

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : construction mécanique

Par : Melle AMIRAT Yousra

Melle BOUALIA Fouzia

Sujet

**Synthèse des propriétés mécaniques et physiques des fils tréfilés
(Acier, Cuivre)**

Soutenu publiquement, le 25 /06 / 2022 devant le jury composé de :

M.ZINAI AbdelHadi	(MCB)	Université de Tlemcen	Président
M.GUENIFED AbdelHalim	(MAA)	Université de Tlemcen	Examinateur
M.KARA ALI Djamel Abdelillah	(MCB)	Université de Tlemcen	Encadreur
M.GHERNAOUT Mohammed El Amine	(Professeur)	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*L'être qui m'est le cher au monde, à celle qui a ou donné pour que je sois ce
que je suis aujourd'hui, ma mère.*

*Celui qui à fait tout son possible pour me voir réussir dans ma vie,
mon père.*

A mes chères sœurs, Sara et Aya.

A mon fiancé, Abousseyf

A tous mes chères amies.

Dédicace

*Je tiens c'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste
travail :*

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère

*A Celui qui à fait tout son possible pour me voir réussir
dans ma vie, mon père.*

A ma très chère sœur : Meriem

A mon très cher frère : Zakaria

À mon amie de mon âge : Nesrine

*A tous mes amis de promotion de 2^{ème} année Master en
construction mécanique*

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciement

Nous remercions en premier lieu **Dieu** le tout puissant pour nos avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Les premières personne que nous allons remercier est bien évidemment notre encadreur de mémoire qui nous a soutenu et merveilleusement encadré, Dr. **KARA ALI Djamel Abdelillah** et notre Co. Encadreur Pr. **GHERNAOUT Mohammed El Amine**.

Nous tenons à remercier les membres du jury, Monsieur **ZINAI AbdelHadi** docteur à l'université de Tlemcen, Monsieur **GUENIFED AbdelHalim** docteur à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Mécanique.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons aussi remercier nos familles, nos parents, frères et sœurs qui ont toujours cru en nous.

Résumé

L'objectif principal de cette synthèse est d'observer l'évolution structurelle des fils de cuivre et d'acier au cours de leur déformation à froid par tréfilage ainsi que d'étudier le taux de déformation sur les propriétés mécaniques et physiques de ces fils. Pour connaître les caractéristiques mécaniques et physiques de ces fils tréfilés, des expériences de traction et de micro-dureté sont effectuées et la microscopie optique et le microscope à balayage électronique sont utilisés. La résistance à la traction et à la dureté augmente avec le taux de déformation. Pour les fils traités thermiquement, les grains apparaissent régulièrement et ce traitement a conduit à une diminution de la résistance à la traction et à une augmentation de l'allongement à la rupture. Enfin, une comparaison de fil de cuivre avec le fil d'acier, qui est plus résistant et durable.

Mots clés : Tréfilage ; Taux de déformation ; Micro-dureté ;
Traction.

Abstract

The main objective of this synthesis is to observe the structural evolution of copper and steel wire during cold deformation by wire drawing and to study the rate of deformation on the mechanical and physical properties of these wires. To find out the mechanical and physical characteristics of these drawn wires, traction and micro-hardness experiments are carried out and an optical microscopy and electron scanning microscopy are used. Tensile and hardness resistance increases with the rate of deformation. For heat-treated wires, the grains appear regularly and this treatment has led to a decrease in tensile strength and an increase in tensile elongation. Finally, a comparative between the copper wire and the steel wire, which one is more resistant and durable.

Key words: Wire drawing; Rate of deformation; Traction; Micro-hardness.

ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة يركز على تلخيص ملاحظة التطور البنيوي لأسلاك النحاس و الفولاذ أثناء تشوهها باستعمال زيوت التشحيم الباردة عن طريق القلذ وكذلك دراسة تأثير نسبة التشوه على الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية لهذه الأسلاك. لمعرفة الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية لهذه الأسلاك المقلوذة يجب إجراء تجارب الشد و الصلادة و استعمال المجهر البصري و مجهر المسح الالكتروني. مقاومة الشد و الصلادة تتزايد مع نسبة التشوه. أما بالنسبة للأسلاك المعالجة حراريا فتظهر حبيبات بشكل منتظم و أدت هذه المعالجة الى انخفاض في مقاومة الشد و زيادة في الاستطالة عند الكسر. و أخيرا المقارنة بين الاسلاك النحاسية و الاسلاك الفولاذية ايهما اكثر مقاومة واستدامة.

الكلمات المفتاحية: القلذ ، نسبة التشوه ، الصلادة ، الشد.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Tréfilage	3
1 Introduction :.....	4
2 Principe de tréfilage :.....	4
3 Type de tréfilage :.....	4
3.1 Tréfilage à sec :.....	4
3.2 Tréfilage humide :.....	5
4 Rupture de tréfilage :.....	6
4.1 Rupture initiée à cœur :.....	6
4.2 Rupture initiées en surface :.....	6
5 Procédés de tréfilage :.....	7
5.1 Outils et équipements industriels de tréfilage :.....	7
5.2 Machines de tréfilage :.....	8
5.2.1 Machine simple :.....	8
5.2.2 Machines multiples :.....	9
5.3 Traitements des fils pour le tréfilage :.....	10
5.3.1 Revêtement des surfaces avant tréfilage :.....	10
5.3.2 Traitements thermiques après tréfilage :.....	10
5.4 Grandeurs mécaniques et physiques :.....	11
5.4.1 Allongement du fil :.....	11
5.4.2 Déformation plastique dans les matériaux c. f. c :.....	12
5.4.3 Contrainte du fil :.....	12
5.4.4 Frottement :.....	12
5.4.5 Température :.....	12
6 Conclusion :.....	13
CHAPITRE II : Généralités sur le cuivre et l'acier	14
1 Introduction :.....	15
2 Cuivre :.....	15
2.1 Généralités :.....	15
2.2 Mines et minéraux de cuivre :.....	15
2.3 Applications industriels du cuivre :.....	16

2.4	Propriétés physiques et mécaniques :.....	17
3	Acier :.....	18
3.1	Généralités :.....	18
3.2	Diagramme fer-carbone :.....	18
3.3	Différentes phases du système Fer-Carbone :.....	19
3.3.1	Ferrite α :.....	19
3.3.2	Ferrite δ :.....	19
3.3.3	Austénite γ :.....	19
3.3.4	Cémentite (Carbone de fer $\text{Fe}_3\text{-C}$) :.....	19
3.3.5	Perlite :.....	20
3.4	Fabrication d'acier :.....	20
3.4.1	Cokerie :.....	20
3.4.2	Haut fourneau :.....	21
3.4.3	Convertisseur à l'oxygène :.....	22
3.4.4	Métallurgie en poche :.....	22
3.4.5	Coulée :.....	23
3.5	Classification des aciers :.....	24
3.5.1	Aciers non alliés :.....	24
3.5.2	Aciers alliés :.....	25
3.5.3	Aciers inoxydables :.....	25
3.5.4	Aciers multi phases :.....	26
4	Conclusion :.....	27
	CHAPITRE III : Techniques expérimentales.....	28
1	Introduction :.....	29
2	Acier :.....	30
2.1	Présentation du matériau étudié :.....	30
2.1.1	Fil machine :.....	30
2.1.2	Fils tréfilés :.....	30
2.2	Préparation des échantillons :.....	31
2.2.1	Découpage et enrobage :.....	31
2.2.2	Polissage :.....	32
2.3	Caractérisation des propriétés physiques :.....	33
2.3.1	Microscope optique :.....	33
2.3.2	Microscope électronique à balayage (MEB) :.....	33

2.4	Caractérisation des propriétés mécaniques :.....	34
2.4.1	La micro-dureté Vickers :.....	34
2.4.2	Essai De Traction :.....	35
3	Cuivre :.....	36
3.1	Présentation du matériau étudié :.....	36
3.2	Préparation des échantillons :.....	37
3.2.1	Découpage et enrobage :.....	37
3.2.2	Polissage :.....	37
3.2.3	Traitement thermique :.....	37
3.3	Caractérisation des propriétés physiques :.....	38
3.3.1	Microscope optique :.....	38
3.3.2	Microscopie électronique à balayage (MEB) :.....	38
3.4	Caractérisation des propriétés mécaniques :.....	39
3.4.1	Essais de traction :.....	39
3.4.2	La micro-dureté Vickers :.....	39
4	Conclusion :.....	40
	CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations	41
1	Introduction :.....	42
2	Acier :.....	42
2.1	Fil machine :.....	42
2.1.1	Analyses métallographiques :.....	42
2.1.2	Propriétés mécaniques :.....	43
2.2	Fil tréfilé :.....	43
2.2.1	Analyses métallographiques :.....	43
2.2.2	Propriétés mécaniques :.....	46
3	Cuivre :.....	47
3.1	Résultats micrographiques :.....	47
3.1.1	Observation par microscopie optique :.....	47
3.1.2	Observation MEB du fil :.....	48
3.2	Résultats des essais mécaniques :.....	48
3.2.1	Essai de traction :.....	48
3.2.2	Résultats des essais de micro-dureté :.....	54
4	Conclusion :.....	54

<i>CONCLUSION GENERALE</i>	55
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :</i>	57

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Principe de tréfilage	5
Figure I. 2 : Dispositifs d'accumulation.....	6
Figure I. 3 : Principe du tréfilage humide avec filières immergées.....	6
Figure I. 4 : Rupture en «assiette et cône».....	7
Figure I. 5 : Rupture initiée par déchirures superficielle.....	7
Figure I. 6 : Schéma d'une filière de tréfilage.....	8
Figure I. 7 : Lubrifiants de tréfilage	9
Figure I. 8 : Schéma de lubrification.....	9
Figure I. 9 : Schéma de principe d'une tréfileuse simple.....	9
Figure I. 10 : Schéma d'une machine de tréfilage multiple	10
Figure I. 11 : Schéma d'un substrat revêtu.....	11
Figure I. 12 : Four de traitement thermique.....	12
Figure I. 13 : Blocs de cellules et murs denses de dislocations.....	13
Figure II. 1 : Fils en cuivre	16
Figure II. 2 : Cuivre natif	17
Figure II. 3 : Chalcopryrite	17
Figure II. 4 : Exemples d'applications sur le cuivre.....	17
Figure II. 5 : Fils d'acier.....	19
Figure II. 6 : Diagramme fer-carbone	20
Figure II. 7 : Chaîne d'élaboration d'acier	21
Figure II. 8 : Cokerie.....	22
Figure II. 9 : Coupe d'un haut fourneau.....	22
Figure II. 10 : Convertisseur à l'oxygène.....	23
Figure II. 11 : Coulée continue	24
Figure II. 12 : Coulée en lingots	24
Figure II. 13 : Désignations des aciers	27
Figure III. 1 : Fil machine d'acier doux sous forme des bobines.....	31
Figure III. 2 : Schéma explicatif d'une Tréfileuse à trois passes.....	31
Figure III. 3 : Schéma explicatif d'une Tréfileuse à quatre passes.....	32
Figure III. 4 : Echantillons coupés et enrobés à froid.....	32
Figure III. 5 : Polissage mécanique	33
Figure III. 6 : L'attaque chimique des échantillons.....	33
Figure III. 7 : Microscope optique (MO)	34
Figure III. 8 : Microscope électronique à balayage (MEB)	34
Figure III. 9 : Schéma explicatif de mesure la micro-dureté Vickers.....	35
Figure III. 10 : Dispositif d'essai en traction	36
Figure III. 11 : Courbe conventionnelle de traction	36
Figure III. 12 : Fil machine et fils tréfilés de cuivre étudiés	37
Figure III. 13 : Les échantillons découpés et enrobés	38
Figure III. 14 : Polisseuse mécanique de type PRESI MECAPOL P260	38
Figure III. 15 : Microscope optique Nikon éclipse e200	39
Figure III. 16 : Microscope électronique à balayage (MEB)	39

Figure III. 17 : Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (ENICAB Biskra).....	40
Figure III. 18 : Empreintes du micro-duromètre observées sur l'échantillon.....	40
Figure IV. 1: Microstructures par microscope optique de fil machine	42
Figure IV. 2: Micrographie au Microscope électronique à balayage (M.E.B) du fil machine	43
Figure IV. 3: Microstructures par microscope optique de fil machine et des fils tréfilés	44
Figure IV. 4: Micrographies MEB vues longitudinales	45
Figure IV. 5: Evolution de la micro-dureté des fils tréfilés en fonction du taux de déformation	46
Figure IV. 6: Evolution La résistance à la rupture en fonction du taux de déformation.....	46
Figure IV. 7: Evolution l'allongement en fonction du taux de déformation.....	46
Figure IV. 8: Évolution de la microstructure du fil en cuivre	47
Figure IV. 9: Images prises par le MEB du fil tréfilé	48
Figure IV. 10: Essai de traction du fil machine du cuivre.....	48
Figure IV. 11: Evolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation des fils en cuivre	49
Figure IV. 12: Evolution de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation des fils en cuivre	50
Figure IV. 13: Faciès de rupture en traction.....	50
Figure IV. 14: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre en fonction de la température de recuit	52
Figure IV. 15: Evolution de l'allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit	52
Figure IV. 16: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1: Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre	17
Tableau III. 1: La composition chimique de fil machine (massique).....	30
Tableau III. 2: Les taux de déformation des fils	31
Tableau III. 3: Composition chimique du fil de cuivre (massique %)	36
Tableau III. 4: Les taux de déformation des fils	36
Tableau IV. 1: Valeurs des propriétés mécaniques mesurées	43
Tableau IV. 2: Propriétés mécaniques des fils du cuivre à l'état initial.....	49
Tableau IV. 3: Résultats des propriétés mécaniques des fils du cuivre à 150°C ,250°C ,300°C	51
Tableau IV. 4: Micro-dureté Vickers associée à l'âme du fil neuf vertical	54
Tableau IV. 5: Micro-dureté Vickers associée à l'âme du fil neuf horizontal	54

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'industrie des fils métalliques, en particulier des câbles de cuivre et d'acier, a connu une très grande évolution quant à leur utilisation dans les domaines de l'industrie, les applications domestiques, dans la distribution de l'énergie électrique et les transports. Cela est dû aux pertinentes caractéristiques électriques (conductivité, résistivité, fiabilité des contacts électrique...) et mécaniques (résistance à la rupture, ductilité...).

Le tréfilage est un processus nécessaire pour produire des fils de différents diamètres. Au cours de ce processus, la mise en forme du matériau est réalisée par un mécanisme de déformation plastique. Le tréfilage s'accompagne de la formation de défauts cristallins, tels que des lacunes et des dislocations, entraînant une augmentation de la dureté et donc une augmentation de la résistivité, caractéristique très importante de la conductivité et des performances du câble.

La fabrication de fils a d'énormes intérêts économiques en Algérie. C'est raisonnable et concret en installant deux grandes entreprises de tréfilage à travers le pays. L'une, à Biskra Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB), spécialisée dans la fabrication des fils des différentes sections en aluminium et en cuivre, destinés à la fabrication des fils électriques ; l'autre, à El-Eulma (Sétif) et portant le nom (TREFISOUD) qui produit des fils d'acier pour différentes utilisations industrielles (clôtures, baguette à souder...etc.).

Pour un complément de caractérisation de ces fils, notre objectif était focalisé sur l'observation et la compréhension de l'évolution de la microstructure des fils de cuivre et d'acier au cours de la déformation par tréfilage à froid, ainsi que l'effet des taux de déformation sur le comportement mécanique de ces fils et faire regrouper tous les résultats obtenus pour comparer entre les fils de cuivre et celles d'acier.

Après une introduction générale, le mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le procédé de tréfilage (principe, types, outils et équipements industriels, machines de tréfilage, ...).

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

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

Le quatrième chapitre est consacré aux principaux résultats expérimentaux et les interprétations associées.

Enfin nous terminons notre étude par une conclusion générale qui reprend les objectifs de ce travail.

CHAPITRE I :
Tréfilage

Chapitre I : Tréfilage

1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à un petit aperçu sur le tréfilage, en premier lieu on va connaître c'est quoi un tréfilage, son principe et ses types, puis une étude sur ces procédés : les outils industriels de tréfilage ainsi que les types des machines, aussi on va présenter le traitement thermique avant et après tréfilage et les grandeurs physiques et mécaniques, enfin on termine par les modes d'application du tréfilage.

2 Principe de tréfilage :

Le tréfilage est une technique d'étirer à froid du métal qui permet de réduire la section du fil, par déformation plastique, en le tirant à travers d'un trou calibrée sous l'effet d'une force de traction en présence d'un lubrifiant.

Cette technique permet d'obtenir des fils de diamètre inférieur à 5 mm et ainsi de s'affranchir des limitations technologiques économiques de la déformation à chaud, à savoir respecter des tolérances serrées sur les diamètres et ayant du corps, les propriétés mécaniques sont adaptées par écrouissage.

