

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème :

*Etude des propriétés électriques de tréfilés en
alliages du système (Sn Zn), en vue de
remplacer l'alliage (Cu Zn37).*

Proposé et dirigé par :
Mr.M. CHITROUB

Réalisé par :
Mr. Noureddine CHIHANI

Promotion: Juin 2012

Ecole Nationale Polytechnique, Hacén Badi, B.P.182, El-Harrach, 16200 Alger
Tel: 021.52.53.01-03, Fax: 021.52.29.73 www.enp.edu.dz.

• الملخص.

الهدف من هذه الدراسة النهائية للمشروع هو إظهار القدرة الكهربائية للخلائط الثنائية الناقلة للكهرباء Sn_x-Zn_y الغير مكلفة لتحل محل الخليط الثنائي CuZn37، لتستخدم كسلك للقطع في آلة التنظيم الإداري في BCR (براغي، سكاكين وأدوات المطبخ).
الدراسة التجريبية تركز على تطوير ستة سبائك التي تم إعدادها من قبل الصب ومختلفة التكوين ورصد المقاومة الكهربائية الخاصة بهن بالنسبة لدرجة حرارة الطبخ والنسبة لزمن الطبخ الأصلية والممررة بالتشوه الأخدودي.
كلمات البحث:

المقاومة الكهربائية، الناقلة الكهربائي، التشوه الأخدودي الخ

• *Résumé*

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de mettre en évidence la capacité électrique des alliages conducteurs binaire Sn_x-Zn_y peu coûteux, afin de substituer l'alliage CuZn37, utilisé comme fil de coupe dans la machine d'électroérosion de BCR (Boulonnerie, coutellerie et robinetterie).

L'étude expérimentale a porté sur l'élaboration de six lingots par la méthode de fonderie de composition différente et de suivre l'évolution de leurs résistivité électrique en fonction de la température de recuit et du temps de recuit après déformation par laminage en cannelure.

Mots clés :

La résistivité électrique, conductivité électrique, laminage en cannelure...etc.

• *Summary*

The objective of this final project study is to demonstrate the ability of electrical conductors binary alloys $Sn_x Zn_y$ inexpensive to replace the alloy CuZn37, used as a cutting wire EDM machine in the BCR (bolts, fittings and cutlery).

The experimental study focused on the development of six ingots by casting method of different composition and to monitor their electrical resistivity as a function of annealing temperature and annealing time after deformation by wire drawing.

Keywords:

The electrical resistivity, electrical conductivity, etc. ... rolling groove.

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu le tout puissant de m'avoir créé et donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail.

Nos sincères remerciements et profonde gratitude à Mr M. CHITROUB mon encadreur, pour m'avoir dirigé et soutenu tout au long de ce travail. Ses qualités intellectuelles et sa modestie ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également Mr F. HELLAL pour son aide concernant des appareils de mesure.

Je remercie par anticipation, Monsieur le président du jury, Dr A. DAIMELLAH, ainsi que tous les membres du jury à savoir, Pr F. HELLAL et Dr N. KECHOUD et, d'avoir bien voulu siéger notre jury.

Sans oublier de remercier Mr KECHOUAN, Chef de Laboratoire des couches Minces au sein de l'USTHB, qui nous a permis de réaliser des mesures indispensables à notre thème.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- *A mes chers parents pour leur soutien et leur présence permanente à mes côtés et leurs inquiétudes pour ma réussite ; ma mère qui m'a soutenu pendant toute ma vie et mon père qui a fait de moi ce que je suis parvenu à être aujourd'hui...*
- *A mon frère et à mes sœurs.*
- *A tous les membres de la famille.*
- *A tous mes amis.*

Noureddine

Sommaire

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

Partie A : Etude bibliographique

I. Electroérosion.

I.1. Historique.....	2
I.2. Définition.....	2
I.3. Principe.....	2
I.4. Les électrodes.....	3
I.5. Les liquides diélectriques.....	3
I.6. Les type d'usinage.....	4
I.7. Conclusion.....	7

II. Propriétés électriques.

II.1. La Résistance et la résistivité électrique.....	8
II.2. Influence de l'état physique et mécanique du matériau Sur la résistivité.....	9
II.2.1. Restauration.....	9
II.2.2 Recristallisation.....	10
II.2.3. Traitements thermiques et la résistivité électrique.....	11
II.2.4. État mécanique.....	12
II.3. Essais de dureté.....	13

III. Le tréfilage.

III.1. Définition.....	16
III.2. Fil machine.....	16
III.3. La machine simple.....	16
III.4 Les machines multiples.....	19
III.5 Écrouissage.....	20
III.6. Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écrouissage.....	21
III.7. Les observables du tréfilage (frottement, force et température).....	22

IV. Les propriétés physiques et mécaniques du Cu, Zn, Sn.

IV.1. Propriété de zinc.....	26
IV.2. Propriétés de l'étain.....	26
IV.3. Propriété du cuivre.....	27
IV.4. Alliage Sn-Zn.....	28
IV.5. alliages cuivre-zinc de 5 à 45 %Zn (Laitons).....	28

Partie B : Etude expérimentale

I. Descriptif des expériences.

I.1. Elaboration des alliages Sn_xZn_y	29
I.1.1. préparation du moule.....	29
I.1.2. Calcul des masses.....	30
I.1.3. Préparation des alliages :.....	33
I.1.4. La fonte des alliages.....	34
I.2. Etude métallographique.....	35
I.3. Traitement thermique.....	36
I.4. Laminage en cannelure (déformation à froid).....	37
I.5. Mesure de la résistivité électrique.....	37
I.5.1. Mesure de la résistivité électrique avant laminage.....	37
I.5.2. Mesure de la résistivité électrique après laminage.....	39
I.6. Micro-dureté.....	40

II. Résultats et discussions.

II.1.1. Microstructures.....	41
II. 1.2. Résistivité électrique.....	43
II.1.3. Influence du temps de recuit.....	46
II.2. Echantillons à l'état tréfilé et à l'état tréfilé plus traité.....	49
II.2.1. Microstructures.....	49
II.2.2. Résistivité électrique.....	50
II.3. la comparaison des résultats de la résistivité électrique.....	52
II.4. la micro-dureté.....	53

Conclusion générale	54
----------------------------------	----

TABLE DES FIGURES

Partie A

I. Electroérosion.

Figure I.1. Représentation schématique des différents types d'usinage et leur principe .	4
Figure I.2. Défonçage par électroérosion	4
Figure I.3. Quelques pièces usinées par enfonçage	5
Figure I.4. Principe de découpage par électroérosion par une électrode fil	5
Figure I.5. Quelques pièces usinées en utilisant le découpage par fil	6
Figure I.6. Principe d'usinage par surfaçage	6
Figure I.7. Machine moderne en commande numérique	7

II. Propriétés électriques.

Figure II.8. Élément de conducteur de section S et de longueur L	8
Figure II.9. Évolution des produits des alliages métalliques lors de la restauration et de la recristallisation	10
Figure II.10. Résistivité d'un fil écroui en fonction de la température de recuit	12
Figure II.11. Résistivité d'un fil d'aluminium en fonction du taux de réduction	13
Figure II.12. Évolution de la dureté au cours de la restauration et de la recristallisation .	14
Figure II.13. (a) processus de formation de l'empreinte.....	14
(b) dimensions de l'empreinte	

III. Le tréfilage.

Figure III.14. Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple.....	17
Figure III.15. Profil d'une filière	18
Figure III.16. Machine multiple continue	19
Figure III.17. Machine multiple à accumulation	20
Figure III.18. Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées	21
Figure III.19. Principe de l'Upsetting Sliding Test	23
Figure III.20. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière	24

Partie B

I. Descriptif des expériences.

Figure I.1. Le montage du moule avant la coulée.....	29
Figure I.2. Le diagramme d'équilibre binaire du Sn-Zn	30

Figure I.3. Le diagramme d'équilibre binaire en fraction massique du Sn-Zn .	32
Figure I.4. Balance électronique utilisée.	34
Figure I.5. Four à creuset.	34
Figure I.6. La sonde utilisée pour le contrôle de la température du four d'élaboration.	35
Figure I.7. Polisseuse mono-plateau.	35
Figure I.8. Microscope optique utilisé pour réaliser nos microstructures.	36
Figure I.9. Four de chauffage.	36
Figure I.10. Laminoir à double cylindre semi-automatique.	37
Figure I.11. Schéma représentatif du dispositif de mesure de la résistivité électrique.	38
Figure I.12. Le dispositif de mesure de la résistivité électrique.	39
Figure I.13. Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.	40

II. Résultats et discussions.

Figure II.1. Lingot brut après le démoulage.	41
Figure II.2. Les microstructures des lingots de $Sn_x Zn_x$ à l'état brut.	42
Figure II.3. Les microstructures des lingots de $Sn_x Zn_x$ à l'état recuit.	43
Figure II.4. La variation de la résistivité électrique en fonction de la température.	45
Figure II.5. Influence de la température du recuit sur la résistivité électrique.	45
Figure II.6. Influence de la température du recuit sur la résistivité électrique, temps de recuit $t = 5$ heures.	46
Figure II.7. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $= 80^\circ C$.	47
Figure II.8. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $t = 120^\circ C$.	47
Figure II.9. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $t = 160^\circ C$.	48
Figure II.10. Fil après laminage en cannelure.	49
Figure II.11. Les microstructures des fils de $Sn_x Zny$ à l'état tréfilé.	50
Figure II.12. Les microstructures des fils de $Sn_x Zny$ à l'état tréfilé + traité.	50
Figure II.13. Résistivité électrique en fonction de la température de recuit pour un temps de maintien égale à 2h, pour les échantillons tréfilés.	51
Figure II.14. Les histogrammes de la résistivité électrique des échantillons (lingots et fils) après le recuit finale.	52
Figure II.15 : La variation de la dureté des lingots tréfilés en fonction de la température de recuit et en fonction de la composition chimique.	53

TABLE DES TABLEAUX

PARTIE A

IV. Les propriétés physiques et mécaniques du Cu, Zn, Sn.

Tableau IV.1. Propriétés physiques du zinc	1
Tableau IV.2. Propriétés mécaniques à 20°C du zinc	1
Tableau IV.3. Propriétés physiques de l'étain	2
Tableau IV.4. Propriétés mécaniques à 20°C de l'étain	2
Tableau IV.5. Propriétés physiques du cuivre	2
Tableau IV.6. Propriétés mécaniques à 20°C du cuivre.....	2

PARTIE B

I. Descriptif des expériences.

Tableau I.1. Résume les résultats du calcul pour les autres valeurs de n_{Zn}	4
Tableau I.2. Résume les résultats du calcul pour les autres valeurs de M_{Zn}	5

II. Résultats et discussions.

Tableaux II.1. Résistivité électrique ρ et la conductivité électrique σ de Sn_xZn_y à l'état brut de coulée et à l'état traité.....	44
Tableaux II.2 : Résistivité et conductivité électrique de Sn_xZn_y à l'état tréfilé et à l'état tréfilé + traité.....	51
Tableaux II.3 : Dureté Vickers de Sn_xZn_y à l'état tréfilé brut et à l'état tréfilé + traité.....	53

Introduction générale.

De nos jours, la fabrication mécanique est la mise en forme des pièces, pour réaliser des formes complexes dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques, nécessite des outils de coupe de précision, telles que : le découpage par laser, l'électroérosion ...etc.

L'objectif de notre travail est d'étudier les propriétés électriques des fils conducteurs à base des alliages binaires Sn-Zn, élaborés par la méthode de fonderie, afin de substituer le fil de laiton Cu-Zn37%, utilisé actuellement dans la machine d'électroérosion de BCR. Cela nous a induit à suivre l'évolution de la résistivité électrique après tréfilage des lingots élaborés.

Le présent mémoire est structuré en deux grandes parties, A et B, qui sont à leur tour divisées en différents paragraphes.

La première partie, A, regroupe notre recherche bibliographique où sont reportées, d'une manière non exhaustive, diverses informations sur l'électroérosion, et toutes les informations théoriques sur notre technique expérimentale.

La deuxième partie, B, traite l'étude expérimentale et les résultats. Dans un premier temps, nous présenterons les procédés expérimentaux utilisés. En second lieu, nous donnerons les résultats et leurs interprétations.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des suggestions, la liste des références bibliographiques utilisées.

**Partie
A**

Etude bibliographique

I

Electroérosion

I. Electroérosion.

I.1. Historique.

Les premiers dispositifs d'usinage par électroérosion ont été conçus et réalisés en URSS au cours de la seconde guerre mondiale. Le développement du procédé connu par la suite différentes étapes mais ce n'est que vers 1955 que furent construites les premières machines industrielles, en France et en Europe Occidentales.

Depuis, de nombreux perfectionnements ont été apportés aux machines et générateurs d'usinage du fait des progrès de l'électronique, et l'usinage par électroérosion est maintenant une technique largement utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie [1].

I.2. Définition.

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 [2].

Un courant électrique de haute fréquence est appliqué entre l'électrode de l'outil et la pièce, créant des étincelles qui franchissent l'intervalle et vaporisent de petites zones de la pièce [1].

I.3. Principe.

- ❖ Les deux électrodes (la pièce et l'outil) sont plongées dans un liquide diélectrique qui circule en permanence.
- ❖ Un générateur à impulsion fournit les décharges électriques dont la durée et la tension sont réglées en fonction du matériau de la pièce qui est relié à l'anode et l'outil qui relie à la cathode.
- ❖ A chaque impulsion il se produit une décharge électrique entre la pièce et l'outil qui provoque l'érosion de la pièce environ de 99% et pour l'outil environ de 1%.
- ❖ L'électrode a la forme complémentaire de la forme à réaliser.
- ❖ Les particules du métal brûlé sont entraînées par le liquide diélectrique

En cours d'usinage, il convient de maintenir la distance entre la pièce et l'électrode constante, le déplacement de l'électrode est assuré par un mouvement d'avance servocommande, le paramètre d'asservissement étant la tension moyenne d'usinage qui est en fonction de la distance entre la pièce et l'électrode. Le métal enlevé est éjecté dans le liquide diélectrique [1].

I.4. Les électrodes.

La recherche d'une précision d'usinage élevée et d'états de surface fins en usinage implique l'utilisation des électrodes d'une précision au moins égale et ayant elles-mêmes un bon état de surface.

Quant aux matériaux d'électrodes, ils doivent être conducteur d'électricité et de plus, pour avoir une bonne résistance à l'usure, posséder des propriétés thermo-physiques particulières [1]:

- Températures de fusion et d'ébullition élevées.
- Chaleurs latentes de fusion et d'ébullition élevées.
- Diffusivité thermique élevée.

Les matériaux les plus utilisés pour la fabrication d'électrodes pour l'usinage de l'acier, sont :

- le graphite.
- le cuivre.
- les matériaux à base de tungstène élaboré.

Choix du matériau d'électrode il se fait en fonction des critères suivants [1]:

- la nature du matériau de la pièce.
- les dimensions de l'électrode.
- les caractéristiques géométriques et micro-géométrique de la pièce
- Le prix de ce matériau.

I.5. Les liquides diélectriques.

La plupart des produits employés comme diélectriques sont des hydrocarbures ou bien l'eau ordinaire ou dé ionisée [1].

La fonction du diélectrique est triple en usinage par électroérosion:

- Amorçage des décharges donnant lieu aux étincelles, par claquage provoqué par la tension appliquée entre l'électrode et la pièce.
- Évacuation des résidus d'usinage. (injection ou aspiration).
- Refroidissement de la pièce et de l'électrode que l'étincelage tend à chauffer.

I.6. Les types d'usinage.

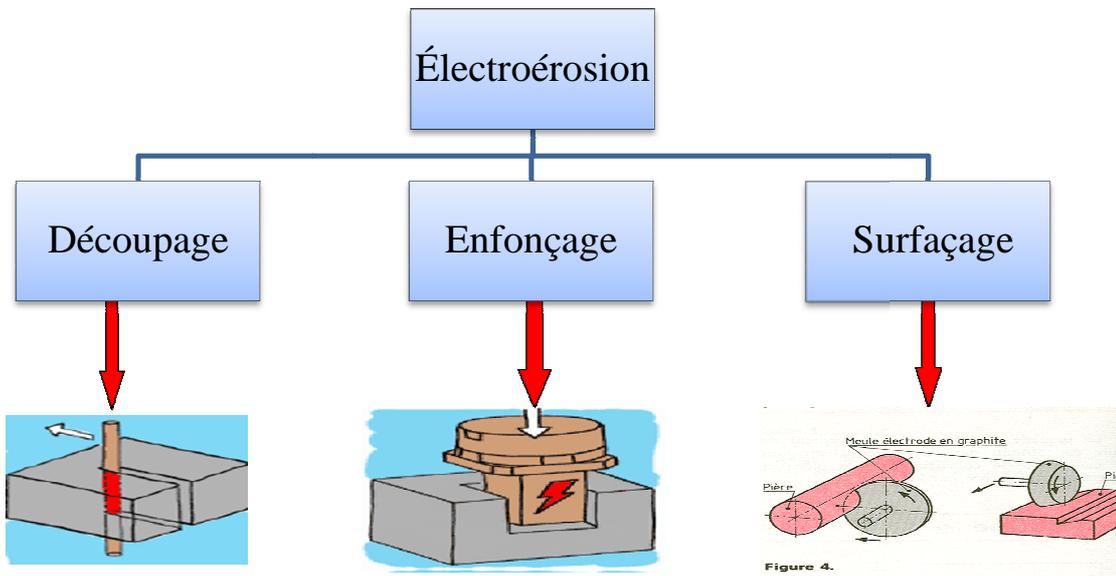


Figure I.1. Représentation schématique des différents types d'usinage et leur principe [1].

I.6.1. Usinage en plongée (Enfonçage).

L'électroérosion par enfonçage reproduit dans une pièce métallique la forme d'un outil appelé électrode comme la montré sur la figure I.2.

Dans la zone d'usinage, chaque décharge crée un cratère dans la pièce (enlèvement de matière) et un impact sur l'outil (usure de l'électrode).

Il n'y a jamais de contact mécanique entre l'électrode et la pièce.

L'électrode est le plus souvent en cuivre ou en graphite [1].

