



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



Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Option : **Génie des Matériaux**

Thème

Étude du comportement mécanique d'aluminium déformé par tréfilage

Présenté par :

BENLAHBIB Youcef
MAABED Khalil

Encadré par :

Dr. Diha Abdallah

Devant le jury composé de :

Mr. Hannachi Med Tahar	Pr	Université de Tébessa	Président
Mr. DIHA Abdallah	M.C.A	Université de Tébessa	Rapporteur
Mr. Laouadi Bouzid	M.C.B	Université de Tébessa	Examineur

Année Universitaire 2022/2023



Remerciements

Le présent mémoire de master est le fruit de plusieurs mois de recherche.

Nos remerciements d'abord à dieu, puis nous aimerions remercier les personnes qui nous accompagnent. De cette façon, ils ont participé à la préparation de ce mémoire.

Nous remercions vivement et chaleureusement, DIHA Abdallah encadreur de mémoire, pour nous avoir guidé et soutenu tout au long de ce mémoire.

Nous le remercions particulièrement pour la confiance qu'il nous a accordé, pour son rigueur scientifique, pour son patience et pour ses conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance aux enseignants du département de Génie Mécanique à Université Larbi Tébessi – Tébessa.

Liste des symboles

σ : Contrainte

ε : Déformation (%)

Δl : L'allongement absolu

l_0 : La longueur initiale

R_e : Limite d'élasticité (MPa)

R_m : Résistance à la traction (MPa)

$A\%$: Allongement pourcent après rupture (%)

$Z\%$: coefficient de striction (%)

E : Le module de Young

R_m : La résistance maximale

σ_e : La limite d'élasticité

σ_{ec} : La limite d'écoulement

σ_{max} : La résistance à la traction

σ_r : La contrainte à la rupture

F_{pr} : Force de proportionnalité

F_e : Force de limite d'élasticité

F_{ec} : Force de limite d'écoulement

F_{max} : Force maximal

F_r : Force de rupture

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1	Schéma d'une courbe de traction	5
Figure I.2	La propagation d'un pli le long d'un tapis, un tapis, analogue au mouvement d'une dislocation coin	7
Figure I.3	Déplacement d'une dislocation coin dans un cristal	8
Figure I.4	Modification de la forme d'un grain sous l'effet du glissement a) avant déformation; b) après déformation.	9
Figure I.5	Blocs de cellules et murs denses de dislocations	11
Figure I.6	Effets de la température sur la résistance, résistivité et taille de grain	12
Figure I.7	Évolution de la contrainte d'écoulement d'un acier en fonction de la température	13
Figure I.8	Principe du chauffage par induction (d'après EDF)	14
Figure I.9	Principe de fonctionnement d'une chauffeuse à induction (d'après EDF)	14
Figure I.10	Principe du chauffage par conduction (D'après EDF)	15
Figure I.11	Principe de fonctionnement d'une chauffeuse à conduction (d'après EDF)	15
Figure I.12	Principe du tréfilage	16
Figure I.13	Changement de texture au cours du tréfilage des fils d'aluminium de diamètre 9,5 mm. 15% de réduction à chaque passe à une vitesse de 20 m/min	17
Figure I.14	Tréfileuse multi passes	17
Figure I.15	Schématisation des zones de tréfilage d'éléments géométriques	19
Figure I-16	Principales étapes d'une opération d'emboutissage. (a) Positionnement du flan, (b) serrage, (c) descente du poinçon et (d) remontée des outils mobiles	20
Figure I.17	Schéma du procédé de thermo-estampage: 1) plaque pré-consolidée ; 2) chauffe dans le four ; 3) emboutissage du flan ; 4) pièce terminée	21

Chapitre II

Figure II.1	Machine d'essai de traction	27
Figure II.2	Courbes conventionnelles typiques de traction avec les étapes d'endommagement d'éprouvette	28
Figure II.3	Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et Rp0.2	29
Figure II.4	Rigidité et ductilité des matériaux	30
Figure II.5	Dispositif pour l'essai de dureté	32
Figure II.6	Principe d'essai de Brinell	33
Figure II.7	Principe de la Rockwell	34
Figure II.8	Principe d'essai de dureté Vickers	38
Figure II.9	Schéma de principe d'un essai de dureté Knoop	41
Figure II.10	Principe de l'essai de résilience et du montage de l'éprouvette	42
Figure II.11	Machine de l'essai de résilience	42

