

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

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

**Tentative d'identification des causes
de rupture dans les fils tréfilés (AGS)**

Présenté par:
Mostafa Baidji.

Proposé et dirigé par:
Dr. Salim Messaoudi.

Promotion : Juin 2017

Résumé

Cette étude est une tentative expérimentale de recherche des causes qui provoquent la rupture de l'un des fils AGS au cours de tréfilage. L'absence du suivi et de la mesure des paramètres opératoires pendant le tréfilage a handicapé fortement cette étude. La mesure des propriétés mécaniques tels que la limite d'élasticité, la contrainte maximale de rupture n'ont pas permis de mettre en évidence les causes des ruptures. Quand aux mesures de la microdureté, elle révèle une légère hétérogénéité entre le cœur et la périphérie du fil. Ceci peut être pris comme facteur aidant à la rupture mais ne peut être considéré comme cause principale. En revanche l'analyse microstructurale par EBSD réalisée dans des études précédentes révèle la présence d'une forte porosité dans ce fil en comparaison aux autres fils. Nous pensons que cette porosité peut être l'une des causes principales qui provoque la rupture de ce fil.

ملخص

هذه الدراسة هي محاولة تجريبية للبحث في إنهيار أسلاك AGS خلال عملية القلد. غياب القياسات الميدانية ومعايير التشغيل خلال عملية الإنتاج أثرت بشكل سلبي على هذه الدراسة. إن قياس الخواص الميكانيكية مثل المرونة، وأقصى قوة الشد لا تسمح لتحديد أسباب تقطع السلك. أما قياسات الصلادة، فقد كشفت عن عدم تجانس طفيف بين لب السلك و محيطه الخارجي. ربما يكون هذا عاملا يساعد على تقطع السلك ولكن لا يمكن أن يعتبر السبب الرئيس. لكن تحليل البنية المجهرية التي تمت بتقنية EBSD والتي نشرت في دراسات سابقة كشفت وجود مسامية عالية في هذا السلك مقارنة مع الأسلاك الأخرى. إنطلاقا من هذا يمكن إعتبار أن هذه المسامية يمكن أن تكون واحدا من الأسباب الرئيسية التي تتسبب في انهيار هذا السلك.

Abstract

This study is an experimental attempt to investigate the causes that cause the rupture of one of the AGS alloy during wire drawing. The absence of follow-up and measurement of the operative parameters during the wire drawing strongly handicapped this study. Measurement of the mechanical properties, such as elasticity limitations and maximum stress of rupture, did not reveal the causes of the breaks. As for the measurements of microhardness, it reveals a slight heterogeneity between the core and the periphery of the wire. This can be a factor that helps to break, but cannot be considered as the main cause. On the other hand, the microstructural analysis by EBSD carried out in previous studies reveals the presence of a high porosity in this wire compared to the other wires. We believe that this porosity can be one of the main causes that provoke the rupture.

Remerciements

En premier lieu, je remercie notre Dieu Allah, notre créateur de m'avoir donné la force et aidé à surmonter toutes les difficultés lors de mes études et m'a permis d'accomplir ce modeste travail.

*Je remercie mon encadreur le **Dr. Messaoudi Salim**, d'avoir accepté de m'encadrer pour mon projet de fin d'études, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes et son encouragement.*

*Je tiens à remercier fortement les membres du jury : le président monsieur le professeur **Boumerzoug Zakaria** et l'examineur monsieur **Boulegroune Abd Elmalek**, de l'Université **Mohamed Khider**, d'avoir accepté de juger ce travail.*

Je remercie également tous les professeurs qui m'ont aidé tout au long de mon cursus universitaire pour leurs conseils et leur soutien.

A la fin, je tiens à remercier du fond du cœur ma famille et mes ami(e)s.

Sommaire

Liste des Tableaux	I
Liste des Figure	II
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Mécanique de la rupture

I.1. Introduction	2
I.2. Définitions	2
I.3. Les modes de rupture.....	4
I.4. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception.....	5
I.4.1. Critère d'énergie.....	6
I.4.1.1. Plaque infinie	6
I.4.2. Concept d'intensité des contraintes.....	8
I.4.3. Propagation des fissures et concept de tolérances au dommage	9
I.5. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture	11
I.6. Applications des modèles	11

Chapitre II : LE TREFILAGE

II.1. Introduction	13
II.2. Le tréfilage	13
II.3. La Tréfileuse	13
II.4. Principales composantes de la tréfileuse.....	14
II.4.1. La filière	14
II.4.2. Les cabestans de tirage.....	15
II.4.3. Lubrification	16
II.4.3.1. Les lubrifiants à base d'eau.....	16
II.4.3.2. Les huiles légères	17
II.4.3.3. Les savons	17
II.5. Les incidents au cours de tréfilage	17
II.5.1. La rayure	18
II.5.2. Les cassures	18
II.6. Traitements thermiques des fils tréfilés	19

Chapitre III : PARTIE EXPERIMENTALE RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Introduction	21
III.2. Matériau Etudié	21
III.3. Démarche Expérimentale	22
III.3.1. Préparation Des Echantillons	22
1. Découpage	22
2. Le Polissage Mécanique	22
3. L'attaque chimique	22
III.3.2. Techniques de caractérisations	22
1. Microscopie optique	22
2. Microdureté	23
3. Essai de traction	23
III.4. Résultats Et Interprétations	24
III.4.1. Analyse microstructurale	24
III.4.2 La caractérisation mécanique	25
III.4.3. La charge à la rupture	25
III.4.4. L'allongement	26
III.4.5. La Microdureté	26

Liste des abréviations

σ_e	la limite d'élasticité du matériau.
σ	le contrainte appliqué.
G	L'énergie de Griffith.
α_c	La longueur critique de défaut.
K_I	facteur d'intensité des contraintes.
ΔK	L'amplitude du facteur d'intensité des contraintes.
C	Constante du matériau.
m	Constante du matériau.
a_0	La longueur de fissure initiale.
ϵ	Le taux de déformation.
ϕ	Diamètre du fil.
p	Charge appliquée.
d	longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).
HV	Microdureté.
ρ	Résistivité électrique ($\Omega\cdot\text{m}$)
Rm	charge à la rupture.
A	l'allongement (%).

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1.Caractéristiques de la rupture ductile et de la rupture fragile.....4

CHAPITRE III

Tableau III. 1 : Les fils étudiés et les déformations correspondantes.....21

Tableau III. 2: La composition chimique de l'alliage Al-Mg-Si.....22

Tableau III.3: Les valeurs des mesures mécaniques des fils étudiés25

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. Rupture fragile.....	3
Figure I.2. Rupture ductile.....	3
Figure I.3. Schématisation des trios modes de rupture.....	4
Figure I.4. Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b)	6
Figure I.5. Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie.....	7
Figure I.6. Comparaison entre l'approche classique et celle de la MLR.....	8
Figure I.7 . Contraintes près de l'extrémité d'une fissure.....	8
Figure I.8 . Concept de tolérance au dommage.....	10
Figure I.9 . Comportement en fonction de la ténacité.....	12

CHAPITRE II

Figure II.1. photo et schéma de l'ensemble (Filières + Cabestans).....	14
Figure II.2. Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe).....	14
Figure II.3. Schéma d'une filière de tréfilage	15
Figure II.4. Photos et Schéma de cabestan	16
Figure II.5. Les lubrifiants à base d'eau.....	16
Figure II.6. Boite à savon (savonnier).....	17
Figure II.7. Bourrage d'une filière générant la rayure du fil.....	18
Figure II.8. Criques de surface appelées pattes de corbeaux.....	18
Figure II.9. Rupture en cup and cone d'un fil.....	19

CHAPITRE III

Figure III.1. Matériau Etudié.....	21
Figure III.2. : micrographies optiques des fils étudiés.....	24
Figure III.3. Variation la charge en fonction de taux de déformation.....	25
Figure III.4 : Variation de l'allongement en fonction de taux de déformation.....	26
Figure III.5. : Variation de microdureté Coueur et Peripherie en fonction de taux de déformation	27
Figure III.6. : Microstucture EBSD d'un fil fortement tréfilé.....	28

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Hormis leur utilisation dans l'aérospatiale et l'automobile les alliages d'aluminium série 6000 sont également utilisés dans le secteur énergétique précisément dans le transport électrique. L'entreprise ENICAB – Biskra utilise l'alliage d'aluminium type AGS 6101 pour la fabrication des fils et des câbles électriques. L'entreprise achète sa matière première (dite fil machine) de chez différents fournisseurs. Il s'avère que l'un des fils achetés pose un problème de rupture à l'entreprise lors de son élaboration.

Cette étude a été entreprise avec le service de production de l'entreprise afin de chercher les causes qui provoquent la rupture de ce fil pendant l'opération de tréfilage.

L'étude prévue était divisée en deux parties :

- la partie : suivi et prélèvement des conditions et des mesures pendant l'opération de tréfilage se déroulera à l'unité de fabrication.
- la partie : analyses et caractérisations, se réalisera aux laboratoires.

Cependant au cours de la période septembre 2016 à mai 2017 l'entreprise n'a pas fabriqué de fils de l'alliage AGS 6101. Ceci est en relation directe avec leur carnet de commandes. Cette situation nous a, en effet, causé un handicap majeur dans la réalisation de ce travail.

Cette étude est partagée en deux parties ; partie bibliographique et partie expérimentale.