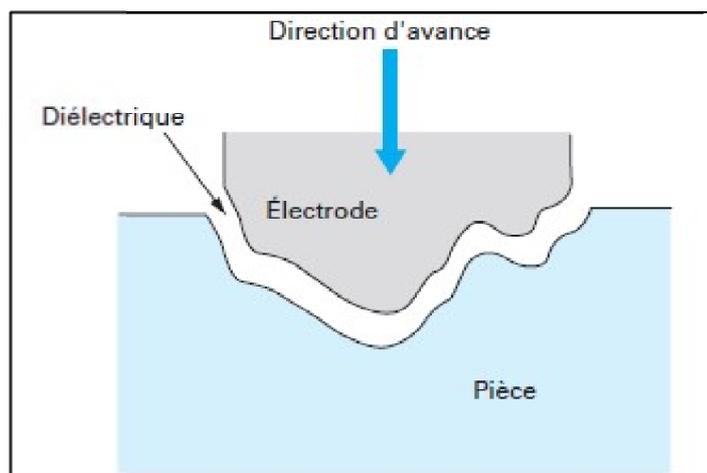


Figure I.2. Défonçage par électroérosion [2].



Figure I.3. Quelques pièces usinées par enfonçage [1].

I.6.2 Usinage par découpage.

La découpe par fil consiste à utiliser un fil tendu et à le déplacer à l'aide de mouvements gérés par une commande numérique 2 axes ou 4 axes (figure I.4), La matière est enlevée progressivement, et le fil reproduit petit à petit la forme programmée, avec une saignée un peu plus grande que son diamètre (diamètre plus de deux fois la distance inter électrode). Cette technique ne nécessite pas la fabrication préalable d'une ou plusieurs électrodes, et est donc naturellement flexible.

Son intérêt principal est de permettre de réaliser des découpes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm ; le plus souvent 0,2 ou 0,25 mm) [2].

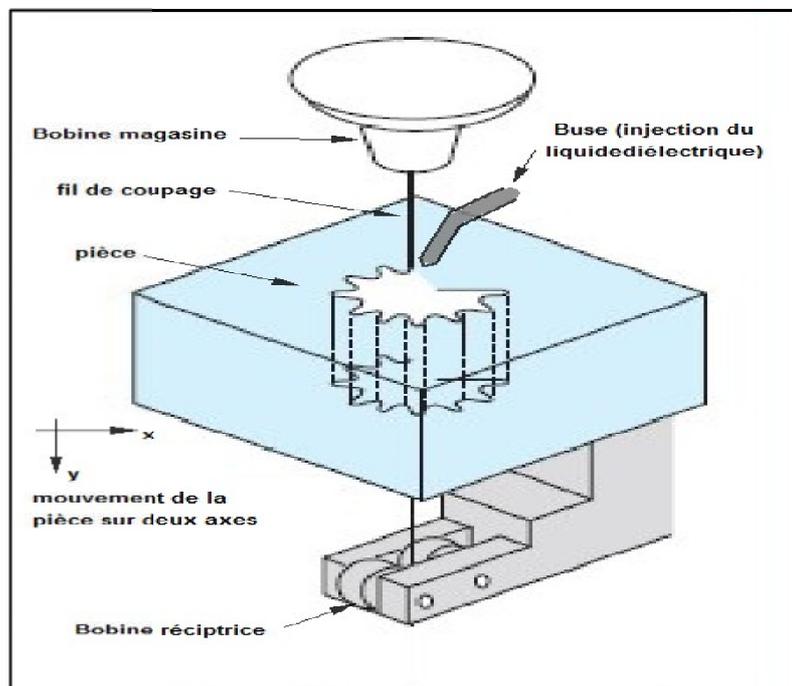


Figure I.4. Principe de découpage par électroérosion par une électrode fil [2].

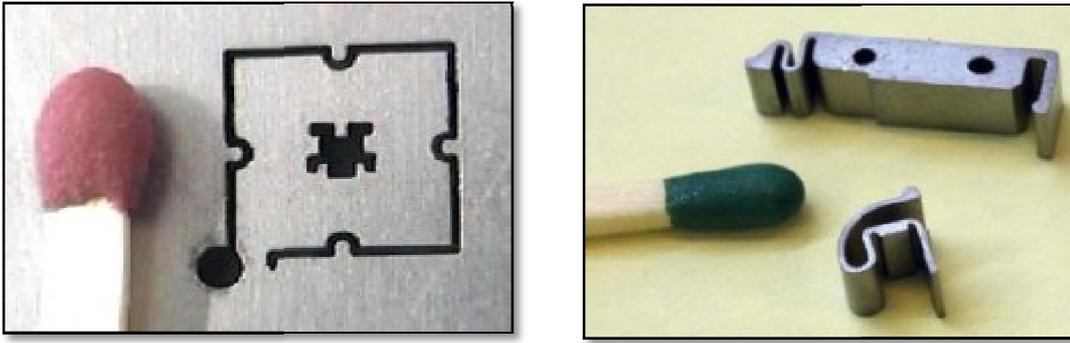


Figure I.5. Quelques pièces usinées en utilisant le découpage par fil [1].

I.6.3. Usinage par surfaçage.

Ce procédé s'apparente à la rectification des surfaces planes et cylindriques mais on utilise une meule électrode en graphite comme la montré sur la figure I.6 [1].

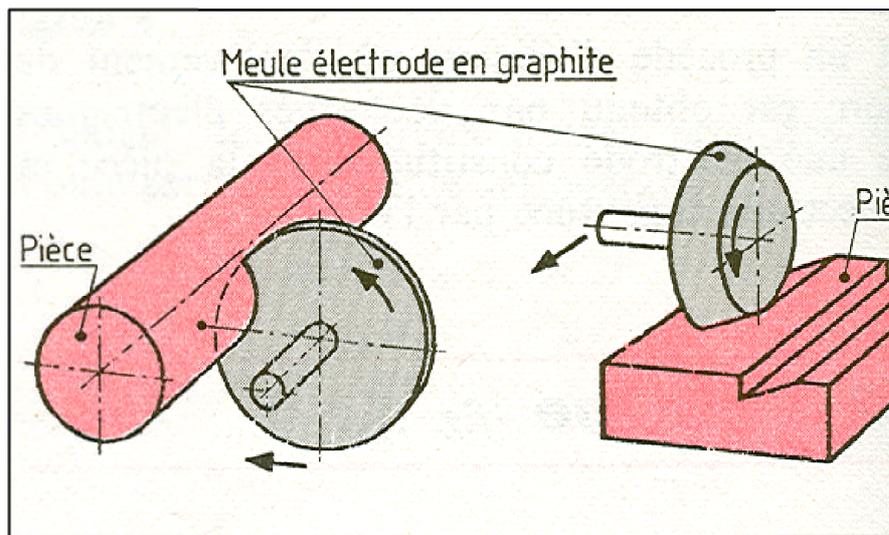


Figure I.6. Principe d'usinage par surfaçage [2].

I.7. Domaine d'utilisation.

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, découpe de petites séries) [2].



Figure I.7. Machine moderne en commande numérique [1].

I.7. Conclusion.

L'électroérosion est incontournable pour réaliser des formes complexes dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques. Ses concurrents potentiels sont l'usinage à grande vitesse (qui ne permet pas cependant d'obtenir des détails aussi fins) et le prototypage rapide, qui est plus flexible, et sa très grande qualité est la précision, qui peut être meilleure que 0,01 mm [2].

II

Propriétés électriques

II. Propriétés électriques.

II.1. La Résistance et la résistivité électrique.

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

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

Une des premières découvertes expérimentales sur le courant électrique dans les fils conducteurs fut la *loi d'Ohm* [11].

$$\Delta U = RI$$

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

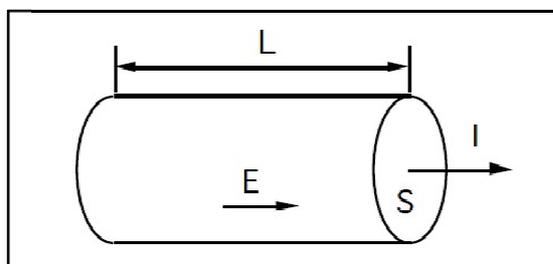


Figure II.8. Élément de conducteur de section S et de longueur L [11].

La résistance du fil conducteur est fonction de sa longueur L et de sa section S selon la formule suivante:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

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

Elle varie de $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ pour un très bon conducteur (cuivre), à $10^{16} \Omega \text{ m}$ pour un bon isolant (quartz fondu) à température ambiante [11].

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

$$E = \frac{\Delta U}{L}$$

Parallèle en tout point au fil et dirigé dans le sens du courant (voir la figure II.8). Des charges soumises à un champ électrique d'intensité constante sont uniformément accélérées, or le courant électrique apparaissant lorsque l'on établit une différence de potentiel tend rapidement vers une valeur constante, ce qui signifie que les charges possèdent alors (du moins en moyenne) une vitesse constante. Par analogie avec la chute d'un corps dans un fluide visqueux, on peut imaginer que le fil exerce une force de frottement sur les charges en déplacement. Cette résistance à l'avancement est à l'origine de la résistance électrique. La nature exacte de cette force dépasse le cadre de la manipulation; une théorie satisfaisante de la résistance électrique ne peut d'ailleurs se faire que dans le cadre de la mécanique quantique [11].

II.2. Influence de l'état physique et mécanique du matériau sur la résistivité.

II.2.1. Restauration.

Un échauffement jusqu'aux températures relativement peu élevées ($< (0.2 \div 0.3) \times T_f$) au dessous de la température de recristallisation le mécanisme de restauration se déclenche, au cours du stade de ce mécanisme, il n'y a pas de création des nouveaux grains, mais seulement réduction du nombre des défauts atomiques (lacunes, dislocations) et réarrangement de ceux-ci en nouvelles configurations plus stables sans modification apparente de la structure. Sous l'effet de la température, les dislocations sont plus mobiles. Elles s'éloignent les unes des autres, se redressent pour former des configurations plus stables. En général, elles s'organisent en réseaux formant des cellules polygonales. C'est ce que l'on appelle le phénomène de polygonisation. Ces modifications ne sont détectables qu'avec microscopie électronique à transmission ou indirectement (mesure de la résistivité électrique, mesure de la dureté) [8].

L'écrouissage introduit des défauts ponctuels et des dislocations ; Parallèlement, au cours du phénomène de restauration, on observe une diminution de la résistivité électrique (Figure II.9) qui est presque entièrement restaurée. L'évolution des propriétés mécaniques peut être suivie par mesure de dureté ou de façon plus précise, par mesure de la limite d'élasticité. Cette évolution dépend plus directement des défauts linéaires, c'est-à-dire des dislocations [7].

En gros, quand la température s'élève, on observe la diminution de la résistivité en plusieurs stades attribuables à la migration et à l'élimination des lacunes, et pour le stade des plus hautes températures, à la réduction de la densité des dislocations au cours de la recristallisation [4].

II.2.2 Recristallisation

La recristallisation est caractérisée par le développement des nouveaux grains au dépend d'une matrice se trouve dans un état structural moins parfait. Les conditions de chauffage et de maintien en température sont déterminées en fonction de la composition de l'alliage et du taux d'écrouissage. Les impuretés et les éléments d'addition ont pour effet d'augmenter la température de recristallisation tout en diminuant la mobilité des nouveaux joints des grains [8].

Cette transformation est accompagnée d'une diminution importante de R_m et R_e et d'une augmentation de l'allongement $A\%$ comme le montre la Figure II.9, La recristallisation est précédée par la formation des nouveaux grains par germination et croissance dans un métal écroui [7].

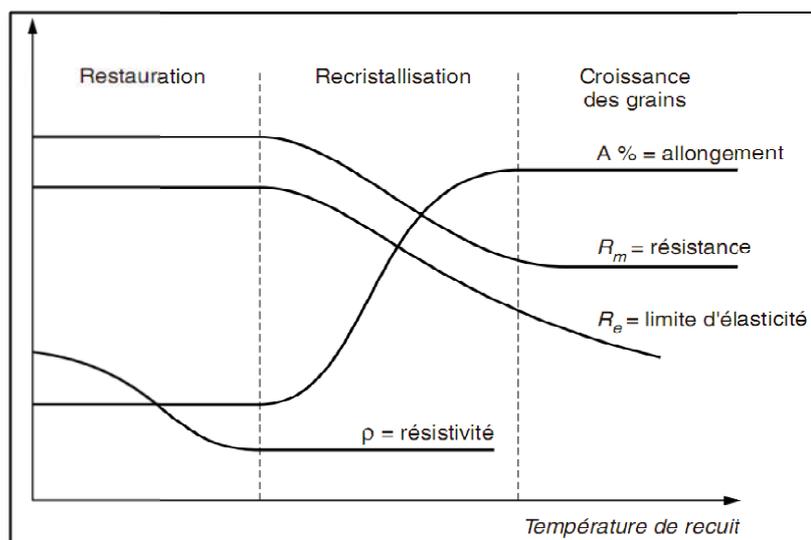


Figure II.9. Évolution des produits des alliages métalliques lors de la restauration et de la recristallisation [7].

II.2.3. Traitements thermiques et la résistivité électrique.

Les principaux traitements thermiques utilisés dans le domaine des matériaux métalliques peuvent se classer en trois grandes catégories :

- recuit.
- trempe.
- revenu et restauration.

Il s'agit d'une classification simplifiée car chaque traitement se divise en traitements spécifiques dont les paramètres sont adaptés à chaque type de matériau en vue d'une application bien précise [6].

II.2.3.1. Traitement d'homogénéisation.

Les pièces moulées demandent souvent des traitements thermiques d'homogénéisation pour améliorer leurs propriétés. Elles peuvent subir aussi toutes sortes de traitement thermique. Mais si elles contiennent des soufflures ou des gaz occlus, elles peuvent gonfler lors des traitements thermiques, ce qui nuit à leurs précisions dimensionnelles. Même un traitement de détente ou de cuisson de peinture à 200 °C peut, pour certains alliages, provoquer des gonflements [6].

En contrôlant le refroidissement des différentes parties de la pièce dans le moule, on peut obtenir des modifications structurales au cours du refroidissement et par conséquent effectuer un traitement thermique en même temps que le moulage. C'est ainsi que lors du moulage d'un arbre à cames en fonte dans un moule en sable on peut obtenir de la fonte grise pour le corps de l'arbre et de la fonte blanche très dure pour les cames elles-mêmes devant résister à l'usure, en plaçant des refroidisseurs en acier dans le moule, à l'emplacement des cames [3].

II.2.3.2. Traitement de Recuit.

Ce traitement consiste en une opération de chauffage suivie d'un refroidissement lent destiné à retrouver une structure proche de celle de l'état d'équilibre physico-chimique. Parmi les nombreux types de recuits, on distingue le recuit de restauration et le recuit de recristallisation pratiqués sur les matériaux écrouis lors de leur mise en forme. Au cours de ce traitement, le réseau cristallin fortement perturbé est restauré, les défauts ponctuels sont éliminés, la densité de dislocations diminue. Ce premier stade de la restauration peut être suivi par la recristallisation au cours de laquelle de nouveaux grains se forment par germination et croissance au sein du métal écroui. Il en découle ainsi un métal proche de l'état d'équilibre, ce qui se manifeste par une amélioration de la plasticité et, pour le point qui nous intéresse ici, par une baisse sensible de la résistivité électrique. La figure II.10 montre l'évolution de la résistivité d'un fil

d'aluminium écroui de 3 mm de diamètre en fonction de la température de recuit d'une durée de 4 h. Le métal retrouve, après recuit à 300 °C, la résistivité qu'il avait avant écrouissage en raison du retour à l'état d'équilibre [6].

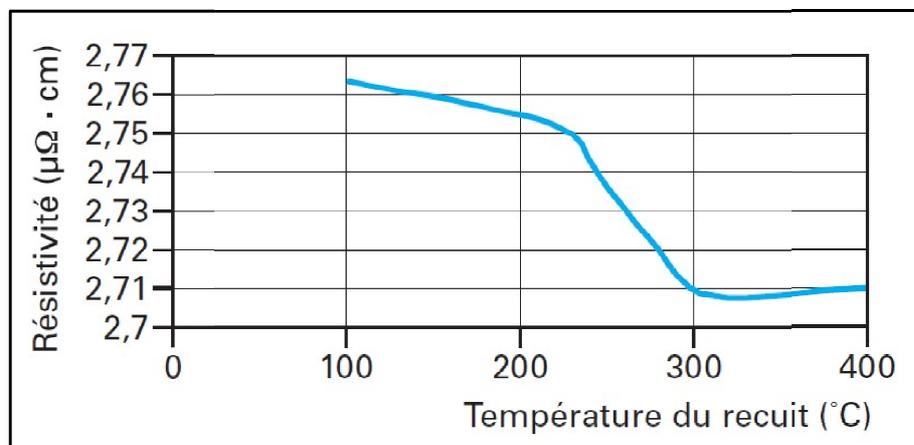


Figure II.10. Résistivité d'un fil d'aluminium écroui en fonction de la température de recuit [6].

II.2.4. État mécanique.

Les matériaux passent par des phases d'élaboration, de mise en forme à chaud et à froid au cours desquelles leur structure évolue. Cela est particulièrement vrai pour des mises en forme à froid telle que le laminage, le filage, le tréfilage, l'emboutissage, etc.

Le matériau est déformée plastiquement, et cette déformation déplace les atomes de leur position d'équilibre et augmente la densité des dislocations. Au fur et à mesure de la progression de la déformation, le glissement des plans du réseau cristallin devient de plus en plus difficile car les dislocations, piégées par les obstacles, deviennent de moins en moins mobiles. Au final, le réseau entier offre davantage de résistance à la déformation, ce qui se traduit par le phénomène de durcissement par écrouissage (augmentation de la résistance à la traction et de la dureté, diminution de la plasticité).

Cet état perturbé est également moins favorable à la circulation des électrons externes qui assurent le passage du courant électrique, ce qui se traduit par une augmentation de la résistivité. La figure II.11 illustre la variation de la résistivité lors du tréfilage d'un fil d'aluminium en fonction du taux de réduction. On rappelle que le taux de réduction est défini comme étant la quantité [6]:

$$[(D^2-d^2)/D^2]*100 \text{ (en \%)}$$

Avec

D: diameter initial,

d : diameter final.

Dans ce cas précis la résistivité augmente de 1 à 2 %, mais il existe des alliages pour lesquels cette augmentation peut être beaucoup plus conséquente (de quelques dizaines de %).

