

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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 : Métallurgie

Option: Métallurgie physique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de:**

**MASTER**

*Thème*

**Etude de L'effet de Traitement de Recuit Sur le  
Comportement Structural et Mécanique des Fils  
en Acier Doux Déformé**

**Présenté par:**

**Wafa BERHI**

**Proposé et dirigé par:**

**Pr. Mosbah ZIDANI**

**Promotion : Juin 2017**

# *Dédicaces*

Ahdaia spécial à toutes mes sœurs filles et les

garçons Mohamed et Ahmed , Zeineb, Nora,

Dalal, Karima et ma soeur jumelle Ikram

Comme je ne l'oublierai pas mon fiancé cher

à mon cœur \*S\* et sa famille

# Remerciement

Tout d'abord je remercie mon encadreur, Monsieur Le professeur M. Zidani pour les orientations qu'il a bien voulu m'apporter lors de mon travail. Je veux bien lui exprimer ma haute et sincère gratitude.

Mes vifs remerciements aux membres de jury

Mes sincères remerciements aux personnels de département de génie mécanique de Biskra Dirigé par docteur k.Aoues et sa secrétaire Salima et Au profit de chaque département d'enseignement particulièrement Fahima Chef de scolarité et mes amies Fatima , Sana, Nassira, Salsabile, Djamila comme je n'oublierai pas mes amies Afef, Baya, Fouzia, Saadia, Sara.

Mes sincères remerciements aux personnels du laboratoire de DRX M<sup>r</sup> I.Gasmi et M<sup>me</sup> I. Gasmia et le personnel du laboratoire de métallurgie Iness Latifa, Amina et Samir.

Et dans le dernier, tout le monde merci qui m'a aidé de près ou de loin.

## Listes des tableaux

Page

### Chapitre I : La déformation plastique par tréfilage

Tableau .I.1 : Comparaisons des divers procédés de mise en forme.....	4
Tableau .I.2 : Les systèmes de maillage pour des différentes structures .....	10

### Chapitre III : Matériaux et méthode expérimentale

Tableau.III.1: La composition chimique de l'acier F8Z .....	27
Tableau.III.2 : Les taux de déformation des fils .....	29
Tableau.III.3 : Résultats des mesures de la microdureté des fils tréfilés .....	35
Tableau.III.4 : Résultats des mesures de la microdureté de recuit .....	39
Tableau.III.5: Résultats des mesures de la microdureté de recuit .....	43

## Listes des figures

### Chapitre I : La déformation plastique par tréfilage

Figure.I.1 : Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux ..	4
Figure.I.2 : Procédés de l'étirage .....	6
Figure.I.3 : Procédés de tréfilage .....	6
Figure.I.4 : Procédé de forgeage .....	7
Figure.I.5 : Laminage de profilés (americana steel and iron institute) .....	7
Figure.I.6: Glissement en traction et en compression .....	8
Figure.I.7 : Modification de la forme d'un grain sous l'effet du glissement .....	9
Figure.I.8 : Texture de déformation .....	11
Figure.I.9 : Profil d'une filière .....	12
Figure.I.10 : Schéma d'un banc à tréfiler .....	14
Figure.I.11 : Machine décalamineuse par flexion (schéma de fonctionnement) .....	15

### Chapitre II : Traitements thermiques de recuits des files tréfilés

Figure.II.1 : Diagramme d'équilibre Fer-carbone de Fer au voisinage du point eutectoïde .....	19
Figure.II.2 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques et la structure d'un métal durci par déformation .....	23

<b>Figure.II.3</b> : Influence de la température, de la durée du chauffage et du degré de déformation sur la grosseur du grain recristallisé ( $t_1 < t_2 < t_3$ ) .....	25
<b>Figure.II.4</b> : Recristallisation dynamique : évolution de la microstructure au cours de la déformation .....	26

### **Chapitre III : Matériaux et méthode expérimentale**

<b>Figure.III.1</b> : Polisseuse mécanique .....	29
<b>Figure.III.2</b> : Attaque chimique .....	29
<b>Figure.III.3</b> : Microscope optique métallographique de type HUND WETZLAR .....	30
<b>Figure.III.4</b> : Microduromètre Vickers de type 402 MVDZ .....	30
<b>Figure.III.5</b> : Famille de plans cristallins en condition de Bragg .....	31
<b>Figure.III.6</b> : Diffractomètre des rayons X de type Bruker D8 Advance .....	33
<b>Figure.III.7</b> : Microstructure de fil machine de composition 0.097 % en carbone .....	34
<b>Figure.III.8</b> : Microstructure des fils déformé par MO de : a) $\epsilon_1 = 27.27$ % et b) $\epsilon_2 = 40.9$ % .....	35
<b>Figure.III.9.a</b> : Variation de la microdureté avec le taux de déformation des fils déformés .....	36
<b>Figure.III.9.b</b> : Histogramme de la variation de la microdureté en fonction de taux de déformation des fils déformés .....	37
<b>Figure.III.10</b> : Evolution microstructurale de l'acier doux 0,097 % C à 400 °C pendant 10 min et 60 min .....	38
<b>Figure.III.11.a</b> : La variation de la microdureté en fonction de taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 400°C .....	39
<b>Figure.III.11.b</b> : Histogramme de la variation de la microdureté avec le taux de déformation de l'état tréfilé et recuit a 400°C .....	40
<b>Figure.III.12.a</b> : La variation de la microdureté en fonction du temps de maintien de l'état recuit à 400°C .....	40
<b>Figure.III.12.b</b> : Histogramme de la variation de la microdureté avec le temps de maintien des fils tréfilés et recuit a 400°C .....	41
<b>Figure.III.13</b> : Evolution microstructurale de l'acier doux 0,097 °C à 550 °C pendant 10 min et 60 min .....	42
<b>Figure.III.14.a</b> : La variation de la microdureté en fonction de taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 550°C .....	43
<b>Figure.III.14. b</b> : Histogramme de la variation de la microdureté avec le taux de déformation de l'état tréfilé et recuit a 550°C .....	44

<b>Figure.III.15.a</b> : La variation de la microdureté en fonction du temps de maintien de l'état recuit à 550°C .....	44
<b>Figure.III.15.b</b> : Histogramme de la variation de la microdureté avec le temps de maintien des fils tréfilés et recuit a 550°C .....	45
<b>Figure.III.16</b> : Spectres de diffraction de rayons x des fils d'acier F8Z brute et tréfilé ....	46

# Sommaire

	page
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : La déformation plastique par tréfilage</b>	
I. Introduction.....	3
II. Les procédés de mise en forme .....	3
III. Les modes de mise en forme .....	5
III.1. La mise en forme à froid .....	5
III.1.a. L'étirage .....	5
III.1.b. Le tréfilage .....	6
III.2. La mise en forme à chaud .....	6
III.2.a. Le forgeage .....	7
III.2.b. Le laminage .....	7
IV. La déformation plastique .....	8
IV.1. Introduction .....	8
IV.2. Le glissement .....	9
IV.3. Le maclage .....	9
IV.4. La différence entre la déformation par maclage et par glissement .....	10
IV.5. Texture de déformation .....	11
V. Le Procède de Tréfilage .....	12
V.1. Introduction .....	12
V.2. Description de la filière .....	12
V.3. Le principe de tréfilage .....	13
V.4. But de tréfilage .....	14
V.5. Procédés de préparation du fil machine .....	14
V.5.1. Méthode mécanique (décalaminage) .....	15
V.5.1.1. Méthode par flexion .....	15
V.5.1.2. Méthode par grenailage .....	15
V.5.2. Méthode chimique (décapage) .....	15
V.6. Lubrification .....	16
V.6.1. Lubrifiant .....	16
V.6.2. Dispositif pour améliorer la lubrification .....	16
V.6.3. Refroidissement du fil au cours du tréfilage .....	16

## Chapitre II : Traitements thermiques de recuits des files tréfilés

### Partie 1 : Traitement thermique des files tréfilés

I.Introduction .....	17
II. Tréfilage des aciers doux .....	17
III. L'effet de traitement thermique sur les aciers .....	18
III.1. Introduction .....	18
III.2. Recuits .....	18
III.2.1. Recuit de normalisation .....	18
III.2.2. Recuit complet .....	19
III.2.3. Recuit de coalescence .....	20
III.2.4. Recuit de recristallisation .....	20
III.2.5. Recuit d'adoucissement .....	20
IV. Patentage .....	21
IV.1. Définition .....	21
IV.2. Application .....	21

### Partie 2: Recuit de fil d'acier tréfilé

I.Introduction .....	22
II. Mécanisme de recristallisation .....	22
II.1. La restauration .....	22
II.2. Recristallisation .....	23
III. Texture de recristallisation .....	24
III.a. La germination .....	24
III.b. La croissance des grains .....	24
III.c. Le grossissement des grains .....	24
IV. Restauration et recristallisation dynamiques .....	25
IV.a. Restauration dynamique .....	25
IV.b. Recristallisation dynamique .....	26

## Chapitre III : Matériaux et méthode expérimentale

### Partie 1 : Matériaux et méthode expérimentale

I.1. Introduction.....	27
I.2. Choix et préparation des échantillons .....	27
II. Préparation du fil machine à Tréfissoud.....	27
II.1. Le décapage .....	27
II.2. Le décalaminage .....	28
III. Méthodes expérimentales utilisées.....	29

III.1. Préparation métallographique .....	29
III.2. Microscopie optique .....	30
III.3. Microdureté .....	30
III.4. Diffraction des rayons X .....	31
* Principe .....	31
* Exploitation des diffractogrammes .....	32
* Positions angulaires des raies de diffraction .....	32
* Intensités des raies de diffraction .....	32
* Configurations de mesure .....	33

## **Partie 2 : Résultats et interprétation**

I. Introduction .....	34
II. Fil machine .....	34
III. Etude de l'état déformé .....	35
IV. Microdureté .....	35
V. Etat recuit .....	37
V.1.a. Traitements thermiques des fils tréfilés à 400°C .....	37
V.1.b. La variation de la microdureté lors de recuit isotherme à 400 °C .....	39
V.2.a. Traitement thermique des fils tréfilés à 550°C .....	41
V.2.b. La variation de la microdureté lors de recuit isotherme à 550 °C .....	43
VI. Etude par diffraction de rayons X .....	46
conclusion générale .....	47
Résumé	

# introduction générale

The image features the text 'introduction générale' in a bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple for 'i', transitioning through red, orange, yellow, green, and ending with blue and purple for 'générale'. The text is presented in a 3D perspective, with a soft, grey shadow cast beneath it, suggesting it is floating above a surface. The background is plain white.

# Introduction générale

Les métaux et les alliages sont commercialisés sous différentes formes, en fonction de leur utilisation ultérieure. On note que dans l'industrie on utilise trois types de mises en formes, en l'occurrence la fonderie qui est le versement d'un liquide dans un moule ou il se refroidie sous la forme souhaitée, le frittage de poudres qui consiste à comprimer la poudre dans la forme désirée et la chauffer à l'état solide pour obtenir une pièce. et en dernier la déformation plastique.

Le principe de tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de (traction) et celle de (fil). Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant à faire passer le métal à travers un orifice calibré, appelé (félière), sous l'action d'une traction continue.

Les industriels se sont alors orientés vers l'amélioration des lubrifiants bruts, la diminution des inclusions, l'homogénéisation de la matière, la réduction de la ségrégation et des impuretés parasites. De gros progrès ont été atteints, voire dépassés sans modifier le procédé d'élaboration.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de traitement de recuit sur le comportement structurel et mécanique des fils en acier doux (F8Z) déformé à l'entreprise de tréfilage (EL.Ealma-Sétif)

Ce mémoire est présenté en trois chapitres comme suit :

**Le premier chapitre** : est consacré à la recherche bibliographique qui se subdivise en deux parties. La première partie traite les procédés de mise en forme des matériaux métalliques. La seconde partie présente la déformation plastique par le procédé de tréfilage.

## **Introduction générale**

---

**Dans le deuxième chapitre :** ont l'exposera en deux parties. La première partie présente les traitements thermiques des fils tréfilés et la deuxième partie est consacré au recuit des fils d'acier tréfilés

**Le troisième chapitre :** présente le matériau et les méthodes d'analyse utilisé et résultats obtenus et leurs interprétations.

Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale.

# Chapitre I

## La Déformation Plastique par Tréfilage

## **Les procédés de mise en forme des matériaux métalliques**

### **I. 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 cout.

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].

### **II. Les procédés de mise en forme :**

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine géométrie, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées (**Fig.I.1**).

Les techniques de mise en forme diffèrent selon les matériaux. Pour les métaux les principaux procédés sont (**Tableau.I.1**):

- Forgeage : consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage.
- Fonderie : cette technique consiste à fondre et à couler le métal dans un moule.
- Frittage : permet de consolider la poudre sous l'action de la chaleur et la rend ainsi compacte.
- Emboutissage : permet d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle mince, un objet dont la forme est non développable [2].

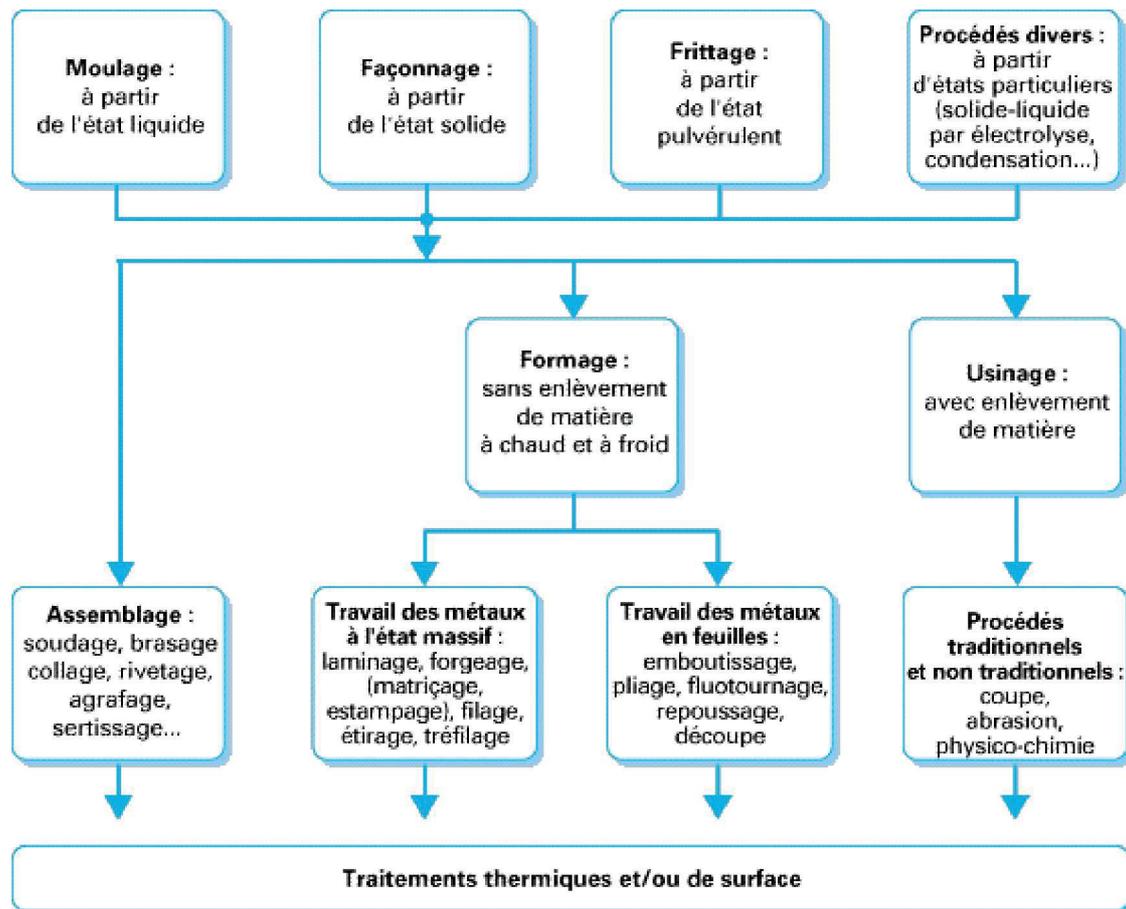


Figure.I.1 : Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux.

- Comparaison des divers procédés de mise en forme et de fabrication

Caractéristiques	Mise en forme				
	à froid	à tiède	à chaud	état semi-liquide	état liquide
$T/T_f$	0,15	0,5	0,7 à 0,85	≈ 1	> 1
$\theta(C)$ :					
- aciers		600	1 200	1 500	> 1 530
- alliages cuivreux	20		800		> 1 000
- alliages d'aluminium			400 à 480		> 600
Procédés	laminage forgeage emboutissage tréfilage cisailage coupe	forgeage	laminage forgeage filage étirage frittage forgeage superplastique	rhéoformage thixoformage injection de gelées métalliques	coulée continue moulage soudage oxycoupage faisceau laser torche plasma ...
$\sigma_o (N/mm^2)$ (aciers)	200 à 1 500	100 à 500	50	1	0
Energies Forces de mise en forme	élevées	moyennes	faibles	négligeables	
Qualité du produit :					
- tolérances dimensionnelles	élevées	moyenne	faibles	faibles	faibles
- état de surface	très bon	bon	médiocre	médiocre	médiocre
- structure métallurgique	écrouie	écrouie	restaurée ou recristallisée		dendritique
Aspects tribologiques :					
- lubrification	variée	problèmes	difficile	difficile (laitiers, verres...)	
- sollicitations des outils	mécaniques	critiques	thermomécanique	thermiques	

Tableau.I.1 : Comparisons des divers procédés de mise en forme.