La partie recherche bibliographique comporte deux chapitres :

Chapitre 1 : expose des généralités sur la rupture dans les matériaux métalliques

Chapitre 2 : expose des généralités sur Le Tréfilage de l'alliage d'Aluminium (AGS)

La partie expérimentale comporte un seul chapitre :

Chapitre 3 : ce chapitre illustre les techniques d'analyse et de caractérisation utilisées dans ce travail, les résultats obtenus et les interprétations attribuées.

Et en de ce manuscrit, on résume l'ensemble des résultats obtenus dans une conclusion générale.

CHAPITRE I

Mécanique de la rupture

Mécanique de la rupture

I.1. Introduction

La mécanique de la rupture s'intéresse à l'étude des fissures macroscopiques. A partir des caractéristiques des défauts et des propriétés du matériau, la mécanique de la rupture permet de déterminer la résistance à la rupture de l'élément.

La mécanique de la rupture suppose l'existence d'une fissure initiale dans la structure étudiée et un système de sollicitations extérieures. La fissure initiale est soit une fissure créée par endommagement sous l'effet de cette sollicitation, soit un défaut créé lors de l'élaboration du matériau ou de sa mise en forme.

Les défauts présents dans la structure tendent à redistribuer les champs de contraintes internes en provoquant des concentrations de contraintes en pointe de fissure. Pour déterminer la résistance à la rupture, il faut étudier la distribution des contraintes autour de la fissure. Généralement on fait l'hypothèse que le matériau est homogène isotrope et que son comportement est élastique linéaire. Bien qu'une zone plastique ou endommagée soit toujours présente en pointe de fissure ("process zone"), l'analyse élastique linéaire fournit une bonne schématisation de la réalité. [1]

I.2. Définitions

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps. [2]

On distingue deux types de rupture :

- **Rupture fragile:** la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible). [2]

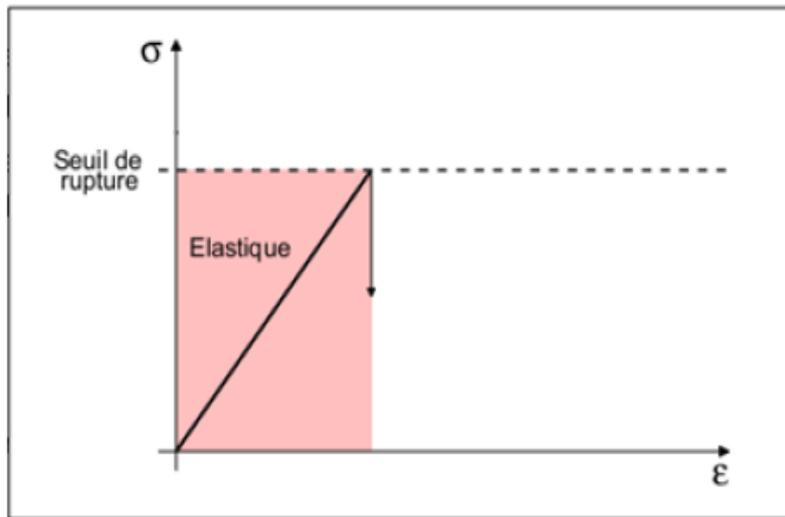


Figure I.1. Rupture fragile.

- **Rupture ductile:** la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande). [2]

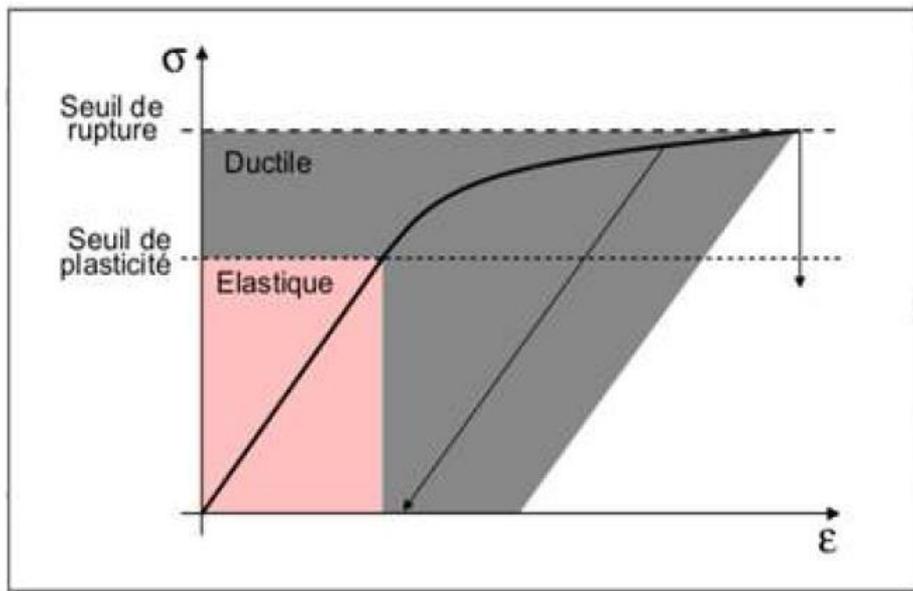


Figure I.2. Rupture ductile.

Caractéristiques d'une rupture ductile	Caractéristiques d'une rupture fragile
D'abord, on observe un processus de déformation au cours duquel le matériau se déchire lentement avec une grande dépense d'énergie.	Comprend peu ou pas de déformation du matériau.
La propagation de fissures est un processus lent. On observe une déformation plastique importante avant et pendant la propagation des fissures.	La propagation de fissures est rapide. (La rupture fragile n'est possible que lorsque les fissures se propagent à des vitesses élevées.)
La fissure se propage à travers les grains (propagation transgranulaire) et l'aspect de la fissure est le suivant: elle est grise et fibreuse.	La fissure se propage le long des joints de grain (propagation inter granulaire) et confère à la surface de rupture un aspect cristallin brillant ou granulaire.

Tableau I.1: Caractéristiques de la rupture ductile et de la rupture fragile. [3]

I.3. Les modes de rupture

La propagation d'une fissure peut se faire suivant trois modes de déplacement des faces de la fissure dans un plan défini. Elle peut aussi se faire suivant des modes mixtes qui les combinent tous les trois. La figure I.3 illustre les trois modes de rupture.[2]

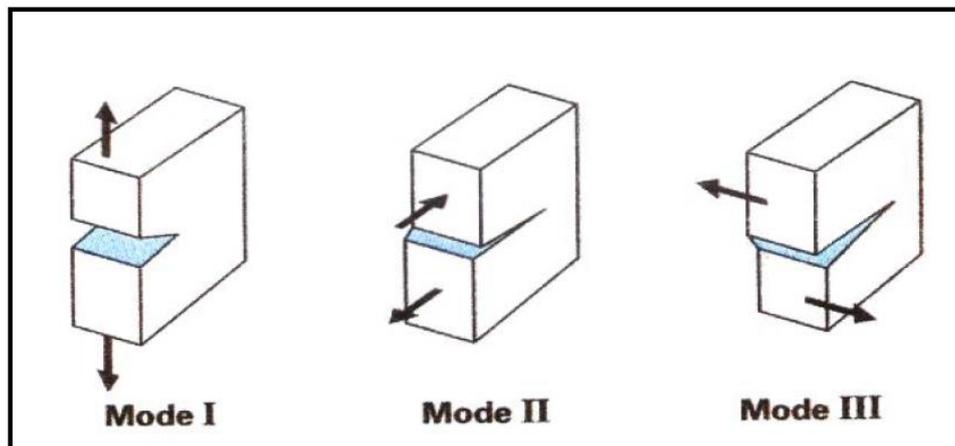


Figure I.3 : Schématisation des trois modes de rupture.[2]

- **Mode I:** les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre, c'est le mode par ouverture.

- **Mode II:** les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, et dans une direction perpendiculaire au front de fissure. Il est appelé aussi mode par glissement droit.
- **Mode III:** les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissure, c'est le mode de glissement vis.

Le mode I est considéré comme le plus dangereux en raison de l'ouverture par traction qui favorise l'initiation et la propagation des fissures. C'est le type le plus répandu dans le cas des matériaux fragiles. Par conséquent, il est le plus étudié.[2]

I.4.Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

La figure I.4 illustre l'approche classique utilisant le dimensionnement des structures basée sur la limite d'élasticité du matériau σ_e et l'approche utilisant le concept de ténacité K_c issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).

Dans le premier cas, on dimensionne les structures pour que les contraintes appliquées σ restent inférieures à la limite d'élasticité ($\sigma < \sigma_e$). On utilise en général un coefficient de sécurité pour prévenir tout risque de rupture fragile ($\sigma < \alpha \sigma_e$ avec $\alpha < 1$). Cette approche est à deux variables σ et σ_e ; elle fait abstraction de l'existence d'éventuels défauts sous forme de micro fissures par exemple.