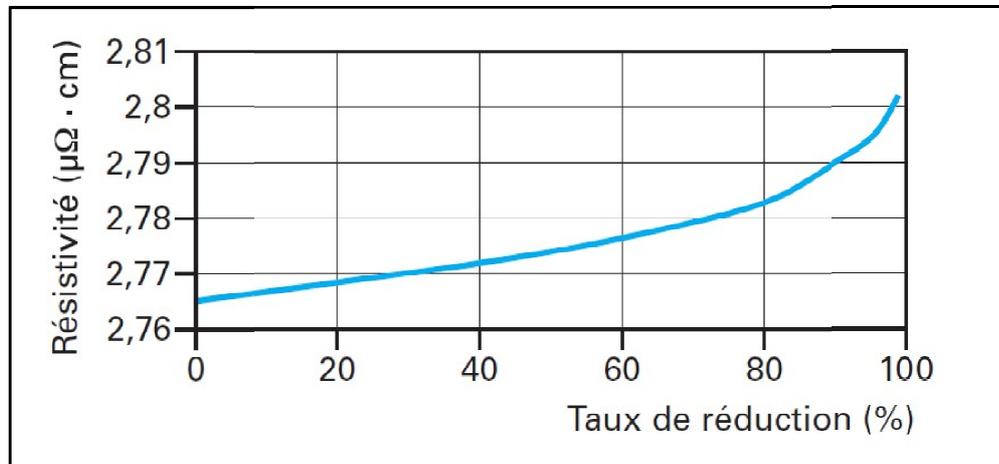


Figure II.11. Résistivité d'un fil d'aluminium en fonction du taux de réduction [6].

II.3. Essais de dureté.

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé [5].

Dans le cas on a un traitement thermique après une déformation (laminage) : le temps d'incubation et la durée de transformation de la structure sont donc réduits lorsque la température s'élève, au point de passer directement de l'état écroui à la recristallisation primaire à haute température. L'énergie motrice gagnée au cours de l'évolution est l'énergie des dislocations pour la recristallisation primaire, et celle des joints de grains pour la recristallisation secondaire : les durées d'incubation et de transformation sont donc d'autant plus réduites que le matériau de départ est écroui (figure II.12), et la recristallisation n'est pas observable en dessous d'un certain écrouissage critique. En cas de forte déformation imposée à chaud (laminage à chaud, forgeage, extrusion...), une recristallisation dynamique peut avoir lieu pendant la déformation même [5].

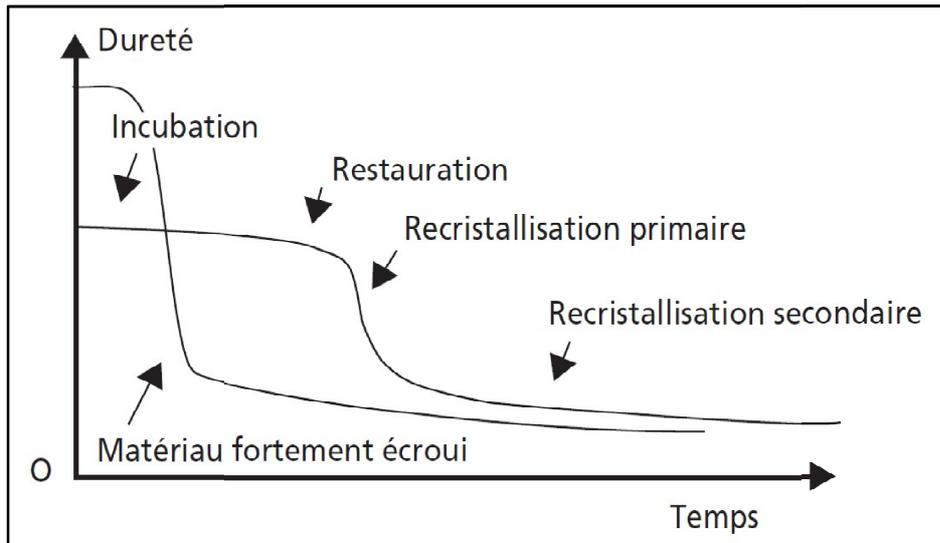


Figure II.12. Évolution de la dureté au cours de la restauration et de la recrystallisation [5].

II.3.1. Essai Vickers.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet 136° sous une charge F et à mesurer les diagonales d_1 et d_2 (figure II.13), de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S [9].

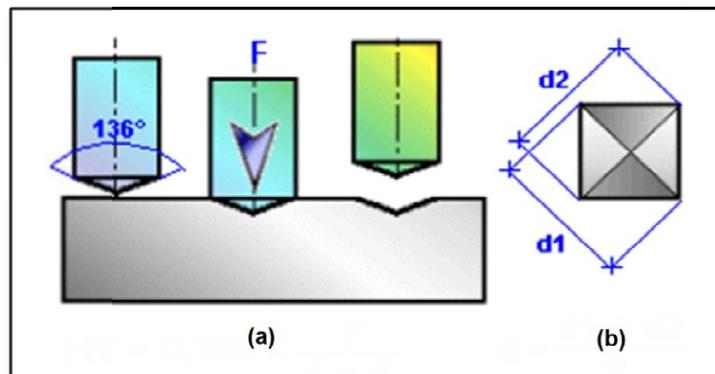


Figure II.13. (a) processus de formation de l'empreinte
(b) dimensions de l'empreinte [6].

II.3.2. Symboles et désignations.

S : surface de l'empreinte considérée comme pyramide droite.

F : charge d'essai en Newtons à $\pm 1\%$.

d : moyenne des diagonales de l'empreinte d_1 et d_2 en mm.

$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

$$HV = 0,189 F / d^2$$

II.3.3. Conditions d'essais.

- L'essai est normalement effectué à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement sans choc, ni vibration et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 s.
- On préparera la surface pour éviter toute altération.
- On choisira l'épaisseur de la pièce $\geq 1,5 \times d$.

III

Le tréfilage

III. Le tréfilage.

Connu depuis la plus haute antiquité, le tréfilage permet d'obtenir des fils métalliques de section et de formes bien déterminées.

Le principe du tréfilage, est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil ». Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant et à faire passer le métal à travers un orifice calibré, appelé « filière », sous l'action d'une traction continue. Cette technique utilise l'aptitude à la déformation plastique du métal [18].

III.1. Définition.

L'étirage, au sens général du mot, est une méthode de transformation d'un produit en un autre de section plus réduite, de même forme, ou de forme différente, avec allongement.

Il existe également le tréfilage qui est une branche de l'étirage car il fait appel au même mode de déformation plastique des métaux. La seule différence porte sur les dimensions : étirage de produits rectilignes (barres) de longueur 4 à 6m ; tréfilage de produits longs (fils) généralement bobinés [20].

III.2. Fil machine.

Le fil machine, est défini comme un produit de section pleine, laminé sur un train approprié et enroulé à chaud en couronnes à spires non rangées. La forme de la section peut être circulaire, carrée, hexagonale, octogonale, demi-ronde, rectangulaire ou autre [19]. La forme la plus couramment utilisée est la forme [18].

III.3. La machine simple.

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception (figure III.14).

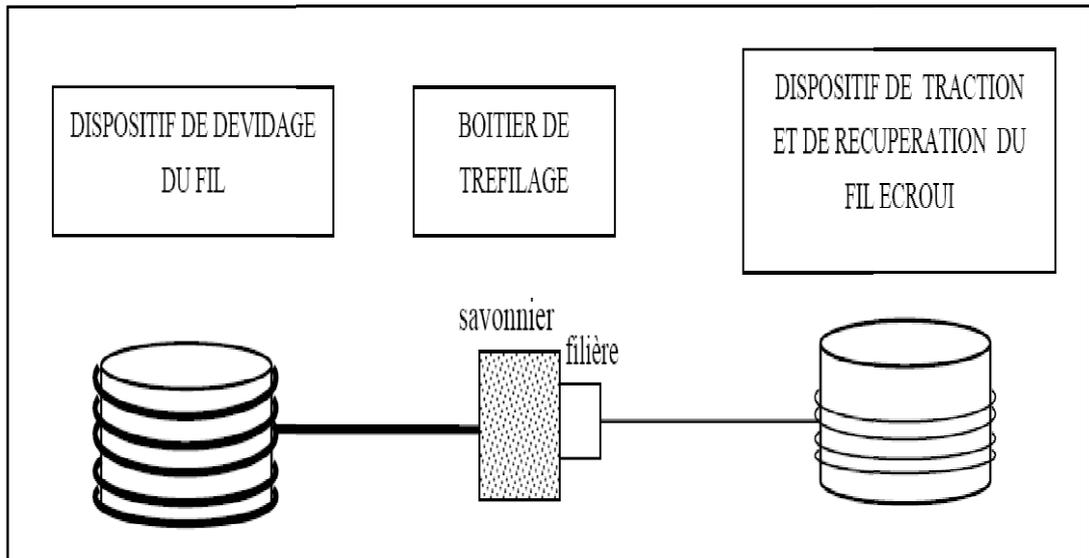


Figure III.14. Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe) [12].

III.3.1. Filière.

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théoriques ou expérimentaux.

Elle est constituée d'un noyau dur généralement en carbure de tungstène (allié au cobalt) ou en diamant, fritté dans une monture généralement en acier ordinaire (figure III.15) [19].

La surface intérieure, est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrices généralement rectilignes [18].

Les principales caractéristiques géométriques d'une filière sont :

- cône d'entrée, permettant l'entraînement du lubrifiant ;
- cône de travail, d'angle au sommet 2α ;
- portée cylindrique, dont la longueur est comprise entre $1/3$ et $1/2$ du diamètre à obtenir ;
- cône de sortie ou chanfrein de dégagement.

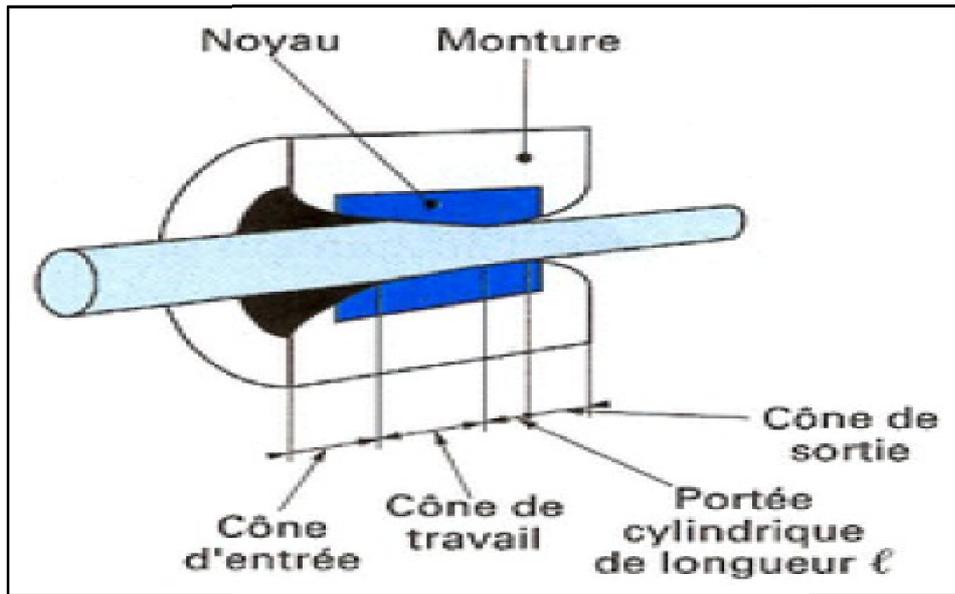


Figure III.15. Profil d'une filière [18].

Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant (appelé également savon ou graisse) et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant [12].

III.3.2 Le lubrifiant.

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

En général, pour les gros et moyens diamètres, ce sont des savons qui sont utilisés (tréfilage à sec) : il s'agit de corps pulvérulents composés d'une matière grasse (sel métalliques d'acides gras) et de charges minérales. Le rôle de ces lubrifiants est de former un film suffisamment épais sur le fil de manière à éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface. Ils permettent ainsi des réductions successives, mais donnent un aspect terne au fil. Suivant les applications ultérieures du fil, un nettoyage s'impose pour ôter tous les résidus de lubrifiant [12].

III.4 Les machines multiples

Elles permettent des réductions de section importantes grâce à un enchaînement de filières.

Il existe trois types de machines multiples:

a) **les machines continues ou à passage direct :**

Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répandus. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. En effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil [12].

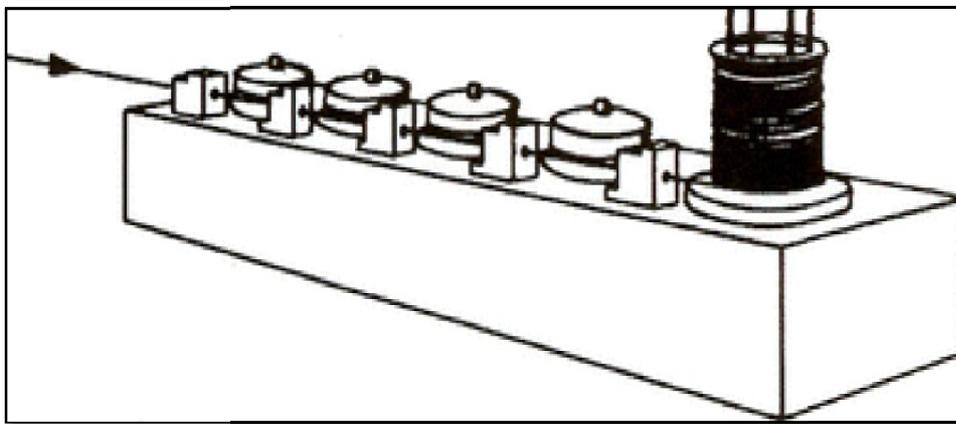
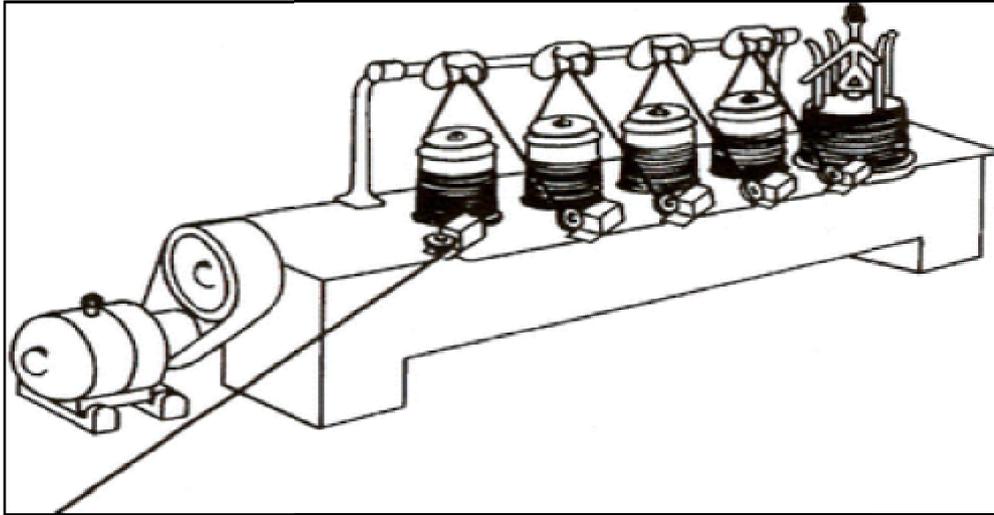


Figure III.16. Machine multiple continue [18].

b) **Les machines à accumulation.**

Il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Les passes sont calculées pour que chaque filière débite plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante d'où une accumulation du fil sur la bobine. Cette dernière favorise le refroidissement du fil, problématique du point de vue métallurgique pour les aciers au carbone, et permet de ne pas interrompre la production de bobines aval en cas de problème sur les bobines amont [12].



Figure

III.17. Machine multiple à accumulation [18].

c) Les machines à glissement.

Dans ces machines dédiées au tréfilage humide, il n'y a ni équilibrage des vitesses, ni accumulation de fil. Le glissement du fil sur les bobines compense les différences de vitesses.

Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche", c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 9,5mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes. Le fil peut ensuite être tréfilé en "reprise" à sec sur des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fils très propres [12].

III.5 Écrouissage.

La déformation du fil au cours de l'étirage, à travers la filière, provoque une modification générale de ses propriétés. La variation des caractéristiques mécaniques : résistance, limite d'élasticité, allongement, striction, retient tout particulièrement l'attention du tréfileur [18].

• l'allongement du fil λ

La conservation du volume, entre l'entrée et la sortie de filière, au cours de la déformation plastique permet d'écrire que $S_e.L_e = S_s.L_s$. Nous avons alors

$$\lambda = \frac{L_s}{L_e} = \left(\frac{R_e}{R_s} \right)^2 \quad (1)$$

Avec L_e , L_s : les longueurs initiales et finales de fil.

• la réduction du fil :

$$r = 1 - \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^2 \quad (2)$$

• la déformation :

$$\varepsilon = \ln \lambda = 2 \ln \left(\frac{R_e}{R_s} \right) \quad (3)$$

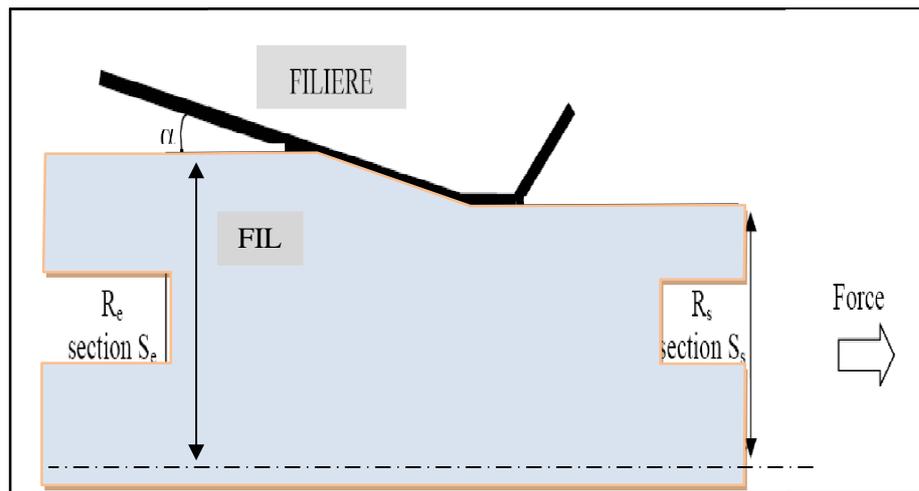


Figure III.18. Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées [12].

III.6. Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écrouissage.

Au fur et à mesure que le fil s'écrouit :

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

Ces conséquences sont exploitées en tréfilage, pour obtenir des fils avec des caractéristiques de résistance à la traction, de limite d'élasticité et d'allongement définies en fonction de l'utilisation ultérieure [18].

