

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÈRI DE TIZI OUZOU



Faculté De Génie De La Construction

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

Master Académique en Génie Mécanique

Option : Comportement et Mise en Forme des Matériaux

Thème

**Etude et caractérisation mécanique du fil
électrode à base de Cu-Zn utilisé sur la machine
ROBOFIL 290P (BCR)**

Proposé et dirigé par : **Mr SEDJAL .H**

Réalisé par : **Mr AMIRAT Boukhalfa**

C.M.F.M

Promotion : 2012/ 2013

... *Remerciements* ...

Mes remerciements vont premièrement à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens d'abord à remercier Mr SEDJAL Hamid, mon enseignant et promoteur, pour avoir encadré et dirigé ce projet de fin d'études.

Je remercie vivement, professeur Fateh HELLAL avec ses remarques constructives et Mr CHETROUB, chef du département de métallurgie de l'école nationale polytechnique, ainsi le personnel du laboratoire du département, pour nous avoir offert les moyens de travail, et pour leurs aides précieuses.

Je tiens également à remercier l'ingénieur du laboratoire de CATEL où nous avons effectué les essais de traction, et tous les fonctionnaires de cette l'entreprise.

Tout le personnel de l'entreprise Orfee, en particulier Mr. YADDADEN pour son aide durant le stage et Mr ZOUATI, trouvent ici mon profond respect.

J'exprime ma profonde gratitude à Mr M. OULD OUALI et tous les autres enseignants du département de Génie Mécanique ayant contribué à ma formation, ainsi que tout le personnel de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Enfin je remercie vivement tout les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en jugeant notre travail.

Merci à tous

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents que dieu les garde pour moi

A mes très chères sœurs

A mes très chers frères en particulier Karim et Idir

A tout mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines

A ma future femme Meriouma

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers

Boukhalfa

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Table des matières	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iii
Nomenclature.....	iiii
Résumé.....	iiii

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

Chapitre I : L'usinage par électroérosion

I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Mécanismes de base de l'électroérosion.....	4
I.4. Principe physique de l'usinage par électroérosion	4
I.4.a. L'initiation de la décharge	5
I.4.b. La fusion et la vaporisation de la matière	6
I.4.c. L'éjection de la matière	7
I.5. Fluide diélectrique pour l'électroérosion.....	8
I.5.1. Rôle du fluide diélectrique	8
I.6. Les différents procédés d'EDM	9
I.6.1. L'électroérosion à plongée ou DSEDM	9
I.6.2. L'électroérosion à fil ou WEDM	10
I.7. Recommandations pour fil électrode	13
I.8. Matériaux pour fils	14
I.9. Liste des fils courants et leurs applications.....	15
I.10. Conclusion	17

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et le zinc

II.1. Introduction.....	18
II.2. Généralités sur le cuivre.....	18
II.3. Propriétés physiques du cuivre	19
II.4. Propriétés mécaniques du cuivre	20
II.5. Généralités sur le zinc.....	21
II.6. Propriétés physiques du zinc	21
II.7. Alliage cuivre-zinc Cu-Zn (laiton)	22

II.7.1. Laitons simples ou binaires.....	23
II.7.2. Laitons avec addition	23
II.7.3. Compositions normalisées des Barres, fils et profilés en laitons simples	24
II.7.4. Propriétés des laitons	24

Chapitre III : Le tréfilage et le revêtement électrolytique

III.1. Introduction	26
III.2. Outils et équipements industriels du tréfilage	27
III.3. La machine de tréfilage simple	28
III.4. Les machines multiples	29
III.5. Les traitements thermiques après tréfilage.....	29
III.6. Grandeurs mécaniques du tréfilage.....	30
III.6.1. l'allongement du fil	30
III.6.2. La force ou la contrainte.....	31
III.6.3. Le frottement	31
III.6.4. La température	32
III.7. Le traitement de surface ou revêtement.....	33
III.7.1. Modes d'application.....	33
III.7.1. Procédé électrolytique	33
CONCLUSION.....	35

Chapitre IV : Dispositifs et techniques expérimentales

IV.1. Introduction.....	36
IV.2. Matériau étudié	36
IV.3. Caractérisation microstructurale	36
IV.4. Observation microscopique	37
IV.5. Préparation des échantillons.....	37
IV.5.1. l'enrobage	38
IV.5.2. Le polissage	38
IV.6. La microscopie électronique a balayage	39
IV.6.1. Présentation d'un microscope électronique à balayage.....	39
IV.6.2. Principe de la microscopie électronique à balayage	40
IV.7. Caractérisations mécaniques	41
IV.7.1. Essai de la micro-dureté	41
IV.7.2. Essai de traction	43
IV.7.2.1. Principe d'essai de traction	43
IV.7.2.2. Les principales valeurs caractéristiques de traction	45

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction.....	47
V.2. Interprétation des résultats micrographiques.....	47
V.2.1. Observation par microscopie optique.....	47
V.2.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à balayage.....	49
V. 2.2.1. Observation MEB du fil neuf.....	49
V. 2.2.2. Observation MEB de fils usagés.....	50
V.2.2.3. Observation MEB de Faciès de rupture de traction.....	52
V.3. Résultats des essais mécaniques.....	53
V.3.1. Résultats des essais de microdureté	53
V.3.2. Résultats d'essais de traction.....	55
V.4. Synthèse	59
Conclusion générale	61
Références bibliographiques.....	63

Liste des figures

Chapitre I : L'usinage par électroérosion

Figure I.1	<i>Schéma de la phase d'ionisation.</i>	p : 5
Figure I.2.	<i>Fusion-vaporisation de la matière.</i>	p : 6
Figure I.3.	<i>Ejection de la matière.</i>	p : 7
Figure I.4	<i>Electroérosion par enfonçage.</i>	p : 10
Figure I.5	<i>Schéma de principe de l'électroérosion a fil.</i>	p : 11
Figure I. 6	<i>Schéma du système d'arrosage en EDM a fil</i>	p : 12
Figure I.7	<i>Formation d'étincelles entre le fil l'électrode et la pièce à usiner.</i>	p : 12
Figure I.8	<i>Les particules érodées sont enlevées et séparés par un système de filtre.</i>	P : 13

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et le zinc

Figure II.1	<i>Diagramme d'équilibre cuivre-zinc.</i>	p : 22
--------------------	---	--------

Chapitre III : Procédés de tréfilage et de revêtement électrolytique

Figure III.1	<i>Vue en coupe d'une filière avec un fil.</i>	p : 26
Figure III.2	<i>Schéma d'une filière de tréfilage.</i>	p : 27
Figure III.3 :	<i>Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe).</i>	p : 28
Figure III.2	<i>Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisés</i>	P : 30
Figure III.3	<i>Schéma d'un substrat revêtu</i>	p : 33
Figure III.4	<i>Principe de déroulement d'un revêtement électrolytique</i>	p : 34

Chapitre IV : Dispositifs et techniques expérimentales

Figure IV.1.a	<i>Image de fil neuf</i>	p : 36
Figure IV.1.b	<i>Image de fil usagé</i>	p : 36
Figure IV. 2	<i>Microscope optique OPTIKA M-789 avec système d'acquisition.</i>	p : 37

Liste des figures

Figure IV.3	<i>Echantillons coupés et enrobés.</i>	p : 37
Figure IV.4	<i>Polisseuse.</i>	p : 38
Figure IV.5	<i>Un œil de mouche grossi 100, 1000 et 10 000 fois à l'aide d'un MEB.</i>	p : 38
Figure IV.6	<i>Microscope électronique à balayage (MEB).</i>	p : 39
Figure IV.7	<i>Schémas du Microscope électronique à balayage.</i>	p : 40
Figure IV.8	<i>Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.</i>	p : 41
Figure IV.9	<i>Représentation schématique de l'essai de Vickers.</i>	p : 42
Figure IV.10	<i>Empreintes du microduromètre observée sur l'échantillon.</i>	p : 42
Figure IV.11	<i>Machine de traction type Zwick/Roell Z2.5.</i>	p : 44
Figure IV.12	<i>Courbe conventionnelle de traction.</i>	p : 44

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V.1	<i>Coupe frontale de fil composite (ame et une couche de revetu) neuf.</i>	p : 47
Figure V.2	<i>Coupe longitudinale de fil neuf (avant l'utilisation)</i>	p : 48
Figure V.3	<i>Coupe longitudinale de fil usagé (après l'érosion)</i>	p : 48
Figure V.4.	<i>Images prises par le MEB du fil neuf</i>	p : 49
Figure V.5	<i>Image MEB de la surface érodé fil usagé</i>	p : 50
Figure V.6	<i>Image MEB de la surface érodé fil usagé</i>	p : 51
Figure V.7	<i>Image MEB de la surface érodé et non érodé fil usagé</i>	p : 51
Figure V.8	<i>Observation au MEB de la surface érodé et non érodé fil usagé</i>	p : 52
Figure V.9	<i>Faciès de rupture en traction</i>	p : 52
Figure V.10	<i>Courbes contraintes allongement des fils neuf</i>	p : 55
Figure V.11	<i>Courbe de traction de fil neuf.</i>	p : 56
Figure V.12	<i>Courbes contraintes - allongements des fils usagés</i>	p : 57
Figure V.13	<i>Courbe de traction du fil usagé</i>	p : 58

Liste des tableaux

Chapitre I : L'usinage par électroérosion

Tableau I.1	<i>Liste de Fils en laiton non revêtus</i>	p : 15
Tableau I.2	<i>Liste de Fils revêtus de zinc</i>	p : 16
Tableau I.3	<i>Fils revêtus d'alliage</i>	p : 16

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et le zinc

Tableau II.1.	<i>Les principales caractéristiques mécaniques du cuivre.</i>	p : 20
Tableau II.2.	<i>Les différentes propriétés physiques et mécaniques de zinc.</i>	p : 21
Tableau II.3	<i>Laitons simples pour barres, fils et profilés compositions normalisées (D'après la norme NF A 51-104)</i>	p : 24

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.1	<i>Microdureté Vickers associée à l'âme du fil neuf vertical.</i>	p : 53
Tableau V.2	<i>Microdureté associée a l'âme de fil neuf horizontal.</i>	p : 53
Tableau V.3	<i>Microdureté Vickers associée a l'âme de fil usagé horizontal</i>	p : 54
Tableau V.4	<i>Récapitulatif des résultats des essais de traction sur fils neufs.</i>	p : 56
Tableau V.4	<i>Récapitulatif des résultats des essais de traction sur fils usagés</i>	p : 58

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
A	Allongement relatif	%
ΔL	Allongement	mm
U	Tension électrique	volt
I	Intensité du courant électrique	A(Ampère)
F	Force	N
Re	Limite élastique	N/mm ²
E	Module de Young	Mpa
d ₀	Diamètre initiale	mm
Rm	Résistance maximale	N/mm ²
HV	Dureté Vickers	/
Rr	Résistance a la rupture	mm
Rs	Rayon de sortie	mm
Se	Section d'entrée	mm ²
Ss	Section de sortie	mm ²
Le	Longueur d'entrée	m
Ls	Longueur de sortie	m
r	Réduction du fil trefilé	%
u	Vitesse de tréfilage	m/s
dm	diamètre moyen	mm
L ₀	Longueur initiale	mm
ΔT_s	somme de l'échauffement	°C
k	conductivité thermique	W/(m.K)

Caractères grecs :

<i>Caractère</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
ρ	Masse volumique	kg/m ³
θ	L'angle du cône d'entrée	degré
λ	L'allongement du fil tréfilé	/
ε	Déformation	%
$\sigma_{z,s}$	Contrainte de tréfilage en sortie de filière	MPa
σ_e	Contrainte élastique	MPa
σ_r	Contrainte à la rupture	MPa

Abréviations :

<i>Abréviation</i>	<i>Désignation</i>
BCR	Boulonnerie Coutelier Robinetterie
EMO	Exposé de Machine-Outil
EDM	Electrical Discharge Machining
DSEDM	Die Sinking Electrical Discharge Machining
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining
CN	Commande Numérique
av. J.C	Avant Jesus Christ
ENP	Ecole Nationale Polytechnique
Cu	Cuivre
Zn	Zinc
NF	Norme Française
MEB	Microscope Electronique A Balayage
HV	Dureté Vickers

RÉSUMÉ

Ce travail fait partie d'un Projet National de Recherche (PNR) mené par le groupe de recherche du département métallurgie de l'école nationale polytechnique en collaboration avec l'entreprise ORFEE (BCR de Bordj Menaiel), qui porte sur « La caractérisation du fil destiné à l'électroérosion de matrices métalliques, en vue de son optimisation ».

Le but de notre projet de fin d'étude est d'apporter des éclaircissements sur le fil électrode utilisé par la machine ROBOFIL 290P que possède l'entreprise ORFEE (filiale de groupe BCR), caractérisé mécaniquement ce fil ainsi que de savoir d'avantage sur le processus de sa fabrication (tréfilage, traitement thermique, revêtement).

Ce travail ne se limite pas à l'interprétation des caractéristiques microstructurales de ce fil métallique à l'état tréfilé, mais nous avons essayé de connaître l'influence de l'étincelage érosif sur les propriétés de ce dernier.

Les méthodes d'études utilisées sont la micro dureté Vickers, l'essai de traction, la microscopie optique et microscopie électronique à balayage MEB.

MOTS-CLÉS : *électroérosion, cuivre, zinc, tréfilage, recuit, revêtement électrolytique.*

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Pendant longtemps, la mise en forme des métaux a été effectuée essentiellement à l'aide de procédés mécaniques. Que ce soit par les techniques de coupe à l'outil tranchant ou par les techniques d'abrasion, l'enlèvement de matière était réalisé par une action mécanique.

Ce n'est que vers les années 1950 qu'on entendit parler pour première la fois de procédés électriques d'usinage, basés sur l'enlèvement par décharge électrique. Rapidement, l'intérêt de ces techniques d'électroérosion fut compris par tous les pays industrialisés qui ont mis en œuvre ce procédé dans les ateliers de production.

L'entreprise Orfee (filiale du groupe BCR Bordj Menaiel) a profité de cette technologie, en se procurant une machine d'électroérosion à fil de type CHARMILLES ROBOFIL 290P essentiellement utilisée pour produire des matrices, des moules et des pièces d'outillage avec précision et bonne qualité de surface.

Le fil électrode utilisé par la machine sus cité, est un élément majeur pour en faire de l'étincelage érosif une technologie de pointe dans le monde d'usinage par enlèvement de matières. D'ailleurs, dans l'industrie nous les trouvons souvent de diamètre 0,25mm. L'apparition de cette technique a donné aux ingénieurs mécaniciens une large gamme de manœuvres dans leurs travaux conceptions.

Ce procédé réservé aux matériaux conducteurs est irrévocable ni devant la dureté des métaux trempés ni de la complexité des formes des pièces qu'on veut produire ; ceci nous a conduit à poser certaines questions :

- En quoi consiste l'enlèvement de matières par étincelage ?
- De quoi sont constitués les fils électrode ?
- Comment fabrique-t-on ce genre d'électrode ?
- De quelle façon réagissent-ils avec les exigences industrielles ?

L'objectif de ce présent mémoire est de répondre à ces questions, pour cela nous avons organisé notre travail autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des principes d'usinage par électroérosion en mettant le point sur les machines et les matériaux des fils électrodes.

Le deuxième chapitre englobe une présentation générale du cuivre et du zinc ainsi que les alliages des deux, leurs propriétés physiques et mécaniques sont aussi décrites.

Le troisième chapitre présente une brève étude bibliographique sur les procédés de tréfilage à froid et le traitement de surface par électrolytique.

Le quatrième chapitre aborde les différentes techniques expérimentales d'observations, d'analyses et de caractérisations mécaniques que nous avons choisies pour notre étude

Le cinquième chapitre dresse un bilan des résultats obtenus, indispensable pour pouvoir corréler par la suite les propriétés mécaniques et les paramètres d'électroérosion.

Enfin nous terminons notre étude par une **conclusion générale** qui reprend les objectifs du présent travail.

CHAPITRE I :

L'USINAGE PAR ELECTROEROSION

I.1. Introduction

L'usinage par électroérosion ou par étincelage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière, moderne, offrant une technologie intéressante pour usiner des formes complexes dans des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. Il est donc de plus en plus utilisé principalement pour fabriquer des outils: moules d'injection, matrices de frappe (estampage), matrices de découpage, outils d'extrusion, etc.

Ce sont les étincelles générées entre une électrode et la pièce qui arrachent des particules de matière, servent en quelque sorte d'outil de découpe.

Mais, comment tout cela fonctionne-t-il ? La plupart des opérations ne sont hélas pas visibles.

A l'aide des modèles et des schémas nous allons tenter dans ce chapitre de donner une image concrète des principes de base de l'usinage par électroérosion.

I.2. Historique

Le phénomène d'érosion dû aux décharges électriques avait déjà été constaté en 1770 par le savant anglais Priesley.

En 1943, les scientifiques russes B.R et N.I Lazarenko mirent au point la première technique d'usinage de métaux par étincelage, utilisant une succession de décharges électriques opérées entre deux conducteurs immergés dans un liquide isolant (le diélectrique). L'idée leur était venue suite à une étude où ils cherchaient à diminuer l'usure des contacteurs électriques.

C'est le principe du générateur de décharge (appelé Circuit de Lazarenko) qui a servit de base aux développements des machines modernes. La première machine industrielle utilisant ce principe a été présentée à EMO de Milan en 1955 (Charmilles Technologies).

I.3. Mécanismes de base de l'électroérosion

L'électroérosion est un processus d'usinage basé sur des décharges électriques contrôlées (étincelles). L'enlèvement de matière a lieu sans aucune interaction mécanique entre l'électrode (l'outil) et la pièce à usiner. Chaque étincelle fond et évapore une petite quantité de matière de la pièce à usiner (mais aussi de l'électrode). Un diélectrique liquide refroidit et nettoie la zone de travail. Lorsque l'énergie des étincelles décroît, le volume de matériel évacué diminue; l'état de surface et la géométrie s'améliorent en conséquence.

Si l'influence des paramètres de l'étincelle (tension, durée, polarité,...) est prépondérante pour la qualité de l'usinage, les conditions de lavage conditionnent grandement la stabilité du processus, donc la précision et la rugosité. Le lavage consiste à évacuer les débris fondus et évaporés de la zone située entre l'électrode et la pièce à usiner. Cette zone est appelée le gap.

Pour obtenir une rupture du diélectrique et par conséquent l'étincelage, le gap doit correspondre à la distance de claquage. Cette distance est fonction de la tension d'amorçage, mais également de la rigidité du diélectrique lui-même étroitement liée à sa contamination par les particules conductrices érodées. De fait, pour maintenir un gap constant, il est important d'évacuer régulièrement le diélectrique sale présent entre la pièce et l'électrode et de le remplacer par du diélectrique propre pour les prochaines décharges.

I.4. Principe physique de l'usinage par électroérosion

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, immergés dans un liquide isolant (le diélectrique). La pièce doit donc nécessairement être conductrice.

Le diélectrique est en général de l'eau dé-ionisée pour les machines de découpage EDM à fil, du pétrole ou de l'huile pour les machines EDM d'enfonçage.

L'application d'une tension génère un champ électrique entre l'électrode et la pièce (espace appelé 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.

Le déroulement du processus est le suivant :

I.4.a. 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 [9].

Cette phase préparatoire consiste en l'accroissement de l'ionisation du diélectrique initialement très faible, voire pratiquement nulle puisqu'il s'agit d'un milieu isolant. Il est admis, que le phénomène a lieu à l'endroit où le champ électrique provenant de l'application d'une tension entre les électrodes, a une intensité maximale. Le plus souvent entre les points les plus proches de l'électrode et de la pièce; de petites irrégularités de surface suffisent pour déclencher la construction d'une étincelle.

Durant cette première phase qui comprend toutes les réactions conduisant à la formation du canal de décharge, on note une forte variation du courant et de la tension. Cette caractéristique, après la perforation du diélectrique, provoque un flux de courant presque exclusivement à la surface du canal de décharge qui s'est formé (effet pelliculaire) [2].

