

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Conception Mécanique Et Productique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Thème

**Etude de l'évolution des propriétés des
fils tréfilés d'alliage AGS**

Présenté par:

Chenafi Messaoud

Proposé et dirigé par:

Dr. Messaoudi Salim

Promotion : Juin 2014

SOMMAIRE

<i>Introduction Générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I- Les procédés de mise en forme des métaux

1. INTRODUCTION	2
2. LA MISE EN FORME À FROID	2
3. LA MISE EN FORME À CHAU	3
4. LA METALLURGIE DE MISE EN FORME	3
5. FORGEAGE	5
5.1. FORGEAGE A FROID	6
5.2. FORGEAGE A CHAUD	6
6. EMBOUTISSAGE	7
7. FILAGE	9
7.1. LE FILAGE DIRECT	9
7.2. LE FILAGE INVERSE	9
8. LAMINAGE	10
8.1. LAMINAGE A FROID ET LAMINAGE A CHAUD	11
8.2. ASPECT METALLURGIQUE	12
9. TRÉFILAGE	12

Chapitre II - Procédés de mise en forme par tréfilage à froid

1. LE TREFILAGE	14
2. DEFINITION ET PRINCIPE DE TREFILAGE	14

3. LA PRÉPARATION DE SURFACE.....	15
4. LUBRIFICATION DE LA SURFACE.....	15
5. OUTILS ET EQUIPEMENTS INDUSTRIELS DU TREFILAGE.....	16
5.1. LA MACHINE SIMPLE.....	17
5.2. LES MACHINES MULTIPLES.....	17
6. LA FILIERE.....	18
7. LA FINITION : NETTOYAGE ET TRAITEMENTS THERMIQUES.....	19
8. LES OBSERVABLES DU TRÉFILAGE: FORCE, FROTTEMENT ET TEMPÉRATURE.....	20
9. LE FROTTEMENT.....	21
10.LA TEMPERATURE.....	21

Chapitre III - méthodologie expérimentale, résultats et discussions

1. INTRODUCTION.....	23
2. LA METHODOLOGIE EXPERIMENTALE.....	23
3. PRELEVEMENT .DES ECHANTILLONS.....	23
4. PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	24
4.1. DECOUPAGE.....	24
4.2. POLISSAGE.....	24
4.3. L'ATTAQUE CHIMIQUE.....	25
5. TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS.....	25
5.1. MICROSCOPIE OPTIQUE.....	25
5.2. MICRODURETE.....	26
5.3. ESSAI DE TRACTION.....	27
5.4. MESURE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE.....	28
6. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	28
7. LA CARACTERISATION MECANIQUE	30
7.1. LA CHARGE A LA RUPTURE.....	30
7.2. L'ALLONGEMENT.....	31

7.3. LA MICRODURETE.....	31
8. LA RESISTIVITE ELECTRIQUE.....	32
9. CONCLUSION.....	32
CONCLUSION GENERALE.....	33
BIBLIOGRAPHIE.....	34

LIST DES FIGURES

N° de figure	Titre de figure	N° de page
Figure 1	Mise en forme par déformation plastique	4
Figure 2	Matrices d'outillages pour forgeage de sécateurs. XXe siècle	6
Figure 3	Presse à emboutir (en gris) les baignoires avec son outillage (en bleu)	8
Figure 4	: Etapes de la production de canettes à partir de découpes circulaires par emboutissage profond, emboutissage de reprise et étirage de parois	8
Figure 5	Schéma du filage direct	9
Figure 6	Schéma du filage inverse	10
Figure 7	Procédé de laminage	10
Figure 8	Train de laminage	11
Figure 9	Aspects métallurgiques du laminage	12
Figure 10	Schéma de principe du procédé de tréfilage	13
Figure 11	schéma principe de tréfilage	15
Figure 12	lubrifiants utilisés en tréfilage	16
Figure 13	Schéma d'un dispositif de tréfilage	16
Figure 14	photo d'une ligne de tréfilage	17
Figure 15	<i>Schéma d'une filière de tréfilage</i>	19
Figure 16	Les échantillons découpés	23
Figure 17	La polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS	24
Figure 18	Microscope optique	25
Figure 19	Microduromètre.	25
Figure 20	Machine de traction INSTRON 5969	26
Figure 21	les variations de la charge à la rupture en fonction du taux de déformation de fil	29
Figure 22	les variations d'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation de fil.	30
Figure 23	Les variations de la microdureté en fonction du taux de déformation	31
Figure 24	les variations de la résistivité électrique en fonction du taux de déformation de fil.	32

LIST DES TABLEAUX

N° de tableau	Titre de tableau	N° de page
Tableau 1	Composition chimique et caractéristique de la matière étudiée	22
Tableau 2	Déformations de des fils	23
Tableau 3	Caractéristiques mécaniques des fils	29
Tableau 4	Résultats de résistivité	31

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'importance industrielle des les alliages d'aluminium est mise en valeur par l'utilisation de ces alliages d'aluminium en tant que conducteurs électriques dans les lignes électriques. L'utilisation de l'aluminium dans le transport d'énergie électrique est ancienne, mais c'est à partir des années 1980 que les conducteurs fabriqués à partir des alliages aluminium sont devenus très populaires.

Parmi ces conducteurs réussis on trouve en grande partie les alliages d'Aluminium AGS (Al-Mg-Si) qui étaient des conducteurs légers et pouvaient avoir des tailles (section) plus grandes.

L'entreprise ENICAB spécialisée dans la fabrication des fils et des câbles électriques, importe le fil machine d'alliage d'aluminium de deux fournisseurs différents. Sur l'un des fils importé, l'entreprise rencontre des problèmes de ruptures du fil au niveau de chaîne de tréfilage et le produit final ne correspondait pas au prescrit fourni par le fournisseur. Ceci cause des pertes en temps et en produit et nuit à l'entreprise.

Ce travail sera mené sur les fils d'alliage d'aluminium MIDAL qui posent ce problème à l'entreprise. Dans cette étude on traitera uniquement l'état tréfilé ou on examinera et on suivra l'évolution des propriétés microstructurales, mécaniques et électriques des fils tréfilés.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres ;

- Le chapitre 1 : illustre les différents procédés de mise en forme basés sur le principe de la déformation plastique.
- Le chapitre 2 : traite d'une manière générale le procédé de tréfilage
- Le chapitre 3 : est consacrée à la partie expérimentale ; description de la démarche expérimentale, illustration des résultats et les interprétations associées.

Et en fin, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

LES PROCEDES DE MISE EN FORME DES METAUX

LES PROCÉDES DE MISE EN FORME DES MÉTAUX

1. INTRODUCTION

La plasticité des alliages métalliques joue un rôle important dans leurs applications. Elle conditionne de nombreuses opérations de mise en forme des alliages à l'état solide, et pour ces opérations de mise en forme, un écoulement plastique facile et recherché. Les principaux procédés de mises en formes des métaux sont apparus progressivement donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série des pièces à faible coût.

Les procédés de mise en forme se divisent en trois types :

- La déformation plastique, pratiquée à froid ou à chaud sur un lingot ;
- La fonderie (le métal – ou l'alliage – liquide est versé dans un moule ou il se solidifie sous la forme souhaitée) ;
- Le frittage des poudres (le métal en poudre est comprimé dans la forme désirée et chauffé à l'état solide pour obtenir une pièce massive).[1]

2. LA MISE EN FORME À FROID

Dans la pratique l'expression à froid signifie à la température ambiante : en général, le matériau n'est pas réchauffé volontairement, ni avant, ni pendant l'opération de mise en forme, cependant la déformation plastique peut engendrer un échauffement important, pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés, notamment en usinage. De tels cas relèvent en fait de la déformation à chaud.