III.7. Les observables du tréfilage (frottement, force et température).

III.7.1. Le frottement.

Contrairement à d'autres procédés où il est moteur, le frottement est un phénomène parasite pour le tréfilage. Il génère une augmentation de la force de tréfilage et de la température au cours de l'opération et rend les conditions de tréfilage critiques (rayures du fil, usure de la filière). L'objectif du tréfileur est donc de le minimiser en ajustant les paramètres du procédé (réduction du fil, angle de filière) ou en utilisant un bon lubrifiant (c'est-à-dire un lubrifiant qui recouvre de manière homogène le fil).

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

- la mesure directe consiste à mesurer la force axiale et la force normale de tréfilage. Cette voie nécessite de disposer toutefois de matériels de tréfilage sophistiqués et bien instrumentés. La technique la plus connue est le "split-die", développée par Mc Lellan en 1952-53 puis améliorée par Wistreich, qui consiste à utiliser une filière coupée en deux et à mesurer conjointement la force qui tend à séparer les deux parties ainsi que la force axiale lors du tréfilage,
- la mesure indirecte consiste à mesurer la force axiale de tréfilage et à calculer le coefficient de frottement grâce à un modèle mécanique et à la connaissance de la contrainte d'écoulement du fil. Ce type de calcul peut toutefois être entaché d'erreurs qui découlent d'une connaissance qu'approchée de la contrainte d'écoulement ou d'hypothèses plus ou moins discutables sur le frottement et le travail redondant. Cette approche fournit quoi qu'il en soit de bonnes estimations [13].

Une autre méthode d'identification assez précise du coefficient de frottement a été proposée plus récemment : l'Upsetting Sliding Test (figure III.19).

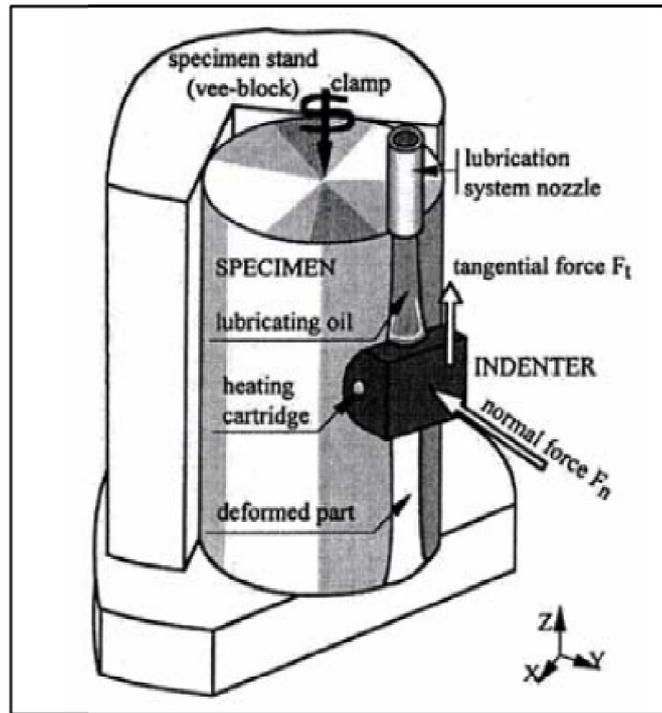


Figure III.19. Principe de l'Upsetting Sliding Test [16].

Il s'agit d'un essai de laboratoire qui consiste à reproduire les conditions de contact physique, chimique et mécanique de l'interface pièce-outil du procédé de mise en forme au moyen d'un indenteur (qui représente l'outil) et d'un échantillon (qui représente la pièce). Après un ajustement des paramètres de l'essai (géométrie de l'indenteur et pression de contact), l'indenteur se déplace sur l'échantillon, et la mesure des forces tangentielle et normale, permet de calculer avec une bonne précision le coefficient de frottement. Pour le tréfilage, l'avantage de cet essai réside dans la possibilité de tester, en laboratoire, des conditions de contact représentatives du procédé puisque les matériaux des deux antagonistes ainsi que leurs états de surface peuvent être fidèles à la réalité : il est alors possible de tester les différents revêtements de surface et lubrifiants utilisés dans l'industrie et de les classer en fonction de leurs performances en terme de lubrification. Toutefois, il est actuellement mis en œuvre à des vitesses de glissement inférieures à celles attendues en tréfilage [16].

II.7.2. Force de tréfilage.

Lors de l'étirage des fils à travers une filière, les contraintes influencent considérablement les conditions de travail. La déformation plastique intervient, dans la filière, sous l'effet combiné de la *force de traction* appliquée au fil et de la *compression latérale* qui apparaît le long des parois de la filière comme une force de réaction (figure III.20).

À défaut de solution mathématique rigoureuse, des formules ont été établies, donnant des valeurs approchées des forces nécessaires au tréfilage. Ces formules cumulent [18] :

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

Le contact lubrifié fil-filière, se traduit par un cisaillement, représenté par un coefficient de frottement (μ). Le fil est caractérisé, par sa contrainte d'écoulement plastique (σ_0) et les diamètres d'entrée (D_0) et de sortie (D_1). Différents modèles ont été proposés pour évaluer l'effort de tréfilage à appliquer (F), pour tirer le fil à travers la filière. Les modèles de Siebel et Bonzel, donnent la contrainte de tréfilage (σ) en fonction de la déformation appliquée ε (pour des angles α faibles) [10] :

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

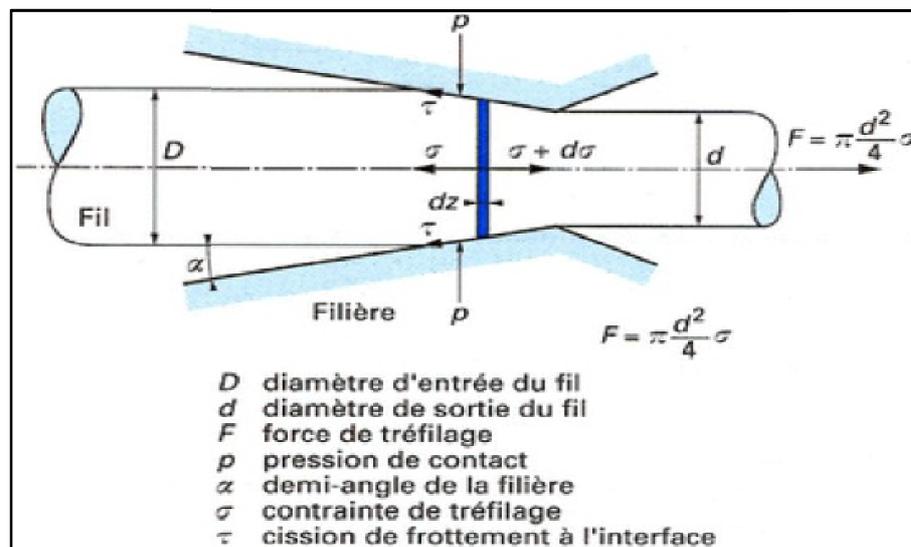


Figure III.20. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [18].

La force de tréfilage F est obtenue par multiplication de σ par l'aire de la section finale du fil s :

$$\mathbf{F = s \sigma} \quad (5)$$

La formule permet d'estimer la force et la puissance de tréfilage, si l'on se donne la vitesse de tréfilage, et ainsi la conception des tréfileuses [18].

II.7.3. Echauffement du fil.

L'énergie de tréfilage est dissipée et chauffe fil et filière. Aux vitesses pratiques, l'opération peut, avec une très bonne approximation, être considérée comme adiabatique et, à la sortie de la filière, l'échauffement $\Delta\theta$ du fil s'uniformise rapidement à une valeur donnée par la formule [10] :

$$\Delta\theta = \frac{\sigma}{\rho c} \quad (6)$$

Avec :

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

IV

Les propriétés du Cu, Zn,
et Sn

IV. Les propriétés physiques et mécaniques du Cu, Zn, Sn.

IV.1. Propriétés de zinc.

Le zinc est connu depuis la plus haute antiquité sous forme d'alliages avec le cuivre et l'étain. Il a des propriétés électrochimiques fortement anodiques, une grande électronégativité par rapport à l'acier, d'où utilisation pour la protection contre la corrosion par revêtement (galvanisation) suivant divers procédés. Il est utilisé à l'état laminé pour la fabrication de plaques de photogravure et couvertures de bâtiment [1].

Tableau IV.1. Propriétés physiques du zinc [15,17].

Structure cristalline	Masse atomique	Masse volumique [g·cm ⁻³]	Point de fusion [°C]	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Résistivité électrique [μΩ · cm]
HC	65,4	7,134 (25 °C)	418	113 (25°C)	5,92 (25°C)

Tableau IV.2. Propriétés mécaniques à 20°C du zinc [5].

résistance à la traction [MPa]	limite d'élasticité [MPa]	Allongement [A %]	module d'Young [MPa]
200 à 300	160 à 200	10 à 30 %	93 000

IV.2. Propriétés de l'étain.

L'étain (symbole : Sn) est un métal déjà connu dans l'Antiquité, sous la forme d'un alliage avec le cuivre, à l'époque dénommée âge du bronze.

Ce métal, relativement rare et cher, est malléable et ductile ; il est plus dur mais moins lourd que le plomb, et sa brillance argentée persiste longtemps quand il est exposé à l'air sec aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur. Un bruit caractéristique du métal solidifié sous la forme d'un bâtonnet, et qui se manifeste chaque fois qu'on le plie, est dû au frottement des cristaux entre eux et est appelé le cri de l'étain [14].

Tableau IV.3. Propriétés physiques de l'étain [15,17].

Structure cristalline	Masse volumique [g/cm ³]	Masse atomique	Point de fusion [°C]	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Résistivité électrique [μΩ · cm]
blanc(β) quadratique	7,29	118,71	231,9	62,8 (0°C)	11 (0°C)
gris (α) cubique	5,77	118,71	231,9	62,8 (0°C)	300 (0°C)

Tableau IV.4. Propriétés mécaniques à 20°C de l'étain [14].

Charge de rupture [MPa]	module d'Young [MPa]	Dureté Brinell [HB]
14,8	41 595	3,9

IV.3. Propriétés du cuivre.

Le cuivre et les alliages à base de cuivre offrent une heureuse combinaison de propriétés physique utilisées dans de nombreuses applications depuis l'antiquité. Le cuivre non allié est tellement mou et ductile qu'il est difficile à usiner. Mais on peut l'écraser à volonté. De plus, il est extrêmement résistant à la corrosion dans divers milieux, dont l'atmosphère ambiante et l'eau de mer [19].

Tableau IV.5. Propriétés physiques du cuivre [15,17].

Structure cristalline	Masse volumique [g/cm ³]	Masse atomique	Point de fusion [°C]	Conductivité thermique [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Résistivité électrique [μΩ·cm]
CFC	8,930	63,54	1 083	385 (25°C)	1,71 (25°C)

Tableau IV.6. Propriétés mécaniques à 20°C du cuivre [5].

Résistance à la traction [MPa]	limite d'élasticité [MPa]	Module d'Young [MPa]	Allongement [A %]
230 à 520	60 à 320	125 000	45 à 6 %

IV.4. Alliage Sn-Zn.

Cet alliage, qui résiste également bien à la corrosion, est par ailleurs très utile pour réaliser l'assemblage par brasage tendre de l'aluminium (avec des compositions soit de 20 % Zn, soit de 8 à 15 % Zn). Le diagramme d'équilibre est très simple, et il représente un eutectique à 198 °C, de composition 92 % Sn - 8 % Zn. La présence de cet eutectique, même à teneurs très faibles ($\leq 0,05$ %), donne lieu à une abondance de films inter cristallins très ténus qui sont fort fragiles.

On recommande aussi d'ajouter très peu d'étain à la coulée du zinc pour réduire fortement la contraction lors de sa solidification au moulage (limite de solubilité de Sn, à l'état solide, inférieure à 0,05 %).

On fait aussi des alliages additionnés soit de 5 à 15 % Sb pour mieux résister à la compression, soit de 0,9 à 1,5 % Cu pour accroître la dureté des alliages d'étain 70 % Sn-30 % Zn, 50 % Sn-50 % Zn, ou 30 % Sn-70 % Zn [14].

IV.5. alliages cuivre-zinc de 5 à 45 %Zn (Laitons).

En présence de certains produits chimiques. L'alliage améliore les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion du cuivre. La plupart des alliages de cuivre ne peuvent être ni renforcés par un traitement thermique ; il faut donc les écrouir ou effectuer un alliage en solution solide pour en améliorer les propriétés mécaniques.

La plupart des alliages de cuivre courant sont des laitons dans lesquels le zinc, en tant qu'impureté de substitution, est l'élément d'alliage prédominant [19].

Elles sont distinguées de bonne résistance à la corrosion dans de nombreux milieux, améliorée par addition d'étain (laiton « amirauté » : Cu-Zn29Sn1) ou d'aluminium (Cu-Zn22Al2, résistant à la corrosion et à l'érosion par cavitation), et les propriétés mécaniques croissantes avec la teneur en zinc (Cu-Zn40) [5].

Parmi les applications les plus répandues des laitons, mentionnons la fabrication de bijoux de fantaisie, de douilles des cartouches, de radiateurs d'automobile, d'instruments de musique, de boîtiers (en électronique) et de pièces de monnaie [19].

**Partie
B**

Etude expérimentale

I

Descriptif des expériences

I. Descriptif des expériences.

Cette partie est consacrée à l'énumération détaillée des différentes étapes de l'étude expérimentale ainsi que la présentation des dispositifs expérimentaux exploités ou réalisés au sein de notre laboratoire ou dans le laboratoire des solutions solides de la faculté de physique de l'Université des Sciences Technologiques Houari Boumediene.

Les étapes de cette étude sont les suivantes :

- Elaboration des alliages à base du système (Sn, Zn) par la méthode classique.
- Traitements de normalisation.
- Réduction de la section du lingot par déformation à froid (laminage en cannelure).
- Mesure de la résistivité électrique.
- Observation métallographique.

I.1. Elaboration des alliages Sn Zn.

Les étapes de l'élaboration de nos alliages Sn Zn sont les suivantes :

I.1.1. préparation du moule.

A partir d'une brique réfractaire on fabrique un moule de diamètre 8 mm et de longueur de 50mm. Le moule est coupé en deux pour faciliter la récupération du lingot. La figure I.1 représente le montage du moule avant la coulée

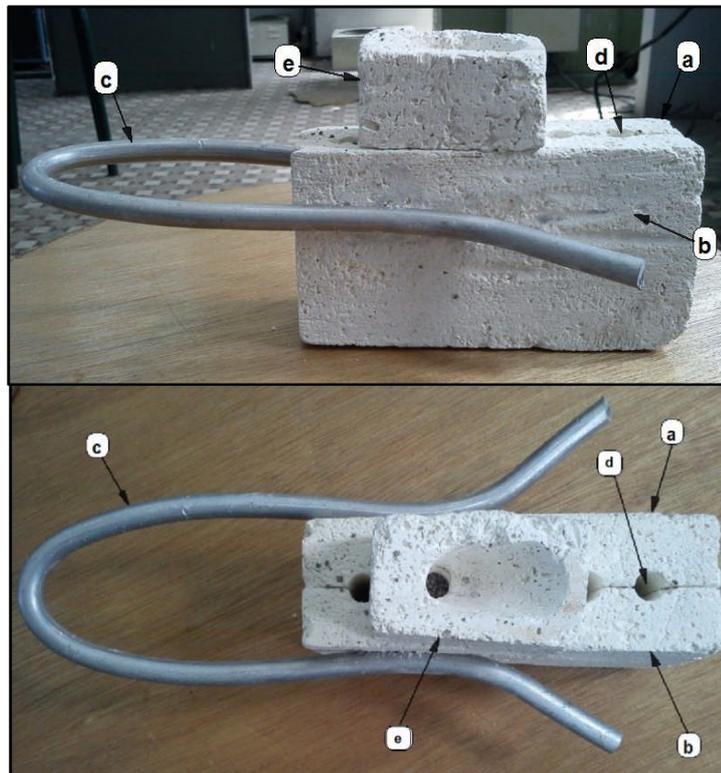


Figure I.1. Le montage du moule avant la coulée.

- (a) : demi-moule gauche.
- (b) : demi-moule droite.
- (c) : serre-joint pour fixer les deux demi-moules.
- (d) : trou de lingot.
- (e) : bassin de coulé.

I.1.2. Calcul des masses.

Le calcul des quantités de masse de l'étain et de zinc nécessaires à nos six alliages se fait à partir des diagrammes d'équilibres du système (Sn, Zn) en fraction molaire et en poids.

I.1.2.1. Calcul du volume de la lingotière.

Les dimensions du volume de la lingotière mesurées par un pied à coulisse sont les suivantes :

- Diamètre : $D = 8\text{mm}$.
- Longueur : $L = 50\text{mm}$.

Le volume de notre lingotière est donc égal à 3.10^3mm^3 .

I.1.2.2. Calcul des masses d'alliage Sn-Zn.

Le calcul des masses de Zn, Sn s'est fait suivant deux méthodes, présentées ci-dessous:

a) Méthode 1.

La méthode 1 utilise le diagramme d'équilibre établi en fraction molaire (Figure I.2.), pour calculer les masses.

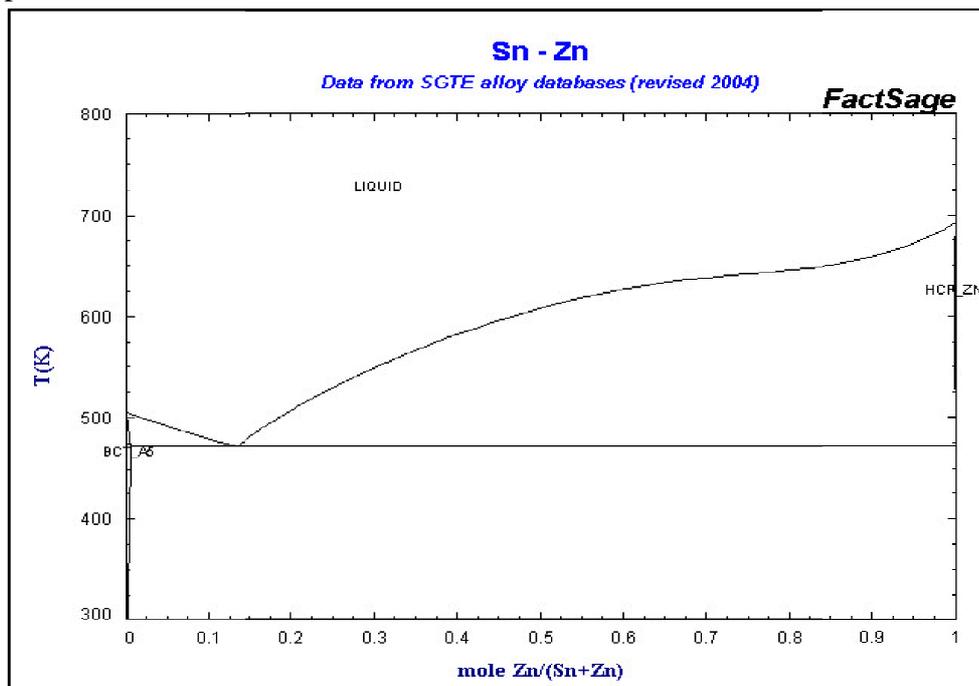


Figure I.2. Le diagramme d'équilibre binaire du Sn-Zn [12].

