit à un autre fil revêtu, parfois appelés "fil stratifié". Il est généralement constitué par un noyau en laiton ou en cuivre, pour assurer une bonne conductivité électrique et une haute résistance à la traction ; et un revêtement en zinc pur est déposé généralement par l'électrolyse ou par la projection thermique pour améliorer la formation d'étincelles [8].

# CHAPITRE II:

**Généralités sur les laitons  
et les traitements  
thermiques aux alliages  
cuivreux.**

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

## II.1 Introduction

Les laitons sont des alliages de cuivre contenant de 5 à 45% de zinc. Le cuivre a une solubilité élevée pour le zinc et les alliages sont très homogènes. Le laiton avec moins de 28% de zinc est appelé le laiton rouge et est tout particulièrement indiqué pour l'usinage. Lorsque le contenu en zinc augmente, la couleur rougeâtre du cuivre prend celle plus jaune du laiton. Les alliages contenant jusqu'à 37% de zinc sont constitués d'une solution  $\alpha$  solide et sont adéquats pour le façonnage à froid. Si son contenu en zinc est plus élevé, le laiton devient de moins en moins ductile et donc plus facile à usiner. A partir de 38% de zinc, les alliages montrent une microstructure biphasée  $\alpha$ - $\beta$  adéquate pour le façonnage à chaud. En ajoutant de l'aluminium, du manganèse, du fer, du nickel et de l'étain, des types de laiton spéciaux peuvent être produits ayant des propriétés chimiques ou mécaniques spécifiques. Des additions de petites quantités de plomb améliorent l'usinabilité du laiton.

Selon leur contenu en zinc, différents laitons sont utilisés dans différents domaines d'application: des montres et bijoux à la technologie électronique (CuZn5), aux ressorts, vis, tiges, des pièces de matrices de forgeage (CuZn30) aux armatures (CuZn40) et paliers pour les boîtiers de pompes résistants à l'eau de mer (CuZn10Sn2) [9].

## II.2 Diagramme d'équilibre

Le diagramme des alliages cuivre-zinc à forte teneur en cuivre (laiton) est donné par la *figure II.1*.

La solidification se fait de 100 à 67.5% Cu en solution solide  $\alpha$  ; de 67.5 à 62% en la même solution solide  $\alpha$  avec une réaction péritectique finale donnant une autre solution  $\beta$  à 63% au plus de cuivre ; au-dessous de 62% de cuivre donnant directement la solution solide  $\beta$ , puis par une nouvelle réaction péritectique une troisième phase  $\gamma$ .

Immédiatement après solidification, l'alliage est donc, selon la teneur en zinc, formé d'une solution solide  $\alpha$  riche en cuivre, d'une phase  $\beta$  à base de CuZn, d'une phase  $\gamma$  à base de Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub> ou d'un mélange  $\alpha\beta$  ou  $\beta\gamma$ . Lorsque la température baisse, le domaine se  $\beta$  rétrécit,

## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

mais sans disparaître complètement, et à une température qui, selon la composition, varie de 453 à 470°C, survient une transformation : la solution cubique centrée non ordonnée se transforme en une solution solide de même structure, mais ordonnée [10].

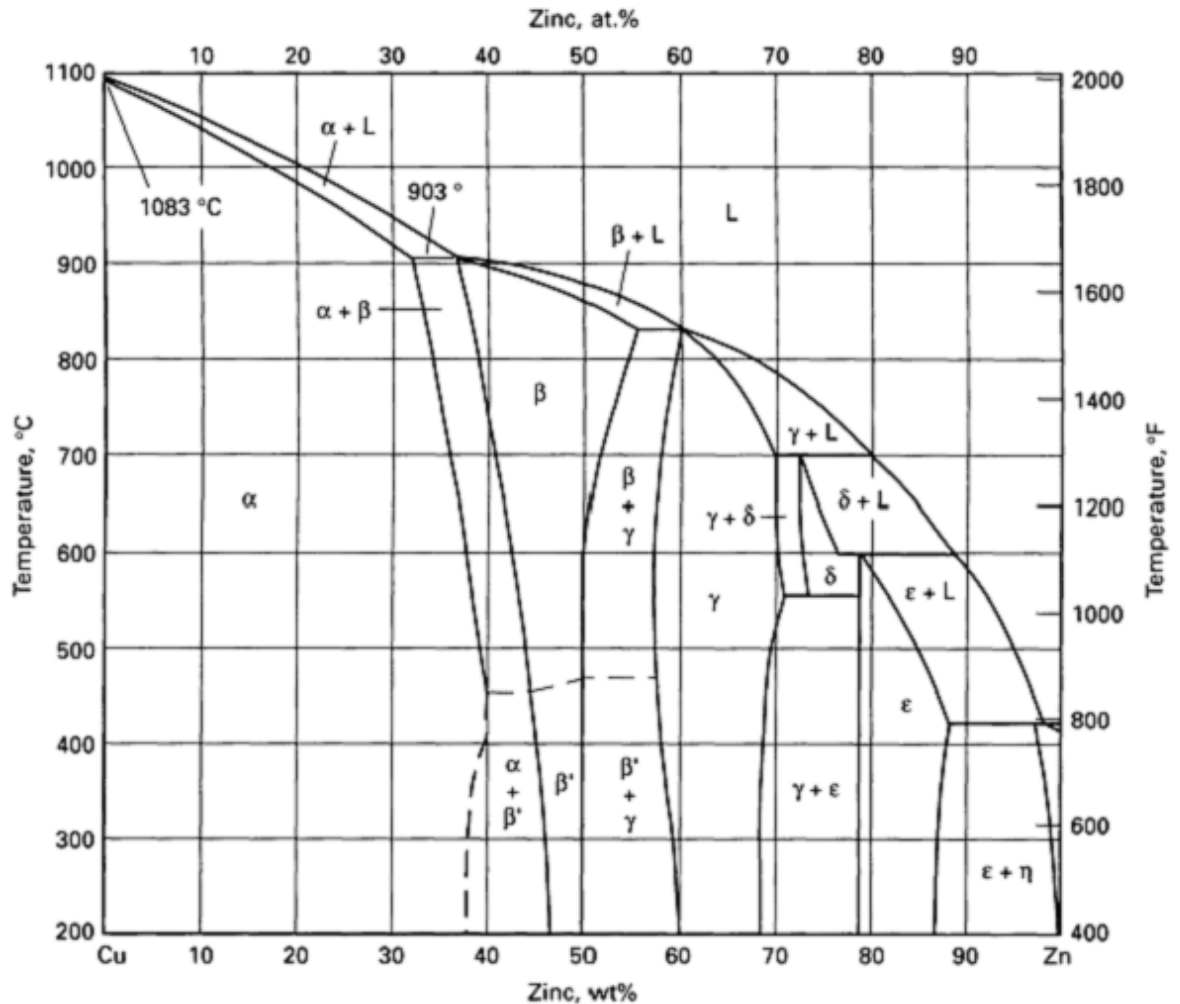


Figure II.1 : Diagramme d'équilibre cuivre-zinc [11].

Le solidus des laitons est toujours très voisin du liquidus ; les deux courbes sont même pratiquement confondues entre les teneurs de 38 et 50% de zinc.

Tous les laitons présentent à chaud une zone de fragilité, plus au moins étendue selon leur composition et qui vient restreindre le domaine où le travail à chaud est possible. Les décohésions qui se produisent dans ce cas sont surtout du type intergranulaire [10].

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

## II.3 Laiton monphasé $\alpha$

Le diagramme d'équilibre Cu-Zn (*figure II.1*) indique une solubilité maximale de 39 % Zn vers 450°C, qui décroît à plus haute et à plus basse températures. Mais dans les plaques ou billettes coulées, il existe des proportions croissantes de phase  $\beta$ , hors équilibre, pour une teneur en zinc supérieure à 30 % et, en pratique industrielle, il devient impossible d'éliminer totalement cette phase pour atteindre 100 % de phase  $\alpha$  homogène au-delà de 37 % de zinc [12].

### II.3.1 Propriétés particulières aux laitons monphasés $\alpha$

Les laitons  $\alpha$  industriels s'étendent donc de CuZn5 jusqu'à CuZn37 et leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques évoluent continûment avec leur titre en zinc. La résistance des laitons  $\alpha$  croît avec leur teneur en zinc jusqu'à l'apparition de la phase  $\beta$ . Au contraire la striction, l'allongement et la profondeur d'emboutissage passent par un maximum vers 28% de zinc.

Aussi les laitons à teneur en zinc à 28% ne sont-ils guère employés, sans addition complémentaire, que là où, avec une bonne capacité de déformation on recherche pour la facilité de mise en œuvre une dureté faible.

De 28 à 36 % de zinc, les laitons voient à froid leur allongement décroître régulièrement, tandis que leur résistance varie en sens inverse, sous réserve toutefois de l'influence de la dimension du grain, à laquelle les laitons monphasés sont particulièrement sensibles. Pour un travail à froid poussé, tous les laitons  $\alpha$  renommés pour leur ductilité à froid supportent des réductions de 90 % et plus par laminage ou étirage-tréfilage, et ils se prêtent à des mises en forme par pliage, emboutissage, formage, gravage mécanique (tôles) et forgeage à froid (barres et fils). Comme la grande étendue de leur zone de fragilité à chaud ne permet pas (sauf par filage) le travail à chaud des laitons  $\alpha$ , les alliages plus chargés en zinc devront être réservés pour les fabrications exigeant une moindre déformation [10,12].

A l'état moulé, les laitons sont peu résistants et utilisés seulement pour des pièces d'importance secondaire ; encoure se limite-t-on en générale aux alliages assez riches en zinc

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

(U-Z33), dont l'intervalle de solidification est plus étendu et qui offrent par suite un moindre retrait [10].

## II.3.2 Additions complémentaires dans les laitons monophasés

Le principal cas où de telles additions sont utilisées est, au moins pour la marine (celui des tubes condenseur). C'est par une addition d'étain que l'on croit alors habituellement la résistance à la corrosion par l'eau de mer, mais la teneur doit en rester assez basse ( $< 1.2$ ). La nuance classique de laiton *Amirauté* est *CuZn29Sn1*, où l'étain soluble favorise la formation en service d'une couche plus protectrice, même dans des eaux légèrement polluées de rivières et des estuaires (mais la présence de sable ou de vase en suspension ou d'un extrait sec supérieur à 0,4 % en masse proscrit son usage) [10].

**CuZn22Al2 (laiton à l'aluminium)** : où l'aluminium soluble fait renforcer notablement la tenue de la couche protectrice formée en début de service et confère au tube une bonne résistance à la corrosion-érosion ; c'est l'alliage le plus employé pour les tubes échangeurs refroidis à l'eau de mer, éventuellement polluée.