De point de vue physique, on considère qu'il existe deux grandes classes de mécanismes microscopiques intervenant dans la déformation plastique de métaux :

- Les mécanismes athermiques, qui ne font pas intervenir l'agitation thermique des atomes, sont en général prédominants pour $T \leq 0,2$ ou $0,3 T_f$ (T et T_f températures absolues de déformation et de fusion du métal respectivement) ;

- Les mécanismes activés thermiquement exigent au contraire l'intervention de l'agitation thermique ; ils sont donc surtout efficaces aux températures élevées ($T \geq 0,5 T_f$) ; il faut cependant noter qu'ils interviennent également aux très basses températures.

La déformation à froid est caractérisée par la prédominance des mécanismes athermiques. En particulier, la diffusion y est négligeable, ce qui exclut les phénomènes de recristallisation ou de précipitation pendant la déformation.

3. LA MISE EN FORME À CHAUD

La mise en forme à chaud concerne, les opérations de déformation plastique effectuées à une température absolue $T > 0,5T_f$ (ou T_f désigne la température de fusion du matériau), soit par exemple : [2]

Tungstène	: $\theta > 1554^\circ$;
Fer	: $\theta > 631^\circ$;
Cuivre	: $\theta > 393^\circ$;
Aluminium	: $\theta > 193^\circ$;
Plomb	: $\theta > 27^\circ$.

4. LA METALLURGIE DE MISE EN FORME

La métallurgie de mise en forme traite les problèmes de déformation plastique à froid et à chaud, à l'exclusion des procédés impliquant un enlèvement de matière (usinage) et des divers types d'assemblage (soudure, collage, etc.). elle aborde aussi les questions relevant de la tribologie (frottement et lubrification, usure) ou de la thermique (auto-échauffement, transferts de chaleur métal/outil), qui sont d'une importance considérable dans l'analyse de la plupart des procédés [3] [4] [5].

Dans le présent chapitre nous présenterons quelques procédés de mise en forme par déformation plastique à froid.

Divers aspects de la métallurgie en mise en forme

Les problèmes de métallurgie en mise en forme font intervenir quatre échelles d'observation différentes:

- ✓ L'échelle macroscopique (de la fraction de millimètre à plusieurs mètres).

- ✓ L'échelle mésoscopique (de quelques micromètres à quelques millimètres).
- ✓ L'échelle microscopique (de quelques nanomètres à quelques micromètres).
- ✓ Enfin, l'échelle nanoscopique (du dixième de nanomètre au nanomètre).

Nous pouvons voir schématiquement (Figure 1) les divers phénomènes apparaissant lors de la mise en forme par déformation plastique.

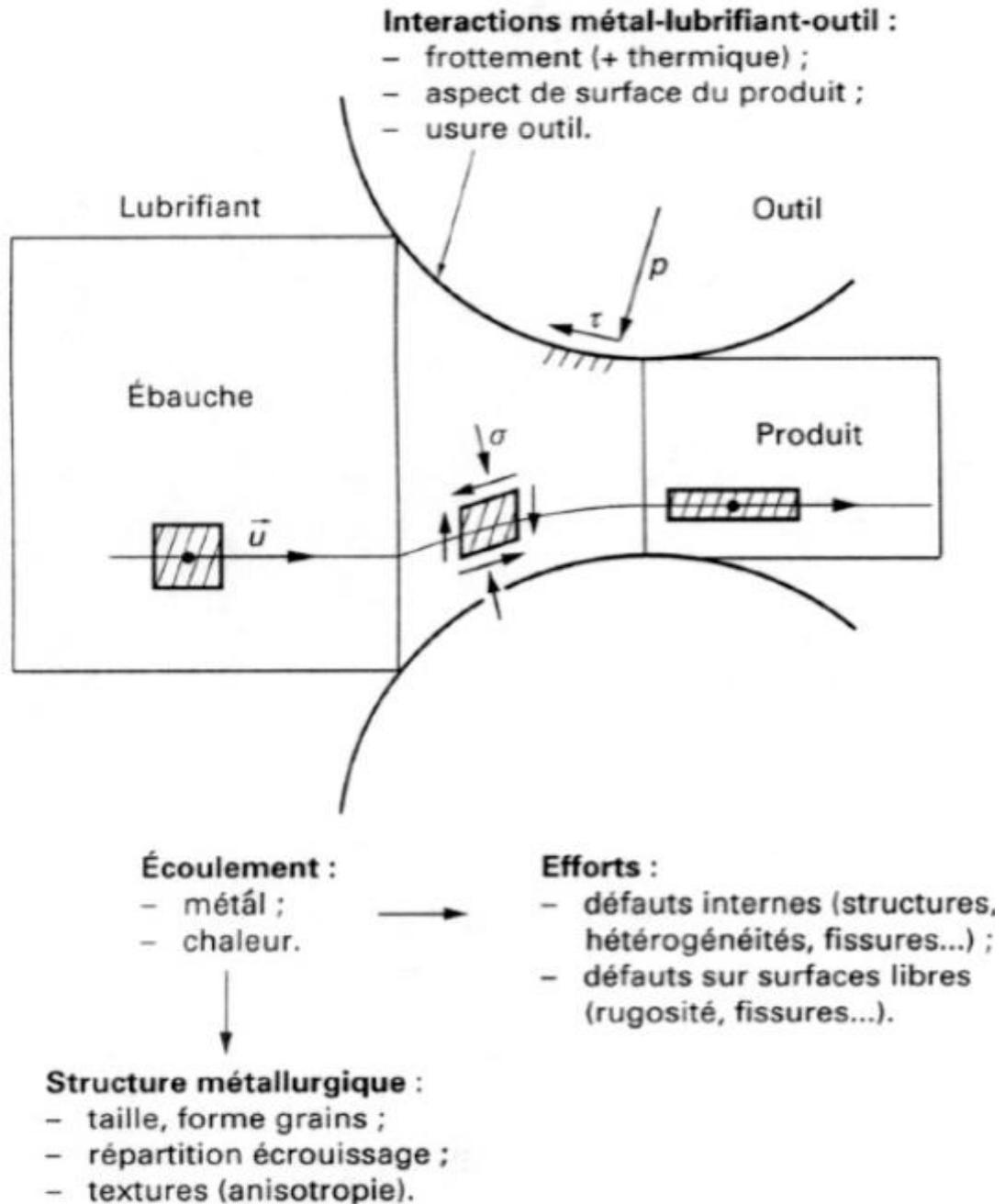


Figure 1 : Mise en forme par déformation plastique

5. FORGEAGE

Le forgeage est le procédé le plus ancien de la mise en forme qui a survécu à ce jour. Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue.

Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau ou marteau-pilon) et un support (enclume ou matrice).

La forge ne permet pas d'obtenir les mêmes marges de tolérance que l'usinage, ce qui la réserve aux pièces requérant une forte résistance mais une faible précision (boulonnerie, outillage). Le forgeage se révèle inutilisable pour obtenir directement les pièces mécaniques ayant besoin d'une forte précision dimensionnelle.

En revanche, les pièces obtenues sont plus résistantes aux contraintes mécaniques car la déformation des métaux engendre un grand nombre de phénomènes métallurgiques, tant au niveau microscopique que macroscopique. Parmi ces phénomènes on trouve notamment le corroyage, qui lui-même est à l'origine du fibrage du métal. Ce fibrage est le résultat d'un écrouissage subi par une pièce obtenue par déformation plastique et traduit toujours une anisotropie des propriétés en particulier les propriétés mécaniques de la pièce : Une orientation des grains de la matière (*orientation de la "structure métallurgique"*) dans la direction de son écoulement.

La plasticité des alliages métalliques solides correspond à leur aptitude à présenter, après application d'un état de contrainte, une déformation permanente laissant invariant en première approximation leur volume.[6]

Le paramètre fondamental du forgeage est la température de forgeage qui doit être supérieure à $0.5T_f$ (T_f = température de fusion en K).

Quelques valeurs de T forgeage:

- aciers bas carbone = 1250°C
- aciers teneur en C >0.30% C = 1200°C
- aciers alliés et inox. Martensitiques = 1220°C

Un autre paramètre important est la force de mise en forme qui est fonction aussi de T_f .