Chapitre III

Figure III.1	Tréfileuse horizontale de type DZWG1250/10 ,1.	46
Figure III.1	Four de traitement thermique. (Université Larbi Tebessi tebessa).	48
Figure III.2	Eprouvettes des fils d'aluminium tréfilés.	48
Figure III.3	Eprouvettes de dureté.	49
Figure III.4	Machine de traction (Zwick/Roell Z050) (Université Badji-Mokhtar Annaba)	49
Figure II.5	Principe d'essai de Brinell	50
Figure III.6	Machine de dureté Brinell (INNOVATEST) (Université Badji-Mokhtar Annaba)	51

Chapitre IV

Figure IV.1	Courbes de traction des fils non traités d'aluminium tréfilés avec taux de réduction 30.26 %; 53.68 % et 65.26 %.	55
Figure IV.2	Courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés, à taux de réduction 30.52 % en fonction de la température du recuit à $t_r=2h$	56
Figure IV.3	Courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés, à taux de réduction 30.52 % pour une température 450 °C et pour des temps de recuits 1h, 2h,.4h et 6h	57
Figure IV.3	Courbes de dureté des fils non traités d'aluminium tréfile avec taux de réduction 0 %, 30.26 %, 53.68 % et 65.26 %.	58
Figure IV.4	Courbe d'essais dureté d'un fil d'aluminium tréfilé recuit de 2 h, à taux de réduction de 53.68 %.	59

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1	Les systèmes de maillage pour différentes structures	9
--------------------	--	---

Chapitre II

Tableau II.1	Différentes échelles de dureté Rockwell)	36
Tableau II.2	Compatibilité des unités de dureté Rockwell pour les échelles N et T	37
Tableau II.3	Comparaison entre les méthodes par pénétration	39
Tableau II.4	Différentes méthodes d'essai de dureté	40

Chapitre III

Tableau III.1	Valeurs des taux de réduction	47
Tableau III.2	Caractéristiques physiques du fil d'aluminium	47
Tableau III.3	Composition chimique du fil d'aluminium (composition massique %)	47

Chapitre IV

Tableau. IV.1	Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés non recuits	55
Tableau. IV.2	Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés recuits à différentes températures pendant de 2h de recuit.	56
Tableau. IV.3	Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés recuits à différents temps de recuit à une température 450 °C	57
Tableau. IV.4	Valeurs de dureté des fils non traités d'aluminium tréfile avec taux de réduction 0%,30.26%, 53.68% et 65.26%.	58
Tableau. IV.5	Valeurs de dureté d'un fil d'aluminium tréfilé à taux de réduction de 53.68 %, soumis à différentes températures	59

Sommaire

Remerciements	VI
Liste des symboles	VI
Liste des figures	III
Liste des tableaux	VI
Introduction générale	1
Références bibliographiques	3

Chapitre I

Déformation des métaux

I.1	Introduction	5
I.2	Déformation élastique et anélastique	5
I.3	La déformation plastique	6
	I.3.1 Introduction	6
I.4	Définition	7
I.5	Les modes de déformation plastique	8
I.6	Déformation par glissement	8
I.7	Déformation par maclage	9
I.8	Types de déformations	10
	I.8.1 Déformation à froid	10
	I.8.2 Déformation à chaud	11
I.9	Chauffage	12
	I.9.1 Différents modes de chauffage utilisés	13
	I.9.1.1 Chauffage à la flamme	13
	I.9.1.2 Chauffage électrique	13
I.10	Procédés de mise en forme des métaux	15
	I.10.1 Introduction	15
	I.10.2 Tréfilage	16
	I.10.2.1 Principe	16
	I.10.2.2 Texture de tréfilage	16
	I.10.2.3 Outils et équipements industriels du tréfilage	17
	I.10.3 La lubrification en tréfilage	18
	I.10.4 Filière	18
I.11	Emboutissage	19
	I.11.1 Introduction	19
	I.11.2 Principe	19
I.12	Estampage	20
	I.12.1 Définition	20
	I.12.2 Principe du procédé	20
I.13	Conclusion	21
	Références bibliographiques	22

Chapitre II

Essais mécaniques

II.1	Introduction	26
II.2	Essais de traction	26
II.2.1	Introduction	26
II.2.2	Principe d'essai de traction	27
II.2.3	Contraintes et déformations	27
II.2.4	Courbe contrainte-déformation	30
II.2.5	Caractéristiques mécaniques des métaux en traction	30
II.2.6	Déformation plastique	31
II.2.7	Loi de Hook	31
II.2.8	Module d'élasticité	31
II.2.9	Limite de proportionnalité	31
II.2.10	La limite d'élasticité	32
II.2.11	La limite d'écoulement	32
II.2.12	La résistance à la traction	32
II.2.13	La contrainte à la rupture	32
II.3	Essais de dureté	35
II.3.1	Machines d'essai et éprouvettes	37
II.3.2	Essai de dureté Brinell	37
II.3.2 .1	Le matériau à tester	37
II.4	Variante: Essai de dureté Meyer	40
II.5	Essai de dureté Rockwell	40
II.5.1	Les différentes échelles	40
II.6	Dureté Rockwell superficielle	41
II.7	Essai de dureté Vickers	41
II.7.1	Principe	42
II.8	Différentes méthodes d'essai de dureté	40
II.9	Mesure de microdureté	40
II.10	Essai de dureté Knoop	40
II.11	Essai de Résilience	41
II.11.1	Principe	41
II.11.2	Machine de l'essai	42