Les matériaux les plus couramment utilisés dans les applications sont l'acier, le cuivre, l'aluminium et le tungstène. [1]



Figure I. 1 :Principe de tréfilage. [8]

3 Type de tréfilage :

3.1 Tréfilage à sec :

Indépendamment des organes entraînement (moteurs et boîtes de vitesse), ainsi que des dispositifs de tréfilage (filières) et de lubrification (boîtes à savon), le fil passe successivement d'une filière à l'autre via des bobines d'enroulement servant de cabestan pour la traction du fil à travers la filière. Celles-ci comportant, en général à leur base, une zone appelée chasse, dont le profil est tel que chaque nouvelle spire chasse la précédente pour prendre sa place au cours

Chapitre I : Tréfilage

de l'enroulement et permette ainsi une bonne accumulation des diverses spires en vue d'un dévidage ultérieur correct, tout en faisant diminuer progressivement la contrainte de traction du fil. Les machines à sec se présentent schématiquement sous la forme d'une succession d'ensembles « boîte à savon – filière – cabestan », et se distinguent des façons suivantes :

- Systèmes d'accumulation du fil (simples ou doubles chasses).
- Diamètre des cabestans (généralement entre 250 et 900 mm).
- Trajet du fil (avec ou sans torsion).
- Mode et intensité du refroidissement du fil.
- Type de dispositif assurant la régulation de la vitesse de passage qui augmente à chaque passe.
- Les vitesses de tréfilage sont de l'ordre de 10 à 15 m/s pour un fil de 2,5 mm et de 20 à 25 m/s pour un fil de 1 mm. [6]

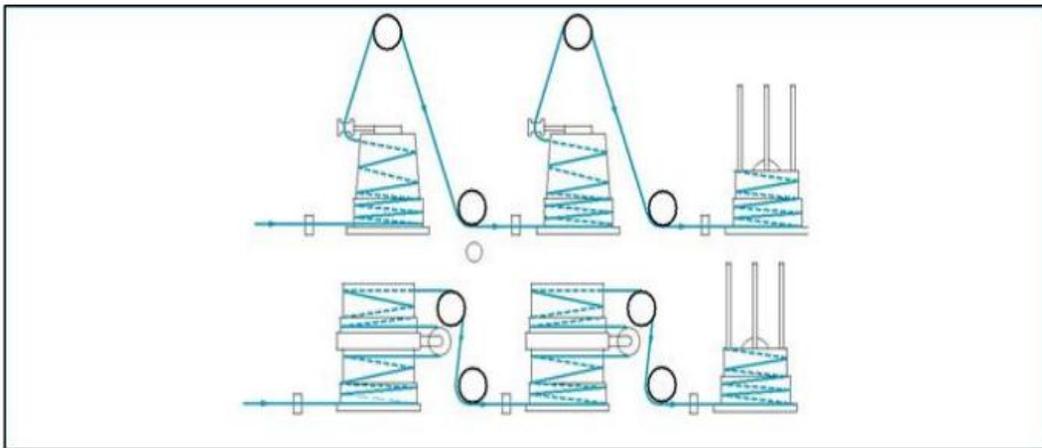


Figure I. 2 : Tréfilage à sec (dispositifs d'accumulation) [2].

3.2 Tréfilage humide :

L'ensemble est immergé dans un bac contenant un lubrifiant en solution aqueuse. Dans ce cas, c'est le glissement des fils sur les cabestans qui compense l'usure des filières. Ce procédé concerne plus particulièrement les fils fins d'un diamètre généralement inférieur à 1 mm. Son avantage facilite la concentration d'une vingtaine de filières dans un espace assez réduit. [6]

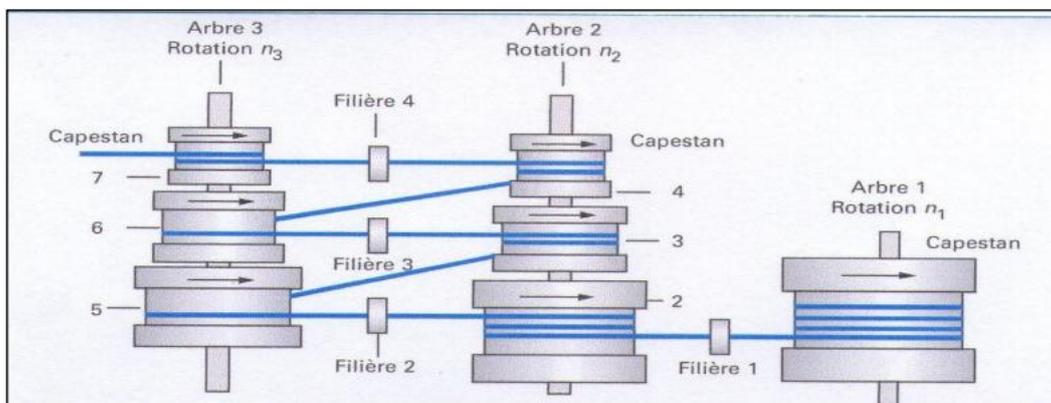


Figure I. 3 : Tréfilage humide avec filières immergées [2].

4 Rupture de tréfilage :

Deux grandes familles de rupture au tréfilage peuvent être rencontrées :

- Rupture initiée à cœur.
- Rupture initiée en surface.

4.1 Rupture initiée à cœur :

A quelques exceptions près ou le schéma de tréfilage proprement dit est trop sévère, la plupart de ces ruptures, de forme « assiette et cône », sont initiées sur des défauts internes de type métallurgique (figure I.4). [6]

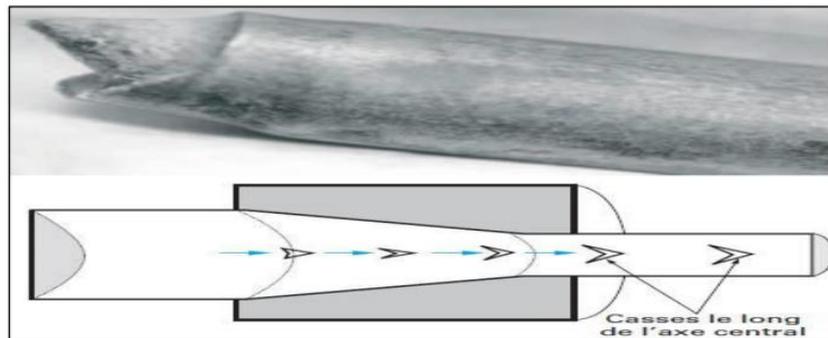


Figure I. 4 : Rupture en « assiette et cône » [2].

4.2 Rupture initiées en surface :

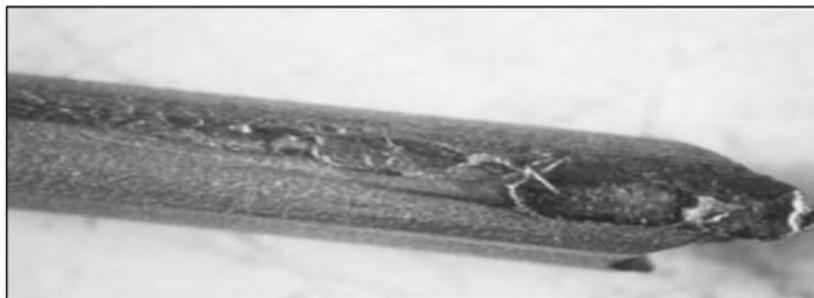


Figure I. 5 : Rupture initiée par déchirures superficielle [2].

Dans ce cas, nous retrouvons deux types de défauts susceptibles de provoquer des ruptures (figure I.5) :

- Ceux dits « d'origine métallurgique » et préexistants sur le fil machine (fissures, reliures de laminage ou pailles).
- Le type « stries mécaniques », engendré à froid, soit au cours de la manutention des couronnes ou pendant le transport, soit pendant le tréfilage. [6]

5 Procédés de tréfilage :

5.1 Outils et équipements industriels de tréfilage :

L'ensemble du matériel principal de tréfilage comporte trois éléments-clés :

- a. Fil de départ : Il provient du laminage à chaud (la coulée en continue) et peut subir une préparation de surface.

❖ Conditionnement du fil tréfilé :

Après tréfilage, le fil peut être conditionné de deux façons différentes :

- Enroulé sur une bobine à flasque par couches successives de spires jointives, ou non.
- Déposé « en rosace » sur une bobine fixe à l'axe vertical disposée sur un support qui tourne lentement, et dont l'axe est excentré par rapport à celui de la bobine.

Deux avantages de ce procédé :

- Il n'est pas nécessaire d'arrêter la machine lors du changement de bobine.
- Les bobines ne sont pas compactes et la prise de température est plus rapide lors des traitements de recuit en four statique. [6]

- b. Filière : est généralement un bloc cylindrique percé d'un trou calibré de la taille et de la forme souhaité pour le produit tréfilé. Elle est composée de quatre parties :

- Le cône d'entrée
- Le cône de travail
- La portée
- Le cône de sortie.

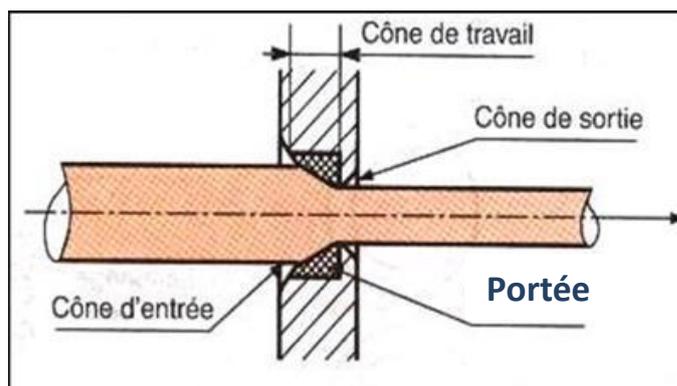


Figure I. 6 : schéma d'une filière de tréfilage [4]

- c. Lubrifiant : réduit le frottement entre deux pièces en mouvement et il joue un rôle très important dans le tréfilage :

- Il refroidit la filière pour éviter sa déformation.
- Il améliore l'état de surface du fil.
- Il nettoie également les surfaces.

Chapitre I : Tréfilage

Un concentré d'huile soluble destiné au tréfilage contient généralement les types d'additifs chimiques suivants :

- Huile minérale de qualité supérieure à additif de lubrification.
- Huiles de base pures stables à additif de performance à pression.
- L'oxydation extrême.
- Émulsifiants Bactéricides à additifs détergents tensioactifs biocides et fongicides
- agents d'adhérence tensioactifs anti mousses avec inhibiteurs de corrosion



Figure I. 7 : Lubrifiants de tréfilage [7]

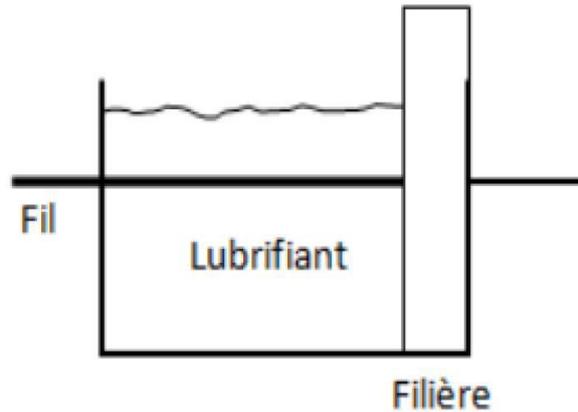


Figure I. 8 : Schéma de lubrification [2]

Dans le cas d'étirage à sec, on utilise du savon sec des métaux. Il aide à former un film de surface suffisamment épais pour éviter l'interaction directe entre la filière et le fil. Il s'agit du lubrifiant de tréfilage le plus courant pour le cuivre. Les gouttelettes assurent la lubrification à la fois au niveau de la surface de la filière et de celle du cabestan.

5.2 Machines de tréfilage :

5.2.1 Machine simple :

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle ne comporte qu'une bobine et ne peut effectuer qu'une passe de tréfilage, c'est-à-dire une réduction de section de 35mm^2 au maximum. À chacun des blocs sont associés un ensemble de dévidage et un dispositif de réception.

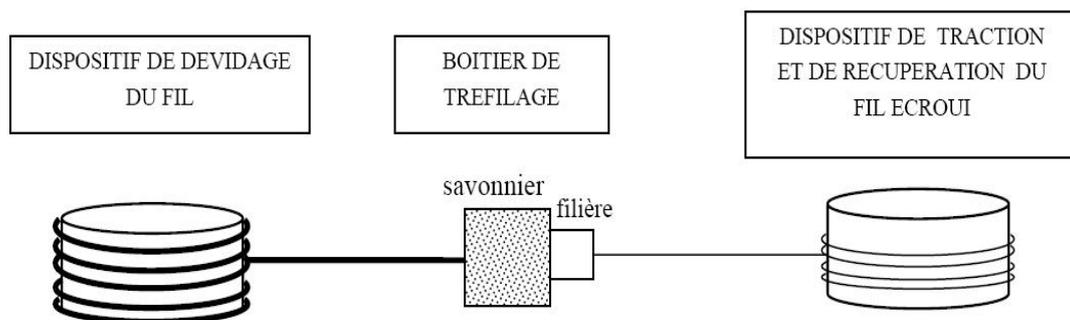


Figure I. 9 : Schéma de principe d'une tréfileuse simple [3]

5.2.2 Machines multiples :

Elles permettent des réductions de section importantes sont obtenues par des réductions successives grâce à un enchaînement de filières. Dans ce cas, le fil passe d'une bobine à une autre en traversant une filière, et il subit à chaque fois une réduction de section et un accroissement de vitesse. Il existe trois types de machines multiples [2].

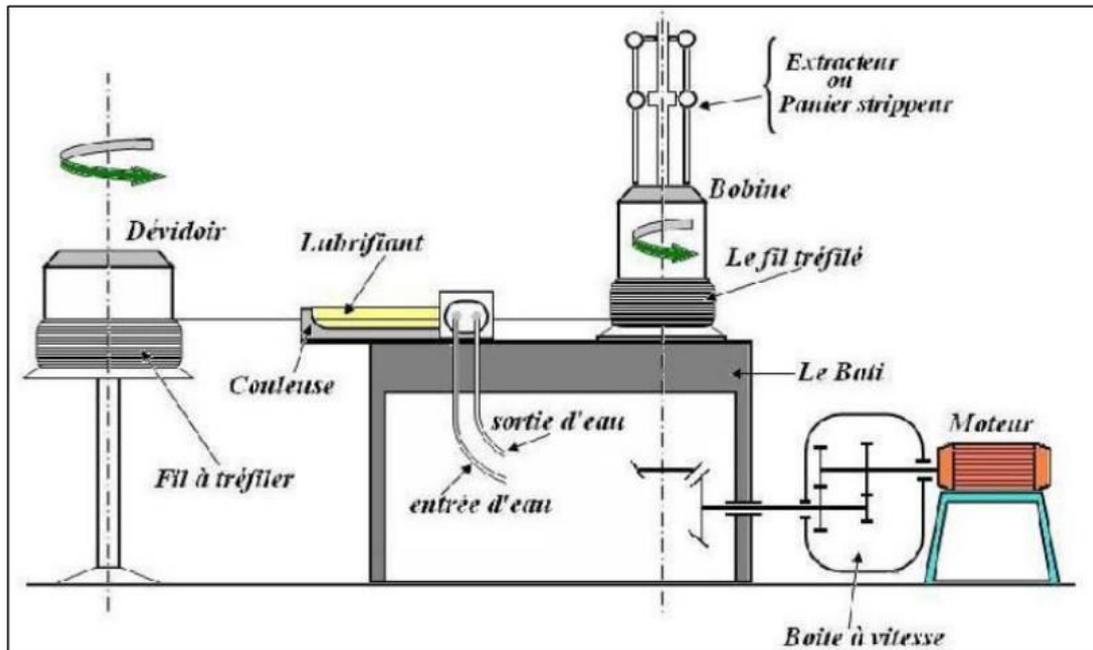


Figure I. 10 : Schéma d'une machine de tréfilage multiple. [5]

- **Machines à passage direct** : Ce sont les équipements les plus modernes et les plus réponsus. 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.
- **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 pas interrompre la production de bobines aval en cas de problème sur les bobines amont.
- **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 8mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes. Le fil peut ensuite être tréfilé en « reprise » à sec des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fil très propre.

5.3 Traitements des fils pour le tréfilage :

5.3.1 Revêtement des surfaces avant tréfilage :

Ils sont à l'objectif d'éliminer les oxydes recouvrant la surface du fil et appliquer des revêtements pour faciliter le tréfilage.

- L'élimination est assurée par le décapage chimique. En France on utilise l'acide sulfurique pour les fils en aciers non alliés, a tendance à céder du terrain à l'acide chlorhydrique dont les eaux résiduaires offrent de plus grandes facilités de récupération et de recyclage.
- Pour le revêtement ils ont pris de nouveaux processus avec le chaulage classique. et ils ont signalé le développement pris par la phosphatation qui protège efficacement les outillages devant assurer la déformation ultérieure du fil.

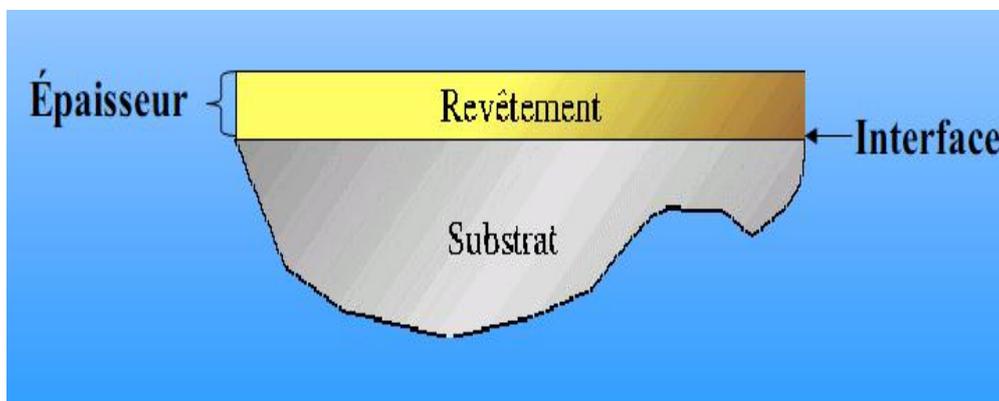


Figure I. 11 : Schéma d'un substrat revêtu. [10]

Mention doit également être faite du décalaminage mécanique du fil machine, qui consiste à faire éclater la couche d'oxydes par pliage du fil sur des galets, puis à détacher ces oxydes par brossage ou tout autre moyen de nettoyage mécanique. Ce procédé, né de la pénurie d'acide en France au lendemain de la deuxième guerre mondiale, a pris alors une grande extension dans le domaine des aciers non alliés et reste encore largement utilisé à l'heure actuelle, malgré les facilités de décapage par voie chimique apportées par le refroidissement contrôlé du fil machine en fin de laminage. Il a en effet l'avantage d'être peu coûteux, du fait qu'il peut prendre place directement en amont de la machine à tréfiler et qu'il évite toutes les charges imposées par les eaux résiduaires du décapage acide.