L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est à trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité K_c qui remplace la limite d'élasticité et une variable additionnelle qui est la taille du défaut. Il y a cependant deux approches alternatives de la mécanique de la rupture: l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie. Ces deux approches sont équivalentes dans certaines conditions. [4]

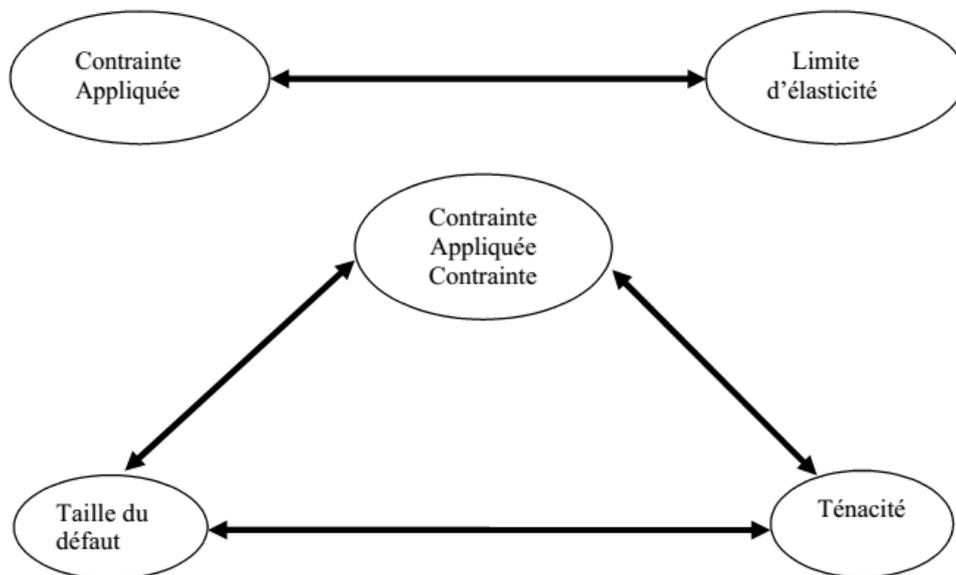


Figure I.4. Modèle de l'approche classique (a) et Modèle de l'approche utilisant la MLR (b).[4]

I.4.1. Critère d'énergie

L'approche énergétique est basée sur le postulat suivant : l'extension d'une fissure qui conduit à la rupture se produit lorsque l'énergie fournie est suffisante pour vaincre la résistance du matériau : cette résistance se compose de l'énergie de création de surface, de l'énergie de plastification de l'extrémité de la fissure, et éventuellement d'autres types d'énergies dissipatives associées à la propagation d'une fissure.

L'énergie de Griffith notée G (qu'on appelle aussi taux de restitution d'énergie) est définie par la variation d'énergie par unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit lorsque G atteint une valeur critique G_c ; G_c est une mesure de la ténacité du matériau.[4]

I.4.1.1. Plaque infinie

Pour une fissure de longueur $2a$ (figure I.5) dans une plaque de dimensions infinies (ce qui équivaut à dire que la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans la plan de chargement), constituée d'un matériau de module d'Young E et soumise à une contrainte de traction σ^∞ , l'énergie de Griffith G par unité de surface fissurée est donnée par :

$$G = \frac{\pi(\sigma^\infty)^2\alpha}{E} \quad (I.1)$$

Si on continue à augmenter la contrainte appliquée σ^∞ , la rupture se produira lorsque l'énergie G atteint sa valeur critique pour une contrainte appliquée σ_R . On a alors d'après la relation précédente :

$$G_C = \frac{\pi\sigma_R^2\alpha}{E} \quad (I.2)$$

On peut noter qu'à valeur de G_C fixée, la contrainte à rupture varie avec $\alpha^{-1/2}$; de même à G_C et σ^∞ fixées, la longueur critique de défaut α_C est donnée par :

$$\alpha_C = \frac{EG_C}{\pi(\sigma^\infty)^2} \quad (I.3)$$

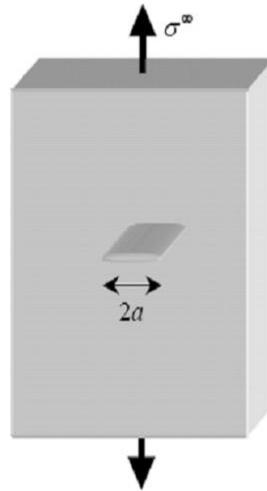


Figure I.5. Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie.

La figure I.6 illustre bien la différence entre l'approche classique qui fait abstraction de l'existence d'une fissure (le critère de rupture est $\sigma^\infty = \sigma_E$) et l'approche par la MLR qui prend en compte la présence de la fissure (σ^∞ proportionnelle à $1/\sqrt{a}$). La zone de non rupture située sous les deux courbes représentant les approches précédentes, montre que de part et d'autre de la longueur de défaut a_0 .

L'énergie de Griffith G est la force motrice dans un matériau dont la résistance à la rupture est donnée par G_C . Par analogie avec l'approche basée sur la limite d'élasticité où

c'est la contrainte qui joue le rôle de force motrice dans un matériau dont la résistance à la déformation plastique est donnée par la limite d'élasticité σ_E .

Cette analogie est utilisée aussi pour illustrer le concept de similitude. La limite d'élasticité d'un matériau mesurée à partir d'essais sur des éprouvettes de laboratoire est indépendante de la taille des éprouvettes et peut donc être utilisée pour des structures de tailles différentes dès lors que le matériau est raisonnablement homogène. Ce principe de similitude est une des hypothèses fondamentales de la mécanique de la rupture : la ténacité d'un matériau (mesurée par G_C) est indépendante de la taille et de la géométrie de la structure fissurée. Cette hypothèse de similitude reste valable tant que le comportement du matériau demeure linéaire élastique.[4]

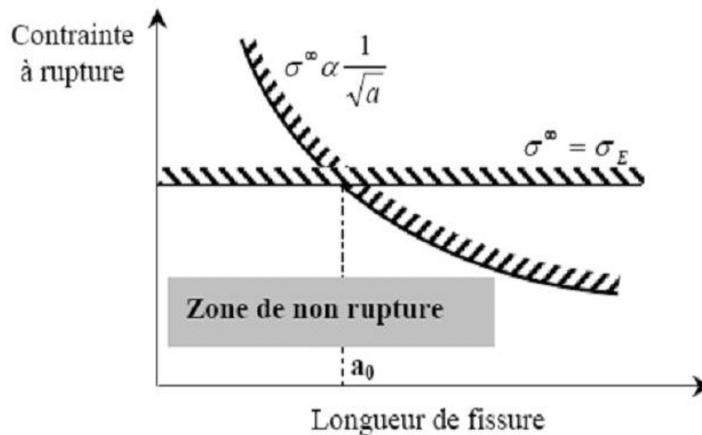


Figure I.6 : Comparaison entre l'approche classique et celle de la MLR.

I.4.2. Concept d'intensité des contraintes

La figure I.7 représente schématiquement les contraintes sur un élément centré sur un point M repéré par les coordonnées polaires r et θ par rapport à une extrémité d'une fissure sollicitée en mode d'ouverture ou mode I.[4]

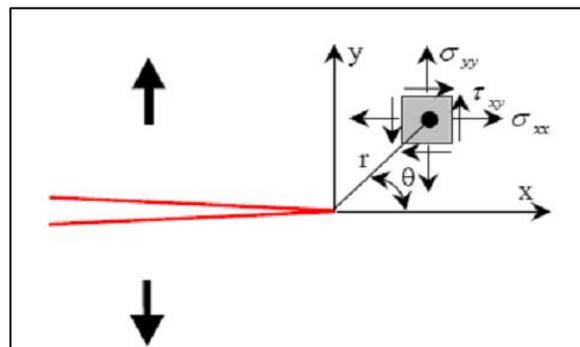


Figure I.7 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure.

Ces contraintes s'expriment à partir d'un paramètre noté K_I appelé facteur d'intensité des contraintes (FIC) en mode I, par les relations I.4:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (I.4)$$

Ces relations peuvent s'écrire sous la forme condensée suivante :

$$G_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (I.5)$$

Des formules donnant le FIC K_I pour différentes configurations de chargement existent dans les manuels spécialisés. L'expression du FIC K_I dans le cas de la figure I.5 est :

$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \quad (I.6)$$

En comparant les formules (I.1) et (I.6), il apparaît que :

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad \text{et} \quad G_C = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (I.7)$$

Dans l'approche basée sur le concept de FIC de la MLR, la rupture se produit lorsque le FIC K_I atteint la valeur critique K_{IC} qui correspond à la ténacité du matériau. Dans cette approche, le K_I est la force motrice dans un matériau dont la résistance à la rupture est caractérisée par la ténacité K_{IC} . Le principe de similitude est supposé vérifié comme dans le cas de l'approche énergétique. Les deux approches sont équivalentes (relations I.7) pour un matériau dont le comportement est linéaire élastique. [4]

I.4.3. Propagation des fissures et concept de tolérances au dommage :

La MLR permet le calcul de la durée de vie d'une structure soumise à des sollicitations cycliques (phénomène de fatigue) ou sujette à des effets de corrosion sous tension. La vitesse de propagation des fissures est alors caractérisée par un paramètre tel que le FIC, et la taille critique de défaut à ne pas dépasser est directement liée à la ténacité du matériau. Dans le cas par exemple de la fissuration par fatigue des alliages métalliques, la propagation de fissure da/dN est généralement représentée par la relation empirique de Paris :

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (1.8)$$

Où ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes et C et m sont des constantes du matériau.