II.12	Conclusion	43
	Références bibliographiques	44

Chapitre III

Matériau étudié et techniques expérimentales

III.1	Introduction	46
III.2	Procédé de tréfilage	46
III.3	Matériau étudié	46
	III.3.1 Eprouvettes de traction et de dureté	47
	III. 3.1.1 Eprouvettes de traction	47
	III. 3.1.2 Eprouvettes de dureté	48
III.4	Techniques expérimentales	48
	III.4.1 Traitement de recuit	48
	III.4.2 Essais de traction	49
	III.4.3 Essai de dureté Brinell	50

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1	Introduction	54
IV.2	Essais de traction	54
IV.3	Essais de dureté	57

	Conclusion générale	61
--	----------------------------	----

	Résumé	62
--	---------------	----

Introduction générale

Introduction générale

La présence de l'aluminium se manifeste dans tous les secteurs de l'activité économique. Ce succès industriel et commercial de l'aluminium s'explique par ses pertinentes caractéristiques physiques et chimiques, telles que sa faible densité, sa basse température de fusion et son importante résistance à la corrosion [1].

C'est un métal résistant aux sollicitations mécaniques ; sa résistance peut augmenter par effet d'alliage ou par traitement à froid. La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre de deux tiers de celle du cuivre ; en utilisant l'aluminium comme conducteur électrique plutôt que le cuivre, on réalise une économie de 50 % sur le poids. La conductivité thermique de l'aluminium est de l'ordre de 60 % de celle du cuivre, ce qui justifie son utilisation dans différents domaines. L'aluminium se substituait au cuivre pour la fabrication des câbles de transmissions à haut voltage d'électricité. Par ailleurs les fils électriques en aluminium étaient de plus en plus utilisés pour les installations électriques et résidentielles [2].

En raison de la variété des propriétés mécaniques et électriques de l'aluminium les câbles en aluminium sont utilisés comme conducteurs électriques en raison de la qualité de leur conductivité, de leur tolérance aux variations climatiques et de leur faible coût, ils sont considérés comme adaptés à cet usage.

Ces fils sont obtenus par un processus de tréfilage, qui est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, par déformation plastique, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'action d'une force de traction et en présence d'un lubrifiant [3]. Ces fils sont produits de l'entreprise des industries du câble de Biskra (E.N.I.C.A. B). Pour mieux connaître les propriétés mécaniques de ces fils tréfilés. Plusieurs essais mécaniques ont été appliqués, tels que des essais de traction et l'essai de dureté Brinell.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le **premier** chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la déformation plastique et les différentes contraintes mécaniques qu'elle induit, et l'explication des différents mécanismes physiques de déformation du tréfilage.

Le **deuxième** chapitre présente les plus importants essais mécaniques, qui peuvent fournir les propriétés intrinsèques des matériaux tels que la dureté, la traction, résilience....

Dans le **troisième** chapitre, les matériaux étudiés ainsi que les tests mécaniques et les techniques expérimentales d'observation et d'analyse utilisées dans notre étude sont présentés en détail.

Le **quatrième** chapitre est consacré aux résultats et discussions de divers essais mécaniques effectués.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale.

Références bibliographiques

- [1] Y.C. Lin, Y.C. Xia, M.S. Chen, Y.Q. Jiang, L.T. Li, *Comput. Mater. Sci.* 67 243–248 (2013).
- [2] Y.C. Lin, Y.C. Xia, M.S. Chen, Y.Q. Jiang, L.T. Li, *Comput. Mater. Sci.* 67 243–248 (2013).
- [3] C. Levrau, *Compréhension et Modélisation des Mécanismes de Lubrification lors du Tréfilage des Aciers Inoxydables avec les Savons Secs*, Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, ENSMP (2006).