5.3.2 Traitements thermiques après tréfilage :

Les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au ré-tréfilage ou aux déformations ultérieures, pour supprimer l'effet de l'écrouissage 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). [2]

Chapitre I : Tréfilage

Selon la nature des traitements et la dimension des fils concernés, on opère, soit en ligne par déroulage des fils à travers les installations thermiques, soit en masse en disposant les fils maintenus à l'état de couronnes dans les enceintes concernées. Le processus de traitement en masse est plus particulièrement utilisé pour les traitements ne comportant pas de changements brusques de température, ce qui est le cas de la plupart des recuits.



Figure I. 12 : Four de traitement thermique. [6]

5.4 Grandeurs mécaniques et physiques :

5.4.1 Allongement du fil :

- La conservation volumique au cours de la déformation plastique s'écrit :

$$S_e \times l_e = S_s \times l_s \dots \dots \dots (1)$$

- la réduction du fil r : $r = 1 - \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2 \dots \dots \dots (2)$

- La déformation : $\epsilon = \ln \Delta l = 2 \ln \left(\frac{R_e}{R_s}\right) \dots \dots \dots (3)$

Alors : $\Delta l = \frac{l_s}{l_e} = \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2 \dots \dots \dots (4)$

Avec :

l_s , l_e : Les longueurs initiales et finales du fil.

Δl : L'allongement du fil.

S_s et S_e : les sections initiales et finales du fil.

5.4.2 Déformation plastique dans les matériaux c. f. c :

La déformation plastique à froid conduit à l'écrouissage du matériau, donc à son durcissement. Cet écrouissage dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En effet, la déformation à froid entraîne une importante de la densité de dislocations (énergie élastique stockée) dans le matériau. Il s'ensuit une hétérogénéité de la microstructure et de la texture cristallographique à l'intérieur des grains. Pour conférer au matériau les propriétés mécanique souhaitées. Celui-ci est recuit après déformation. Ce recuit conduit à une réorganisation de la microstructure par diminution ou suppression des obstacles les plus importants aux mouvements des dislocations. Lors du traitement thermique après déformation, deux phénomènes plus ou moins concurrents ont lieu : la restauration et la recristallisation. Ces deux types d'évolution structurale ont la même force motrice c'est-à-dire l'énergie élastique emmagasinée au cours de la déformation à froid.[9]

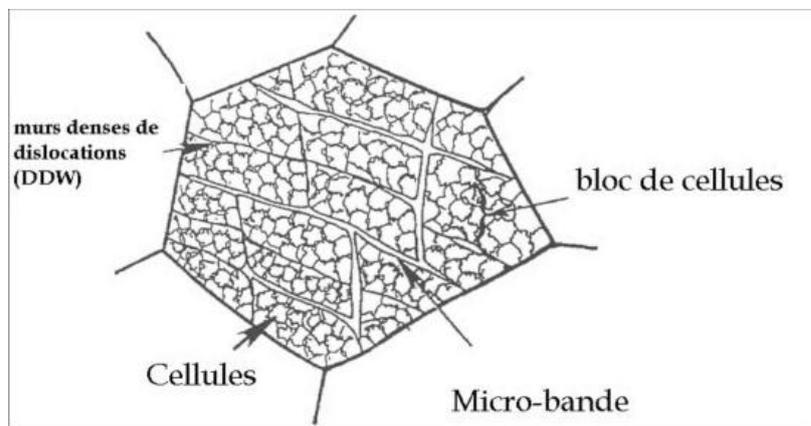


Figure I. 13 : Blocs de cellules et murs denses de dislocations [11].

5.4.3 Contrainte du fil :

Elle s'écrit :
$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi R_s^2} = \sigma_{pl} + \sigma_{fr} \dots \dots \dots (5)$$

La force de traction tire le fil au travers de la filière qui impose une pression latéral à la traction et un cisaillement en fonction des conditions de frottement et donc la force de tréfilage est la somme des forces de frottement et la force de deformation plastique.

5.4.4 Frottement :

Il produit une augmentation de la force et la température au cours du tréfilage et rend ces conditions critiques, donc le but de tréfileur est de diminuer le frottement en fixant les parametres ou en utilisant un lubrifiant.

5.4.5 Température :

La connaissance de ce paramètre est capitale puisqu'elle va conditionner le déroulement de l'opération.

Chapitre I : Tréfilage

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 [3].

6 Conclusion :

Ce chapitre présente un mode de mise en forme des métaux par déformation plastique. Nous avons expliqué les principes de base de ce procédé. Le tréfilage est basé sur l'utilisation de plasticité du matériau dans le but de réduire la section du fil en forçant son passage à travers des orifices successifs calibrés, de diamètre décroissants. De ce fait, le matériau s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. Au tréfilage, le comportement d'un fil est fonction de la nature de l'alliage qui le constitue et de son état métallurgique.

CHAPITRE II :
Généralités sur le
cuivre et l'acier

1 Introduction :

Les matériaux en général et les métaux en particulier constituent un rôle important pour tout développement industriel ou progrès technologique. Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux. Vu les exigences de l'industrie moderne, de nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères ... mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches ; et ce chapitre nous donne un petit aperçu sur le cuivre et l'acier et leurs propriétés physiques et mécaniques. [12]

2 Cuivre :

2.1 Généralités :

Le cuivre est un métal rouge à cassure rose et pur présent dans la nature et se distingue parmi les métaux non ferreux. C'est l'un des plus anciens métaux connus et probablement le premier à être usiné. Aujourd'hui, Il est le deuxième métal le plus important après l'aluminium. Le cuivre est utilisé dans divers alliages tels que le laiton composé de cuivre et de zinc, le bronze composé de cuivre et d'étain et des centaines d'alliages, notamment le cuivre-aluminium, le cupronickel, le cuivre-silicium, le cuivre-chrome et le cuivre-béryllium. Autres alliages. [13]



Figure II. 1: fils en cuivre [14]

2.2 Mines et minéraux de cuivre :

Les mines productrices de cuivre sont nombreuses à travers le monde entier. Ce métal est extrait tout d'abord sous forme de sulfure dans tous les grandes mines à ciel ouvert et des filons de porphyre cuprifère ayant une teneur en cuivre de 0,4 à 1,0%. Sachant que la teneur moyenne en cuivre présent sur la croûte terrestre est de 68 ppm en masse et de 22 ppm s'il l'on parle d'atome. Au Chili, l'extraction est énorme et elle correspond aux cinq premières mines mondiales. Selon le British Geological Survey, en 2005, cette localité est classée comme étant le premier producteur de cuivre mondial suivi des États-Unis, de l'Indonésie et du Pérou. Il produit au moins un tiers de la production mondiale jusqu'à nos jours. En effet, le Chili est

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et l'acier

bordé de mines de cuivre à ciel ouvert jusqu'en Santiago et à proximité du désert d'Atacama, un lieu naturel très éloigné en altitude.

Des échantillons de roche de cuivre ont également été détectés dans plusieurs échantillons de roche prélevés dans la crête médio-atlantique ainsi que dans la Lune et portant la sonde de la mission Luna 24 de Mare Cirsium. [15].



Figure II. 2: Cuivre natif [16]



Figure II. 3: Chalcopyrite [17]

2.3 Applications industriels du cuivre :

Le cuivre est présent dans de nombreux alliages il est utilisé principalement en plomberie notamment dans la fabrication d'un grand nombre d'appareils de chaufferie industriels de tuyauteries, de gouttières, ... etc.

En électricité pour la constitution de câbles électriques. Ils l'ont choisit pur à 99,999 %. Les propriétés conductrices du cuivre sont connues depuis longtemps. C'est pour cela il est un matériau de choix en télécommunications, dans le bâtiment, les transports et pour la fabrication de casseroles avant de devenir l'un des composants principaux de la tuyauterie sanitaire. Le cuivre est utilisé pour le frappage des pièces de monnaies ainsi pour la fabrication d'alliages importants tels que les laitons (cuivre+zinc) et les bronzes (cuivre+étain).



Figure II. 4: Exemples d'applications sur le cuivre. [18]

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et l'acier

2.4 Propriétés physiques et mécaniques :

Le cuivre est un élément chimique du 1er groupe de la classification de médaille de couleur rouge dorée Il a deux isotopes : Cu ⁶³ (69,2 %) ; Cu ⁶⁵ (30,8 %) et sa densité est de (8,92). Il a une dureté de 3 Mohr et Coefficient de Poisson de 0,34 à 20°C, une faible résistance à la traction et un allongement élevé. Les propriétés mécaniques du cuivre sont très intéressantes pour le formage à chaud et à froid.

Le cuivre et ses alliages ont la particularité intéressante que leurs propriétés mécaniques augmentent lorsque la température diminue. Par conséquent, ils sont utilisés comme matériaux cryogéniques dans l'industrie du gaz liquéfié. Au contraire, à haute température, ils présentent deux inconvénients : la résistance à l'oxydation diminue avec la température, et les propriétés mécaniques du cuivre pur diminuent à partir de 200°C. [3]

Tableau II. 1: Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre. [9]

Elément Cu (M = 63,54, Z = 29)					
Propriétés physiques					
Enthalpie de fusion		211850 j /kg			
Température de fusion		1065 ° à 1083° C			
Coefficient de dilatation (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	de -190° à 16° C		14,1		
	de 25° à 100° C		16,8		
	de 20 ° à 200° C		17,3		
Capacité thermique massique (en J/(Kg. K))	20° C		386		
	100° C		393		
Conductivité thermique (en W/(m. K))	20° C		400		
	100° C		385		
Conductivité électrique (% IACS)	(état recuit)	20° C	100 à 102,5		
		100° C	76		
	(état écroui)	20° C	97		
Résistivité électrique ρ (en μΩ. cm)	(état recuit)	20° C	1,724 à 1,682		
		100° C	2,27		
	(état écroui)	20° C	1,78		
Propriétés mécaniques					
Etat de livraison	Symbole AFNOR	<i>Rp_{0,2}</i> (MPa)	<i>Rm</i> (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	230	45	50
1/4 dur	H11	190	270	25	80
1/2 dur	H12	250	300	14	100
4/4 dur	H14	320	350	6	110

L'état de recuit signifie 0% d'érouissage : état AFNOR OS

1/4dur : 10%d'érouissage : état AFNOR H11

1/2dur : 25%d'érouissage : état AFNOR H12

4/4dur : 50%d'érouissage : état AFNOR H14

$R_{p0,2}$: Limite élastique à 0,2% d'allongement

R_m : Résistance mécanique

3 Acier :

3.1 Généralités :

L'acier est l'un des principaux matériaux de construction dans le monde. Il est utilisé dans presque toutes les industries : automobile, construction, ingénierie mécanique, construction navale, appareils électroménagers, ordinateurs et électronique grand public. Sans acier, les projets d'infrastructure tels que les routes, les ponts ou les voies ferrées seraient inimaginables. Lorsqu'un objet n'est pas principalement composé d'acier - comme un Smartphone, un ordinateur ou un avion - il est composé d'éléments fabriqués mécaniquement à l'aide d'acier. En d'autres termes, l'acier est à la base du niveau de vie élevé et de la croissance des marchés émergents dont bénéficient aujourd'hui les pays industrialisés. [19]



Figure II. 5: fils d'acier. [20]

L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique (voir aussi l'article sur la théorie du soudage de l'acier) et de la construction mécanique. Il est constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone dans des proportions comprises entre 0,02 % et 1,67 % en masse. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferronickels par exemple. [21]

3.2 Diagramme fer-carbone :

Le système fer-carbone est théoriquement décrit par le diagramme fer-carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer α précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ($C < 2.11\%$, environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer Fe_3C appelé cémentite.

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et l'acier

Il est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre fer-cémentite dont la figure I.1 présente un schéma. [22]

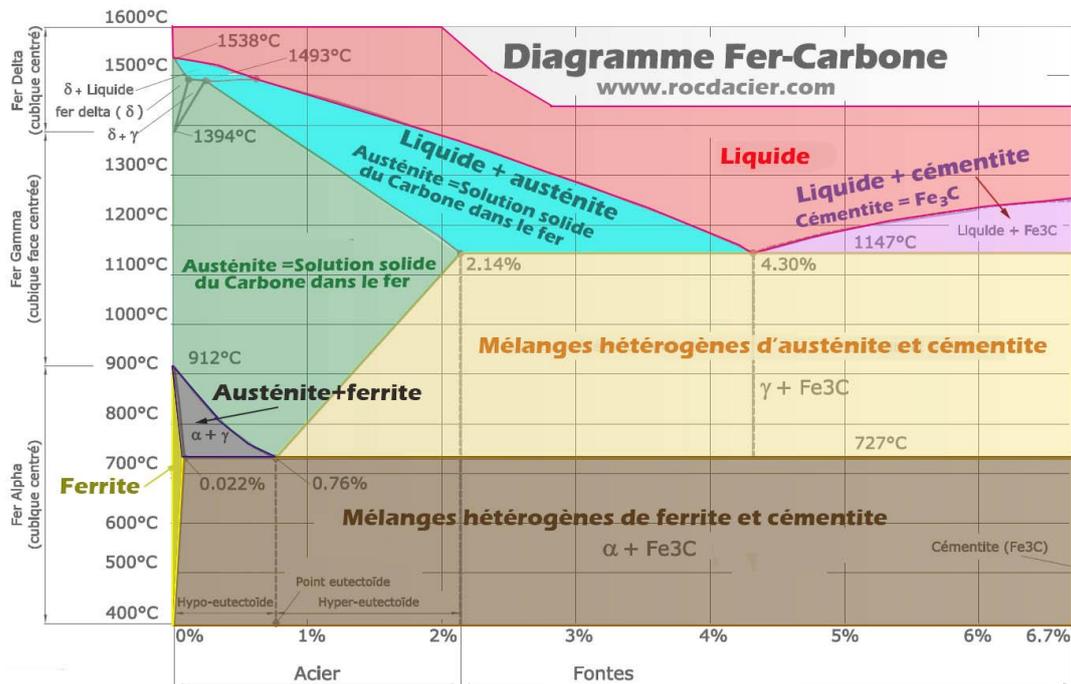


Figure II. 6: Diagramme fer-carbone. [23]

3.3 Différentes phases du système Fer-Carbone [24] :

3.3.1 Ferrite α :

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($\text{HB} \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$).

3.3.2 Ferrite δ :

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

3.3.3 Austénite γ :

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%$ C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

3.3.4 Cémentite (Carbone de fer $\text{Fe}_3\text{-C}$) :

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

3.3.5 Perlite :

Agrégat éutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850 \text{ MPa}$) et assez ductile ($A\% \approx 10$).

3.4 Fabrication d'acier [25] :

S'élabore actuellement de deux manières :

- dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur .
- dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique.

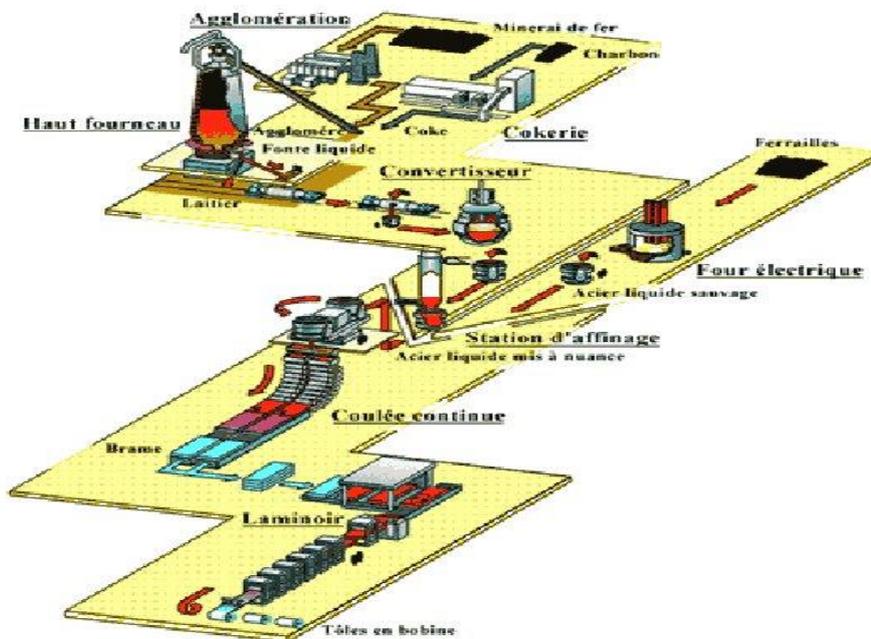


Figure II. 7: Chaîne d'élaboration d'acier. [26]

3.4.1 Cokerie :

De façon simplifiée, le coke est du carbone presque pur doté d'une structure poreuse et résistante à l'écrasement. Il est utilisé comme un puissant réducteur. Il est obtenu à partir de la houille, après que celle-ci ait été libérée de ses composants indésirables. Pour cela on l'a fait cuire, à l'abri de l'air, dans les fours de la cokerie à $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ durant 17 heures.

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et l'acier

En brûlant dans le haut fourneau, le coke apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai ainsi que le carbone nécessaire à sa réduction.