Ces paramètres dépendent des caractéristiques et de la qualité du produit à fabriquer, par exemple : tolérances dimensionnelles, état de surface, structure métallurgique etc.



Figure 2 : Matrices d'outillages pour forgeage de sécateurs. XXe siècle.

5.1. Forgeage à froid

Le forgeage à froid est le procédé par lequel on obtient la déformation d'une pièce sans chauffage préalable. Le **forgeage à froid** (ou **extrusion**) dérive de réalisations de **pièces généralement creuses** sur des machines utilisant des **lopins** comme produit de départ ;

Les machines à forger à froid sont extrêmement robustes, du fait que le lopin n'a pas la malléabilité que lui aurait donnée un chauffage. Ce forgeage, impose un usage orienté pour la très grande fabrication en série, dans le domaine de l'automobile, de la visserie, et de la quincaillerie en général.

5.2. Forgeage à chaud

Le procédé de forgeage à chaud consiste à chauffer à haute température ($T \geq 0.6T_{\text{fusion}}$) un demi-produit, appelé lopin, que l'on viendra écraser entre deux matrices dans lesquelles est reproduit le négatif de la forme à obtenir. Afin de permettre un remplissage suffisant des matrices et une limitation des efforts de compression, un volume supplémentaire sera usiné dans les matrices permettant ainsi la formation d'une bavure.



Exemple d'une pièce forgée à chaud

Remarque : L'estampage est une opération de forgeage (généralement des métaux non ferreux) en trois coups (ébauche, finition et ébavurage). Cette opération consiste à former, après chauffage, des pièces brutes par pression entre deux outillages nommés « matrices », que l'on vient fixer sur des presses (hydrauliques, mécaniques...).

6. Emboutissage

Principe

Le principe est fondé sur la déformation plastique du matériau (en général un métal), déformation consistant en un allongement ou un rétreint local de la tôle pour obtenir la forme.

L'emboutissage est un procédé de fabrication très utilisé dans l'industrie automobile, dans l'électroménager, etc..., il permet d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince, montées sur presse. La tôle appelée « flan », est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. L'opération peut être réalisée avec ou sans serre flan pour maintenir le flan contre la matrice pendant que le poinçon déforme la feuille.. La température de déformation se situe entre le tiers et la moitié de la température de fusion du matériau.

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux qui comportent, dans le principe, trois pièces :

- une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce
- un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle
- un serre-flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.
- des jons sont parfois utilisés pour freiner le glissement de la tôle (retenue de l'acier)

L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint - aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse notamment sur les pièces d'aspect (exemple : plusieurs mois pour l'extérieur d'une portière, capot, etc.)



Figure 3: Presse à emboutir (en gris) les baignoires avec son outillage (en bleu)



Figure 4 : Etapes de la production de canettes à partir de découpes circulaires par emboutissage profond, emboutissage de reprise et étirage de parois

7. FILAGE

Le filage consiste à placer du métal solide chauffé à la température dite de filage dans un outillage appelé généralement conteneur et de la faire ressortir par un orifice (d'une filière, en général) plus petit en exerçant une poussée. À partir d'un certain effort, il y a écoulement plastique à travers la filière. Cette dernière peut avoir des formes variées.[7]

7.1. Le filage direct

La billette (cylindre plein de métal) de métal préalablement chauffée est placée dans le conteneur. Un poinçon exerce une poussée. Le métal est d'abord plaqué contre la filière et file à travers la filière en prenant sa forme définitive **Figure 5**.

7.2. Le filage inverse

Dans le cas du filage inverse, la filière est placée à l'extrémité d'un poinçon. La billette chauffée est placée dans le conteneur. L'on plaque une tête sur le conteneur. C'est donc l'ensemble, billette, conteneur et tête qui avance vers la filière. Le métal file à l'intérieur du poinçon **Figure 6**.

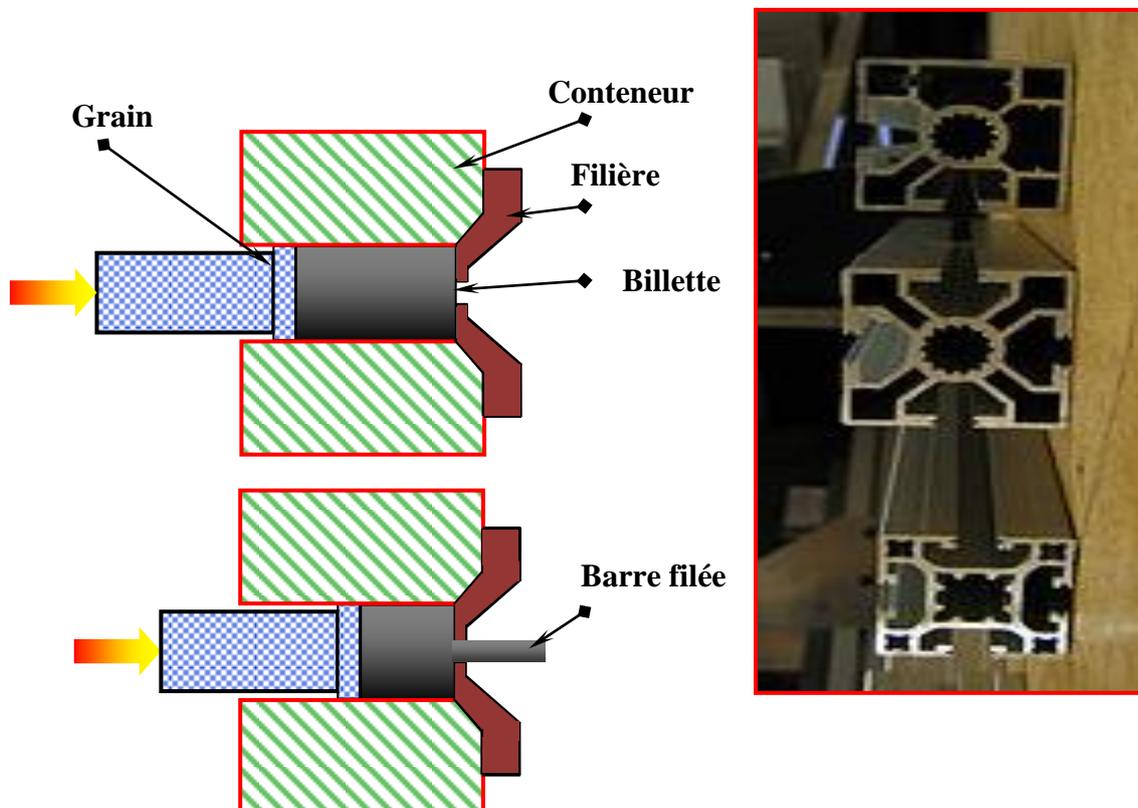


Figure 5: Schéma du filage direct.

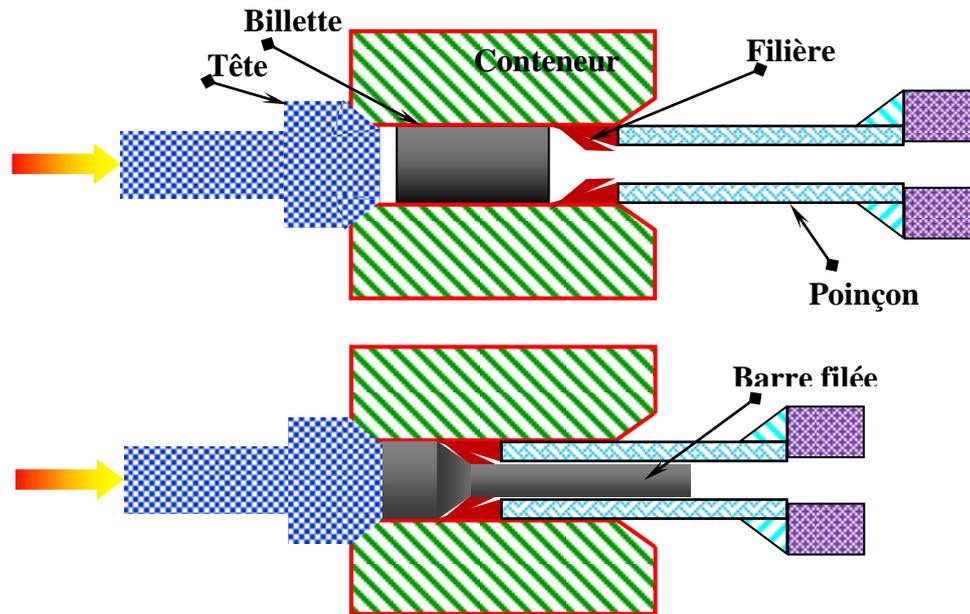


Figure 6: Schéma du filage inverse.