Chapitre I

Déformation des métaux

I.1 Introduction

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux d'un point de vue macroscopique et phénoménologique, et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelée limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible : si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau recouvre sa forme initiale. A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique [1] (figure. I.1). La déformation plastique est donc (essentiellement) irréversible. En général, elle est isochore : le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique. La déformation plastique est donc (essentiellement) irréversible. En général, elle est isochore : le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique.

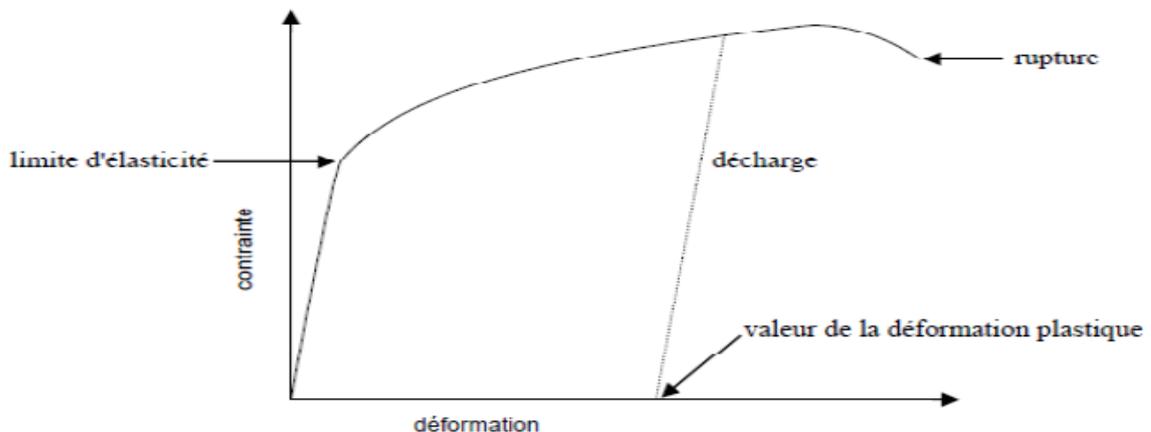


Figure I.1: Schéma d'une courbe de traction [2].

I.2 Déformation élastique et anélastique

Dans ce cas, la densité d'énergie stockée est une fonction d'état, c'est-à-dire qu'elle ne dépend que des états initial et final, et non du chemin parcouru. Cela signifie que pour une boucle fermée, on revient à l'état initial. Si la contrainte est supprimée, la déformation s'annule donc, ce qui peut être exprimé par une déformation résiduelle nulle. Deux cas doivent alors être distingués :

a) Il n'y a pas de dissipation d'énergie pendant le processus de déformation, c'est-à-dire que toute l'énergie dépensée a été emmagasinée dans le solide et est intégralement restituée si on supprime la contrainte : on dit alors que la déformation est élastique [3].

La déformation élastique ne provoque pas de modification permanente perceptible de structure et de propriétés du métal, la charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversible des atomes ou le pivotement des blocs de cristal. En traction d'un monocristal, les atomes s'éloignent l'un de l'autre, et en compression, ils se rapprochent. Un tel écart à partir d'un état d'équilibre compromet le bilan des forces d'attraction et de répulsion électrostatique.

C'est pourquoi après la suppression de la charge, les forces d'attraction et de répulsion remettent les atomes déplacés à l'état d'équilibre de départ et les cristaux reprennent leur forme et leurs dimensions initiales [4]

Dans ce cas, la déformation est instantanée lors de l'application de la contrainte et le retour à l'état non déformé lors de la suppression de la contrainte est également instantané. En un mot, la déformation est indépendante du temps.

b) Il y a dissipation d'énergie pendant le processus de déformation. La déformation est alors dite anélastique. Ceci se traduit par le fait que la réponse est en retard sur la sollicitation : si on applique instantanément une contrainte σ , la déformation élastique correspondante n'est atteinte qu'au bout d'un temps qui peut être infini. Il est donc clair que la déformation dépend du temps [3].

I.3 La déformation plastique

I.3.1 Introduction

L'une des raisons principales de l'emploi très généralisé des métaux est leur propriété d'être malléables, c'est-à-dire déformables sans rupture sous l'effet de sollicitations mécaniques plus ou moins élevées. L'aptitude des métaux à se déformer plastiquement dépend de beaucoup de facteurs qu'il est nécessaire de connaître en vue, d'une part, des opérations de mise en forme (travail à chaud ou à froid du métal) et, d'autre part, du calcul des pièces et des constructions, dans lesquelles on cherche au contraire à éviter toute déformation plastique dans les conditions de service.