Les structures contiennent la plupart du temps des défauts de type fissure; ces défauts, souvent inhérent aux procédés même de fabrication des composants, étant inévitables, on dimensionne les structures en tenant compte de leur présence et en veillant à ce qu'ils n'atteignent pas la taille critique qui conduit à la rupture brutale : c'est le concept de tolérance au dommage. La MLR fournit les outils nécessaires pour déterminer la taille critique du défaut (relation I.3) et suivre sa propagation (relation I.8). [4]

Considérons un défaut (une fissure de fatigue ou de corrosion sous tension) qui se développe dans une structure et dont l'évolution de la taille en fonction du temps est représentée schématiquement sur la figure I.8. Cette figure illustre bien le concept de tolérance au dommage. La longueur de fissure initiale a_0 correspond généralement à la limite de détection des moyens de contrôle non destructif, et la longueur critique est déterminée à partir du chargement appliqué et de la ténacité du matériau. On prend un coefficient de sécurité de telle sorte que la longueur admissible du défaut reste inférieure à la longueur critique; la durée de vie de la structure est alors déterminée en calculant le temps nécessaire pour que la longueur de défaut passe de a_0 à la longueur admissible. [4]

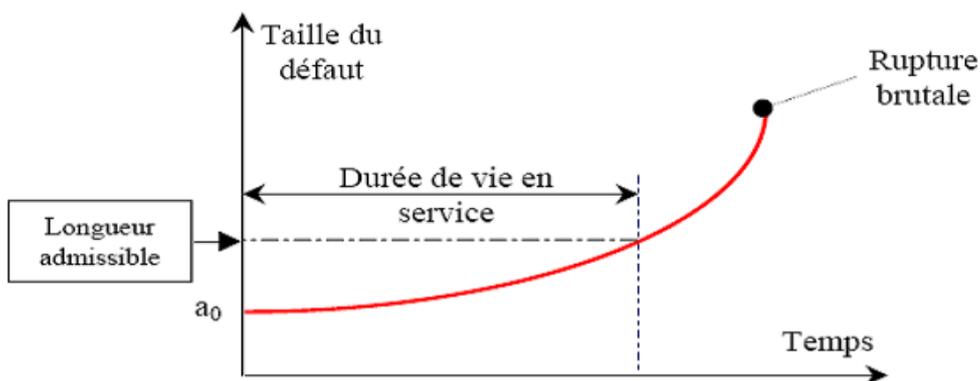


Figure I.8 : Concept de tolérance au dommage.

I.5. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture :

Selon le comportement physique d'un matériau, on utilise les concepts adaptés de la mécanique de la rupture. La classification habituellement utilisée pour ces concepts est la suivante :

- La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire élastique. Les alliages d'aluminium à précipitation durcissant, les aciers à haute limite élastique, les céramiques... font partie de cette catégorie. [4]

- La mécanique non linéaire de la rupture (MNLR) ou mécanique élastoplastique de la rupture (MEPR), pour les matériaux ductiles tels que les aciers à faible ou moyenne résistance, les aciers inoxydables ou aciers austénitiques, les alliages de cuivre... etc.

- La mécanique dynamique de la rupture (MDR), linéaire ou non linéaire, pour les métaux sollicités à grandes vitesses de déformation; le comportement peut être aussi viscoplastique dans ces conditions.

- La mécanique viscoélastique de la rupture (MVER) pour essentiellement les polymères sollicités à des températures au-dessous de la température de transition vitreuse.

- La mécanique viscoplastique de la rupture (MVPR) pour les polymères au-dessus de la température de transition, pour les métaux et les céramiques sollicités à haute température.

La MLR et la MEPR sont indépendantes du temps. Le temps intervient en revanche explicitement dans le comportement pour la MDR, la MVER et la MVPR. La MEPR, la MDR, la MVER et la MVPR sont souvent regroupées dans le domaine élargi de la mécanique non linéaire de la rupture (MNLR).

I.6. Applications des modèles

Considérons une plaque fissurée qui est chargée jusqu'à rupture. La figure I.9 est une représentation schématique de la variation de la contrainte à rupture en fonction de la ténacité des matériaux.

Pour les matériaux à faible ténacité où la contrainte à rupture varie linéairement avec le K_{IC} (relation I.6), la rupture fragile est le principal mécanisme qui gouverne la ruine de la structure; la MLR décrit raisonnablement bien ce genre de comportement. Pour des matériaux à très haute ténacité, la MLR n'est plus valable et ce sont les propriétés d'écoulement du

matériau qui gouvernent le mécanisme de rupture; on utilise alors une simple analyse de chargement limite pour dimensionner les structures. Les matériaux à ténacité intermédiaire constituent une transition entre les deux domaines précédents ; la MNLR est généralement appliquée pour décrire le comportement dans ce domaine. [4]

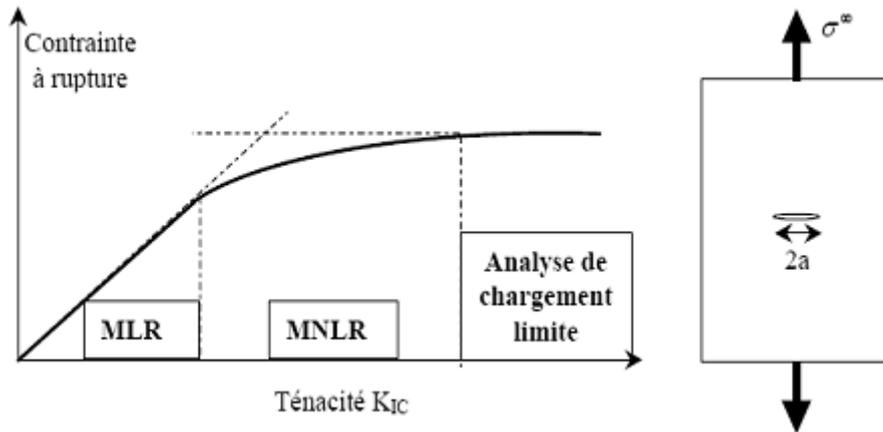


Figure I.9 : Comportement en fonction de la ténacité.

CHAPITRE II

Le Tréfilage de l'alliage d'Aluminium (AGS)

Le Tréfilage de l'alliage d'Aluminium (AGS)

II.1.Introduction

Le tréfilage à froid est essentiellement une opération de mise en forme par déformation plastique qui consiste à l'élaboration de fils de différents diamètres. Dans les métaux, cette déformation s'obtient par glissement suivant certains plans et directions de glissement grâce au déplacement de dislocations. 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. Le tréfilage a pour effet de "durcir" le métal et de diminuer ses possibilités de déformation ultérieure.

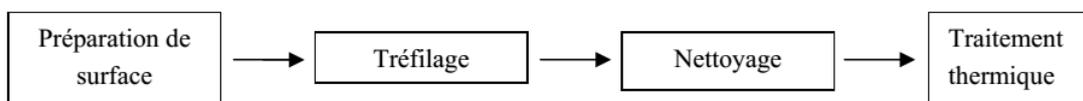
Voilà pourquoi on est amené à recuire le métal soit pour poursuivre le tréfilage à froid, soit pour redonner aux produits finis des propriétés de plasticité suffisante.

Le tréfilage, en tant que procédé de mise en forme d'un matériau donné, est caractérisé par différents paramètres, à savoir la vitesse et la température de tréfilage, la géométrie des filières et les conditions de frottement, mais également par la structure et les propriétés du matériau qui déterminent sa capacité à subir une déformation élevée en tréfilage. [5]

II.2. Le tréfilage

Le tréfilage consiste à réduire la section d'un fil métallique par passage à travers une ou plusieurs filières, sous l'effet d'une force de traction (étirage). [6]

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires : [7]



II.3. La Tréfileuse

Une tréfileuse (**Figure II.1**) est une machine comprenant essentiellement une série de filières de forme appropriée et d'une série de cabestans fournissant la force de traction pour tirer le fil à travers des filières. L'ensemble est lubrifié et refroidi par lubrifiant approprié. [8]

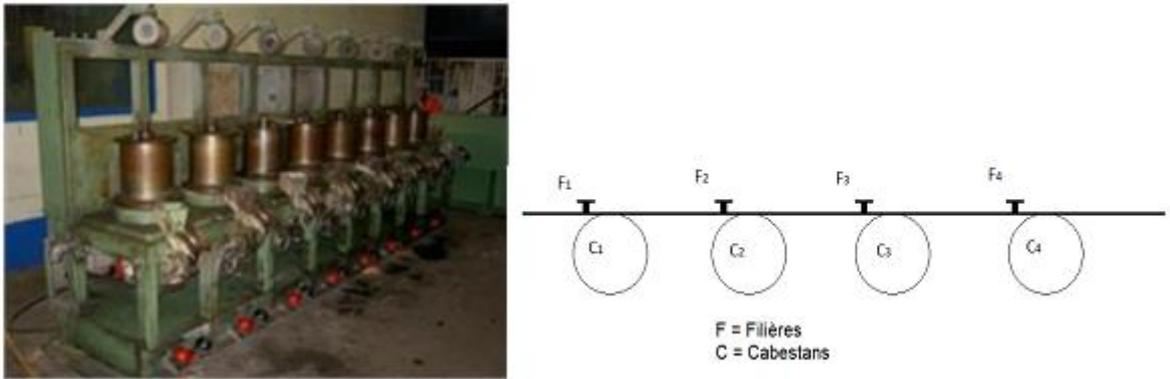


Figure II.1: Photo et schéma de l'ensemble (Filières + Cabestans). [8]

- **La machine simple**

C'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction. Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception (**Figure II.2**).