Le canal conducteur est formé d'un plasma, gaz qui subit une ionisation à très haute température (8 000 à 12 000 °C). Ce plasma est constitué par des atomes métalliques évaporés aux électrodes, des ions M et des électrons. Ces particules sont créées par les chocs violents que subissent les atomes portés à haute température, cette haute température résultant elle-même de l'échauffement du milieu provoqué par les chocs entre particules et atomes [9];

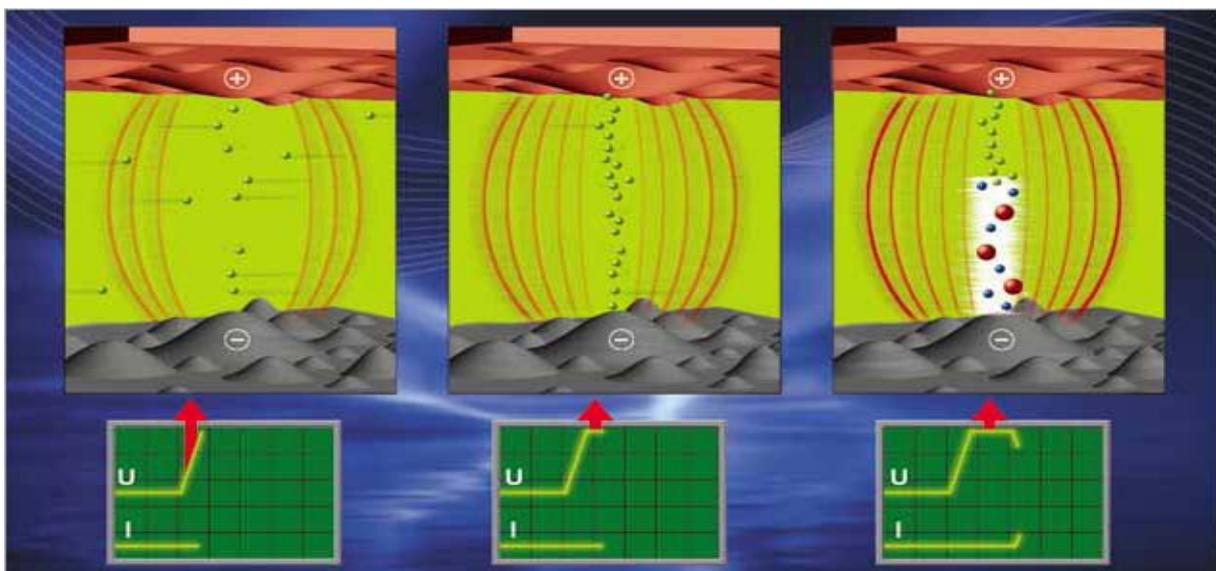


Figure I.1 : Schéma de la phase d'ionisation.

I.4.b. La fusion et la vaporisation de la matière

Le diélectrique étant ionisé, un courant s'établit entre les électrodes à travers le gap, 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 dans le canal de décharge ou canal de plasma, la température est de 8'000 à 12'000 °C. 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^2 . Celles-ci entraînent des effets physico-thermiques importants : l'échauffement local des électrodes, la fusion et la vaporisation des matériaux qui les constituent, la dégradation du diélectrique. Des poches de matière fondue apparaissent aux deux électrodes. Autour du canal de plasma est créée une bulle de gaz et une onde de choc se propage radialement dans le liquide, la pression est très élevée; le volume de cette bulle croît durant le passage du courant, et d'ailleurs comme la section du canal de plasma. [9];

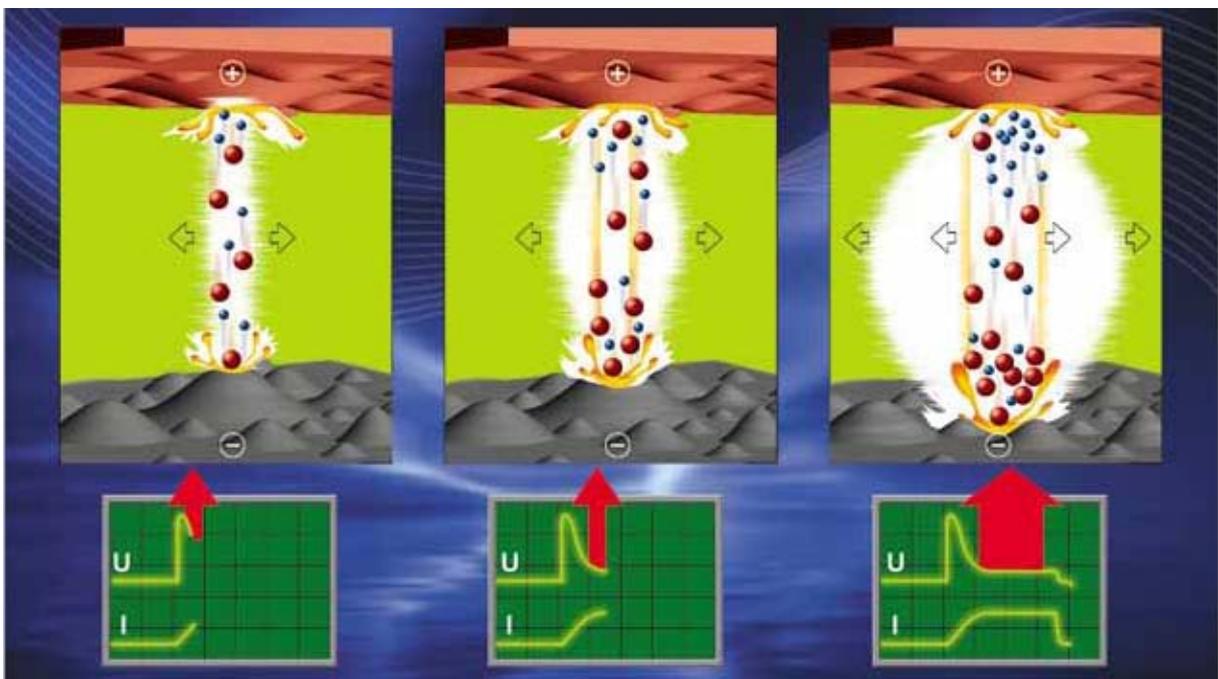


Figure I.2. Fusion-vaporisation de la matière.

I.4.c. L'éjection de la matière

A la fin de la décharge, lorsque le courant est coupé, la pression retombe à l'intérieur de la bulle et le canal de plasma s'effondre aussi tôt. Aux surfaces de la pièce et de l'électrode, on assiste à une vaporisation explosive du matériau fondu.

Cette phase 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. 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.

Les débris érodés sont éjectés à grande vitesse se retrouvent au sein du diélectrique sous forme de petites sphérules et laissent un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée se solidifie sur place [9].

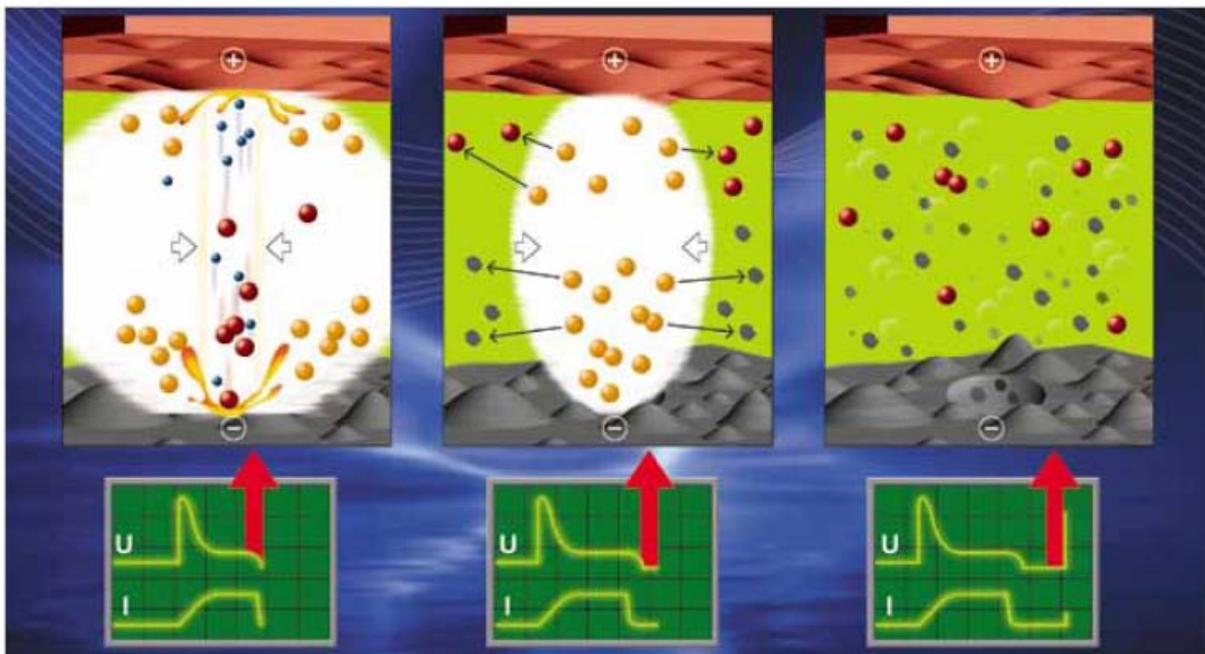


Figure I.3 : Ejection de la matière.

I.5. Fluide diélectrique pour l'électroérosion

Lors de la découverte de l'emploi des décharges à condensateur comme procédé d'usinage sur les matériaux métalliques, les premières machines utilisèrent tout d'abord de l'air normal comme diélectrique.

Il s'avéra cependant très rapidement que les fluides à base d'huile minérale offraient des avantages non négligeables. La rigidité diélectrique était plus élevée. Aucun gap plus petit permettant une telle précision de reproduction ne pouvait être choisi.

L'enchaînement des étincelles pouvait être augmenté et le métal ainsi ôté pouvait être facilement évacué de la zone de traitement. Une application industrielle de l'électroérosion n'aurait pu être envisagée sans les fluides à base d'huile. Tout d'abord, ce furent des produits à base de pétrole et de white-spirit tels que l'huile cristalline qui furent utilisés.

I.5.1. Rôle du fluide diélectrique

1. Isolation :

Le fluide diélectrique doit en tout premier lieu isoler la pièce de l'électrode. La décharge disruptive doit avoir lieu le plus près possible. Ainsi, on augmente l'intensité d'érosion et la précision de reproduction.

2. Ionisation :

Le fluide diélectrique doit créer le plus rapidement possible des conditions nécessaires à la formation d'un champ électrique et permettre un canal d'ionisation. A la fin de l'impulsion, le canal de décharge doit être déionisé rapidement afin que la prochaine décharge puisse se faire.

Lors de la décharge, le fluide diélectrique doit restreindre le canal de décharge autant que possible afin que la densité du flux d'énergie obtenue soit élevée. Ce qui signifie en même temps une augmentation du rendement de la décharge.

3. Refroidissement :

Etant donné que l'étincelle électrique entre en contact avec la pièce à une température d'environ 8000 à 12 000 degrés Celsius, le fluide diélectrique doit refroidir

l'électrode et la pièce. Il faut éviter une surchauffe de l'électrode afin de ne pas provoquer une usure exagérée. Les vapeurs de métaux apparaissant lors du procédé d'électroérosion doivent pouvoir se condenser dans le fluide.

4. Evacuation des particules enlevées :

Les particules ôtées lors de l'usinage par électroérosion doivent pouvoir être évacuées de la zone d'électroérosion par le fluide diélectrique afin d'éviter tout problème dans le procédé.

I.6. Les différents procédés d'EDM (Electrical Discharge Machining)

Il existe beaucoup de types de machines et d'applications qui utilisent le principe de l'électroérosion.

Mais les deux types bien distincts de machines d'usinage par électroérosion sont: les machines EDM à fil et les machines EDM à enfonçage. Les caractéristiques communes aux machines EDM sont les suivantes :

- ✓ Usinage de matériaux conducteurs ;
- ✓ Possibilité d'usinage de matériaux très durs (pas de limite de dureté) ;
- ✓ Pas d'effort mécanique à l'enlèvement de matière ;
- ✓ Asservissement des axes mécaniques aux conditions électriques pour maintenir un gap constant. A aucun moment l'électrode ne touche la pièce ; ce sont des mesures de grandeurs électriques qui permettent de déterminer la distance pièce-électrode et qui sont utilisées dans les boucles de régulation de la commande numérique.

I.6.1. L'électroérosion à plongée ou 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-type, conventional, plonge ou encore vertical EDM. Ce procédé reproduit naturellement la forme d'une électrode dans une pièce métallique. L'électrode creuse progressivement la pièce selon un mouvement vertical. Si la pièce est un moule, l'électrode a la forme de l'objet moulé.

Les machines standards actuelles sont dotées de quatre axes interpolés, 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.

Ce procédé est très employé pour la fabrication des moules d'injection, estampage (matrices de frappe), outils d'extrusion, matrices de compactage de poudre, ...

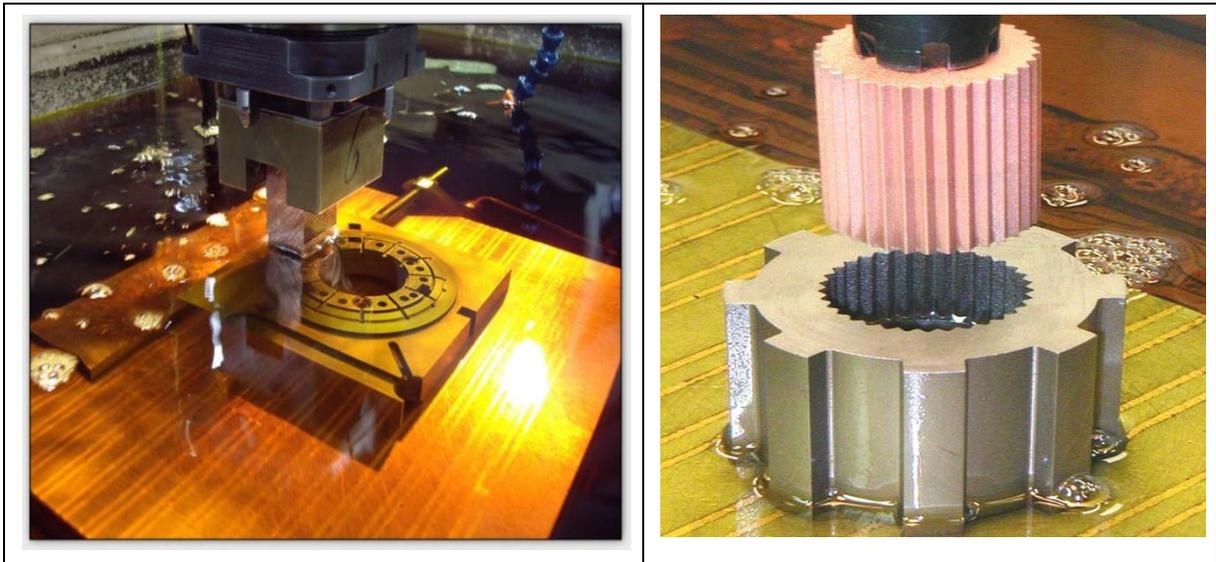


Figure I.4 : Electroérosion par enfonçage.

I.6.2. L'électroérosion à fil ou WEDM (Wire Electrical Discharge Machining)

En 1969, l'entreprise Agie suisse produit la première machine d'électroérosion à fil dans le monde.

En règle générale, ces premières machines au début des années 70 ont été extrêmement lentes, coupent environ 2 pouces carrés par heure ($21 \text{ mm}^2/\text{min.}$). Leurs vitesses ont augmenté au début des années 80 à 6 pouces carrés par heure ($64 \text{ mm}^2/\text{min.}$). Aujourd'hui, les machines sont équipées d'un système d'enfilage automatique et peuvent usiner à une vitesse 20 fois plus rapide que le début [13].

Ce procédé très répandu, utilise une électrode fil qui défile en continu et se déplace à travers la pièce à usiner (*Figure I.5*). Le mouvement relatif entre l'électrode fil et la pièce, est contrôlé par une CN 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. 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 interpolés, permettant d'usiner des pièces coniques en inclinant le fil.

Ce procédé est utilisé avec excellence pour la production des matrices de découpage, matrices d'extrusion, poinçons de découpe, moules, électrodes pour les machines EDM à enfonçage, micro-usinage (pièces d'horlogerie)...

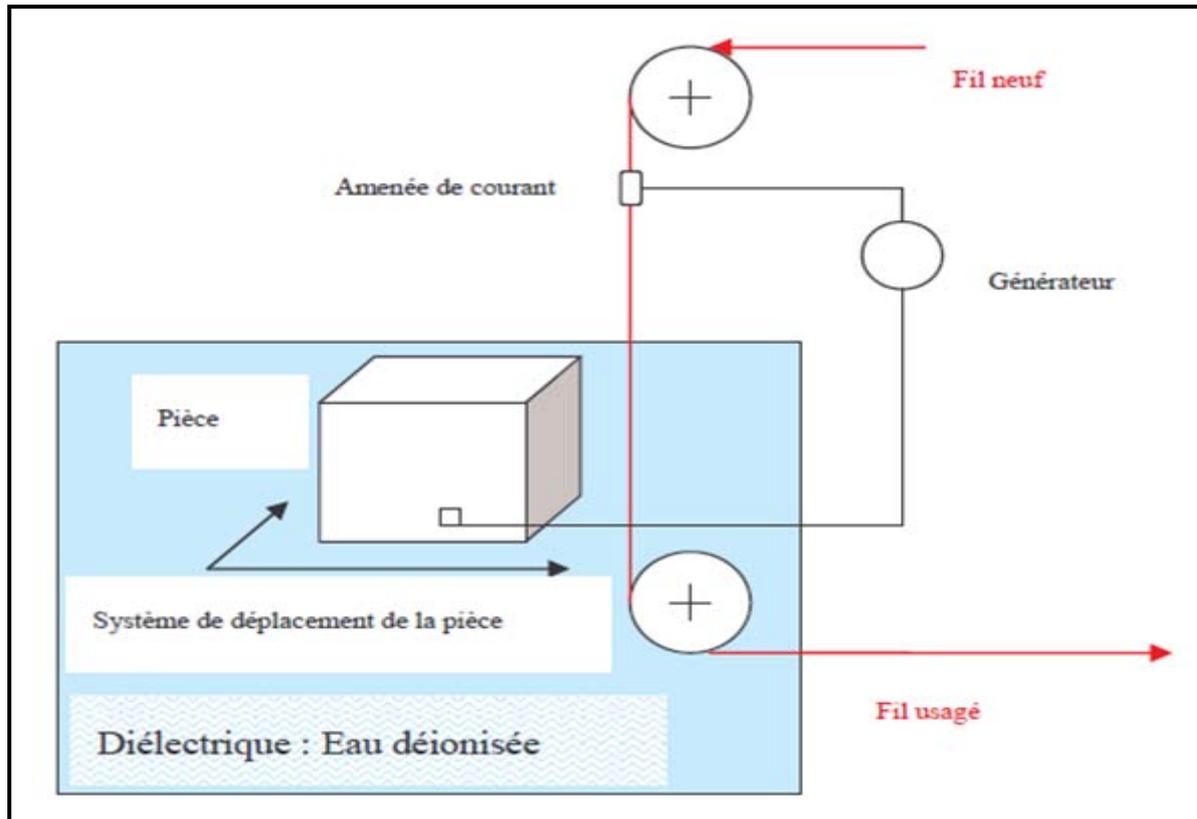


Figure I.5 : Schéma de principe de l'électroérosion à fil.

Électroérosion à fil utilise un fil-électrode qui se déplace et qui passe à travers la pièce à usiner. Le fil est contrôlé avec précision par un ordinateur à commande numérique (CNC) système.

Entre le fil et la pièce à usiner il y a un bouclier d'eau déionisée (diélectrique). L'eau pure est un isolant, mais l'eau du robinet contient généralement des minéraux qui provoquent trop de conduction pour électroérosion à fil. Pour commander la conductivité de l'eau, l'eau passe à travers un réservoir de résine pour éliminer une grande partie de ses éléments, ce conducteur est appelé l'eau déminéralisée. Comme les coupures de la machine, la conductivité de l'eau a tendance à augmenter, et une pompe oblige automatiquement l'eau à traverser un réservoir de résine lorsque la conductivité de l'eau est trop élevée.

Lorsque la tension suffisante est appliquée, le fluide est ionisé puis une étincelle contrôlée érode précisément une petite section de la pièce, faisant fondre et vaporiser de la matière.

Ces impulsions électriques sont répétées plusieurs fois par seconde. La sous pression du fluide de refroidissement, le diélectrique, refroidit le métal vaporisé et force les particules re-solidifiées érodées à s'écarter. Le fluide diélectrique passe par un filtre qui élimine les solides en suspension. Pour maintenir la machine et la précision de la pièce, le fluide diélectrique s'écoule à travers un refroidisseur pour maintenir le liquide à une température constante (voir la figure I.6).