8. LAMINAGE

Le laminage est le procédé de déformation le plus largement utilisé et consiste à faire passer entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale du lingot. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés (figure 7). La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient de façon discontinue par passes successives dans le même laminoir ou en continu en utilisant des laminoirs placés en série.

Au cours du laminage, la déformation plastique du métal se fait essentiellement dans le sens du déplacement du lingot dont la longueur augmente à chaque passe [7]

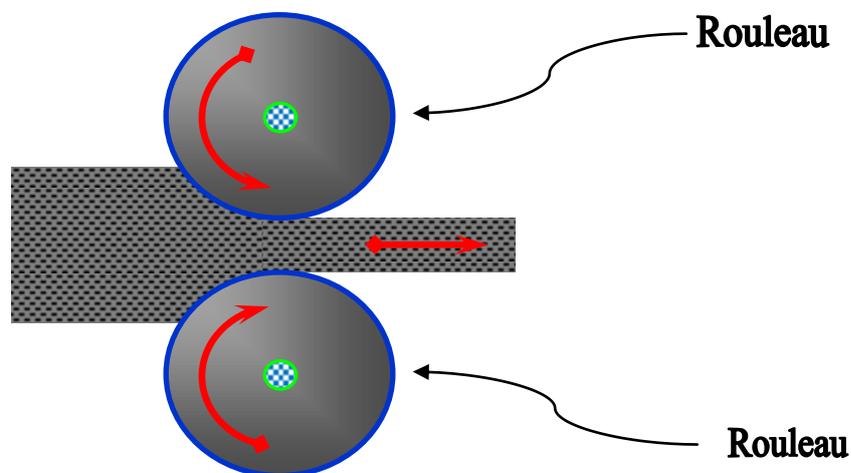


Figure 7 : Procédé de laminage

8.1. Laminage à froid et Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales : la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand. Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage. Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande.

Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

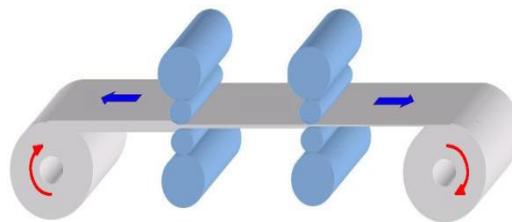


Figure 8 : Train de laminage

8.2. Aspect métallurgique

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations.

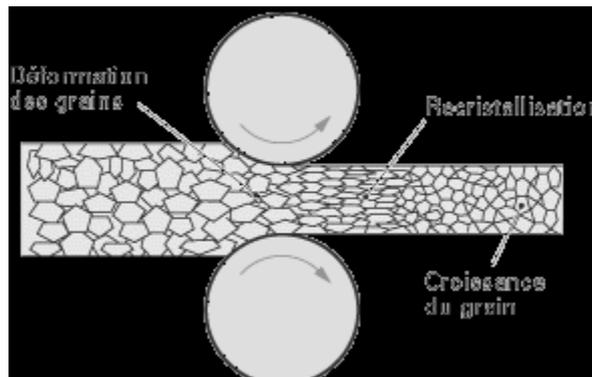


Figure 9 : Aspects métallurgiques du laminage

9. TRÉFILAGE

Le tréfilage est une opération de mise en forme son principe est basé sur la diminution de la section d'une barre ou un fil métallique par tirage mécanique sur une machine à tréfiler (tréfileuse). Cette technique utilise donc l'aptitude à la déformation plastique du métal. Les usines spécialisées dans le tréfilage sont nommées des tréfileries.

Le fil machine, sous forme de bobine, est posé sur un dévidoir. Il est enroulé sur un ou des cabestans, qui, par frottement, exercent une traction sur le fil. Le fil passe dans une filière, en amont du cabestan, qui impose au fil une déformation par réduction de section. La filière est abondamment lubrifiée, pour assurer le maintien d'un bon état de surface du fil métallique et pour assurer le refroidissement et contrer l'échauffement provoqué par l'écroutissage du métal Figure10.[8]

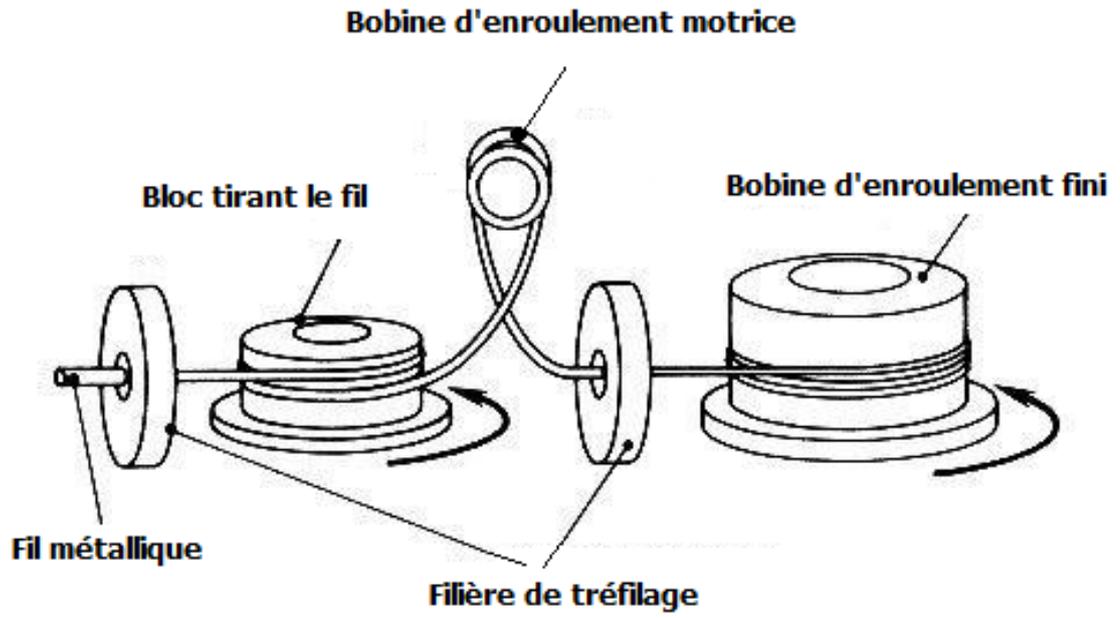


Figure 10: Schéma de principe du procédé de tréfilage

Chapitre II

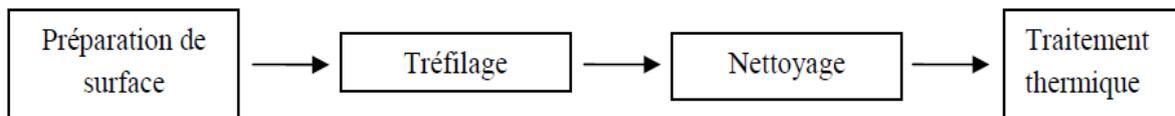
PROCEDE DE TREFILAGE

PROCEDE DE TREFILAGE

1. LE TREFILAGE

Le procédé de mise en forme à froid connu sous le nom de tréfilage est de plus en plus important dans le domaine industriel. Il est appliqué sur plusieurs métaux et alliages comme le cuivre, l'aluminium (fils électrique) et les aciers en particulier les aciers doux. [8]

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires



2. Définition et principe de tréfilage

Le tréfilage est la réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique et passage à travers une filière.