### **III. Les modes de mise en forme :**

Les opérations de mise en forme se font par déformation plastique, les principales opérations sont le forgeage, le tréfilage et l'emboutissage, elles peuvent être faites à chaud ou à froid suivant la nature du matériau utilisé.

#### **III.1. La mise en forme à froid :**

Dans la pratique l'expression à froid signifie à la température ambiante : en générale, 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 des 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 sortant 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.

Nous examinons successivement les lois de comportement, les évolutions de structure (et de texture) ainsi que les phénomènes d'endommagement liés à la mise en forme à froid [3].

##### **III.1.a. L'étirage :**

L'étirage consiste à tirer une pièce métallique à travers une matrice à alésage conique en appliquant une force de traction à la sortie. A mesure que la pièce s'allonge, sa section transversale diminue. L'étirage total s'effectue parfois à l'aide d'une suite de matrice. Les tiges, les fils et les tuyaux sont des exemples de pièces généralement fabriquées par étirage (**Fig.I.2**) [4].

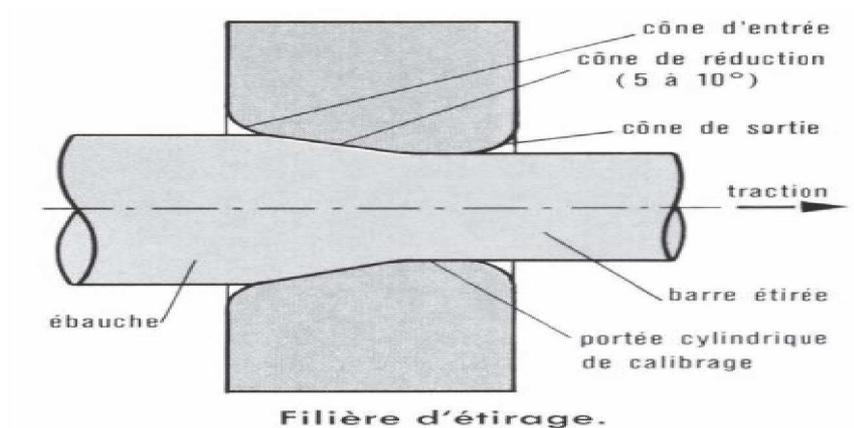


Figure.I.2 : Procédés de l'étirage.

### III.1.b. Le tréfilage :

Qui est une opération à l'aide de la quelle on peut réduire la section d'un fil rond par passage successif à travers de filières calibrées sous l'action d'une traction exercée normalement à la sortie de chaque filière pour augmenter sa longueur (Fig.I.3) [5].

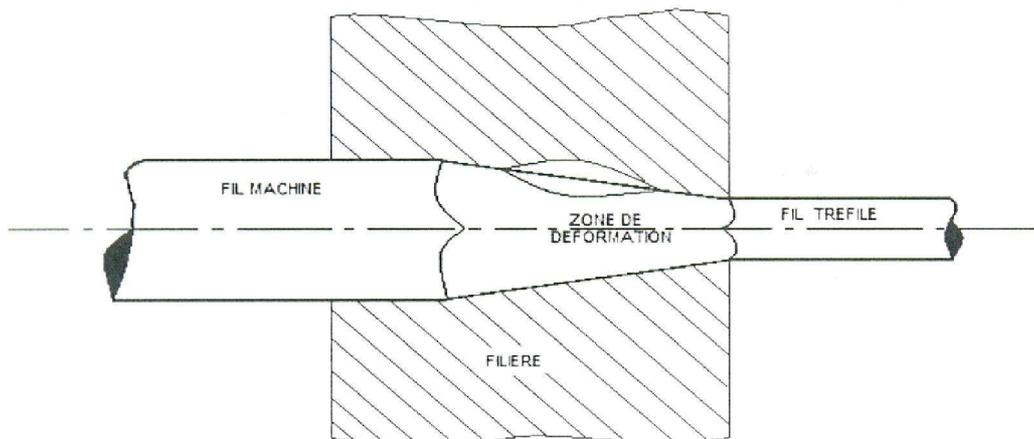


Figure.I.3 : Procédés de tréfilage.

### III.2. La mise en forme à chaud :

La mise en forme à chaud concerne, en principe, les opérations de déformation plastique effectuées à une température absolue  $T \geq 0.5 T_f$  (ou  $T_f$  désigne la température de fusion commençante du matériau), soit par exemple : (lois de comportement et évolution structurales), [6].

Tungstène :  $\theta > 1554^\circ\text{C}$

Fer :  $\theta > 631^\circ\text{C}$

Cuivre :  $\theta > 393^\circ\text{C}$

Aluminium :  $\theta > 193^\circ\text{C}$

Plomb :  $\theta > 27^\circ\text{C}$ .

### III.2.a. Le forgeage :

Le forgeage désigne le travail ou la déformation mécanique d'une pièce métallique généralement chaud et s'accomplit soit par application de chocs successifs, soit par compression continue. Le forgeage se fait en matrice fermée ou ouverte. Dans le cas d'une matrice fermée, le métal se déforme dans la cavité entre elle (**Fig.I.4**). Dans le cas d'une matrice ouverte, on utilise deux matrices de forme géométrique simple (plates et parallèles, ou semi-circulaires, par exemple), habituellement avec de grosses pièces. Les pièces ainsi obtenues ont une structure de grains remarquable et offrent la meilleure combinaison de propriétés mécaniques [4].

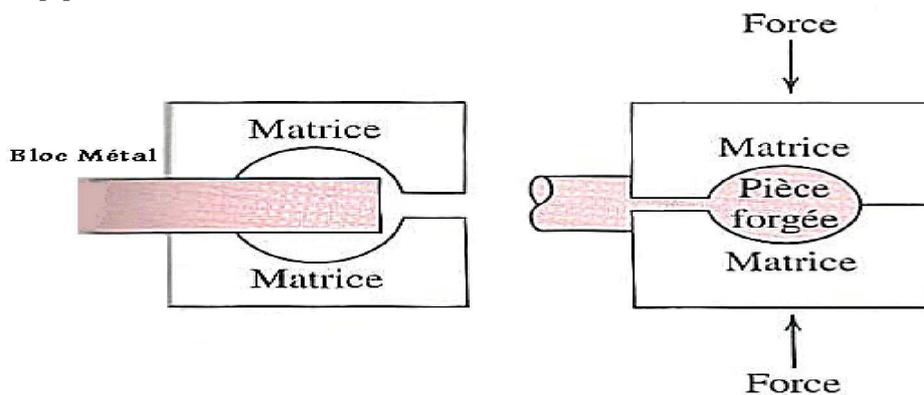


Figure.I.4 : Procédé de forgeage.

### III.2.b. Le laminage :

C'est l'opération que consiste à déformer un métal en faisant 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 pour préparer des produits plats, ou utilisés des cylindres à génératrice rectiligne, pour obtenir des produits présentant des ormes particulières ou employer des cylindres à cannelu (**Fig.I.5**) [7].

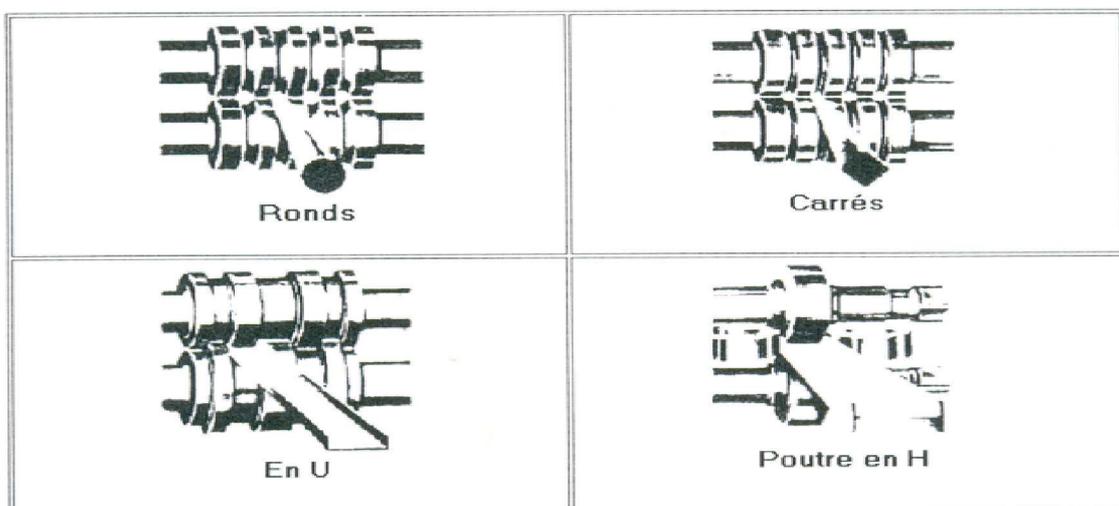


Figure.I.5 : Laminage de profilés (americana steel and iron institute).

### IV. La déformation plastique :

#### IV.1. Introduction :

L'étude des propriétés mécaniques des métaux et essentiellement leurs propriétés plastiques est très importante. Ce sont celles-ci qui ont d'ailleurs un intérêt pratique soit qu'on les utilise directement au cours des opérations industrielles de formage soit qu'on veuille éliminer ou réduire au maximum toutes déformations dans les constructions et pièces métalliques de toutes sortes. Les recherches actuelles en métallurgie ont pour but en forte proportion, la mise au point d'alliage à résistance mécanique de plus en plus élevée.

La déformation peut être étudiée au moyen d'essais de laboratoire en nombre varié. L'essai de traction (**Fig.I.6**) permet l'étude détaillée des propriétés mécanique de base et dont l'interprétation est simple. Celui-ci doit être complété par l'observation micrographique, optique et électronique, qui renseigne sur les modes de déformations plastiques mise en jeu, en outre la radiocristallographie, par l'étude de la structure fin des taches Laue, fournit de nombreuses informations sur l'état de perfection de la structure cristalline [8].

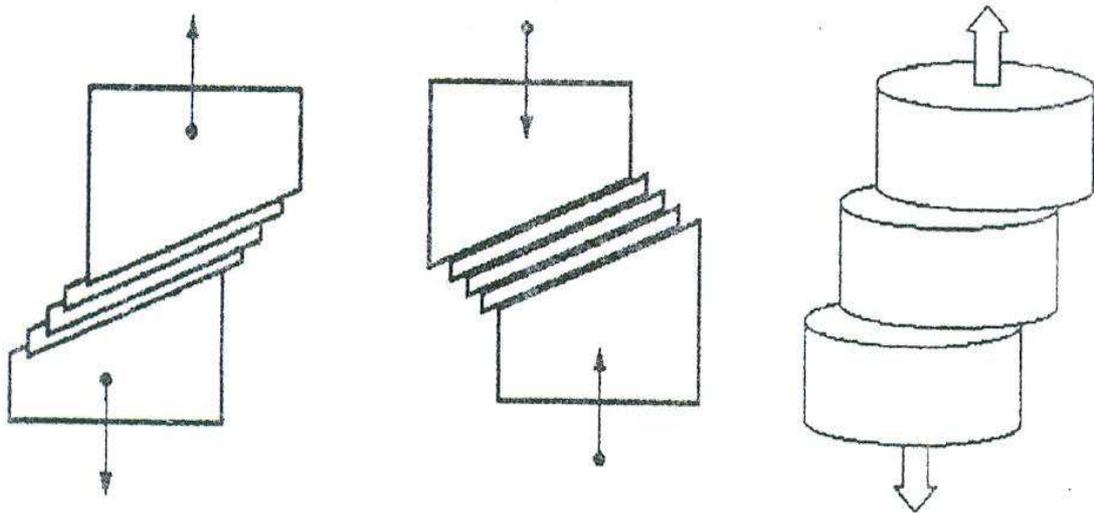
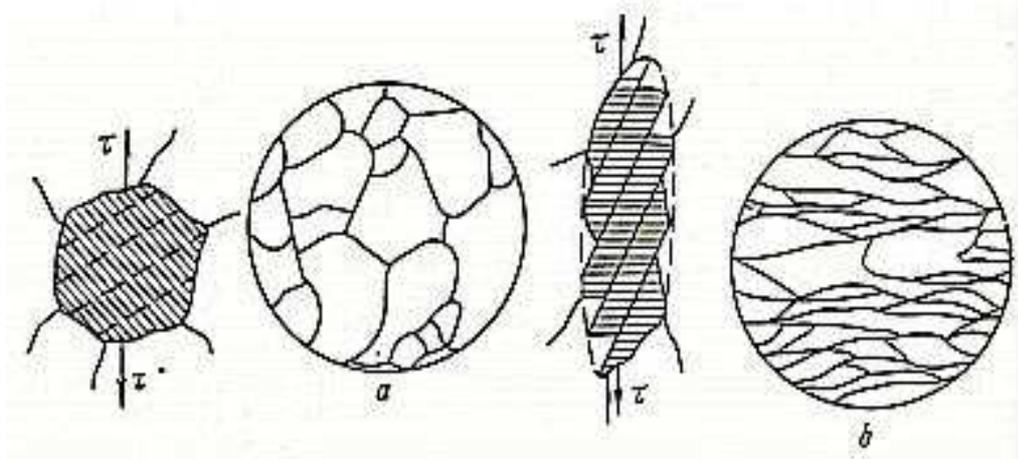


Figure.I.6: Glissement en traction et en compression.

### IV.2. Le glissement :

Fait que lorsque la déformation est importante, la forme des grains (cristaux) change. Avant la déformation, les grains ont une forme arrondie (**Fig.I.7.a**), après la déformation suivant les plans de glissement tendent les grains dans le sens des efforts appliqués, et en produit une structure fibreuse (**Fig.I.7.b**) [9].



**Figure.I.7** : Modification de la forme d'un grain sous l'effet du glissement.

a : avant déformation.      b : Après déformation.

La modification de la forme des grains s'accompagne à leur intérieure de la fragmentation des blocs et du renforcement de leur désorientation. L'étude radiographique montre qu'après la déformation, les grains isolés et les blocs sont sollicités par une contrainte élastique, alors que suivant les joints des grains, et au voisinage des plans de glissements, le réseau cristallin subit une distorsion (déformation par une torsion).

### IV.3. Le maillage :

C'est mode de déformation beaucoup plus compliqué que le glissement.

Dans ce cas, les atomes des matériaux se déplacent de telle manière que le réseau cristallin ne soit pas transformé, et le réseau maillé devient symétrique par rapport à un plan de mode.

Dans les cristaux cubiques possèdent de nombreux systèmes de glissement répondent complémentaire du glissement et ce mode existe fréquemment dans les métaux CC (fer  $\alpha$ ) à température inférieure à la température ordinaire.

Pour les métaux CFC est favorisé pour les basses températures, les fortes vitesses de déformation ou pour une faible énergie du défaut d'empilement (**Tableau.I.2**).

**Tableau .I.2** : Les systèmes de maclage pour des différentes structures.

Structure	Direction de macle	Plan de macle
CFC	112	111
CC	111	112
HC	101	102

#### IV.4. La différence entre la déformation par maclage et par glissement :

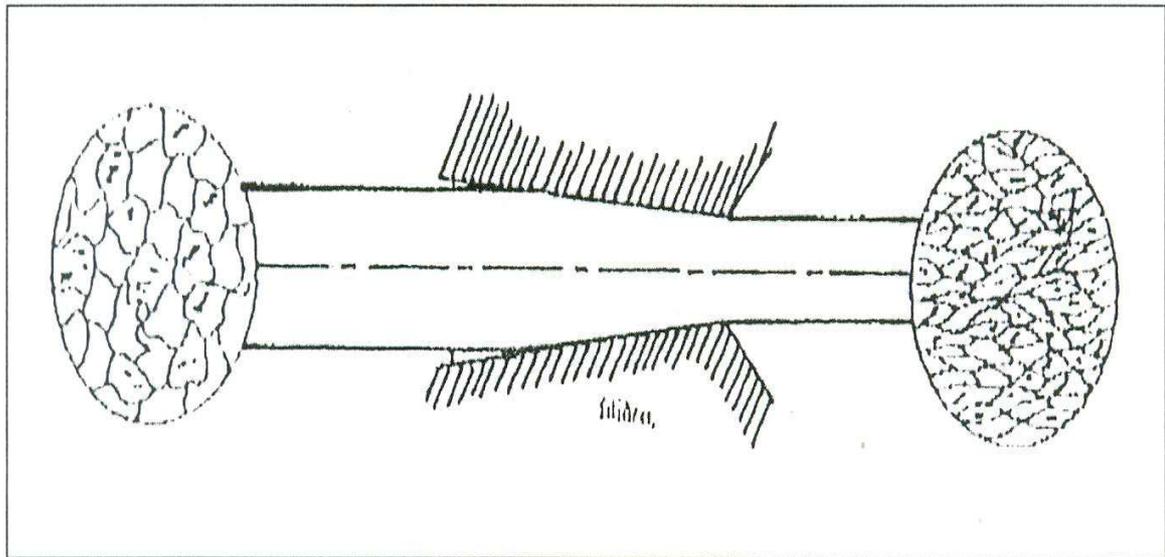
Pour le glissement, les dislocations se propagent dans le même plan, par contre le maclage exige la propagation d'une dislocation sur chaque plan succin. Il semble qu'il contribue plutôt au relâchement des contraintes engendrées par les hétérogénéités de déformation plastique.