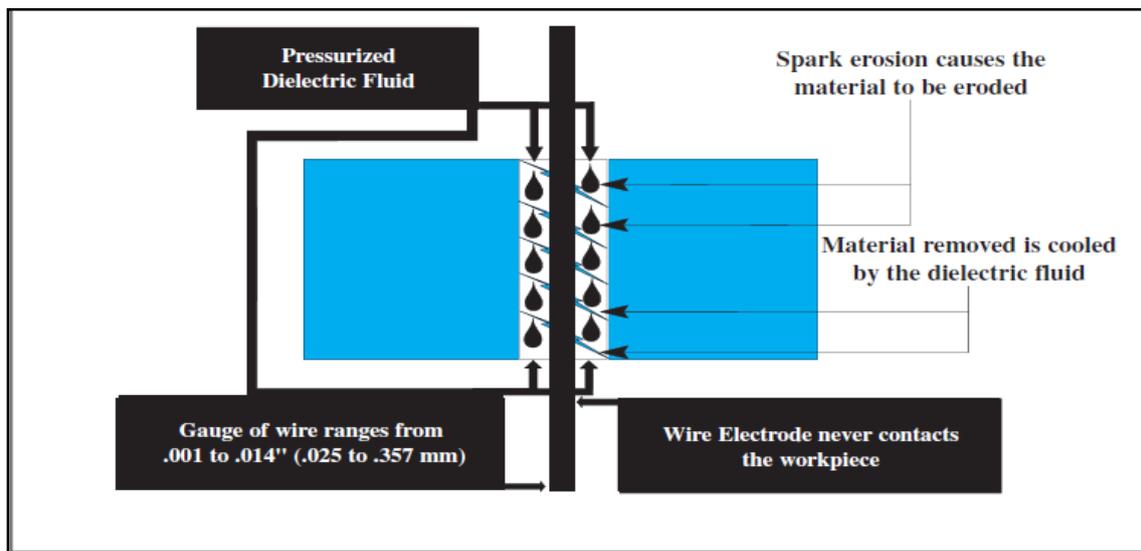


Figure I. 6 : schéma du système d'arrosage en EDM a fil.

Le diélectrique résiste jusqu'à ce que la tension appliquée soit suffisante. Ensuite, le fluide ionisé produit des étincelles entre le fil l'électrode et la pièce à usiner.

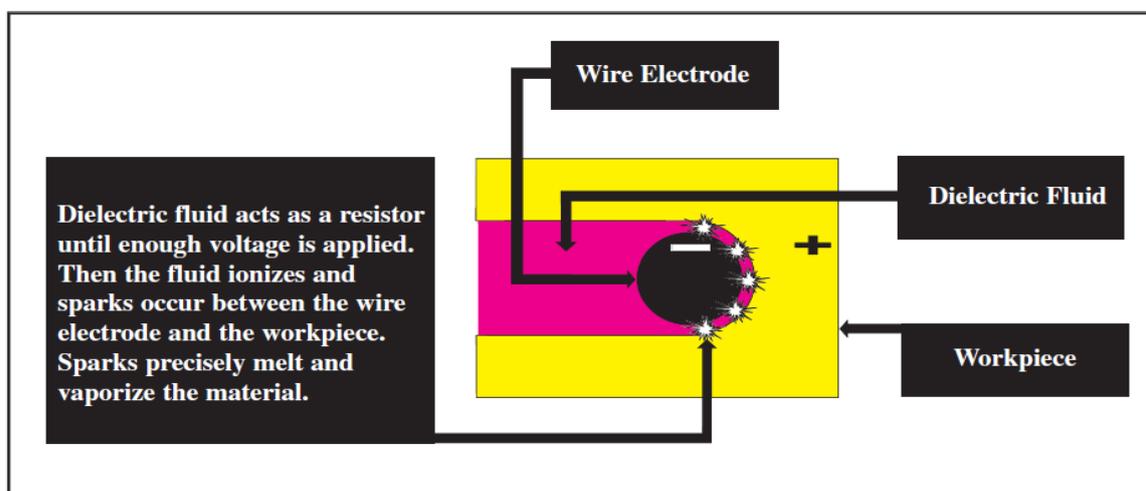


Figure I.7 : formation d'étincelles entre le fil l'électrode et la pièce à usiner.

Une fois le processus d'étincelles est terminé, la pièce à usiner est refroidie par le fluide diélectrique sous pression et les particules érodées débusquées.

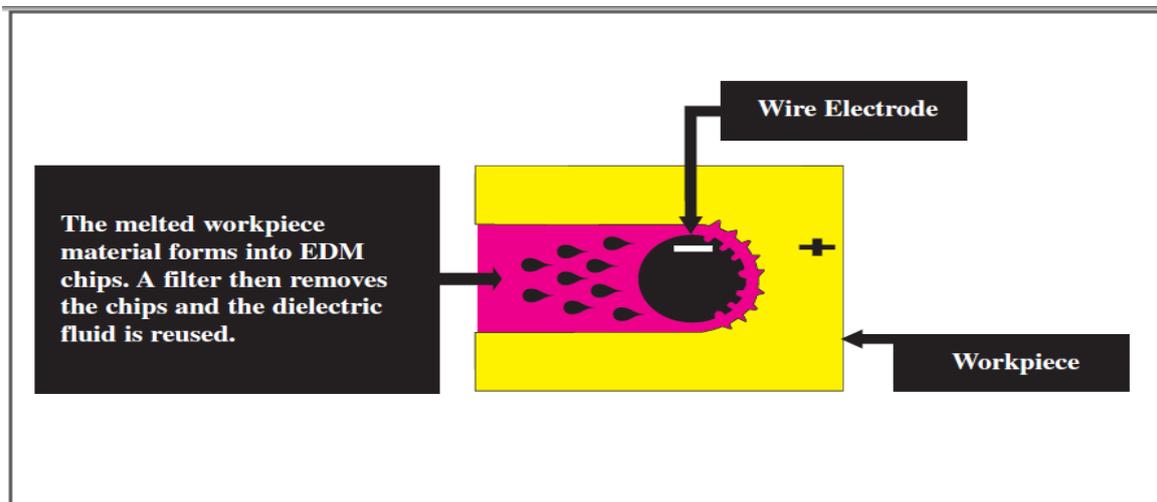


Figure I.8 : Les particules érodées sont enlevées et séparées par un système de filtre.

Un système d'asservissement à courant continu ou alternatif maintient un intervalle de 00,051 à 0,076 mm entre le fil-électrode et la pièce à usiner (Gap). Le servo-mécanisme empêche le court-circuit entre le fil électrode et la pièce, et le fil peut progresser quant il coupe la forme désirée car le fil ne doit jamais toucher la pièce. L'EDM à fil est une opération de coupe sans effort mécanique.

I.7. Recommandations pour fil électrode

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.

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

➤ **Haute résistance à la traction (limite élastique, charge de rupture) ;**

A fin d'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.

➤ **Haute conductivité électrique ;**

➤ **Basse température de fusion ;**

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

- **Basse température requise pour maintenir une pression de vaporisation donnée.**

La pression de vapeur est très importante : on préfère que le matériau du fil se vaporise plutôt que de fondre, car, dans ce cas, il se produit des gouttelettes (des gaz sont plus faciles à évacuer que des sphérules solides).

- **Le diamètre du fil.**

Le diamètre optimal est bien évidemment un paramètre important, et aussi un compromis entre la quantité de matière à enlever et la tenue mécanique du fil. La saignée à réaliser dépend du diamètre du fil. Donc, pour minimiser la quantité de matière à enlever, on préfère un fil de petit diamètre.

Mais alors, il n'est pas possible de le tendre suffisamment fort et il vibre plus facilement, conduisant à des courts-circuits qui ralentissent l'avance et peuvent rompre le fil. À l'inverse, un fil plus gros en diamètre peut être tendu très fortement, mais la saignée est plus large, la quantité de matière à enlever est plus grande, la vitesse de découpe est alors plus faible. Le diamètre donnant le plus fort enlèvement de matière est 0,2 à 0,3 mm.

I.8. Matériaux pour fils

Les matériaux utilisés pour la fabrication des fils électrodes doivent répondre à toutes les exigences citées auparavant. Dans le marché industriel on trouve une variété importante, chaque type a ses propres caractéristiques distinctes.

Pour fournir l'énergie nécessaire, il faut considérer la conductivité électrique du matériau. Le cuivre est un matériau à haute conductivité, 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 [9].

À une époque relativement récente, il y a eu l'apparition des fils composites. Cela permet d'avoir une âme très résistante mécaniquement, et une enveloppe très conductrice et facile à fondre et à vaporiser. La première application a été un fil de laiton recouvert de zinc.

Certains constructeurs ont ajouté à l'âme de laiton des éléments d'addition tels que l'aluminium et le titane, pour augmenter la tenue mécanique.

Les fils revêtus sont maintenant disponibles dans une grande variété de matériaux de base, matériaux de revêtement, des profondeurs de revêtement et résistance à la traction, pour s'adapter à diverses applications et les exigences de la machine [10].

I.9. Liste des fils courants et leurs applications

Il existe actuellement de nombreux types de fil électrode pour électroérosion, qui présentent chacun des propriétés particulières pouvant justifier leur choix pour tel ou tel type d'usinage par électroérosion.

Les tableaux suivants présentent la plupart des matériaux utilisés pour les fils pour découpe par électroérosion et permettent d'effectuer un choix selon l'application.

Tableau I.1 : Liste de Fils en laiton non revêtus

Type	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Allongement A%	Matériaux De base	Diamètre courant	Intérêts
Laiton Mou	175	350-450	>30	CuZn37	0,1 à 0,35	Technologie grande dépouille
Laiton ½ dur	380	480-520	17-25	CuZn37	0,1 à 0,35	Fil d'usage courant
Laiton dur	-	800-900	0,5-3	CuZn37	0,1 à 0,35	Permet une tension mécanique élevée favorable à la qualité de surface et à la précision géométrique

Tableau I.2 : Liste de Fils revêtus de zinc

Ame	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A %	Matériaux de base	Revêt ement	Diamètre courant	Intérêts
Laiton ½ dur	355	450-550	14- 20	CuZn37	Zn	0,1 à 0,35	Bonne qualité de surface après ébauche cylindrique ou en dépouille
Laiton Dur	-	800-900	0,5-3	CuZn37	Zn	0,1 à 0,35	Recommandé pour l'usinage en ø 0,1 et bonne résistance à la traction vitesse de coupe élevée

Tableau I.3 : Fils revêtus d'alliage

Ame	Rm (N/mm ²)	A %	Matériaux de base	Revêtement	Diamètre courant	intérêts
Cuivre	450-570	1	Cu	Base de Zn	0,2 à 0,3	Haute vitesse de coupe en ébauche

Conclusion

L'électroérosion à Fil est l'une des plus grandes innovations affectant l'industrie de l'usinage et d'outillage. Ce processus a permis à l'industrie des améliorations spectaculaires en termes de précision, de qualité, de productivité et de revenus

La structure du fil électrode doit en général présenter une résistance mécanique suffisante pour éviter la rupture du fil dans la zone d'étincelage et pour permettre d'appliquer au fil électrode une tension longitudinale élevée dans la zone d'usinage, pour limiter l'amplitude des vibrations afin de garantir un positionnement très précis du fil et donc un usinage précis.

CHAPITRE II :

GENERALITES SUR LE CUIVRE ET LE ZINC

II.1. Introduction

Le cuivre, comme l'or et l'étain, est l'un des tout premiers métaux utilisés par nos ancêtres. La facilité avec laquelle il est possible de le former, sa belle couleur et sa résistance à la corrosion, ont fait de lui un métal très prisé pour la fabrication des premières armes, bijoux, objets liturgiques et domestiques.

Le cuivre métallique est connu depuis environ 9000 ans av. J.C. il est largement utilisé depuis 5000 ans av. J.C. Lorsque la valeur de son alliage à l'étain a été découverte, les débuts de l'Age de Bronze ont marqué un profond développement culturel et économique en Europe et dans les pays méditerranéens [3].

Le cuivre et ses alliages connaissent de nombreuses applications industrielles et plus particulièrement les alliages cuivre-zinc qui portent le nom de laitons. Ils forment une grande série d'alliages ayant de bonnes propriétés mécaniques associées à une bonne résistance à la corrosion. Ils offrent une large gamme de propriétés intéressantes qui dépendent de la concentration en zinc.

II.2. Généralités sur le cuivre

La teneur en cuivre de l'écorce terrestre est faible (0,01%), cependant, à cause de son existence à l'état naturel et de la facilité de extraction du métal à partir des minerais, le cuivre est un métal connu depuis longtemps .sa métallurgie a précédé celle de fer de 2500ans[5].

À l'état brut, le cuivre se trouve principalement sous forme de sulfure (chalcopryrite CuFeS_2). Les minerais contiennent peu de cuivre (moins de 5 %) mais contiennent d'autres métaux, en particulier du fer et des métaux précieux (argent, or, platine), parfois du nickel et du cobalt, qui en sont également extraits.

Le cuivre pur est désigné par le symbole chimique Cu suivi d'un tiret et d'un code indiquant le procédé d'obtention. On distingue :

- le cuivre affiné (contient encore des traces d'oxygène) : affiné thermiquement (Cu-ETP, CW 004A), affiné électrolytiquement (Cu-FRHC, Cu-FRTP), à fort phosphore résiduel (Cu-DHP) ou à faible phosphore résiduel (Cu-DLP) ;
- le cuivre désoxydé : Cu-OF (*Oxygene Free*, CW 008A), Cu-OFE (haute pureté).

Le cuivre désoxydé est moins fragile et a une conductivité électrique plus élevée ; il est soudable au fer. Les cuivres Cu-ETP et Cu-FRHC ont une conductivité électrique garantie, pas les autres.

Les nuances de cuivre industriel selon la norme française (NF A 51-050) distinguent trois types de cuivre pur [5] :

- Cu/a : raffiné contenant de l'oxygène, à hautes conductivités thermique et électrique ;
- Cu/b : exempt d'oxygène, contenant des traces d'oxydant résiduel (phosphore), emboutissable ;
- Cu/c : cuivre exempt d'oxygène.

II.3. Propriétés physiques du cuivre

Métal rouge plus ou moins foncé, d'un bel aspect d'où ses applications artistiques. Le cuivre est un élément chimique du premier groupe dans la classification de Mendeleïev. Son numéro atomique est égal à 29, sa masse atomique vaut 63,54g/mol et sa densité est de 8,93 Kg/m³ (à 20°C).il cristallise dans un réseau cubique à faces centrées avec un paramètre de maille $a=3,6074\text{Å}$. Le cuivre est intéressant pour plusieurs raisons [20] :

- sa faible résistivité électrique (cuivre pur : $\rho_e = 16,8 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$) ;
- sa faible température de fusion ($T_f = 1\ 083 \text{ °C}$) ;
- sa grande conductivité thermique ($\lambda = 385 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) ;
- sa résistance naturelle à la corrosion : il réagit avec le dioxygène de l'air pour former une couche d'oxyde Cu_2O compacte et protectrice, de couleur noire ; il réagit également avec le dioxyde de carbone pour former le vert-de-gris.

On peut donc facilement en faire des fils électriques (tréfilage), des tuyaux de plomberie (fonderie ou laminage et soudure) et des échangeurs de chaleur.

Par ailleurs, il forme des alliages, en particulier avec l'étain, ce qui donne les bronzes, et le zinc, ce qui donne les laitons ; les bronzes et laitons sont moins chers, ont une meilleure ductilité et un point de fusion plus bas, ce qui facilite l'emboutissage et le moulage.

Remarque : les valeurs de la conductivité thermique et la résistance électrique du cuivre sont prise par convention comme valeurs de référence égale à 100% IACS (international Annealed Copper Standard).

II. 4. Propriétés mécaniques du cuivre

Le cuivre pur est durci par écrouissage. Cet écrouissage est annulé par un recuit. On distingue typiquement quatre états de livraison : recuit et 1/4 dur à 4/4 dur.

Tableau II.1. Les principales caractéristiques mécaniques de cuivre [18].

État de livraison du cuivre pur	taux d'écrouissage (%)	R _e (MPa)	R _m (MPa)	Dureté Vickers HV	Allongement A%
Recuit	0	7	23	50	45
1/4 dur	10	21	27	80	25
1/2 dur	25	25	30	100	14
4/4 dur	50	32	35	110	6

II.5. Généralités sur le zinc

Le zinc est un métal blanc bleuâtre, sa métallurgie repose sur deux groupes de procédés :

- L'extraction par voie sèche, appelée plus souvent voie thermique, dans laquelle l'oxyde de zinc est réduit en présence de carbone à haute température ;
- L'extraction par voie humide, ou procédé électrolytique, dans laquelle l'oxyde de zinc est mis en solution dans l'acide sulfurique dilué, et le zinc extrait par électrolyse.

Le zinc entre dans la constitution de nombreux alliages ou il n'est pas l'élément le plus abondant : laiton que nous verrons par la suite, maillechorts et antifrictions.

II.6. Propriétés physiques du zinc

Le Zinc symbole Zn, cristallise dans le système hexagonal compact, ses caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau II.4.

Le zinc est cependant assez inaltérable ; il se recouvre à l'air libre humide d'une couche d'hydrocarbonate protectrice ; d'où son emploi pour la confection des toitures, des gouttières et pour la protection du fer (galvanisation, zingage électrolytique, métallisation par protection et sherardisation). Il brûle facilement à l'air ; l'oxyde de zinc, obtenu par combustion du métal, est très employé en peinture [6].

Tableau II.2. Les différentes propriétés physiques et mécaniques de zinc [19].

PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU ZINC	
Numéro atomique	30
Masse atomique	67,37
Masse volumique (à 25°C)	7,14 g/cm ³
Température de fusion	419,5 °C
Température d'ébullition	907 °C
Tension de vapeur	0,139 mmHg (à 419,5 °C)
Conductivité thermique	113 W/(m.K)
Résistivité électrique à 20°C	5,9 μΩ.m
La résistance à la traction	145 – 186 Mpa
La limite d'élasticité	40 – 50 Mpa

II.7. Alliage cuivre-zinc Cu-Zn (laiton)

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 α 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 adéquate pour le façonnage à chaud..

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), les fils électrodes (CuZn37), aux armatures (CuZn40) et paliers pour les boîtiers de pompes résistants à l'eau de mer (CuZn10Sn2)[7].

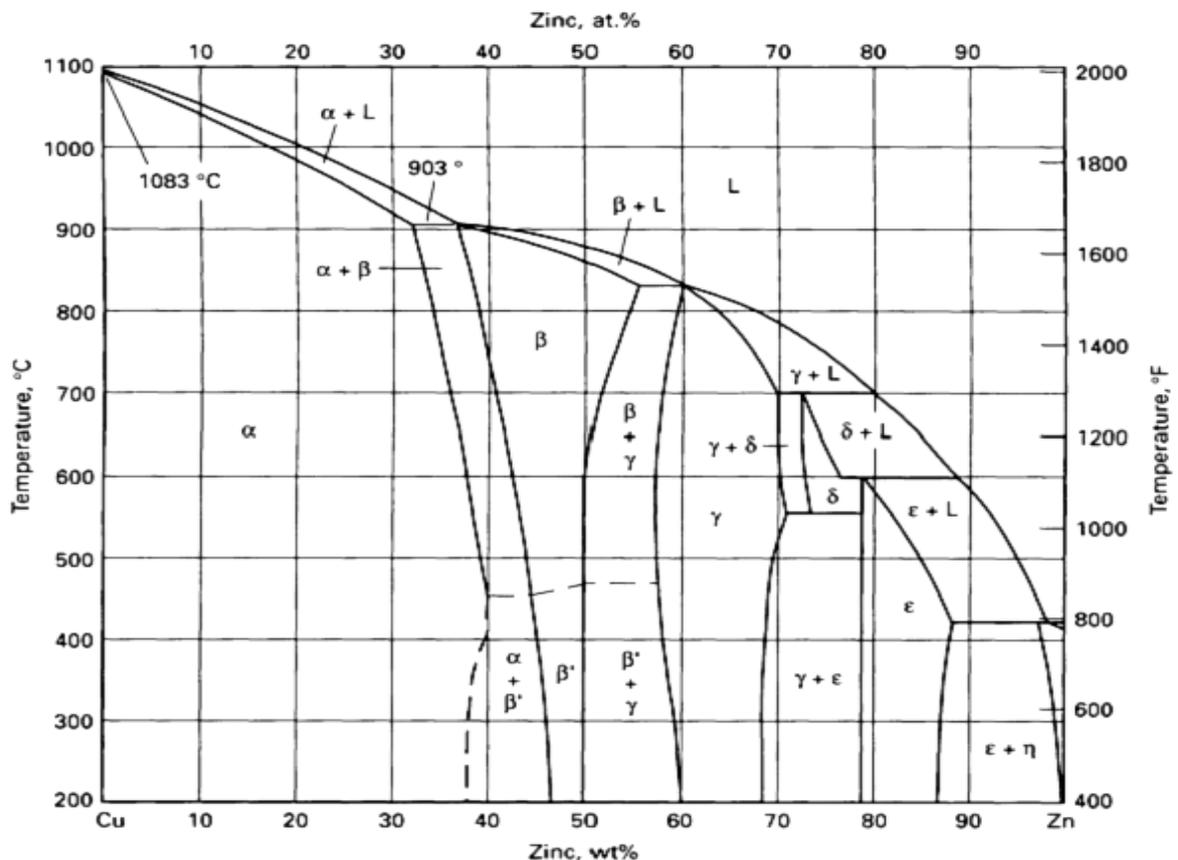


Figure II.1 : Diagramme d'équilibre cuivre-zinc [11].