Figure II. 8: cokerie. [27]

3.4.2 Haut fourneau :

On y extrait le fer de son minerai. Minerai et coke solides sont enfournés par le haut, le gueulard. L'air chaud (1200 °C) insufflé à la base provoque la combustion du coke (carbone presque pur). Le monoxyde de carbone ainsi formé va réduire les oxydes de fer, c'est-à-dire prendra leur oxygène et, de ce fait, isoler le fer. Il se chargera cependant en carbone pendant son séjour dans le creuset et se transformera en fonte. La gangue est un produit secondaire du haut fourneau (c'est la part stérile du minerai de fer) ; elle est récupérée, à la sortie du haut fourneau, à l'état liquide, mêlée à d'autres oxydes. La densité moindre de ce résidu le fait flotter au-dessus de la fonte. Ce résidu est appelé laitier de haut fourneau et est principalement exploité pour la fabrication du ciment.

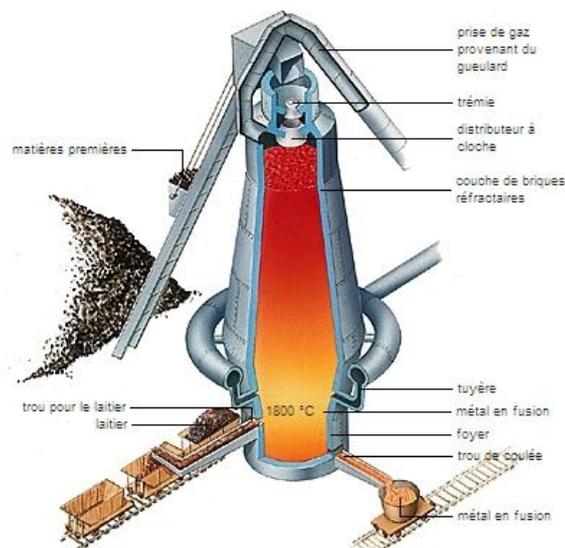


Figure II. 9: coupe d'un haut fourneau [27]

3.4.3 Convertisseur à l'oxygène :

C'est la conversion de la fonte en acier. La fonte en fusion est versée sur un lit de ferrailles. On brûle les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte en insufflant de l'oxygène pur. Cette combustion provoque une élévation de la température du bain qui passe de 1250 °C (fonte liquide) à plus de 1600 °C (acier liquide).



Figure II. 10: Convertisseur à l'oxygène [27]

3.4.4 Métallurgie en poche :

Le rôle de la métallurgie en poche consiste à mettre à nuance et à température l'acier liquide issu du convertisseur.

✚ Mise à nuance :

Elle comporte plusieurs étapes, toutes facultatives, et dont l'ordre peut changer :

- le calmage de l'acier sauvage qui va consommer l'oxygène dissous dans l'acier. Pour cela, on jette dans l'acier liquide de l'aluminium (pour les produits plats) ou du silicium (cas des produits longs) qui, en s'oxydant, vont transformer l'oxygène dissous en oxydes.
- le dégazage : l'acier va passer par un passage sous vide destiné à parfaire la décarburation entamée au convertisseur (dans ce cas-ci, il est nécessaire de conserver, au préalable, un minimum d'oxygène dissous). A cette étape on peut retrouver les opérations de déshydrogénation et, parfois, de dé-nitruration (abaissement de la teneur en hydrogène et azote respectivement) ;
- l'ajustement du laitier de poche, de manière qu'il ait la capacité d'absorber les impuretés comme les oxydes produits par le calmage ;
- l'affinage qui va ôter les derniers éléments indésirables, comme le soufre (désulfuration).
- l'ajout des éléments d'alliages.

✚ Mise à température :

La coulée continue demande typiquement des températures d'acier d'environ 30 °C au-dessus des liquides de l'alliage. Les moyens de réchauffage sont, soit le four électrique à poches, soit un procédé chimique comme l'aluminothermie. Il est également possible de travailler tout le temps très chaud, pour ne refroidir à la bonne température qu'au dernier moment.

3.4.5 Coulée :

✚ Coulée continue :

L'acier liquide est coulé, à environ 1560 °C, dans une lingotière en cuivre de section carrée, rectangulaire ou ronde (selon le demi-produit fabriqué).

Au contact des parois de la lingotière, le métal se solidifie instantanément et commence à former une peau solide. L'acier est ensuite tiré vers le bas par un jeu de rouleaux et d'extracteurs et il achève de se solidifier, grâce essentiellement à des jets d'eau pariétaux.

À cause du refroidissement intense, le métal subit une histoire thermomécanique, lors de son parcours dans la machine de coulée continue. En fonction de cet historique (influencé notamment par la vitesse de coulée, la forme de la machine, l'intensité du refroidissement), la qualité du produit est plus ou moins bonne et le sidérurgiste pourra vendre plus ou moins cher le produit.

✚ Coulée en lingots :

La coulée peut être également faite en lingotière. Ce procédé, peu performant en termes de mise au mille permet cependant l'obtention d'alliages spécifiques, comme les aciers non calmes.

L'acier est coulé et solidifié dans des moules en fonte : les lingotières. et une fois la solidification terminée, les lingots sont démoulés (le stripage). Après un réchauffage à 1 200 °C, ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en brames, ébauches de produits plats.

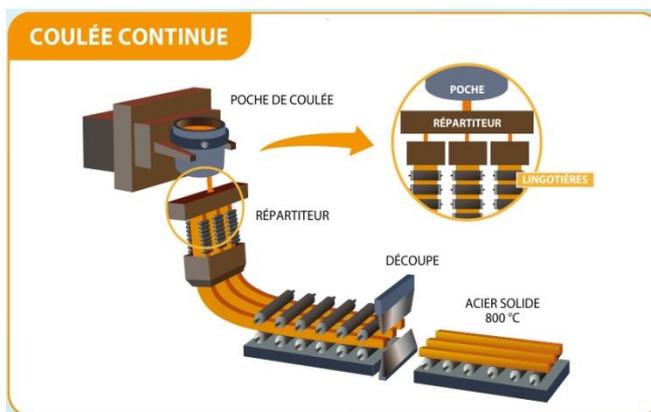


Figure II. 11: Coulée continue. [28]

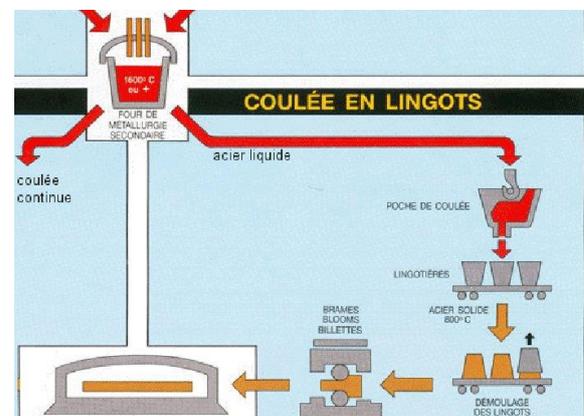


Figure II. 12: Coulée en lingots. [28]

3.5 Classification des aciers [25] :

Chaque pays a son mode de désignation des aciers. Le schéma ci-contre indique la désignation européenne selon les normes EN 10027 - 1¹⁷ et - 2¹⁸. Cette norme distingue quatre catégories :

- les aciers non-alliés d'usage général (construction) ;
- les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, etc. ;
- les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu ; les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, les roulements, etc. ;
- les aciers fortement alliés :
 - les aciers inoxydables,
 - les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forets.

3.5.1 Aciers non alliés :

Aciers non alliés d'usage général :

Ils sont destinés à la construction soudée, à l'usinage, au pliage, etc. On distingue :

- le type S qui correspond à un usage général de base (construction de bâtiment...) ;
- le type P pour usage dans les appareils à pression ;
- le type L pour les tubes de conduites ;
- le type E pour la construction mécanique ;
- le type R pour les rails.

La désignation de ces aciers comprend la lettre indiquant le type d'usage, suivie de la valeur de la limite élastique minimale (R_e) exprimée en méga pascals (MPa). À noter qu'il s'agit de la valeur à faible épaisseur, les résistances décroissant avec l'épaisseur.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G. La désignation peut être complétée par des indications supplémentaires (pureté, application dédiée, etc.).

Exemples :

- S185 (anciennement A33), $R_e = 185$ MPa
- S235 (anciennement A37, E24), $R_e = 235$ MPa
- E295 (anciennement A50), $R_e = 295$ MPa
- GE295, acier moulé, $R_e = 295$ MPa
- S355 J2 WP (anciennement A52, E36) $R_e = 355$ MPa .

✚ Aciers non alliés spéciaux (type C) :

La teneur en manganèse est inférieure à 1 %, et aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse. Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance.

Leurs applications courantes sont les forets (perceuses), ressorts, arbres de transmission, matrices (moules), etc.

Leur désignation comprend la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G.

Exemples :

- C45, acier non allié comportant un taux de 0,45 % de carbone ;
- GC22, acier moulé non allié comportant un taux de 0,22 % de carbone.

3.5.2 Aciers alliés :

✚ Aciers faiblement alliés :

La teneur en manganèse est supérieure à 1 % et aucun élément d'addition ne doit dépasser 5 % en masse. Ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

Exemples de désignation normalisée :

- 35NiCrMo16 : contient 0,35 % de carbone, 4 % de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusqu'à 600 °C ;
- 100Cr6 : 1 % de carbone et 1,5 % de Chrome. C'est l'acier typique utilisé dans les roulements à billes.

✚ Aciers fortement alliés :

Au moins un élément d'addition dépasse les 5 % en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, maraging (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique et pour la fabrication de coque de sous-marins), Hadfields (très grande résistance à l'usure), Invar (faible coefficient de dilatation).

Les aciers rapides spéciaux (ARS) font partie des aciers inoxydables.

3.5.3 Aciers inoxydables :

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la

Chapitre II : Généralités sur le cuivre et l'acier

propriété d'in oxydabilité, et au nickel, élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont classés en quatre familles : ferré tique, austénitique, martensitique et au sténo-ferré tique. Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus malléables et conservent cette propriété à très basse température ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Leurs applications sont multiples : chimie, nucléaire, alimentaire, mais aussi coutellerie et équipements ménagers. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

3.5.4 Aciers multi phases :

Ces aciers sont conçus suivant les principes des composites : par des traitements thermiques et mécaniques, on parvient à enrichir localement la matière de certains éléments d'alliage. On obtient alors un mélange de phases dures et de phases ductiles, dont la combinaison permet l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques. On citera, par exemple :

- les aciers Dual Phase qui sont la déclinaison moderne de l'acier damassé, mais où la distinction entre phase dure (la martensite) et phase ductile (la ferrite), se fait plus finement, au niveau du grain.
- les aciers duplex formés de ferrite et d'austénite dans des proportions sensiblement identiques.
- les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity), où l'austénite se transforme partiellement en martensite après une sollicitation mécanique. On débute donc avec un acier ductile, pour aboutir à un acier de type Dual Phase.
- les aciers damassés où des couches blanches ductiles pauvres en carbone absorbent les chocs, et les noires, plus riches en carbone, garantissent un bon tranchant.

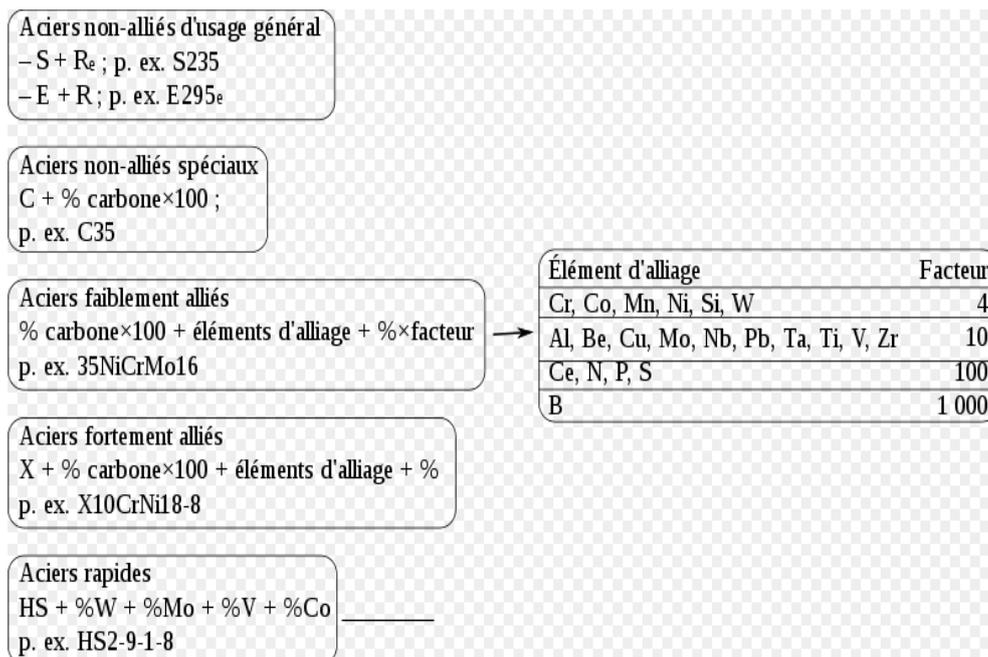


Figure II. 13: Désignations des aciers [25]

4 Conclusion :

Le cuivre et ses alliages ont de nombreuses applications industrielles, notamment les alliages cuivre zinc qui portent le nom de laiton. Ils forment un grand nombre d'alliages avec de bonnes caractéristiques mécaniques associées à une bonne résistance à la corrosion. Ils offrent une large gamme de propriétés intéressantes qui dépendent de la concentration en zinc ; et de tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large.

CHAPITRE III :
Techniques
expérimentales

1 Introduction :

L'étude de l'évolution microstructurale et les propriétés mécaniques concernant les fils d'acier doux et les fils de cuivre tréfilés au cours de la déformation plastique par tréfilage a été menée à l'aide de diverses méthodes expérimentales. Le caractère innovant de ce travail repose sur l'utilisation combinée des techniques de caractérisation microstructurale indirecte telles que le microscope optique, microscope à balayage électronique, essai de traction et mesure de la micro-dureté Vickers.

✓ Remarque :

L'expérimentation devrait se faire au sein du laboratoire de structures de la faculté. Vue notre incapacité à effectuer des manipulations en raison de la situation sanitaire dans le monde (COVID-19), nous avons effectué des recherches et trouvé des mémoires contenant des expérimentations similaires à notre travail. Nous citons quelques unes :

- Thèse de doctorat présentée par Mr. **Toufik DJIMAOUI**. «**Étude du comportement structural et mécanique des fils tréfilés en acier doux destinés à la fabrication des électrodes de soudure à TREFISOUD** ». Soutenue le 17/01/2019. Université Mohammed Khider-Biskra. [1]
- Mémoire de fin d'études présenté par Mr **AMIRAT Boukhalfa**, «**Étude et caractérisation mécanique du fil électrode à base de Cu-Zn utilisé sur la machine ROBOFIL 290P (BCR)** ». Soutenue en (2012/2013). Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou. [2]
- Mémoire de fin d'études présenté par Melle **Imene ABDOU** et **Ouarda FARHAT**, «**étude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés de l'ENICAB-Biskra** ». Soutenue le 20/09/2020. Université Mohammed Khider-Biskra. [3]

2 Acier :

Nous nous sommes inspirées de la thèse [1].

2.1 Présentation du matériau étudié :

2.1.1 Fil machine :

L'acier doux choisi a été fourni par la société de tréfilage et de fabrication des produits de soudage TREFISOUD. Il est très utilisé par l'entreprise pour la fabrication des électrodes de soudure. Ils ont utilisés un fil machine d'acier sous forme de bobines dont le diamètre du fil est environ 5.5 mm obtenu à partir du métal liquide selon le procédé CLC (coulée et laminage continu).

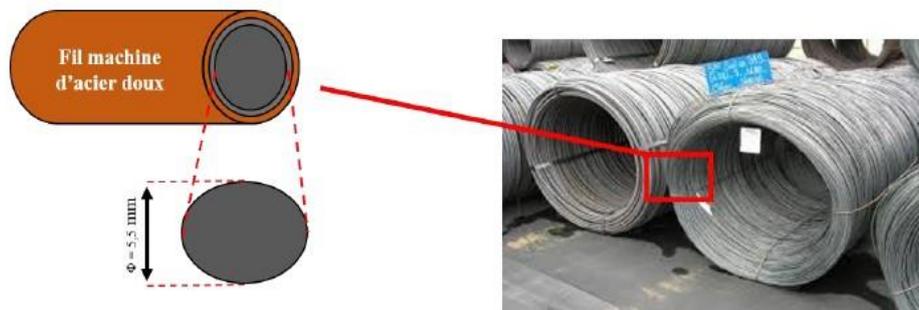


Figure III. 1: Fil machine d'acier doux sous forme des bobines.

La composition chimique exacte du fil machine est donnée dans le tableau III.1.

Tableau III. 1: La composition chimique de fil machine (massique)

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0.071	0.087	0.45	0.008	0.014	0.003	0.018	0.014	99.3

2.1.2 Fils tréfilés :

Les différents fils étudiés sont issus du tréfilage de l'état initial non déformé (fil machine) présenté ci-dessus. Ils ont été réalisés par tréfilage industriel sur une tréfileuse multi-passe. En premier lieu le fil à tréfiler passe du diamètre initial $d_i=5.5\text{mm}$ jusqu'au diamètre $d=4\text{mm}$ par une tréfileuse de trois passes.