Il peut aussi contribuer à une rotation du cristal qui permet au glissement facile de se poursuivre [10].

#### IV.5. Texture de déformation :

Lorsque les déformations sont importantes, elles donnent, lieu à une orientation cristallographique préférentielle des grains, l'orientation régulière des cristaux déterminée par les efforts extérieurs à reçu le nom de texture (texture de déformation).

Plus la déformation est forte plus le nombre de grains à orientation préférentielle (texture) est grand. Le caractère de la texture dépend de la nature du métal et du mode de déformation (laminage, tréfilage.....etc.). La texture cristallographique ne doit pas être identifiée à une structure fibreuse, il se peut que cette dernière ne possède pas de texture car la structure fibreuse est définie par la présence des inclusions. La formation d'une texture favorise l'anisotropie des propriétés mécaniques et physiques (**Fig.I.8**) [15].



**Figure.I.8** : Texture de déformation.

Certaines propriétés des métaux polycristallins dépendent des orientations cristallographiques des différents grains qui les constituent.

Cette texture se manifeste d'abord sur les propriétés pour lesquelles un cristal unique présente un comportement anisotrope.

La texture intervient pour le glissement aux joints dans le fluage, la ségrégation intergranulaire ou la diffusion intergranulaire car elle conditionne les caractéristiques des joints des grains. Leurs propriétés dépendent de cinq paramètres géométriques, trois fixent la position relative des réseaux de deux grains voisins, et deux l'orientation du joints qui les sépare, les trois premiers découlent directement de la texture ; la forme allongée de certains indique de plus une tendance du joints à suivre un tracé privilégié minimale, et par conséquent à fixer dans une certaine mesure les deux derniers paramètres [9].

### V. Le procédé de tréfilage :

#### V.1. Introduction :

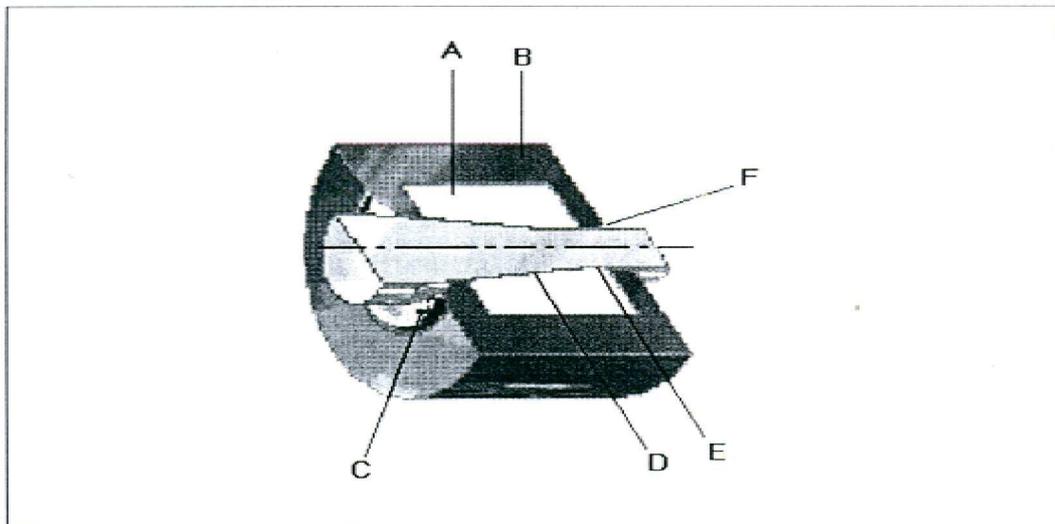
L'opération qui permet la réduction du diamètre du fil est dite tréfilage.

Le tréfilage est la déformation plastique à froid qui consiste à réduire la section d'un fil rond par passage successifs au travers de filières calibrées sous l'action d'une traction continue exercée normalement en sortie de chaque filière (**Fig.I.9**).

#### V.2. Description de la filière :

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. Elle est constituée d'un noyau dur A généralement en carbure de tungstène ou en diamant, frété dans une monture B en acier. La surface intérieure est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrice généralement rectilignes (**Fig.I.9**)

- Cône d'entrée C, permettant l'entraînement de lubrifiant.
- Cône de travail D, d'angle au sommet  $2\alpha$ .
- Portée cylindrique E, dont la longueur comprise entre  $1/3$  et  $1/2$  du diamètre obtenir.
- Cône de sortie ou chanfrein de dégagement F.



**Figure.I.9** : Profil d'une filière.

La forme de la partie active de la filière composée du cône de travail (ou cône d'étirage) peut varier suivant :

- La nature et l'état de l'acier.
- Le taux de réduction du minimum de perte d'énergie par frottement sur les parois.
- La progressivité régulière de la déformation.
- Le type de lubrifiant.

Les valeurs, généralement, adoptées pour l'angle  $2\alpha$ . Varient entre  $8^\circ$  et  $20^\circ$  en fonction des éléments cités précédemment, l'optimum pour lequel les frottements et l'effort de tréfilage

Sont minimaux est compris entre  $10^\circ$  et  $12^\circ$  [11].

### **V.3. Le principe de tréfilage :**

Le principe de tréfilage est d'utiliser la plasticité du métal pour réduire le diamètre du fil par le passage à travers plusieurs orifices calibrés appelés (filière) de diamètre décroissant ; les principaux types de tréfileuses sont [4] :

- Machines mono passe
- Machine multiple.

La figure.I.10 : représente un modèle type d'une tréfileuse qui se compose de :

- Le dévidoir : qui permet le déroulement continu de la couronne de fil.
- La boîte à savon : qui permet le logement du porte filière et le logement du lubrifiant.
- La porte de filière : qui permet le positionnement de filière et le refroidissement de celle-ci.
- La bobine : qui permet de tirer le fil à travers le filière et l'enrouler en spire
- L'extracteur : permettant d'enlever la couronne de fil de bobine.
- La boîte à vitesse : qui permet de varier la vitesse de rotation de la bobine
- La filière (passe) : qui est constituée d'un noyau en carbone métallique fritté (le plus souvent en carbure de tungstène). Le noyau est ensuite fritté sur un corps cylindrique en acier appelé (monture).

de plus, la filière est un bloc en général cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme que l'on désire du produit à tréfiler. Elle est composée de quatre parties :

- Le cône d'entrée qui contribue à entrainer le lubrifiant dans la filière.
- Le cône de travail : partie essentielle dans laquelle le métal subit sa déformation par compression.
- La portée : qui guide le fil après déformation.
- Le cône de sortie.

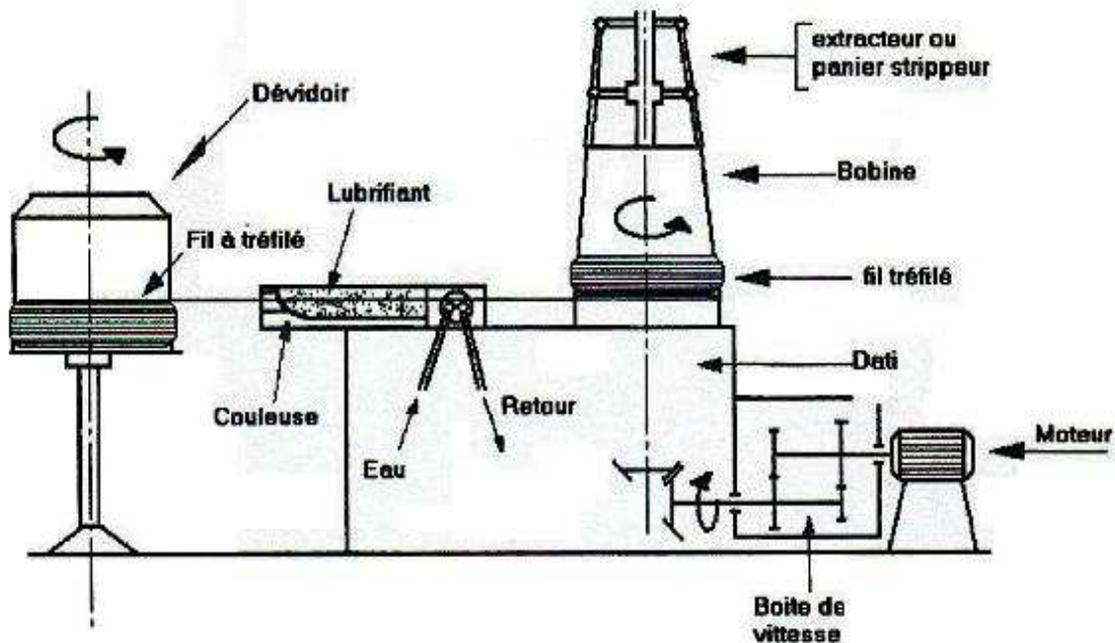


Figure.I.10 : Schéma d'un banc à tréfiler.

#### V.4. But de tréfilage :

Le tréfilage a pour but de transformer le métal en fil, par passage à travers une filière. C'est un procédé analogue à l'étirage. La seule différence réside dans le fait que le fil est enroulé sur un tambour à la sortie de la filière.

#### V.5. Procédés de préparation du fil machine :

Le fil machine, après laminage est recouverte d'une couche d'oxydes métallique, la dureté et l'absence de plasticité de ceux-ci imposent qu'ils soient éliminés de la surface du fil avant l'opération de tréfilage. Par ailleurs, les états de surfaces régulières accroissent l'aptitude à la déformation. Cette préparation de surface s'effectue :

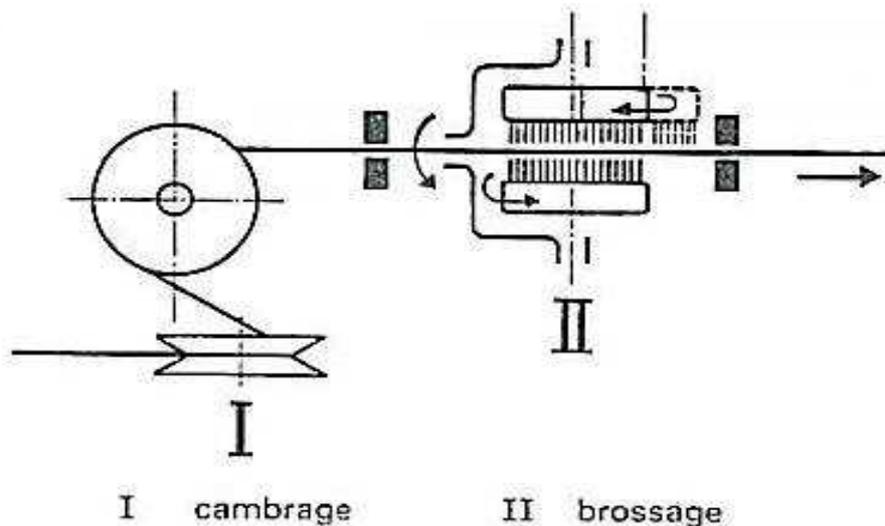
- Par des moyens mécaniques (décalaminage).
- Par des moyens chimiques (décapage).
- Par combinaison des deux systèmes.

Enfin, très souvent, le tréfileur profite de cette première opération indispensable pour déposer sur le fil un premier film lubrifiant ou un support pour les lubrifiants ultérieure [12].

### V.5.1.Méthode mécanique (décalaminage) :

#### V.5.1.1.Méthode par flexion :

Pour des épaisseurs de calamine non décomposée supérieures à  $10\ \mu\text{m}$  soit un taux massique de 5%. Sur du fil machine de diamètre 5.5 mm, un allongement du fil provoque l'éclatement et le décollement des couches d'oxydes. Si l'on fait un allongement de 6 % à un fil machine recouvert d'un taux de calamine de 5 à 6%. Après cette opération le taux de calamine dite résiduelle est de l'ordre de 0.5 à 1%. (**Fig.I.11**) [13].



**Figure.I.11** : Machine décalamineuse par flexion (schéma de fonctionnement).

#### V.5.1.2. Méthode par grenailage :

La calamine est enlevée en bombardant le fil machine à l'aide d'un flux de grenaille dont la disposition permet de toucher la totalité de la périphérie.

### V.5.2.Méthode chimique (décapage) :

La calamine va être éliminée par l'action chimique de l'acide sur celle-ci et sur le métal de base. Suivant la nature du métal et les conditions d'exploitation, différents acides seront utilisés :

- Pour les aciers au carbone, on emploie généralement des solutions d'acide sulfurique ou chlorhydrique.

## **Chapitre I : La déformation plastique par tréfilage**

---

- Pour les aciers inoxydables, on fait appel à des solutions complexes en fonction du type d'aciers et de l'épaisseur de la couche de calamine.

Après élimination de la couche d'oxyde on peut procéder au tréfilage du fil machine. [13].

### **V.6. Lubrification :**

#### **V.6.1. Lubrifiant :**

Les pressions extrêmes élevées qui se développent dans l'opération de tréfilage nécessitent des lubrifiants particuliers qui doivent :

- Résister aux fortes élévations de température.
- Réduire l'effort à exercer pour obtenir la déformation.
- Supporter les opérations successives de tréfilage.

Assurer un régime de lubrification stable [13].

#### **V.6.2. Dispositif pour améliorer la lubrification :**

Dans le système courant de lubrification, la matière lubrifiante est absorbée par la surface du métal et diminue la dureté de la couche extérieure. Tout se passe dans les conditions de frottement limité.

Par analogie avec la lubrification liquide, des dispositifs ont été recherchés pour provoquer une arrivée du lubrifiant sous pression qui permet de réaliser des lubrifications du type hydrodynamique.

D'autres procédés améliorent la lubrification et font l'objet d'études et d'essais :

- Tréfilage dans un champ ultrasons.

Application de lubrifiants par procédés électrostatiques [13].

#### **V.6.3. Refroidissement du fil au cours du tréfilage :**

Le fil s'échauffe dans la filière : des mesures ont enregistré des températures atteignant 250°C. L'influence de ces températures sur le fil conduit à un processus de fragilisation, c'est-à-dire à la réduction de l'aptitude à la déformation. Cette perte de déformation est attribuée au vieillissement par écrouissage très rapide du fil aux températures très élevées.

Dans le travail en continu par passes successives ; divers moyens sont utilisés pour refroidir le fil avant son introduction dans la filière suivante, on peut énumérer :

- Accumulation sur une bobine intermédiaire fortement refroidie à l'intérieure par une circulation d'eau et à l'extérieur par un soufflage énergique d'air froid.

Refroidissement direct du fil à la sortie de la filière par un courant d'eau [13].

# Chapitre II

**Traitements**

**Thermiques de**

**Recuits des Files**

**Tréfilés**

## **Traitement thermique des files tréfilés**

### **I. Introduction :**

Le tréfilage à froid est essentiellement une opération de mise en forme par déformation plastique. Dans les métaux, cette déformation s'obtient par glissement suivant certains plans et directions de glissement grâce au déplacement de dislocation. Après déformation, une partie de ces dislocations reste piégée à l'intérieur des grains. Dans ce cas, la structure est dite écrouie et les propriétés du métal sont modifiées. La déformation plastique a pour effet de durcir le métal et diminuer ses possibilités de déformation ultérieure. Voilà pourquoi on est amené à recuire le métal soit pour suivre le tréfilage à froid, soit pour redonner aux produits finis des propriétés de plasticité suffisante. La mise en forme à froid de la grande majorité des aciers destinés à la fabrication des fils d'usage général (grillage, pointes...) nécessite parfois la réalisation d'un recuit préalable soit avant l'utilisation du métal ou après la déformation plastique [1].

### **II. Tréfilage des aciers doux :**

En général, tous les aciers peuvent être transformés en fil par tréfilage l'expérience conjointe des sidérurgistes et des tréfileurs a fait rechercher les caractéristiques optimales que doit avoir la matière première pour une bonne aptitude à la déformation à froid.

La plus grande majorité des aciers d'usage général sont livrés et employés à l'état ferrito-perlitique :

Ceci signifie qu'ils sont constitués des grains ferritiques juxtaposés avec des grains perlitiques.

L'agrégat de perlite constitué lui-même des particules de ferrite ( $Fe\alpha$ ) et des particules (lamelles) de carbure de fer ( $Fe_3C$ ). la ferrite est relativement ductile alors que la cémentite est dure et fragile. Les aciers hypoeutectoides présentent une bonne plasticité directement liée à la quantité de la ferrite proeutectique. On note que la teneur en carbone de ce type d'aciers est entre 0.06% et 0.12% [1].