II.7.1. Laitons simples ou binaires :

On appelle ainsi ceux qui ne contiennent que du cuivre et du zinc. En pratique industrielle, ces laitons contiennent 5 à 45% de zinc. Le diagramme d'équilibre Cu-Zn (*figure II.5*) indique une solubilité maximale de 45% Zn vers 450°C, qui décroît à plus haute et à plus basse températures. Ceux contenant 5 à 37 % de zinc sont monophasés (une seule phase α) et les laitons contenant 37 à 40 % sont biphasés ($\alpha + \beta$). Les laitons contenant 37 % de zinc peuvent être soit monophasés, soit biphasés, en fonction des traitements thermiques.

Les laitons α industriels s'étendent donc de CuZn5 jusqu'à CuZn37 et leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques évoluent continuellement avec leur titre en zinc, ainsi que leur prix matière, car le zinc reste sensiblement moins cher que le cuivre [8].

II.7.2. Laitons avec addition

En ajoutant de l'aluminium, du manganèse, du fer, du nickel et de l'étain, des types de laitons spéciaux peuvent être produits ayant des propriétés chimiques ou mécaniques spécifiques. Des additions de petites quantités de plomb améliorent l'usinabilité du laiton

➤ Laitons au plomb :

Ces laitons présentent une aptitude à l'usinage et au décolletage supérieure à celle des autres alliages industriels.

Le laiton de décolletage classique renferme 40 % de zinc et 3 % de plomb (Cu Zn 40 Pb 3). Cependant, il existe aussi des laitons au plomb sans phase β (comme le Cu Zn 35 Pb 2) qui allient une bonne usinabilité et une forte capacité de déformation à froid [12].

➤ Laitons spéciaux :

Ces laitons sont obtenus par addition d'un ou plusieurs éléments aux laitons simples. Ces additions ont généralement pour but :

- soit d'améliorer les propriétés mécaniques (additions de Fe, Mn, Ni, Al, Si) ;
- soit d'améliorer la tenue à la corrosion (additions de Al, Sn avec faible quantité d'arsenic, ce dernier élément évitant la dézincification des laitons monophasés).

Ces éléments modifient également les propriétés et les proportions relatives des phases. Ainsi Sn, Al et Si augmentent la proportion de phase β alors que Ni, Fe et Mn augmentent la proportion de phase α [12].

II.7.3. Compositions normalisées des Barres, fils et profilés en laitons (simples)

Les nuances sont définies dans les normes : NF A 51-104 *Barres, fils, profilés en laitons simples* (tableau II.3) ;

Tableau II.3 – Laitons simples pour barres, fils et profilés : compositions normalisées (d'après norme NF A 51-104)					
Désignation	Cu %	Zn %	Impuretés		
			Fe max. %	Pb max.%	Total max.%
Cu Zn 10	89,0 à 91,0	Reste	0,1	0,05	0,4
Cu Zn 15	84,0 à 86,0		0,1	0,05	0,4
Cu Zn 20	78,5 à 81,5		0,1	0,05	0,4
Cu Zn 30	68,5 à 71,5		0,1	0,05	0,4
Cu Zn 33	65,5 à 68,5		0,1	0,1	0,5
Cu Zn 37	62,5 à 65,5		0,2	0,3	0,5
Cu Zn 40	59,0 à 62,0		0,2	0,3	0,5

II.7.4. Propriétés des laitons

Il y a lieu de distinguer plusieurs cas suivant la teneur en zinc.

- Jusqu'à une teneur en zinc de 33 % la structure est monophasée α . La phase α étant malléable à froid et à chaud, les laitons correspondants peuvent subir des déformations importantes par laminage, emboutissage, repoussage, frappe à froid, etc. En fait, la capacité de déformation dépend de la teneur en zinc, du taux d'écrouissage du produit considéré et, pour les produits à l'état recuit, de la grosseur du grain métallurgique, la résistance mécanique à l'état recuit diminuant lorsque croît la grosseur du grain. Pour les emboutissages profonds, le laiton CuZn33 est l'alliage le plus indiqué, car il possède une aptitude à la déformation à froid particulièrement importante associée à des caractéristiques mécaniques élevées.
- Au-delà de 33 % de zinc la structure est biphasée $\alpha + \beta'$. La phase β' étant dure et fragile, les laitons biphasés présentent une plus faible aptitude à la déformation à la température ordinaire que les laitons monophasés, et ceci d'autant plus que la teneur en zinc est élevée.

Aux températures supérieures à 455 °C, la phase β' se transforme en phase β , beaucoup plus malléable, ce qui permet aux laitons biphasés d'être facilement déformés à chaud.

Pratiquement, jusqu'à 36 % de zinc, les laitons biphasés conservent encore, cependant, une bonne aptitude à la déformation à froid, les laitons du type CuZn40 étant plutôt réservés aux opérations avec déformation à chaud (forgeage, matriçage) [8].

CHAPITRE III :

Le tréfilage et le revêtement électrolytique

III.1. Introduction

Le tréfilage est une opération nécessaire pour la production des fils électrode de faible diamètre. Au cours de ce processus, la mise en forme du matériau est effectuée par un mécanisme de déformation plastique.

Le principe du tréfilage, est défini dans le sens du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil », c'est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'action d'une force de traction et en présence d'un lubrifiant (figure III.1).

Cette technique permet d'obtenir des fils de différents diamètres et de s'affranchir ainsi des limites technologique et économique d'un procédé de déformation à chaud, à savoir de respecter des tolérances serrées sur les diamètres et de conférer, éventuellement, des caractéristiques mécaniques adaptées par écrouissage [21].

Les matériaux les plus utilisés dans le cadre d'applications industrielles sont les aciers, le cuivre, l'aluminium et le tungstène.

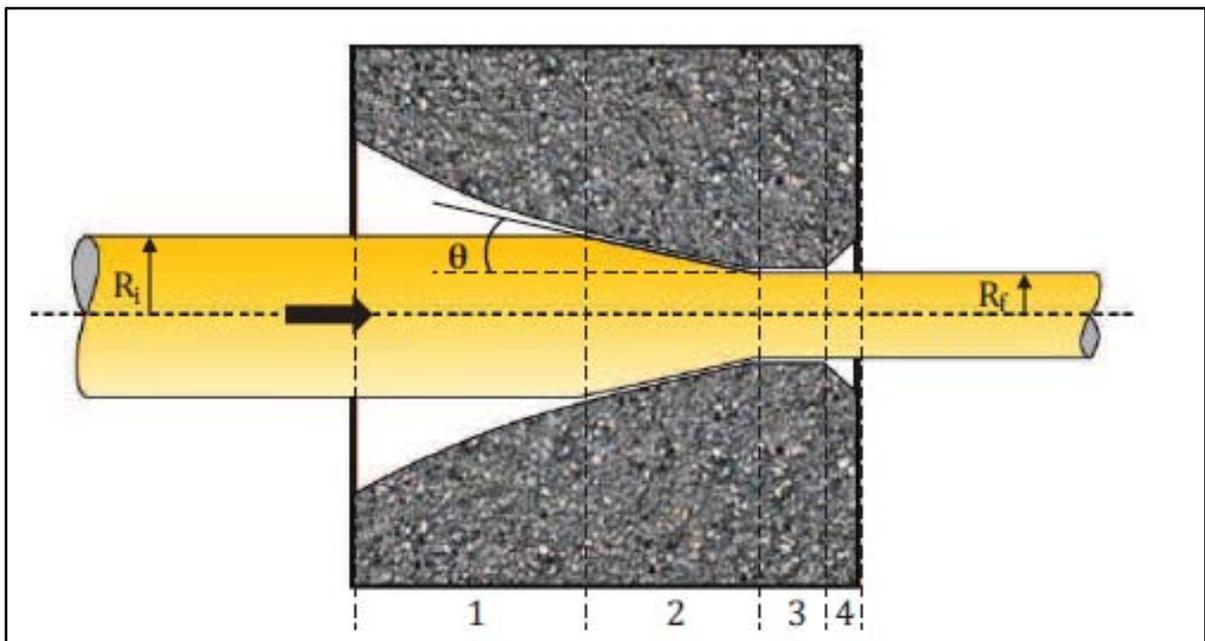


Figure III.1 : Vue en coupe d'une filière avec un fil.

La zone 1 : représente le cône d'entrée,

La zone 2 : le cône de travail,

La zone 3 : la zone cylindrique et

La zone 4 : le cône de sortie.

θ : L'angle est le demi-angle du cône d'entrée

III.2. Outils et équipements industriels du tréfilage

Les trois éléments-clés du tréfilage sont :

A. Le fil de départ : ou fil-machine provient du laminage à chaud ;

B. La filière :

Elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, qui va assurer la réduction du diamètre du fil et une frette en acier qui maintient le noyau et lui permet de résister aux fortes pressions développées au cours du tréfilage. Elle se compose de plusieurs parties (figure III.2):

- un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant,
- un cône de travail, de demi-angle α , dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil,
- une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil
- un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant.

Le tréfilage des gros fils se fait le plus souvent avec des filières en carbure de tungstène.

Pour les fils plus fins, ce sont des filières diamant (de géométrie différente) qui sont plutôt utilisées sauf dans le cas du cuivre qui se tréfille avec ce type de filière même pour les diamètres importants. La durée de vie de ces filières est plus importante que celle des filières en carbure, mais leur coût est nettement plus élevé.

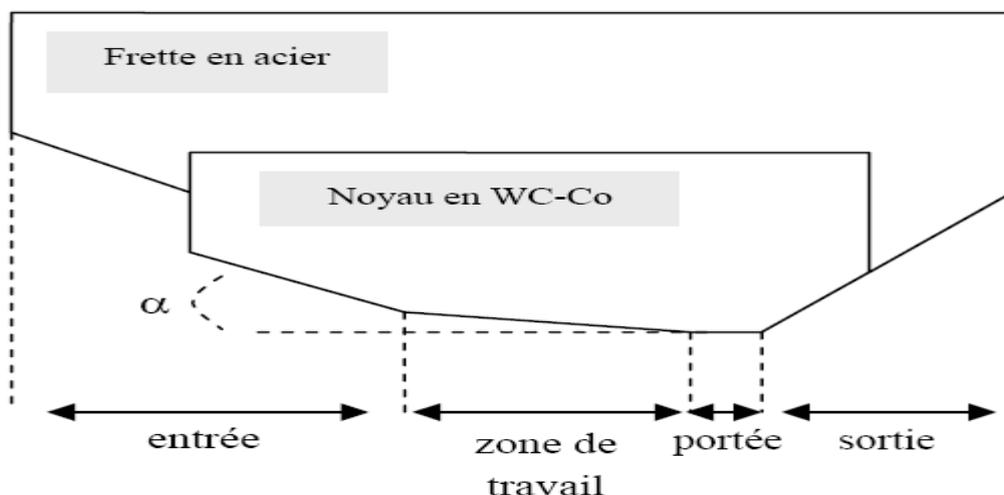


Figure III.2 : Schéma d'une filière de tréfilage.

Au cours du tréfilage, le matériau de filière se dégrade : l'endommagement peut provenir d'une usure par fatigue ou d'une usure abrasive liée à une mauvaise lubrification. La durée de vie d'une filière est conditionnée par de nombreux facteurs : la nuance du métal, la préparation de surface du fil (qui va "accrocher" le lubrifiant), l'état de surface du fil machine (rugosité), nature et forme de la filière (angles de raccordement), le refroidissement, le lubrifiant et la vitesse de tréfilage.

C. 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.

III.3. La machine de tréfilage simple

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction mono passes. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception (figure III.3).

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.

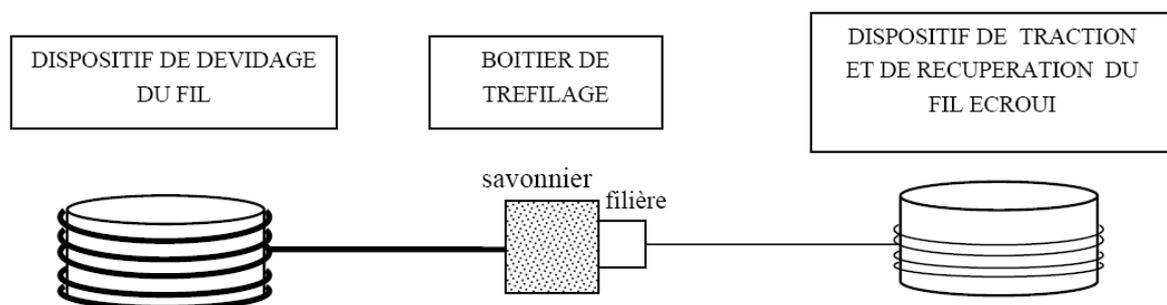


Figure III.3 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe).

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 [22] :

- a) Les machines continues ou à passage direct : Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répons. 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.
- 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.
- 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.

III.5. Les traitements thermiques après tréfilage

En dernière lieu, les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au retréfilage ou aux déformations ultérieures, pour supprimer l'effet de l'érouissage et adoucir le fil (recuit) ou encore pour communiquer au fil des caractéristiques particulières (trempe). Les fours de recuit peuvent être de types statiques (couronnes, bobines) ou au défilé (fours pouvant atteindre 20m de longueur) [22].

III.6. Grandeurs mécaniques et physiques du tréfilage

Nous rappelons les définitions des différentes grandeurs mécaniques utilisées pour décrire le tréfilage (figure II.1).

III.6.1. l'allongement du fil

La conservation du volume, entre l'entrée et la sortie de filière, au cours de la déformation plastique permet d'écrire que :

$$S_e \times L_e = S_s \times L_s.$$

Alors :

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

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

- la réduction du fil r :

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

- La déformation

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

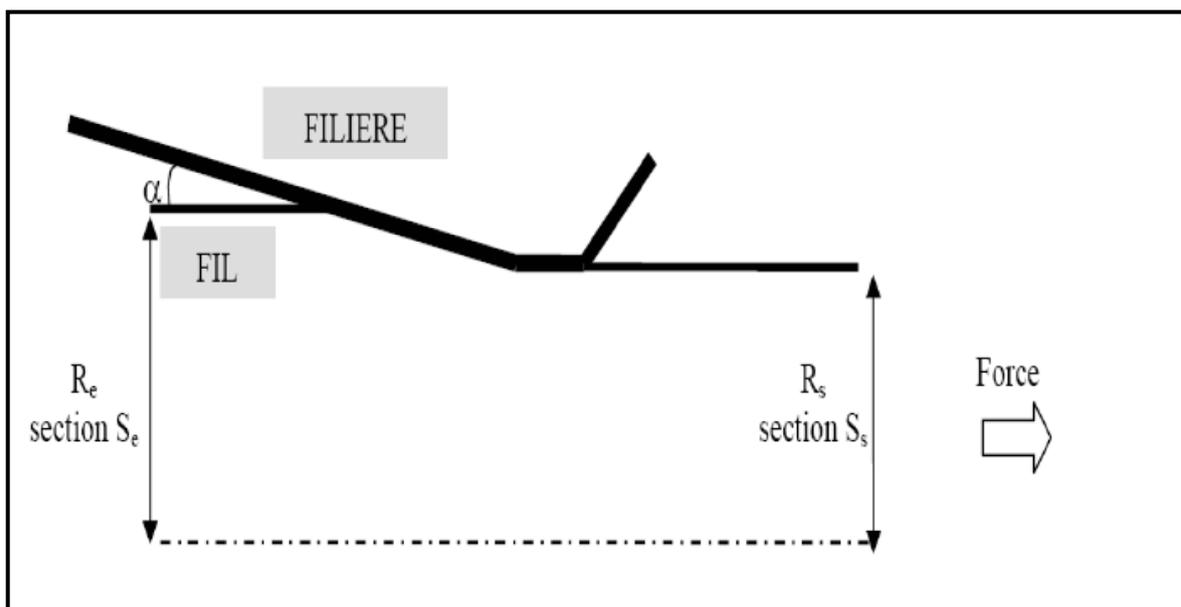


Figure III.4 : Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisés.

III.6.2. la contrainte de tréfilage

Le fil est tiré au travers de la filière par une force de traction. L'écoulement plastique du métal est rendu possible par l'action combinée de la traction axiale et de la compression radiale imposée par la filière. A l'interface fil-filière, s'exerce en plus de la pression latérale imposée par la filière, un cisaillement en fonction des conditions de frottement. La force nécessaire pour tréfiler le fil est donc la somme de la force nécessaire pour déformer plastiquement le fil et de la force nécessaire pour vaincre le frottement. En terme de contrainte de tréfilage, nous pouvons écrire que :

$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi R_s^2} = \sigma_{pl} + \sigma_{fr}$$

La contrainte de tréfilage est donc fortement dépendante :

- de la géométrie de la filière : la valeur de l'angle de filière et la longueur de sa portée vont conditionner la surface de contact entre le fil et augmenter la part du frottement,
- des propriétés mécaniques du fil et plus particulièrement de sa contrainte d'écoulement,
- des conditions de frottement à l'interface fil-filière via l'utilisation d'un lubrifiant.

Différentes méthodes (analytiques et numériques) ont été proposées pour calculer la contrainte de tréfilage [23].

III.6.3. Le frottement

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).

III.6.4. La température

La connaissance de ce paramètre est capitale puisqu'elle va conditionner le déroulement de l'opération. En effet, un échauffement élevé peut dégrader le lubrifiant et compromettre ses performances, accentuer les phénomènes d'usure qui vont conduire à un état de surface du fil non souhaité voire provoquer des changements métallurgiques.

La génération de chaleur a d'abord été mesurée au moyen de méthodes calorimétriques consistant à mesurer en sortie de filière l'échauffement d'un bain d'huile ou d'un tube de cuivre, suite au passage du fil tréfilé. Pour améliorer les mesures, des essais avec thermocouples implantés dans la filière ont été développés et ont permis de connaître la distribution de températures le long du contact fil-filière dans le cas de dispositifs mono passes [27].

III.7. Le traitement de surface ou revêtement

Une surface est faite pour satisfaire des propriétés d'emploi données. C'est la raison pour laquelle on est souvent amené à pratiquer un ou des traitements pour anoblir la surface et lui conférer une fonctionnalité spécifique.

Un revêtement désignant toute couche métallique, organique ou minérale déposée sur une surface par un procédé de recouvrement, tel que la surface du matériau d'apport soit assez homogène et les modifications du matériau de base à l'interface négligeable pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur.

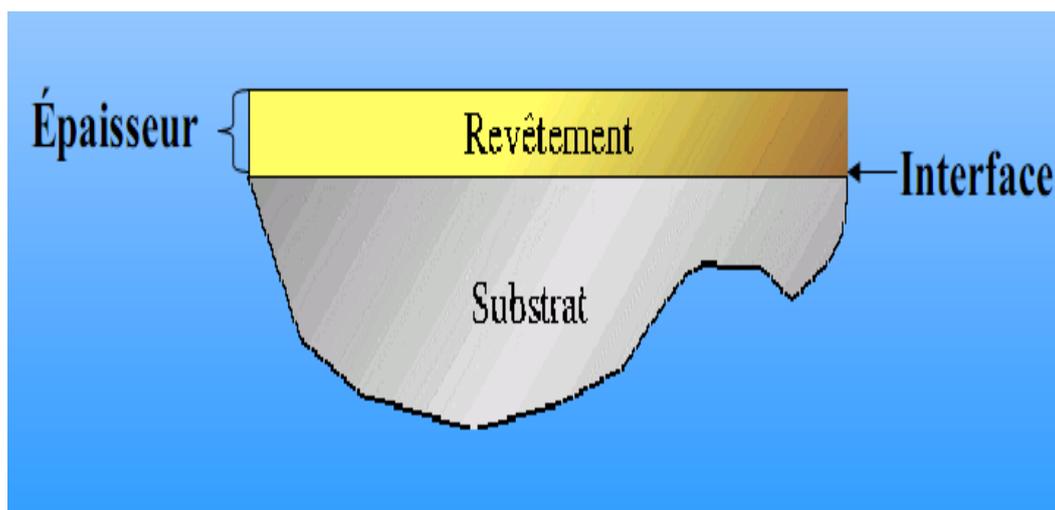


Figure III.5 : schéma d'un substrat revêtu

III.7.1. Modes d'application

Il existe plusieurs modes de revêtement mais nous exposons le procédé par électrolytique qui est utilisé pour revêtement des âmes des fils électrode en EDM.