Le calcul des masses pour un alliage de composition 0,4 mole Zn/(Sn + Zn) (Figure I.2) est le suivant :

$$\begin{aligned} & \text{1 mole d'alliage} = n_{\text{Zn}} + n_{\text{Sn}} \\ \text{Où} & \quad n_{\text{Zn}} = 0,4 \\ \text{Donc} & \quad n_{\text{Sn}} = 0,6. \end{aligned}$$

D'autre part on a

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Zn}} &= 7.134 \text{ g.cm}^{-3} & M_{\text{Zn}} &= 65.409 \text{ g.mol}^{-1} \\ \rho_{\text{Sn}} &= 7.290 \text{ g.cm}^{-3} & M_{\text{Sn}} &= 118.710 \text{ g.mol}^{-1} \end{aligned}$$

Donc les masses de Zn et Sn nécessaires sont respectivement :

$$m_{\text{Zn}} = n_{\text{Zn}} * M_{\text{Zn}} \rightarrow m_{\text{Zn}} = 0.4 * 65.409 \rightarrow m_{\text{Zn}} = 26,163 \text{ g.}$$

$$m_{\text{Sn}} = n_{\text{Sn}} * M_{\text{Sn}} \rightarrow m_{\text{Sn}} = 0.6 * 118.710 \rightarrow m_{\text{Sn}} = 71,226 \text{ g.}$$

Et les volumes correspondant sont :

$$\rho_{\text{Zn}} = m_{\text{Zn}} / V_{\text{Zn}} \rightarrow V_{\text{Zn}} = m_{\text{Zn}} / \rho_{\text{Zn}} \rightarrow V_{\text{Zn}} = 26.163 / 7.134$$

$$\rightarrow V_{\text{Zn}} = \mathbf{3.667 \text{ cm}^3}.$$

$$\rho_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / \rho_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = 71.226 / 7.290$$

$$\rightarrow V_{\text{Sn}} = \mathbf{9.770 \text{ cm}^3}.$$

Le volume totale est égale à :

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{Zn}} + V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{tot}} = 3.667 + 9.770$$

$$\rightarrow V_{\text{tot}} = \mathbf{13.437 \text{ cm}^3}.$$

Les masses correspondant à ce volume sont :

Pour le Zinc

$$\begin{aligned} \text{On a} & \quad 26.163 \text{ g} \rightarrow 13.437 \text{ cm}^3 \\ & \quad m_{\text{Zn utilisée}} \rightarrow 3 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Donc} \quad m_{\text{Zn utilisée}} = (3 * 26,163) / 13.437$$

$$\rightarrow m_{\text{Zn utilisée}} = \mathbf{5.841 \text{ g.}}$$

Pour l'étain

$$\begin{aligned} \text{On a} \quad 71,226 \text{ g} &\rightarrow 13,437 \text{ cm}^3 \\ m_{\text{Sn utilisée}} &\rightarrow 3 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Donc} \quad m_{\text{Sn utilisée}} = (3 * 106,839) / 15,5722$$

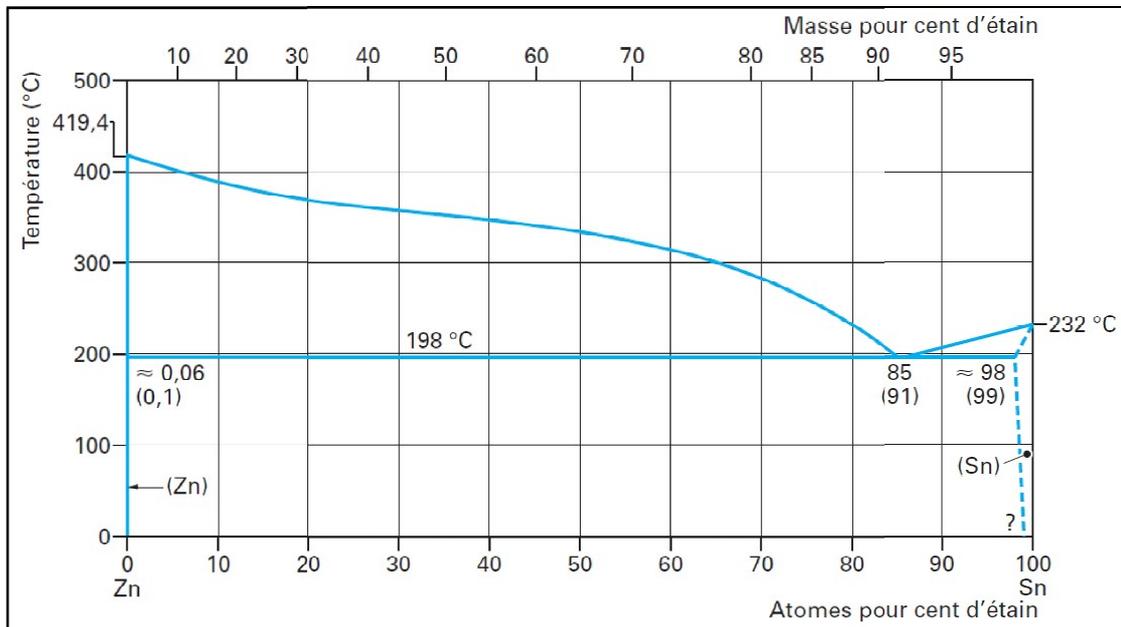
$$\rightarrow m_{\text{Sn utilisée}} = 15,902 \text{ g.}$$

Tableau I.1. Résume les résultats du calcul pour les autres valeurs de n_{Zn} .

n_{Zn}	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$m_{\text{Zn utilisée}}(\text{g})$	5,841	7,709	9,799	12,152	14,821	17,874
$m_{\text{Sn utilisée}}(\text{g})$	15,901	13,992	11,856	9,452	6,724	3,604

b) Méthode 2

La méthode 2 utilise le diagramme d'équilibre établi en fraction massique, pour calculer les masses.

**Figure I.3.** Le diagramme d'équilibre binaire en fraction massique du Sn-Zn [12].

D'après le diagramme d'équilibre en fraction massique, le pourcentage de l'étain en masses est 60% pour un alliage de composition 40% de Zn en masses.

Soit

$$M_{\text{Zn}} = 40\% \quad ; \quad M_{\text{Sn}} = 100 - 40 = 60\%$$

Et donc le volume occupé par

Le Zinc

$$\rho_{Zn} = m_{Zn} / V_{Zn} \rightarrow V_{Zn} = m_{Zn} / \rho_{Zn} \rightarrow V_{Zn} = 40 / 7.134$$

$$\rightarrow V_{Zn} = 5,607 \text{ cm}^3$$

L'étain Sn

$$\rho_{Sn} = m_{Sn} / V_{Sn} \rightarrow V_{Sn} = m_{Sn} / \rho_{Sn} \rightarrow V_{Sn} = 60 / 7.290$$

$$\rightarrow V_{Sn} = 8,230 \text{ cm}^3$$

Donc $V_{\text{tot}} = V_{Zn} + V_{Sn} = 13,837 \text{ cm}^3$

On pose α : le coefficient de changement du volume ou de la masse :

$$\alpha = V_{\text{ling}} / V_{\text{tot}}$$

$$\rightarrow \alpha = 0,217$$

$$M_{Zn \text{ utilisée}} = \alpha \cdot M_{Zn} = 8,653 \text{ g}$$

$$M_{Sn \text{ utilisée}} = \alpha \cdot M_{Sn} = 12,980 \text{ g}$$

Tableau I.2. Résume les résultats du calcul pour les autres valeurs de M_{Zn} .

M_{Zn}	40%	50%	60%	70%	80%	90%
$M_{Zn \text{ utilisée}} \text{ (g)}$	8,653	10,817	12,980	15,144	17,307	19,471
$M_{Sn \text{ utilisée}} \text{ (g)}$	12,980	10,817	8,653	6,490	4,326	2,163

Pour l'élaboration de nos alliages, nous avons choisi la méthode 2 plus simple et plus claire.

I.1.3. Préparation des alliages :

Avant de mélanger nos deux métaux purs (5N) pour élaborer nos six alliages, pour chaque alliage on effectue la pesée à l'aide d'une balance électronique de précision de l'ordre du centième (figure I.4) de nos métaux purs.



Figure I.4. Balance électronique utilisée.

I.1.4. Elaboration des alliages

L'élaboration s'est faite dans un four à creuset en graphite illustré dans la figure I.5, dans lequel les masses précédemment calculées et pesées ont été mises, suivies d'un flux de couverture (matière réfractaire non fusible) servant à isoler l'alliage à l'état liquide de l'air contenu dans le four, et plus précisément pour empêcher l'évaporation du Zn qui a la propriété de s'évaporer dès sa fusion.

La température d'élaboration est portée légèrement supérieure à celle de fusion des éléments caractérisés par la plus grande température de fusion constituant l'alliage binaire, dans notre cas, elle est de l'ordre de 450°C. La température du four est contrôlée par une sonde chrome-alumel-chrome représentée sur la figure I.6.

Le mélange liquide est dans le four, à chaque instant, il est agité et le temps de fusion à dépasser 6 heures, par contre le refroidissement s'est fait à l'air libre dans la lingotière



Figure I.5. Four à creuset.



Figure I.6. La sonde utilisée pour le contrôle de la température du four d'élaboration.

I.2. Etude métallographique

I.2.1. L'enrobage

L'enrobage s'est fait à froid pour éviter tout traitement thermique des échantillons élaborés, vu que la température de l'eutectique sont basse (200°C Sn-Zn).

I.2.2. Le polissage

Le polissage mécanique, au moyen d'une polisseuse et munie de papier abrasif allant de 400 à 1200 puis achevé par l'alumine (0,3 μ m) en suspension ont permis d'obtenir le meilleur état de surface possible. Le dispositif utilisé est illustré dans la figure I.7.



Figure I.7. Polisseuse mono-plateau.

I.2.3. L'attaque chimique :

Le but de l'attaque chimique est de créer un contraste révélant la microstructure du matériau. Pour l'alliage Sn-Zn L'attaque chimique s'est faite par le biais du Nital à 5% c.-à-d. :

5ml d'acide nitrique + 95 ml d'éthanol. [14].

I.2.4. L'observation au microscope optique :

Après l'attaque, les échantillons sont passés au microscope optique de marque

'*OLYMPUS*' assisté par ordinateur, muni d'un appareil de capture d'images (figure I.8) pour la visualisation des différentes phases.



Figure I.8. Microscope optique utilisé pour réaliser nos microstructures.

I.3. Traitement thermique

Au moyen d'un four de chauffage électronique de marque CARBOLIT-CWF 1300 (Figure I.9), équipée d'un thermocouple, on a effectué les différents recuits nécessaires à notre étude sur nos alliages élaborés. Les températures de recuit utilisées sont 60°C, 80°C, 90°C, 120°C et 160°C, pour des temps de recuit de 1h, 2h, 3h, et 5h.



Figure I.9. Four de chauffage

I.4. Laminage en cannelure (déformation à froid)

Au moyen d'un laminoir semi-automatique à double cylindres de marque VOF (Figure I.10.a), comportant plusieurs cannelures (16 cannelures) disposées côte à côte avec un diamètre qui augmente de 1mm à 7mm, on a tréfilé nos alliages.

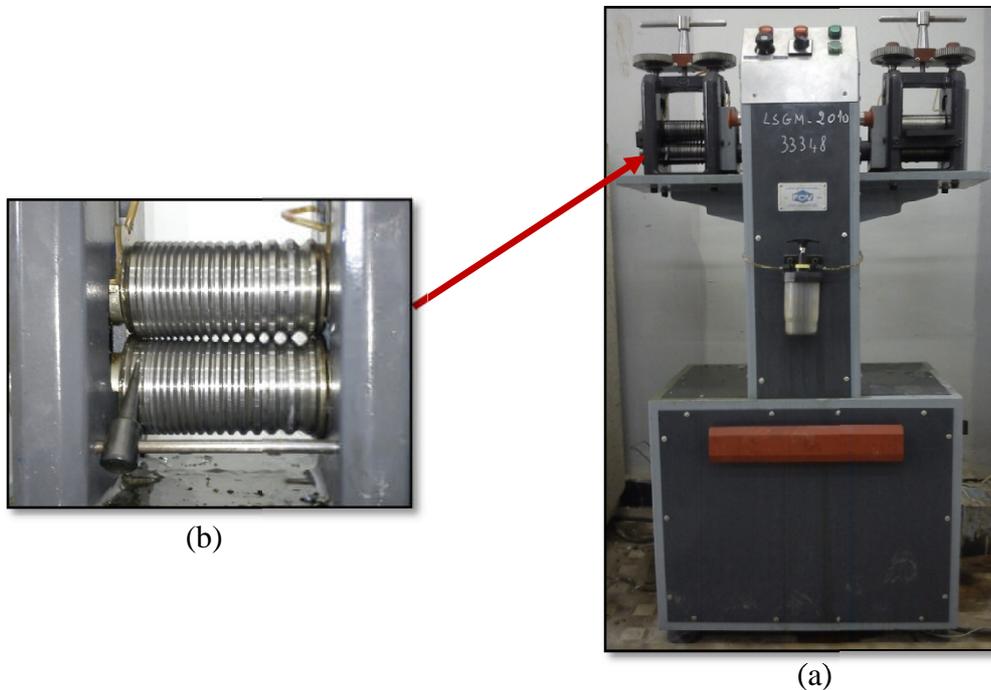


Figure I.10. Laminoir à double cylindre semi-automatique.

I.5. Mesure de la résistivité électrique

La forme géométrique de nos échantillons, nous a imposé d'utiliser deux sortes de dispositif de mesure de la résistivité électrique. La méthode de quatre points a été utilisée pour les échantillons avant le tréfilage, alors que la méthode de la mesure de la résistance a été utilisée quant elle pour les échantillons tréfilés.

I.5.1. Mesure de la résistivité électrique avant laminage

Les mesures de la résistivité électrique ont été effectuées au laboratoire des solutions solides de la faculté de physique de l'USTHB, par un dispositif dont le schéma descriptif est montré sur la Figure I.11.

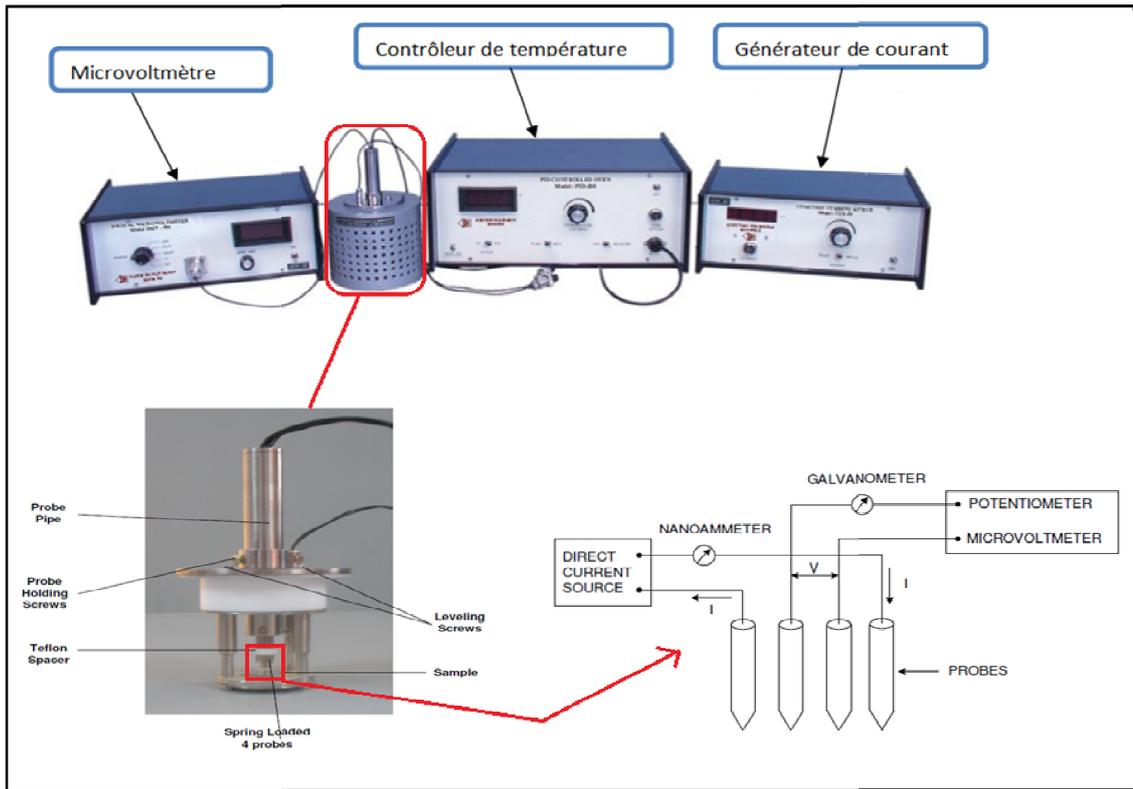


Figure I.11. Schéma représentatif du dispositif de mesure de la résistivité électrique.

Préalablement il faut préparer la surface de l'échantillon, un bon état de surface permet d'obtenir des bons résultats, une fois les échantillons sont préparés ils sont mis au-dessous des 4 points ensuite on les fixe bien On génère le courant et on mesure la tension.