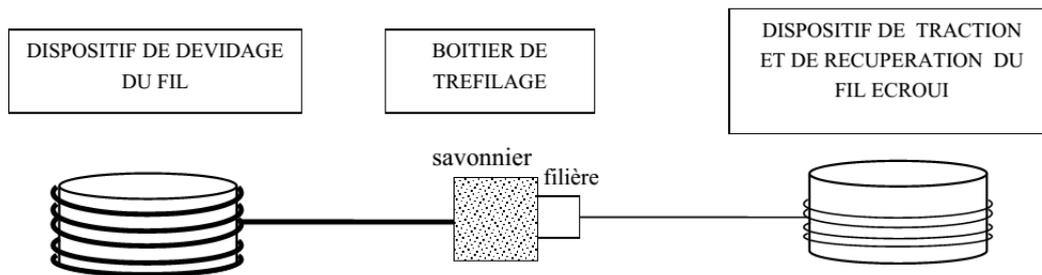


Figure II.2 : Schéma de principe d'une machine à tréfiler simple (ou mono passe). [7]

II.4. Principales composantes de la tréfileuse

II.4.1. La filière

Elle se compose de deux parties : un noyau, très dur, qui va assurer la réduction du diamètre du fil et une frette en acier qui maintient le noyau et lui permet de résister aux fortes pressions développées au cours du tréfilage. Elle se compose de plusieurs parties (Figure II.4).

- un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant,
- un cône de travail, de demi-angle α , dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil,
- une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil,

- un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant.

Le tréfilage des gros fils se fait le plus souvent avec des filières en carbure de tungstène lié cobalt. Pour les fils plus fins, ce sont des filières diamant.

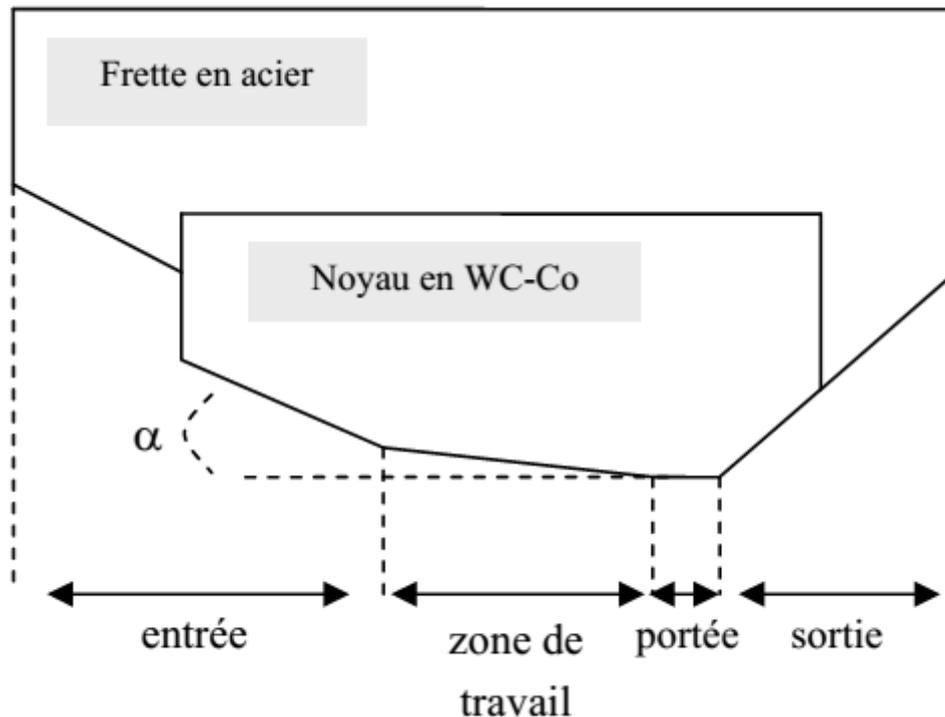


Figure II.3 : Schéma d'une filière de tréfilage. [7]

II.4.2. Les cabestans de tirage

C'est un tourniquet en bloc massif à frette amovible posé verticalement ou horizontalement pour rouler et bobiner le fil tréfilé. C'est au cabestan d'exercer l'effort de traction continu sur le fil et il est conçu de manière à fonctionner en synchrone avec plusieurs types de métaux. Il est muni d'un dispositif d'expulsion permet de sortir sans effort des bobines de grande taille. La largeur et la vitesse de bobinage sont réglables en continu. [8]

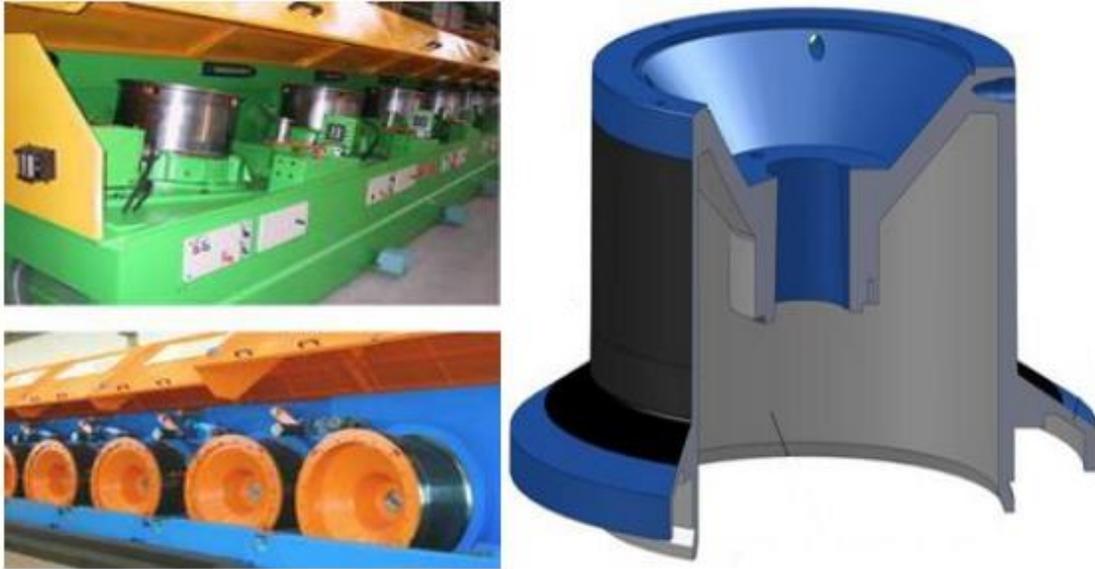


Figure II. 4: Photos et Schéma de cabestan. [8]

II.4.3.Lubrification

Il est important d'utiliser un lubrifiant au cours du procédé de déformation plastique par tréfilage afin de minimiser le frottement et limiter ainsi l'usure. L'impact du lubrifiant se sent par la diminution des forces d'étirage, et d'éviter les accroissements excessives de la température d'échauffement, aux grandes vitesses de tréfilage, il en résulte la durabilité des outils de travail (filières, poulies....) et la bonne qualité du produit tréfilé.

Les lubrifiants sont généralement en trois catégories :

II.4.3.1. Les lubrifiants à base d'eau

De l'eau pure, eau graphitée, ou émulsion,... ils s'imposent là où le refroidissement de l'outillage est un problème primordial à cause de la valeur élevée de la capacité thermique massique de l'eau (mise en forme à chaud).



Figure II.5: Les lubrifiants à base d'eau. [9]

Leur utilisation se développe dans les procédés à froid à forte vitesse de déformation où le refroidissement du produit et de l'outillage est un problème important : laminage à froid, treillage de fils fins. Leur faible coût l'a fait préférer aux autres lubrifiants quand le problème de frottement est peu crucial.

II.4.3.2. Les huiles légères

D'assez faible viscosité : utilisées à froid, elles imposent un frottement mixte modéré. Leur coût est plus élevé que celui des émulsions.

II.4.3.3. Les savons

Dans la fabrication des savons de tréfilages, on utilise principalement des matières grasses d'origine animale, le suif et acides gras de suif donnant une composition majoritaire en acides gras insaturés (35 - 40%) et acides saturés (45%).

Les propriétés du savon utilisé comme lubrifiant à sec, sont influencées par la composition en acides gras de ces savons, d'où la dureté, le jaunissement. Les températures de ramollissement et de fusion du savon varient selon la répartition des différents types d'acides dans les savons.



Figure II.6 : Boite à savon (savonnier). [9]

II.5. Les incidents au cours de tréfilage

Les opérations de tréfilage sont confrontées à de nombreux problèmes, de nature techniques ou matériels, cela se traduit par l'apparition d'imperfections au niveau du produit tréfilé, influant ainsi sur sa qualité.