### **III. L'effet de traitement thermique sur les aciers :**

#### **III.1. Introduction :**

Avant d'étudier les aciers de traitement thermique, il nous faut d'abord décrire les traitements thermiques proprement dits, afin de mieux déterminer quelles sont les diverses nuances d'aciers qui peuvent s'y prêter. Selon les buts, on distingue trois types de traitements :

Les recuit (traitements d'adoucissement et de régénération) ; les traitements thermiques dans la masse ; les traitements de surface

Nous avons déjà étudié les traitements qui entraînent des modifications des propriétés des métaux et des alliages, ainsi que les diverses transformations qui les accompagnent. Nous contenterons donc ici de décrire les traitements appliqués aux seuls aciers, sans analyser en détail les transformations et les changements de microstructure [27].

#### **III.2. Recuits :**

Les recuits ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication (écrouissage ou trempe), ainsi que les hétérogénéités de structure imputables à leur élaboration (forgeage, laminage, soudage). Les recuits permettent en outre de retrouver les structures d'équilibre des aciers.

Selon les buts visés et les modifications structurales obtenues, on distingue plusieurs types de recuits : le recuit de normalisation, le recuit complet, le recuit de coalescence, le recuit de recristallisation et le recuit d'adoucissement [27].

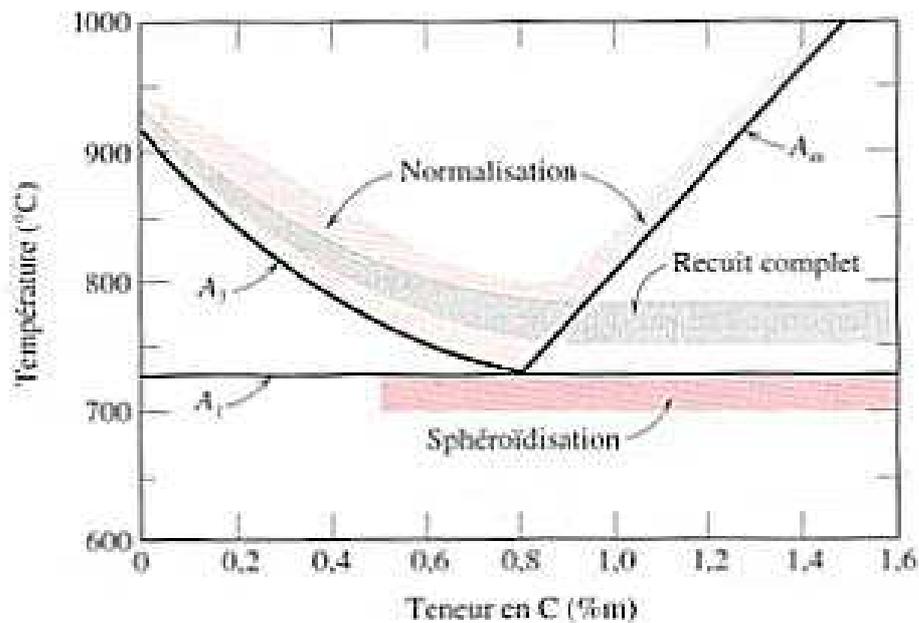
##### **III.2.1. Recuit de normalisation :**

Les aciers qui subissent une déformation plastique, notamment par laminage, sont constitués de grains de perlite (et vraisemblablement d'une phase pro-eutectoïde) dont la forme est irrégulière et dont la taille, relativement grande, est très variable. Le recuit de normalisation permet d'obtenir des grains de perlite plus fins ayant une taille plus uniforme. Les aciers perlitiques à grains fins sont plus tenaces que ceux à gros grains. La normalisation commence par un chauffage à une température dépassant 550°C à 850°C la température limite supérieure, laquelle dépend bien sûr de la composition, comme l'indique la figure.II.1. On maintient cette température assez longtemps pour que l'alliage se transforme entièrement en austénite-par un processus appelé austénitisation- puis on procède à un refroidissement dans l'air [4].

### III .2.2. Recuit complet :

On a souvent à un recuit complet pour traiter les aciers à faible ou moyenne teneur en carbone qui sont dessinés à l'usinage ou qui devront subir des déformations plastiques importantes au cours d'une opération de formage. Comme indique la figure.II.1, l'alliage est d'abord porté à une température dépassant de 15°C à 40°C , les températures limite  $A_3$  ou  $A_1$  et y est maintenu jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Ensuite, on laisse l'alliage refroidir dans le four éteint. Ainsi, la température du four et celle de l'alliage diminuent au même rythme, la température ambiante étant atteinte après plusieurs heures.

Ce type de recuit produit une perlite grossière ( en plus d'une phase pro-eutectoïde) relativement douce et ductile. Le processus de refroidissement des recuits complets, exige beaucoup de temps, mais il donne une microstructure dont les grains sont fins et repartir uniformément [4].



**Figure.II.1** : Diagramme d'équilibre Fer-carbone de Fer au voisinage du point eutectoïde.

### **III .2.3. Recuit de coalescence :**

Comportant successivement :

- Un chauffage juste au-dessous de la température de transformation  $Ac_1$  ;
- Un maintien prolongé à cette température (ou, éventuellement, une série de refroidissements et de réchauffages entre deux températures voisines situées de part et d'autre de  $Ac_1$ ).
- Un refroidissement à vitesse convenable.

Ce traitement permet au métal d'atteindre un équilibre structural comportant des modifications de la forme et des dimensions de constituants fins dispersés : sphéroïdisation de la cémentite.

Subissent ce traitement les fils destinés à la fabrication de pièces de forme complexe par l'opération de frappe à froid (article spécialisé dans ce traité).

La sphéroïdisation optimale de la cémentite, avec un cycle de traitement minimal, est obtenue en traitant des fils ayant subi un taux d'érouissage supérieur à 35 % de réduction de section [27].

### **III .2.4. Recuit de recristallisation :**

On procède au chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 700°C) et on contrôle le refroidissement. On applique ce traitement aux produits déformés à froid (tôle minces laminées à froid, par exemple) pour faire disparaître les structures d'érouissage et faciliter ainsi une mise en forme ultérieure (emboutissage, pliage, etc..) [27].

### **III .2.5. Recuit d'adoucissement :**

Effectué quelques dizaines de degrés au-dessus de  $Ac_1$  , dans le but d'améliorer la malléabilité du fil.

Ce type de recuit est utilisé pour les fils dits en acier doux ( $C \leq 0,25$  %) et destinés à des ligatures ou à la confection de grillages [28].

### **IV. Patentage :**

#### **IV.1. Définition :**

Le patentage est un traitement thermique dans lequel le fil est :

- porté à une température supérieure à la température d'austénitisation ( $A_{c3}$  pour les aciers hypoeutectoides) ;

- refroidi à une vitesse suffisante à travers l'intervalle des transformations, jusqu'à une température située au-dessus de la température  $M_s$  de formation de la martensite.

L'objet du refroidissement est produire, dans le cas aciers hypoeutectoides, une structure de perlite lamellaire extrêmement fine. Cette structure est celle qui convient le mieux à la déformation à froid pour les fils subissant un degré d'écrouissage nécessaire à l'obtention de résistance à la traction élevées [27].

#### **IV.2. Application :**

Sont soumis à ce traitement :

- Le fil machine dont le refroidissement en in de laminage n'a pas donné une structure apte à une déformation poussée ;
- Les fils tréfilés ébauches pour l'exécution de fils fins dont la section finale représente une réduction par rapport au fil machine supérieure à 80 %
- Les fils tréfilés ébauches en vue d'obtenir un fil plus fins à caractéristiques définies inférieurs à celle que donnerait l'écrouissage direct sur fil machine [27].

## **Recuit de fil d'acier tréfilé**

### **I. Introduction :**

Les modifications structurales entrainées par tréfilage à froid modifient les propriétés physique et mécanique des métaux. mais on peut généralement restaurer les propriétés et la structure que le métal possède avant la déformation au moyen d'un recuit (l'agitation thermique), ce qui permet en effet un retour vers l'état d'équilibre. ce retour, s'effectue essentiellement selon trois processus : la restauration, la recristallisation et le grossissement de grains [14].

### **II. Mécanisme de recristallisation :**

#### **II.1. La restauration :**

Au cours des traitements thermiques des métaux, on sait qu'un recuit approprié conduit à supprimer progressivement l'écrouissage et le durcissement qui en résultent. la restauration englobe les phénomènes qui précèdent le mouvement apparent des joints de grains, c'est un retour progressif vers l'état initial, l'état écroui n'étant pas thermodynamique stable. elle est autant plus complète que la température est plus élevée, c'est une manifestation des vibrations thermique des atomes recherchent au cours de leurs vibrations à reprendre leurs positions d'équilibre [15].

L'énergie emmagasinée dans la structure devient plus élevée de sorte qu'elle est en relation avec le taux de déformation et l'orientation des grains. Par exemple, la restauration au niveau des grains ferritique est plus accélérée dans l'orientation  $\langle 111 \rangle$  que dans la direction  $\langle 100 \rangle$ .

La maximisation de l'énergie se produit par réduction du nombre de défauts atomiques, interstitiels, lacunes et à une diminution de la densité des dislocations introduites par l'écrouissage, ceci est obtenu par un réarrangement des dislocations qui forment alors des parois délimitant les cellules d'écrouissages ( ou sous- joints grains) [16].

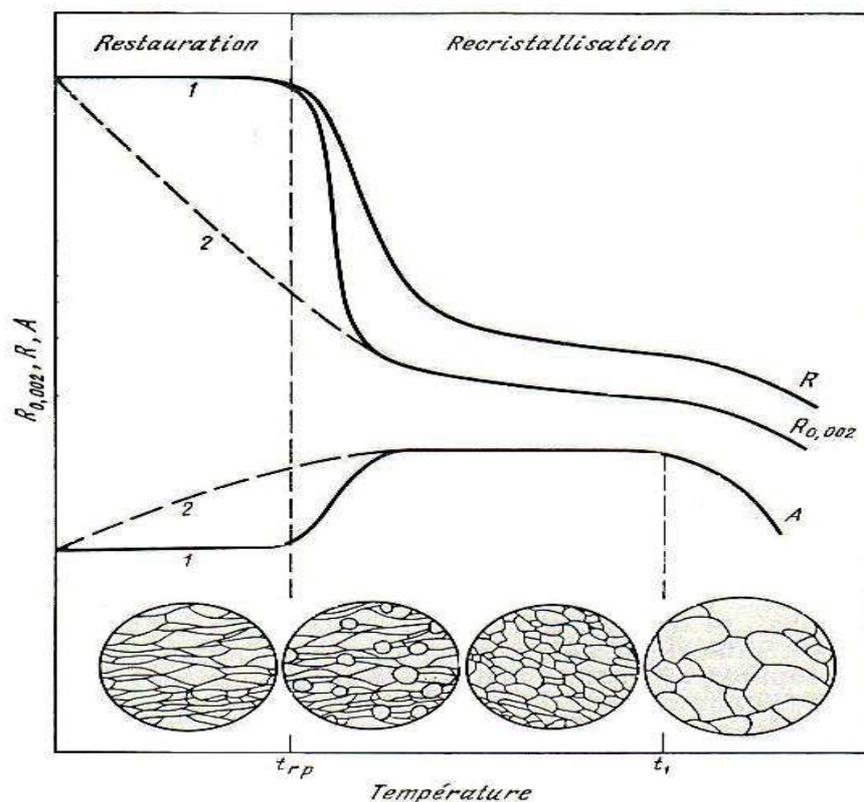
### II.2. Recristallisation :

Après la restauration, les germes des nouveaux grains apparaissent préalablement dans les secteurs à densité de dislocation accrue et qui se concentrent dans plus fortes distorsions du réseau. L'échauffement du métal écroui ne rétablit pas l'ancien grain, mais produit un grain tout à fait nouveau, dont les dimensions peuvent différer sensiblement du grain initial. La formation des nouveaux grains qui remplacent la structure fibreuse du métal déformé s'appelle la recristallisation (**Fig.II.2**).

D'après : [17].

La recristallisation de la structure n'apparaît qu'à partir de certains taux de déformation ( $\epsilon_c$  : déformation critique).

- Si la température est constante, la taille des grains augmente en fonction de la température de recristallisation et de temps de maintien. Par exemple, pour les grains ferritiques le temps nécessaire pour l'apparition des germes des nouveaux grains



**Figure.II.2** : Influence de la température sur les propriétés mécaniques et la structure d'un métal durci par déformation [18].

### **III. Texture de recristallisation :**

Au cours de la recristallisation, la texture de tréfilage est ainsi remplacée par une nouvelle texture appelée : texture de recristallisation. Cette nouvelle texture dépend des mécanismes qui se produisent pendant le recuit : germination, croissance et grossissement des grains [1].

#### **III.a. La germination :**

On peut admettre que la germination est le résultat de la croissance d'une cellule d'érouissage située au voisinage d'une forte hétérogénéité, l'orientation d'un germe est donc vrai semblablement à une des orientations de la texture de tréfilage, mais cette orientation peut correspondre à une très faible fraction volumique de la structure écroui [19].

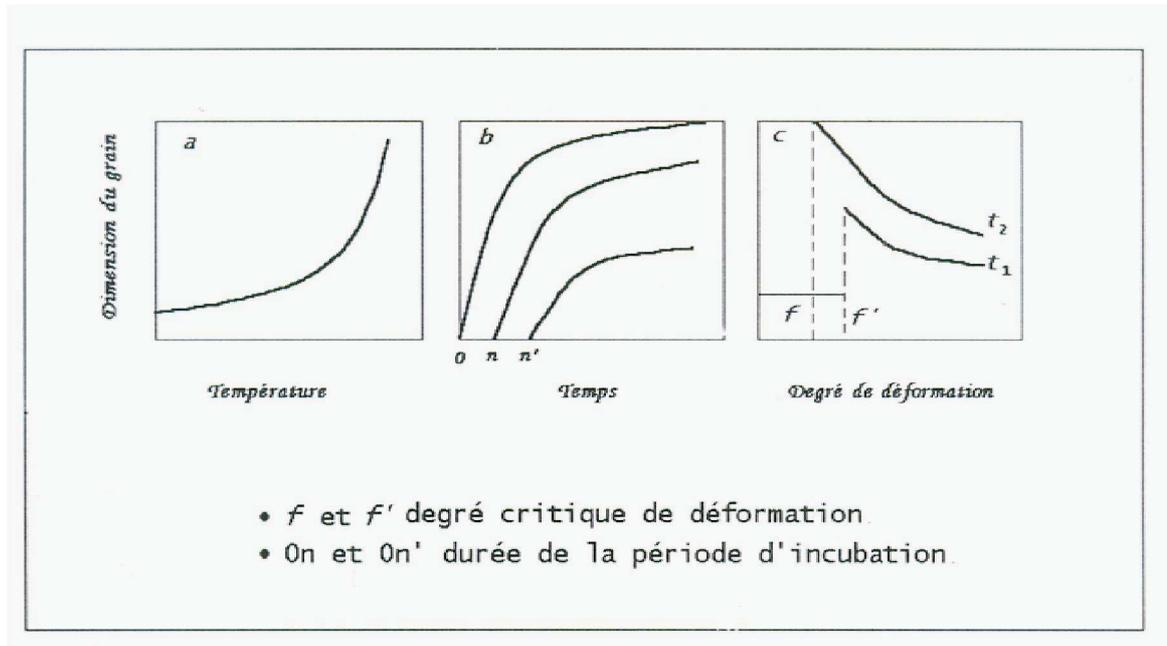
#### **III.b. La croissance des grains :**

La croissance des grains accrue spontanément, si le recuit est prolongé ou, on assiste à la migration des joints de nouveaux grains, avec comme conséquence un excès de l'énergie emmagasinée dans ces joints. la force motrice qui correspond à cette énergie permet le croissance de certains grains aux dépend des grains voisins [20].

#### **III.c. Le grossissement des grains :**

Après la recristallisation, la grosseur du grain peut être plus grande ou plus petite que le grain initial. la grosseur du grain dépend de la température de recuit de recristallisation (**Fig .II.3.a**), de sa durée (**Fig.II.3.b**), du degré de déformation préalable (**Fig.II.3.c**), de la composition chimique de l'alliage, de la dimension de grains de départ, de la présence des inclusions insolubles... etc. le degré de déformation étant donné, l'augmentation de la température et de la durée du recuit accroître de la dimension du grain.

Les grains recristallisés sont d'autant moins gros que le degré de déformation est plus grand (**Fig.II.3.c**). aux températures  $t_1$  et  $t_2$ , les grains recristallisés ne se forme pas d'emblée, mais après un certain délai de temps appelé période d'incubation [18].



**Figure.II.3 :** Influence de la température, de la durée du chauffage et du degré de déformation sur la grosseur du grain recristallisé ( $t_1 < t_2 < t_3$ ).