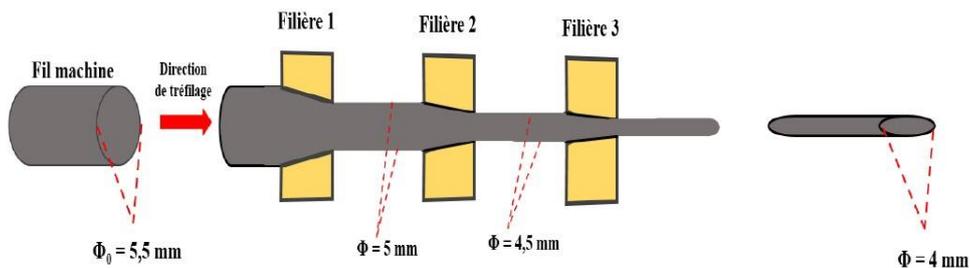


Figure III. 2: Schéma explicatif d'une Tréfileuse à trois passes.

Chapitre III : Techniques expérimentales

En deuxième lieu le fil passe du diamètre $d=4\text{mm}$ jusqu'au diamètre final $d_f=3.25\text{mm}$ par une tréfileuse de quatre passes.

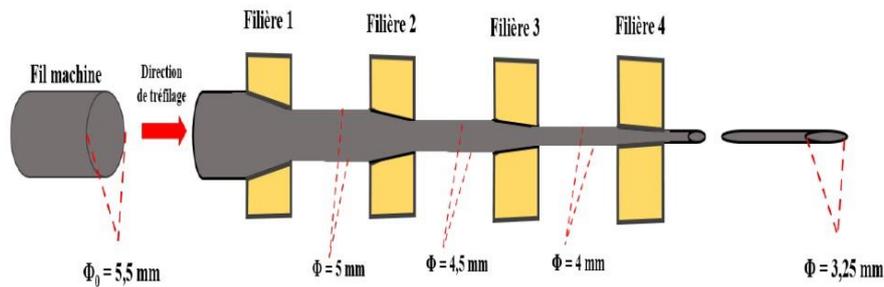


Figure III. 3 : Schéma explicatif d'une Tréfileuse à quatre passes.

Les lubrifiants utilisés sont des savons à base de calcium, type X8G pour les deux premières passes et de savon à base de sodium pour le reste des passes.

Les taux de déformation des fils tréfilés étudiés sont calculés à partir de l'équation (6) :

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \dots \dots (6)$$

ε : Taux de réduction en (%).

S_0 : Section initial du fil machine en (mm^2).

S : Section finale du fil tréfilé en (mm^2).

Tableau III. 2: Les taux de déformation des fils

Diamètre (mm)	Taux de déformation (%)
Fil machine = 5.5	0
$\Phi_1 = 4.00$	$\varepsilon_1 = 27$
$\Phi_2 = 3.25$	$\varepsilon_2 = 41$

2.2 Préparation des échantillons :

2.2.1 Découpage et enrobage :

Les échantillons (fil machine, fils tréfilés, métal déposé) sont découpés avec des coupes transversales et longitudinale de 1.5 cm de longueur.

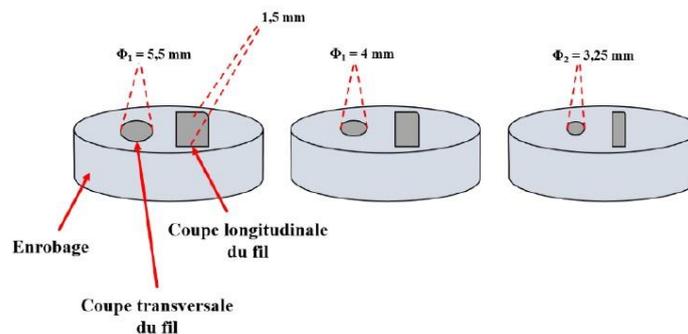


Figure III. 4: Echantillons coupés et enrobés à froid.

Pour La manipulation des échantillons prélevés, cela a nécessité leur enrobage à froid dans des résines époxy des durcissant à froid. Cet enrobage permet de faciliter le polissage manuel de petits échantillons.

2.2.2 Polissage :

Pour les observations métallographiques, les échantillons enrobés sont polis mécaniquement sur polisseuse mécanique type Struer labopol-2, avec papiers abrasifs de différentes granulométries allant de 120 au 4200, suivi d'un tissu feutré avec addition du lubrifiant et de l'alumine de $6\mu\text{m}$ au $3\mu\text{m}$. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et enfin séchés.

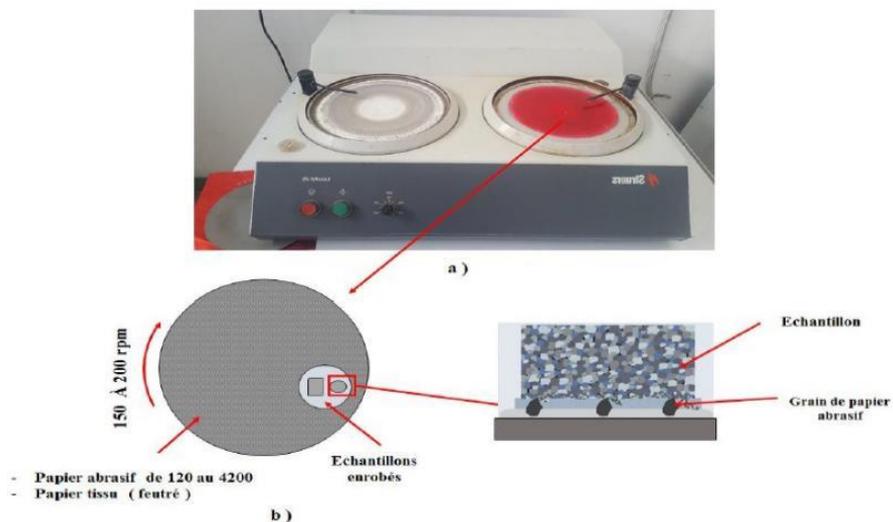


Figure III. 5: Polissage mécanique

Les échantillons sont attaqués chimiquement par réactif appelé nital 4% (dilution d'acide nitrique dans l'éthanol) entre 10 et 50 secondes.

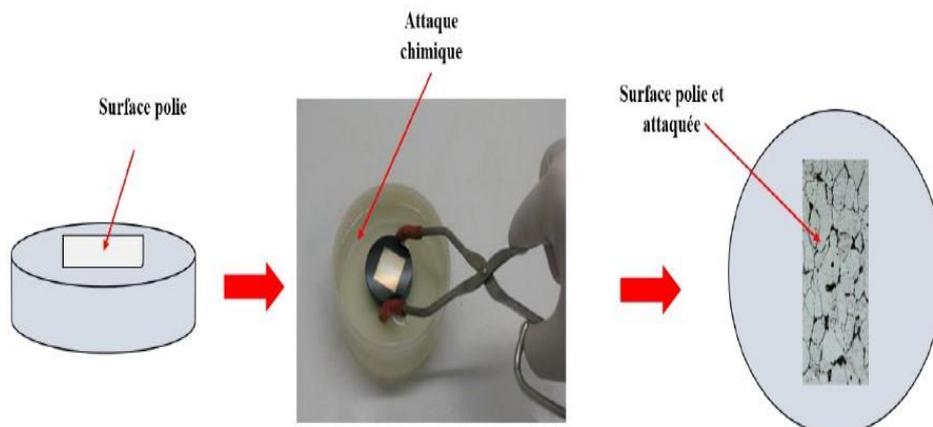


Figure III. 6: L'attaque chimique des échantillons

2.3 Caractérisation des propriétés physiques :

2.3.1 Microscope optique :

La microscopie optique a été utilisée dans ce travail comme première technique d'observation de l'évolution de la microstructure de différentes formes d'aciers doux. Les observations sont effectuées à l'aide d'un microscope optique de marque Nikon Eclipse LV100D-U dont l'agrandissement va de 50 à 1500 fois. Figure II.14 montre le microscope optique, utilisé pour l'observation de nos échantillons.

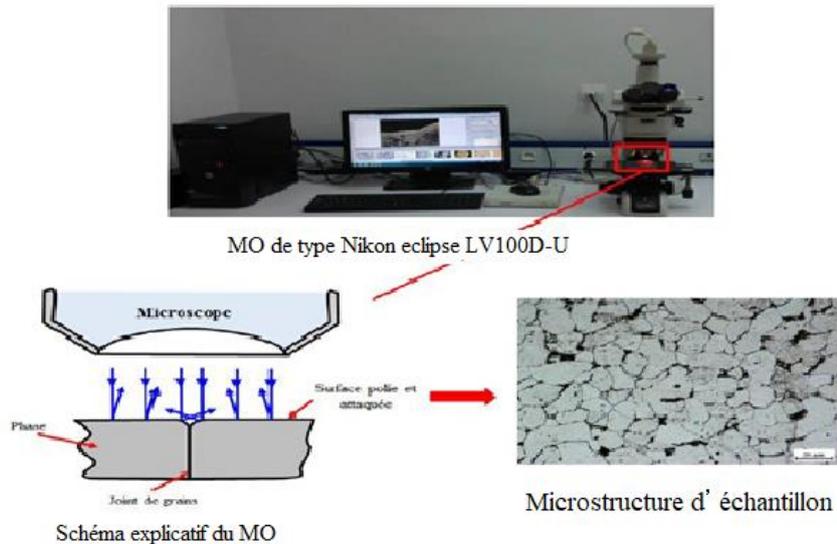


Figure III. 7: Microscope optique (MO)

2.3.2 Microscope électronique à balayage (MEB) :

Le MEB utilisé dans ces travaux est un appareil de type Zeiss Gemini-SEM 300.

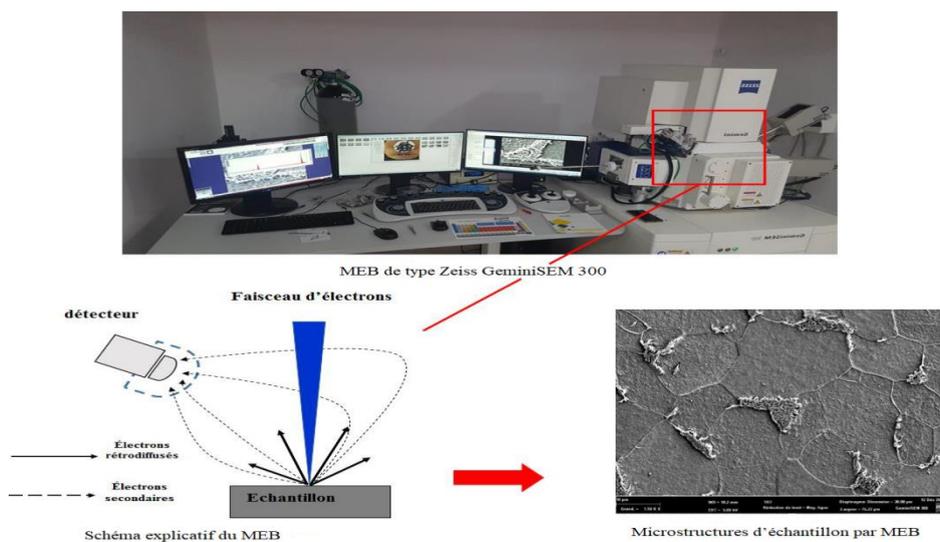


Figure III. 8: Microscope électronique à balayage (MEB)

Chapitre III : Techniques expérimentales

Les observations réalisées au MEB sont basées sur le balayage des échantillons par un faisceau d'électrons de haute énergie. L'interaction de ce faisceau avec l'échantillon va conduire à l'émission d'électrons secondaires qui se rétrodiffusent. L'image obtenue dépend du type d'électrons émis recueillis :

- Les électrons secondaires sont éjectés des couches superficielles jusqu'à 50 Angströms. Ils permettent d'obtenir des images très détaillées de la topographie des échantillons.
- Les électrons rétrodiffusés sont issus du faisceau incident et peuvent donner des informations sur les couches supérieures de la surface de l'échantillon jusqu'à 100 nm.

Les électrons primaires interagissent effectivement avec les atomes d'acier étudié et leur taux de rétrodiffusion dépend du numéro atomique des éléments constitutifs d'échantillon. Ceci permet de mettre en évidence des différences de composition chimique dans les échantillons. Il est notamment possible de révéler les différentes phases d'échantillon.

2.4 Caractérisation des propriétés mécaniques :

2.4.1 La micro-dureté Vickers :

Dans cette étude ils ont utilisé La micro-dureté Vickers. L'essai Vickers est une pyramide à base carrée, dont les faces forment entre elles des angles de 136°. La dureté est le rapport de la force appliquée (en Kgf) sur la surface de contact (μm^2), c'est-à-dire la pression moyenne dans le contact. L'épaisseur de l'échantillon doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale des empreintes (soit environ 7,5 fois la profondeur d'enfoncement h) et la distance entre les centres de deux empreintes successives supérieure à 6 fois la diagonale pour éviter l'interaction entre celles-ci.

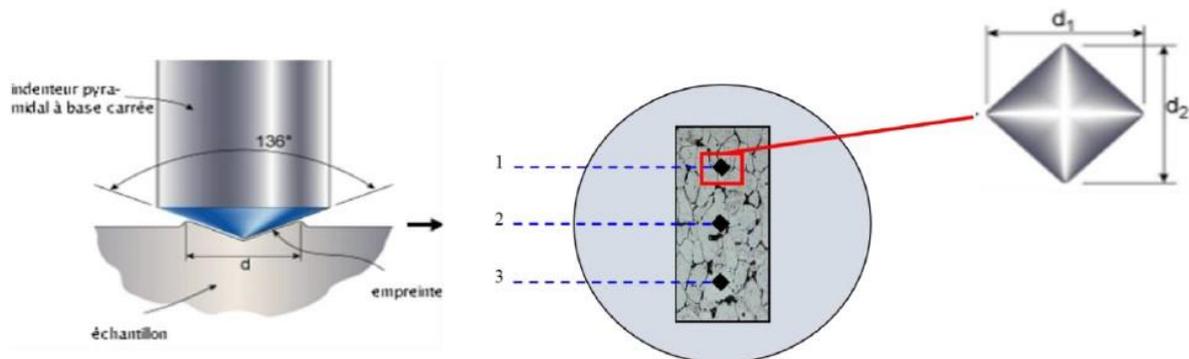


Figure III. 9: Schéma explicatif de mesure la micro-dureté Vickers

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode de Vickers et sous une charge de 100 g. Une moyenne de mesure est calculé à partir de trois essais sur la coupe longitudinale de chaque échantillon. Qui est nécessaire pour déterminer HV à partir d'un double clic sur le bouton de HV de l'appareil, où bien à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1854.4 \frac{p}{d^2} \quad (7)$$

P : Charge appliquée.

d : Longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

2.4.2 Essai De Traction :

Les caractéristiques mécaniques des fils d'aciers ont été mesurées par essai de traction. Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction de la marque Zwick-Roell équipée d'une cellule de force de 5 kN et pilotée par le logiciel *testXpert*. Il permet l'acquisition et le dépouillement des données. Un extensomètre du type *makroXtens* a été utilisé afin de mesurer les allongements.

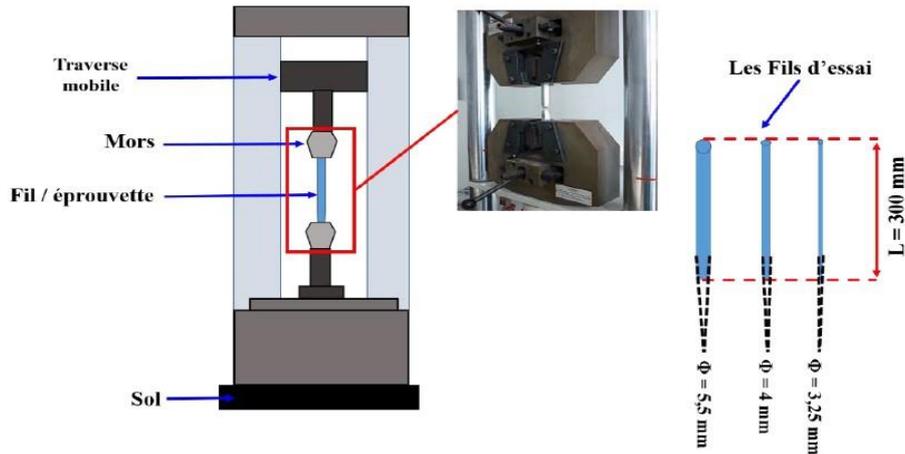


Figure III. 10: Dispositif d'essai en traction

Les éprouvettes testées présentent une longueur de 300 mm entre mors, leur diamètre dépendant de leur écrouissage. La longueur utile des éprouvettes entre les pinces de l'extensomètre est quant à elle de 100 mm. Les mesures ont été réalisées à température ambiante et à vitesse de traverse constante, 36 mm/min soit une vitesse de déformation de l'ordre de 6.10^{-3} s^{-1} . Les grandeurs caractéristiques mesurées sont la résistance mécanique maximale (R_m), la limite d'élasticité à 0.2% ($R_p0.2$) et l'allongement total à rupture (A_t)

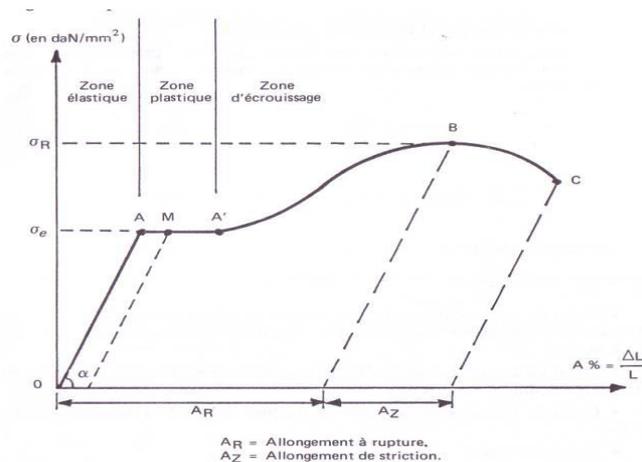


Figure III. 11: Courbe conventionnelle de traction

3 Cuivre :

Nous nous sommes inspirées des PFE [2] et [3].