I.4 définition

La déformation plastique du cristal se produit en raison du mouvement de défauts topologiques unidimensionnels, les dislocations. Ces perturbations unidimensionnelles de l'arrangement atomique permettent aux plans cristallins de glisser : comme un tapis qui se déplace par génération et propagation de plis (figure I.2), il est énergétiquement plus favorable que le cristal se déforme en générant des dislocations et puis les propager.

En fait, ce déplacement ne fait intervenir que quelques liaisons interatomiques à chaque étage et demande donc moins d'effort que le glissement instantané et rigide d'une moitié du cristal sur l'autre.

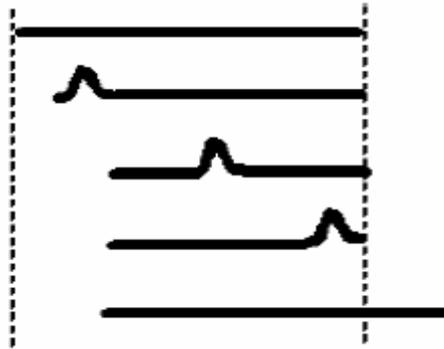


Figure I.2: La propagation d'un pli le long d'un tapis, un tapis, analogue au mouvement d'une dislocation coin [2].

Les dislocations sont en quelque sorte des vecteurs de déformation plastique : en se déplaçant, le cristal se déforme par cisaillement. La déformation fondamentale propagée lors du déplacement de la dislocation peut être représentée par un vecteur b appelé vecteur de Burgers. Si le vecteur de Burgers est perpendiculaire à la ligne de luxation on dit que la luxation est une luxation angulaire, s'il est parallèle on dit que c'est une luxation en vis, dans les autres cas c'est une luxation mixte. La figure II.3 illustre le déplacement des dislocations de bord dans un cristal. Lorsqu'une dislocation traverse le cristal de part en part, la partie inférieure de celui-ci glisse par rapport à la partie supérieure d'une distance b . Ainsi, lorsqu'une dislocation parcourt le cristal jusqu'à sa surface, elle y laisse un pas de hauteur b .



Figure I.3: Déplacement d'une dislocation coin dans un cristal [2].

La contrainte macroscopique nécessaire pour amorcer le mouvement général des dislocations est la limite d'élasticité. Cependant, le déplacement d'une dislocation dépend directement de la contrainte locale (résultat de la contrainte externe appliquée et des contraintes internes dues aux autres défauts du matériau) ainsi que de l'agitation thermique [5].

I.5 Les modes de déformation plastique

La déformation plastique des métaux et des alliages introduit dans les réseaux des défauts supplémentaires, des dislocations, des lacunes et éventuellement des macles. Le matériau écroui est caractérisé par une densité très élevée de dislocation [Simonnet, 1996]. Les déplacements relatifs des atomes sous l'effet des contraintes externes se font principalement par glissement ou par maclage selon le matériau et les conditions expérimentales de la déformation [Penelle, 1976] et [Mousy, 1990]. Ces deux derniers, étant les deux mécanismes essentiels de déformation plastique à froid auxquels on peut ajouter pour certains matériaux la transformation martensitique, qui résulte d'une modification de structure cristalline sous contrainte mécanique ou thermique [6].

I.6 Déformation par glissement

La possibilité de déformation plastique par glissement selon des plans et directions privilégiées est associée ; d'une part la forte densité atomique selon ces plans et ces directions, et d'autre part la présence de défauts dans le réseau cristallin.

Les défauts sont de diverses natures, à savoir :

- Les failles d'origine purement cristalline, où les atomes sont perdus ici et là (lacunes de Smekal), les régions intactes peuvent être exemptes d'atomes (failles de Griffith). Il peut y avoir des anomalies de distribution appelées : dislocations.

- Des défauts provoqués par des impuretés (inclusions) ou atomique (solution solide) [Roos, 1981]. A l'échelle microscopique, la déformation plastique à froid est due essentiellement au

mouvement des dislocations par glissement. Ce mode de déformation conduit à une modification de la forme des grains qui génère une structure fibreuse (figure I.4) [7].

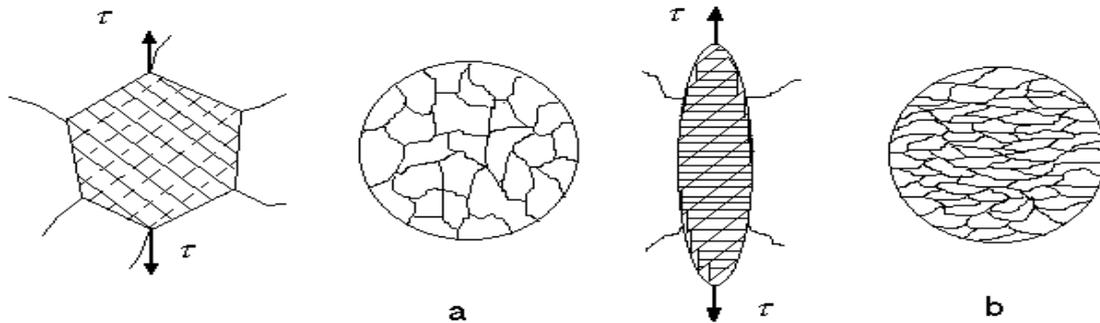


Figure I.4 : Modification de la forme d'un grain sous l'effet du glissement

a) avant déformation; b) après déformation [3].