#### IV. Restauration et recristallisation dynamiques :

Au cours des opérations de corroyage à chaud (laminage, forgeage, filage...), le métal subit écrouissage et adoucissement, celui-ci étant dû à des processus de restauration et de recristallisation dynamique, ainsi appelés pour les distinguer des processus statiques qui se produisent au cours du recuit d'un métal préalablement écroui [29].

##### IV.a. Restauration dynamique :

Les dislocations produites par la déformation se regroupent en parois par des mécanismes de glissement dévié et de montée. La contrainte d'écoulement est ainsi réduite et, si la température est assez élevée, celle-ci tend vers une valeur constante, correspondant à un régime stationnaire avec une sous-structure de polygonisation formée de sous-grains équiaxes. Contrairement au cas classique de la polygonisation après écrouissage, celle-ci est dynamique : elle se produit simultanément à la déformation, les parois se détruisent de façon à maintenir une sous-structure équiaxe. La désorientation entre

Sous-grains est de l'ordre du degré ou de quelques degrés, leur dimension  $d$ , qui se mesure en dizaines de microns, est à peu près inversement proportionnelle à la contrainte ;

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-m} \quad (1)$$

Avec  $m = 1.5$  dans les alliages d'aluminium vers  $400-500^\circ\text{C}$ . Le développement de cette sous-structure peut aboutir à des grains assez fortement désorientés, on parle alors de

recristallisation in situ dynamique. ces processus sont observés dans le fer  $\alpha$  métaux à forte énergie de défaut d'empilement [29].

### IV.b. Recristallisation dynamique :

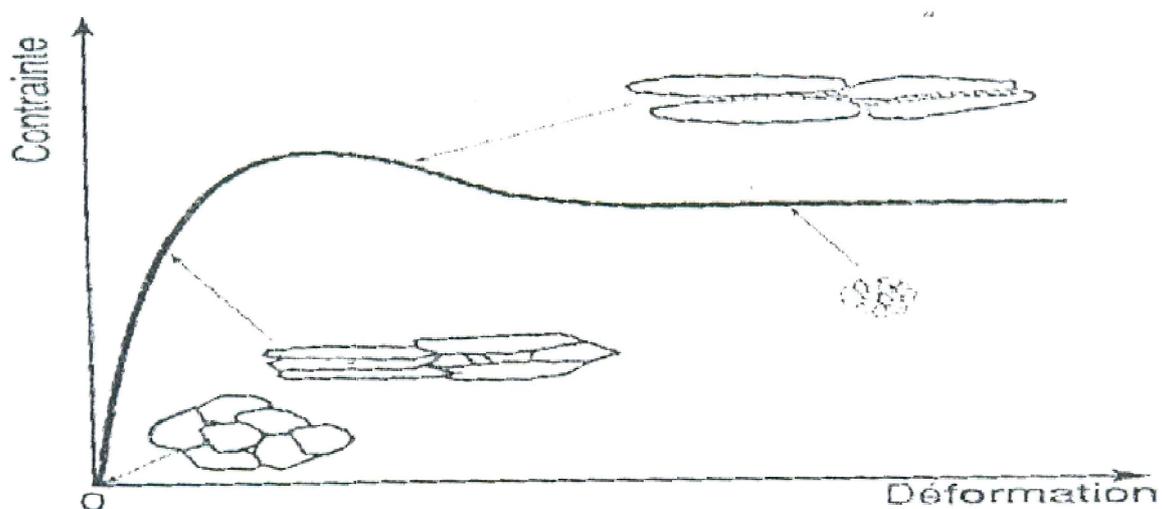
Dans ce cas, l'adoucissement en cours de déformation est du à une véritable recristallisation. Celle-ci s'amorce pour valeur critique de la déformation et la contrainte passe par un maximum puis diminue vers un palier correspondant à un régime et une microstructure stationnaires (**Fig.II.4**). Les nouveaux grains se forment par migration des joints de forte désorientation en laissant dans leur sillage du métal non écroui.

Au cours du corroyage, la taille moyenne des grains  $d$  reste constante quelle que soit la valeur de la déformation et elle est d'autant plus petite que la vitesse de déformation est plus grande, la température plus basse et la contrainte est plus élevée :

$$\sigma/\mu = Cste(d/b)^{-2/3} \quad (2)$$

Soulignons qu'il s'agit d'un état de régime dynamique : on observe des grains fins peu perturbés à côté de grains fortement écrouis chaque grain passe par des états d'écrouissage croissants avant de disparaître par recristallisation. la recristallisation dynamique s'amorce aux joints de grains originels, puis de nouveaux grains germent au limites de grains en cours de croissance. on obtient ainsi des microstructure en collier si la taille de grains initiale est bien supérieure à celle des grains de recristallisation (**Fig.II.4**). pour des contraintes plus faibles les stades de recristallisation et d'écrouissage peuvent être un peu séparés, ce qui donne lieu à des oscillations de la contrainte et à une microstructure plus grossière.

La recristallisation dynamique s'observe dans les métaux à faible énergie de défaut d'empilement : aciers austénitiques, alliages de cuivre et de nickel, magnésium, zinc [29].



**Figure.II.4** : Recristallisation dynamique : évolution de la microstructure au cours de la déformation.

# Chapitre III

## **Matériaux et Méthodes Expérimentales**

## **Matériaux et méthodes expérimentales**

### **I.1. Introduction :**

Le tréfilage est l'un des procédés de mise en forme largement utilisé dans l'industrie. La société nationale de tréfilage et fabrication des produits de soudage (Tréfissoud) est l'une des grandes sociétés de tréfilage des aciers en Algérie. Les tréfilés produits par cette société sont destinés pour répondre aux besoins du marché algérien en matière de clôtures, de grillage ....etc. dans ce travail nous avons opté pour étudier et caractériser du comportement lors du traitement du recuit isotherme d'un fil en acier doux tréfilé à froid par la société Tréfissoud.

### **I.2. Choix et préparation des échantillons :**

L'entreprise Tréfissoud utilise le procédé de tréfilage à froid sur plusieurs types de fil machine de différentes nuances : S2M0, F10, S1, F5 et 1KP ...etc. dans notre étude, on a opté pour le fil machine de nuance **F8Z** en acier doux de diamètre initial égal à 5.50 mm et de composition chimique indiquée dans le tableau.III.1 :

**Tableau.III.1:** La composition chimique de l'acier F8Z

<b>Eléments</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>N</b>
at %	<b>0.097</b>	0.20	0.34	0.006	0.003	0.043	0.003	0.021	0.015	0.019
<b>Eléments</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Sb</b>	<b>Fe</b>	
at %	0.007	0.046	0.001	0.002	0.004	0.009	0.002	0.007	99.1	

## **II. Préparation du fil machine à Tréfissoud :**

Avant chaque opération de tréfilage du fil machine, il est nécessaire en premier temps d'enlever la couche d'oxyde qui revête la surface du fil. Les deux principaux procédés d'élimination de cette couche sont : le décapage et le décalaminage.

### **II.1. Le décapage :**

Le décapage est un procédé chimique qui est basé sur l'émergence des couronnes du fil machine dans un bain chaud de solution acide (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>...), suivi d'un premier rinçage à froid par un jet d'eau, ensuite une opération de boraxage qui a pour but de neutraliser tout le résidu d'acide et de protéger le fil contre la corrosion. Enfin, le séchage par une soufflerie d'air chaud. On note que le boraxage facilite l'opération de tréfilage, car il est le support aux lubrifiants ultérieurs [26].

### **II.2. Le décalaminage :**

Le décalaminage est un procédé mécanique, où l'élimination de la couche d'oxyde s'effectue par le passage du fil machine à travers des poulies de diamètre lié au diamètre du fil machine. Cette première opération provoque une série de flexions qui conduisent au décalaminage. Ensuite, les écailles résiduelles sont enlevées par une brosse métallique située juste après les poulies. On note que les fils décapés chimiquement subiront facilement le tréfilage contrairement aux fils décalaminés. Pour ce dernier type de fil, le procédé de tréfilage devient presque impossible, de telle sorte que le fil après une ou deux passes se rompre [26].

### **III. Méthodes expérimentales utilisées :**

#### **III.1. Préparation métallographique :**

Pour chaque étape de tréfilage deux morceaux du fil de longueur moyenne de 15 mm ont été couper pour chaque taux de déformation (**Tableau.III.2**) afin de suivre les changements microstructurales aux cours des traitements en gardant la même plage choisie, et les autres pour les mesures de microdureté après chaque traitement.

Ces échantillon sont passés successivement sur différents papiers abrasifs dont les grains ont une finesse décroissant (N° 80, 380, 600, 800, 1000, 2000) sous l'eau suivie directement par un polissage de finition sur un tissu contenant une diamanté diamètre de dimension successive  $1\mu\text{m}$  et  $\frac{1}{2}\mu\text{m}$  sous un lubrifiant approprié (**Fig.III.1**).

Pour révéler la microstructure, l'échantillon est attaqué par un réactif d'attaque très utilisé pour les aciers étant le nital, une solution composée de 96 % d'éthanol et 4 % d'acide nitrique pour une durée d'attaque entre 20 et 40 seconde, et ceci selon l'état d'échantillon (tréfile ou recuit) (**Fig.III.2**).

Le taux de déformation par tréfilé est calculé à partir de l'équation (1) suivant :

$$\varepsilon \% = \frac{s_0^2 - s^2}{s_0^2} \times 100 \quad (1)$$

Tableau.III.2 : Les taux de déformation des fils.

Diamètre (mm)	Taux de déformations (%)
Fil machine D = 5.5	0
D <sub>1</sub> = 4	ε <sub>1</sub> = 27.27
D <sub>2</sub> = 3.25	ε <sub>2</sub> = 40.9



Figure.III.1 : Polisseuse mécanique.



Figure.III.2 : Attaque chimique.

### **III.2. Microscopie optique :**

La microscopie optique est les premiers essais pour la compréhension de différents phénomènes microstructuraux après les traitements thermiques et thermomécaniques que subis l'échantillon, car on peut observer, pour une matrice déterminée, la taille de grains, la répartition de précipités, les lignes de glissement, les macles et bien d'autres caractéristiques structurales.

Pour cela, on à utilisé un microscope métallographique de type Hund équipé d'un appareil photo numérique (**Fig.III.3**) qui nous a permis de prendre des micrographies de la microstructure des échantillons étudiés pour des grossissement allant jusqu'à 800 fois .



**Figure.III.3 :** Microscope optique métallographique de type HUND WETZLAR.

### **III.3. Microdureté :**

La deuxième technique d'analyse utilisée dans cette étude pour suivre l'évolution de l'une des caractéristiques mécaniques des fils tréfilés et recuits qu'est la microdureté vickers (Hv) la charge appliquée 500g (**Fig.III.4**).

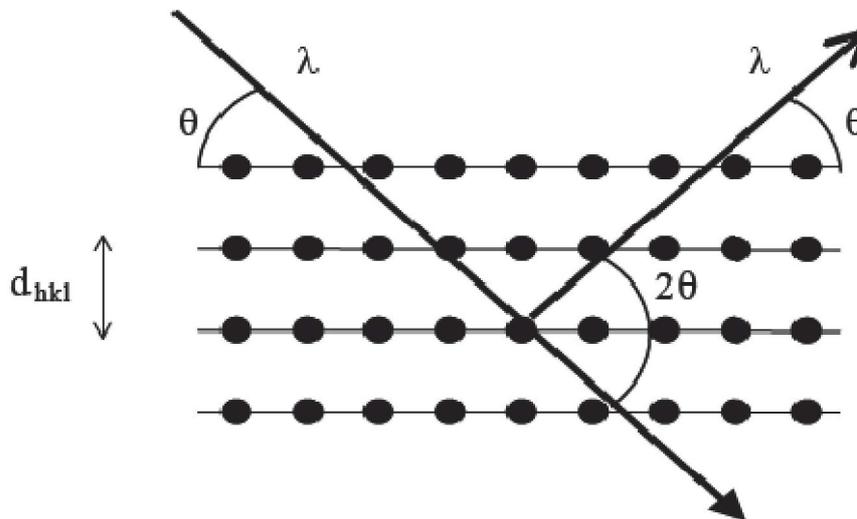


**III.4. Diffraction des rayons X :**

La diffraction de rayons X permet l'étude cristallographique des couches nitrurées sur toute leur épaisseur [23].

- **Principe :**

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatique est dirigé sur un matériau poly cristallin, il est en partie réfléchi par les plans atomiques de certains cristaux. Pour que la diffraction des photons X soit mesurée, l'incidence du faisceau par rapport aux plans atomiques doit avoir lieu sous un angle particulier. Il faut en effet que les ondes réfléchies soient en phase de sorte à interférer de manière constructive pour ensuite être mesurées par le détecteur, comme il est illustré à la figure.III.5.



**Figure.III.5 : Famille de plans cristallins en condition de Bragg.**

Les conditions nécessaires à cette interférence constructive sont données par la loi de

$$\text{Bragg : } d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

Où  $d_{hkl}$  est la distance interréticulaire séparant les plans définis par les indices de Miller (h, k et l),  $\theta$  l'angle d'incidence et donc de réflexion par rapport à ces plans et enfin  $\lambda$  la longueur d'onde des photons X.

Dans le cas d'un échantillon poly cristallin où toutes les orientations possibles des cristallites sont représentées, tous les faisceaux diffractés que permet la structure émergent de l'échantillon.

- **Exploitation des diffractogrammes :**

Le diffractogramme est un enregistrement de l'intensité diffractée en fonction de l'angle  $2\theta$  formé avec le faisceau direct. L'étude du diffractogramme permet de remonter à un grand nombre d'informations sur les caractéristiques structurales et microstructurales de l'échantillon telles que les structures cristallines des différentes phases, leurs proportions, la taille des cristallites, les taux de défauts structuraux, les macros et micro - contraintes et la présence d'une texture.

- **Positions angulaires des raies de diffraction :**

Les positions angulaires des raies de diffraction sont caractéristiques des paramètres du réseau cristallin. L'étude des positions des raies de diffraction permet donc de remonter au réseau cristallin de chacune des phases cristallisées de l'échantillon. Une fois le réseau déterminé, les positions angulaires des raies permettent de calculer les distances interréticulaires des plans atomiques diffractant et ainsi d'accéder aux paramètres de maille.

Par exemple, pour un système cubique, on a :

$$\alpha = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3)$$

Les paramètres de maille évoluent sous l'effet de macro - contraintes ou par la présence de défauts ponctuels tels que des lacunes atomiques ou des atomes en substitution ou en insertion dans la structure. Moyennant certaines précautions, l'étude des positions angulaires des raies de diffraction permet de déterminer le taux de contraintes ou la nature des défauts ponctuels.

- **Intensités des raies de diffraction :**

Les positions et intensités des raies de diffraction de la plupart des matériaux connus ont été étudiées et sont répertoriées dans des bases de données. La comparaison d'un diffractogramme expérimental avec ces données permet de retrouver la nature de chaque phase constitutive de l'échantillon.

Dans le cas où la représentation des orientations de cristallites n'est pas identique dans toutes les directions de l'espace, les intensités relatives des raies de diffraction peuvent s'écarter des valeurs données par la structure cristalline. L'étude des intensités des raies d'un échantillon poly cristallin de structure cristalline déterminée permet dans ce cas d'étudier la distribution des orientations des cristallites (texture) au sein de l'échantillon [23].

- **Configurations de mesure :**

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un diffractomètre Bruker D8 Advance (40 KV- 40 MA) (**Fig.III.6**) avec la raie  $K\alpha_1$  du cuivre comme source au La Bo.Ma.P. De l'ENSAM Cluny en configuration Bragg - Brentano, aussi appelée  $\theta-2\theta$  l'angle d'incidence  $\theta$  séparant le faisceau de rayons X et la surface de l'échantillon est égal à l'angle de mesure entre le détecteur et la surface de l'échantillon. Cela signifie que les plans qui sont dans la situation de Bragg sont toujours parallèles à la surface [23].



**Figure.III.6 :** Diffractomètre des rayons X de type Bruker D8 Advance [23].

## **Résultats et interprétation**

### **I. Introduction :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les principaux résultats obtenus et leurs interprétations lors des séries successives de tréfilage du fil machine décapé et décalaminé. Dans la seconde partie, nous exposerons les résultats des traitements thermiques appliqués sur les fils tréfilés.

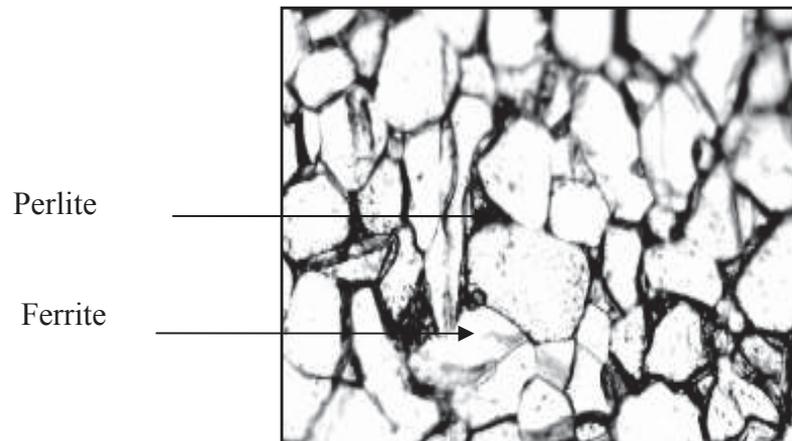
L'étude par microscope optique était la principale méthode d'étude la plus utilisée dans notre analyse afin de mettre en évidence l'évolution structurale du fil d'acier. Cette technique d'observation est accompagnée par des mesures de microdureté à tréfilé et recuit.