## II.4 Laitons biphasés $\alpha+\beta$

Le diagramme Cu-Zn (*figure II.1*) montre qu'au-delà de 32 % de zinc dans le cuivre apparaît progressivement une phase  $\beta$  qui remplace totalement la phase  $\alpha$  au-delà de 45 % Zn. Cette phase  $\beta$  est de structure cubique centrée (ou cubique à corps centré cc). Elle s'ordonne au-dessous d'une certaine température qui varie avec le titre en zinc (453 à 470°C) et s'appelle alors  $\beta'$ . On peut considérer cette phase  $\beta'$  comme l'imbrication de deux réseaux cubiques simples, l'un de cuivre, l'autre de zinc, ou comme un réseau cubique centré, mais avec tous les atomes de cuivre au sommet du cube et les atomes de zinc au centre ou inversement (*figure II.2*).

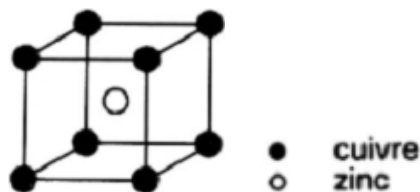


Figure II.2 : Structure de la phase  $\beta'$  du diagramme cuivre-zinc [12].

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

La transformation ordre-désordre est quasiment instantanée et c'est donc toujours cette phase  $\beta'$  qui est présente dans l'alliage à température ambiante.

Les limites de solubilités  $\alpha \leftrightarrow \alpha + \beta$  et  $\alpha + \beta \leftrightarrow \beta$  varient avec la température. Pour une composition donnée, la structure  $\alpha + \beta$  d'un alliage sera donc fonction de l'histoire thermique de cet alliage au cours de sa transformation à chaud [12].

- **Propriétés particulières aux laitons biphasés  $\alpha\beta'$**

Les principales caractéristiques des laitons biphasés  $\alpha$  et  $\beta$  dépendent des propriétés respectives de plasticité des phases  $\alpha$  et  $\beta$ . la phase  $\alpha$  est très malléable à froid, tout en gardant une certaine capacité de déformation à chaud. En revanche, la phase  $\beta'$  ordonnée, présente à froid, est dure et fragile, tandis que la phase  $\beta$  est facilement déformable à chaud. Suivant les proportions des phases  $\alpha$  et  $\beta$ , il sera donc possible d'obtenir toute une gamme de possibilités en ce qui concerne la les propriétés d'usage de ces alliages. Cette transformation à chaud se fait généralement dans le domaine  $\alpha + \beta$ , proche de la limite  $\alpha + \beta \leftrightarrow \beta$ . La transformation à chaud est le plus souvent suivie d'une déformation à froid. Cependant la ductilité faible de la phase  $\beta'$  limite ces déformations à une ou deux passes maximum [12].

Les laitons  $\alpha\beta'$  ont une module d'Young d'environ 9500 hbar et une masse volumique de 8.5 kg /dm<sup>3</sup> [10].

## II.5 Alliage CuZn37

Le CuZn37 est un laiton qui présente principalement une structure homogène monophasée  $\alpha$ , solution solide de Zn dans le cuivre de structure cubique à face centrée. Il peut cependant, et dépendant des conditions de refroidissement lors des procédés de fabrication, contenir des traces de phase  $\beta$  (cubique centrée). Le CuZn37 a une usinabilité estimée à 35% de celle du CuZn39Pb3. Bien que parmi les alliages de Cu et de Zn, il existe des nuances contenant moins de Zn qui sont plus aptes à la déformation à froid, le laiton CuZn37 est fréquemment utilisé pour l'emboutissage [13].

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

## II.5.1 Composition chimique

Le tableau ci-dessous montre les pourcentages des principaux éléments d'addition de l'alliage CuZn37.

**Tableau II.1 : Les principaux éléments d'addition de l'alliage CuZn37 [13].**

Cu	Zn	Ni	Pb	Fe	Sn	Al	Autres
<b>62.0-65.5</b>	Reste	≤ 0.30	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.10

## II.5.2 Propriétés physiques et caractéristique mécanique

- Module d'élasticité : 110 kN/mm<sup>2</sup> ;
- Coefficient de poisson : 0.3 ;
- Masse volumique : 8.44 kg/dm<sup>3</sup> ;
- Point de fusion / intervalle de solidification : 902 – 920 °C ;
- Coefficient de dilatation linéaire :  $20.2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  de 20 à 200°C ;
- Résistance électrique spécifique : 6.67μΩcm ;
- **Propriétés mécaniques des bandes** : les valeurs réalisables sont en fonction de la dimension et de la forme. Les valeurs de tableau ci-dessous sont des valeurs des bandes avec les dimensions suivantes :
  - ✓ l'épaisseur (mm) : 0.01 - 1.5 ;
  - ✓ la largeur (mm) : 10 – 200 ;
  - ✓ la longueur (mm) : 100 – 3000 [13].

Le tableau ci-dessous donne quelques types de fils usuels en laiton CuZn37 pour l'électroérosion.



# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques et électriques pour certains types des fils en laiton CuZn37 [14].

Type du fil	Dimensions (mm)	Résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	Conductivité électrique (%IACS)
Nu	0,15/0,20/0,25/0,30	400	15,5
Nu	0,15/0,20/0,25/0,30	500	15
Nu	0,15/0,20/0,25/0,30	900/950/1000	13,5
Traité	0,25/0,30	520	50

## II.6 Traitement thermique

Les traitements thermiques confèrent aux produits métalliques les propriétés nécessaires pour leur transformation, leur mise en œuvre ou leur utilisation. Ils constituent donc une opération métallurgique fondamentale.

Les paramètres principaux des traitements thermiques sont :

- La température maximale ;
- La durée de maintien à cette température ;
- La nature du milieu de refroidissement.

L'exécution des traitements thermiques du laiton ne présente pas de difficultés particulières. Elle est même relativement aisée dans le cas des alliages monophasés (phase  $\alpha$ ), du fait de l'absence de transformation allotropique, et les températures nécessaires ne sont pas très élevées (généralement  $< 800^{\circ}\text{C}$ ).

### II.6.1 Recuit

Au cours du recuit, les métaux et les alliages tendent vers leur état de plus grande stabilité thermodynamique. Le recuit donc, plus généralement est un traitement adoucissant.

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

Si le métal ou l'alliage présente un changement de phase entre la température de recuit et la température ambiante, la vitesse de refroidissement doit être suffisamment faible pour que cette transformation puisse s'accomplir. Lorsque n'existent pas de tels points de transformation, la vitesse de refroidissement est indifférente (cas du laiton  $\alpha$ ).

Selon l'état initial du matériau et les propriétés recherchées, on distingue plusieurs sortes de recuit [15], parmi ces recuits :

## a. Recuit de recristallisation

Ce recuit s'effectue sur les produits écrouis pour leur restituer la malléabilité nécessaire, soit à la poursuite des opérations de façonnage (recuit intermédiaire), soit à l'utilisation (recuit final).

La recristallisation résulte de la formation et de la croissance de germes de nouveaux cristaux dans la région la plus perturbée par la déformation à froid (joint de grains, plans de glissement). Ces cristaux sains se développent progressivement aux dépens des anciens grains déformés, et la recristallisation proprement dite est terminée lorsque cette substitution est complète.

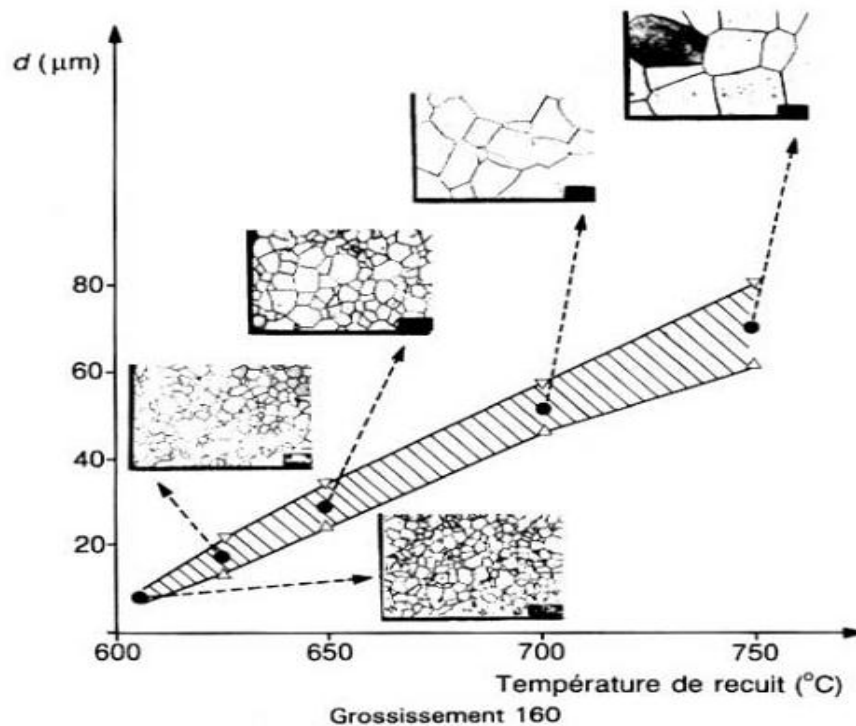
La recristallisation se produit dans un certain intervalle de températures dont l'étendue et les valeurs extrêmes dépendent de la composition de l'alliage, de la durée du recuit et, surtout du taux d'écrouissage : la température de recristallisation est d'autant plus faible que l'écrouissage est plus fort ; elle est abaissée par des maintiens suffisamment longs.

Dans l'échelle des températures et, à un moindre degré toutefois, dans celle des temps, la recristallisation est généralement précédée d'une *restauration* (élimination de défauts réticulaires et de contraintes internes sans modification apparente de la structure) et suivie d'une croissance des grains (développement de certains cristaux aux dépens des autres) *figure II.3*. Ces différentes étapes empiètent fréquemment les unes sur les autres et il est souvent malaisé de les distinguer.

Un écrouissage minimal est nécessaire pour que la recristallisation se produise. Dès que ce taux est atteint (écrouissage critique), des germes peu nombreux se développent et

## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

envahissent, sans se gêner mutuellement, toute la masse du métal, donnant ainsi une structure à gros grains. L'écroissage critique est généralement très faible, de l'ordre de quelques %.



**Figure II.3 : Exemple d'évolution de la taille des grains recristallisés en fonction de la température de recuit [16].**

Pour des taux d'écroissage supérieurs, le nombre de germes augmente et la recristallisation se termine avec des grains plus nombreux donc plus petits : pour une température et un temps de recuit donnés, la grosseur du grain de recristallisation est alors d'autant plus faible que l'écroissage est plus fort (*figure II.4*).

## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

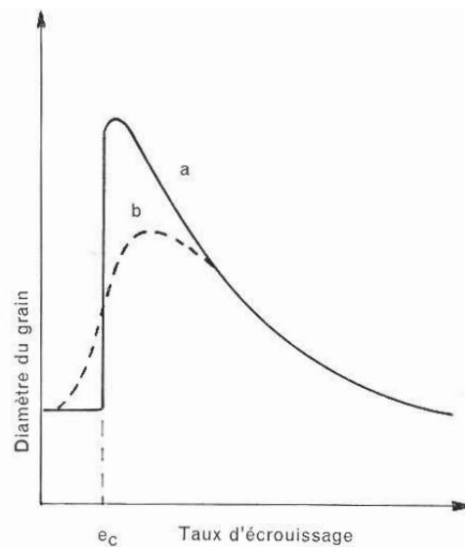


Figure II.4 : Variation de la grosseur du grain en fonction du taux d'écroutissage pour des recuit à température et temps de maintien fixes [16].

Les données précédentes ne sont cependant valables que pour les métaux purs et les alliages constitués d'une seule et même phase depuis l'ambiante jusqu'à la température de recuit. Dans les alliages polyphasés, le recuit détruit l'écroutissage, mais la croissance des nouveaux grains d'une phase est généralement entravée par les autres phases.

Parallèlement à l'évolution structurale décrite ci-dessus, les propriétés mécaniques se modifient comme l'indique la *figure II.5*.

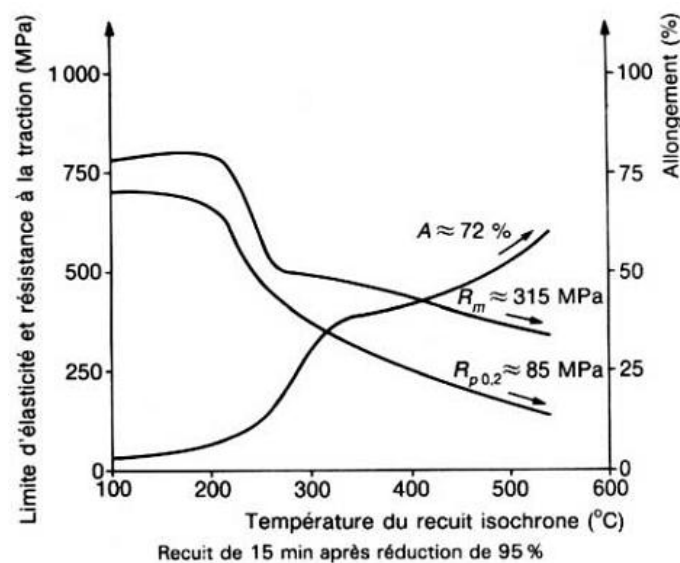


Figure II.5 Évolution de  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  et  $A$  % en fonction de la température de recuit [16].

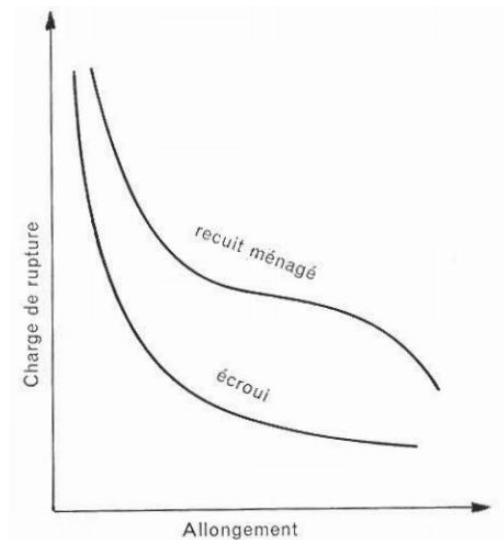
# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

## b. Recuit ménagé

C'est un recuit effectué sur des demi-produits intentionnellement très écrouis. Par un réglage convenable de la température et de la durée de maintien, il est possible d'obtenir des caractéristiques mécaniques précises, intermédiaires entre celles de l'état écroui et celle de l'état complètement recuit.

De plus, en raison principalement de la finesse de la structure ainsi obtenue, les allongements à la rupture après recuit ménagé sont très supérieurs à ceux du même produit écroui d'égale résistance à la traction (*figure II.6*) [17].



**Figure II.6 : Charge de rupture en fonction des allongements pour les état ecroui et recuit ménagé [17].**

## II.6.2 La trempe

La trempe consiste à réaliser, par chauffage, une transformation structurale des alliages, puis à refroidir ceux-ci suffisamment vite pour empêcher la transformation inverse normale. Théoriquement, ce traitement peut s'appliquer à tous les alliages dont la structure à température élevée est différente de la structure d'équilibre à l'ambiante.

## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

On peut grouper sous ce terme des traitements thermique effectués sur certains alliages dans des conditions telles que la structure résultante n'est ni la solution stable à chaud, ni de la martensite, ni la structure d'équilibre normale.

Selon le cas, le refroidissement peut être continu, avec des vitesses comprises entre celles du recuit et de la trempe martensitique, ou présenter des paliers isothermes de durées déterminées, ce qui limite l'influence des chocs thermiques.

Les structures ainsi obtenues présentent souvent des caractéristiques intéressantes par suite de la finesse et de la répartition particulière des constituants avec, parfois, modification des proportions relatives des phases.

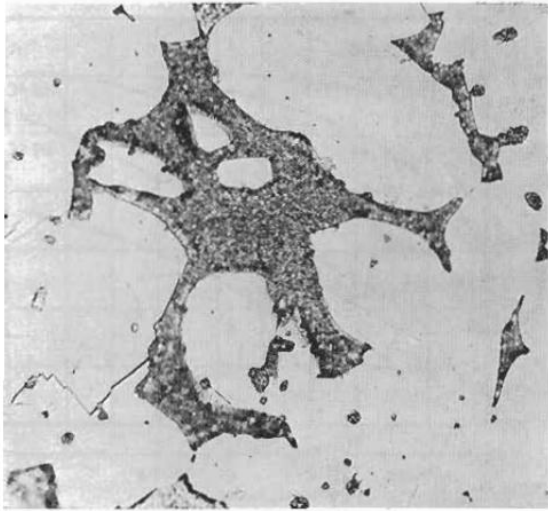
Dans les alliages cuivreux, ce dernier cas se présente presque exclusivement avec les laitons biphasés (type U-Z40) où la trempe à l'eau depuis 700 à 800° C, permet d'accroître la proportion de phase  $\beta'$  et donne une répartition aciculaire, fine et homogène, du mélange  $\alpha+\beta'$  [18] (*figure II.7*).

Ce traitement, d'application toutefois limitée en raison de la dézincification sèche et du grossissement du grain provoqués par le chauffage à haute température, peut être utilisé pour relever un peu, par rapport à l'état recuit, les caractéristiques mécanique de pièces qui ne peuvent être écrouies (pièces matricées à chaud par exemple).

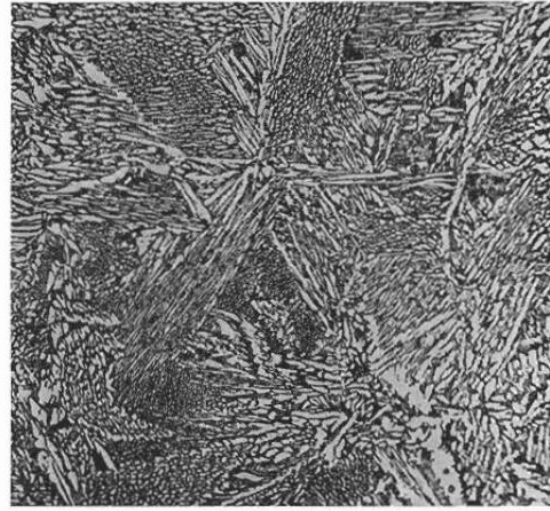
Par rapport aux valeurs obtenues après refroidissement à l'air, la charge de rupture est augmentée de 5 hbar environ, la limite élastique de 4 à 5 hbar et la dureté de 20 à 30 unités Brinell [19].

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---



Refroidi lentement après maintien de 15 mn  
à 800°C – Dureté 73 Vickers/10kg



Trempe à l'eau après maintien de 15min  
à 800°C – Dureté 73 Vickers/10kg

**Figure II.7 : Influence de la vitesse de refroidissement sur les proportions et la répartition des phase  $\alpha$  (en clair) et  $\beta'$  (en sombre) dans un laiton U-Zn Pb2. X 300- attaque au perchlorure de fer [16].**

## II.6.3 Revenu

Ce traitement consiste à chauffer la structure métastable obtenue par trempe de façon à la faire évoluer vers l'état d'équilibre physico-chimique.

Selon qu'il s'agisse d'une simple solution solide sursaturée ou de martensite, le mécanisme et les effets du revenu sont durcissants dans le premier cas, alors que dans le deuxième, le revenu est plus souvent adoucissant.

- **Revenu durcissant**

Dans les alliages cuivreux industriels, les solutions solides sursaturées sont métastable à la température ambiante : elles ne se modifient pas spontanément et ne sont donc pas susceptibles de « vieillissement naturel ».

Une température minimale est nécessaire pour permettre certains réarrangements atomiques au sein de ces solutions qui tendent alors à se séparer en deux phases (ou plus) conformément au diagramme d'équilibre.

# GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

En fait, lorsque le revenu est effectué peu au-dessus de cette minimale, la séparation a rarement lieu par germination et croissance de précipités ayant d'emblée la structure d'équilibre. Le processus suit plus généralement le schéma suivant : les atomes en excès commencent par s'accumuler dans de très petits domaines, appelés « zones G-P », et se répartissent le plus souvent sur certains plans préférentiels.

Ces premières zones ont, pratiquement, la structure de la solution-mère mais, en raison des différences de diamètre atomique des espèces en présence, elles constituent des perturbations locales très importantes du réseau et peuvent, dans certains cas, donner un durcissement appréciable.

Avec le temps, et surtout si la température est légèrement relevée, les atomes s'organisent progressivement à l'intérieure des zones jusqu'à transformer celles-ci en de véritables précipités ayant une structure propre. Il peut ainsi apparaitre plusieurs types de précipités successifs, dont la structure est de moins liée à celle de la matrice, avant que ne se séparent les phases d'équilibre.

Si le revenu est poursuivi, en particulier à une température encore peu plus haute, les précipités d'équilibre coalescent et la structure tend vers celle que donnerait le recuit. Ce stade de l'évolution structurale est généralement appelé « sur-revenu ».

Pour chaque alliage, il existe donc un couple température/temps de maintien qui donne les caractéristiques optimales. Le durcissement structural est un phénomène relativement lent qui s'effectue à des températures moyennes ; il est donc facile à contrôler.

Pour l'ensemble des alliages cuivreux, les températures de revenu sont comprises entre 300 et 500° C et les durées de maintien entre 30 minutes et 4 heures environ. Il est, par ailleurs, possible d'accentuer par écrouissage avant ou après revenu [19].