Dans une opération de tréfilage, un fil de diamètre D_i préalablement appointé est tiré à travers une filière ayant un diamètre de col D_f inférieur à D_i au cours de laquelle la contrainte de traction se superpose avec la compression latérale par l'inclinaison des parois et le frottement, on dit que le fil à la sortie de la filière est tréfilé. [9]

On peut définir l'aptitude au tréfilage du fil machine par la réduction de section ($\varepsilon\%$) au-delà de laquelle le fil se rompt, ou par sa ténacité ($A\%$) qui diminue jusqu'à ce qu'il devient très difficile de pour suivre la déformation ; on définit ($\varepsilon\%$) et ($A\%$) :

$$\varepsilon\% = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$A\% = \frac{S_i - S_f}{S_f} \times 100 \quad \dots\dots\dots 2$$

Où : S_i et S_f sont la section de fil avant et après le filage respectivement.

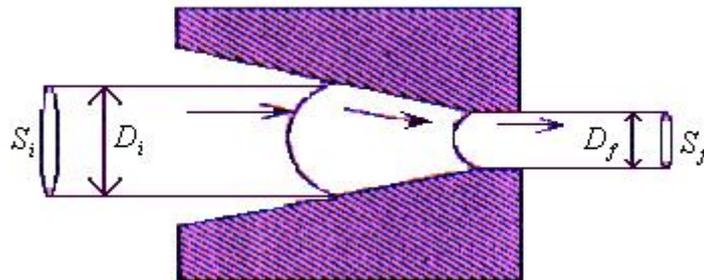


Figure 11 : schéma principe de tréfilage

3. LA PRÉPARATION DE SURFACE

Le matériau de départ utilisé pour le tréfilage est appelé fil-machine, il provient du laminage à chaud de billettes produites par coulée continue et se présente sous forme de couronnes, refroidies à l'air. La surface du fil est souvent recouverte d'une couche d'oxydes métalliques, dont l'épaisseur est fonction de la température de sortie du fil. A cause de son caractère abrasif, de sa dureté et de son absence de ductilité, cette couche doit être éliminée avant le tréfilage. Différents procédés de nettoyage de surface peuvent être employés ; par action chimique (décapage), mécanique (décalaminage) ou action combinée des deux.[9]

4. LUBRIFICATION DE LA SURFACE

L'utilisation d'un lubrifiant est capitale au cours du procédé pour limiter le frottement et l'usure et assurer un régime de lubrification stable. Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil. En général, pour les gros et moyens diamètres, ce sont des savons qui sont utilisés (tréfilage à sec) : il s'agit de corps pulvérulents composés d'une matière grasse (sel métalliques d'acides gras) et de charges minérales. Le rôle de ces lubrifiants est de former un film suffisamment épais sur le fil de manière à éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface. Ils permettent ainsi des réductions successives, mais donnent un aspect terne au fil. Suivant les applications ultérieures du fil, un nettoyage s'impose pour ôter tous les résidus de lubrifiant.[9]

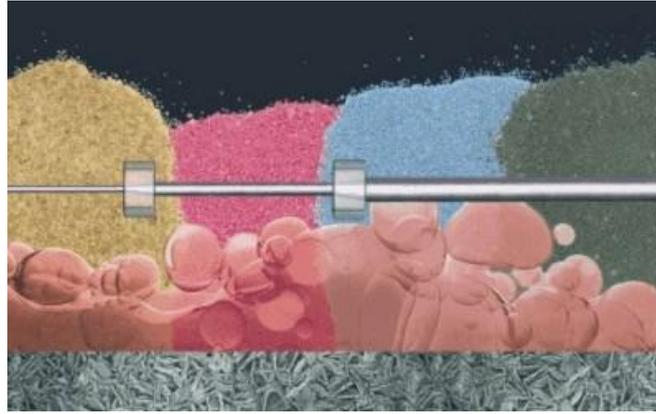


Figure 12: lubrifiants utilisés en tréfilage

5. OUTILS ET EQUIPEMENTS INDUSTRIELS DU TREFILAGE

L'ensemble du matériel de tréfilage comporte trois éléments:

- un dispositif de dévidage du fil,
- une machine à tréfiler,
- un dispositif de récupération du fil écroui.

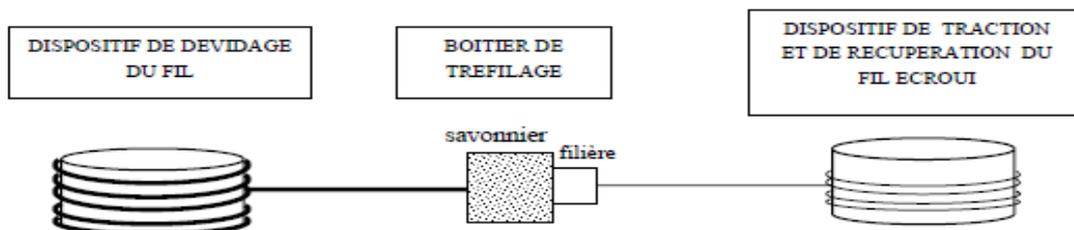


Figure 13 : Schéma d'un dispositif de tréfilage

Parmi tous les dispositifs, nous distinguons :

- les machines de tréfilage à sec, qui permettent d'obtenir des fils jusqu'à 1 mm de diamètre.
- les machines de tréfilage humide, qui sont particulièrement adaptées pour l'obtention de fils plus fins.

La lubrification est mise en œuvre par immersion ou aspersion d'huile minérale.

Suivant la réduction de diamètre souhaitée, le nombre de passes (c'est-à-dire de passages en filière) est ajusté. Pour des réductions de section de l'ordre de 35%, ce sont des dispositifs simples (ou mono passes) qui sont utilisés. Pour des réductions de section plus importantes, il faut envisager des réductions successives et donc utiliser des machines

multiples (appelées également multi passes). Les dispositifs mono passes sont généralement utilisés pour des phases de calibrage, de finition ou pour l'obtention d'un état de surface particulier. [8]



Figure 14 : photo d'une ligne de tréfilage

5.1. LA MACHINE SIMPLE

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

Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant (appelé également savonnier) et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant.[9]

5.2. LES MACHINES MULTIPLES

Elles permettent des réductions de section importantes grâce à un enchaînement de filières. Il existe trois types de machines multiples

- les machines continues ou à passage direct : Ce sont les équipements les plus modernes et les plus répandus. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. En effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit

massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil. Ce type de machine est particulièrement utilisé pour le tréfilage des aciers inoxydables, car ceux-ci ne nécessitent pas un refroidissement entre passes aussi poussé que d'autres types d'aciers.[9]

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

- Les machines à glissement : Dans ces machines dédiées au tréfilage humide, il n'y a ni équilibrage des vitesses, ni accumulation de fil. Le glissement du fil sur les bobines compense les différences de vitesses. Ces équipements permettent de tréfiler du fil "en ébauche", c'est-à-dire qu'ils permettent de réduire le diamètre du fil machine de 5,5mm à 1 ou 2mm en plusieurs passes. Le fil peut ensuite être tréfilé en "reprise" à sec sur des bancs de même type ou bien en milieu humide sur des bancs fonctionnant en immergé pour l'obtention de fils très propres.