I.7 Déformation par maclage

Le maclage est un mode de déformation beaucoup plus compliqué que le glissement. Dans ce cas, les atomes des matériaux se déplacent de telle manière que le réseau non transformé et le réseau maclé deviennent symétriques par rapport à un plan de macle (Tableau II.1). Les macles apparaissent comme un mode de déformation complémentaire de glissement et ce mode existe fréquemment dans les métaux c.c ($Fe\alpha$) à une température inférieure à la température ordinaire [1].

Tableau I.1: Les systèmes de maclage pour différentes structures [2].

Structure	Direction de macle	Plan de macle
c.f.c	$\langle 112 \rangle$	(111)
c.c	$\langle 111 \rangle$	(112)
h.c	$\langle 101 \rangle$	(1012)

La différence entre la déformation par maclage et par glissement, c'est que pour le glissement, les dislocations se propagent dans un même plan, par contre, le maclage exige la propagation d'une dislocation sur chaque plan successif. Il semble qu'il contribue plutôt au relâchement des contraintes engendrées par les hétérogénéités des déformations plastiques. Le maclage peut aussi contribuer à une rotation du cristal qui permet au glissement facile de se poursuivre [4].

I.8 Types de déformations

I.8.1 Déformation à froid

On appelle déformation à froid celle qui s'effectue aux températures inférieures à la température de recristallisation [6]. La déformation plastique à froid conduit à l'écrouissage du matériau, donc à son durcissement. Cet écrouissage dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En effet, la déformation à froid entraîne une importante augmentation de la densité de dislocations (i.e. énergie élastique stockée) dans le matériau. Il s'ensuit une hétérogénéité de la microstructure et de la texture cristallographique à l'intérieur des grains. Pour conférer au matériau les propriétés mécaniques souhaitées, celui-ci est recuit après déformation. Ce recuit conduit à une réorganisation de la microstructure par diminution ou suppression des obstacles les plus importants aux mouvements des dislocations. Lors du traitement thermique après déformation, deux phénomènes plus ou moins concurrents ont lieu : la restauration et la recristallisation. Ces deux types d'évolution structurale ont la même force motrice c'est-à-dire l'énergie élastique emmagasinée au cours de la déformation à froid [8].

Lors d'une déformation à froid, la microstructure évolue en fonction du taux de déformation. Au cours du premier stade de déformation, les grains se subdivisent, changent de forme et s'allongent selon la direction de sollicitation. Une sous-structure de dislocations apparaît à l'intérieur des grains, dépendant de leur orientation cristallographique [9,10].

La subdivision des grains donne lieu à une configuration cellulaire (blocs de cellules) constituée de "parois" à forte densité de dislocations entourant des volumes à faible densité de dislocations. Quand le taux de déformation augmente, les parois des cellules s'affinent pour former des sous joints (figure I.5). Cette transformation est accompagnée par une diminution de la taille des cellules [11,12] ainsi que par une augmentation progressive de leur désorientation (1° à environ 5°). Les joints de blocs des cellules sont identifiés comme étant des murs denses de dislocations (Dense Dislocations Walls DDW) [13,14]. Pour les fortes déformations, d'autres formes d'hétérogénéités apparaissent :

- Des microbandes constituées par des cellules de dislocations de taille plus faible que la valeur moyenne des cellules de dislocations au sein du même matériau.
- Des bandes de cisaillement, typiquement à 30 ou 40° de la direction de sollicitation, sous forme de longues bandes d'épaisseur $0,1$ à $2 \mu\text{m}$ et de longueur 10 à $100 \mu\text{m}$ [15].

La localisation de la déformation dans ces bandes est d'autant plus importante que la température et l'énergie de défauts d'empilement sont faibles.