## II.6.4 Atmosphères des traitements thermiques pour les laitons

En raison de l'oxydation et de la volatilisation du zinc, le recuit brillant de ces alliages est d'autant plus difficile à réaliser que la teneur en zinc est plus grande et que la température est plus élevée. Pour éviter totalement l'oxydation, il est nécessaire que l'atmosphère soit rigoureusement exempte de gaz oxydant, lesquels agissent même à des très faibles

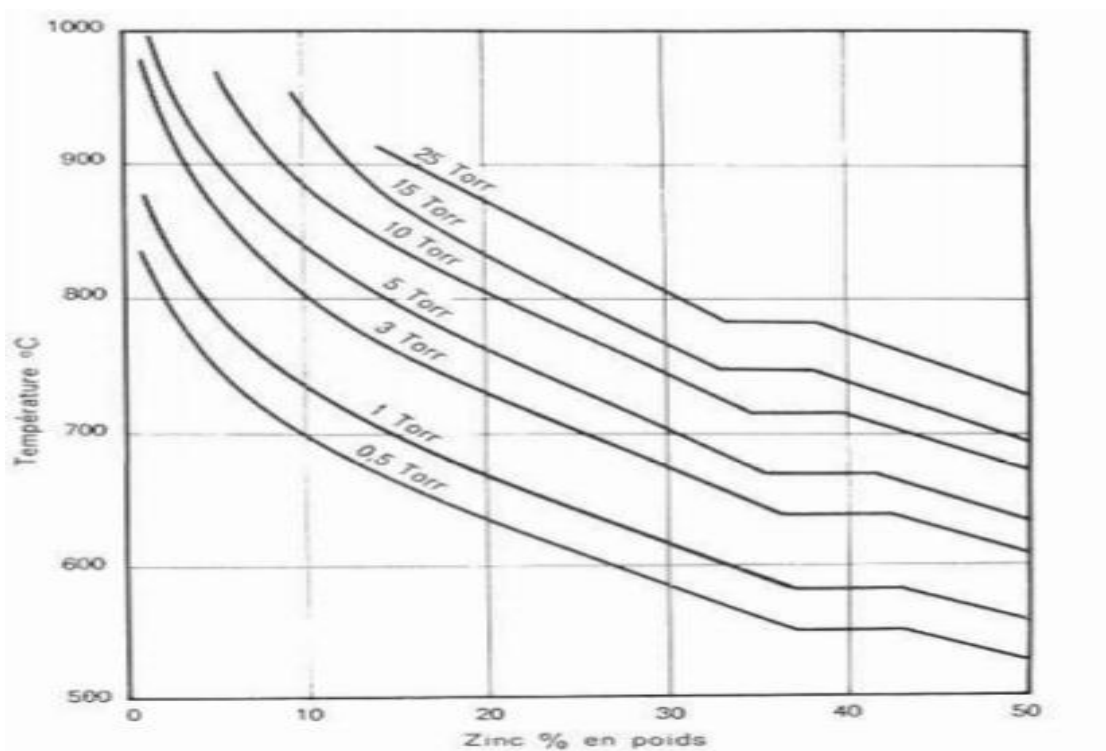


## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

concentrations : par exemple, à 750°C dans l'hydrogène, ZnO se forme en présence de traces de vapeur d'eau.

Mais dans ces conditions, la volatilisation du zinc devient appréciable dès 450-500°C ; en atmosphères réductrices ou neutres, elle se poursuit théoriquement jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la vapeur de zinc et le zinc en solution solide dans l'alliage. Toutefois, cet équilibre statique n'est jamais réalisé et la dézincification progresse.

La **figure II.8** donne, pour les laitons, la tension de vapeur du zinc en fonction de la température et de la composition [20]. On peut réduire la dézincification en effectuant les traitements thermiques à des températures aussi basses que possible (correspondant à des tensions de vapeur de zinc de 1 à 1.5 torr) ou en limitant au minimum le temps de maintien à température. Ces conditions sont approchées au mieux dans les fours à passage à haute convection.



**Figure II.8 : Tension de vapeur du zinc dans les laitons en fonction de la température [21].**

En pratique, l'atmosphère de recuit des laitons et des maillechorts est très faiblement oxydante, ce qui réduit la perte en zinc, et la légère teinte grise qui ternit alors les produits est

## GENERALITES SUR LES LAITONS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES AUX ALLIAGES CUIVREUX

---

éliminée par un décapage rapide (acide sulfurique à 10-15% à 35-40°C). par ailleurs, pour obtenir des recuits aussi propres que possible, il est avantageux de dégraisser préalablement les produits. On évite ainsi la formation de taches dues aux dépôts de carbone ou de composés sulfurés résultant de la décomposition des lubrifiants.

A cet égard, le procédé combinant les purges sous vide et le chauffage sous atmosphère non polluée donne des résultats remarquables [22].

# CHAPITRE III:

## **Dispositifs et techniques expérimentaux**

L'étude consiste à étudier la micrographie d'un fil de laiton (CuZn37,  $\Phi = 0.25$  mm) avant et après son utilisation ; le fil est utilisé comme électrode (fil de découpe) par l'électroérosion à fil, et les traitements thermiques possibles.

## III.1 La métallographie

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques. On commence par la préparation de l'échantillon, l'enrobage, le polissage et l'attaque électrolytique et enfin l'observation micrographique à l'aide d'un microscope optique.

### III.1.1 Prélèvement des échantillons

On applique une très petite force d'écrouissage sur plusieurs fils de laiton (CuZn37) pour les relier les uns sur les autres. Le tableau ci-dessous présente les échantillons à étudier.

**Tableau III.1 : le choix des échantillons.**

	Type d'échantillon	Position
Fils neufs	EH1	Horizontal
Fils usagés	EH2	Horizontal
	EV2	Vertical
Fils neuf après traitement thermique	EV3	verticale

### III.1.2 Préparation des échantillons

#### a. Enrobage à froid

Consiste à mettre l'échantillon dans un moule et ajouter le mélange résine - durcisseur ; et ensuite laisser la résine se solidifier pendant quelques minutes. Cette étape permet d'avoir une meilleure manipulation des échantillons pendant le

## DISPOSITIFS ET TECHNIQUES EXPERIMENTAUX

polissage. Nous avons utilisé l'enrobage à froid pour éviter toutes transformations et changements structuraux.

### b. Polissage

Pour notre travail nous avons utilisé le polissage mécanique. Il permet d'obtenir une surface plane, non rugueuse et d'éliminer la couche d'oxyde superficielle. Les principales étapes sont indiquées dans le *tableau III.2*.

**Tableau III.2 : Principales étapes de polissage.**

Granulométrie (gr/mm)	Temps (min)	Vitesse (tr/min)	lubrifiant
<b>600</b>	15	300	eau
<b>1000</b>	15	300	eau
<b>1200</b>	20	250	eau
<b>2000</b>	20	250	eau

A chaque changement de granulométrie, on change la position de l'échantillon de 90° par rapport à la rotation de la position précédente.



**Figure III.1 : Polisseuse.**

- **La finition**

On utilise un papier de finition avec un mélange d'alumine et d'eau distillée. Le polissage se fait avec une vitesse de 200 tr/min.

**Temps de polissage :** jusqu'à obtenir une surface presque sans rayures (dues au polissage précédent).



Figure III.2 : Polisseuse de finition.

### c. Attaque chimique

Après le polissage final, l'échantillon subit une attaque chimique qui s'effectue à l'aide d'un réactif chimique formé d'acide nitrique dilué (50% de  $HNO_3$  (69%) + 50% d'eau distillée) pendant 15-20 secondes pour les fils usagés et neufs, et 40 secondes pour les fils neufs après traitement thermique. Ils sont alors nettoyés à l'eau distillée et séchés à l'aide d'un séchoir.

### d. Observation microscopique

Le but principal de l'observation est la mise en évidence de la structure des différents échantillons. Nous avons fait l'observation micrographique des échantillons après l'attaque chimique, à l'aide d'un microscope optique connecté à un micro-ordinateur muni d'une caméra numérique. Les images obtenues sont traitées par le logiciel «*Archimed*» qui permet de lire et sauvegarder les images sur le micro-ordinateur. Ce microscope optique permet d'agrandir l'image de 50 jusqu'à 1000 fois.



Figure III.3 : Dispositif expérimental de l'observation microscopique.

### III.2 Les traitements thermiques

On a pris une plaque de céramique ayant une rainure où on a placé un fil de laiton (CuZn37,  $\Phi=0.25\text{mm}$ ) que l'on a recouvert par du sable fin bien lavé. On a mis l'ensemble (plaque, fil) dans le four à moufle à une température d'environ  $800^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes.

Le refroidissement se fait par: une vitesse de refroidissement  $V_{\text{ref}} = 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (la porte de la chambre de four est ouverte)

- **Le four**

Le four utilisé est de type à moufle (MF 120) qui est conçu pour travailler entre  $600^{\circ}\text{C}$  et  $1200^{\circ}\text{C}$ , et qui a la capacité de stabiliser ces températures pendant le temps désiré. Le four s'arrête automatiquement après le temps de maintien. La distribution homogène de la température est obtenue par la résistance entourant la chambre du four (à partir de la surface extérieure de la chambre) *figure.III4*.



Figure III.4 : Four à moufle MF 120.

### III.3 Mesure de la résistivité électrique

Pour calculer la résistivité électrique du fil métallique (notre alliage CuZn37), on a besoin de 4 paramètres qui sont: l'intensité de courant électrique, la tension, la section du fil et sa longueur.



Figure III.5 : Dispositif expérimental pour mesurer la tension et l'intensité de courant.



## DISPOSITIFS ET TECHNIQUES EXPERIMENTAUX

---

Pour mesurer ces paramètres on utilise un générateur stabilisé numérique qui fournit un courant continu et un millivoltmètre digital pour mesurer la tension (*figure III.5*). Pour cela on a réalisé un circuit électrique simple composé du notre fil relié au générateur à l'aide de deux pinces. On met en contact notre fil et les deux crochets, et on mesure la distance de contact entre les deux crochets à l'aide d'une règle.

# CHAPITRE IV:

## Résultats et interprétations

## IV.1 Résultats et interprétations de l'examen métallographique des fils en laitons CuZn37 « neuf et usagé »

Dans cette partie nous représentons la structure du fil neuf et celle du fil usagé.

### IV.1.1 Les résultats métallographiques des fils neuf et usagé



FigureIV.1 : Structure d'un fil neuf en laiton CuZn37, poli mécaniquement non attaqué.