Au tréfilage, un certain nombre de défauts sur fil peuvent apparaître :

II.6.1. La rayure

La rayure est facilement délectable, le fil a un aspect brillant et possède une ligne continue sur sa surface périphérique. Elle est due, au frottement fil/filière, mais d'autres paramètres peuvent provoquer cette rayure :

- Par une lubrification incomplète ou un mauvais choix de lubrifiant ;
- Par des traces d'humidité sur la bobine, dans le lubrifiant;
- Le fil machine revêtu, ayant séjourné trop longtemps dans l'atelier;
- Non-respect des dimensions, dû à des outillages non adaptés, à des déformations à la trempe ou au dressage, ou à une excentration de l'ébauche ;
- Filière mal nettoyée au polissage, trace de poudre diamantée ou de carbure de tungstène;
- Une des origines de ces rayures est le bourrage de la filière avec des copeaux de métal. Un tel bourrage (figure II.8) entraîne localement une mauvaise lubrification du fil;
- Des incrustations de métal en surface provoquent des défauts de surface tels que des pattes de corbeaux (figure II.9).

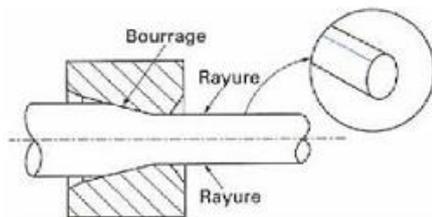


Figure II.7 : Bourrage d'une filière générant la rayure du fil.

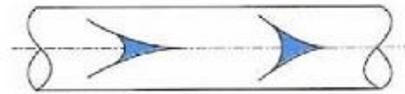


Figure II.8: Criques de surface appelées pattes de corbeaux.

II.6.2. Les cassures

Au cours de procédé de tréfilage, des cassures se produisent, et entraîne l'arrêt de production, ce qui cause des retards, donc des pertes. Les cassures sont dues à plusieurs causes :

- Ecrouissage trop important : en dépassant la limite d'écrouissage du métal, il ne sera plus possible de le tréfiler, le métal est trop dur et sa déformation sera difficile puisque sa ductilité est perdue.

- Réduction trop importante : si on applique une force de traction supérieure à la résistance à la rupture du fil. Alors les forces résistantes sont supérieures à la force de traction du fil.
- Mauvais réglage de la machine.
- Un angle du cône de travail trop ouvert, provoque une rupture en « cup and cone » (figure II.10).

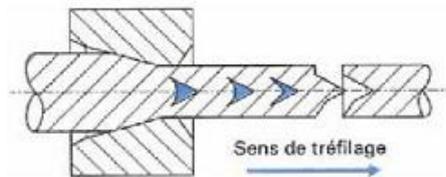


Figure II.9 : Rupture en cup and cone d'un fil. [9]

II.6. Traitements thermiques des fils tréfilés

Les modifications microstructurales induites par la déformation à froid (tréfilage) modifient les propriétés métallurgiques, physiques et mécaniques des métaux. Mais, on peut généralement restaurer les propriétés et la microstructure que possédait le métal avant la déformation, au moyen d'un recuit : l'agitation thermique des atomes due à l'énergie absorbée au cours de ce recuit, permet d'activer les phénomènes de retour à l'état initial. Ce retour, plus ou moins complet, s'effectue essentiellement selon trois processus : la restauration, la recristallisation, et le grossissement (coalescence) des grains ou encore recristallisation secondaire. [9]

CHAPITRE III

**PARTIE EXPERIMENTALE
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

III.1. Introduction

Dans cette partie nous présentons le travail expérimental effectué pour réaliser cette étude. Comme nous l'avons signalé dans l'introduction générale, cette étude comporte uniquement la partie : analyses et caractérisations des fils tréfilés de l'alliage de l'aluminium AGS 6101.

Les techniques d'analyse et de caractérisation utilisées dans ce travail sont : la métallographie optique, la microdureté et l'essai de traction. Les résultats obtenus sont ensuite consignés et interprétés dans ce chapitre.

III.2. Matériau Etudié

Le matériau étudié est l'alliage Al-Mg-Si de désignation AGS 6101. Ce matériau nous été fourni par l'entreprise (ENICAB – Général Câble de Biskra), sous forme de fil machine de diamètre 9,5 mm et de fils tréfilés de différents diamètres (tableau III.1).

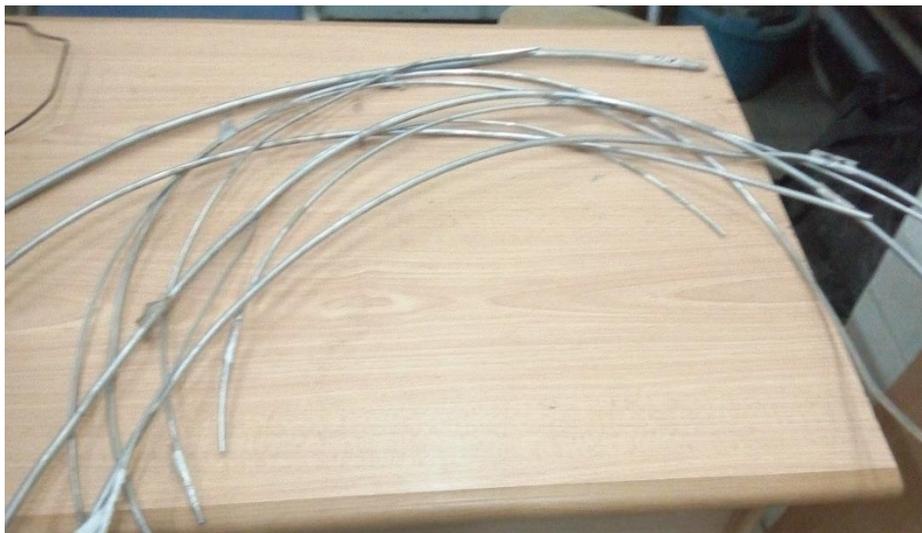


Figure III.1 : Matériau Etudié

Le taux de réduction est calculé par la formule suivante :

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

Tableau III. 1 : Les fils étudiés et les déformations correspondantes

Diamètre du fil (mm)	9.5	8.3	7.3	6.6	5.8	4.7	4.2	3.7	3.3
Taux de déformation (%)	$\varepsilon_0=0$	$\varepsilon_1=23.6$	$\varepsilon_2=41.6$	$\varepsilon_3=51.7$	$\varepsilon_4=62.7$	$\varepsilon_5=75.5$	$\varepsilon_6=80.4$	$\varepsilon_7=85$	$\varepsilon_8=88$

La composition chimique de cet alliage est donnée dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: La composition chimique de l’alliage Al-Mg-Si

Elément	Al	Cu	Fe	Mg	Si
Et %	98.45	0.014	0.215	0.653	0.595

III.3. Démarche Expérimentale

III.3.1.Préparation Des Echantillons

1. Découpage

Le découpage des échantillons qu’été manuellement effectuée 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.

2. Le Polissage Mécanique

Pour les observations aux microscopes optiques, les échantillons sont polis sur une polisseuse (PHOENIX ALPHA d’ANALIS.) avec des papiers abrasifs de différentes granulométries de 320 à 1200. Avant le passage vers une granulométrie inférieur, l’échantillon est nettoyé à l’aide de l’eau distillée puis rincé avec l’éthanol. Le polissage de finition a été réalisé sur un tissu feutré avec addition du lubrifiant et de la pâte diamantée. Les échantillons sont nettoyés à l’alcool et séchés.

3. L’attaque chimique

Pour l’observation optique l’attaque chimique a été réalisée à l’aide du réactif composé de matières suivantes : acide fluorhydrique 40%.

III.3.2.Techniques de caractérisations

1. Microscopie optique

La microscopie optique nous permet d’observer la microstructure de l’état initial (fil machine) et les changements microstructuraux survenus dans les fils tréfiles. Les échantillons sont observés à l’aide d’un microscope de type HUND T100-WETZLAR, de Wilovert’s company. 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.

2. Microdureté

Pour la mesure de la micro dureté, nous avons utilisé un microduromètre Vickers de type 402MVD sous une charge de 200g. Cet appareil donne une mesure automatique ou manuelle. Pour la mesure manuelle l'appareil est équipé d'un oculaire pour permettre de positionner l'empreinte, qui est nécessaire pour déterminer HV à partir d'un double clic sur le bouton de HV de l'appareil (Figure. II.4), où bien à l'aide de la formule suivante :

$$HV= 1854.4 p/d^2$$

Où :

- p : charge appliquée.
- d : longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

3.Essai de traction

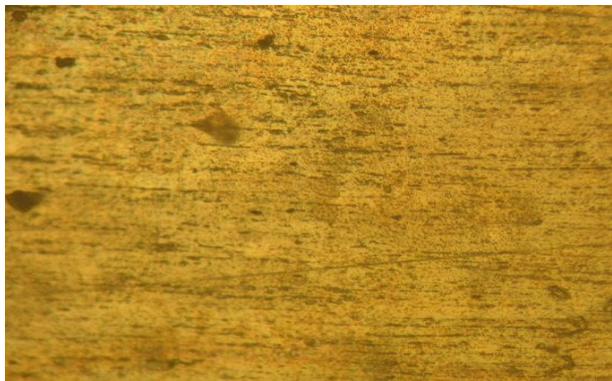
L'essai de traction est effectué au niveau du laboratoire physique de ENICABISKRA sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100, dotée d'une capacité de mesure 100KN et d'un extensomètre de longue course ($L_0 = 200\text{mm}$) ; elle est commandée et pilotée par un ordinateur.