La mesure de la résistivité électrique se fait à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_0 = \frac{U}{I} \times 2\pi S$$

- U la tension en ;
- I l'intensité de courant en ;
- S la distance entre les points (dans ce cas il est constant) en mm.

Un coefficient de correction appelé G_6 est introduit pour calculer la résistivité électrique comme suit :

$$\rho = \rho_0 / G_6$$

G_6 varie en fonction de l'épaisseur, ces valeurs sont déterminées d'après un tableau selon la valeur du rapport W/S .

Tel que ; W : l'épaisseur de l'échantillon.

I.5.2. Mesure de la résistivité électrique après laminage

Les mesures de la résistivité électrique après le tréfilage se fait par le dispositif qui est présenté sur la figure I.12. Ce dispositif est composé d'un générateur stabilisé numérique (1) qui fournit un courant contenu qui peut être compris entre 0.1A à 9.9A, et d'un millivoltmètre digital (2) pour mesurer la tension.

On réalise un circuit électrique simple, On a un fil de notre alliage (6) relié par deux pinces +(3) et -(4), les deux crochets (5) sont placés sur le fil avec une distance mesurable par une règle (7), On laisse passer un courant continu dans ce circuit et on relève la tension U (affichée sur la partie digitalisée de millivoltmètre). Ce qui nous permet d'avoir la résistance de notre fil échantillon. En connaissant sa section S , et sa longueur L , on calcule sa résistivité électrique comme suit.

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{S}{L}$$

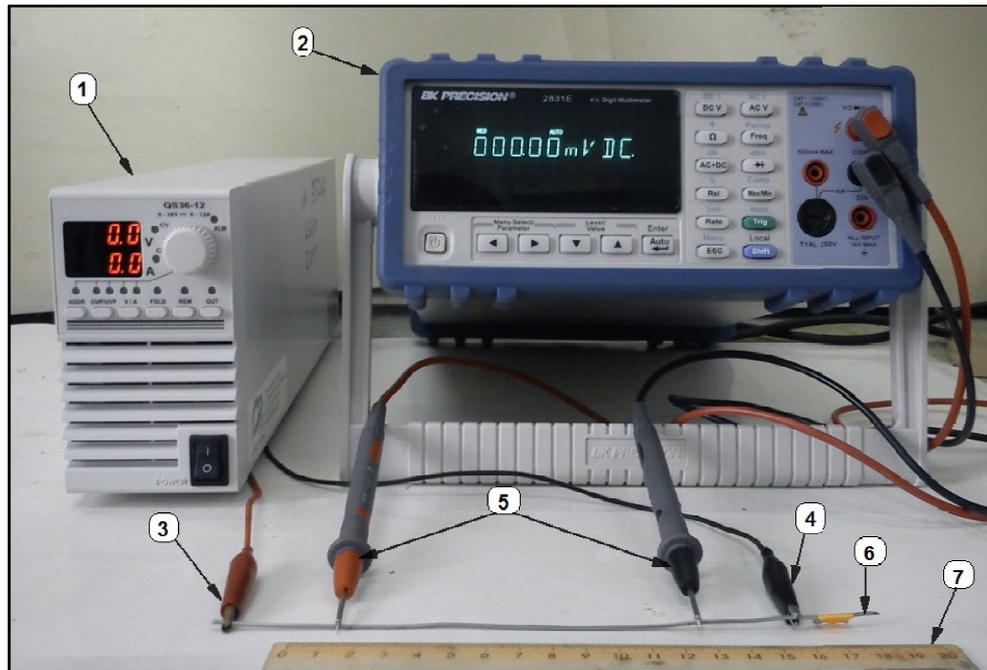


Figure I.12. Le dispositif de mesure de la résistivité électrique pour les échantillons laminés.

I.6. Micro-dureté

Après avoir préparé les échantillons et pour fait les mesures de la microdureté, et cela à travers un microduromètre Vickers de marque 'SHUMATZUHMV-M3' montré dans la figure I.13.

L'empreinte est réalisée à l'aide du pénétrateur pyramidale en diamant, sous une charge de 50g pendant 5s. Nous mesurons tous les fils de l'empreinte, et en déduisant la moyenne, d , qui nous permet de lire directement la valeur HV sur les catalogues de l'appareillage.



Figure I.13. Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.

II

Résultats et discussions

II. Résultats et discussions.

Nos résultats sont basés sur les mesures de la résistivité électrique. Et Ces résultats sont reportés sous forme des tableaux puis exploités sous forme des courbes. Elles sont données par ordre, de l'état initial de l'échantillon brut, brut plus traité, laminé et laminé plus traité.

II.1. Echantillons à l'état brut de coulée et à l'état brut plus traité.

Après le démoulage, on a obtenu des lingots de diamètre 8mm et 5cm de longueur comme le montre la figure II.1, Les surfaces externes des lingots ont subi un polissage grossier pour éliminer les rugosités de coulée.



Figure II.1. Lingot brut après le démoulage.

Les lingots obtenus ont subi un recuit d'homogénéisation avec un temps de maintien de 5 heures et un refroidissement dans le four. Le but de ce recuit est d'atteindre des états proches de l'équilibre thermodynamique en minimisant tous les hétérogénéités de l'état basaltique.

II.1.1. Microstructures

Les microstructures des six lingots élaborés avant le traitement d'homogénéisation sont représentées sur la figure II.2. Les microstructures obtenues montrent que les lingots ont globalement une structure biphasée, composée de l'eutectique en noir et de la phase Zn en blanc. La structure dendritique est clairement observée dans lingot à 80% de Zn. Il existe aussi des cavités (lingot à 90%), ceci est dû au fait que les conditions de refroidissement ne sont pas atteintes et que notre liquide n'a pas été agité très convenablement pour lui permettre d'être complètement homogène. Au fur et à mesure que le pourcentage de Zn augmente, la forme géométrique de l'eutectique se rétrécit et se peaufine dans les joints de grains à 90% de Zn.

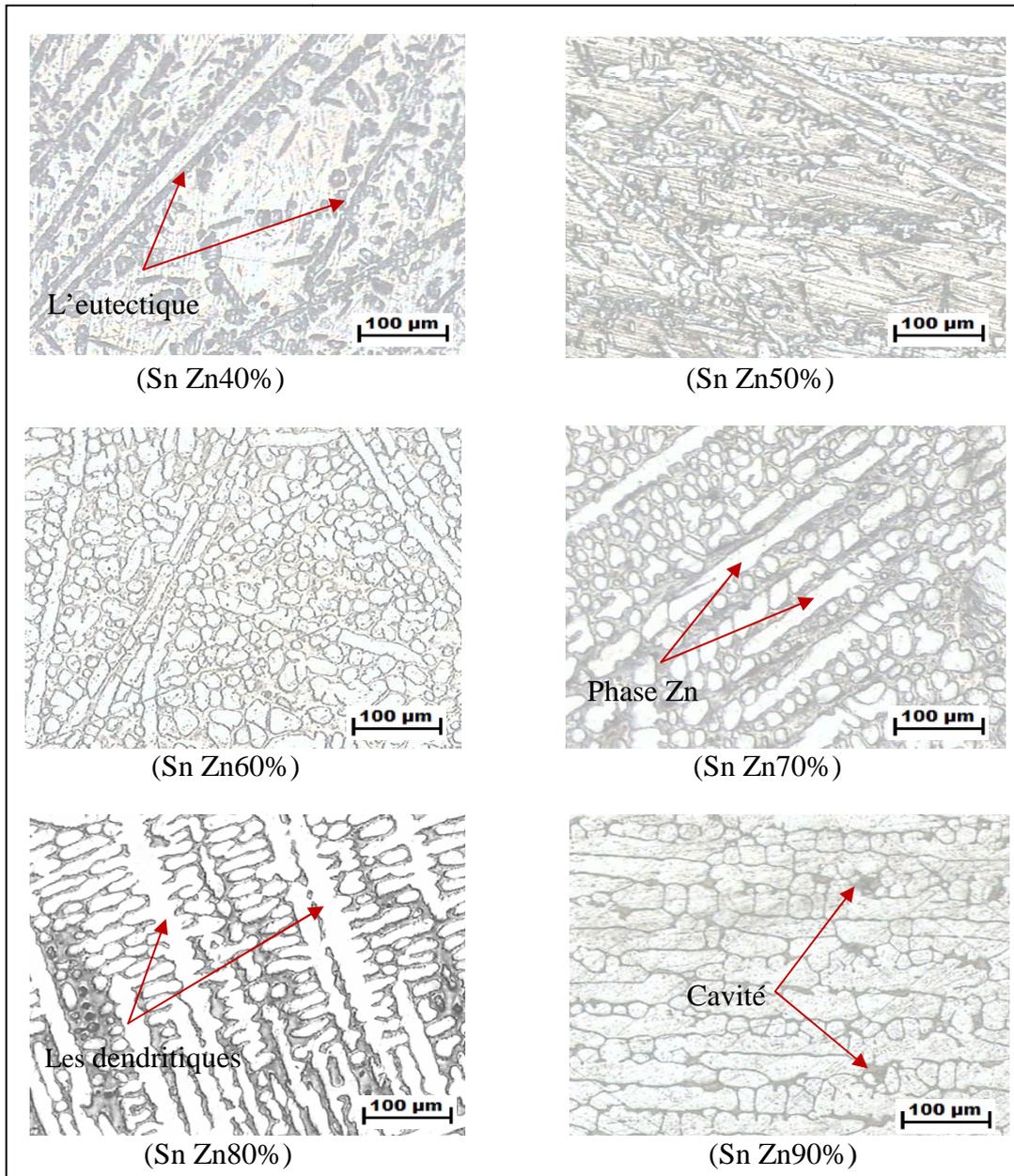


Figure II.2. Les microstructures des lingots de (Sn Zn) à l'état brut.

Les microstructures des six lingots après le traitement d'homogénéisation sont représentées sur la figure II.3. On constate la disparition de la structure dendritique et la coalescence de la phase eutectique. Cette état coalescé diminue au fur et à mesure que le pourcentage de Zn augmente, jusqu'à obtenir une structure constituée de fines particules de l'eutectique dispersées dans la matrice de Zn (lingot à 90% de Zn). Les microstructures correspondant à 50 et 60% de Zn sont pratiquement biphasés.

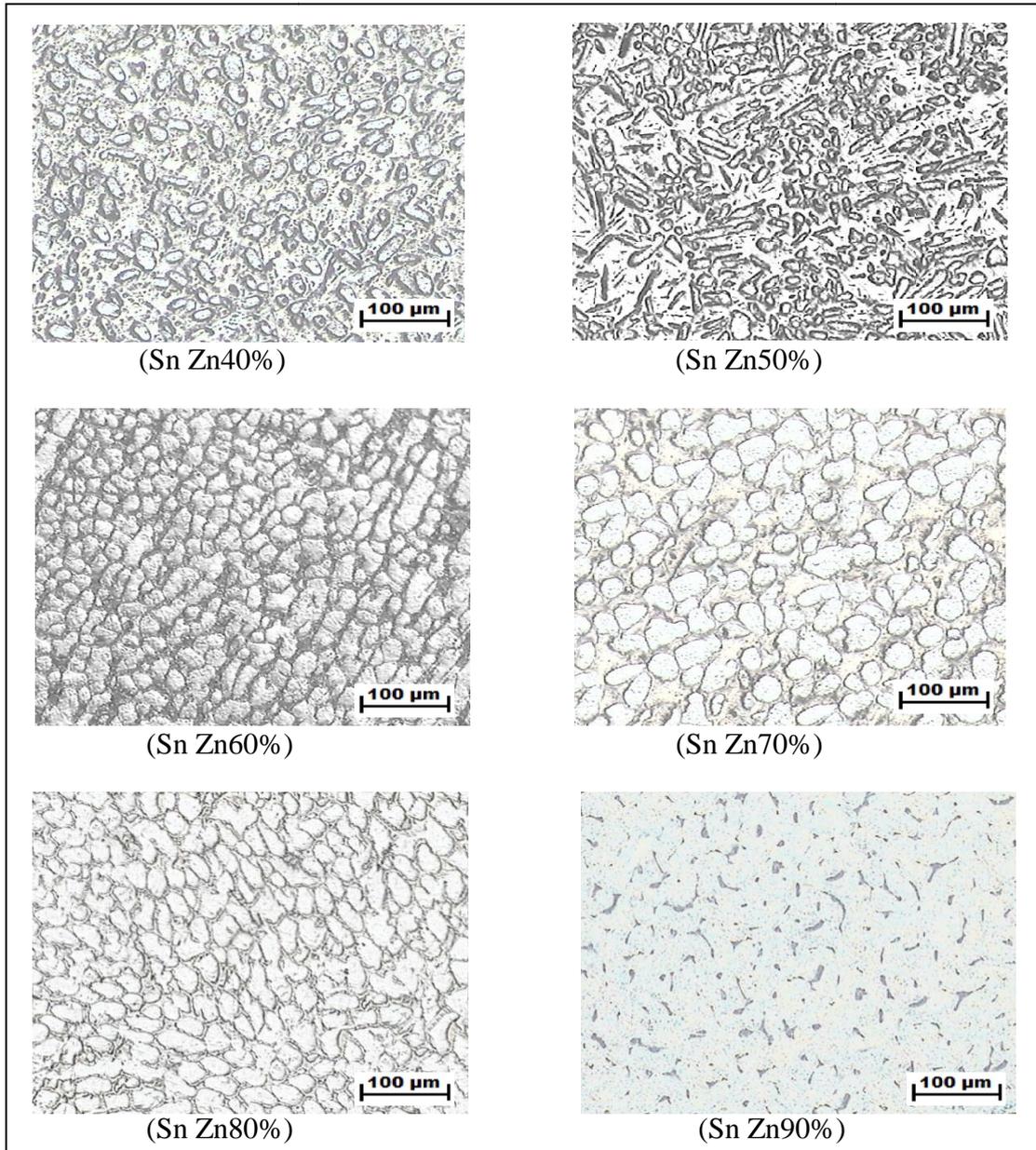


Figure II.3. Les microstructures des lingots de (Sn Zn) à l'état recuit.

II. 1.2. Résistivité électrique.

Les résultats de la mesure de la résistivité et la conductivité électrique de nos six lingots à l'état brut de coulée et à l'état de recuit, sont résumés dans le tableau II.1. Chaque valeur de la résistivité électrique nécessite la mesure de trois paramètres (tension, courant et épaisseur).

Les figures II.4, II.5 et II.6 représentent les variations de la résistivité électrique ρ en fonction de la température du recuit, respectivement, pour un temps de maintien de zéro heure, une heure, 3 heures et 5 heures.

Résultats et discussions

Tableaux II.1. Résistivité électrique ρ et la conductivité électrique σ de Sn_xZn_y à l'état brut de coulée et à l'état traité.

	Résistivité électrique ρ ($\Omega\cdot\text{m}$) $\times 10^{-8}$					
échenillons	Sn Zn40%	Sn Zn50%	Sn Zn60%	Sn Zn70%	Sn Zn80%	Sn Zn90%
Brut (0h)	25,133	23,178	20,73	18,638	16,329	14,259
Recuit (80°C, 1h)	21,511	18,4	16,132	14,52	12,088	10,822
Recuit (120°C, 1h)	18,26	15,394	13,123	11,251	10,346	9,148
Recuit (160°C, 1h)	13,306	11,518	10,327	9,034	8,081	7,951
Recuit (80°C, 3h)	17,331	15,148	13,593	12,209	10,75	9,848
Recuit (120°C, 3h)	13,139	12,093	10,619	9,978	8,876	8,108
Recuit (160°C, 3h)	10,235	10,055	9,308	8,734	7,916	7,251
Recuit (80°C, 5h)	13,388	12,93	11,525	10,379	9,559	8,622
Recuit (120°C, 5h)	10,6	10,394	9,718	8,934	8,081	7,308
Recuit (160°C, 5h)	10,235	10,055	9,308	8,734	7,916	7,251
	Conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) $\times 10^6$					
échenillons	Sn Zn40%	Sn Zn50%	Sn Zn60%	Sn Zn70%	Sn Zn80%	Sn Zn90%
Brut (0h)	3,9788	4,3144	4,8239	5,3654	6,1241	7,0131
Recuit (80°C, 1h)	4,6488	5,4348	6,1989	6,8871	8,2727	9,2404
Recuit (120°C, 1h)	5,4765	6,4960	7,6202	8,8881	9,6656	10,9314
Recuit (160°C, 1h)	7,5154	8,6821	9,6834	11,0693	12,3747	12,5770
Recuit (80°C, 3h)	5,7700	6,6015	7,3567	8,1907	9,3023	10,1543
Recuit (120°C, 3h)	7,6109	8,2692	9,4171	10,0220	11,2663	12,3335
Recuit (160°C, 3h)	9,7704	9,9453	10,7434	11,4495	12,6326	13,7912
Recuit (80°C, 5h)	7,4694	7,7340	8,6768	9,6348	10,4613	11,5982
Recuit (120°C, 5h)	9,4340	9,6209	10,2902	11,1932	12,3747	13,6836
Recuit (160°C, 5h)	9,7704	9,9453	10,7434	11,4495	12,6326	13,7912

Résultats et discussions

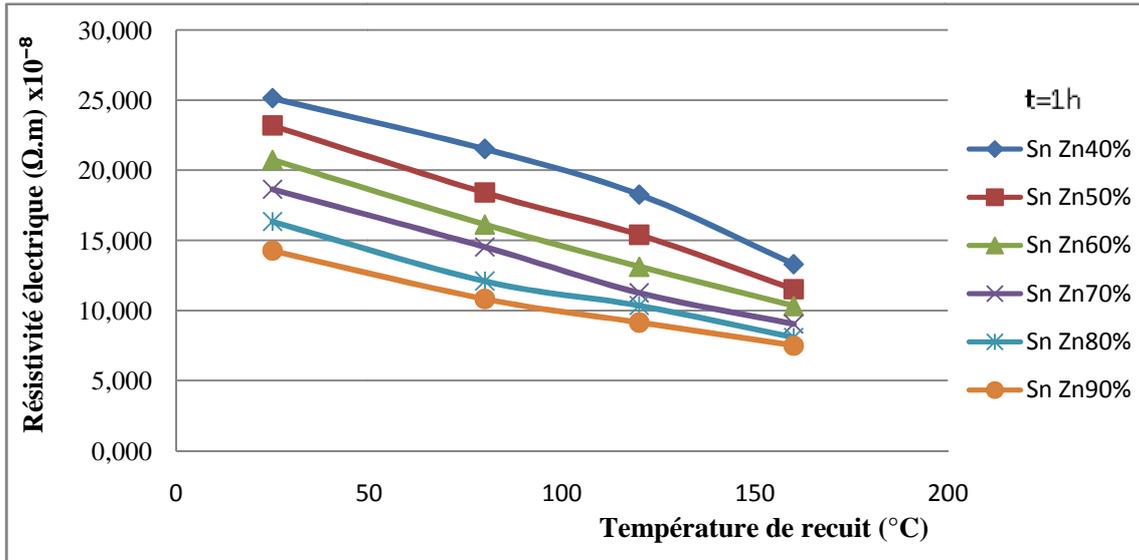


Figure II.4. La variation de la résistivité électrique en fonction de la température du recuit, temps de recuit $t=1$ heure.