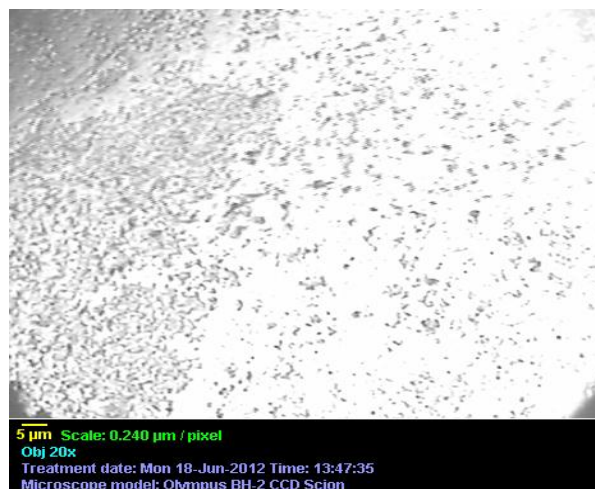
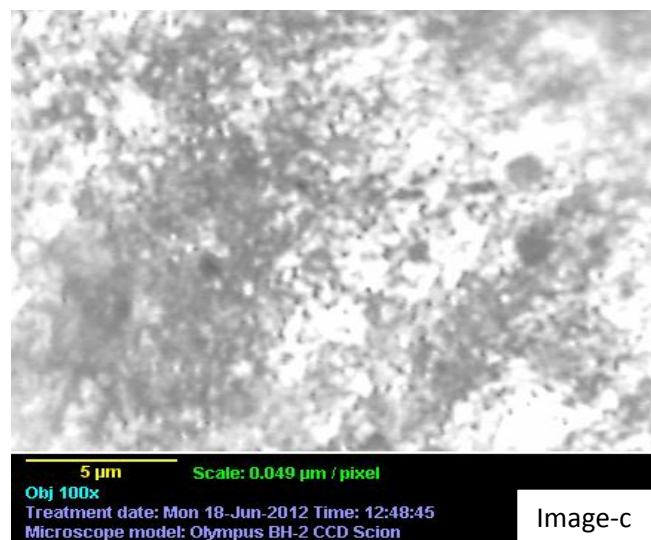
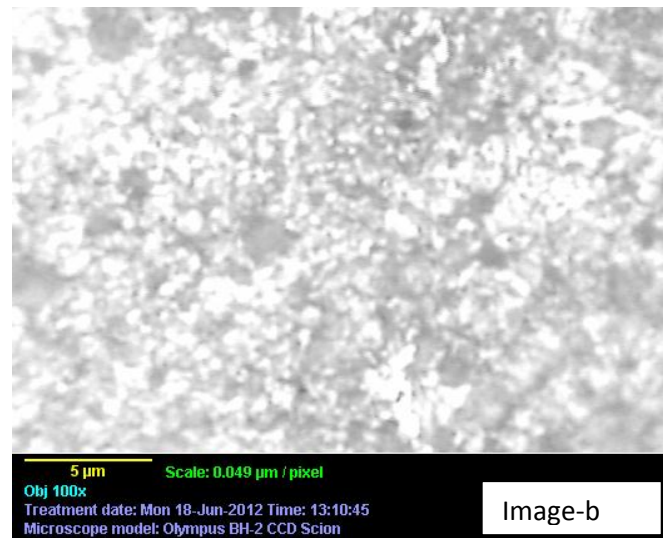
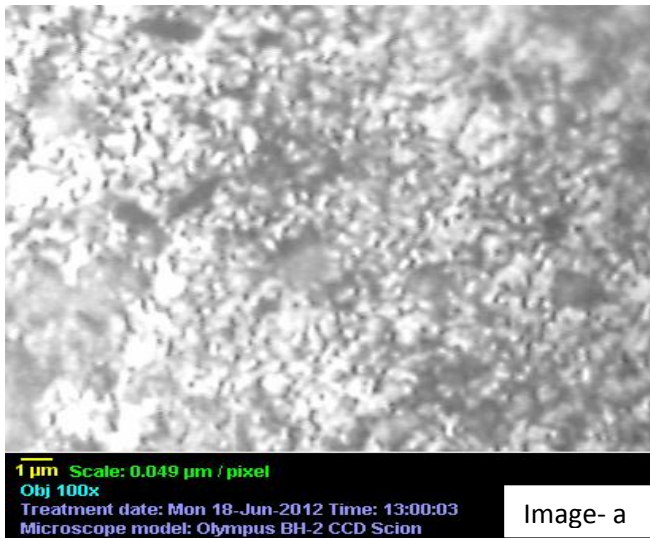


Figure (IV.2) : Structure d'un fil usagé en laiton CuZn37, poli mécaniquement non attaqué.

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

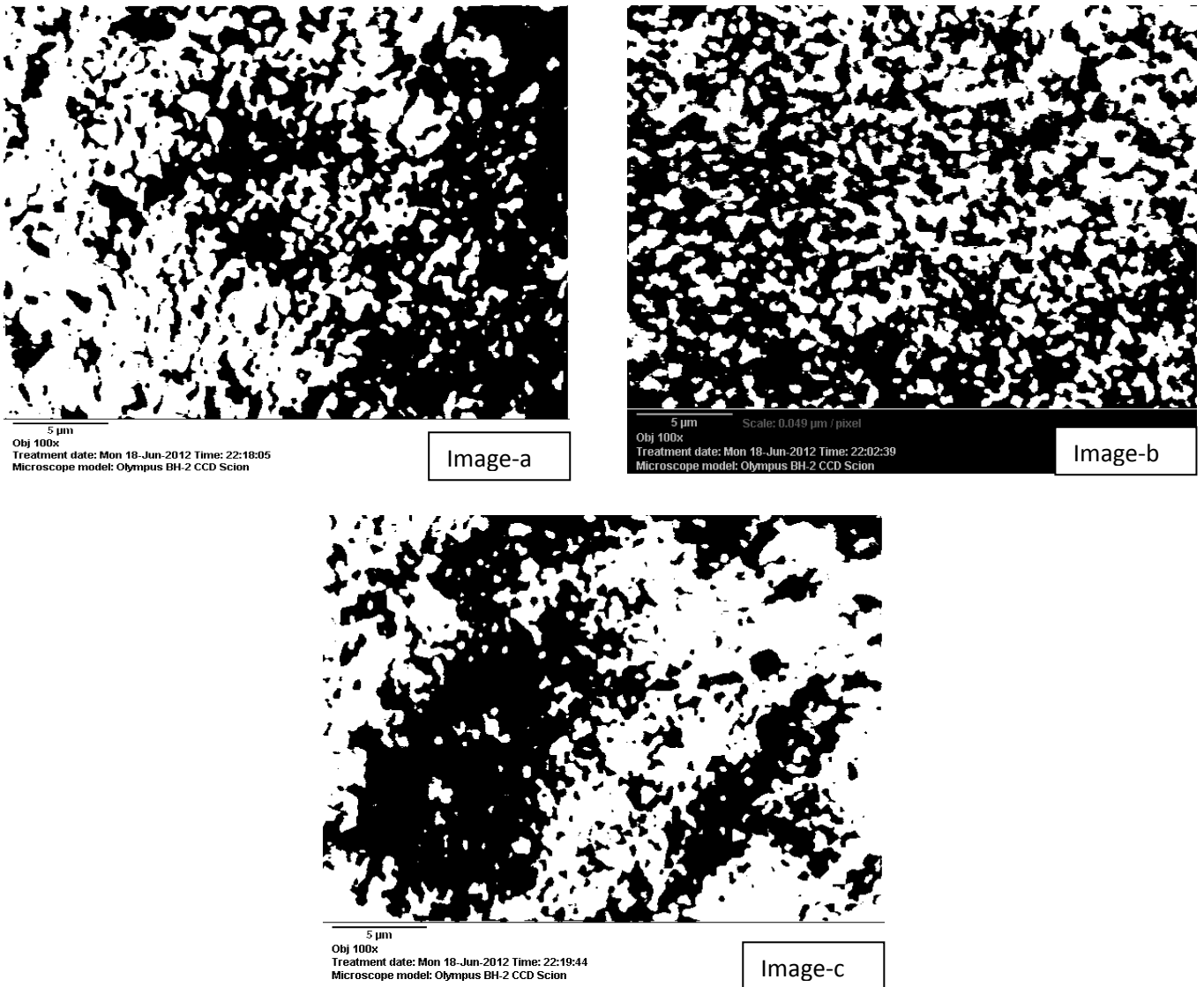
Les figures *IV.1* et *IV.2* représentent respectivement les images des surfaces frontales d'un fil neuf et d'un fil usagé, avant l'attaque chimique.



**Figure IV.3 : Structures d'un fil neuf en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.**

La *figure IV.3* montre que notre fil est un fil de laiton biphasé ( $\alpha+\beta'$ ). La phase blanche est la phase  $\alpha$ , la phase  $\beta'$  est représentée par la couleur noire. Nous avons traité nos micrographies par le logiciel '*image J*' qui nous a permis d'augmenter le contraste et de rendre les phases plus nettes. Ce logiciel a aussi été utilisé pour calculer les taux des phases.

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS



**Figure IV.4 : Structure d'un fil neuf en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.**

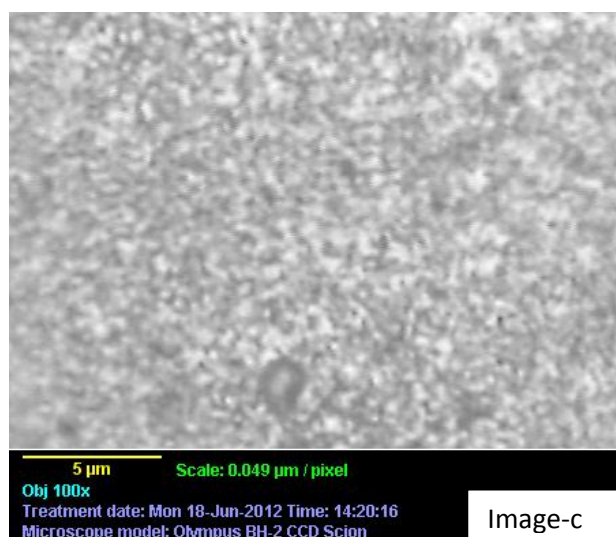
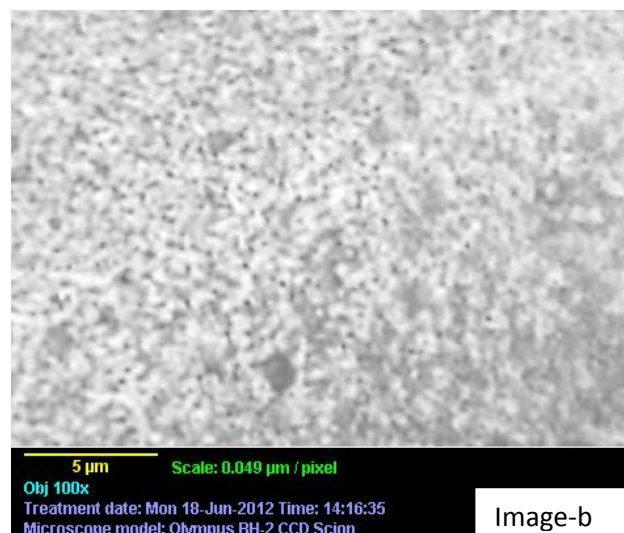
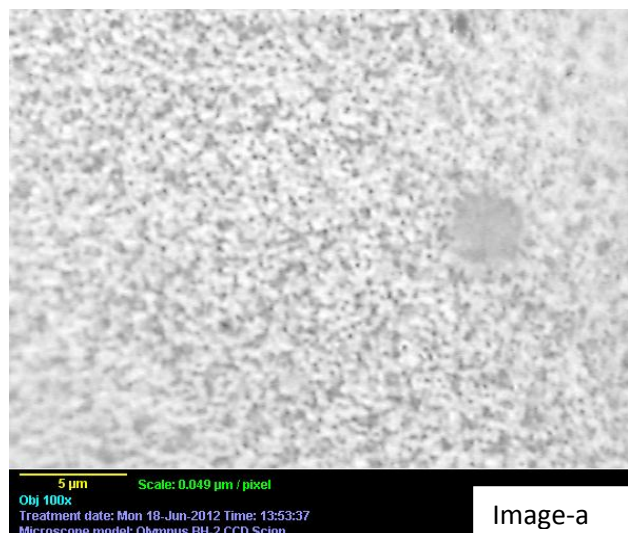
Les images de la *figure IV.4* sont les images de la *figure IV.3* après le traitement d'image .On remarque une répartition régulière entre les phases sur l'ensemble de l'échantillon.