### **II. Fil machine :**

Le tréfilage est une opération de réduction de la section du fil par son passage à travers une série de filières. Ce processus est effectué à partir de fil machine. Le fil machine le plus utilisé à tréfilage est un acier ferrito-perlitique (**Fig.III.7**) caractérisé par deux phases :

**La ferrite** est un solide du carbone dans le fer est relativement ductile alors que la cémentite est dure et fragile.

**La cémentite** (carbone de fer  $Fe_3C$ ) est une combinaison chimique de fer avec 6.67 % du carbone qui qu'est une cristalline dans un système rhombique.



**Figure.III.7:** Microstructure de fil machine de composition 0.097 % en carbone.

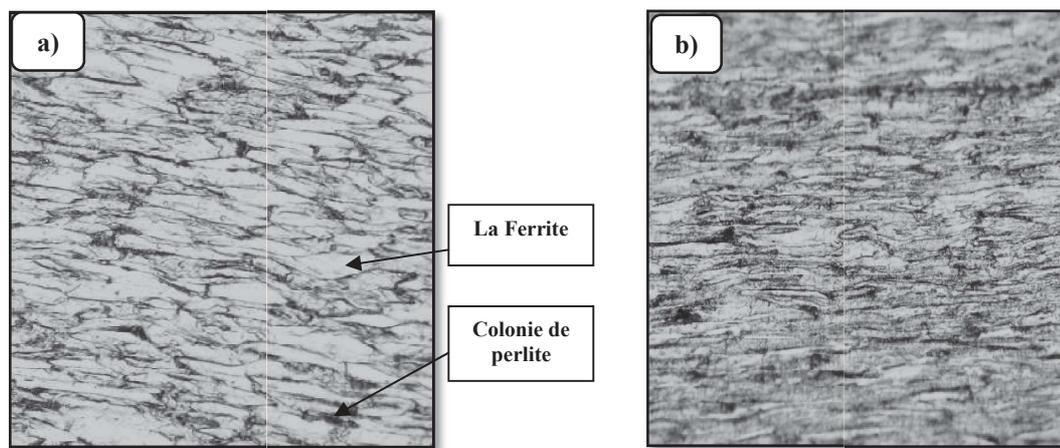
### **III. Etude de l'état déformé :**

### Chapitre III: Matériaux et méthode expérimentale

Pour cette étude nous avons choisi deux taux de déformation par tréfilage. Le premier est une réduction de section de fil de  $\varepsilon_1 = 27.27\%$  (nommé faiblement déformé) et le second de  $\varepsilon_2 = 40.9\%$  (nommé moyennement déformé).

La figure.III.8.a, montre les microstructures de l'échantillon faiblement déformé, par contre la figure.III.8.b, présente l'état microstructural de l'échantillon moyennement déformé.

Nous constatons clairement la différence entre les deux états, où les grains ferritiques et les colonies perlitiques sont de plus en plus orientés dans le sens de l'axe de tréfilage avec l'augmentation du taux de réduction par tréfilage à froid.



**Figure.III.8:** Microstructure des fils déformés par MO de : **a)** $\varepsilon_1 = 27.27\%$  et **b)** $\varepsilon_2 = 40.9\%$

#### IV. Microdureté :

Les résultats des mesures des la microdureté des fils tréfilés sont illustrés dans le tableau.III.3.

**Tableau.III.3 :** Résultats des mesures des la microdurete des fils tréfiles.

Etat déformée	Taux de déformation $\varepsilon$ (%)		
	Fil machine	$\varepsilon_1 = 27.27\%$	$\varepsilon_2 = 40.9\%$
La microdureté (HV)	140.75	260.75	279

### Chapitre III: Matériaux et méthode expérimentale

La figure.III.9.a, et la figure.III.9.b, montre une augmentation de la microdureté, des fils tréfilés, suivant le taux de déformation. Ce durcissement est interprété par le mécanisme d'écroutissage, induisant une très forte densité de dislocation, et au rétrécissement de la distance interlamellaire dans la perlite [16,23]. On note que le durcissement des fils d'aciers avec le taux de déformation par tréfilage est lié d'une part, à la diminution de la taille des grains ferritiques et la diminution de la distance interlamellaire des lamelles perlitiques et d'autre part, à l'interaction des dislocations avec la microstructure [24].

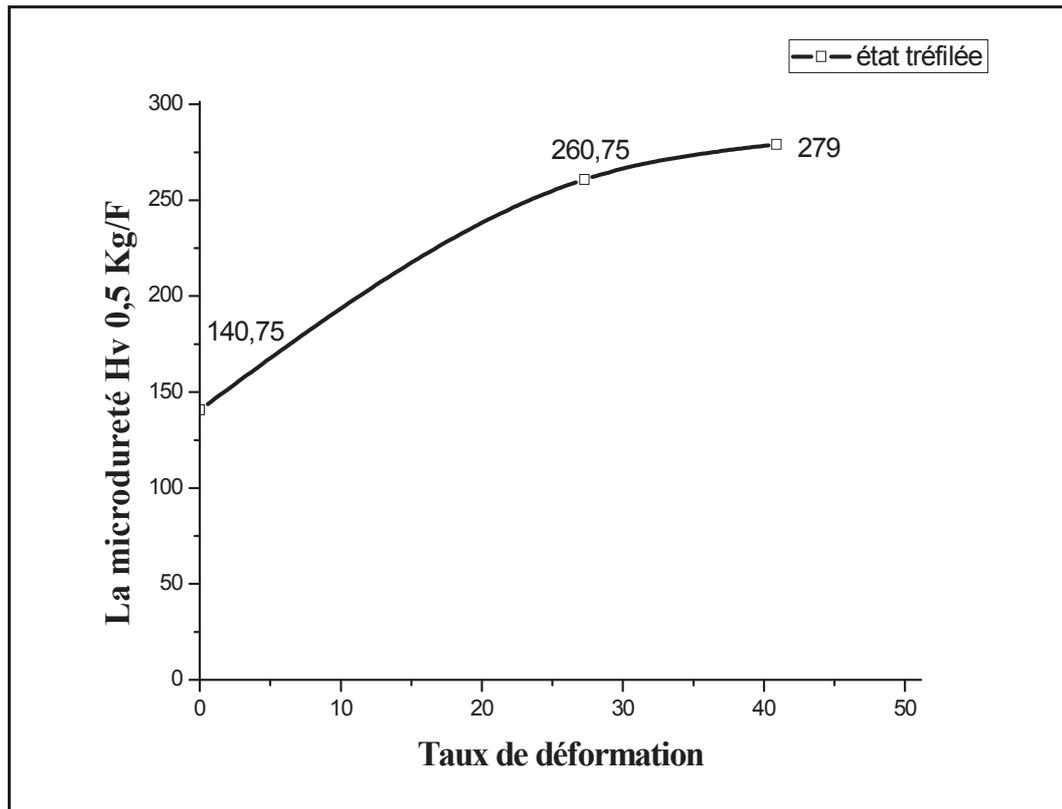
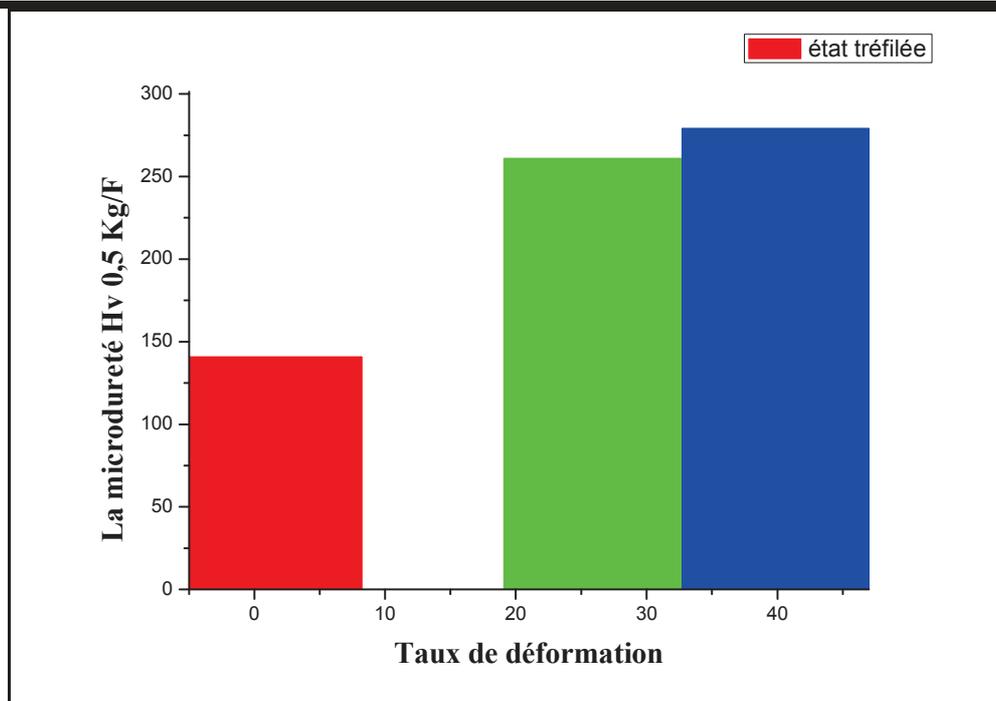


Figure.III.9.a : Variation de la microdureté avec le taux de déformation des fils déformés.



**Figure.III.9.b:** Histogramme de la variation de la microdureté en fonction de taux de déformation des fils déformés.

## **V. Etat recuit :**

### **V.1.a. Traitements thermiques des fils tréfilés à 400°C :**

Dans cette partie d'étude, nous présentons l'évolution microstructurale lors d'un recuit isotherme à 400° C des fils tréfilés (faiblement et moyennement déformés).

La figure.III.10, illustre l'évolution microstructurale de fil d'acier puis recuit à 400 °C. Est consacré à l'étude de l'effet de taux de déformation plastique par tréfilage à froid, c'est à dire, on a pris trois fils du même acier étudié et qui sont différemment déformés. Le premier représenté le fil machine, le deuxième avec un taux de déformation de ( $\epsilon_1 = 27.27\%$ ), et le troisième avec un taux déformation de ( $\epsilon_2 = 40.9\%$ ).

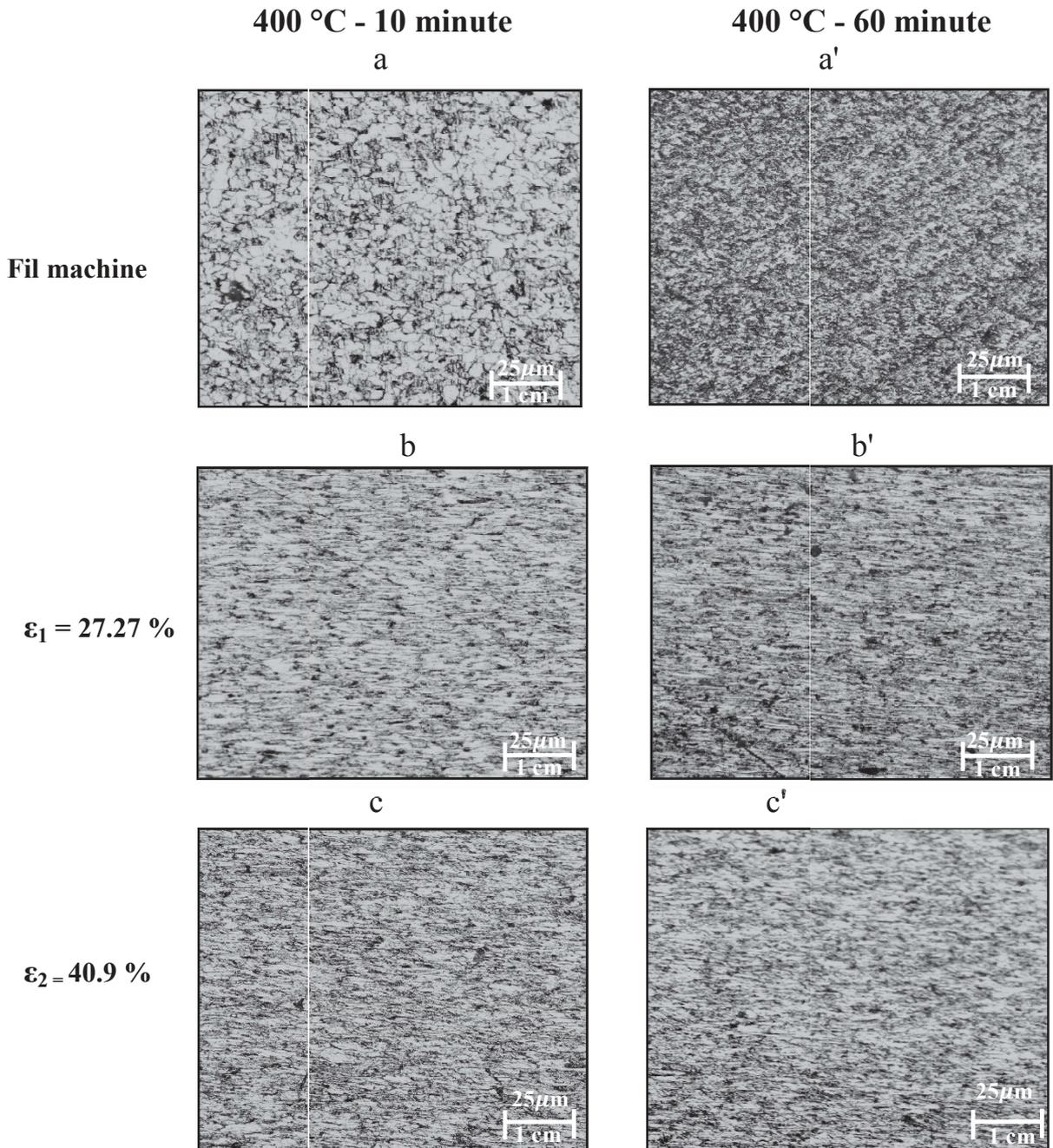
Le recuit de ces trois fils en même temps à la température 400°C pendant de 10 minutes provoque la formation de nouveaux petits grains dans les grains ferritique avec la déformation. Ce changement de l'état structural est très visible pour le fil moyennement tréfilé (**Fig.III.10.c**), ce phénomène est nommé : recristallisation.

Le mécanisme de déclenchement de la recristallisation est accéléré par le prolongement de temps de maintien (60 minute) à partir d'une déformation de 27.27 % (**Fig.III.10.b'**)

### Chapitre III: Matériaux et méthode expérimentale

Ce résultat est en accord avec les différents travaux et théories sur la recristallisation, car une forte déformation plastique conduit à une grande énergie stockée dans les fils par intermédiaire d'un nombre important de dislocation, ce qui cause le déclenchement du mécanisme de recristallisation [25].

On signale des travaux antérieur [21,22] ont observé dans des fils d'acier doux tréfilés à froid que le déclenchement du mécanisme de recristallisation se fait après un maintien de 20 min à partir d'un taux de déformation de 47,44 %, lors de recuits à 500°C et 600°C.



**Figure.III.10** : Evolution microstructurale de l'acier doux 0,097 % C à 400 °C pendant 10 min et 60 min.

#### V.1.b. La variation de la microdureté lors de recuit isotherme à 400 °C :

### Chapitre III: Matériaux et méthode expérimentale

Les résultats de la microdureté de recuit à 400°C pendant de 10 et 60 minutes sont illustrés dans le tableau.III.4

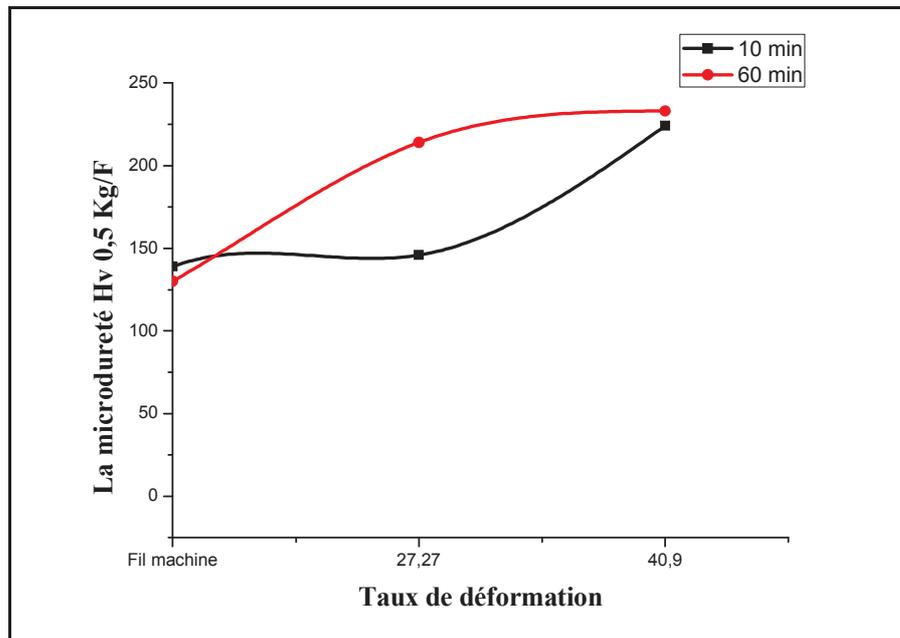
**Tableau.III.4 :** Résultats des mesures de la microdureté de recuit.