- Des bandes de transition séparent des zones adjacentes fortement désorientées d'un même grain. Elles sont souvent parallèles à la direction de déformation principale et accommodent des désorientations supérieures à 20° sur des épaisseurs de 1 à 2 μm . La déformation plastique crée également une quantité importante de défauts ponctuels (lacunes et interstitiels), mais qui s'éliminent en grande partie soit pendant la déformation (restauration dynamique si $T \geq 0,2 T_f$), soit lors d'un recuit ultérieur même à basse température [8].

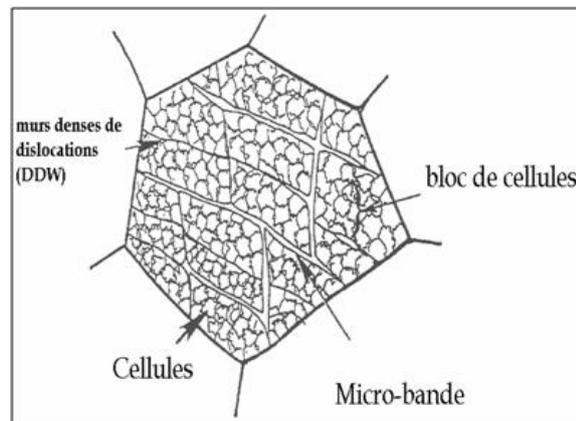


Figure I.5: Blocs de cellules et murs denses de dislocations [16].

I.8.2 Déformation à chaud

La déformation est dite à chaud si elle se fait à une température supérieure à celle de recristallisation, pour obtenir une structure complètement recristallisée. A ces températures, la déformation produit également un effet durcissant (écrouissage à chaud), éliminée partiellement ou complètement par polygonisation et recristallisation réalisées aux températures de traitement et suivis de refroidissement. A la différence d'une polygonisation et d'une recristallisation statique examinées dans ce qui précède, les processus de polygonisation et recristallisation associées à la déformation sont dits dynamiques. Dans le traitement à chaud (laminage, formage, forgeage, estampage, etc.), le durcissement par écrouissage (augmentation de la densité de dislocation) directement au cours de la déformation alterne avec le processus d'adoucissement (diminution de la densité de dislocation) par polygonisation et recristallisation dynamiques pendant la déformation et le refroidissement (figure I.6)[17].

Lorsque les degrés de déformation sont très faibles, le chauffage ne provoque pas de recristallisation. A la déformation de 3% à 15%, la grosseur de grain après recuit augmente brusquement et peut dépasser de nombreuse fois la dimension du grain initial. Ce niveau de déformation est dit critique ; il ne déclenche pas non plus le processus de recristallisation suivant le mécanisme de formation de nouveaux grains et de leur croissance. Lorsque le degré de déformation est élevé, la vitesse de germination produite par la recristallisation croît plus vite que la vitesse de croissance des grains ; il en résulte la formation des grains fins. Il convient de souligner que les limites entre la déformation à chaud et à froid sont conventionnelles et dépendent de la vitesse, du mode et de la température de traitement, des conditions de refroidissement, ainsi que de la vitesse de recristallisation du métal (alliage) [4].

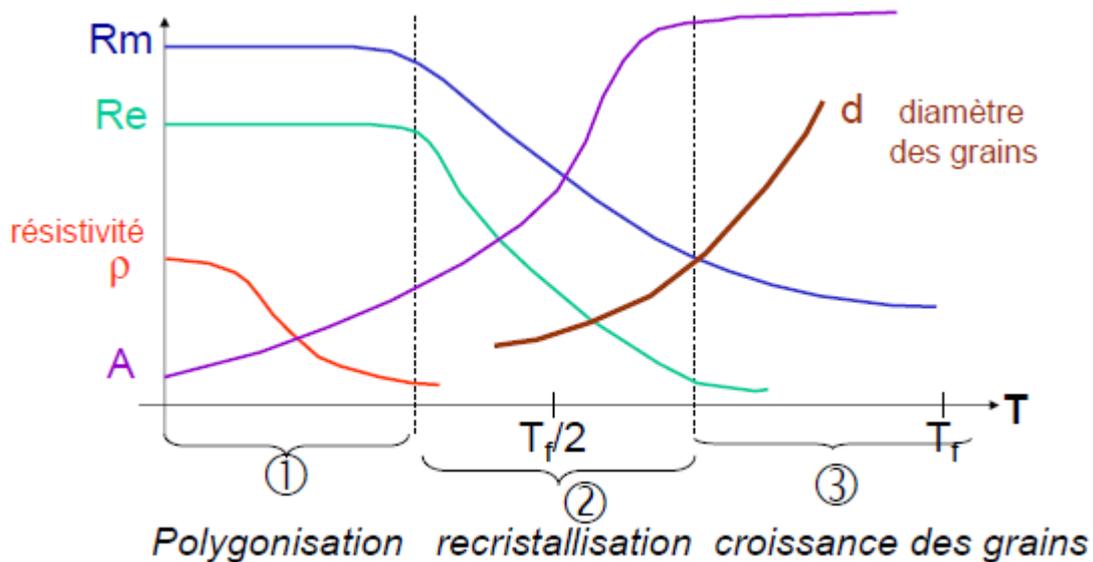


Figure I.6: Effets de la température sur la résistance, résistivité et taille de grain [7].