**Tableau IV.1 : Taux des phases dans le fil neuf.**

	Image-a	Image-b	Image-c	Moyen
Phase $\alpha$ (%)	49	53	51	51
Phase $\beta$ (%)	51	47	48	49

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les valeurs des taux de phases (*tableau IV.1*) indiquent que la phase  $\alpha$  et la phase  $\beta'$  ont une concentration relativement similaire.



**Figure IV.5: Structure d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.**

Dans cette figure (*figure IV.5*) la structure est identique à celle du fil neuf (biphasée), mais la répartition des phases est différente par rapport à celle des images de la *figure IV.3* (fil neuf). On remarque la présence de cratères sur la surface du fil usagé (*figure IV.6*).

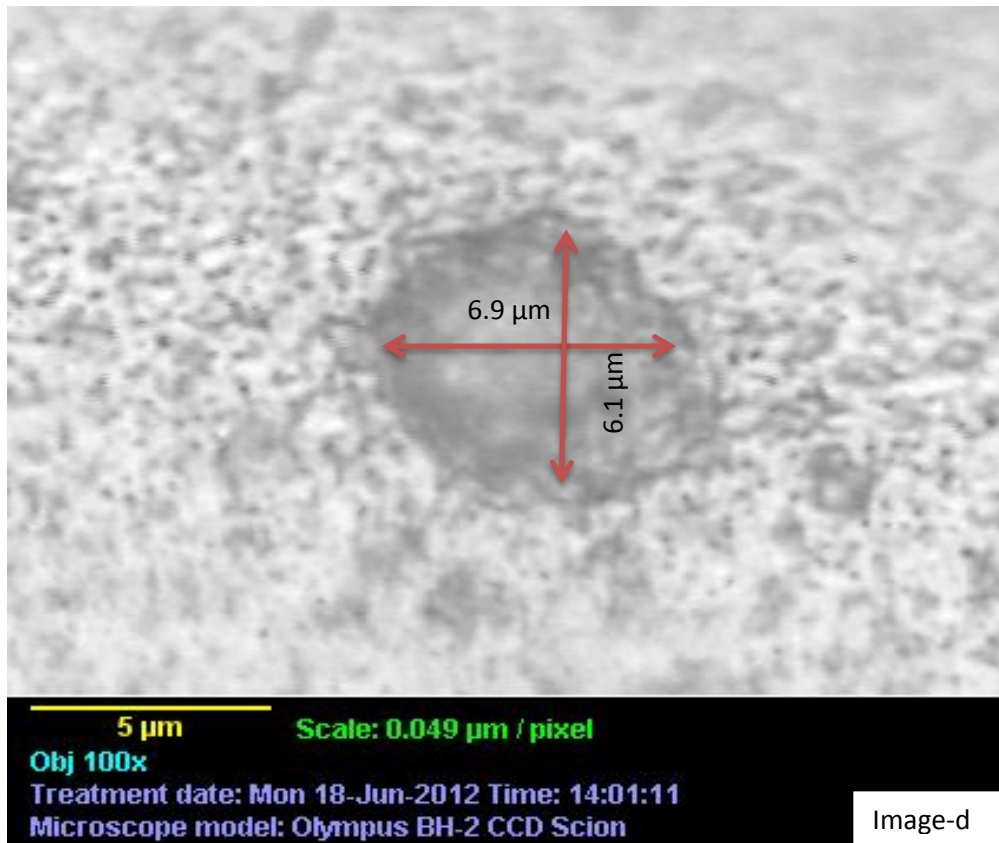


Figure IV.6: Cratère sur la structure d'une section d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.

Tableau IV.2 : Les taux des phases dans le fil usagé (la section).

	Image-a	Image-b	Image-c	Moyen
Phase $\alpha$ (%)	43	59	65	56
Phase $\beta$ (%)	57	41	35	44

Les taux des phases sont calculés d'après les images de la *figure IV.7* (les images de la *figure IV.6* après traitement d'image).

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

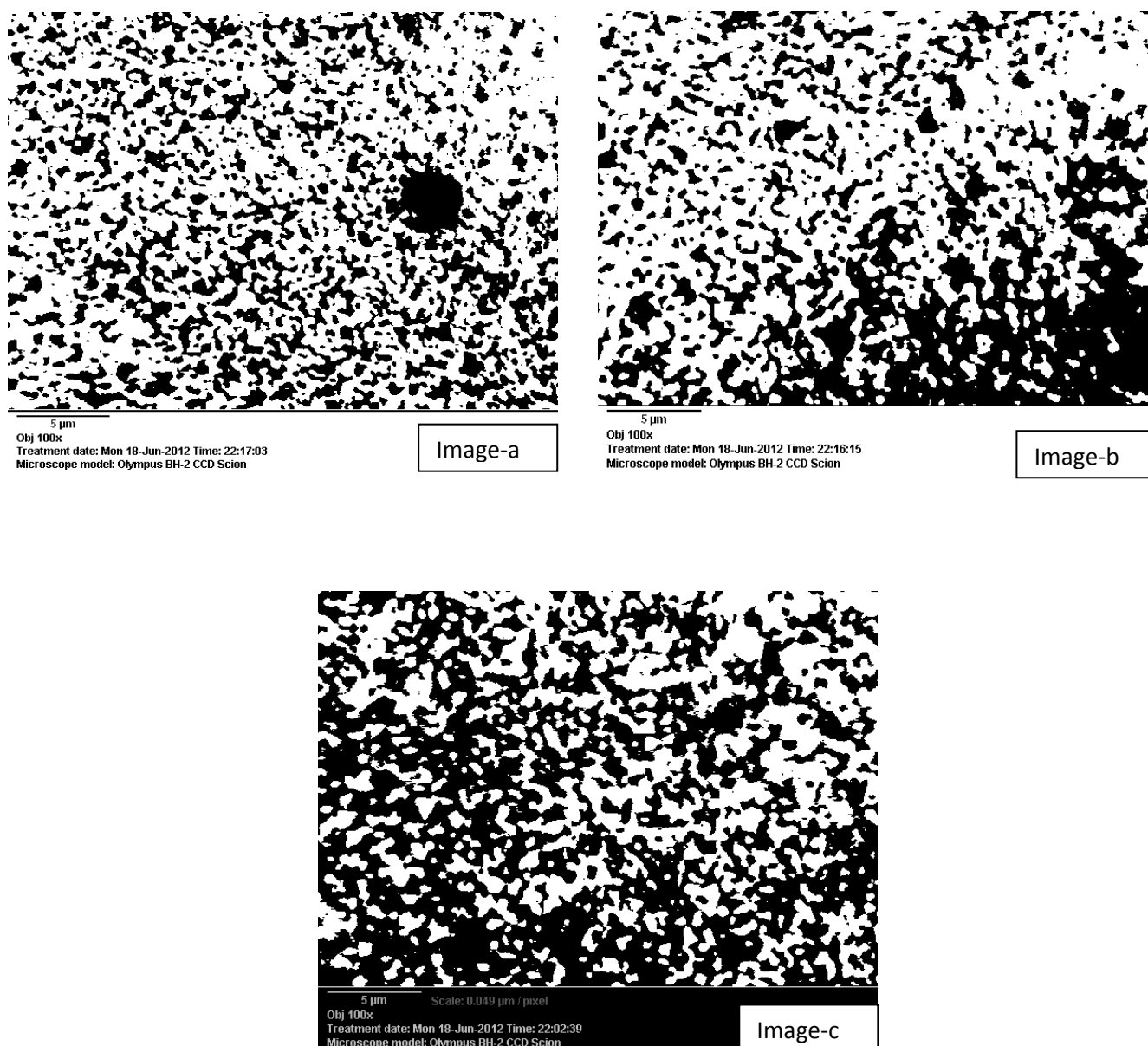


Figure IV.7 : Structure d'une section d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.

**Remarque :** Les structures représentées dans la *figure IV.5* sont des structures de la section du fil usagé.

Dans notre échantillon (fil usagé) on remarque que le taux de la phase  $\alpha$  est supérieur à celui de la phase  $\beta'$ . La répartition de ces phases est irrégulière, la phase  $\beta'$  est prédominante dans certaines zones.



## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

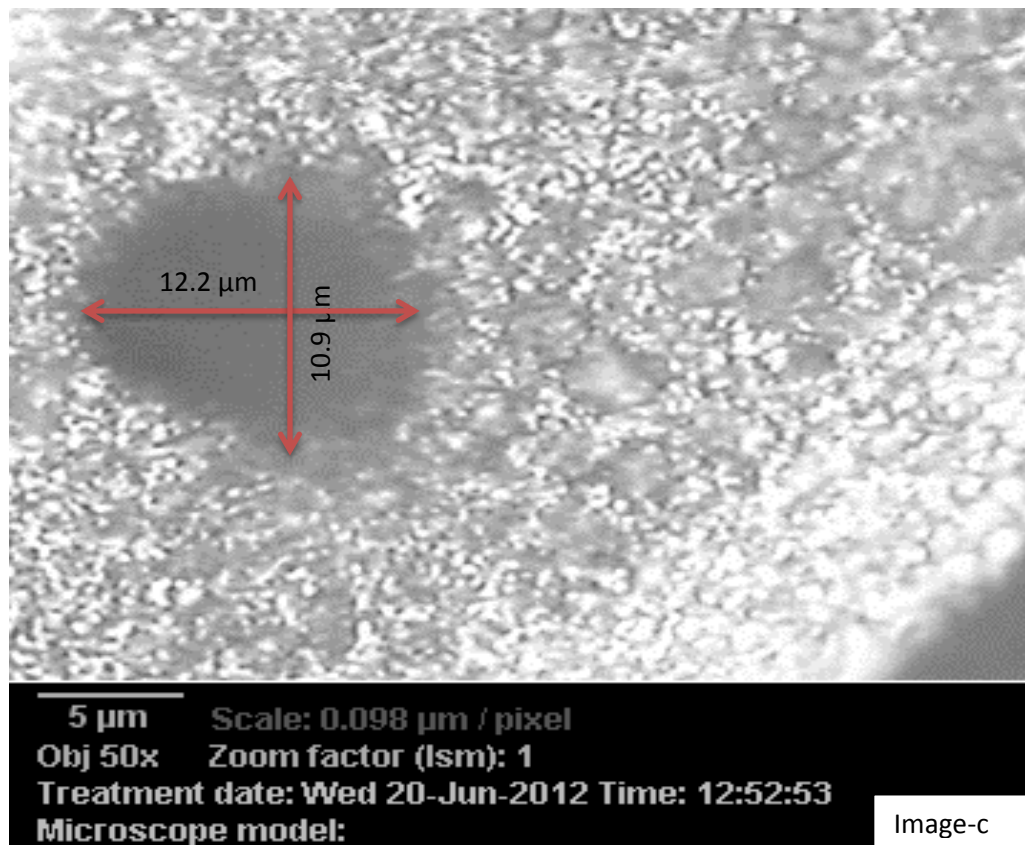
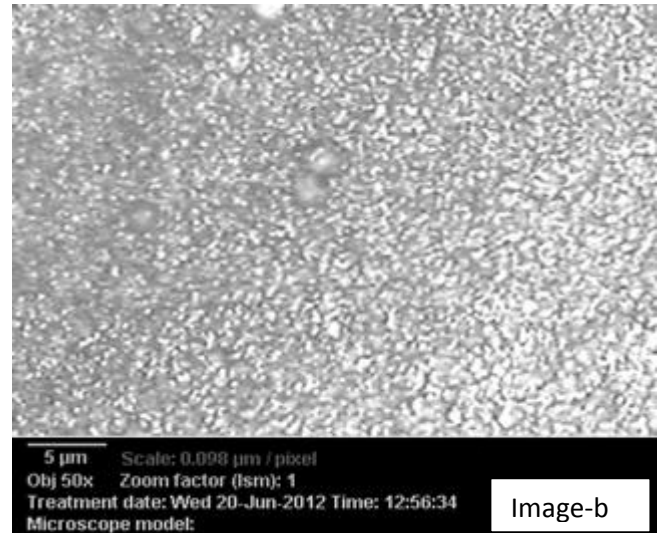
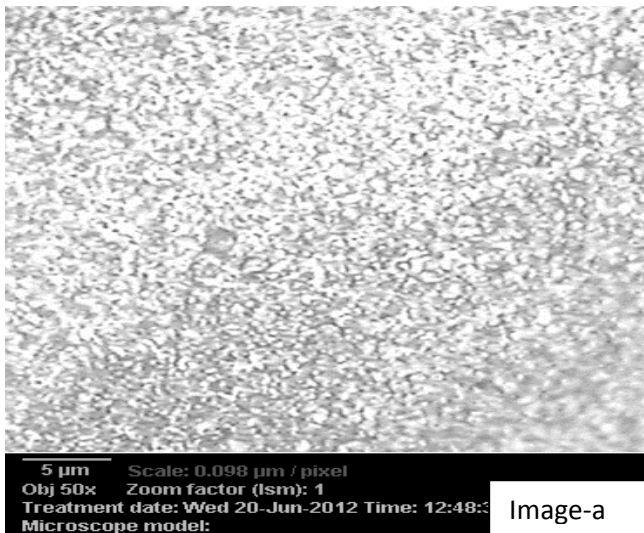
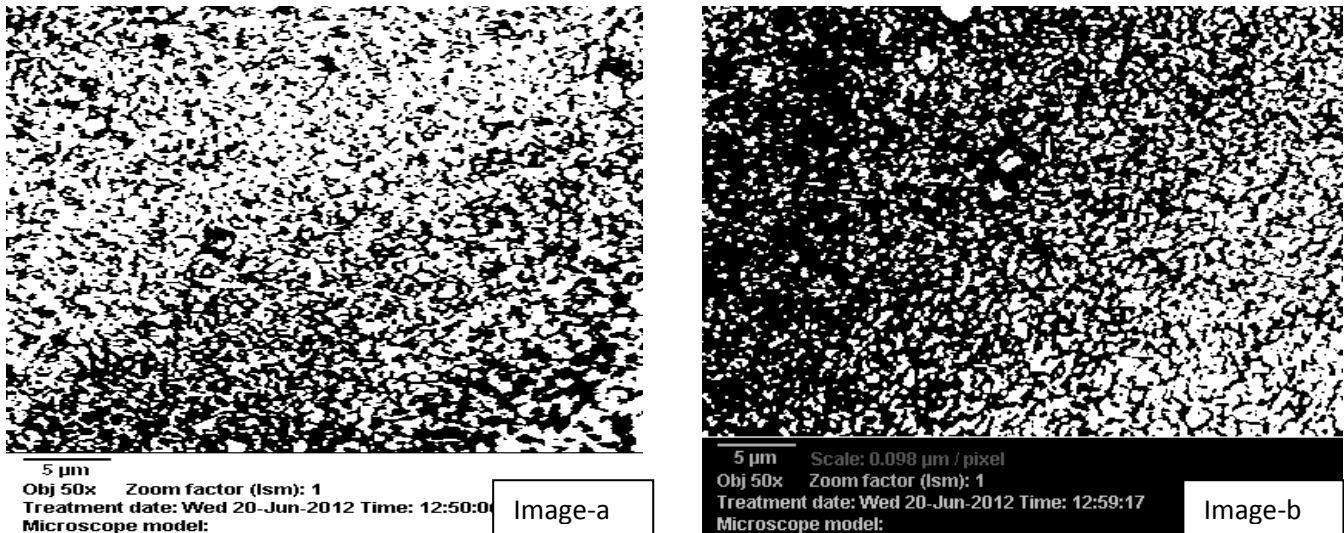


Figure IV.8 : Structure laterale d'un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique.

La *figureIV.8* montre la microstructure d'une surface latérale de notre fil usagé, on remarque aussi la présence des cratères sur la surface.



**Figure IV.9 : Structure d’une surface latérale d’un fil usagé en laiton CuZn37, attaqué à l’acide nitrique, après traitement d’image.**

**Tableau IV.3 : Taux des phases dans le fil usagé (la surface latérale).**

	Image-a	Image-b
Phase $\alpha$ (%)	59	38
Phase $\beta$ (%)	41	62

La *figure IV.9* et le *tableau IV.3* confirme que le taux de la phase  $\alpha$  est plus important que celui de la phase  $\beta$  et l’irrégularité de la répartition de ces phases.

- **Détermination de la résistivité et la conductivité électrique:**

La résistivité électrique est calculé par l’équation suivante :

$$\rho = \frac{R}{L} * S \quad \text{avec} \quad R = \frac{U}{I}$$

- $\rho$  : la résistivité électrique du fil ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) ;
- R : la résistance du fil ( $\mu\Omega$ ) ;
- U : la tension (mV) ;
- I : l’intensité de courant (mA) ;
- L : la distance entre les crochets (les points de contact avec le fil) cm ;
- S : la surface de bout frontal de fil ( $\text{cm}^2$ ).

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

---

❖ *Application* :  $U = 3.6 \text{ mV}$  ;  $I = 115.7 \text{ mA}$  ;  $L = 5 \text{ cm}$  ;  $S = 4.9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$  ;  $R = 0.031 \Omega$ .

D'où La résistivité électrique :  $\rho = 3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ .

Et La conductivité électrique :  $\sigma = 57.4 \% \text{ IACS}$ .

### IV.1.2 Interprétation des résultats micrographiques

La micrographie par microscopie optique (le grossissement maximal est de 1000 fois) du fil neuf a montré l'absence de porosités sur l'échantillon avant et après l'attaque chimique, et elle nous a permis de voir seulement les phases de l'échantillon mais pas les grains (choix de réactif).

D'après le catalogue de DacoCut la résistance à la traction correspondante à une conductivité électrique de 50% IACS est  $520 \text{ N/mm}^2$ , par conséquent en se basant sur la valeur de la conductivité électrique de notre fil neuf ;  $\sigma = 57.4\% \text{ IACS}$ , on peut dire que ces dernières valeurs donnent une idée sur les valeurs des propriétés mécaniques du fil neuf.

En général, dans le procédé de l'EDM le fil de découpe subit une usure, en revanche, la micrographie indique des cratères sur la surface du fil usagé. Ce dernier défaut est dû aux décharges non maîtrisées correctement pendant la découpe. Le fil a les propriétés nécessaires pour qu'il soit une électrode de découpe de l'EDM, donc les raisons des décharges vagabondes sont la tension utilisée, le diélectrique ou les deux.

La répartition des phases dans le fil usagé s'explique par l'enlèvement de matière inégal sur l'électrode (usure), cette dernière due aux conditions violentes de l'électroérosion (une zone de plasma se forme, atteignant une température de 7000 à 8 000 °C et une pression d'environ 40 bars [3]. Le taux de la phase  $\alpha$  est supérieur à celui de  $\beta'$  à cause de la dézincification (due aux hautes températures) qui a lieu lors de la découpe de la pièce.

## IV.2 L'effet du traitement thermique

Dans cette partie on cherche à connaître les effets des traitements thermiques sur le fil neuf.

Pour cela on a fait un cycle d'un traitement thermique *de recuit* schématisé sur la figure ci-dessous.