III.7.1. Procédé électrolytique

Son but est d'apporter une propriété superficielle particulière qui peut être une protection contre la corrosion ou d'une façon générale, des propriétés physiques ou mécaniques différentes de celles du substrat (dureté, frottement, conductivité, adhérence de produits organiques, couches barrière...).

Le métal d'apport initialement sous forme ionique dans un bain, est soumis à une réaction électrochimique de réduction qui le porte à l'état métallique. Cette réaction est provoquée à la surface de la pièce à revêtir par un apport d'électrons assuré par un circuit extérieur.

L'opération se déroule dans une cellule d'électrolyse constituée des éléments suivants :

- ✓ une cuve contenant le bain d'électrolyse,
- ✓ les électrodes immergées dans le bain.
- ✓ La cathode polarisée négativement constituée de la pièce à revêtir, siège de la réaction de réduction conduisant au dépôt. Cette électrode peut également être le siège d'autres réactions de réduction dont l'électrolyse de l'eau avec dégagement d'hydrogène, qui peut être une source de fragilisation de certains substrats.
- ✓ L'anode, siège d'une ou de plusieurs réactions d'oxydation. Elle peut être soluble ou insoluble.

Lorsqu'elle est soluble, elle est constituée du métal à déposer et est soumise à la réaction inverse de celle qui se produit à la cathode. Lorsqu'elle est insoluble, la composition du bain varie de façon continue au cours de l'électrolyse.

- ✓ le circuit électrique constitué de conducteurs alimentant les électrodes reliées à un générateur de courant.

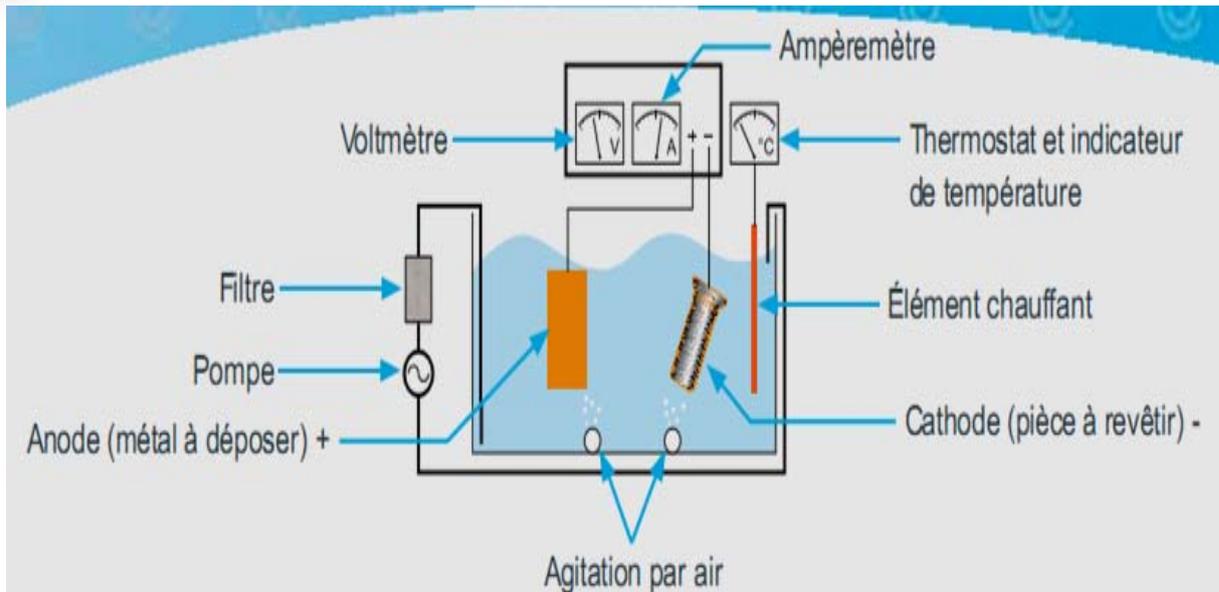


Figure III.6 : Principe de déroulement d'un revêtement électrolytique

La cellule d'électrolyse présentée convient aux pièces de moyennes et grandes dimensions. Les petites pièces sont traitées en vrac dans un appareil appelé "tonneau". Par ailleurs, d'autres dispositifs sont utilisés pour des applications particulières (dépôt sélectifs et dépôts hors cuves). Certaines installations conçues pour des applications spécifiques, s'apparentent davantage à une machine-outil qu'à la cuve d'électrolyse.

CONCLUSION

L'écroissage de la matière, c'est à dire la modification de ses propriétés mécaniques au cours du tréfilage doit, selon le cas, être considéré tantôt comme un but, tantôt comme une simple conséquence du procédé employé pour réduire la section. Dans ce dernier cas, il arrive fréquemment qu'on soit obligé d'atténuer ou d'annuler les effets de la déformation à froid au moyen d'un traitement thermique convenable et il suffit alors de connaître sommairement ces effets [30].

Toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquences de modifier la fonction ou l'aspect de la surface d'un matériau, afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

CHAPITRE IV :

**DISPOSITIFS ET TECHNIQUES
EXPERIMENTALES**

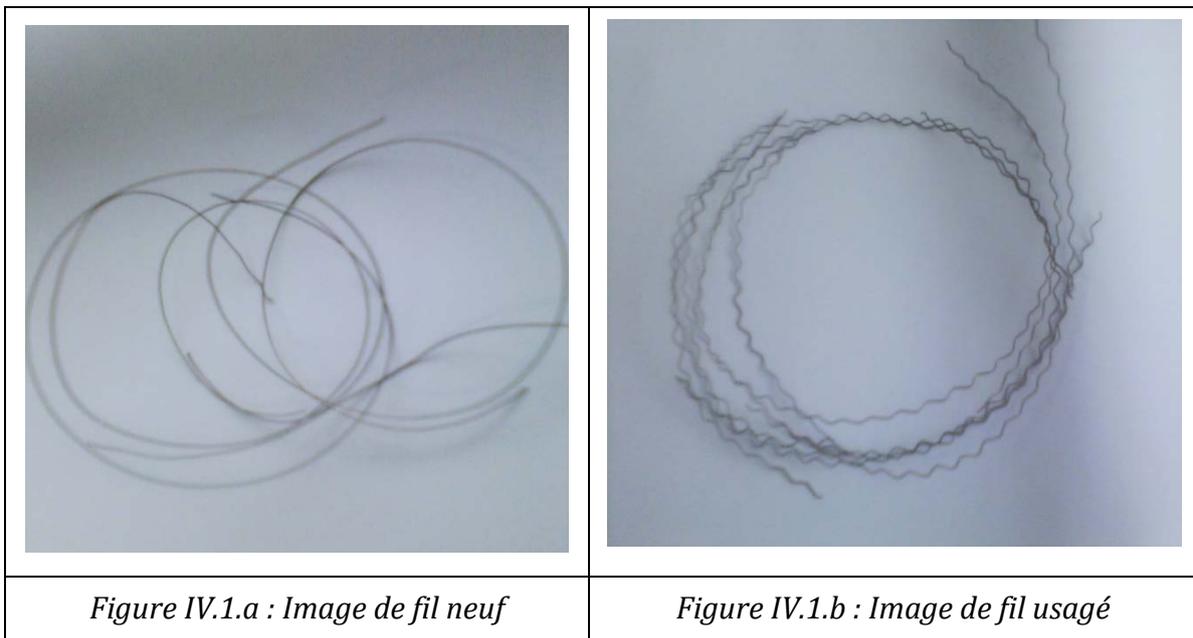
IV.1. Introduction

Lors de la conception d'un nouveau produit ou la caractérisation d'un produit déjà commercialisé, il est bien souvent nécessaire d'en contrôler les caractéristiques mécaniques : sa résistance à la rupture, sa réponse à une sollicitation statique, ses caractéristiques d'élasticité, pour cela, on utilise des machines d'essais mécaniques, employées en laboratoire ou en production, elles permettent, suivant les accessoires utilisés, de réaliser des essais nécessaires, a fin d'évaluer la nature de son comportement.

L'objectif de cette seconde partie est de présenter les matériaux d'étude et les différentes techniques et conditions expérimentales utilisées au cours de cette étude afin de reprendre aux objectifs cités sous thème de notre projet.

IV.2. Matériau étudié

Le matériau étudié est un fil électrode utilisé en électroérosion, fourni par la société ORFEE filiale (BCR), il est à base de cuivre et de zinc présenté sous forme de fil de 0.25 mm de diamètre (Figure IV.1).



IV.3. Caractérisation microstructurale

La Caractérisation microstructurale - ou la métallographie- est une technique qui est basée sur l'observation de la microstructure des échantillons en utilisant un microscope optique et électronique. Avant d'observer les échantillons par le microscope, il faut préparer la surface de ces derniers.

IV .4. Observation microscopique

L'observation microscopique est réalisée, au laboratoire de Métallurgie de l'ENP, à l'aide d'un microscope optique de type OPTIKA M-789 (Figure IV) à différents grossissements, allant de X 50 à X 500, équipé d'une camera numérique qui sert à prendre des photos vues au microscope optique. L'ensemble est connecté à un micro-ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données (Optika.view) avec lequel nous pouvons transformer ces données numériques en images sur écran du micro-ordinateur. Le grossissement utilisé pour nos échantillons est de $\times 500$.

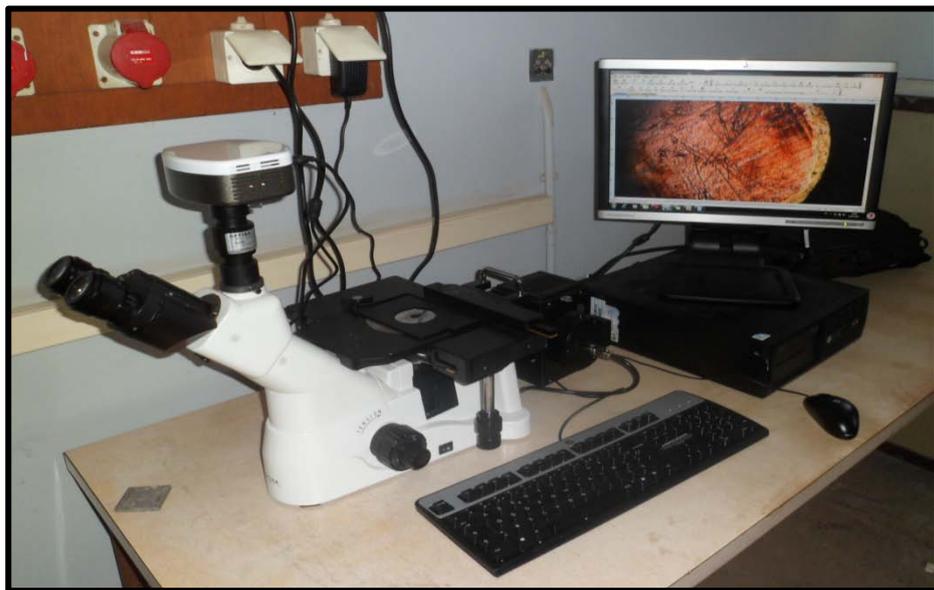


Figure IV. 2: Microscope optique OPTIKA M-789 avec système d'acquisition.

IV.5. Préparation des échantillons

La manipulation des échantillons prélevés a nécessité leur enrobage à froid dans des résines époxydes, durcissante à froid (durcissement à l'air dans des moules plastiques). Cet enrobage permet de faciliter le polissage manuel de petits échantillons (Figure IV.3).



Figure IV.3 : Echantillons coupés et enrobés.

IV.5.1. Le polissage

Le polissage a pour but principal l'obtention d'une surface plane, qui est effectué en deux étapes : la première consiste en un polissage grossier de la surface à l'aide de papiers recouverts de poudre abrasive de granulométrie décroissante (1000 et 1200), Un polissage de finition à l'alumine de 5 microns est effectué en dernier sur un feutre sous une lubrification appropriée. L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie. Les échantillon sont nettoyés à l'eau distillée et séchés.



Figure IV.4 : Polisseuse.

IV.6. La microscopie électronique a balayage

Le microscope Electronique à Balayage (MEB) est un instrument scientifique permettant de réaliser des images de la surface d'objets en 3 dimensions (*Figure IV.5*) avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre (milliardième de mètre). La résolution d'un instrument de grossissement est définie par la taille minimale détectable par l'œil humain sur l'image produite par cet instrument. Ceci signifie qu'une image produite par un MEB permet de différencier distinctement deux points séparés de moins d'un nanomètre.

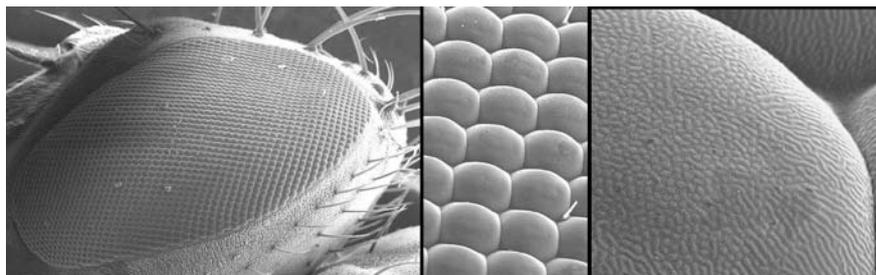


Figure IV.5 : Un œil de mouche grossi 100, 1000 et 10 000 fois à l'aide d'un MEB.

IV.6.1. Présentation d'un microscope électronique à balayage



Figure IV.6 : Microscope électronique à balayage (MEB).

Le microscope électronique à balayage comporte (*Figure IV.3*) :

- Un canon à électron qui envoie un faisceau d'électrons (source d'électrons primaire).
- Une **lentille magnétique** qui focalise les électrons comme peut le faire une lentille optique avec la lumière de manière à obtenir un faisceau très fin et focalisé ;
- Des **bobines de balayage** permettant de balayer la surface de l'échantillon à observer avec le faisceau d'électrons. Ces bobines sont positionnées perpendiculairement de manière à faire parcourir des lignes au faisceau de la même manière que dans une télévision ;
- Une **pompe à vide** permettant de faire le vide dans l'enceinte où se trouve l'échantillon. En effet, pour obtenir une mesure précise, il est important de faire le vide dans l'enceinte (environ 10^{-3} Pascal) ;
- Un **détecteur** permettant de détecter les électrons secondaires. Un détecteur **d'Everhart Thornley** est généralement utilisé. Les électrons secondaires sont « captés » grâce à un champ électrique positif d'environ 500 Volts de manière à diriger les électrons vers un scintillateur convertissant ces derniers en photons. Les photons ainsi produits sont envoyés vers un photomultiplicateur via une fibre optique pour retransformer les photons en un nombre important d'électrons qui sera mesurable par un dispositif électronique classique. Ce type de détecteur est utilisé pour faire de l'imagerie en électron secondaire, mais il existe d'autres techniques d'imagerie.

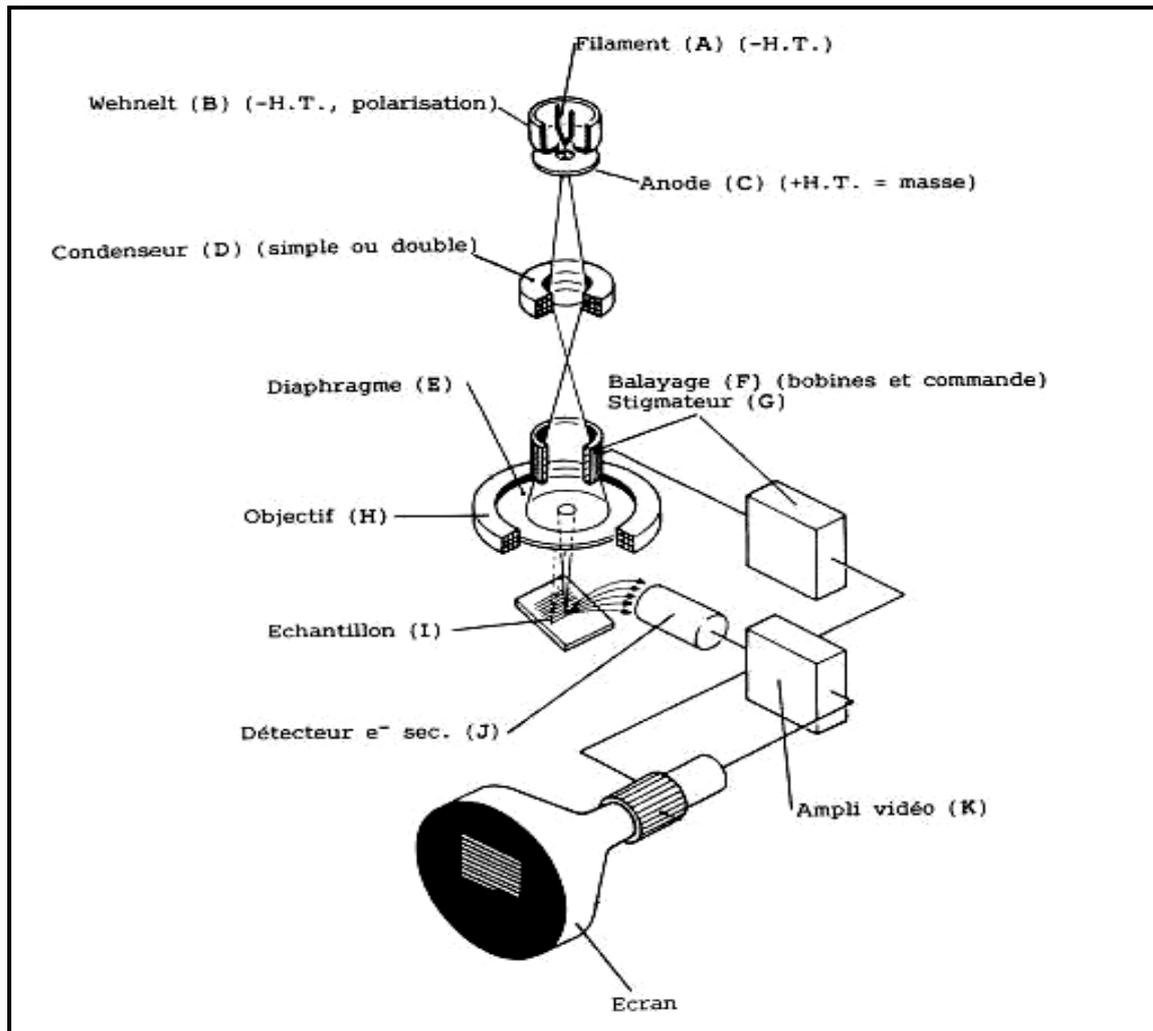


Figure IV.7 : Schémas du Microscope électronique à balayage.[29]

IV.6.2. Principe de la microscopie électronique à balayage

Le principe général est en somme assez simple: l'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique et on vient détecter les électrons secondaires de très faible énergie qui sont produits suite au bombardement de l'échantillon. Ces électrons secondaires sont amplifiés, détectés puis interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. Le MEB réalise donc une topographie de l'échantillon à analyser, c'est pourquoi le MEB fournit des images en noir et blanc où chaque nuance de gris est le résultat de l'intensité du courant détecté.

IV .7. Caractérisations mécaniques

IV.7.1. Essai de la micro-dureté

L'essai de la micro-dureté est un essai mécanique très utile et très pratique car il est rapide, relativement simple, peu coûteux, ponctuel et pratiquement non destructif. Les essais de la micro-dureté réalisés au niveau du laboratoire de Métallurgie de l'ENP, sur les échantillons après enrobage, sont selon la méthode de Vickers, Le microduromètre utilisé est de type 'SHUMATZU HMV-M3' montré dans la (figure IV.8).



Figure IV.8 : Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.

La machine d'essai est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et un microscope métallographique. Par la mesure des deux diagonales de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge. Une fois la pointe retirée, il suffit de mesurer la géométrie de l'empreinte pour accéder à la dureté. Pour mesurer l'empreinte de très petite surface laissée par l'indenteur, nous utilisons un microscope.