6. LA FILIERE

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

- un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant,
- un cône de travail, de demi-angle α , dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil,
- une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil
- un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant.[10]

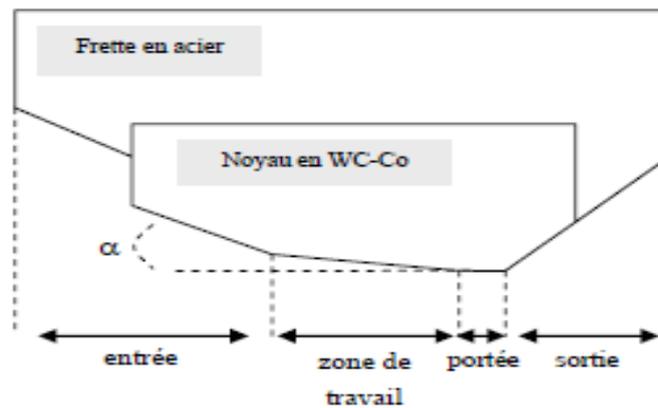


Figure 15 : Schéma d'une filière de tréfilage

Au cours du tréfilage, le matériau de filière se dégrade : l'endommagement peut provenir d'une usure par fatigue ou d'une usure abrasive liée à une mauvaise lubrification. La durée de vie d'une filière est conditionnée par de nombreux facteurs : la nuance du métal, la préparation de surface du fil (qui va "accrocher" le lubrifiant), l'état de surface du fil machine (rugosité), nature et forme de la filière (angles de raccordement), le refroidissement, le lubrifiant et la vitesse de tréfilage. [10]

7. LA FINITION : NETTOYAGE ET TRAITEMENTS THERMIQUES

Après le tréfilage, le fil comporte un film superficiel de lubrifiant et de revêtement dont il faut se débarrasser avant de procéder à un traitement thermique (pour éviter la diffusion d'éléments polluants). Deux sortes de nettoyage peuvent être envisagés, par action mécanique ou chimique (lessives alcalines, solutions acides), au trempé ou au défilé (suivant les sections des fils tréfilés). En dernière étape, les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au 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).[9]

8. LES OBSERVABLES DU TRÉFILAGE: FORCE, FROTTEMENT ET TEMPÉRATURE

8.1. La force : modèles analytiques et simulation numérique

Le fil est tiré au travers de la filière par une force de traction. L'écoulement plastique du métal est rendu possible par l'action combinée de la traction axiale et de la compression radiale imposée par la filière. A l'interface fil-filière, s'exerce en plus de la pression latérale imposée par la filière, un cisaillement fonction des conditions de frottement. La force nécessaire pour tréfiler le fil est donc la somme de la force nécessaire pour déformer plastiquement le fil et de la force nécessaire pour vaincre le frottement. En terme de contrainte de tréfilage, nous pouvons écrire que (relation 1) :[9]

$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi R_s^2} = (\sigma \text{ déformation plastique} + \sigma \text{ frottement})$$

La contrainte de tréfilage est donc fortement dépendante :

De la géométrie de la filière : la valeur de l'angle de filière et la longueur de sa portée vont conditionner la surface de contact entre le fil et augmenter la part du frottement, des propriétés mécaniques du fil et plus particulièrement de sa contrainte d'écoulement, des conditions de frottement à l'interface fil-filière via l'utilisation d'un lubrifiant. Différentes méthodes ont été proposées pour calculer la contrainte de tréfilage. Il faut distinguer les méthodes analytiques des méthodes numériques.

Modèles analytiques

- **La méthode des tranches**

Elle consiste à considérer le fil découpé en tranches cylindriques infinitésimales d'épaisseur dz dont l'axe z est la direction de tréfilage. Chaque tranche est soumise à une traction axiale, à une pression et à une cission de frottement. La résolution des équations d'équilibre nécessite de prendre en compte le critère de plasticité et de choisir une condition de frottement. Si une contre-traction $\sigma_{z,e}$ est exercée,

l'expression de la contrainte de tréfilage en sortie de filière $\sigma_{z,s}$ est donc :

- avec un frottement de Coulomb μ :

$$\sigma_{z,s} = \sigma_{z,e} \lambda^{-\mu \cot \alpha} + \sigma_0 \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) (1 - \lambda^{-\mu \cot \alpha}) \dots\dots\dots 3$$

- avec un frottement de Tresca \bar{m} :

$$\sigma_{z,s} = \sigma_{z,e} + \bar{\sigma}_0 \ln \lambda \left[1 + \frac{\bar{m}}{\sqrt{3}} \cot \alpha \right] \dots\dots\dots 4$$

• **La méthode de la borne supérieure[9]**

Ce modèle, plus rigoureux que le précédent, suppose que les trajectoires sont constituées d'un faisceau de droites convergent sur l'axe du fil et que la zone de déformation est limitée par deux discontinuités de vitesses. L'application du théorème de la borne supérieure montre que l'on obtient ainsi un majorant de la contrainte tréfilage dans la mesure où la puissance dissipée dans l'écoulement considéré sera supérieure à celle dissipée par l'écoulement réel. L'expression de cette contrainte est donc :

$$\sigma_{z,s} = \sigma_{z,e} + \bar{\sigma}_0 \ln \lambda \left[1 + \frac{\bar{m}}{\sqrt{3}} \cot \alpha \right] + 0.77 \sigma_0 \sin \alpha \dots\dots\dots 5$$

9. LE FROTTEMENT

Contrairement à d'autres procédés où il est moteur, le frottement est un phénomène parasite pour le tréfilage. Il génère une augmentation de la force de tréfilage et de la température au cours de l'opération et rend les conditions de tréfilage critiques (rayures du fil, usure de la filière). L'objectif du tréfileur est donc de le minimiser en ajustant les paramètres du procédé (réduction du fil, angle de filière) ou en utilisant un bon lubrifiant (c'est-à-dire un lubrifiant qui recouvre de manière homogène le fil). Le frottement peut être estimé de manière expérimentale, lors d'essais de tréfilage, par mesures directe ou indirecte. [9]

10. LA TEMPERATURE

La connaissance de ce paramètre est capitale puisqu'elle va conditionner le déroulement de l'opération. En effet, un échauffement élevé va modifier les propriétés rhéologiques du lubrifiant, sa consistance et donc son épaisseur passante. Dans le cas le plus critique, un échauffement excessif 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.[9]

Chapitre III

Méthodologie expérimentale ,résultats et discussions

METHODOLOGIE EXPERIMENTALE, RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Introduction

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction générale, notre travail porte sur l'étude des fils d'alliage d'aluminium (AGS) tréfilé à froid.

Cette étude portera sur la caractérisation microstructurale, mécanique et électrique de de l'état déformé des fils tréfilés en fonction du taux de déformation.

2. La méthodologie expérimentale

Matériau étudié

La matière première utilisée dans ce travail est l'AGS dit Midal achetée par l'ENICAB. Les caractéristiques chimiques, mécaniques et électriques sont illustrées dans le tableau suivant :

MIDAL				
Composition Chimique (% .m)				
Al%	Fe	Si	Mg	Cu
98.46	0.211	0.589	0.687	0.020
Caractéristiques d'aluminium utilisé à ENICAB				
Diamètre initial Φ (mm)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement relatif A (%)	La microdureté (HV)	Résistivité électrique ρ (m. Ω .mm)
9.5 mm	215	11	66.84	0.03447

Tableau 1 : Composition chimique et caractéristique de la matière étudiée.

3. Prélèvement des échantillons

La matière qui nous a été fournie par l'entreprise concerne la nuance MIDAL, elle est composée du fils machine et de trois fils tréfiles à des passes différentes. Le fils 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. Ils ont été tréfilés par une tréfileuse à glissement horizontal, de type UDZ WG 125/01gl-F, dont les filières sont en carbure de tungstène. Les étapes de fabrication et les diamètres de fils prélevés sont enregistrés dans le tableau 2.

Le taux de réduction est calculé par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{section initiale} - \text{section finale}}{\text{section initiale}}$$

La désignation	Etat	Taux de réduction
MIDAL 98.46%	Fil machine $D_0=9.5$ mm	$\varepsilon_0 = 0\%$
	$D_1= 8.43$ mm	$\varepsilon_1 = 21.26\%$
	$D_2 =5.29$ mm	$\varepsilon_2 =68.99\%$
	$D_3 = 3.45$ mm	$\varepsilon_3 = 86.81\%$

Tableau 2 : Déformations de des fils.