III.4. Résultats Et Interprétations

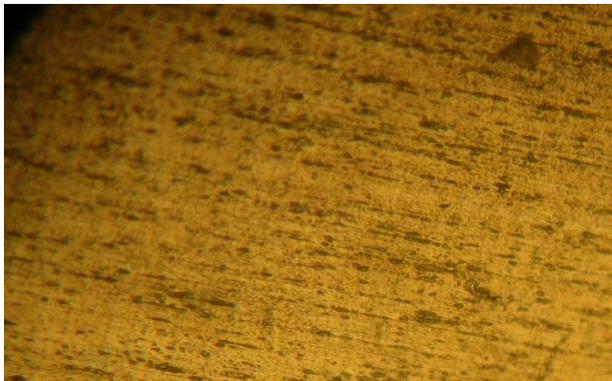
III.4.1. Analyse microstructurale

L'observation au microscope optique ne nous a pas permis de voir des microstructures des fils étudiés. Comme on peut le constater sur les micrographies obtenues (figure III.2), on ne peut pas voir les lignes des joints de grains. Ceci est en effet dû à l'échec de l'attaque chimique appliquée. Toutes solutions chimiques que nous avons utilisées et les techniques testées n'ont pas pu révéler en clarté les joints de grains et ainsi les microstructures des fils étudiés.

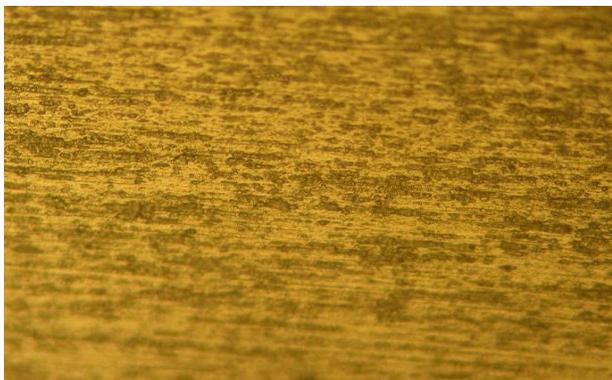
L'échec de cette analyse nous sera un handicap dans la suite de notre étude.



$\varnothing = 9.5$ mm Fil machine



$\varnothing = 6.6$ mm



$\varnothing = 3.3$ mm

Figure III.2 : micrographies optiques des fils étudiés

III.4.2 La caractérisation mécanique

Tableau III.3: Les valeurs des mesures mécaniques des fils étudiés

Diamètres des fils ϕ (mm)	Taux de déformation par rapport au fil machine ϵ (%)	Taux de déformation par rapport au fil précédent %	charge à la rupture R_m (MPa)	microdureté (HV)		l'allongement A(%)
				COEUR	PERIPHERIE	
9.5	0	0	204	/	/	12.3
8.3	23.66	23.66	/	52.7	53.3	6.7
7.3	41.57	22.64	259,85	66.7	65	4.9
6.6	51.73	18.26	268,46	66.7	68.7	/
5.8	62.71	22.77	278,18	63	66	2.81
4.7	75.54	34.33	286,12	66	69	2,35
4.2	80.42	20.14	290,12	62	/	/
3.7	84,85	22.39	300,41	72	70	1.69
3.3	88,93	20.45	303,99	74.7	70	/

III.4.3. La charge à la rupture

La figure III.3 illustre la variation de la charge à la rupture, prélevée par le test de traction sur les fils tréfilés, au cours des différentes passes du tréfilage. On constate une forte augmentation de la charge dans la première passe de tréfilage puis la progression de la charge devient monotone sur le reste de la courbe. L'augmentation forte de la charge à la première passe peut laisser entendre que le durcissement induit par cette déformation peut conduire à la rupture du fil. Ceci peut être vrai c'est seulement si le fil se casse uniquement dans cette étape de tréfilage, hors le fil peut se casser à n'importe quelle étape. En comparant la valeur de la charge à la rupture de ce fil qui est 303 MPa à celle d'un autre fil moins cassant qui est de l'ordre de 320 à 330 MPa, on conclue que cette analyse seule ne peut pas nous permettre de prélevée au moins une des causes qui provoquent la rupture du fil.

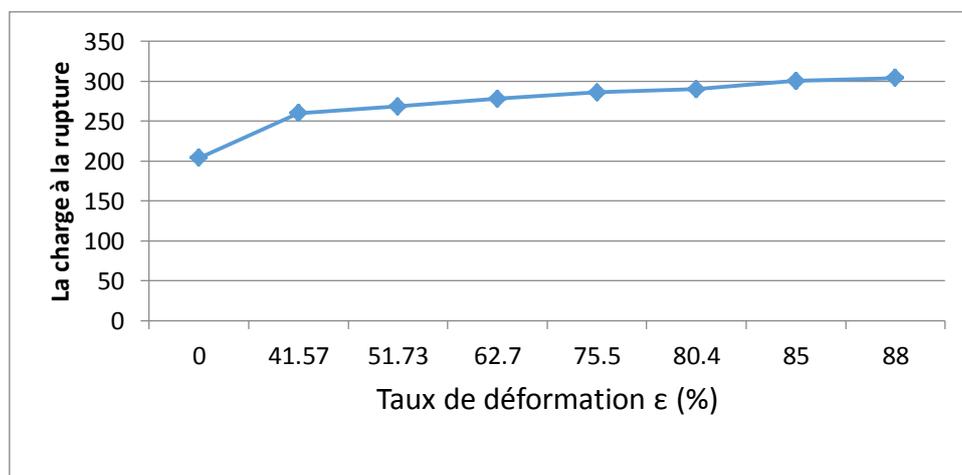


Figure III.3 : Variation la charge en fonction de taux de déformation

III.4.4. L'allongement

La figure III.4 représente l'évolution de l'allongement en fonction du taux de déformation. Contrairement à la charge à la rupture, l'allongement est inversement proportionnel à la déformation appliquée, car cette dernière génère des zones durcies qui freinent l'allongement. Comme précédemment, on constate une chute brusque de l'allongement dès la première passe, puis la diminution devient moins accentuée. De même, cette caractérisation ne peut apporter aucune information sur le problème de rupture du fil.

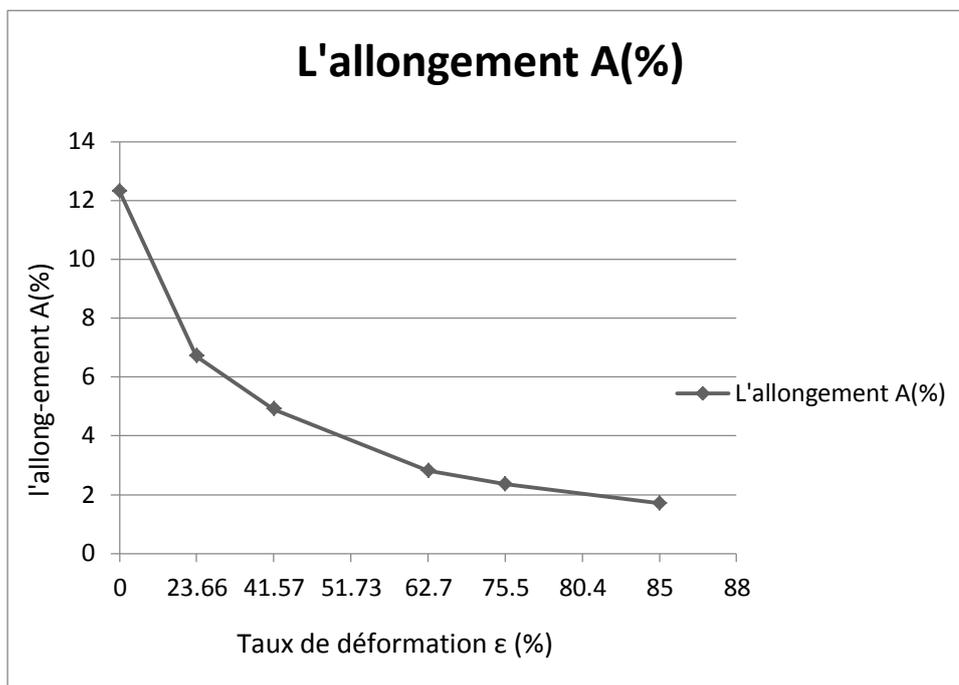


Figure III.4 : Variation de l'allongement en fonction de taux de déformation

Nous avons songé à l'examen des facettes de rupture des fils obtenues par le test de traction dans la suite de l'analyse. Mais l'absence de la striction dans fils cassés lors du tréfilage nous a vite laissé abandonner cette piste.

III.4.5. La Microdureté

La figure III.5 montre les variations de la microdureté de cœur et de la périphérie du fil en fonction du taux de déformation. Sur les deux courbes on constate un rapide durcissement à la première passe du tréfilage. Mais le constat le plus important est l'existence d'une légère différence dans la dureté entre le cœur et la périphérie des fils. Cette hétérogénéité peut être attribuée à plusieurs causes ; hétérogénéité dans la composition microstructurale, anisotropie microstructural en hétérogénéité dans la taille des grains. Ce résultat nous laisse penser que cette hétérogénéité peut constituer un facteur participant à la rupture du fil.