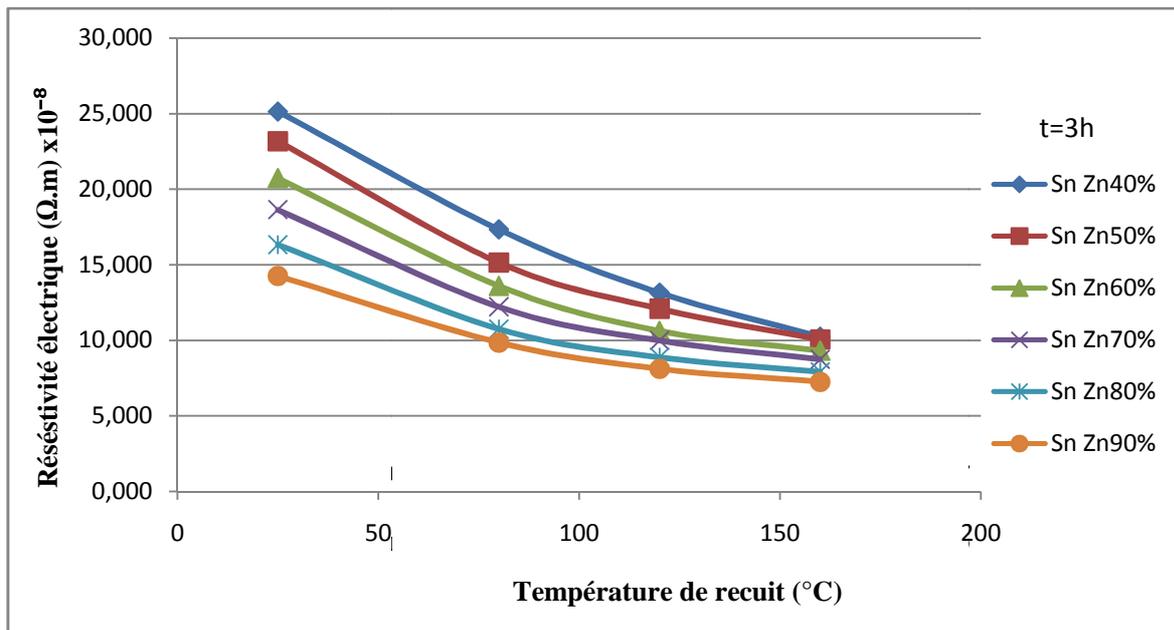


Figure II.5. Influence de la température du recuit sur la résistivité électrique, temps de recuit $t=3$ heures.

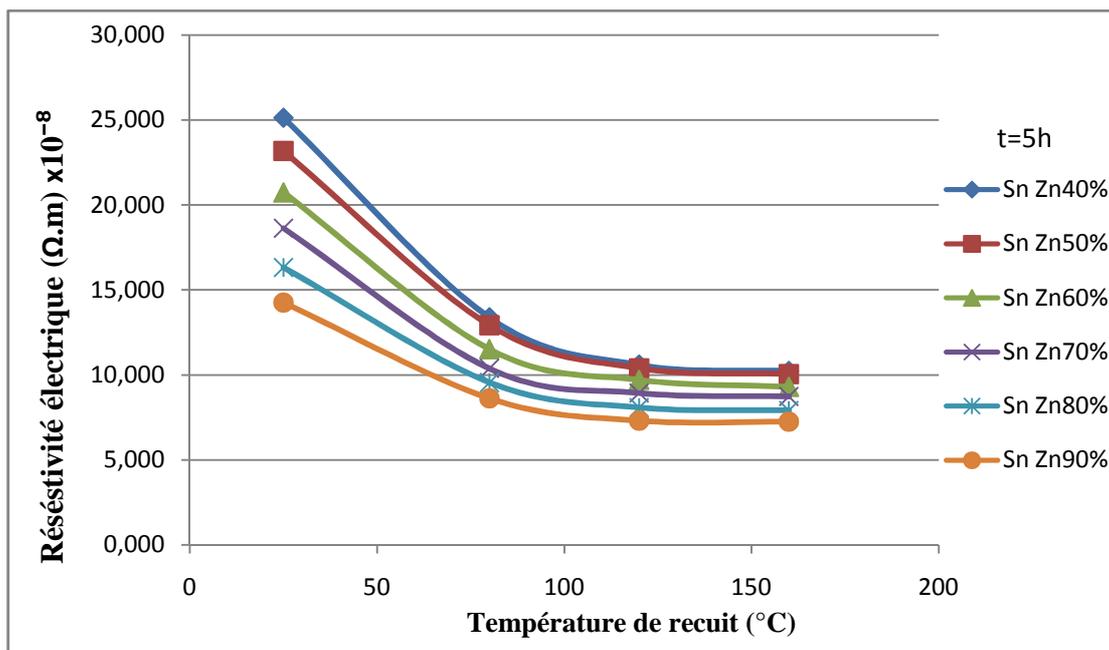


Figure II.6. Influence de la température du recuit sur la résistivité électrique, temps de recuit $t= 5$ heures.

On constate pour les trois figures que la résistivité électrique ρ diminue quand la température de recuit et avec la teneur de Zn. La diminution de la résistivité électrique avec la température de recuit est due au fait que le recuit permet d'éliminer les défauts qui gênent la mobilité des électrons. Par contre, la diminution de la résistivité ρ avec la teneur de Zn est due au fait que la résistivité électrique de Zn pur est inférieure à celle de l'étain pur.

Plus le temps de recuit augmente, plus les courbes de la fonction $\rho = f(T_{\text{recuit}}^{\circ\text{C}})$ prennent la forme d'une hyperbole.

II.1.3. Influence du temps de recuit.

Les figures II.7, II.8 et II.9 représentent les variations de la résistivité électrique ρ en fonction du temps de recuit, respectivement, pour une température de recuit de 80, 120 et 150°C.

Résultats et discussions

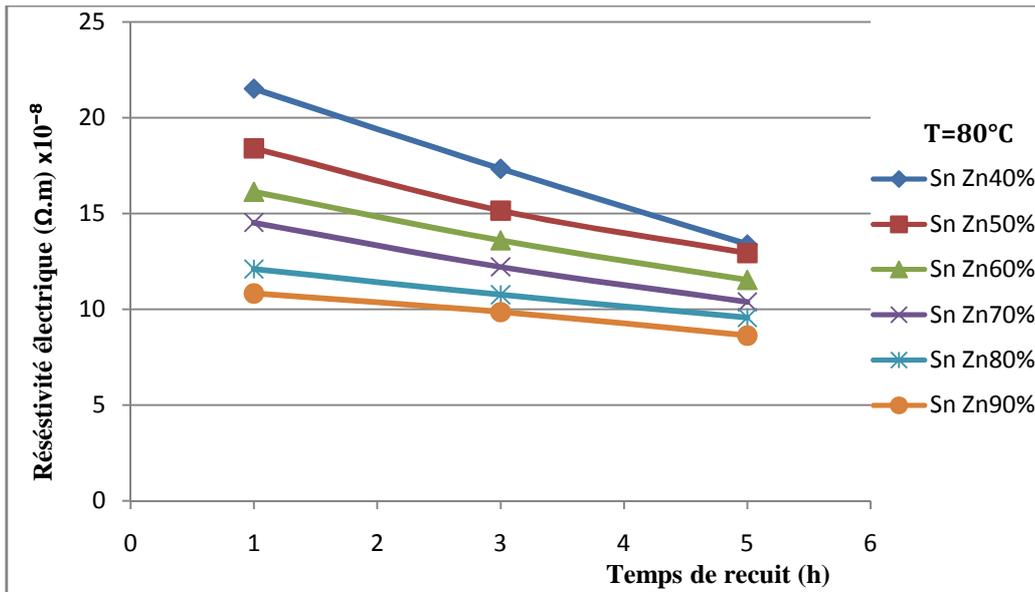


Figure II.7. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $T= 80^{\circ}C$

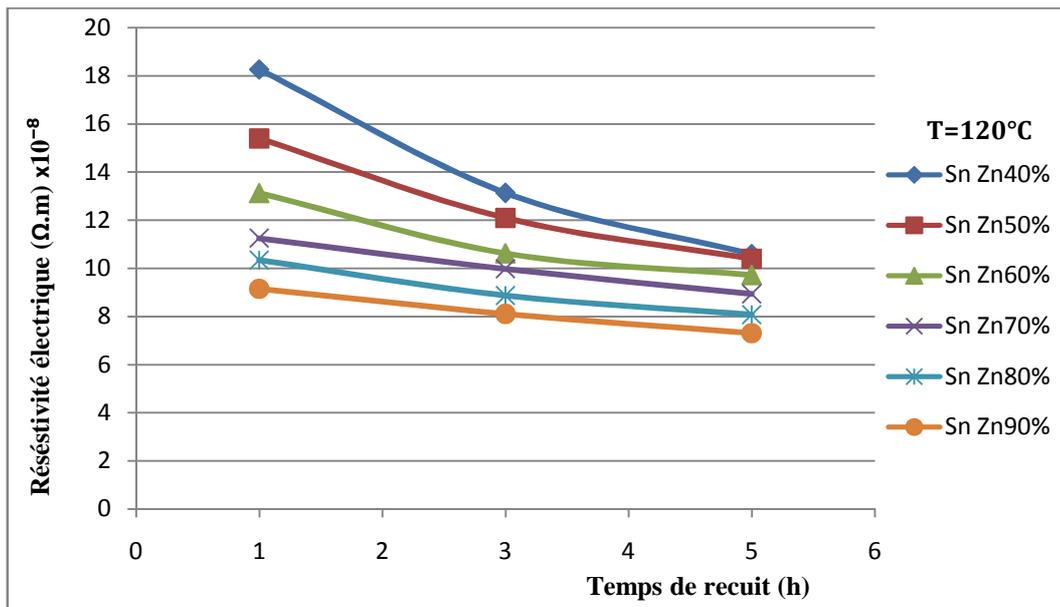


Figure II.8. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $T= 120^{\circ}C$

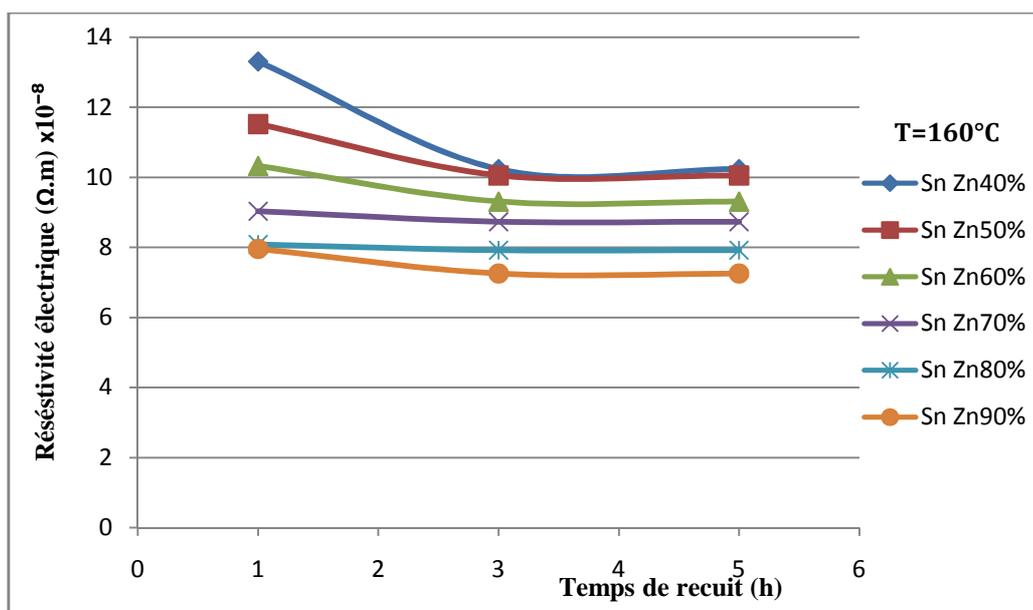


Figure II.9. Influence du temps de recuit sur la résistivité électrique, température de recuit $T=160^{\circ}\text{C}$.

Les courbes de la fonction $\rho = f(\text{Temps de recuit})$ pour une température de recuit donnée prend la forme d'une droite. On constate pour les trois figures, en général, que la résistivité électrique ρ diminue avec le temps de recuit et avec la teneur de Zn. Mais la pente de la diminution de la résistivité électrique avec le temps de recuit devient très faible au fur et à mesure que la température de recuit augmente, jusqu'à sa disparition pour les courbes correspondant à la température de recuit égale à 160°C et pour un temps de maintien supérieure ou égale à 3 heures. Cela veut dire, en d'autres termes, que nos microstructures ne contiennent plus les défauts qui gênent la mobilité des électrons et que le grossissement des grains marque un arrêt à cause de la présence de deux phases dans nos microstructures. Donc, les conditions d'un recuit de saturation pour nos alliages sont une température de recuit égale à 160°C et un temps de maintien égal à 3 heures. Les courbes de la figure II.9 montrent clairement que les microstructures qui ont des phases majoritaires (SnZn90%, SnZn80% et SnZn70%) ont une résistivité électrique inférieure et des pentes pratiquement nulles, par rapport aux microstructures qui sont biphasées (SnZn40%, SnZn50% et SnZn60%). Par contre, la diminution de la résistivité ρ avec la teneur de Zn est due au fait que la résistivité électrique de Zn pur est inférieure à celle de l'étain pur.

II.2. Echantillons à l'état tréfilé et à l'état tréfilé plus traité.

Après le laminage en cannelure de nos six lingots, on a obtenu des fils de diamètre 1mm et 1m de longueur (figure II.10.).

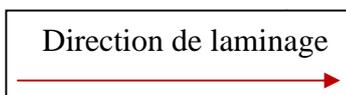
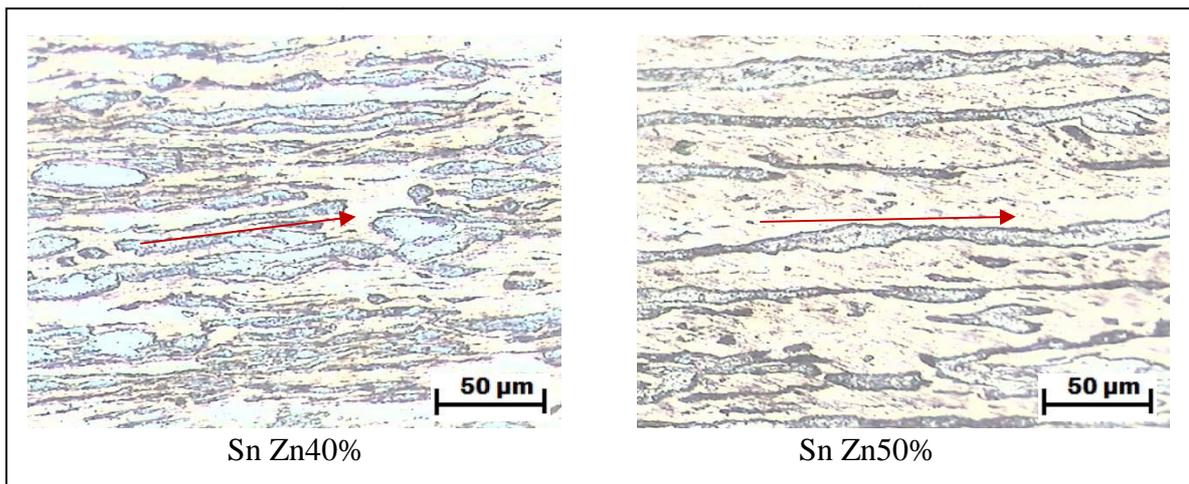
Les lingots tréfilés ont subi des recuits, pour des températures de recuit égales respectivement à 60, 80, 120 et 160°C et un temps de maintien de 2 heures.



Figure II.10. Fil après laminage en cannelure.

II.2.1. Microstructures

Les microstructures des échantillons tréfilés avant le recuit sont représentées dans la figure II.11.



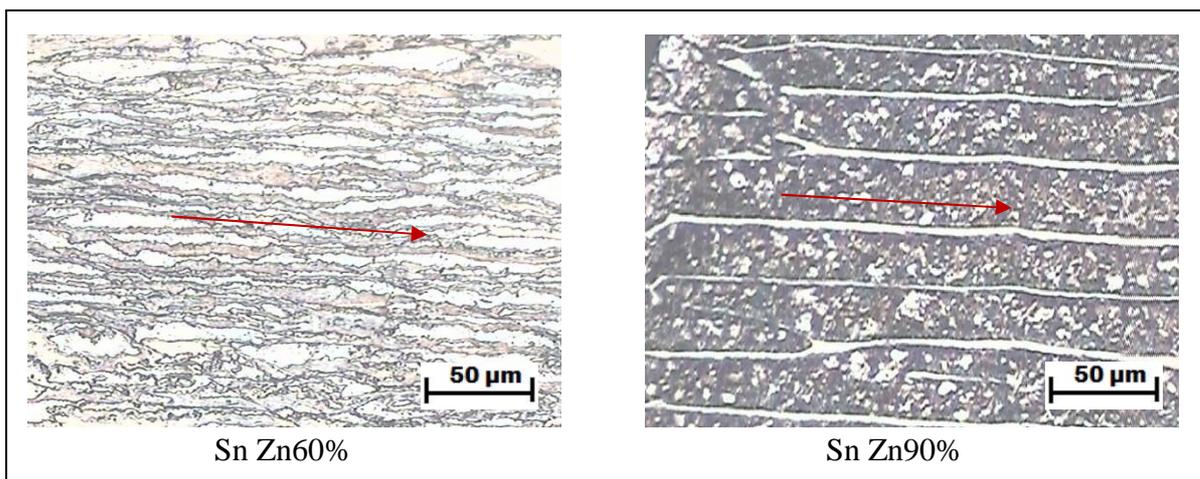


Figure II.11. Les microstructures des fils de $\text{Sn}_x \text{Zn}_y$ à l'état tréfilé.