Pour nos essais, nous avons utilisé une charge F de 100 gf pendant un temps t égal à 30 secondes, sans choc ni vibration.

La micro-dureté Vickers consiste à enfoncer un pénétrateur en diamant de forme pyramidale droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° comme montré par la figure.IV.9.

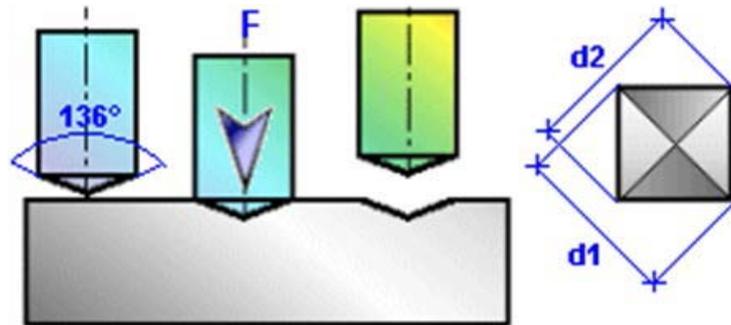


Figure IV.9 : Représentation schématique de l'essai de Vickers.

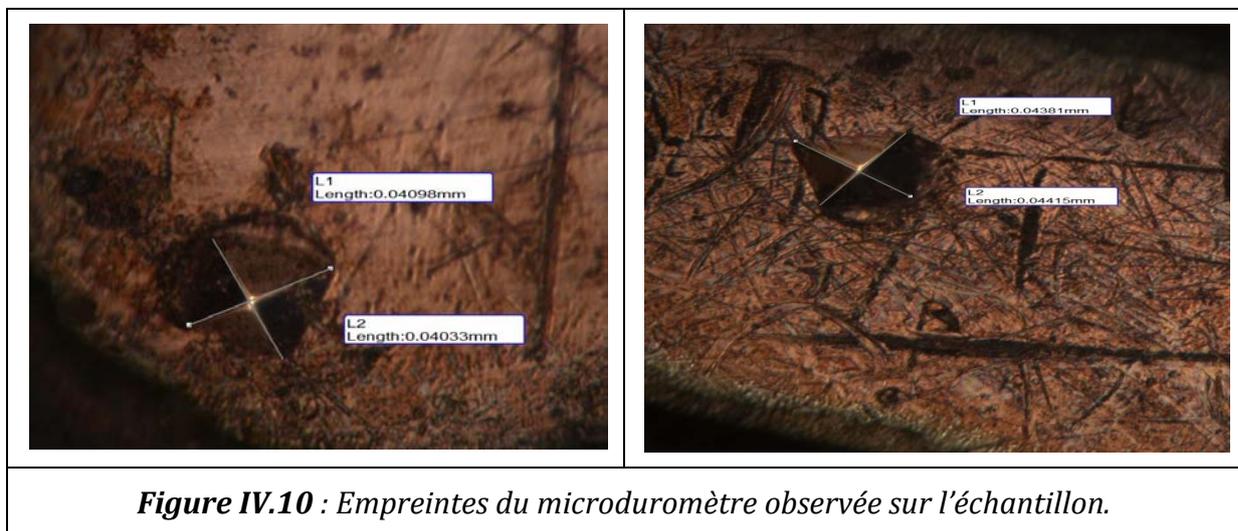


Figure IV.10 : Empreintes du microduromètre observée sur l'échantillon.

Nous calculons la dureté HV à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,854 (F/d^2)$$

Avec :

d (μm) : la moyenne des diagonales de l'empreinte carrée;

F (N) : la force appliquée.

IV.7.2. Essai de traction

L'essai de traction est le procédé expérimental standard normalisé de l'essai de matériaux largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique des métaux et alliages, pour la détermination des principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement à la rupture et autres valeurs caractéristiques des matériaux. Il permet de donner des valeurs exactes qui sont utilisables comme base de calcul. Il appartient aux méthodes d'essais quasi-statiques, destructrices.

Des essais de traction sont réalisés tant en contrôle qualité qu'en recherche et développement, dans la plupart des secteurs d'activité.

IV. 7.2.1.Principe d'essai de traction

Dans une machine d'essai de traction, les éprouvettes sont solidement maintenues aux extrémités entre les mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette de telle manière que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités.

Les éprouvettes sont normalisées avec dimensions définies.ces éprouvettes sont étirées jusqu'à la rupture; l'allongement et la course augmente uniformément, sans à coup et à une vitesse faible. La force appliquée sur l'éprouvette est mesurée pendant l'essai; un extensomètre permet de déterminer la déformation, un dispositif incorporé à la machine d'essai permet de tracer le diagramme de l'essai qui représente la charge en fonction de l'allongement relatif.

Dans nos expériences, nous avons utilisé une machine de type **Zwick/Roell (Z2.5)** au laboratoire de l'entreprise C.A.T.E.L (Oued Semmar), la machine est connectée à un micro-ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données.



Figure IV.10 : Machine de traction type Zwick/Roell Z2.5.

Des appareils adaptés à la machine, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et l'allongement correspondant à l'éprouvette.

Généralement une courbe de traction conventionnelle a l'aspect montré dans la *figure IV.11*:

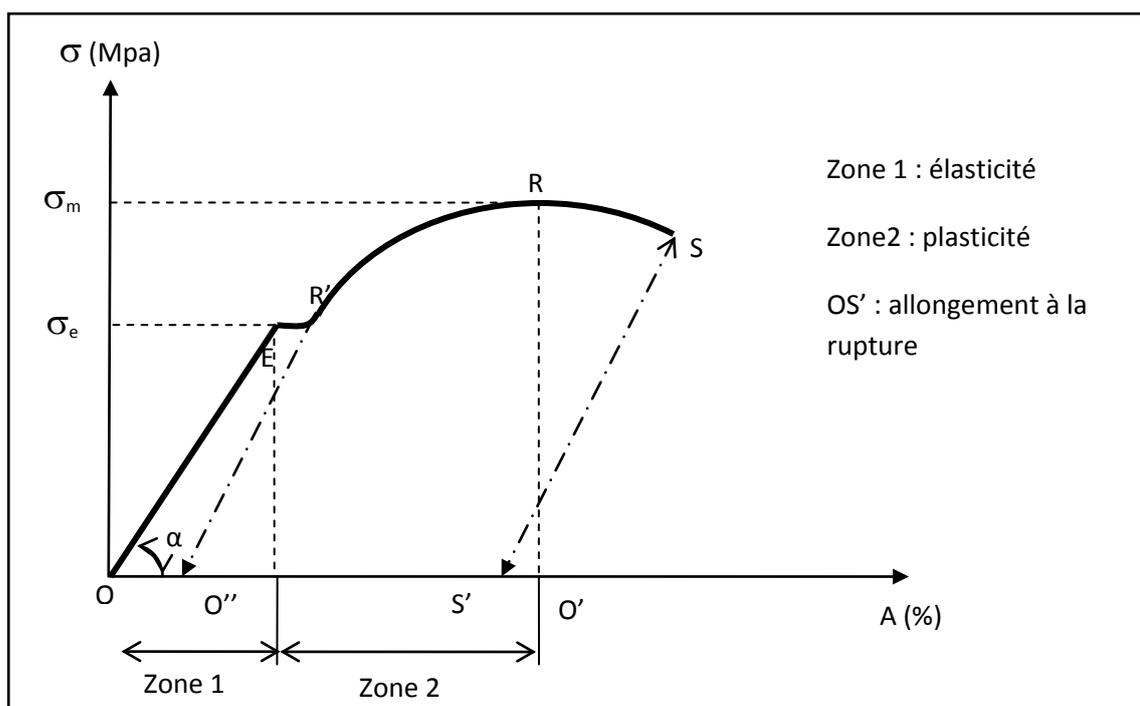


Figure IV.11 : Courbe conventionnelle de traction

Les différents domaines de la courbe de traction sont :

- OE : allongement élastique, cette partie est sensiblement rectiligne;
- OR : allongement permanent, F croît jusqu'à F_m ;
- RS : zone de striction, F décroît jusqu'au point de rupture de l'éprouvette, le point S.

IV. 7.2.2. Les principales valeurs caractéristiques de traction

Les principales valeurs caractéristiques de traction que nous pouvons en déduire sont :

➤ Limite d'élasticité R_e ou σ_e

C'est la charge maximale unitaire que peut supporter le métal sans subir de déformation permanente. C'est la limite de linéarité de la courbe de traction

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{Mpa})$$

➤ Résistance à la traction ou charge à la rupture R_{max} , R_r ou σ_r

C'est le quotient de charge maximale F_m que le métal peut supporter, par la section initiale S_0 de l'éprouvette.

$$\sigma_r = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{Mpa})$$

➤ Allongement relatif

C'est l'allongement relatif pourcent que peut prendre le métal après rupture. Si L_u désigne la longueur finale entre repères

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} * 100 = \frac{\Delta L}{L} * 100 \quad (\%)$$

CHAPITRE V :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Après la réalisation des essais cités au chapitre précédent, nous arrivons par le présent à porté l'accent sur l'analyse et l'exploitation des résultats obtenus, présentés en deux partie :

Dans la première partie nous exposons les résultats micrographiques du fil électrode avant et après son usage. Observé à l'échelle du microscope optique et du Microscope Electronique à Balayage (MEB). L'objectif consiste à comparer les microstructures issues des deux états.

La seconde partie de ce chapitre présente les résultats des essais de traction et de Micro dureté, afin de s'informé sur les caractéristiques mécaniques nominale du fil neuf et en faire par la suite le constat de l'influence physique de l'usinage par électroérosion sur ce dernier.

V.2. Résultats micrographiques

V.2.1. Observation par microscopie optique

La micrographie par microscopie optique (grossissement X 500) des fils neuf et usagé nous a montré l'image de la surface frontale et longitudinale des fils neuf et usagé.

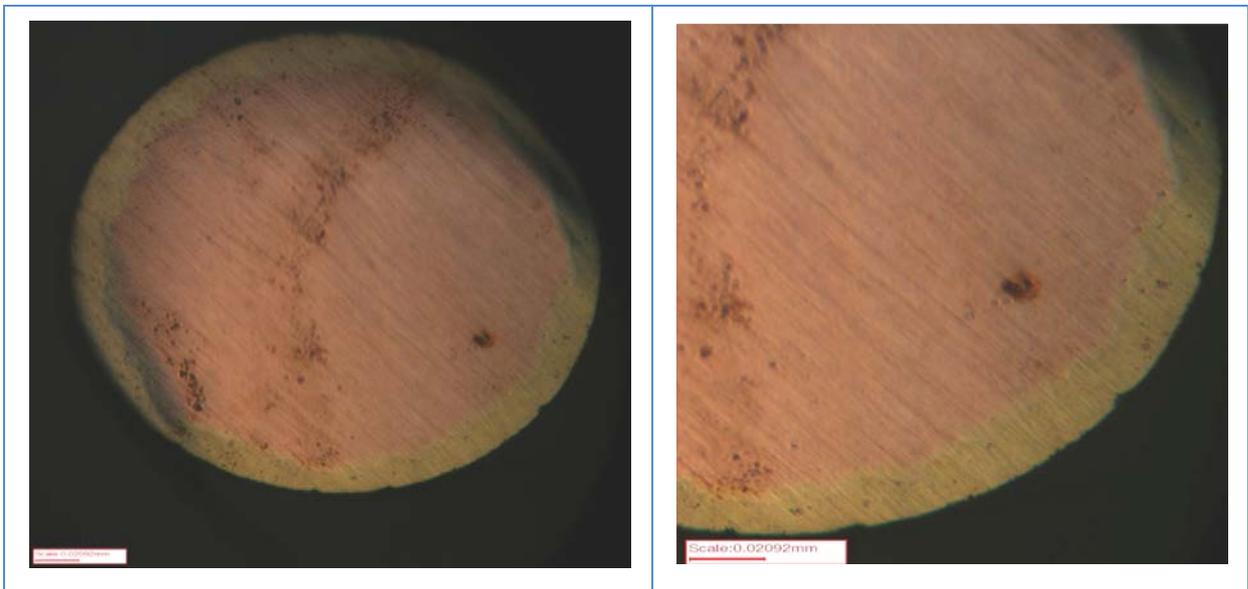


Figure V.1 :coupe frontale de fil composite (ame et une couche de revetu) neuf.

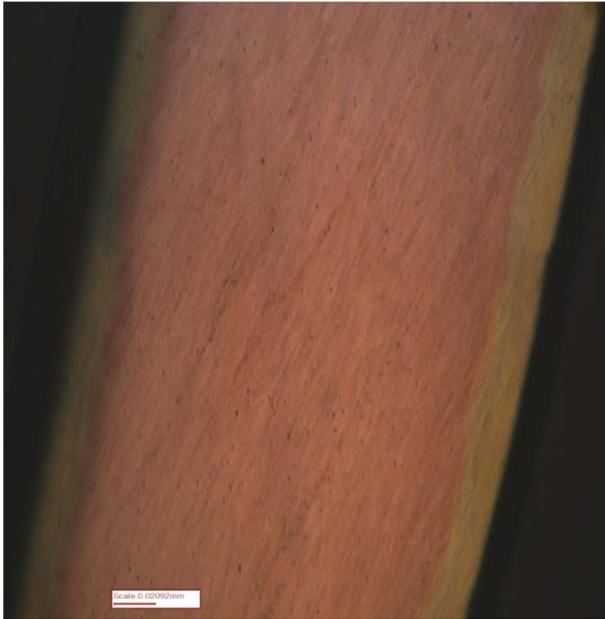


Figure V.2 : coupe longitudinale de fil neuf
(avant l'utilisation)

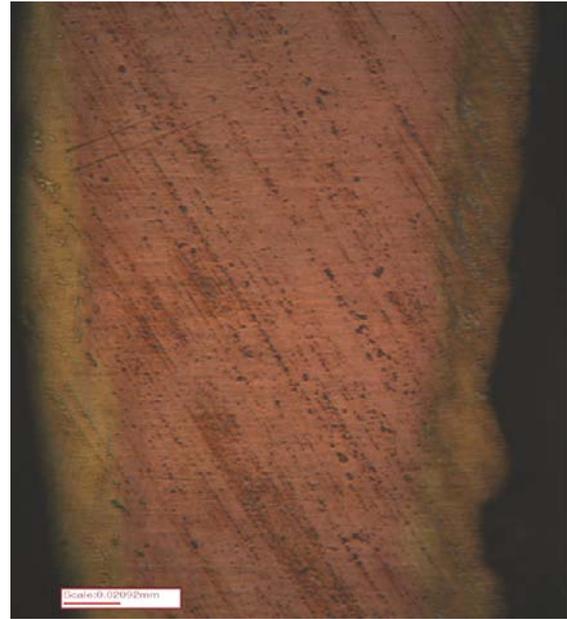


Figure V.3 : coupe longitudinale de fil
usagé (après l'érosion)

Les métallographies prises au microscope optique révèlent à partir des images illustrées (Figures V.1 et V.2), que le fil en question est composé d'âme et d'un revêtu d'une épaisseur non négligeable, ça nous mène à nous focalisé exactement sur le fil en cuivre avec un revêtement à base de zinc.

La couche de revêtu est régulière et uniforme sur le contour de l'âme. Ça ce traduit par composition du bain galvanique et les paramètres électrochimiques et électriques de l'étape d'électrodéposition qui sont choisis de manière à assurer une composition uniforme à la couche d'alliage électrolytique [15].

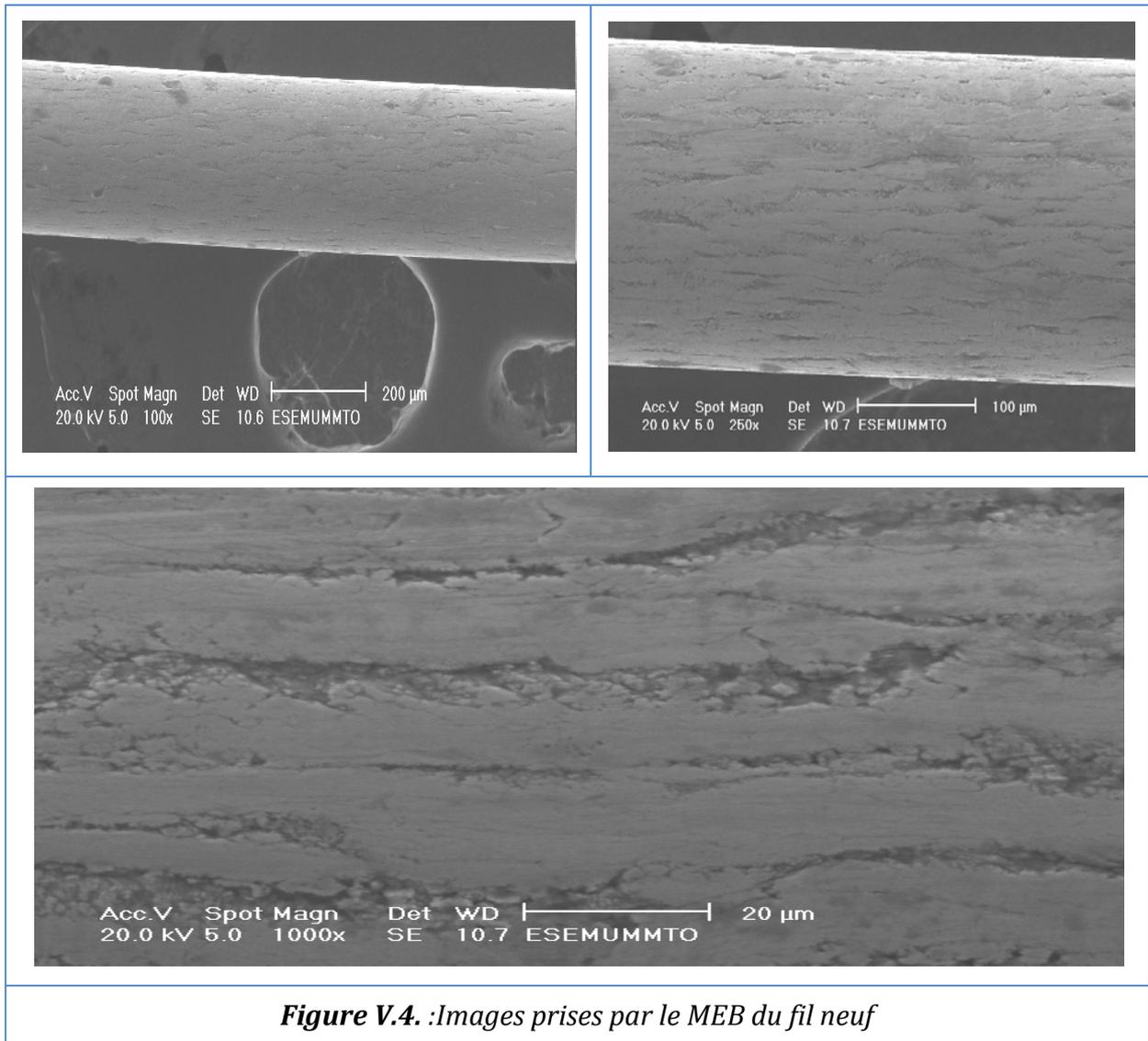
Et à propos des changements survenus sur les échantillons de fil usagé, où nous avons remarqué des irrégularités juste sur la surface de revêtu (voir la figure V.3), là il s'agit des cratères causés par l'étincelage érosif.

Le cratère ou la vaporisation constatée s'est focalisé dans le revêtu. Et l'âme reste intacte non atteinte par l'érosion, donc une épaisseur de revêtu mesuré entre 10 à 20 micron n'a pas été choisie au hasard, peut en conclure que le choix de revêtu en terme de matériau et d'épaisseur a un rapport directe avec l'intensité d'étincelage et taux l'usure de fil électrode.

V.2.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à balayage

V. 2.2.1. Observation MEB du fil neuf

L'observation de la structure du fil au microscope électronique à balayage aux grossissements $\times 100$, $\times 250$ et $\times 1000$ (*Figure IV. 1. a et b*) nous a permis d'examiner l'état de surface du fil neuf.



Les images prises par le MEB après observation surfacique de fil neuf nous renseignent d'avantage sur le procédé de fabrication de fil électrode, vue que la fragmentation régulière surfacique causé par le fait que relativement de cuivre par de zinc est dur et cassant, de sorte que l'enrobage s'est morceler lors d'une opération de tréfilage qui met le fil à dimension pendant sa fabrication. Par conséquent le tréfilage de finition est réalisé après le revêtement de l'âme de fil.