4. Préparation des échantillons

4.1. Découpage

Le découpage des échantillons à été manuellement à l'aide d'une scie à métaux avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement. Les échantillons destinés à l'essai de traction sont découpés à une longueur de 30 cm et ceux des autres caractérisations sont découpés à 1 cm de longueur (Figure 16).



Figure16: Les échantillons découpés.

4.2. Polissage

Les échantillons destinés à la métallographie et à l'essai de micro dureté sont polis sur du papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries. Dans notre, on a utilisé les papiers 600, 800, 1000 et 1200. Pour le polissage de finition un papiers feutre, imprégné d'une pate diamantée ($0,32 \mu\text{m}$) soluble dans l'eau, a été utilisé.

Le polissage est effectué au laboratoire de métallurgie sur une polisseuse de type PHOENIX ALPHA de marque ANALIS (figure17).



Figure 17 : La polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS.

4.3. L'attaque chimique

Les échantillons destinés à l'observation métallographique subissent une attaque chimique adéquate pour révéler leur microstructure :

- 1- La solution KELLER qui est composée de :
 - 0.5 ml HF (acide fluodrique) 48%.
 - 1.5 ml HCl (acide chloridrique).
 - 2.5 ml HNO₃ (acide nitrique)
 - 100 ml H₂O (l'eau)
- 2- La solution HF dilué à 0,5%

5. Techniques de caractérisations

5.1. Microscopie optique

La microscopie optique est la base de notre étude, cette technique nous permet d'observer les changements microstructuraux induit par la déformation et le recuit de recristallisation des fils tréfilés. Les échantillons sont observés à l'aide d'une microscopie de type HUND T100-WETZLAR, de Wilovert's company (Figure 18). Cet appareil est muni de 4 objectifs (x4, x16, x40 et x100) et équipé d'un appareil à photo numérique canon Powershot G6, de définition 7.0 Méga Pixel.



Figure 18: Microscope optique.

5.2. Microdureté

Cette méthode est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution des propriétés mécaniques des fils après chaque étape de tréfilage. Les mesures de la microdureté ont été effectuées avec une charge de 200g et réalisées au laboratoire de physique à l'université de Biskra.



Figure 19: Microduromètre.

5.3. Essai de traction

L'essai de traction est effectué au niveau du laboratoire physique de la câblerie de Biskra, sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100 (figure 20), dotée d'une capacité de mesure 100KM et d'un extensomètre de longue course ($L_0 = 200\text{mm}$) ; elle est commandée et pilotée par un ordinateur.



Figure 20: Machine de traction INSTRON 5969.

5.4. Mesure la résistivité électrique

La mesure de la résistivité électrique a été réalisée à l'ENICAB par le personnel de l'entreprise, nous n'avons eu aucun détail sur la technique de mesure utilisée et aucune donnée sur l'appareillage de mesure employé.

6. Résultats et discussions

L'observation métallographique

Cette analyse n'est pas réussie, les micrographies obtenues ne sont guère exploitables ; ceci est en effet du à l'échec de l'attaque chimique. Les deux solutions que nous avons utilisées n'ont pas pu révéler en clarté les microstructures des fils étudiés comme on le voit sur les micrographies suivantes :



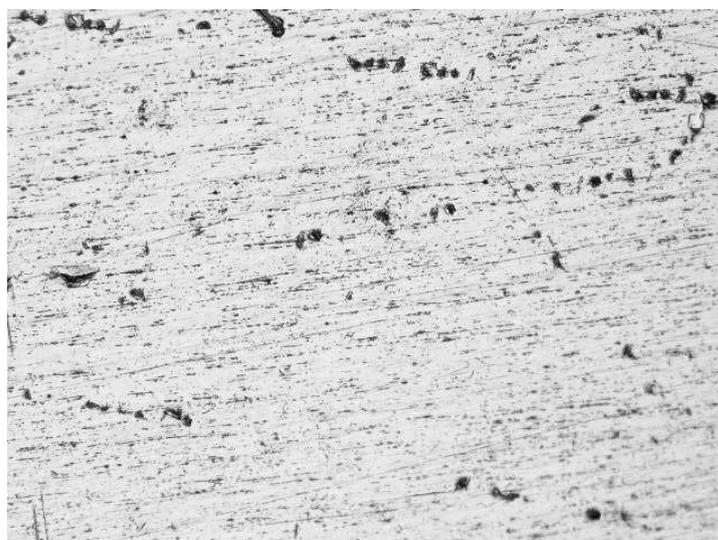
G.X110 : Fil machine



G.X500 : $\Phi = 8,43$ mm



G.X100 : $\Phi = 5,29$ mm



G.X500 : $\Phi = 3,45$ mm

7. La caractérisation mécanique

Diamètres des fils ϕ (mm)	Taux de déformation ε (%)	la charge à la rupture R_m (MPa)	La microdureté (HV)	l'allong-ement A(%)
9,5	0	215	66,84	11
8,43	21,26	254	74,17	4
5,29	68,99	294	93,17	2
3,45	86,81	325	99,11	1,6

Tableau 3: Caractéristiques mécaniques des fils.

7.1. La charge à la rupture

Les propriétés mécaniques telles que l'allongement à la rupture et la contrainte à la rupture sont des facteurs importants dans l'industrie des câbles. La figure 21 présente les variations de la charge à la rupture en fonction du taux de déformation. On remarque, sur cette courbe, que la charge à la rupture augmente avec l'augmentation du taux de déformation de fil.

Ce constat est expliqué par l'écroutissage induit par le tréfilage dans le fil. En effet, plus la déformation (le taux de tréfilage) est importante plus l'écroutissage induit est important plus sera donc important l'effort de toute déformation ultérieure. Ce résultat indique une proportionnalité entre la charge à la rupture et la déformation du fil tréfilé.

La charge à la rupture des fils tréfilés de diamètres 5,29 mm et 3,45 mm sont de 7% à 11% plus élevées que la valeur prescrite par le fournisseur (290 MPa au maximum)

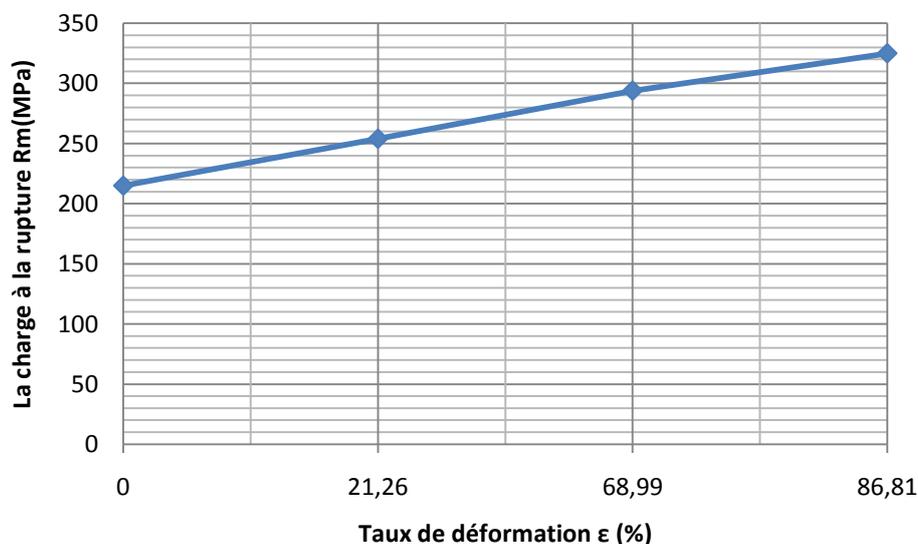


Figure 21: les variations de la charge à la rupture en fonction du taux de déformation de fil.

7.2. L'allongement

Contrairement à la charge à la rupture, l'allongement est inversement proportionnel à la déformation appliquée car cette dernière génère des zones qui facilitent la rupture de fil. De la même manière on interprète ce résultat ; un fil plus déformé s'allonge moins qu'un fil peu déformé car son domaine de plasticité est rétréci par l'écroutissage induit par la déformation en plus.