3.1 Présentation du matériau étudié :

Pour réaliser cette étude ils ont opté pour le cuivre pur sous forme du fil machine de diamètre initial égal à 8.00 mm et de trois fils tréfilés, de diamètre ($d_1= 2.75\text{mm}$, $d_2= 1.76\text{mm}$ et $d_3=1.35\text{mm}$), fourni par l'Entreprise des Industries du Câble de Biskra (ENICAB).



Figure III. 12: Fil machine et fils tréfilés de cuivre étudiés

La composition chimique du fil machine, sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau III. 3: Composition chimique du fil de cuivre (massique %)

Cuivre	Bismuth	Antimoine	Arsenic	Fer	Nickel	Etain	Soufre	Zinc	Plomb
99.9	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0.002	0.002	0.004	0.005

Le fil machine est directement prélevé des bobines des fournisseurs de l'ENICAB. Quant aux fils tréfilés, ils ont été sélectionnés et prélevés depuis la chaîne de tréfilage par le personnel de l'ENICAB.

Les diamètres de fils tréfilés et leurs taux de déformation sont enregistrés dans le tableau III.2 :

Tableau III. 4: Les taux de déformation des fils

Diamètre du fil (mm)	ϵ (%)
8.00	0
2.75	88.19
1.76	95.16
1.35	97.15

✚ **Remarque :** Toutes les étapes que nous avons citées, vont être répétées avec le cuivre.

3.2 Préparation des échantillons :

3.2.1 Découpage et enrobage :



Figure III. 13: Les échantillons découpés et enrobés

3.2.2 Polissage :

Pour les observations au microscope optique, ils ont polis les échantillons enrobés sur une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260 au laboratoire de physique de l'université de Biskra.



Figure III. 14 : Polisseuse mécanique de type PRESI MECAPOL P260

Les échantillons sont attaqués chimiquement par le réactif HNO_3 (acide nitrique) concentrée à 65 %, pour une durée d'attaque de quelques secondes.

3.2.3 Traitement thermique :

Le traitement thermique des échantillons étudiés ont été réalisés dans un four électrique programmable de type «WSU 100» au niveau de laboratoire physique de l'ENICAB de Biskra.

Les températures de recuit appliquées aux échantillons sont : $T_1=150\text{ C}^\circ$, $T_2=250\text{ C}^\circ$ et $T_3=300\text{ C}^\circ$ pendant une heure pour chaque température, puis trempés à l'eau.

3.3 Caractérisation des propriétés physiques :

3.3.1 Microscope optique :

Cette analyse a été réalisée au niveau du laboratoire de physique de l'université de Tizi Ouzou.

Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique de type Nikon éclipse e200.



Figure III. 15: Microscope optique Nikon éclipse e200

3.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) :

Le principe général de MEB 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.



Figure III. 16: Microscope électronique à balayage (MEB)

3.4 Caractérisation des propriétés mécaniques :

3.4.1 Essais de traction :

Les essais de traction sont réalisés à la température ambiante sur les fils de cuivre étudiés avec une vitesse de déplacement de 2mm/min. Les essais sont effectués au niveau du laboratoire physique de l'ENICAB de Biskra, sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100.



Figure III. 17: Machine de traction ZWICK-ROELL Z100 (ENICAB Biskra)

3.4.2 La micro-dureté Vickers :

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° .



Figure III. 18: Empreintes du micro-duromètre observées sur l'échantillon

Chapitre III : Techniques expérimentales

4 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes étapes de l'expérimentation de l'acier ainsi que du cuivre.

CHAPITRE IV :
Résultats et
Interprétations

1 Introduction :

Ce chapitre regroupe tous les résultats obtenus qui sont consacrés à caractériser le fil machine du cuivre et d'acier et les fils tréfilés à l'état initial ou nous avons suivi l'évolution de leurs microstructures et leurs propriétés physiques et électriques.

Après cette synthèse ; nous présentons l'évolution de la texture de déformation et les propriétés mécaniques (essais de traction et de micro dureté) lors la déformation a froid par tréfilage des fils tréfilés.

2 Acier :

Nous sommes inspirées à partir des travaux de la thèse de doctorat [1] , que le comportement structural et mécanique des fils tréfilés en acier doux destinés à la fabrication des électrodes de soudure à TREFISOUD est réalisé dans la démarche suivante.

2.1 Fil machine :

2.1.1 Analyses métallographiques :

✚ Observation au microscope optique :

La figure IV.1 illustre des micrographies optiques de la coupe longitudinale et de la coupe transversale du fil machine. Comme on peut le voir sur les deux coupes, la microstructure du fil machine est ferrito-perlitique. Cette composition microstructurale du fil machine était attendue ; en effet, d'après les données du fournisseur ce fil était élaboré à partir d'un acier doux. On remarque, clairement, que la phase ferritique est nettement majoritaire par rapport à la phase perlitique. Cette dernière apparaît sous forme de petits grains noirs éparpillés au milieu d'une large masse ferritiques.

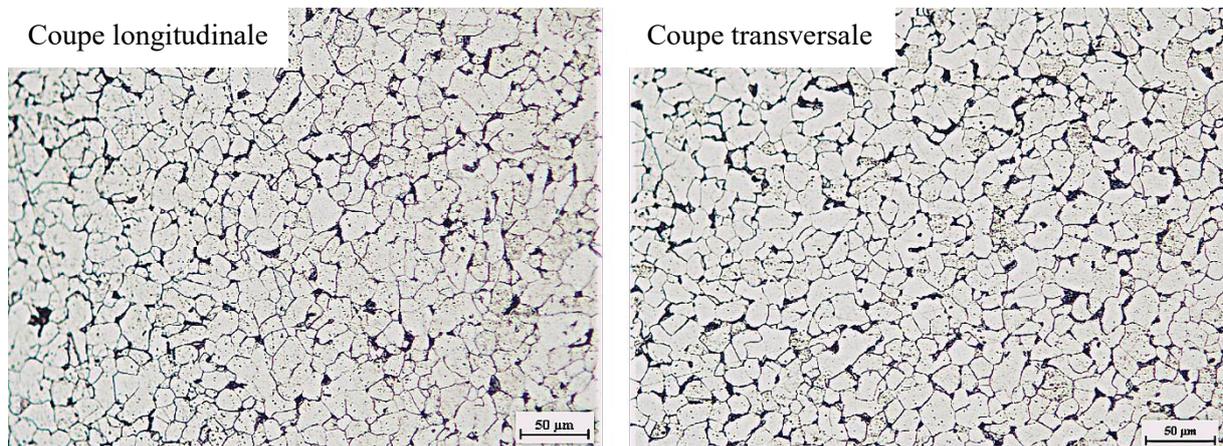


Figure IV. 1: Microstructures par microscope optique de fil machine

✚ Observation au microscope électronique à balayage :

Le MEB montre aussi une microstructure ferrito-perlitique (figure IV.2). Cependant, cette analyse laisse apparaître plus clairement l'hétérogénéité qui existe dans la taille des grains

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

feritiques et aussi dans les grains perlitiques. Pour la phase ferritique le nombre des grains de grandes tailles est nettement supérieur à celui des grains de petites tailles. En revanche, c'est à l'inverse pour la phase perlitique, ce sont les grains de petites tailles qui sont plus nombreux que les gros grains.

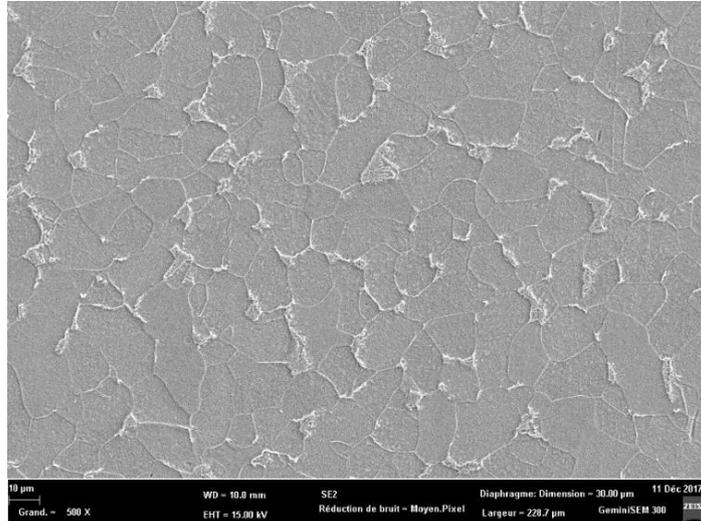


Figure IV. 2: Micrographie au Microscope électronique à balayage (M.E.B) du fil machine

2.1.2 Propriétés mécaniques :

Les valeurs des mesures de la micro-dureté Vickers et les résultats de l'essai de traction sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 1: Valeurs des propriétés mécaniques mesurées

HV(0.1kg)	ΔL (%)	R_m (N/mm ²)
138	65	420

D'après la valeur de la micro-dureté (138 HV) et de la résistance mécanique maximale (420 N/mm²), on confirme que l'acier à partir duquel est élaboré le fil machine est un acier doux. On peut même l'assimiler à un acier très doux d'après la valeur de son allongement à la rupture.

2.2 Fil tréfilé :

2.2.1 Analyses métallographiques :

🔍 Observation au microscope optique :

En comparaison de l'état tréfilé avec l'état initial (figure IV.3), on distingue que l'état tréfilé se manifeste par un allongement de grains dans le sens de la déformation parallèlement à l'axe du tréfilage (sur la section longitudinale) et un affinement de grains sur la section transversale. L'allongement des grains ferritiques est très visible à la déformation de 27% et a beaucoup augmenté à la déformation de 41%. Par contre, l'allongement des grains perlitiques n'a pu être discernable au microscope optique qu'à la déformation de 41%.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Donc la phase ferritique se déforme dès la première passe de tréfilage et se poursuit successivement à chaque passe suivante. La phase perlitique ne commence à se déformer qu'après quelques passes de tréfilage ou la déformation devient suffisante pour pouvoir la déformer. De manière prédictive, on peut dire que les modifications microstructurales induites par le tréfilage auront des répercussions sur les autres propriétés des fils tréfilés.

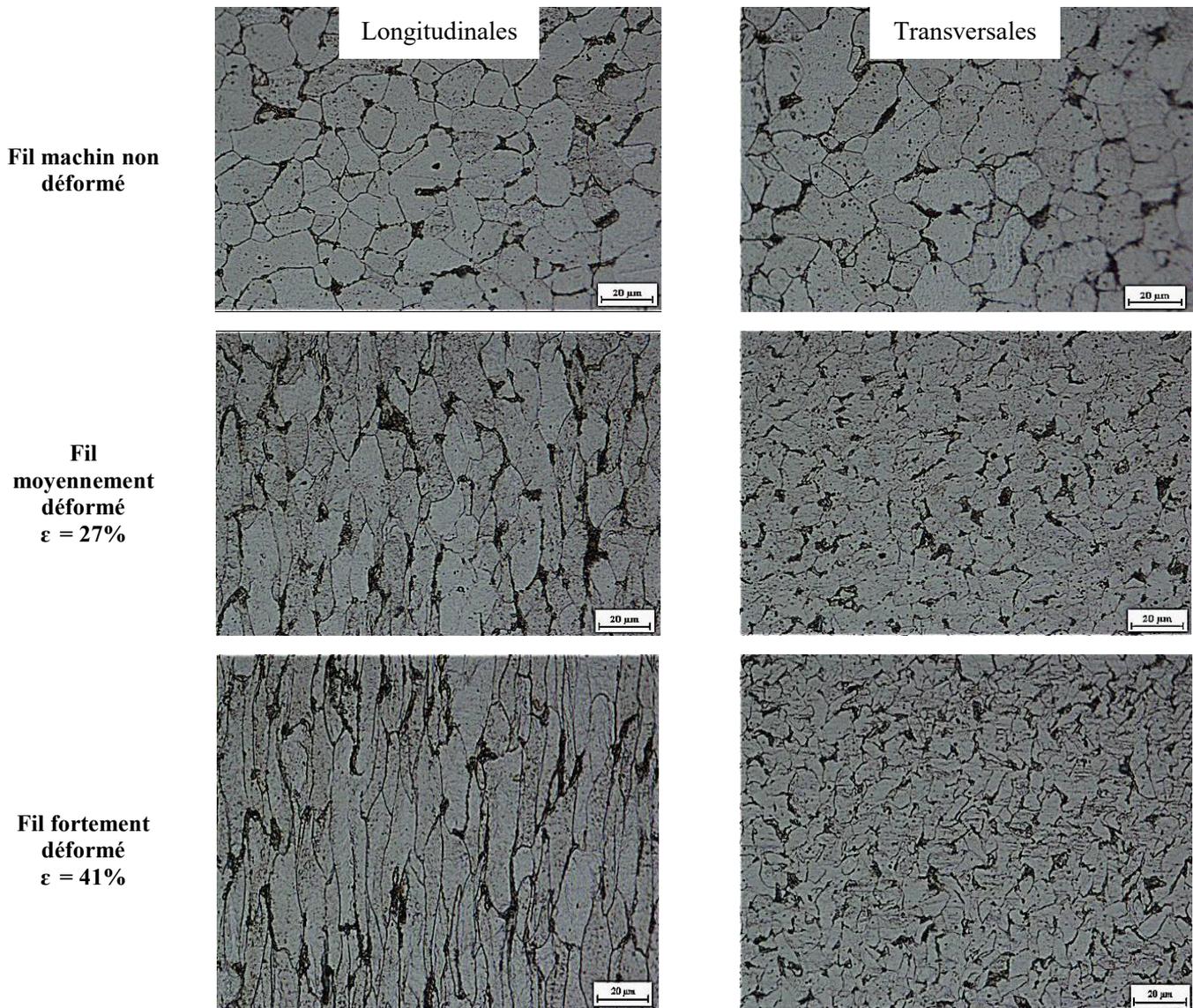


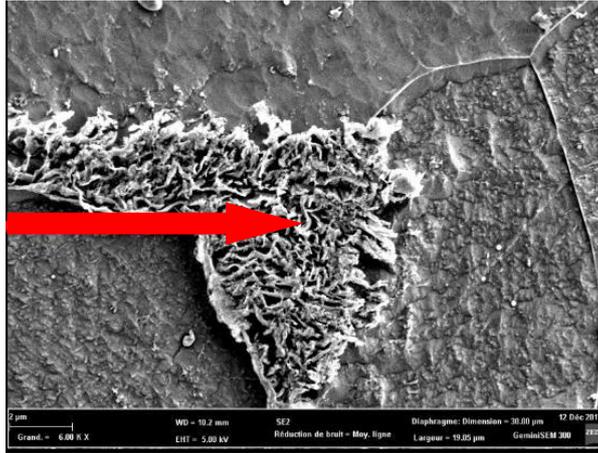
Figure IV. 3: Microstructures par microscope optique de fil machine et des fils tréfilés

➦ Observation au microscope électronique à balayage :

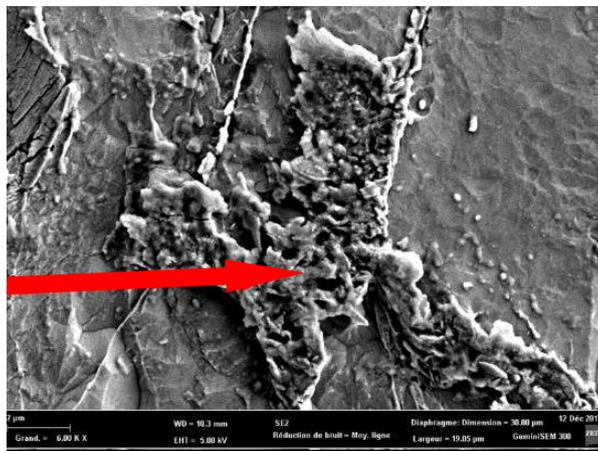
L'observation au MEB permet de mieux voir l'évolution de la taille et la morphologie des grains de chaque phase après déformation.

Sur les micrographies (figure IV.4), on voit plus clairement l'allongement des gains perlitiques, dans le sens de l'axe de tréfilage, après la deuxième déformation (ε_2). Des grossissements plus grands ont mis en évidence le rétrécissement de la distance interlamellaire de la phase perlitique déformée.

a) Fil machin non déformé



b) fil moyennement déformé
 $\epsilon = 27\%$



c) Fil fortement déformé
 $\epsilon = 41\%$

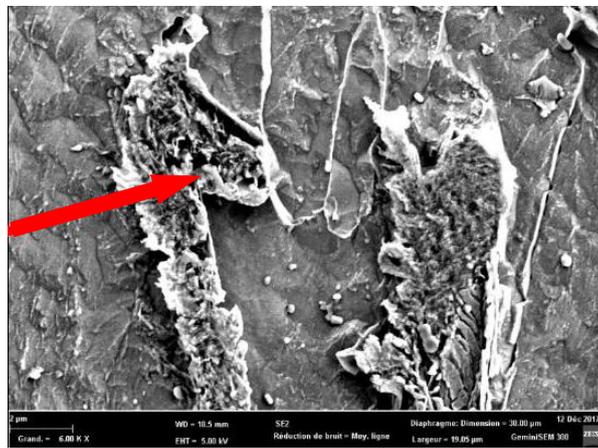


Figure IV. 4: Micrographies MEB vues longitudinales

Après les observations précédentes, on conclue qu'on fonction du tau de déformation appliqué, c'est la phase ferritique (plus douce) qui se déforme en premier, et en augmentant la déformation, la phase perlitique (plus dure) se déforme à son tour.