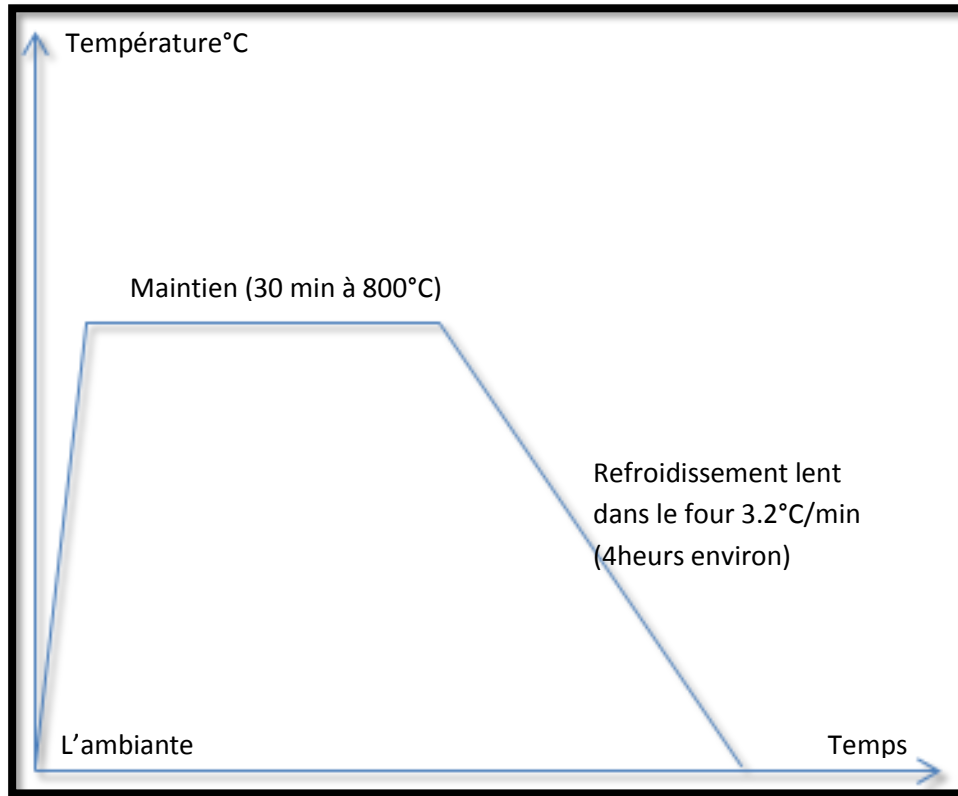


Figure IV.10 : Cycle de traitement thermique de recuit d'un fil du laiton CuZn37.

### IV.2.1 La micrographie du fil après traitement thermique

On remarque sur les images de la *figure IV.11* un phénomène de la coalescence des précipités, l'image-a et l'image-b montrent respectivement, la coalescence des précipités de la phase  $\alpha$  et des précipités de la phase  $\beta'$ . L'image-c présente l'interface entre les phases  $\alpha$  et  $\beta'$ .

# RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau IV.4 : Taux des phases dans le fil neuf après traitement thermique.

	Image-a	Image-b	Image-c	moyen
Phase $\alpha$ (%)	70	49	25	48
Phase $\beta$ (%)	30	51	75	52



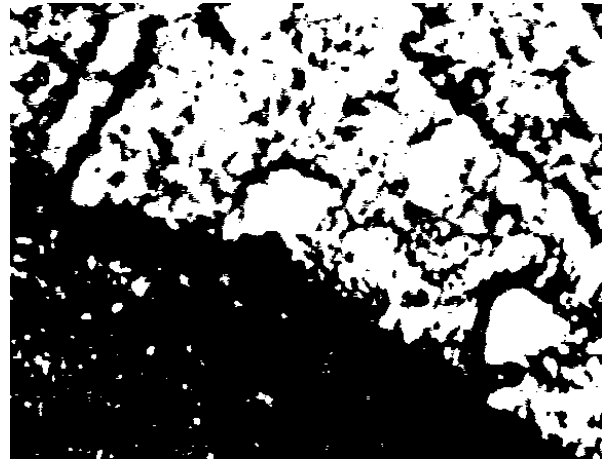
5  $\mu$ m

Obj 20x

Treatment date: Tue 19-Jun-2012 Time: 11:29:27

Microscope model: Olympus BH-2 CCD Scion

Image-a



5  $\mu$ m

Scale: 0.049  $\mu$ m / pixel

Obj 100x

Treatment date: Tue 19-Jun-2012 Time: 11:48:13

Microscope model: Olympus BH-2 CCD Scion

Image-b

- Zone où la phase  $\alpha$  domine.

- zone où les phases  $\alpha$  et  $\beta'$  sont les mêmes.



5  $\mu$ m

Scale: 0.240  $\mu$ m / pixel

Obj 20x

Treatment date: Wed 20-Jun-2012 Time: 15:12:4

Microscope model: Olympus BH-2 CCD Scion

Image-c

- Zone où  $\beta'$  domine.

Figure IV.11 : Structure d'un fil neuf après le traitement recuit en laiton CuZn37, attaqué à l'acide nitrique, après traitement d'image.

### II.5.2 Interprétation De L'effet du Traitement Thermique

La conductivité électrique qu'on a calculé ( $\sigma = 57\%IACS$ ) est proche de celle que l'on trouve dans la littérature. On déduit que le fil neuf a été traité thermiquement.

Ainsi, l'homogénéité de la répartition et l'égalité (approximativement) des taux des phases  $\alpha$  et  $\beta$  du fil neuf nous permettent d'émettre une hypothèse sur un traitement thermique que le fil neuf a subi pendant sa production. Ce traitement est un traitement appelé *trempe intermédiaire* qui consiste à chauffer le fil jusqu'à 750-850° C puis trempé à l'eau. Ce traitement donne une structure aciculaire fine et homogène [18]. Cependant, la structure du fil neuf n'a pas une structure aciculaire, ceci nous conduit à penser que le fil neuf a subi un autre traitement après la *trempe intermédiaire*.

Les résultats de la micrographie de la *figure VI.10* confirment la possibilité d'un traitement de *sur-revenu* après la *trempe intermédiaire*, ceci s'explique par la coalescence des phases après le traitement de recuit.

En résumé, le fil a été traité par le traitement de trempe intermédiaire qui donne une structure homogène aciculaire, et par le traitement de sur-revenu la structure subit à une coalescence afin de donner la structure représentée sur la *figure IV.3*.

#### **Conclusion :**

L'étude micrographique du fil du laiton à l'état neuf, usagé et après notre traitement thermique, et les propriétés électriques et mécaniques correspondantes à la structure du fil neuf prouvent une très bonne aptitude à l'utiliser comme une électrode outil dans le procédé d'usinage par électroérosion.

# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

---

Les conditions violentes de l'électroérosion imposent de bien choisir le matériau pour le fil. Le fil est choisi en fonction de ses propriétés mécaniques et électriques, par conséquent, le fil doit avoir : une haute résistance à la traction, une haute conductivité électrique, une basse température de fusion et une basse température requise pour maintenir une pression de vaporisation donnée.

Dans ce travail nous avons étudié la micrographie d'un fil en laiton (CuZn37) avant et après son utilisation, et l'effet des traitements thermiques sur la structure de ce fil. Cette étude nous a conduit aux résultats suivants :

- La structure du fil est une structure biphasée  $\alpha\beta'$  ;
- Le fil est affecté lors de son utilisation (présence des cratères sur la surface du fil usagé) ;
- Le fil est un fil traité thermiquement.

Les résultats expérimentaux ainsi que les données obtenues dans la littérature confirment la bonne qualité de ce fil pour être un excellent fil de découpe.

Enfin nous notons que ce travail reste ouvert et à enrichir. Pour cela nous proposons comme suite à ce travail :

- ❖ De faire une analyse chimique du fil.
- ❖ D'utiliser le Microscope électronique à balayage pour mieux identifier la structure et de choisir un autre réactif.
- ❖ De choisir un fil non traité pour bien voir les effets des traitements thermiques.
- ❖ D'effectuer un traitement thermique sous vide pour éviter la dézincification à haute température.
- ❖ De faire des essais de la traction et de microdureté.



## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1]: Singh S, Maheshwari S, Pandey PC. Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. J Mater Process Technol 2004; 149:272-277.
- [2]: Puertas I, Luis CJ, Alvares L. analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-CO. J Mater Process Technol 2004; 153-154:1026-1032.
- [3] : source charmillles technologies, EDM\_04\_06.doc, techniques de fabrication, EI ARC & EIG, septembre 2004.
- [4]: RAJURKAR (K.P.), WANG (W.M.) et ZHAO (W.S.), WEDM adaptative control with a multiple input model for identification of workpiece height. Annals of the CIRP, vol. 46/1/97 p. 147-150 (1997).
- [5] : C. JOSEPH, contribution à l'accroissement des performances du processus de  $\mu$ EDM par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision, thèse no 3281 (2005).
- [6]: ALBINSKI (K.). The polarity of electrodes in electrodischarge machining. Int. Symp. For Electro Machining, ISEM XI p. 95-103 (avr.1995).
- [7]: Daniel KREMER, usinage par électroérosion, BM 7 251 techniques de l'ingénieur, traite génie mécanique, 2003.
- [8]: A Reference to Understanding, Selecting and Using Wire on Wire-cut EDM Machines, selecting and using wire on wire-cut EDM machines, second edition, intech EDM 1995, printed in u.s.a.
- [9] : Struers. Application Notes, Préparation métallographique du cuivre et des alliages de cuivre, Printed in Denmark by rosendahls Bogtrykker, [www.struers.com](http://www.struers.com).
- [10] : H .DE LEIRIS, METAUX ET ALLIAGES TOME III, MASSON ET C<sup>ie</sup>, EDITEURS 120,B<sup>d</sup> St-Germain, paris VI<sup>e</sup> 1971.
- [11]: ASM International, The Materials Information Company, HANDBOOK, Heat Treating, VOLUME 4, 1991.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [12] : Dominique ARNAUD, Jean BARBERY, Roger BIAIS, Bernard FARGETTE et Pierre NAUDOT, Propriétés du cuivre et de ses alliages, M430 technique de l'ingénieur, traité Matériaux métallique, 2003.
- [13] : LAMINERIES MATTHEY SA Alliage CuZn37, Edition 3.01, 2007, [www.matthey.ch](http://www.matthey.ch).
- [14] : catalogue DacoCut EDM Wire Electrodes, Germany, 2007, [www.rbsystem.info](http://www.rbsystem.info).
- [15] : F. FISCHER et H. VOSSKUEHLER, Metall, 1961, 15, N° 11, pp. 1073-1075.
- [16] : Traitements thermiques du cuivre et de ses alliages, Jean BARBERY, M 1295 Technique de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, 2003.
- [17] : F. SANTINI et J. TIGEOT, la Technique Moderne, 1966, N° 7-8 (N° spécial Traitements Thermiques, tome II), pp.36-39.
- [18] : F. SANTINI, A. SZYSZKOWSKI et D. WHITWHAM, Cuivre Laitons alliages, 1961, N° 62, pp 27-31.
- [19] : R. EHRT et M. MAY, Neue Hutte, 1964, 9. N° 7, pp. 419-422.
- [20] : M. DAGUIER, Cuivre-Laiton-Alliages, Nov-Déc. 1968, N° 106, pp. 3-6.
- [21] : HARGREAVES, Journal INS. Metals, 1939. 64, pp. 603-616.
- [22] : J. HERENGUEL, Métallurgie spéciale, Tome II, le Cuivre et ses alliages, P.U.F paris, 1962, p.39.