Le document [17] a mis en évidence le fait que le morcellement du revêtement n'est pas défavorable, et permet de faire un fil électrode ayant de bonnes vitesses d'électroérosion. Le document enseigne pour cela un procédé de fabrication du fil dans lequel, après réalisation d'un revêtement de zinc et diffusion du zinc du revêtement et du cuivre de l'âme par échauffement pendant 1 à 4 heures, on met le fil à dimension par tréfilage pour réduire son diamètre. Lors du tréfilage, le revêtement est morcelé en blocs qui, du fait de l'allongement du fil par tréfilage, se trouvent redistribués à la surface du fil. La redistribution est avantageuse car elle permet de répartir en une seule couche de surface de fil les blocs résultant du morcellement du revêtement, et d'assurer ainsi un taux de couverture de l'âme supérieur à celui revêtu après tréfilage de finition.

V. 2.2.2. Observation MEB de fils usagé

Afin de révéler l'état de surface des fils usés, nous avons réalisé des l'image MEB présentées dans les *figures V.5, V.6, V.7 et V.8*.

La *figure V.5* présente un échantillon de fil usagé observé au MEB.

Cependant, Après usinage, la matière présente une couche thermiquement affectée : modifications structurales et de microfissures.

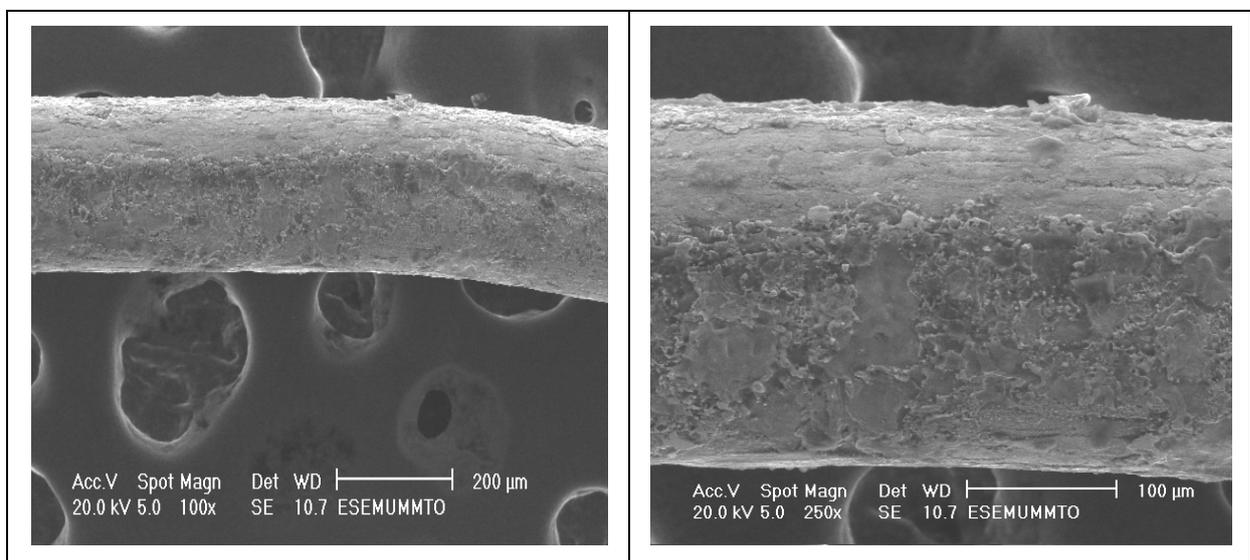
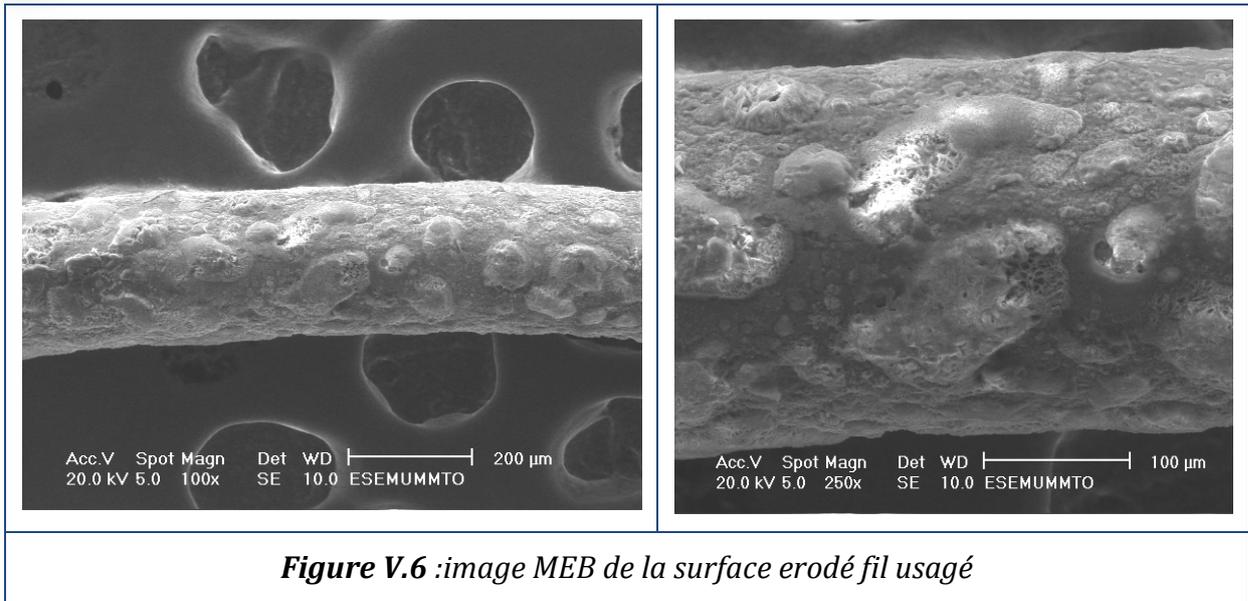
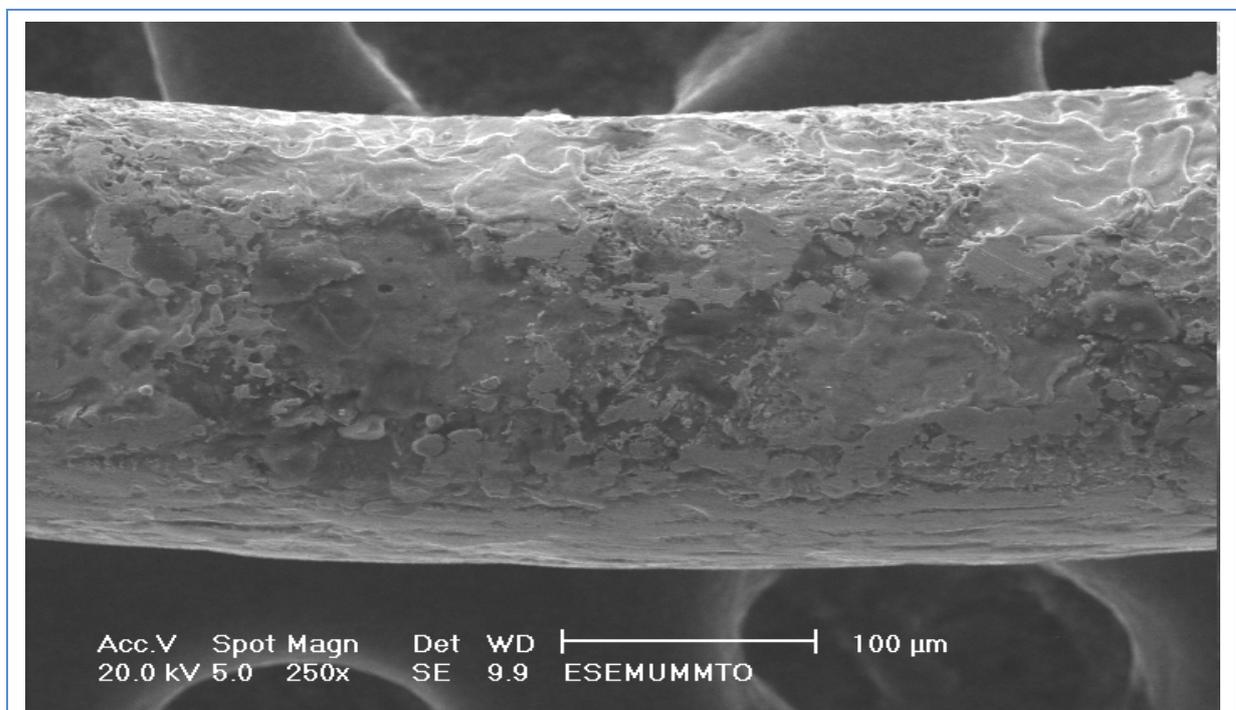


Figure V.5 : image MEB de la surface érodé fil usagé



Les cratères observés sur la *figure V.5*, sont de forme et de dimension différentes à ceux observés sur la *figure V.6*.

Les opérations d'ébauches lors d'un usinage se font avec des énergies d'étincelage très importantes. On comprend que plus l'énergie d'étincelage est grande, plus les cratères d'érosion sont de grandes tailles,



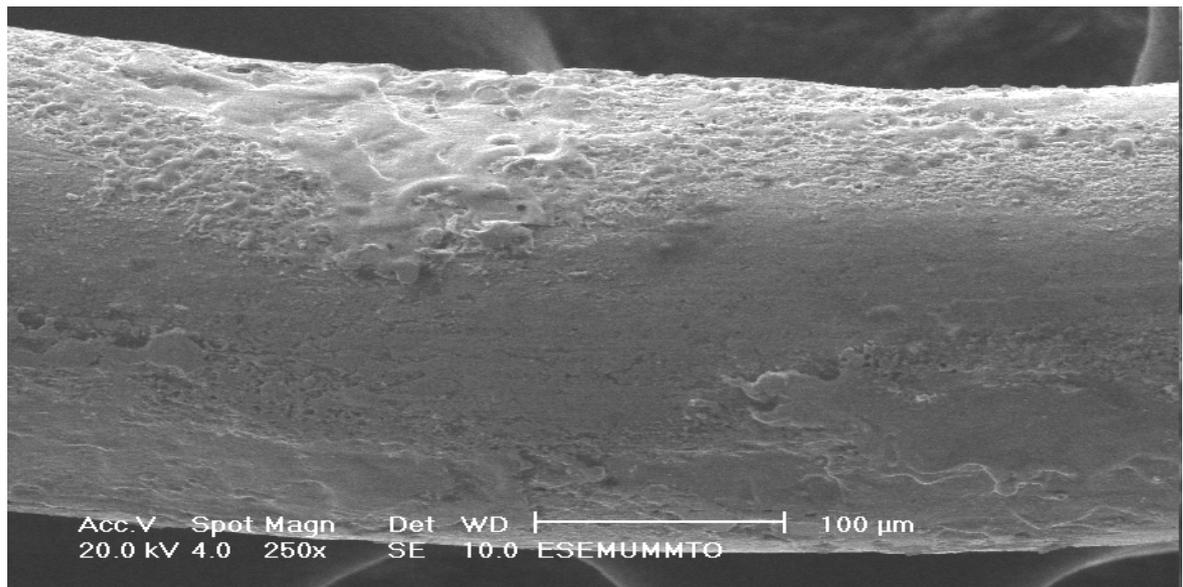


Figure V.8 : Observation au MEB de la surface érodé et non érodé fil usagé

Les figures V.7 et V.8 nous montre clairement que le fil ne s'érode pas totalement, mais juste sur sa surface qui est en face de la pièce a usiné.

V.2.2.3. Observation MEB de Faciès de rupture de traction

La figure V.9 représente le faciès de rupture d'une éprouvette de fil neuf rompue après l'essai de traction. Le centre du faciès est plat et des lèvres de cisaillement sont observées sur le pourtour. Il semble donc que l'endommagement se développe d'abord à cœur, et que la rupture finale conduise à la formation de ces lèvres.

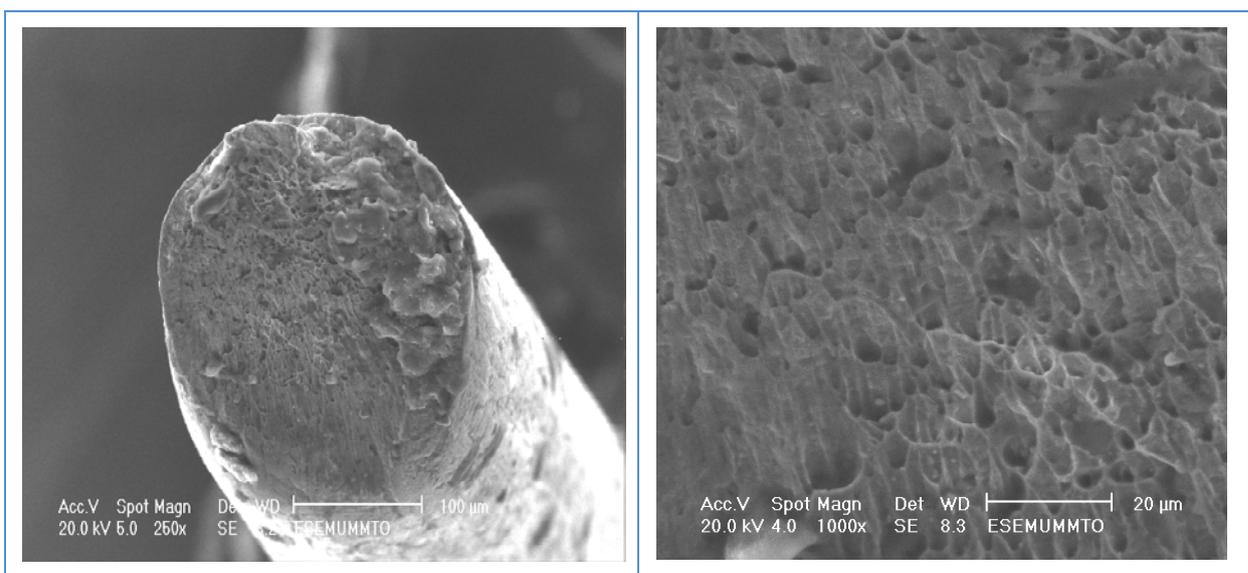


Figure V.9: Faciès de rupture en traction

V.3. Résultats des essais mécaniques

V.3.1. Résultats des essais de microdureté

La dureté quantifie la résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge F.

Les résultats de la microdureté Vickers ainsi que la moyenne, pour les échantillons de fil neuf enrobé verticalement sont donnés dans les *Tableaux V.1*.

Tableau V.1 : Microdureté Vickers associée à l'âme du fil neuf vertical.

Type d'échantillon	Numéro d'échantillon	positionnement	Charge	durée	HV
Ame du fil neuf (cuivre)	N1-V	vertical	100 g	30 s	116,5
	N2-V	vertical	100 g	30 s	112,5
	N3-V	vertical	100 g	30 s	115,4
	N4-V	vertical	100 g	30 s	114,5
	Moyenne				

Les résultats de la microdureté Vickers ainsi que la moyenne, pour les échantillons de fil enrobé horizontalement sont donnés dans les *Tableaux V.2*.

Tableau V.2 : Microdureté associée a l'âme de fil neuf horizontal.

Type d'échantillon	Numéro d'échantillon	Positionnement d'échantillon	Charge	Durée	HV
Ame du fil neuf (cuivre)	N1-H	Horizontal	100 g	30 s	113,2
	N2-H	Horizontal	100 g	30 s	110,7
	N3-H	Horizontal	100 g	30 s	112,6
	N4-H	Horizontal	100 g	30 s	111,5
	Moyenne				

Les résultats de la microdureté Vickers ainsi que la moyenne, pour les échantillons de fil usagé enrobé horizontalement sont donnés dans les Tableaux V.3.

Tableau V.3 : Microdureté Vickers associée a l'âme de fil usagé horizontal

Type de fil	Numéro d'échantillon	Positionnement d'échantillon	Charge	Durée	HV
Ame de fil usagé (cuivre)	U1-V	Horizontal	100 g	30 s	107.20
	U2-V	Horizontal	100 g	30 s	100.30
	U3-V	Horizontal	100 g	30 s	95.80
	U4-V	Horizontal	100 g	30 s	97.00
	Moyenne				100,07

Les valeurs de HV tous le long du fil neuf sont proche de même que celle du franc vertical et horizontal ce qui prouve que l'âme du fil est homogène et isotrope.

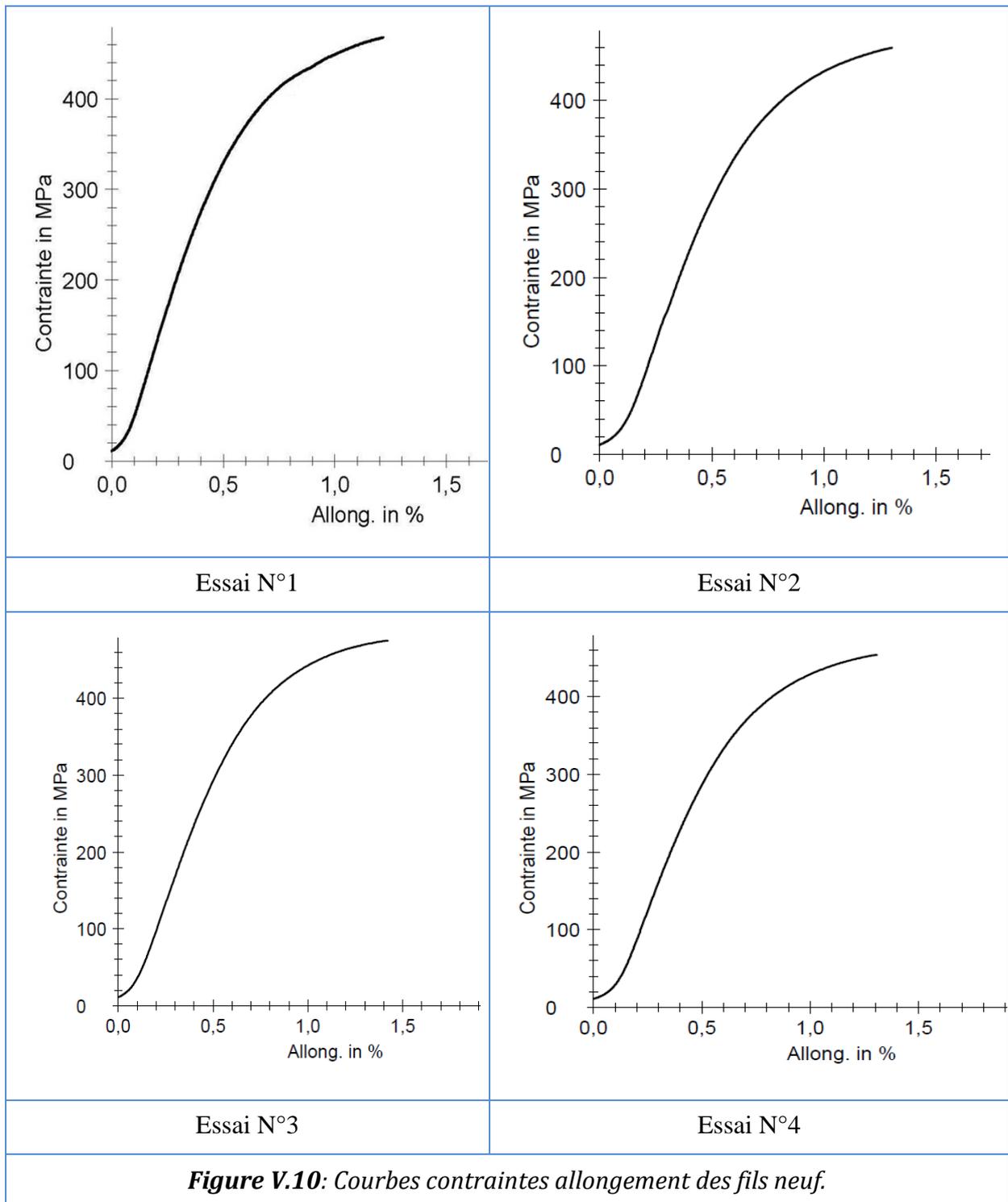
Avant l'usage du fil sa dureté moyenne est de 112 HV, après usage elle est diminuée jusqu'à 100 HV, donc le procédé de l'électroérosion a une influence sur l'âme du fil malgré que les observations métallographiques nous ont révélé qu'il n'a pas été ôté par les étincelles. L'adoucissement a été provoqué essentiellement pour des raisons thermiques.