2.2.2 Propriétés mécaniques :

L'évolution des propriétés mécaniques des fils tréfilés est illustrée par les figures IV. 5, IV. 6 et IV. 7. On constate une augmentation de la dureté et la résistance mécanique maximale et la diminution de l'allongement à la rupture des fils tréfilés. Ceci traduit un certain durcissement

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

du fil tréfilé qui est expliqué, d'une part par l'effet des contraintes internes induites par la déformation et d'autre part, par le phénomène d'écrouissage durant lequel des dislocations sont introduites lors de la déformation plastique.

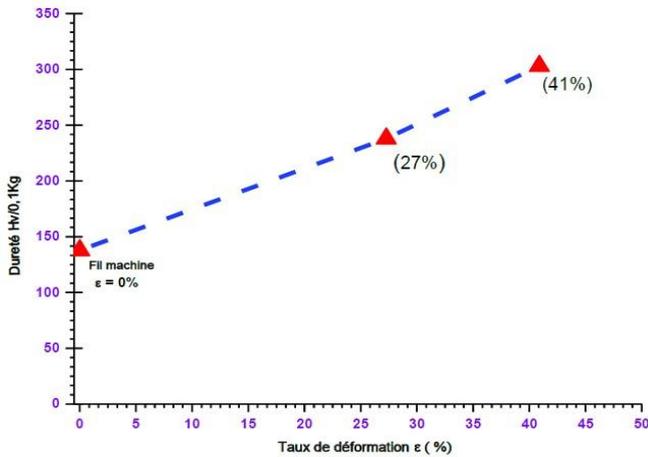


Figure IV. 5: Evolution de la micro-dureté des fils tréfilés en fonction du tau de déformation

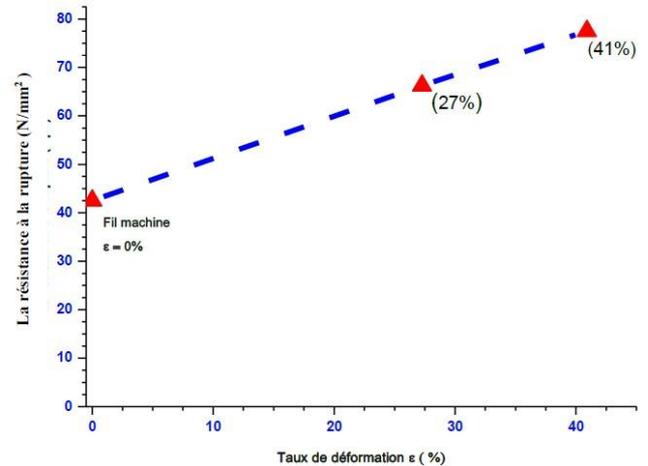


Figure IV. 6: Evolution de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation

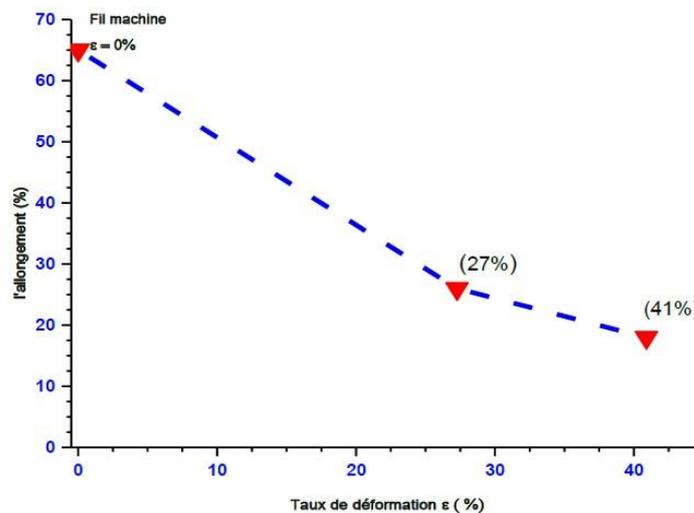


Figure IV. 7: Evolution de l'allongement en fonction du taux de déformation

❖ Conclusion :

Ce mode de déformation (le tréfilage) aide au développement et au renforcement de la fibre sur toute la section transversale du fil tréfilé. Et à partir d'une certaine déformation cette fibre se développera plus en cœur qu'en périphérie du fil. Et on constate l'augmentation de la micro-dureté et de la résistance mécanique maximale et la diminution de l'allongement à la rupture du fil tréfilé par rapport au métal du fil machine.

3 Cuivre :

Nous sommes inspirées d'Étude et caractérisation mécanique du fil électrode à base de Cu-Zn utilisé sur la machine **ROBOFIL 290P (BCR)** [2] , ainsi que l'étude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés de **P'ENICAB-Biskra** [3] que les deux résultats micrographiques et mécaniques sont élaborés et présentés dans notre travail.

3.1 Résultats micrographiques :

3.1.1 Observation par microscopie optique :

La micrographie par microscopie optique (Nikon éclipse e200), nous a montré l'image de la surface frontale et longitudinale des fils.

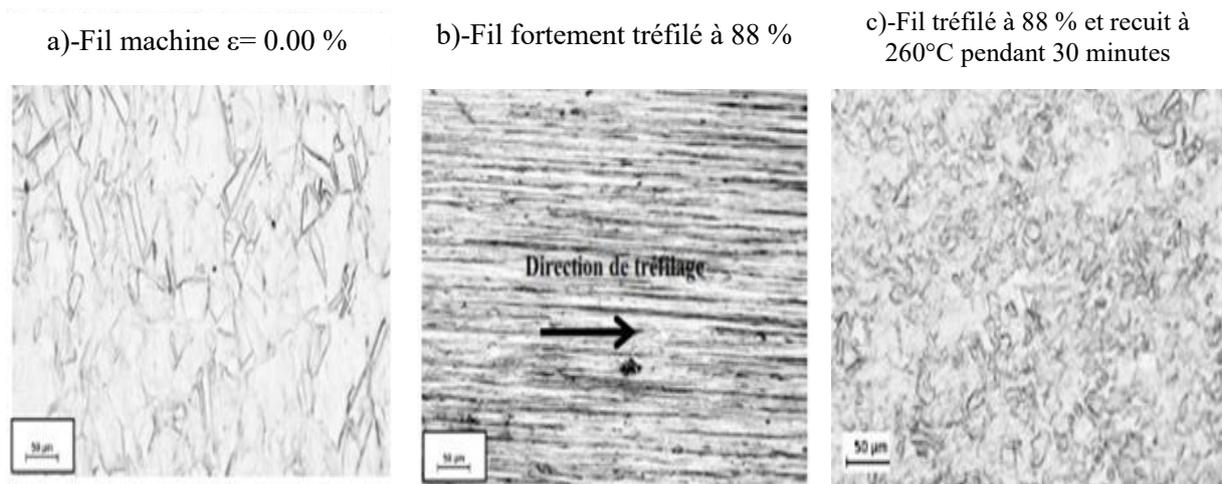


Figure IV. 8: Évolution de la microstructure du fil en cuivre

Les examens réalisés par Baira montrent que la microstructure du fil machine présente une forme équiaxe des grains (figure IV.8 .a). En revanche, dans le plan longitudinal des fils tréfilés, les grains sont allongés suivant l'axe du tréfilage. Cet allongement augmente avec le taux de déformation et conduit à une microstructure fibrée (formation de texture) pour les plus forts taux de déformation (figure IV.8 .b). Le recuit à 260°C pendant 30 minutes permet de déclencher le mécanisme de recristallisation ce qui conduit à l'élimination totale de la microstructure écrouie des grains déformés. Les grains obtenus sont de taille hétérogènes et relativement plus fins pour le cas du fil fortement déformé (figure IV.8 .c) [4].

3.1.2 Observation MEB du fil :

L'observation de la structure du fil au microscope électronique à balayage nous a permis d'examiner l'état de surface du fil.

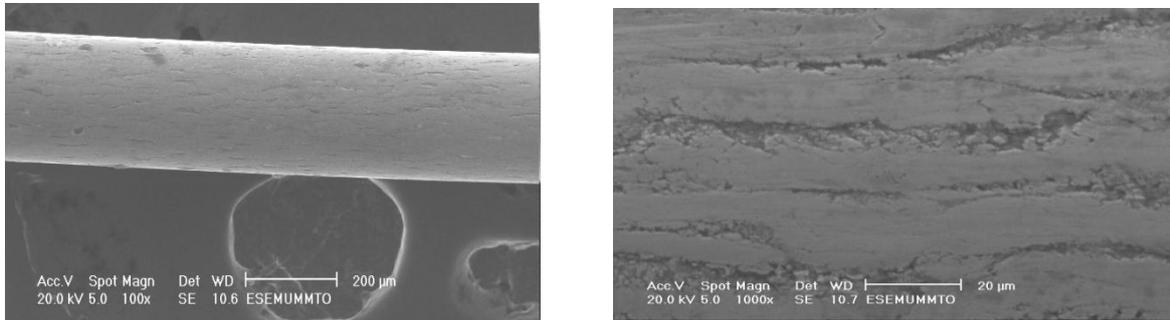


Figure IV. 9: Images prises par le MEB du fil tréfilé

Les images prises par le MEB après observation surfacique de fil nous renseignent davantage sur le procédé de fabrication de fil électrode que la surface du fil est déformé à cause de fait d'étirage.

3.2 Résultats des essais mécaniques :

3.2.1 Essai de traction :

La figure IV.10 présente l'essai de traction réalisé sur le fil machine.

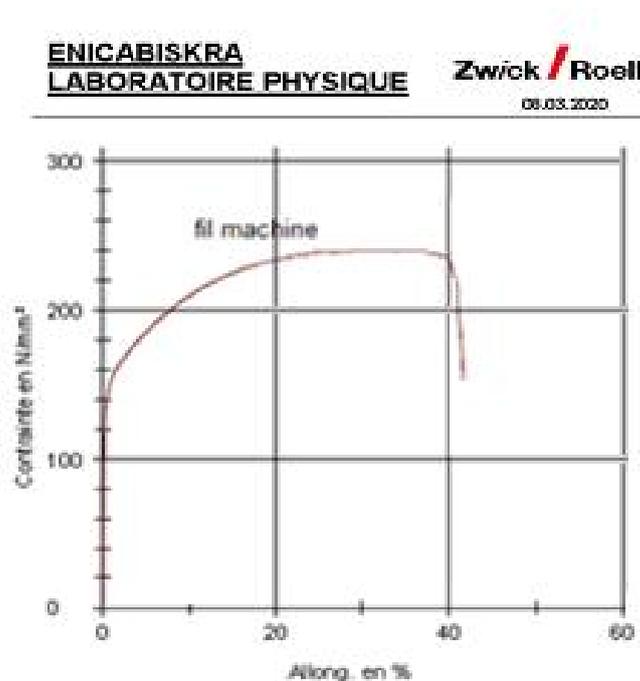


Figure IV. 10: Essai de traction du fil machine du cuivre

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Le tableau IV.2 regroupe les résultats des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés avec différents taux de déformation.

Tableau IV. 2: Propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre fortement tréfilés à l'état initial

Propriétés mécaniques	Taux de déformation (%)			
	Fil machine	ϵ 1 (88.19)	ϵ 2 (95.16)	ϵ 3 (97.15)
R_e 0.2 (N/mm ²)	130.29	135.93	115.01	121.80
Allongement à la rupture(%)	41.57	35.80	33.87	40.16
Résistance à la traction (N/mm ²)	239.77	257.84	255.75	252.32
Charge de rupture (kN)	12.20	1.53	0.62	0.36

D'après le tableau IV.2, on trouve que la limite élastique du fil machine de cuivre est égal à 130.29 N/mm², alors celle des fils fortement déformés varie entre 115.01 à 135.93 N/mm².

La figure IV.11, montre l'évolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation. On observe que les valeurs de la résistance à la traction des trois fils fortement tréfilés sont proches les unes des autres et elles sont plus grandes que la résistance à la traction du fil machine (non déformé). Ceci est expliqué par l'écroutissage induit par le processus de tréfilage. En effet, plus la déformation est importante plus l'écroutissage induit est important plus sera donc important l'effort de toute déformation ultérieure.

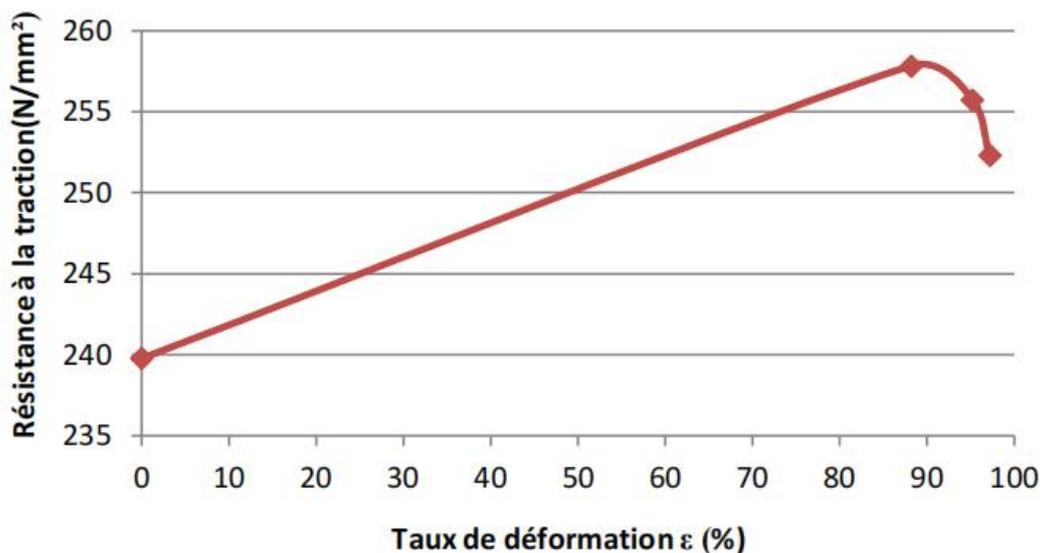


Figure IV. 11: Evolution de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation des fils en cuivre.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

La figure IV.12, représente la variation de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation. D'après cette figure on observe que les valeurs de l'allongement à la rupture des trois fils fortement tréfilés sont relativement proches à celle du fil machine.

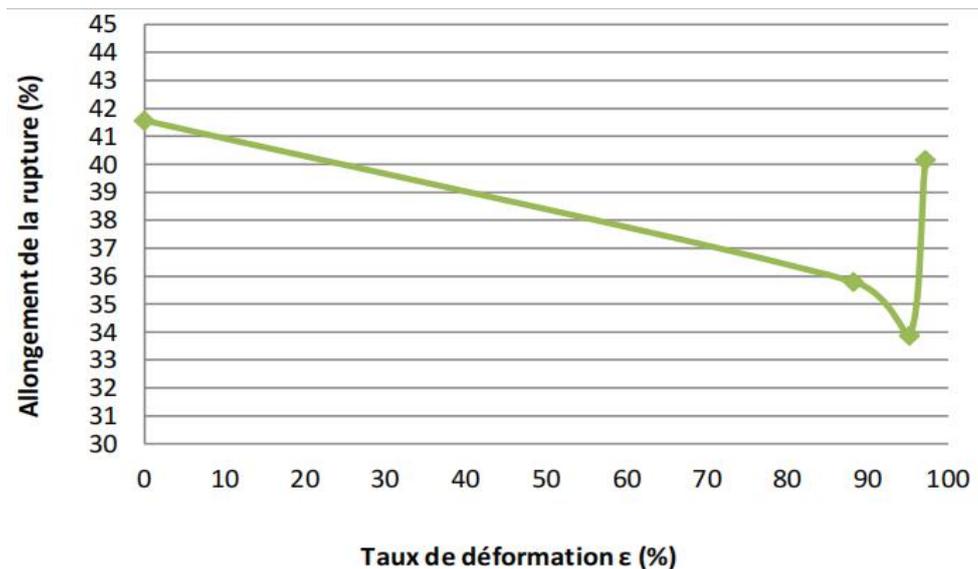


Figure IV. 12: Evolution de l'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation des fils en cuivre

La figure IV.13 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.

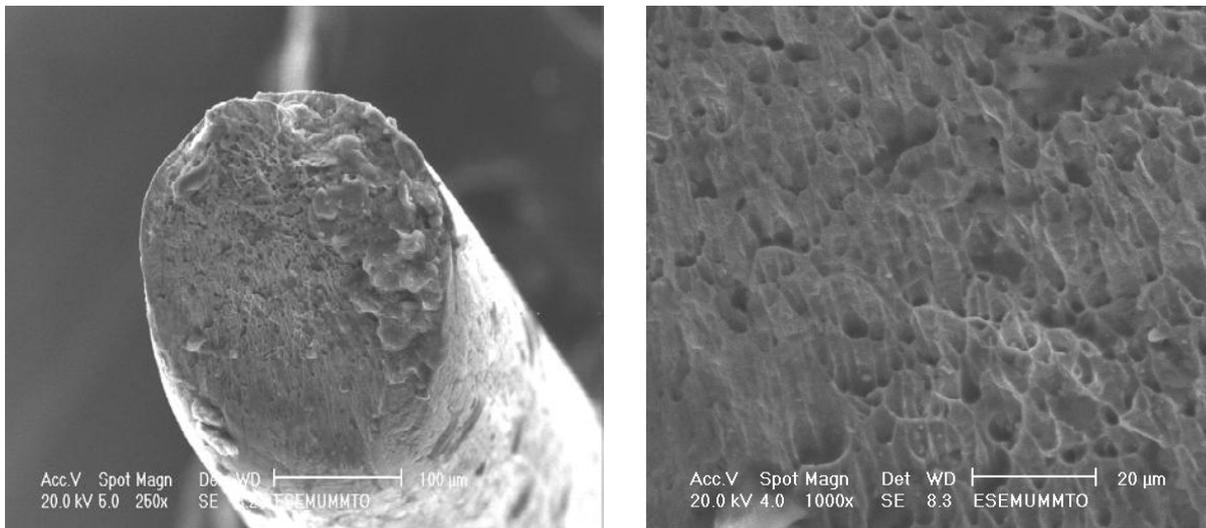


Figure IV. 13: Faciès de rupture en traction

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

- ❖ Cette partie concerne les résultats obtenus après traitements thermiques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés à 150, 250 et 300 C° pendant un temps de maintien d'une heure.