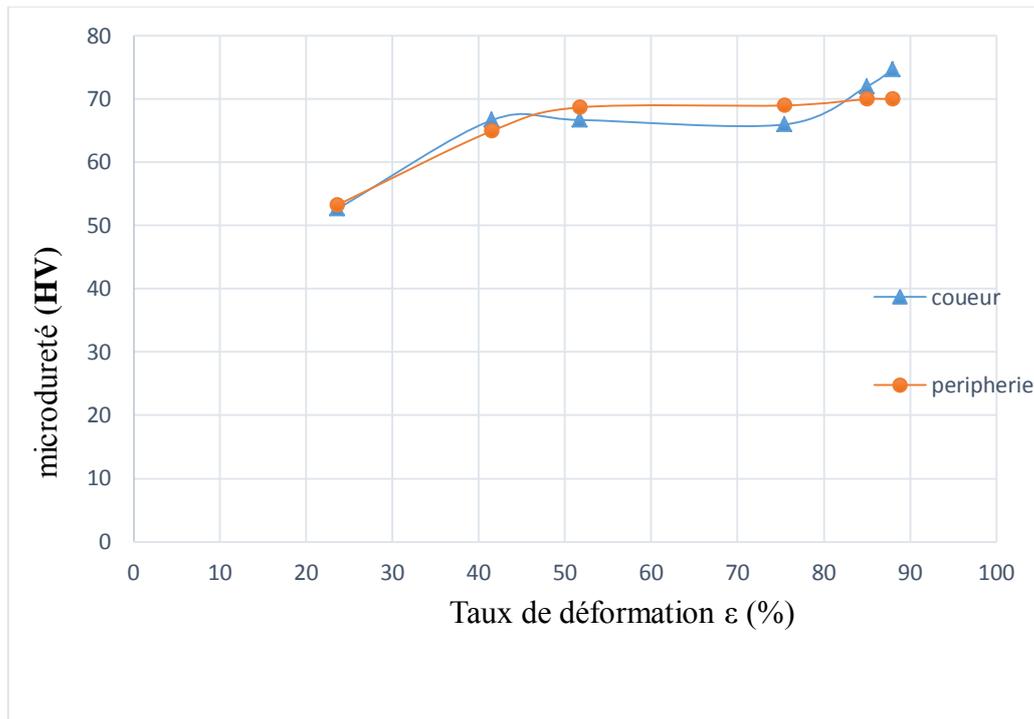
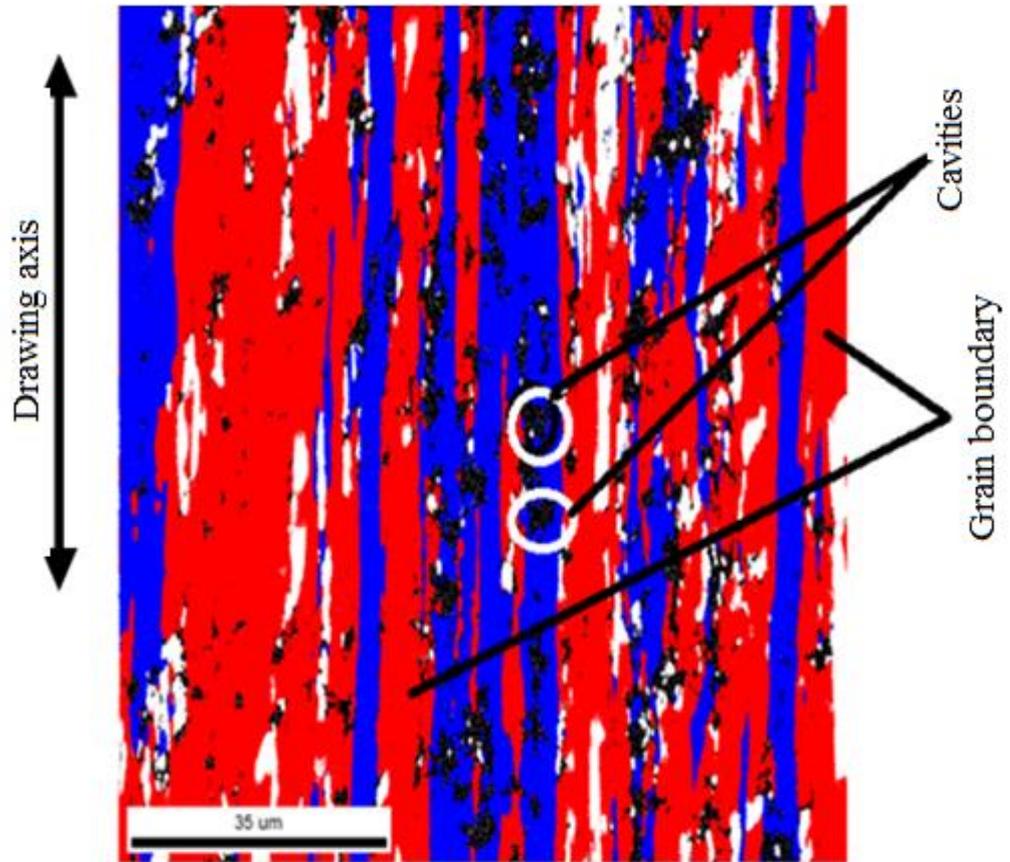


Figure III.5 : Variation de microdureté Cœur etpériphérie en fonction de taux de déformation

En conclusion, nous pouvons dire qu'avec ces analyses nous ne pouvons énoncer quoique ce soit quant aux causes principales qui provoquent la rupture du fil étudié.

Nous avons repris l'analyse microstructurale effectuée par EBSD sur ces fils et présentée dans une étude précédente [10]. Cette analyse révèle la présence de porosité dans le fil machine et même dans les fils fortement déformés. Comme l'énonce la mécanique de la rupture [4], les défauts de structure sont des causes principales qui conduisent à la rupture du matériau. Effectivement la présence de porosité à l'intérieur du fil constitue une hétérogénéité dans la continuité de la matière dans le fil, donc, toute sollicitation extérieure (la force d'étirement) ne sera pas distribuer de manière homogène dans tous les points du fil. La distribution des contraintes n'étant pas homogène sur la section du fil peut conduire à l'amorçage des fissures et conduire ainsi à la rupture du fil.



EBSD microstructure of drawn wire at $\epsilon_3 = 87\%$

Figure III.6 : Microstructure EBSD d'un fil fortement tréfilé [10].

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

D'après ce qu'on a obtenu dans le chapitre précédent, on peut conclure les points suivants :

- L'échec de l'attaque chimique, qui n'a pas permis l'observation microstructurale au microscope optique, a constitué un handicap majeur pour la réalisation de cette étude.
- Que ce soit par mesure de microdureté ou par mesure de la charge à la rupture, le plus grand durcissement du fil se produit pendant la première passe du tréfilage.
- La mesure de la microdureté révèle la présence d'une hétérogénéité entre le cœur et la périphérie du fil. Cette hétérogénéité qui n'a pas pu être identifiée, peut participer à la rupture du fil mais ne peut être comme cause principale de la rupture.
- Nos analyses et caractérisations étant non concluantes quant aux causes provocantes la rupture des fils ; nous avons donc exploités les résultats des travaux antérieurs pour appuyer notre étude. L'analyse microstructurale par EBSD consignée dans le travail antérieur révèle la présence de porosité dans ce fil qui persiste même à forte déformation.
- Après ce résultat nous pensons que la porosité peut être à l'origine de la rupture de ces fils pendant le tréfilage.
- Pour compléter ce travail, le suivi et le prélèvement des conditions opératoires pendant le tréfilage sont primordiales.
- D'autres analyses et caractérisations plus poussées comme la mesure des contraintes résiduelles, l'observation des dislocations et la mesure de la taille, la densité et la distribution de la porosité peut mieux éclaircir ce point.

References Bibliographies

- [1] Hélène Carre « Etude du comportement à la rupture d'un matériau fragile précontraint : le verre trempé », 1996.
- [2] Djebbloun youcef « ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES »2003/2004.
- [3] bourouis fairouz « OPTIMISATION DE LA RUPTURE ET DE L'ENDOMMAGEMENT DE DIFFERENTS MATERIAUX SANDWICHES » 02 / 05 /2013.
- [4] rabie chettah, « ETUDE DE L'ANALYSE LIMITE ET CALCUL A LA RUPTURE DES MATERIAUX ELASTIQUES PARFAITEMENT PLASTIQUES » mémoire de magister
- [5] Z.Boumerzoug, N.Lehraki, M.Zidani, « MORPHOLOGIE DES GRAINS D'UN FIL D'ACIER DOUX TREFILE A FROID A L'ENTREPRISE TREFISOUD D'EL-EULMA », Département de Métallurgie N°06, Juin 2005.
- [6] Mosbah Zidani et al, « Effet du taux de formation et le Temps rature de recuit sur la cinétique de Recristallisation des Fils de Cuivre Tr fils froid », département de génie mécanique, 2011.
- [7] Carole LEVRAU, « Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du trefilage des aciers inoxydables avec les savons secs », Ecole nationale supérieure des mines de paris, 2006.
- [8] A. Rion, « Notion de tréfilage de recuit du cuivre, Vinçotte International », Juin 1987.
- [9] Lahcene FELLAH, « L'effet de tréfilage et de recuit sur les fils électriques de cuivre », université de BISKRA, 2015.
- [10] [S, MESAOUDI. M, ZIDANI. M, CHENAFI. A, MEGHAZI. H, MATHON. T, BAUDIN, Monitoring the Evolution of the Properties of Aluminium AGS Alloy Wire during Drawing; Proceeding METAL 2016, 25th International Conference on Metallurgy and Materials, 2017, pp. 327-332].