On voit clairement que les grains sont très allongés et ils ont une direction privilégiée qui est celle de la direction de tréfilage.

La figure II.12 montre les microstructures des échantillons à l'état tréfilé, traité à 120°C pendant 2 heures. On voit que la direction privilégiée ne s'élimine pas et la disparition complètement des joints de grains au profit d'une structure en bandes.

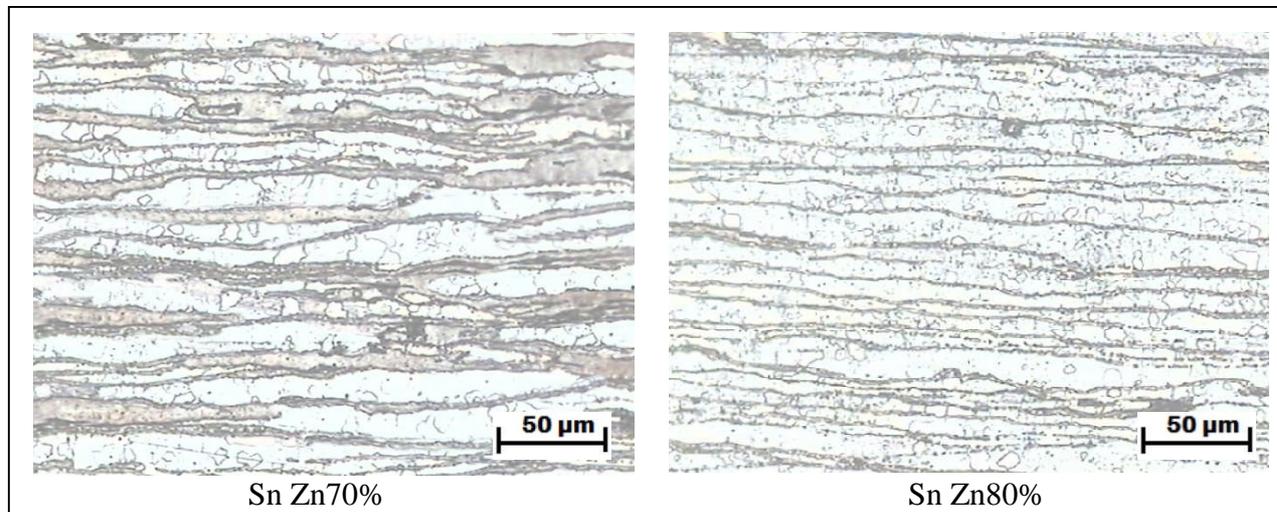


Figure II.12. Les microstructures des fils de $\text{Sn}_x \text{Zn}_y$ à l'état tréfilé + traité.

II.2.2. Résistivité électrique.

La résistivité électrique du laiton (Cu Zn37%) utilisé comme fil de coupe à BCR est de l'ordre de $7,360 \times 10^{-8} \Omega.m$.

Le tableau II.2 représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique ρ de tous les échantillons à l'état tréfilé et à l'état tréfilé + traité.

Résultats et discussions

Tableaux II.2 : Résistivité et conductivité électrique de Sn_xZn_y à l'état tréfilé et à l'état tréfilé + traité.

Résistivité électrique ρ ($\Omega.m$) $\times 10^{-8}$						
échenillons	Sn Zn40%	Sn Zn50%	Sn Zn60%	Sn Zn70%	Sn Zn80%	Sn Zn90%
Brut (0h)	14,453	12,943	11,456	10,986	10,142	9,344
Recuit (60°C, 2h)	13,45	12,132	11,114	10,502	10,102	9,324
Recuit (90°C, 2h)	9,671	8,709	7,87	7,33	6,636	6,23
Recuit (120°C, 2h)	10,388	10,018	8,992	7,675	7,078	6,388
Recuit (160°C, 2h)	10,388	10,008	9,287	8,722	7,948	7,266
conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$) $\times 10^{+6}$						
échantillons	Sn Zn40%	Sn Zn50%	Sn Zn60%	Sn Zn70%	Sn Zn80%	Sn Zn90%
Brut (0h)	6,919	7,726	8,729	9,102	9,860	10,702
Recuit (60°C, 2h)	7,435	8,243	8,998	9,522	9,899	10,725
Recuit (90°C, 2h)	10,340	11,482	12,706	13,643	15,069	16,051
Recuit (120°C, 2h)	9,626	9,982	11,121	13,029	14,128	15,654
Recuit (160°C, 2h)	9,626	9,992	10,768	11,465	12,582	13,763

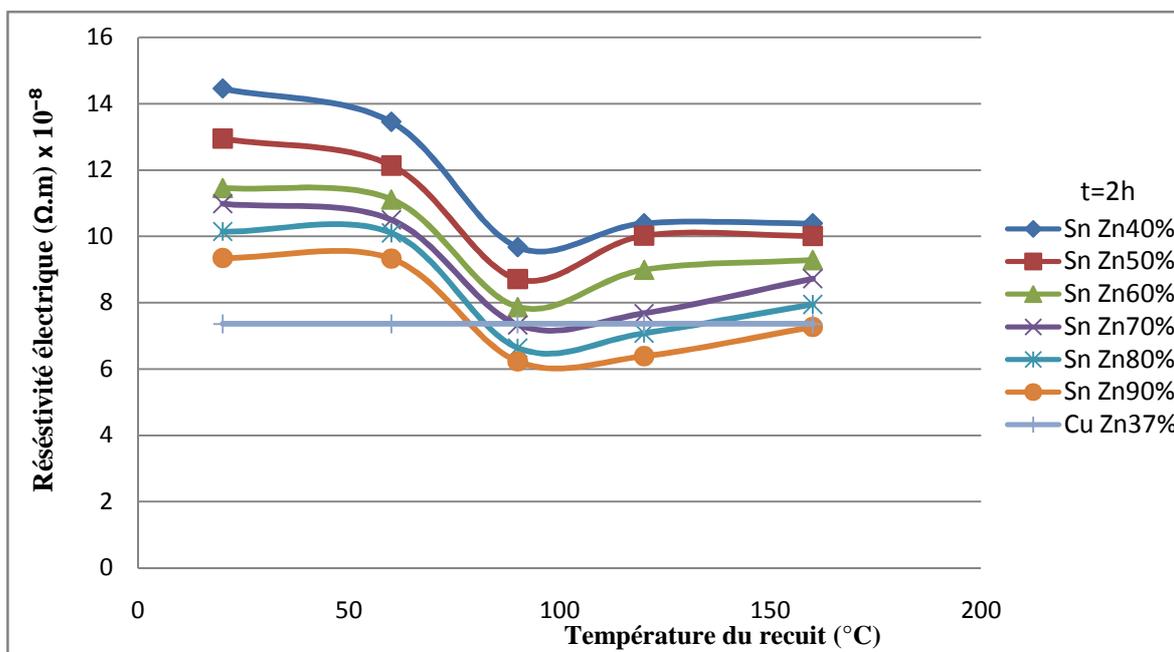


Figure II.13. Résistivité électrique en fonction de la température de recuit pour un temps de maintien égale à 2h, pour les échantillons tréfilés.

Résultats et discussions

Les résultats du tableau II.2 sont représentés sous forme de courbes dans la figure II.13.

On constate bien que la résistivité électrique ρ diminue avec la teneur de Zn. Par contre, avec la température de recuit elle est biunivoque. Elle diminue avec les températures au-dessous de 90°C et elle augmente légèrement pour les températures supérieures à 90°C. Ceci est dû au fait que le tréfilage de nos échantillons a amené une déformation largement supérieure à la déformation critique. Et par conséquent, le phénomène de restauration et recristallisation est présent pendant le recuit de nos échantillons tréfilés. On voit clairement la restauration de la résistivité électrique pour les températures inférieures à 90°C. La température de recristallisation de nos alliages peut être estimée à 90°C.

Globalement les valeurs de la résistivité électrique de nos alliages élaborés par la méthode de fonderie sont comprises entre 6.10^{-8} et $25.10^{-8}\Omega.m$. La valeur minimale correspond à 90% de Zn recuit à 160°C pendant 2h et la valeur maximale à 40% de Zn à l'état de brut de coulée. L'alliage qui a la résistivité électrique égale à celle de Cu Zn37% est l'alliage 70% Zn recuit à une température comprise entre 90 et 120°C pendant deux heures. Il peut le substituer s'il a les mêmes propriétés mécaniques que lui, comme fil de coupe dans la machine d'électroérosion.

II.3. la comparaison des résultats de la résistivité électrique.

La figure II.14 représente les histogrammes de la résistivité électrique des échantillons traités avant (lingots) et après laminage (fils) pour chaque composition chimique élaborée du système (Sn, Zn). On remarque que les histogrammes sont pratiquement identiques ($\pm 0,053 < \Delta\rho < \pm 0,212$) pour chaque composition élaborée. Donc on constate qu'on peut avoir les mêmes résistivités électriques en changeant le diamètre, moyennant des recuits appropriés.

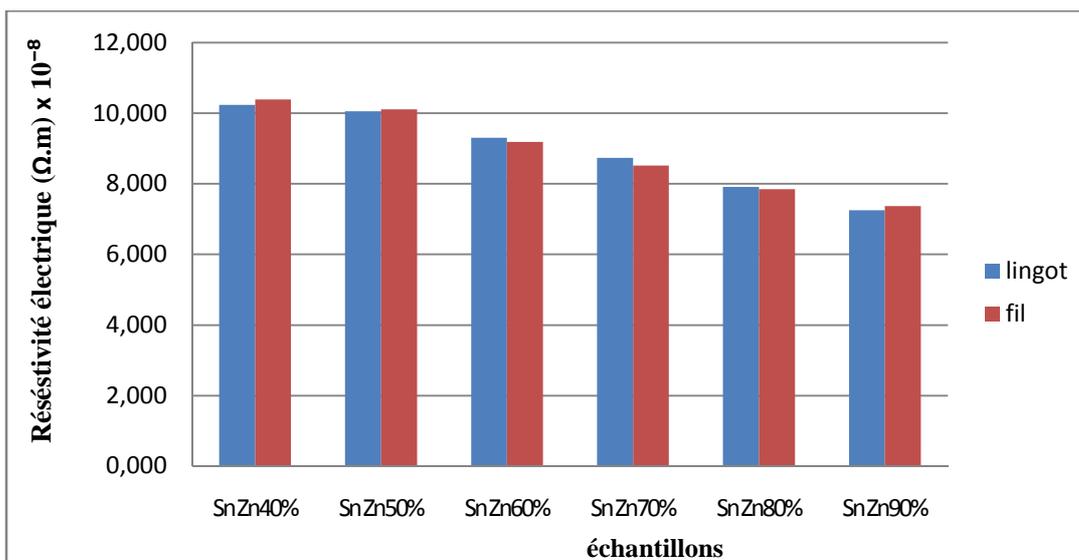


Figure II.14. Les histogrammes de la résistivité électrique des échantillons (lingots et fils) après le recuit finale.

II.4. la micro-dureté.

D'après [21] la dureté HV de laiton (Cu Zn37) est entre 55-95 (N/mm²).

Tableaux II.3 : Dureté Vickers de Sn Zn à l'état tréfilé brut et à l'état tréfilé + traité.

Dureté échantillon	HV50 (brut)	HV50 (80°C)	HV50 (120°C)	HV50 (160°C)
Sn Zn40%	20,780	19,675	14,445	14,490
Sn Zn50%	23,005	20,030	17,165	14,865
Sn Zn60%	24,940	21,000	19,175	17,660
Sn Zn70%	25,760	24,760	22,240	21,000
Sn Zn80%	28,050	26,940	24,940	22,050
Sn Zn90%	35,955	27,955	26,665	24,245

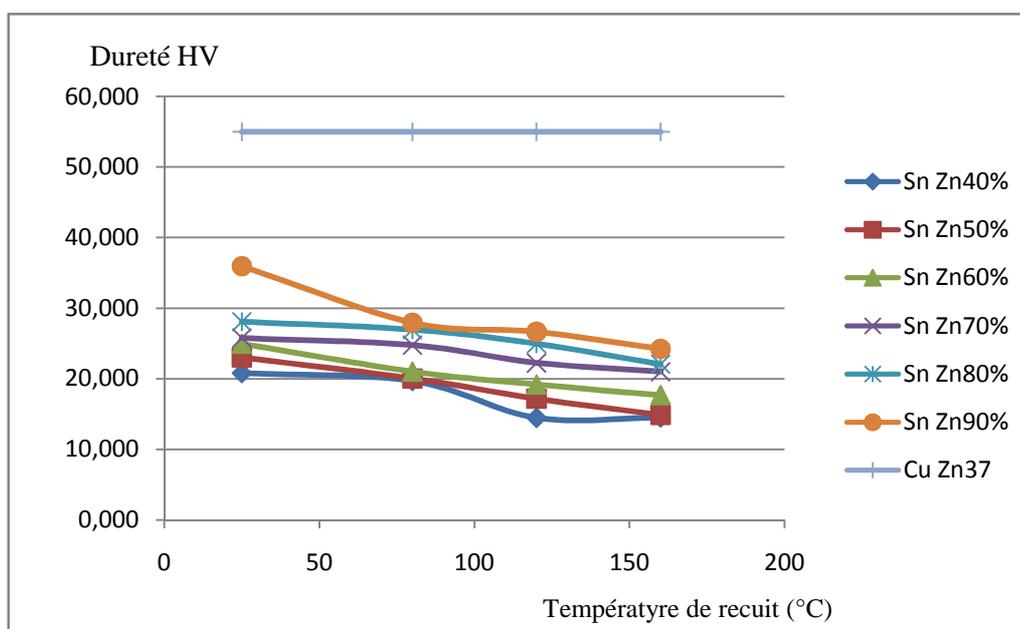


Figure II.15 : La variation de la dureté des lingots tréfilés en fonction de la température de recuit et en fonction de la composition chimique.

La figure II.15 montre la variation de la dureté des lingots tréfilés en fonction de la température de recuit pour chaque composition élaborée et pour un temps de recuit égale à 2 heures. On constate que toutes les valeurs de dureté de nos lingots tréfilés sont largement inférieures à celle de CuZn37. Et que la dureté diminue avec la température de recuit et augmente avec le pourcentage du Zn.

Conclusion générale

L'objectif de ce projet est d'étudier les capacités électriques des alliages conducteurs binaires à base du système (Sn, Zn), afin de substituer l'alliage CuZn37, utilisé comme fil de coupe dans la machine d'électroérosion de BCR.

Nous avons élaboré par la méthode de fonderie, six lingots du système (Sn, Zn) avec la composition de Zn en masses égale respectivement à 40, 50, 60, 70, 80 et 90%. Ces lingots ont été tréfilés et traités. La caractérisation de tous les échantillons bruts, tréfilés et traités a été faite par l'intermédiaire des mesures de la résistivité électrique ρ à la température ambiante, de la dureté et des observations métallographiques.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- La résistivité électrique des alliages du système (Sn, Zn) est très basse, elle oscille entre 6 et $25 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. Elle est largement comparable à celle des conducteurs (laiton).
- Les microstructures obtenues sont biphasées (l'eutectique + la phase mère de Zn).
- Les alliages du système (Sn, Zn) sont mous, leur dureté est très basse, elle oscille entre 15 et 36HV, largement inférieure à celle du laiton.

Suggestions

Mon travail a abouti à un certain nombre de résultats, mais il est certain qu'il est nécessaire de les affiner par d'autres investigations, telles que l'essai de traction, pour compléter nos connaissances sur les propriétés mécaniques des alliages à base du système (Sn, Zn). Une fois ces propriétés sont connues, la décision de substituer le fil de coupe en laiton (CuZn37) par un fil de cet alliage dans la machine d'électroérosion de BCR sera facile à prendre.

Références Bibliographique

- [1]. diapo d'exposé. Réalisé par Boukhazani fethi, Dirigé par Col. ISRIG. K. « Electroérosion ».
- [2]. Daniel KREMER. Usinage par électroérosion. Technique d'ingénieur, BM 7251, 2003.
- [3]. Philippe POUPEAU. «Traitements thermiques des métaux et alliages». Technique de l'ingénieur, réf M 1 105, 10 avril 1996.
- [4]. J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILBERT, et TALBOT: « Métallurgie générale », édition Masson, 2ème édition, 1984.
- [5]. Michel Dupeux, aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, 2004.
- [6]. Jean-Charles DELOMEL. « Résistivité des métaux et alliages ». Technique de l'ingénieur, réf K 710v2, 10 avril 1996.
- [7]. Michel Colombie et coll, «matériaux métalliques», 2e édition, 2008.
- [8]. F.J. Humphreys, Recrystallization and related annealing phenomena, 2004.
- [9]. R. QUATREMENR ET J.P.TROTIGNON. « Précis de métallurgie ». NATHAN. Paris.
- [10]. G.Béranger, G.Henry, G.Labbe et P.Soulinac.« Les aciers spéciaux ». Lavoisier, Paris.1997.
- [11]. Berkeley, électricité, chap. 4.
- [12]. M. D. HADID, « Evolution de la microstructure et des propriétés mécaniques et électriques lors d'un revenu après tréfilage d'un alliage d'aluminium », Mémoire de Magister, Année 2012, ENP.
- [13]. SACHS, G. Plasticity problems in metals. Transactions of the Faraday Society, vol.24, 1928.
- [14]. André DELWASSE. «Propriétés des alliages ». Technique de l'ingénieur, réf M520, 10 avril 1996.
- [16]. DUBAR, L., DUBOIS, A. and DUBAR, M. Friction and wear phenomena in cold metal forming: an integrated approach, Proceedings of ICTMP, 2004.
- [17]. Jean-Charles DELOMEL. « Résistivité des métaux et alliages ». Technique de l'ingénieur, réf K 710v2, 10 avril 1996.
- [18]. Guy SIMONNET. « Tréfilage de l'acier ». Technique de l'ingénieur, réf M645, 10 avril 1996.

[19]. D.callister WILLIAM. « science et génie des matériaux ».5eme édition. Dunod 2001.

[20]. LAVERROUX, M. « Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage ». La revue de métallurgie CIT, 1993.

[21]. Lamineries MATTHEY SA , Route de Neuchâtel 6C, H - 2520 La Neuveville ,
www.matthey.ch, Edition 3.01 - 2007/07