Le tableau IV.3 regroupe les valeurs des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils du cuivre tréfilés après le recuit à différentes températures.

Tableau IV. 3: Résultats des propriétés mécaniques du fil machine du cuivre et les fils fortement tréfilés et recuits à différentes températures

Température de recuit (°C)	Taux de déformation(%)	Propriétés mécaniques	
		Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)
150	0 (Fil machine)	37.26	239.46
	ϵ_1 (88.19)	37.23	254.84
	ϵ_2 (95.16)	34.22	255.11
	ϵ_3 (97.15)	31.36	252.67
250	0 (Fil machine)	41.99	232.75
	ϵ_1 (88.19)	47.70	250.44
	ϵ_2 (95.16)	36.11	253.25
	ϵ_3 (97.15)	41.62	250.64
300	0 (Fil machine)	42.66	233.02
	ϵ_1 (88.19)	21.68	247.28
	ϵ_2 (95.16)	37.13	250.37
	ϵ_3 (97.16)	28.15	247.96

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Les figures IV.14 et IV.15 présentent respectivement l'évolution de la résistance à la traction et l'évolution de l'allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit.

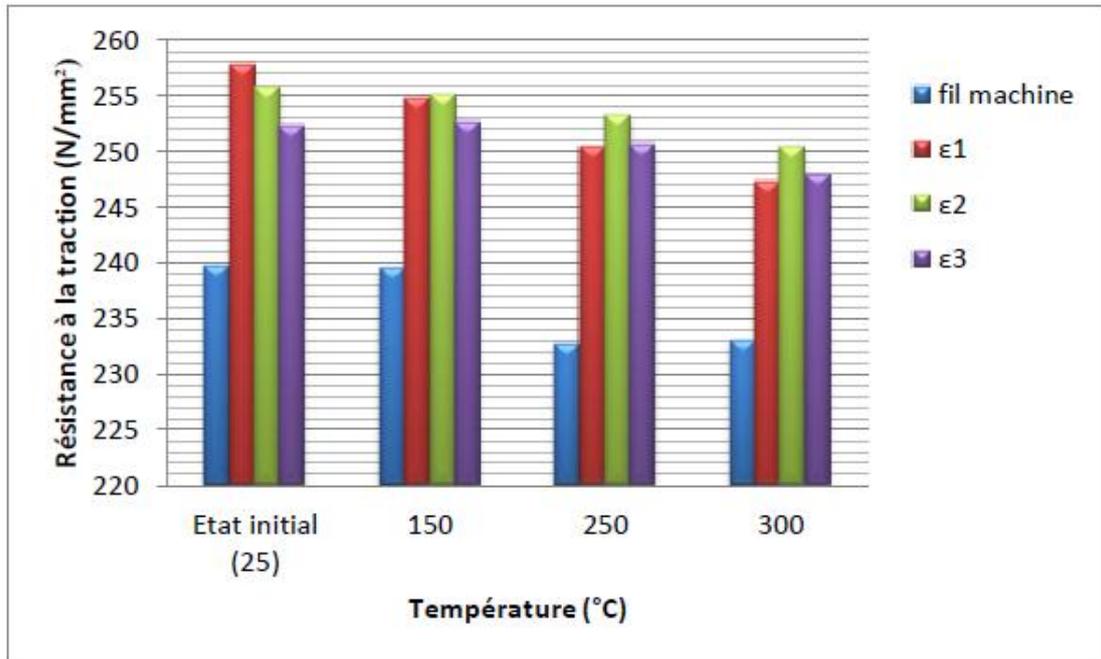


Figure IV. 14: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre en fonction de la température de recuit

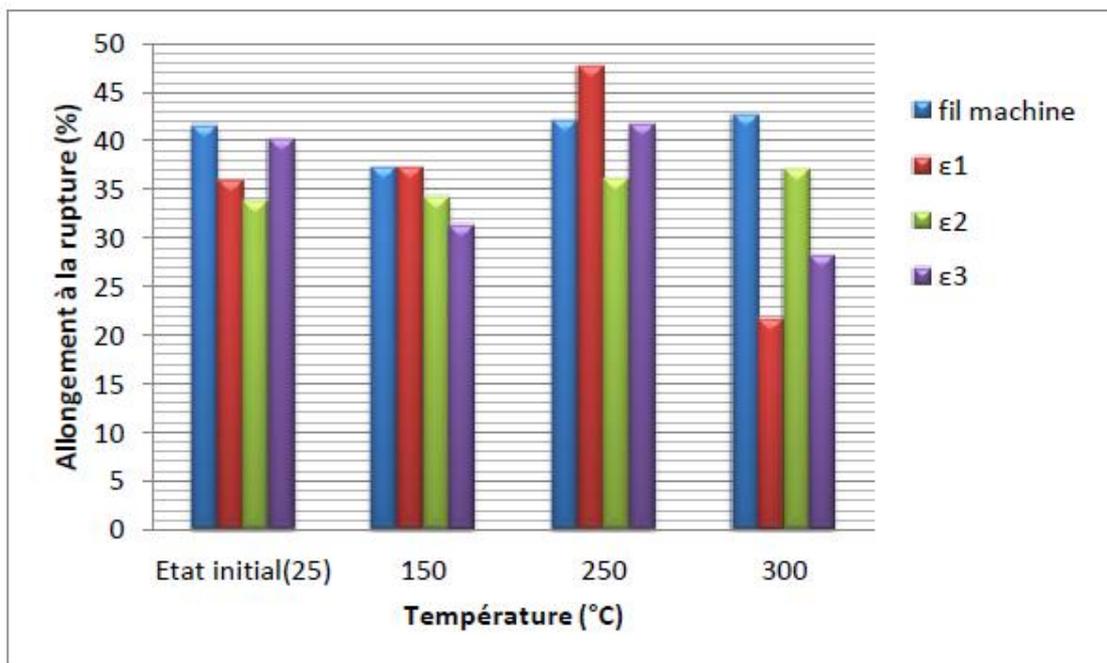


Figure IV. 15: Evolution de l'allongement à la rupture des fils en cuivre en fonction de la température de recuit

Les valeurs de l'allongement à la rupture du fil machine recuit et le fil tréfilé à 95.16% et recuit à 300°C sont légèrement supérieures à celles des mêmes fils à l'état initial, par contre les

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

valeurs de l'allongement à la rupture du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 300°C et le fil tréfilé à 97.15% et recuit à 300°C sont très inférieurs à celles des mêmes fils à l'état initial.

La figure IV.16 présente l'évolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation.

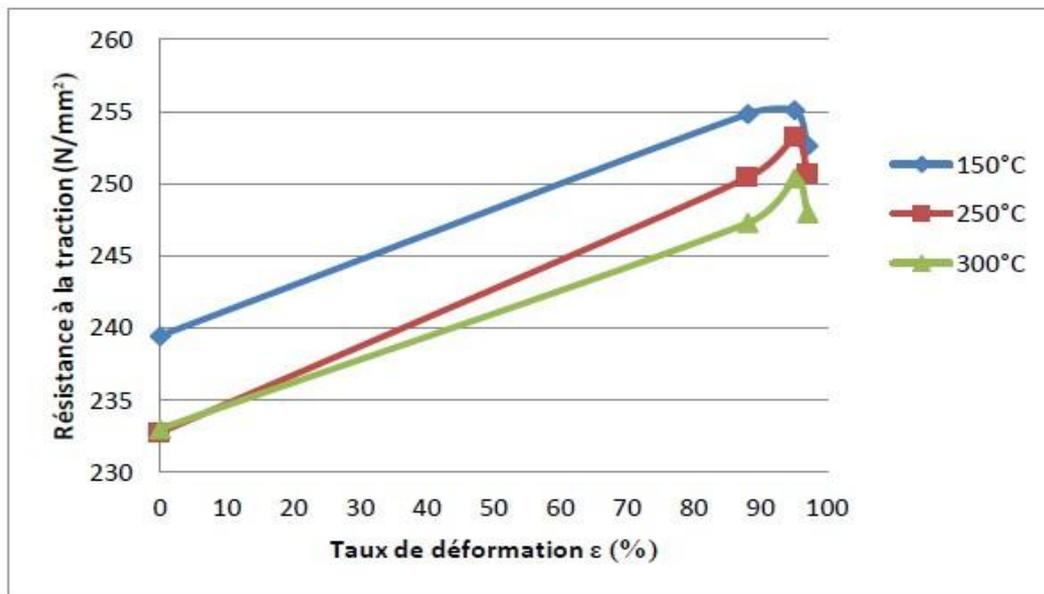


Figure IV. 16: Evolution de la résistance à la traction des fils en cuivre recuits à différentes températures en fonction du taux de déformation

- Le recuit des fils du cuivre à 150°C ne provoque pas un changement notable sur l'évolution de l'allongement à la rupture et la résistance à la traction par rapport à l'état initial de l'ensemble des fils.
- Le recuit des fils du cuivre à 250°C entraîne une légère diminution de la résistance à la traction et une augmentation de l'allongement à la rupture pour l'ensemble des fils par rapport à l'état initial. La valeur de l'allongement à la rupture du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 250°C est de 33% plus élevée que sa valeur à l'état initial et elle représente la valeur la plus élevée de l'allongement à la rupture (47.70%) par rapport aux autres fils.
- Le recuit des fils du cuivre à 300°C conduit à une légère diminution de la résistance à la traction pour l'ensemble des fils par rapport à l'état initial. La valeur de la résistance à la traction du fil tréfilé à 88.19% et recuit à 300°C est de 4% plus basse que sa valeur à l'état initial.[2]

On conclue donc que ce recuit permet de déclencher le mécanisme de recristallisation et de supprimer l'effet de l'écrouissage. C'est-à-dire le retour progressif des propriétés mécaniques des fils tréfilés vers un état proche de l'état initial (fil machine). Les fils en cuivre deviennent plus doux, moins résistant et plus ductile.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

3.2.2 Résultats des essais de micro-dureté :

La dureté quantifie la résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge F. Les résultats de la micro-dureté Vickers ainsi que la moyenne, pour les échantillons de fil enrobé verticalement sont donnés dans le Tableau IV.4.

Tableau IV. 4: Micro-dureté Vickers associée à l'âme du fil neuf vertical

Type d'échantillon	Numéro d'échantillon	positionnement	Charge	durée	HV
Âme du fil (cuivre)	N V (0%)	vertical	100 g	30 s	116.5
	N ₁ V (88.19%)	vertical	100 g	30 s	112.5
	N ₂ V (95.16%)	vertical	100 g	30 s	115.4
	N ₃ V (97.15%)	vertical	100 g	30 s	114.5
	moyenne				

Les résultats de la micro-dureté Vickers ainsi que la moyenne, pour les échantillons de fil enrobé horizontalement sont donnés dans le Tableau IV.5.

Tableau IV. 5: Micro-dureté Vickers associée à l'âme du fil neuf horizontal

Type d'échantillon	Numéro d'échantillon	positionnement	Charge	durée	HV
Âme du fil neuf (cuivre)	N H (0%)	horizontal	100 g	30 s	113,2
	N ₁ H (88.19%)	horizontal	100 g	30 s	110.7
	N ₂ H (95.16%)	horizontal	100 g	30 s	112.6
	N ₃ H (97.15%)	horizontal	100 g	30 s	111.5
	moyenne				

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.

4 Conclusion :

Ces résultats sont expliqués par l'effet d'adoucissement des fils qui a tendance à éliminer les dislocations et les tensions internes et aussi à cause du grossissement des grains sous l'effet de la température. Un matériau à grains fins et plus dur et plus résistant qu'un matériau à grains grossiers. En effet, le phénomène de croissance des grains est accéléré avec l'augmentation la température.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présente une synthèse dont l'effet combiné de taux de déformation par tréfilage à froid sur l'évolution microstructurale et les propriétés mécaniques et physiques des fils machine et des fils en cuivre et en acier. Ces derniers différents effets sont traités dans les entreprises ENICAB à Biskra et TREFISOUD à Sétif, Algérie.

Nous concluons que :

- ✓ Le cuivre est naturel car c'est un élément naturel alors que l'acier est un alliage. Il est largement utilisé dans les applications militaires, électriques, chirurgicales, de câblage et de plomberie, tandis que l'acier est utilisé dans les structures de construction, les portes et de nombreuses autres industries telles que l'automobile.
- ✓ L'acier est plus solide et plus lourd que le cuivre, et les deux peuvent se corroder dans des environnements humides. Il n'est pas utilisé pour la forge et le cuivre des pièces de monnaie est encore utilisé dans de nombreux pays du monde.
- ✓ La ductilité de l'acier varie considérablement par rapport au cuivre, qui est un métal ductile, malléable, amagnétique et anti-étincelles.

Comme perspective :

- ✓ Des investigations expérimentales au niveau de nos laboratoires permettent de comparer nos résultats expérimentaux avec les résultats présentés dans notre synthèse.
- ✓ On peut élargir nos expériences à d'autres alliages sur la base de la même démarche méthodologique.
- ✓ On peut collaborer avec le milieu industriel (SONELGAZ, ENICAB de Biskra et TREFISOUD de Sétif) afin de trouver des applications à notre démarche.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Chapitre 1 ; 2 :

[1] : C. Levrau, « Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.

[2] : SIMONNET, G. Tréfilage de l'acier M645, In Traité des matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur, 1996.

[3]: FELDER, E et LE FLOCH, A. Measurement of thermo-mechanical conditions in wire Drawing dies. Annals of the CIRP, vol.25/1, 1976.

[4] : J. Kesler, R.Bourgeois, H. chauvel, Memento, Génie des matériaux, Edition Casteila, Novembre Paris (2001) .

[5] : J. Bonzel, and E. Siebel, Neuere untersuchungen uber den Frost- Tausalz- Widerstand von Beton, Betontechnische Berichte, vol. 1977.

[6] : FARHANI Rebei, DEKHLI Hamza. Influence de la déformation à froid sur les propriétés mécaniques et microstructurales des fils d'aluminium tréfilés à l'ENICAB- Biskra, 2016.

[7] : condat.fr-produit (lubrifiants-savons-de-tréfilage).

[8] : eurodraw.com/wet-drawing-machines.

[9] : JAKARNI, S., Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé, Thèse de Doctorat, Université Paris Sud – Paris XI, France, 2004.

[10] : AMIRAT Boukhalfa. Etude et caractérisation mécanique du fil électrode à base de Cu-Zn utilisé sur la machine ROBOFIL 290P (BCR), TIZI OUZOU, 2013.

[11] : B. Bay, N. Hansen, D.A Hughes, D. Kulhmann-Willsdorf, Acta Metallurgica and Materialia, 40 (1992) 205.

[12]: thesis.univ-biskra.dz/1315/3/Introduction%20g%C3%A9n%C3%A9rale.pdf.

[13] : etudier.com/dissertations/Introduction-Au-Cuivre/454193.html

[14] : [www.metallerie-serrurerie.net\(atouts-du-cuivre\)](http://www.metallerie-serrurerie.net(atouts-du-cuivre))

[15] : ISE / Arndt Uhlendorff – Octobre 2019

[16] : futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-cuivre-premier-metal-travaille-homme-779/page/2/ (Futura Planète).

[17] : Dan-Weinrich.com

[18] : Latrivenetacavi.com/ le cuivre superstar des métaux

Références bibliographiques

[19] : <https://fr.calameo.com/books/0010161932c328bec51c4>.

[20]: [Maklada.fr/steel wire drawing](http://Maklada.fr/steel-wire-drawing).

[21] : Wikipédia sous licence CC-BY-SA 3.0.

[22] : G. MURRY, « Transformations dans les aciers, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M1115 », Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.

[23] : [rocdacier.com/les alliages binaires et diagramme fer carbone](http://rocdacier.com/les-alliages-binaires-et-diagramme-fer-carbone).

[24] : <https://www.technologuepro.com/cours-materiaux-metalliques/chapitre-3-etude-dudiagramme-fer-carbone.pdf>

[25] : lesechos.fr/2006/08/les-applications-industrielles-des-matieres-minieres-591962.

[26] : Arcelo.fr/steel-solutions-for-a-better-world.

[27] : fours-fumisterie-industrielle.fr.

[28] : ASM.MAROC.

Chapitre 3 ; 4 :

[1] : Thèse Toufik DJIMAOUI. «Étude du comportement structural et mécanique des fils tréfilés en acier doux destinés à la fabrication des électrodes de soudure à TREFISOUD ». Université Mohammed Khider-Biskra. 2019.

[2] : Imene ABDOU et Ouarda FARHAT, «étude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés de l'ENICAB-Biskra ». Mohammed Khider-Biskra. 2020.

[3] : AMIRAT Boukhalfa, «Étude et caractérisation mécanique du fil électrode à base de Cu-Zn utilisé sur la machine ROBOFIL 290P (BCR) ». Tizi Ouzou. 2013.

[4]: BAIRA, F., Etude de l'évolution de la microstructure et la texture et des propriétés mécaniques et électriques dans les fils de cuivre tréfilés industriellement et recuits, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.