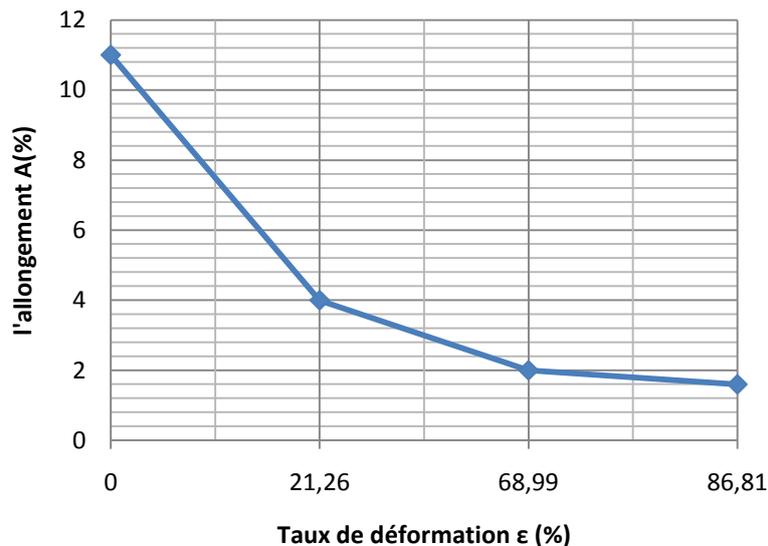


Figure 22: Les variations d'allongement à la rupture en fonction du taux de déformation de fil.

7.3. La microdureté

La figure 23 montre les variations de la microdureté en fonction du taux de déformation, on constate qu'il y a une augmentation de la microdureté avec l'augmentation du taux de déformation. Ce résultat est aussi prévu, en effet tout matériau déformé demandera plus de force pour le déformer encore plus, c'est ainsi que la dureté augmente avec le taux de déformation.

Ce durcissement peut expliquer en partie la rupture des fils dans la chaîne de tréfilage.

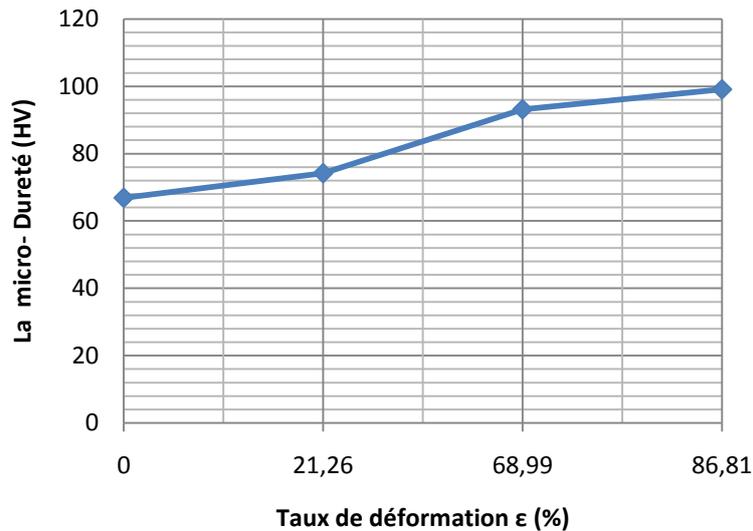


Figure 23: Les variations de la microdureté en fonction du taux de déformation.

8. La résistivité électrique

La résistivité électrique est l'aptitude d'un câble à empêcher le passage du courant électrique à travers de lui, ce paramètre physique est intéressant dans la production des câbles. La figure 24 nous expose les variations de la résistivité électrique en fonction du taux de déformation appliquée. On voit que la résistivité est proportionnelle à la déformation appliquée. Les défauts dus à la déformation appliquée provoquent le piégeage des électrons qui cause une augmentation de la résistivité du fil.

diamètres des fils ø (mm)		Taux de déformation ε (%)	résistivité électrique ρ (Ω.mm ² /m)
Fil-machine	9,5	0	0,03447
1 ^{ere} passe	8,43	21,26	0,03474
2 ^{eme} passe	5,29	68,99	0,03493
3 ^{eme} passe	3,45	86,81	0,03551

Tableau4 : Résultats de résistivité.

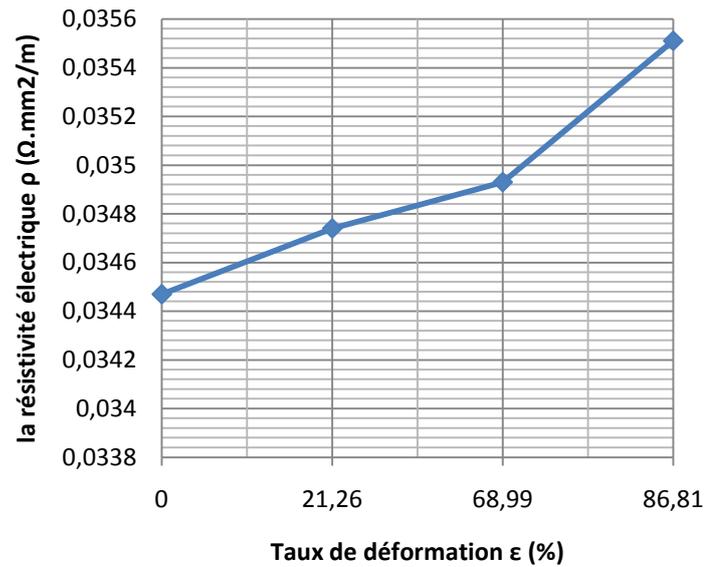


Figure 24 : les variations de la résistivité électrique en fonction du taux de déformation de fil.

9. Conclusion

Le tréfilage provoque la modification des propriétés mécaniques et électrique des fils tréfilés. Cette modification est liée au taux de déformation produite sur le fil.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

D'après ce qui a été obtenu comme résultats dans le chapitre 3, on peut conclure les points suivants :

- Le tréfilage provoque le durcissement des fils d'alliage d'aluminium AGS, ce durcissement est proportionnel à la déformation produite par le tréfilage.
- Le test de traction mené sur les fils montre que le tréfilage augmente de manière proportionnelle à la déformation la charge à la rupture et de manière inversement proportionnelle l'allongement.
- Le tréfilage augmente légèrement la résistivité électrique des fils tréfilés.

Cette modification des propriétés est au fait attribuée à l'écrouissage induit par le tréfile

En perspective ; envisager des traitements thermiques avant et après tréfilage pour les fils de l'alliage MIDAL, afin d'éviter la rupture d'une part et de restaurer et de reproduire les caractéristiques établies par le prescrit du fournisseur.

Résumé :

Cette étude porte sur la caractérisation des fils de l'alliage d'aluminium AGS 6101, tréfilés à froid. L'étude a montré que le tréfilage provoque une modification des propriétés mécaniques et électriques, en particulier la résistance mécanique à la rupture qui est d'environ 7% à 11% supérieure à la valeur prescrite par le fournisseur. Cette modification est attribuée à l'écroutissage de la microstructure à après déformation.

Abstract:

This study focuses on the characterization of the wires of the aluminum alloy 6101 AGS, cold drawn. The study showed that the drawing causes a change of the mechanical and electrical properties, particularly the strength at break which is about 7% to 11% greater than the value prescribed by the supplier. This change is attributed to the hardening of the microstructure after deformation.

ملخص :

هذه الدراسة تتناول تحديد خصائص أسلاك سبائك الألمنيوم من نوع AGS، المسحوبة على البارد. ولقد أظهرت الدراسة أن السحب يؤدي إلى تغيير في الخواص الميكانيكية والكهربائية، وخاصة القوة عند الكسر التي هو أكبر حوالي 7% إلى 11% من القيمة المنصوص عليها من قبل المورد. ويعزى هذا التغيير إلى تصلب البنية المجهرية بعد التشوه.