En situation d'usinage, le fil est chauffé par deux sources : l'effet Joule produit par le transport du courant vers la zone d'usinage, et par les arcs électriques qui s'y produisent. Le fil est refroidi par contact avec l'eau.

V.3.2. Résultats d'essais de traction

Pour des raisons de fiabilité des expériences, nous avons effectué plusieurs essais de traction par type. Ensuite, les moyennes de toutes les caractéristiques seront extraites des résultats de base.

Les courbes contraintes – allongement associées au fil électrode neuf sont données par la *figure V.10* ci-dessous.



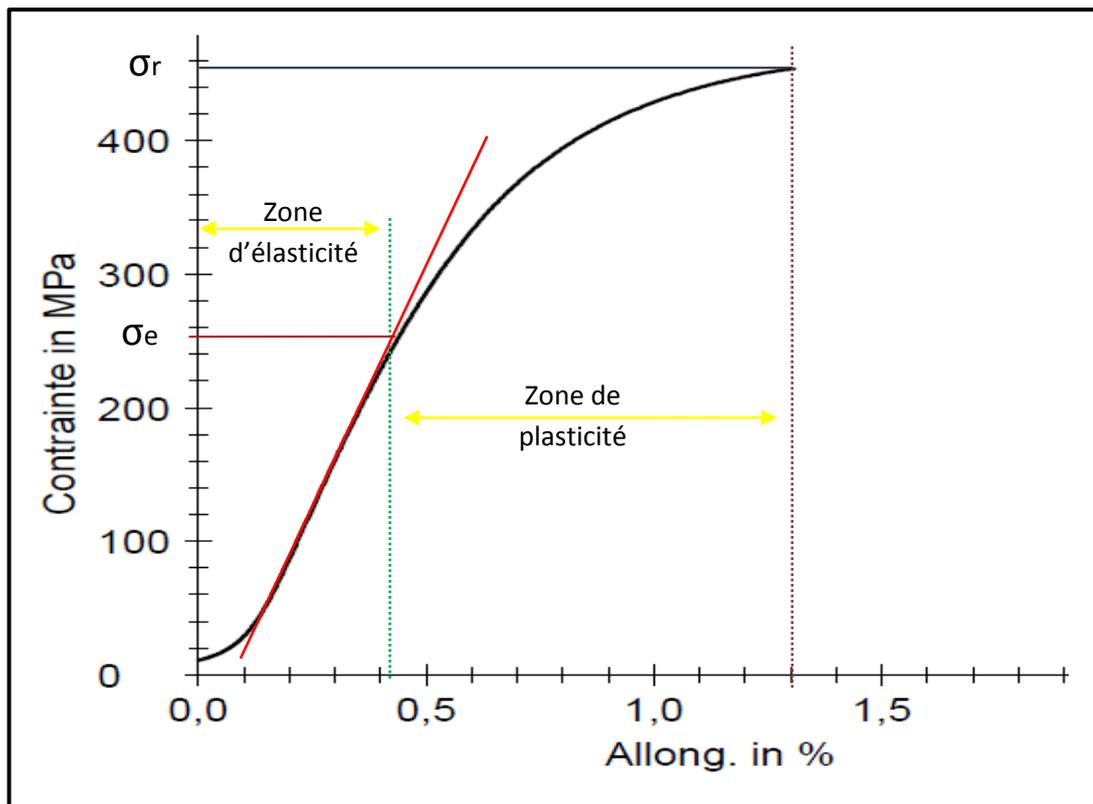


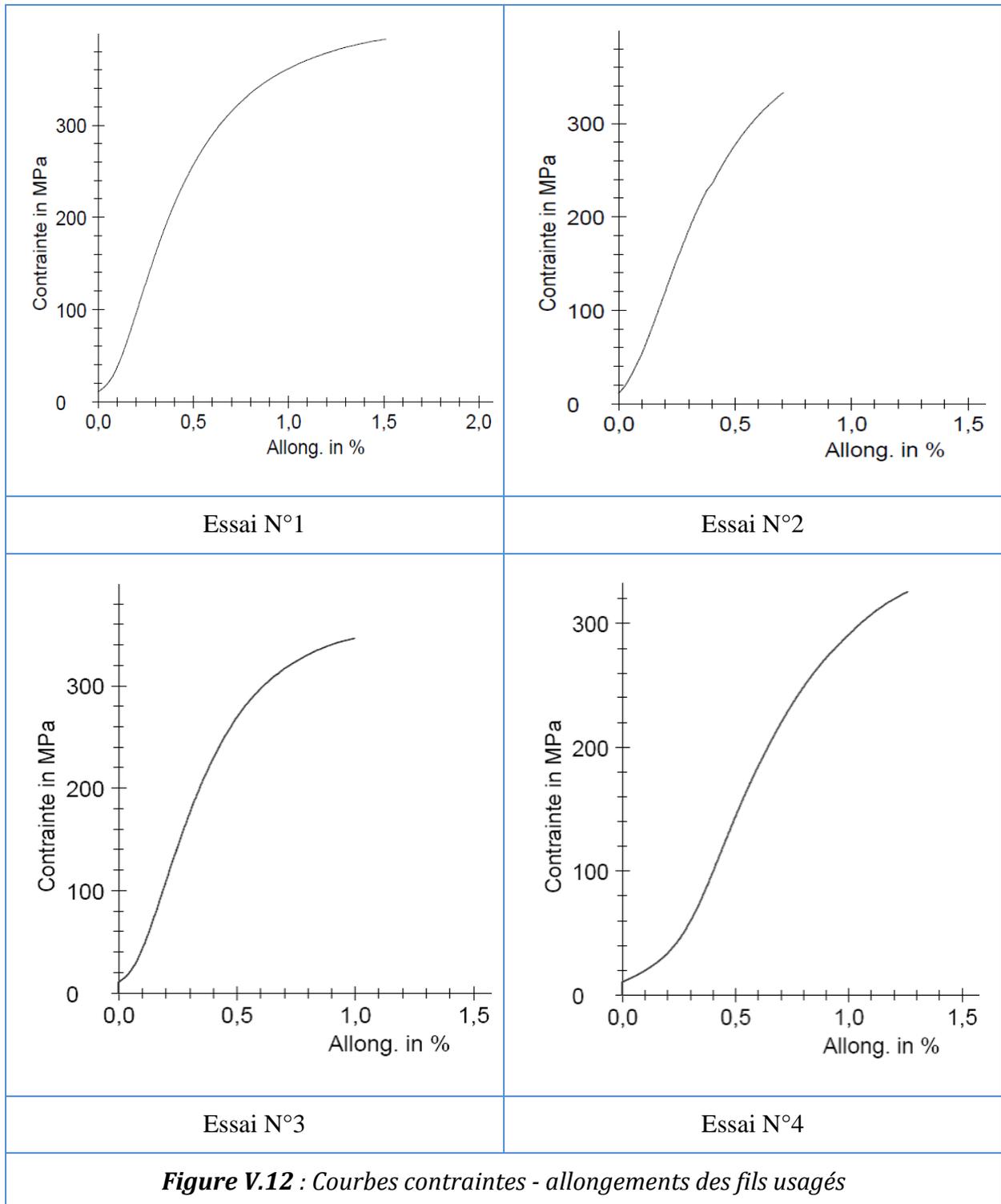
Figure V.11 : courbe de traction du fil neuf.

Les principales données extraites des courbes de traction sont répertoriées dans le tableau V.4.

Tableau V.4: Récapitulatif des résultats des essais de traction sur fils neufs.

Numéro d'éprouvette	Diamètre d_0 [mm]	L_0 [mm]	Limite élastique [Mpa]	Along-Rupt. A %	Cont-Rupt [Mpa]	Module de Young E [Mpa]
N-1	0,25	200,00	278	1,22	467,69	73529,4118
N-2	0,25	200,00	266	1,30	459,69	71428,5714
N-3	0,25	200,00	275	1,42	475,18	75714,2875
N-4	0,25	200,00	254	1,31	454,06	72857,1428
Moyenne	0,25	200,00	268,25	1,3125	464,155	73382,3534

Les courbes contraintes – allongement associées au fil électrode usagé sont données par la *Figure V.12* ci-dessous.



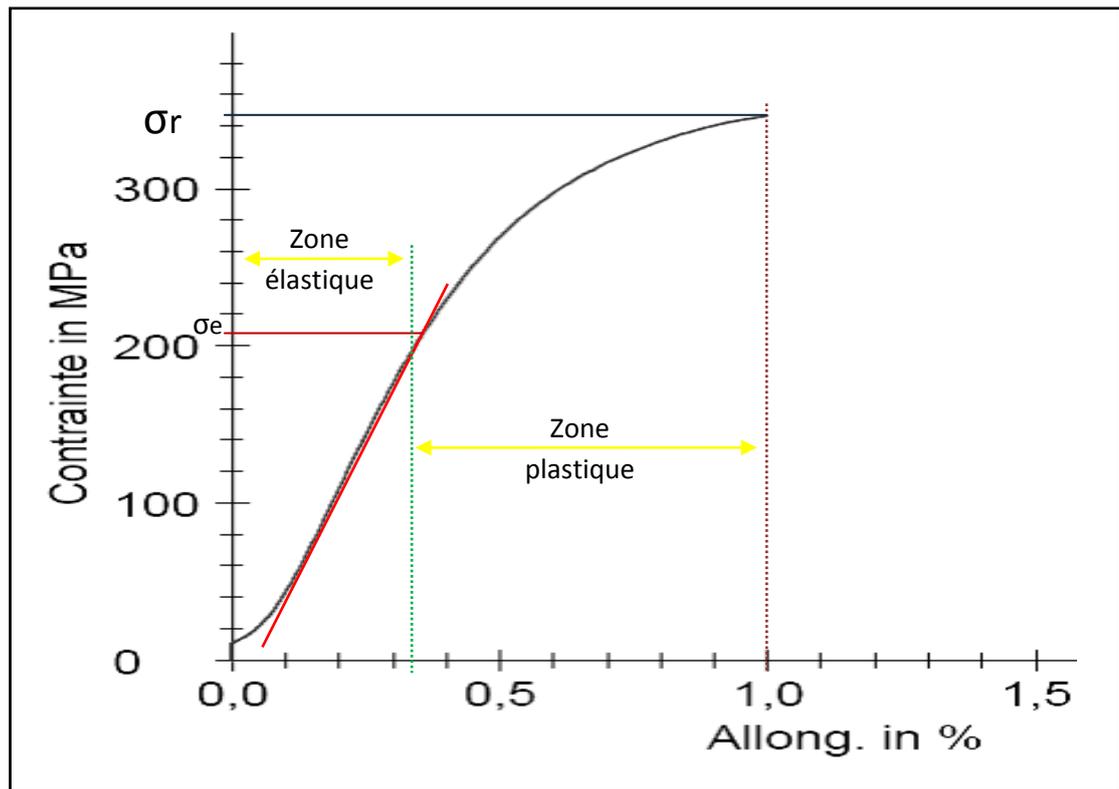


Figure V.13 : Courbe de traction du fil usagé

Les principales données extraites de l'analyse des courbes de traction de fils usagés figurent dans le tableau 3.

Tableau V.5: Récapitulatif des résultats des essais de traction sur fils usagés

Numéro d'éprouvette	Diamètre d ₀ [mm]	L ₀ [mm]	Limite élastique [Mpa]	Along-Rupt. A %	Cont-Rupt [Mpa]	Module de Young E [Mpa]
U-1	0,25	200,00	226	1,51	393,15	70333,3333
U-2	0,25	200,00	206	0,75	332,96	68387,0967
U-3	0,25	200,00	209	1,00	346,19	66363,6363
U-4	0,25	200,00	199	1,26	327,11	60113,9601
moyenne	0,25	200,00	210	1,13	349,85	66299,5066

L'examen des courbes de traction du fil neuf et usagé permet de dégager plusieurs commentaires :

- les deux microstructures présentent deux zones, élastique et plastique ;
- la ductilité du fil neuf est supérieure à celle du fil usagé ;
- la contrainte à la traction du fil neuf est supérieure à celle du fil usagé ;
- L'allongement du fil neuf est supérieure par rapport au fil usagé.
- Le module de Young mesuré du fil neuf est de l'ordre de 73 GPa

Ces résultats ainsi que les données du *tableau I. 3* nous confirment que le fil électrode utilisé par la machine Robofil 290 est un fil de cuivre revêtu d'un alliage de zinc.

L'évolution de la contrainte à la rupture du fil avant et après usage, est interpolée par une diminution de 460 MPa jusqu'à 350 MPa. Ces résultats indiquent que les propriétés de traction sont affectées par le procédé d'usinage par électroérosion en raison de la formation des cratères tout le long du fil érodé, ces derniers sont considérés comme des défauts ou des fissures qui provoquerons bien évidemment de la rupture du fil à une charge moins que celle atteinte pour un fil neuf.

V.4. Synthèse

L'observation au microscope optique et au MEB des éprouvettes a mis en évidence que :

Le fil en question est constitué d'une âme en cuivre et d'un revêtu en zinc, ce dernier est élaboré par un tréfilage suivant un revêtement ;

Les cratères apparaissent dans les fils usagés de plusieurs formes et dimensions, car les décharges ne sont pas correctement maîtrisées ;

La découpe par électroérosion à fil met en jeu une énergie très importante, ce qui provoque des perturbations métallurgiques sur l'électrode outil. Cependant, les perturbations se focalisent juste sur la couche de revêtement ; l'intérêt des fils revêtus est de choisir l'âme du fil en fonction de ses propriétés électriques et mécaniques ainsi que de choisir le revêtement en fonction de ses propriétés érosives [16].

Les essais mécaniques conduisent aux conclusions suivantes :

- ✓ Le procédé d'électroérosion fait perdre au fil électrode neuf 11% de sa dureté ;
- ✓ Le module de Young du fil neuf est de 73 GPa et 66 GPa pour le fil usagé;
- ✓ La résistance du fil en question diminue de 25% après son usage.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'usinage par électroérosion à fil est un procédé qui consiste à enlever de la matière par érosion, fusion et vaporisation, il est réservé aux matériaux conducteurs et semi-conducteurs.

L'usinage par électroérosion à fil est une technique lente. Un certain nombre de fils électrodes avaient été développés dans le but d'accroître sa productivité, ce qui lui a permis de concurrencer avec les procédés d'usinages conventionnels pour la production en grande série.

Notons que le fil qui a été l'objet de ce mémoire fait partie des électrodes de compromis dans le système cuivre-zinc. Une âme de cuivre est particulièrement intéressante pour sa conductivité électrique associée à une ductilité élevée, qui permet d'usiner avec un courant efficace relativement élevé. Un revêtement d'une seule couche d'alliage constituée par le dépôt électrolytique dont le métal à bas point de fusion et de vaporisation, qui est le zinc.

Le fil en question est de diamètre 0,25mm, obtenu par tréfilage après revêtement. Les modifications du fil de départ au moment de son passage dans la filière ont pour conséquence une modification générale de la plupart de ses propriétés, ce qui constitue un fait capital pour l'industrie du tréfilage.

Dans des conditions normales d'ébauche, à partir desquelles nous avons pris nos échantillons des fils usagés, la résistance mécanique des fils après usinage représente en moyenne 75% de leur résistance nominale, donc la tension mécanique supportable par le fil, même après son usage, est nettement inférieure à celle exercée par les guides machines qui est de 200 MPa [26] au maximum. Ces résultats prédisent la réutilisation du fil pour une deuxième fois au minimum, ce qui n'est pas le cas en pratique !

Durant une opération d'usinage, s'il survient par fois des ruptures de fil électrode, cela n'a aucun rapport avec la qualité du fil, car nous avons mesuré sa limite de résistance qui est très loin de celle exercée par les guides machines, nous interprétons ce phénomène soit par le mauvais diélectrique utilisé ou par la négligence d'autres paramètres qu'il faudrait tenir en compte avant d'entamer l'usinage.

D'après les observations faites au MEB, le fil électrode s'érode juste sur une moitié de sa surface. Donc nous suggérons d'imaginer un dispositif qui serait lié au système d'enfilage inférieur et qui permettrait de faire pivoter le fil afin d'assurer à ce dernier un travail tout au long de sa surface et de réduire sa vitesse d'enfilage qui est de l'ordre de 12m/min ainsi que de diminuer la consommation du fil.

Au terme de ce présent travail, Nous pouvons dire que nous avons pu récolter un ensemble de caractéristiques métallographiques et mécaniques du fil en question. D'autres perspectives d'investigation complémentaires peuvent être proposées:

- Faire des essais de réutilisation du fil pour une autre opération d'ébauche, afin de valider notre hypothèse.
- Faire une analyse par DRX dans le but de se renseigner davantage sur la composition chimique avant et après l'usage du fil.

Références bibliographiques



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : Charmilles technologies, EDM.doc, techniques de fabrication, EI ARC & EIG, septembre 2004.

[2] : Cédric. JOSEPH, contribution à l'accroissement des performances du processus de μ EDM par l'utilisation d'un robot dynamique élevée et de haute précision, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE thèse no 3281 (2005).

[3]: Metal Handbook, Desk Edition, ASM, 1997.

[4] : Michel COLOMBIE et coll : « les matériaux métallique », Dunod, Paris, 2008.

[5] : Jean BARRALIS Gérard MAEDER précis métallurgie édition Nathan paris 1997.

[6] : C.CHAUSSIN, G.HILLY .Alliages métalliques Edition Dunod, 1976.

[7] : Elisabeth Weidmann, Anne Guesnier. Application, Préparation métallographique du cuivre et des alliages de cuivre, Struers A/S ; 2007.

[8] : Dominique ARNAUD, Jean BARBERY, Roger BIAIS, Bernard FARGETTE et Pierre NAUDOT, Propriétés du cuivre et de ses alliages, M430 technique de l'ingénieur, 2003.

[9] : Daniel KREMER, usinage par électroérosion, BM 7 251 génie mécanique, techniques de l'ingénieur, 2003.

[10] : A Reference to Understanding, Selecting and Using Wire on Wire-cut EDM Machines, selecting and using wire on wire-cut EDM machines, edition, intech U.S.A. 1995.

[11]: ASM International, The Materials Information Company, HANDBOOK, Heat Treating, VOLUME 4, 1991.

[12]: Jean BARBERY, Données numériques sur le cuivre et ses alliages corroyés, M433 technique de l'ingénieur, 2002

[13]: Wire EDM Fundamentals Complete EDM Handbook, Vol 7, 1990.

[14]: Michel Ly, Etude des fils électrodes pour l'usinage par étincelage érosif, Thèse doctorat ; ENSM-Paris ; 2005.

- [15]: Briffod, Jean-Paul Fil électrode pour le découpage par électroérosion. Demande de brevet EP0521569A1, 1992.
- [16]: Sanchez, Gérald . Ly, Michel. Electrode wire for electric discharge machining. Brevet EP 1 949 995 B1.2002.
- [17]: TOMALIN, Dandridge, Sale Chagrin Falls, Electrode wire for use in electric discharge machining and process for preparing same; and method for forming such a wire, Brevet EP 1 009 574 B1,1998.
- [18]: F. SANTINI er J.TIGEOT, la Technique Moderne, Traitements Thermiques, tome II). 1966.
- [19]: Struers. Application Notes, Préparation métallographique du cuivre et des alliages de cuivre, Printed in Denmark by rosendahls Bogtrykker,2001.
- [20]: Michel DUPEUX : « aide-mémoire science des matériaux », Dunod, Paris, 2004.
- [21]: LAVERROUX, M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. La revue de métallurgie CIT, 1993.
- [22]: SIMONNET, G. Tréfilage de l'acier M645, In Traité des matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur, 1996.
- [23]: SACHS, G. Plasticity problems in metals. Transactions of the Faraday Society, vol.24, 1928
- [24]: M. STORR. L'électroérosion par enfonçage ce qu'il faut savoir ; Human Technology ; 2006.
- [25]: SCHEY, J. A. Tribology in metalworking: Friction, lubrication and wear. Ed American society for metals, 1983.
- [26]:Manuel technologique ROBOFIL 290 P CHARMILLES TECHNOLOGIES,1999.
- [27]: FELDER, E et LE FLOCH, A. Measurement of thermomechanical conditions in wire drawing dies. Annals of the CIRP, vol.25/1, 1976.
- [28]: KEMP, I.P. POLLARD, G. and BRAMLEY, A.N. Temperature distributions in the high speed drawing of high strength steel wire. Int. J. Mech. SCI., vol.27, n°11-12, 1985,
- [29]: J. Faerber Institut de Physique et chimie des matériaux STRASBOURG 2004
- [30]: BONZEL M. Le tréfilage de l'acier, édition, Paris, Editions Dunod, 1958.