Temps	400°C		
	Fil machine	$\epsilon_1 = 27.27 \%$	$\epsilon_2 = 40.9 \%$
10 minutes	139	146	224
60 minutes	130	214	233

Les figures III.11. (a ,b) présente la variation de la microdureté avec la déformation. On constate que la dureté augmente après 10 minutes de recuit à 400°C par apport au temps de maintien de 60 minutes.

Cette augmentation est due au phénomène de recristallisation qui est active avec le prolongement du temps de maintien en fonction de la déformation.

La figure III.12.a et b, décries une deuxième présentation de la variation de la dureté avec le temps de maintien



**Figure.III.11.a :** La variation de la microdureté en fonction de taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 400°C.

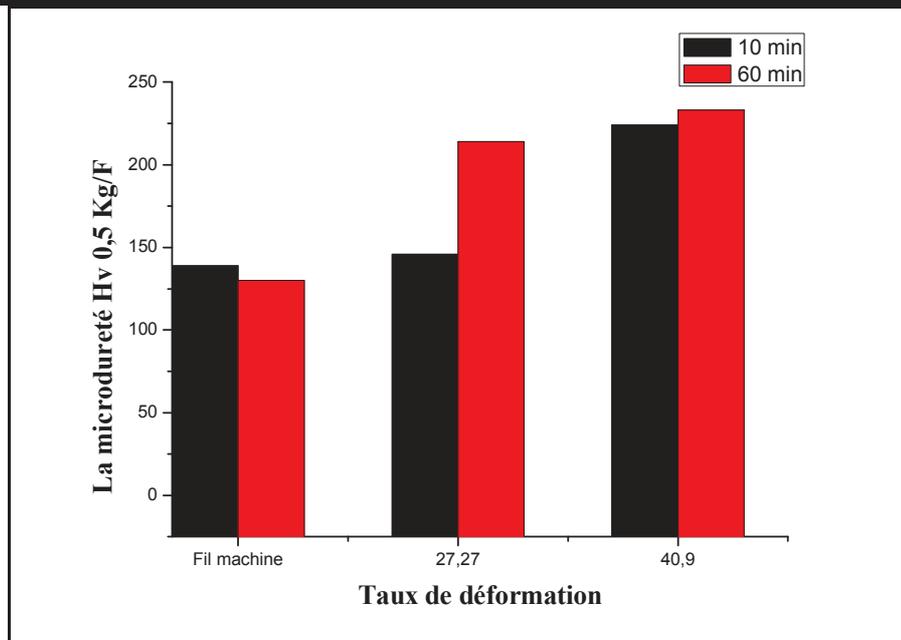


Figure.III.11.b: Histogramme de la variation de la microdureté avec le taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 400°C.

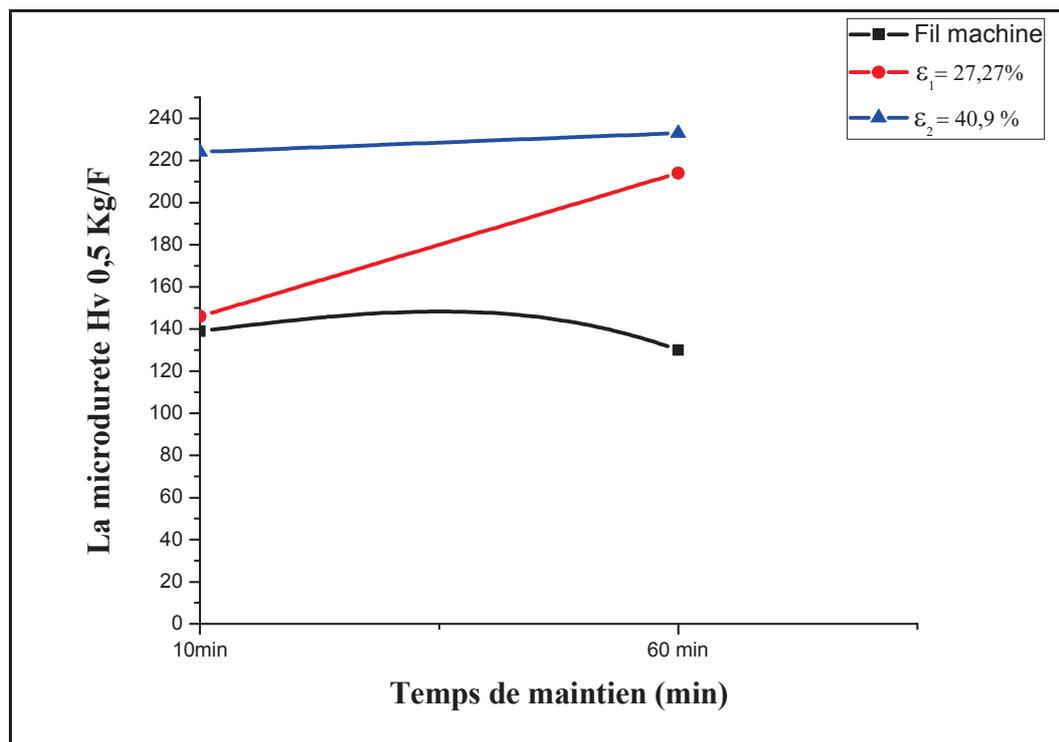


Figure.III.12.a: La variation de la microdureté en fonction du temps de maintien de l'état recuit à 400°C.

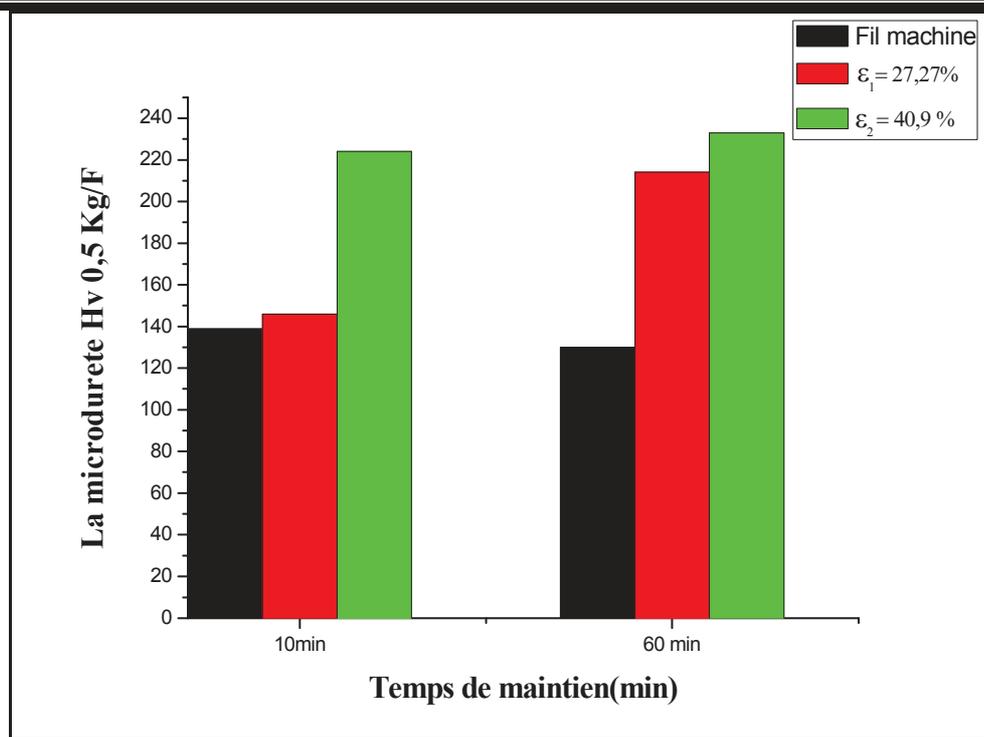
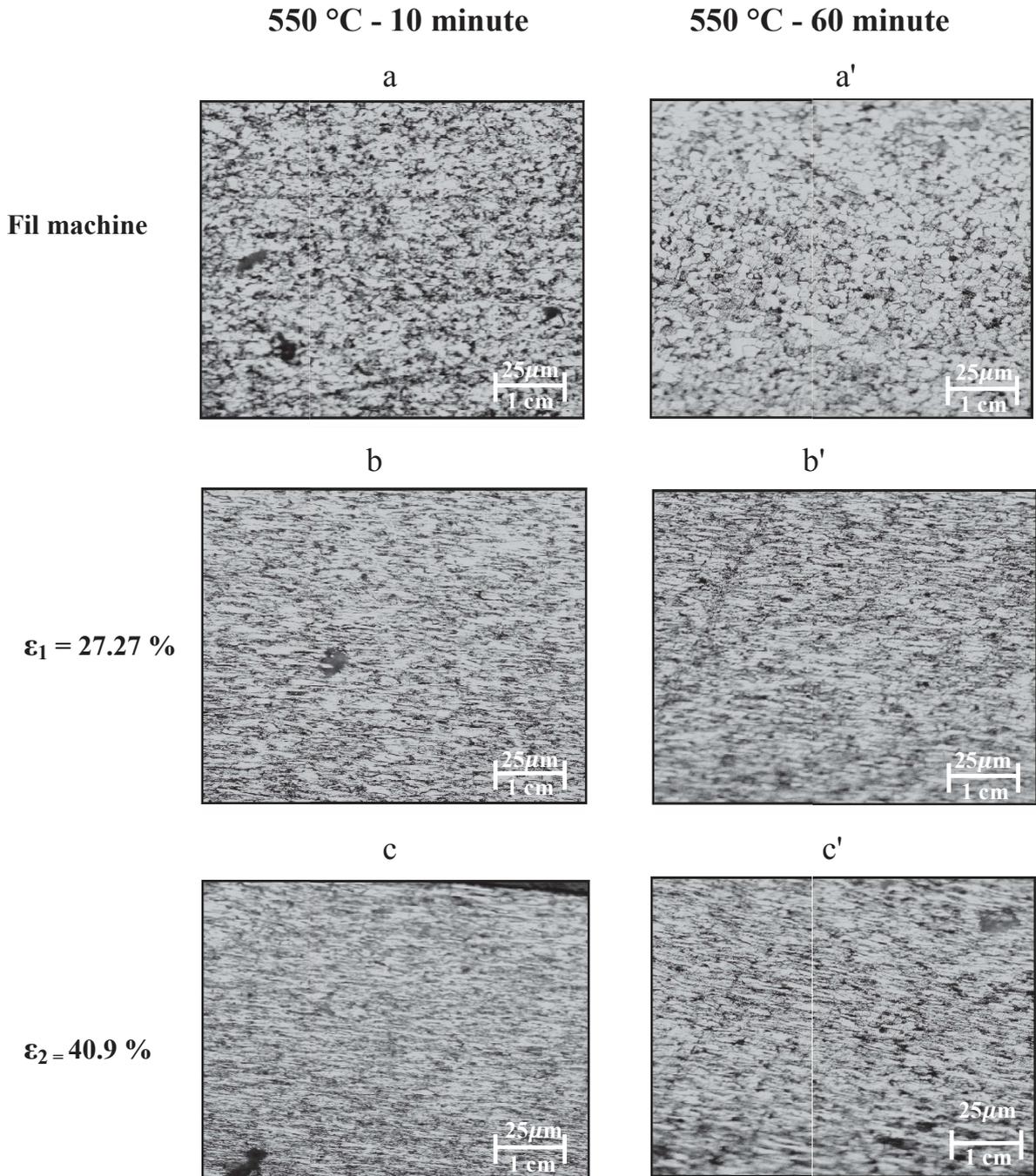


Figure.III.12.b: Histogramme de la variation de la microdureté avec le temps de maintien des fils tréfilés et recuit à 400°C.

#### V.2.a. Traitement thermique des fils tréfilés à 550°C :

La figure.III.13 montre l'évaluation de la microdureté lors de recuit à 550°C pendant de 10 minutes de fil machine et fils déformés. On à remarquer le même constat à 400°C de recuit. Sauf la recristallisation et active à partir de la déformation de 27.27 % à 10 minutes de recuit à 550°C.

Le mécanisme de recristallisation est complexe surtout dans le stade de croissance des grains recristallisés, dû à la présence de la seconde phase (la perlite) dans notre matériau. Cette croissance des grains est étroitement contrôlée par d'autres paramètres tels que la déformation et le temps de recuit: plus la température de recuit augmente plus le temps d'amorçage de la recristallisation et la déformation critique diminue.



**Figure.III.13:** Evolution microstructurale de l'acier doux 0,097 °C à 550 °C pendant 10 min et 60 min.

**V.2.b. La variation de la microdureté lors de recuit isotherme à 550 °C :**

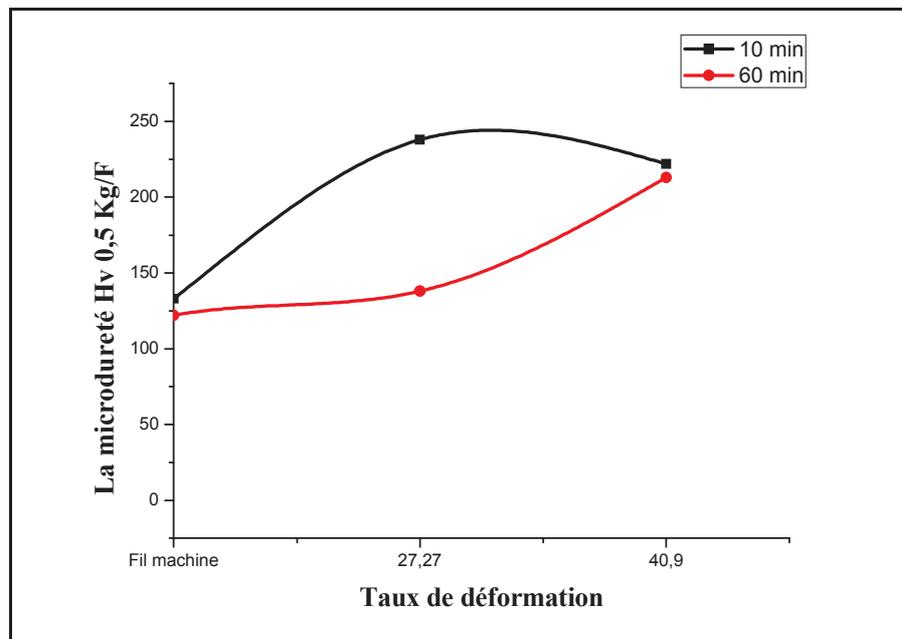
Les résultats de la microdureté de recuit à 550°C pendant de 10 et 60 minutes sont illustrés dans le tableau.III.5.

**Tableau.III.5:** Résultats des mesures de la microdureté de recuit.

Temps	550°C		
	Fil machine	$\epsilon_1 = 27.27 \%$	$\epsilon_2 = 40.9 \%$
10 minutes	133	238	222
60 minutes	122	138	213

La variation de la microdureté en fonction de taux de déformation de l'état tréfilé et le recuit à 550°C montre une augmentation de la microdureté avec la déformation après 60 minutes par rapport à temps de maintien de 10 minutes notamment à partir de 27.27 % de déformation (Fig.III.14.a et b). Cette augmentation est due au changement de la structure (tailles des grains) causés par la recristallisation de grains déformés. Cette dernière réaction est activée avec le prolongement du temps de maintien en fonction de la déformation.

La figure III.15.a et b, montre la variation de la microdureté en fonction du temps de maintien des fils tréfilés après recuit à 550°C. On a constaté une forte diminution de la dureté après 60 minutes de fil déformé à 27.27%.



**Figure.III.14.a:** La variation de la microdureté en fonction de taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 550°C.

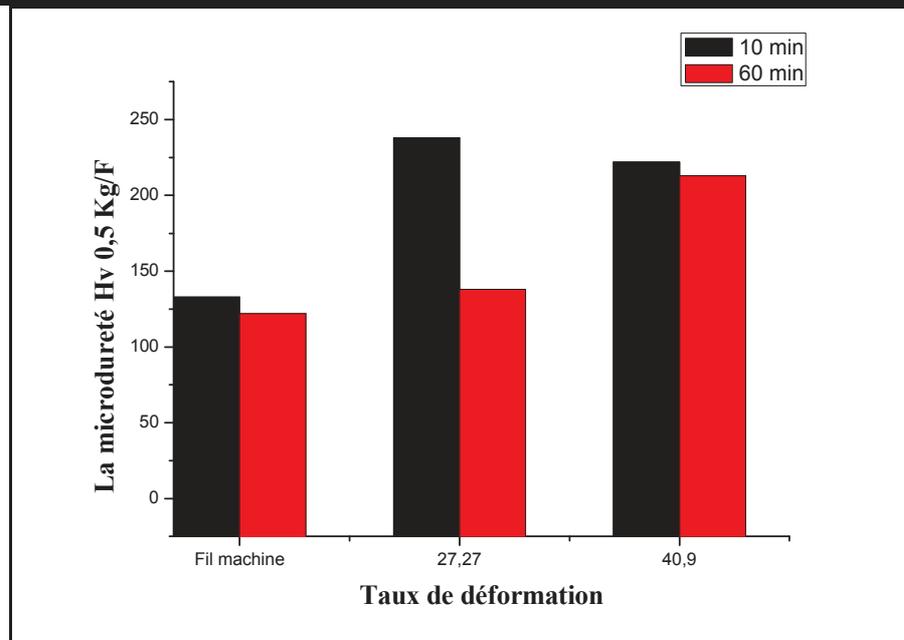


Figure.III.14. b: Histogramme de la variation de la microdureté avec le taux de déformation de l'état tréfilé et recuit à 550°C.

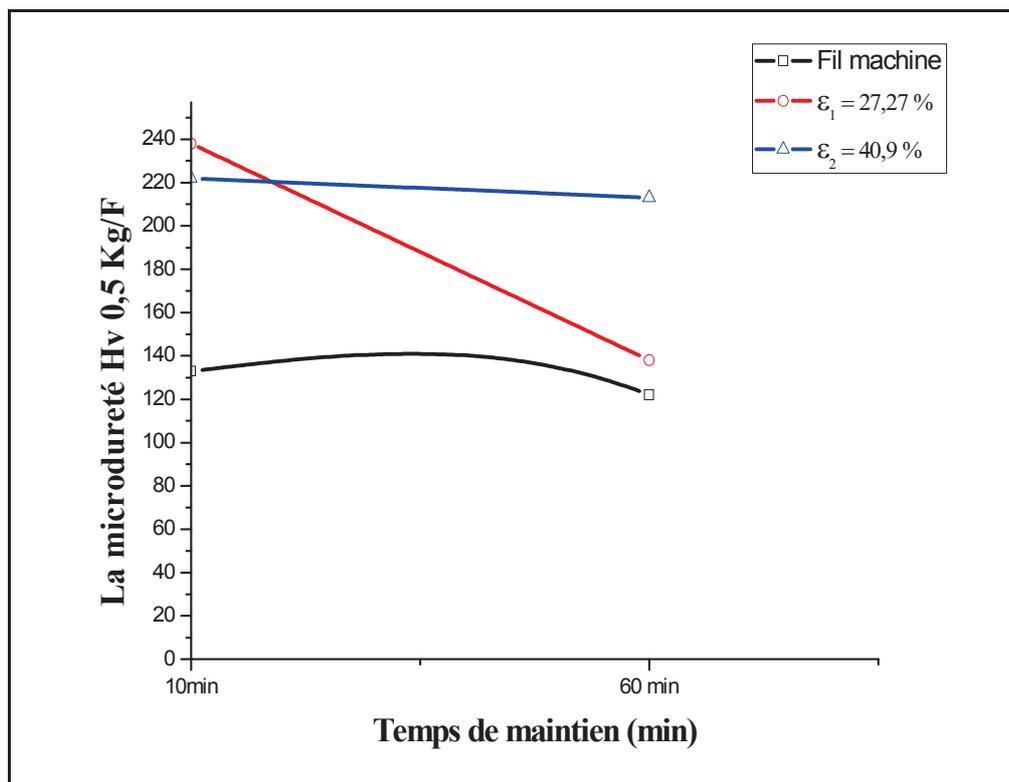


Figure.III.15.a: La variation de la microdureté en fonction du temps de maintien de l'état recuit à 550°C.

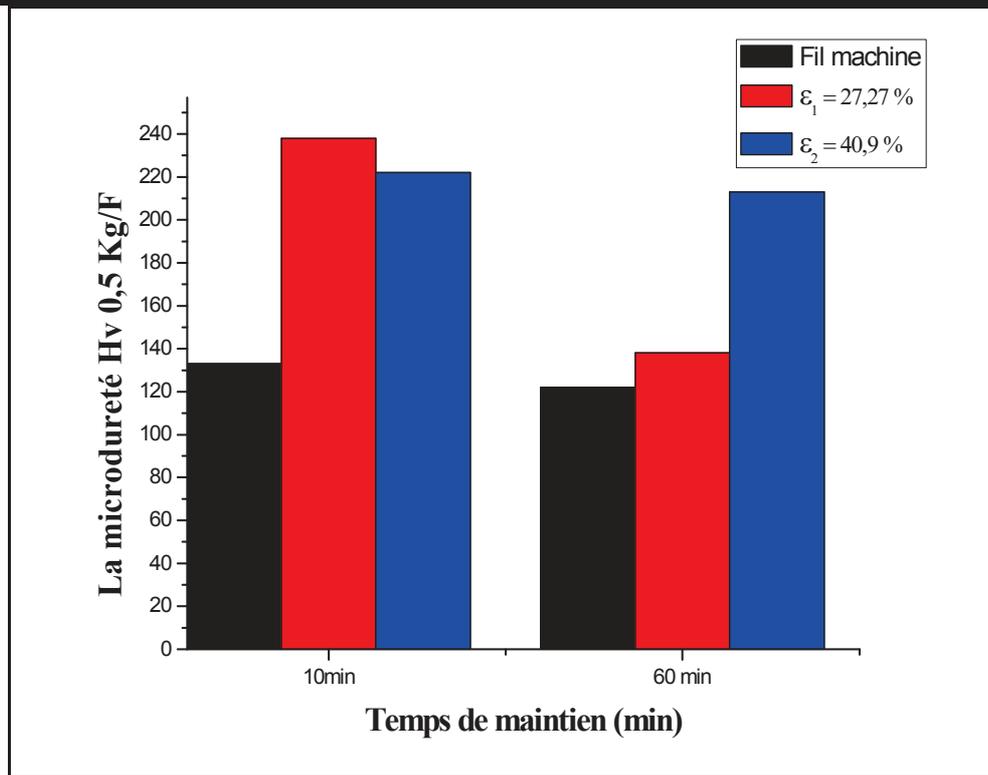
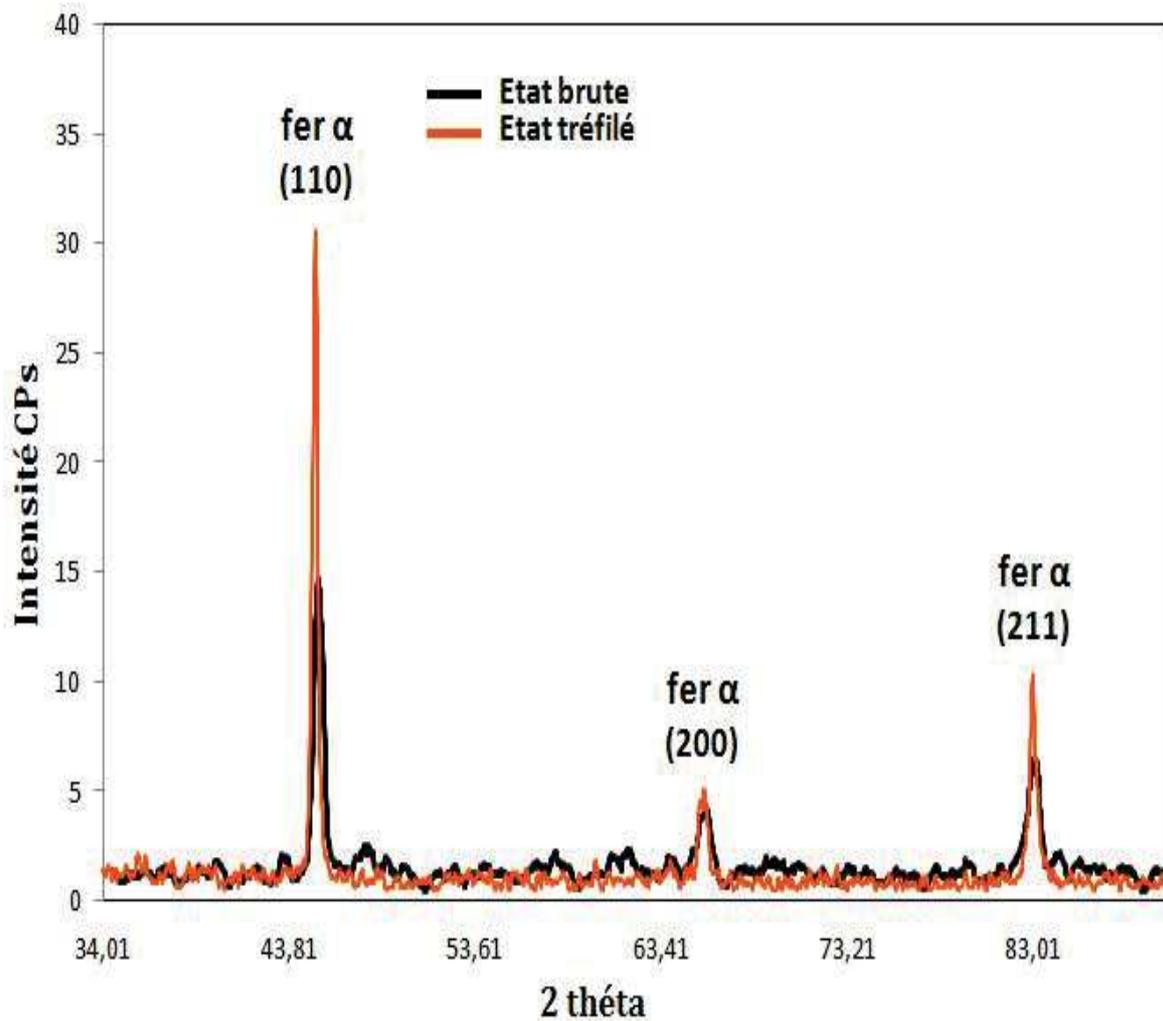


Figure.III.15.b: Histogramme de la variation de la microdureté avec le temps de maintien des fils tréfilés et recuit à 550°C.

**VI. Etude par diffraction de rayons X :**

Dans cette partie, nous présentons les spectres de diffractions de rayons X à l'état tréfilé et à l'état tréfilé.

La figure.III.16, illustre le fil machine et le fil tréfilé. On peut constater l'augmentations de l'intensité du pic (110) le plus intense et la diminution du pic (200) pour l'état tréfilé. Cet état texturé qui est du au tréfilage à froid est du à l'orientation privilégiée des grains ferritiques dans le sens de l'axe de tréfilage.



**Figure.III.16 :** Spectres de diffraction de rayons x des fils d'acier F8Z brute et tréfilé.

# conclusion générale

The image features the text 'conclusion générale' in a bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple on the left and transitioning through red, orange, yellow, green, and blue to purple on the right. The text is presented in a 3D perspective, with a grey, textured shadow cast beneath it, suggesting it is floating above a surface.

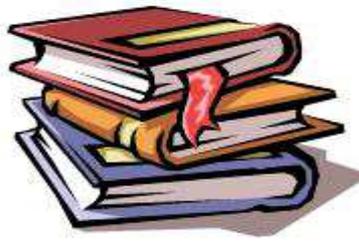
# conclusion générale

Cette étude sur des fils industriels en acier doux tréfilé, nous a permis de déduire les conclusions suivantes :

- Le tréfilage des fils d'acier doux provoque un développement d'une texture fibreuse accompagné d'une augmentation de la dureté avec la déformation.
- Un durcissement du fil d'acier avec le taux de déformation par tréfilage, est observé. Ce phénomène est lié d'une part, à la diminution de la taille des grains ferritiques et d'autre part, à la réduction de la distance interlamellaire de la perlite
- Le mécanisme de recristallisation est complexe surtout dans le stade de croissance des grains recristallisés, dû à la présence de la seconde phase (la perlite) dans notre matériau. Cette croissance des grains est étroitement contrôlée par d'autres paramètres tels que la déformation et le temps de recuit: plus la température de recuit augmente plus le temps d'amorçage de la recristallisation et la déformation critique diminue.

**Références**

**Bibliographiques**



# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N. Lehraki, Mémoire de Magister, Département de Physique, Université de Biskra (2003).
- [2] [http// www.mise en forme.fr](http://www.mise.en.forme.fr)
- [3] F.Montheillet, Métallurgie en mise en forme (lois de comportement et évolutions structurales), technique de l'ingénieur (1981).
- [4] D.Wiliam et al. William d.calliste, jr science et génie des matériaux édition (2000).
- [5] G. Benard, A-Michel, métallurgie générale(1969)
- [6] G.Simonnet, Tréfilage de l'acier, technique de l'ingénieur (1981).
- [7] American steel and iron institute.
- [8] G.Bernard A.michel J.philbert et J.talbot ,métallurgie générale (1969).
- [9] I.Lakhtine, Métallographique et traitement thermique des métaux (1982).
- [10] R.Panelle, influence de l'anisotropie sur la limite d'élasticité et loi de comportement, lob-métal-phg, p75/76 (1976)
- [11] G-Simonnet, groupe de l'ingénieurs des tréfileries de conflandey
- [12] Techniques de l'ingénieur.(5201j)1989
- [13] Techniques de l'ingénieur M 645-9.(4-1989)
- [14] F-R-Boutin, élimination de l'écrouissage et ses conséquences p 274-278(1974)
- [15] L-Lakhtine, métallurgie et traitement thermiques des métaux 4<sup>ème</sup> éd (1986)
- [16] M, B erveiller end J-H-Schmit, déformation in single Crystal and polycrystals p 186,189(1996)
- [17] R-Jouk, P.Pl. Ing.Stuttgart, le traitement des piece farqué pour formage froid ; 39 (1989)

- [18] L-Lkhtine, métallographique et traitement technique des métaux p52 (1978).
- [19] F-Boutin, Aspet métallurgique du laminage à froid, édition par CNRS PARIS (1976)
- [20] E-Kozek chnik, v-plentenet, n-zolotorevesky and b-buchmary, métall mater, trans 30 A(1999).
- [21] Zidani et al. M.Zidani, Z. Boumerzoug et T. Baudin, INCONA 25, université de Annaba, (2005).
- [22] Zidani et al. M.Zidani, Z. Boumerzoug et T. Baudin and R. Penelle, Materials Science Forum, vol. (2006).
- [23] L. Marot, Thèse de doctorat, Univ. Poitiers, France 2001.
- [24] Savilano. JG Savilano, J.Phys III 1 P.967(1975)
- [25] Etter et al. A.L. Etter, M-H Mathon, T.Baudin, V. Branger and R. Penelle, Scripta Materialia, vol. 46, p 311(2002).
- [26] F.Guessouri, thèse de magister en métallurgie, evolution microstructurale d'un acier tréfilé puis recuit( 2007).
- [27] G. Simonnet. Tréfilage de l'acier technique de l'ingénieur (1996).
- [28] I.Lakhtine, Métallurgie et traitement thermique des métaux (1974).
- [29] T-Philibert, A Vigenc, Métallurgie de minerai au matériaux (1989)

## Résumé

Dans le cadre de cette mémoire de Master, on a essayé de comprendre l'effet combinée du taux de déformation et la température de recuit sur le comportement structurale et mécanique des fils d'acier tréfilés industriellement. L'étude a été menée sur un fil machine en acier utilisé par l'entreprise Tréfisoud, qui est un acier à faible pourcentage de carbone (0.097% C). Les techniques des analyses utilisées dans le cadre de cette étude sont la microscopie optique (MO) , la diffraction des rayons X et la microdureté Vickers.

Mot clés : Recuit, tréfilage, microscopie optique, microdureté, diffraction des rayons X, recristallisation

## Abstract

As part of this Master's thesis, an attempt has been made to understand the combined effect of deformation rate and annealing temperature on the structural and mechanical behavior of steel wire drawn industrially. The study was conducted on a steel wire rod used by Tréfisoud, a steel had low carbone percent (0.097% C). techniques of analysis using in this study are optical microscopy (OM), X-ray diffraction and Vickers microhardness.

Key words : Annealing, drawing, Optical microscopy, micro hardness, X-ray diffraction, recrystallization.

## ملخص

في إطار هاته المذكرة للماستر، حاولنا فهم التأثير المشترك لمعدل التشوه ودرجة حرارة التلدين على السلوك البنيوي والميكانيكي لسبائك الفولاذ المقلد صناعيا. و الدراسة تضمنت سلك صناعي من الفولاذ المستخدم من قبل الشركة Tréfisoud، وهو فولاذ بنسبة منخفضة من الكربون (0.097% C). التقنيات التحليلية المستخدمة في إطار هذه الدراسة هي المجهر الضوئي (OM)، الأشعة السينية و جهاز قياس الصلادة.

الكلمات المفتاحية : التلدين، القلدة، المجهر الضوئي، الصلادة، حيود الأشعة السينية، التبلور.