I.9 Chauffage

Afin de diminuer l'effort nécessaire à la mise en forme, il est nécessaire d'échauffer. On trouvera l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement du métal estampé. Mais au cours du chauffage, les lopins se revêtent d'une couche dure d'oxydes appelée couramment « calamine ». Après estampage, on constate que cette couche ne s'est pas comportée comme le métal de base. Elle est moins déformable. La calamine a toujours une épaisseur faible mais une structure et une morphologie complexes, comme le montre la figure I.7.

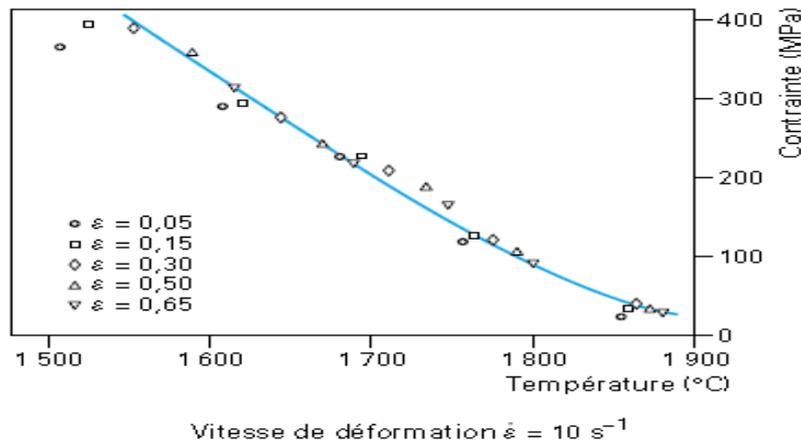


Figure I.7 : Évolution de la contrainte d'écoulement d'un acier en fonction de la température [18].

I.9.1 Différents modes de chauffage utilisés

I.9.1.1 Chauffage à la flamme

Les blocs sont généralement alignés sur la sole du four. Celui-ci est fixe ou mobile, à tour de rôle. La combustion du mélange air-gaz a lieu dans la chambre. L'autorégulation compense l'entrée de tracé à froid et la sortie de patch à chaud. Le temps de démarrage est généralement long : plusieurs heures, car les brûleurs doivent chauffer le four, et le four lui-même doit chauffer les grumeaux. Le rendement énergétique de ces fours s'est considérablement amélioré ces dernières années, mais reste toujours inférieur à 50 %. Le taux de chauffage est faible.

I.9.1.2 Chauffage électrique

➤ Par induction:

Il consiste (figure I.8), en l'utilisation d'une inductance d'un générateur G, à générer un champ magnétique alternatif sur une surface métallique traversant une bobine B, le courant chauffant la périphérie du plot. La chaleur ainsi créée se propage vers le centre du lopin C par conduction thermique. Ce procédé permet un chauffage rapide des lopins et limite l'épaisseur de calamine formée. Le bloc métallique passe devant l'inducteur le long de son axe longitudinal à une vitesse constante de 0,2 à 5 m/min. L'inductance est alimentée par le convertisseur de fréquence qui lui-même est alimenté par la MT/BT. Les onduleurs et thyristors d'aujourd'hui sont statiques. Ils sont refroidis par un circuit d'eau. La fréquence utilisée pour l'acier varie selon la section de l'ébauche : 2 000 à 10 000 Hz pour les diamètres inférieurs à 100 mm et 500 à 1 000 Hz pour les diamètres supérieurs à 100 mm. Le rendement

global des appareils de chauffage par induction varie entre 70% et 80%, selon le couplage entre la section inductrice et la section vrac.

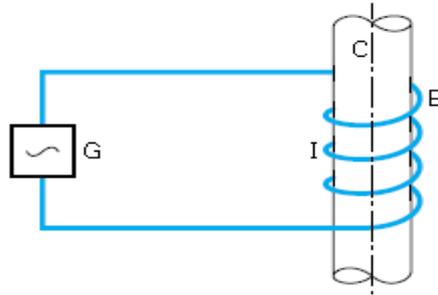


Figure I.8 : Principe du chauffage par induction (d'après EDF) [18].

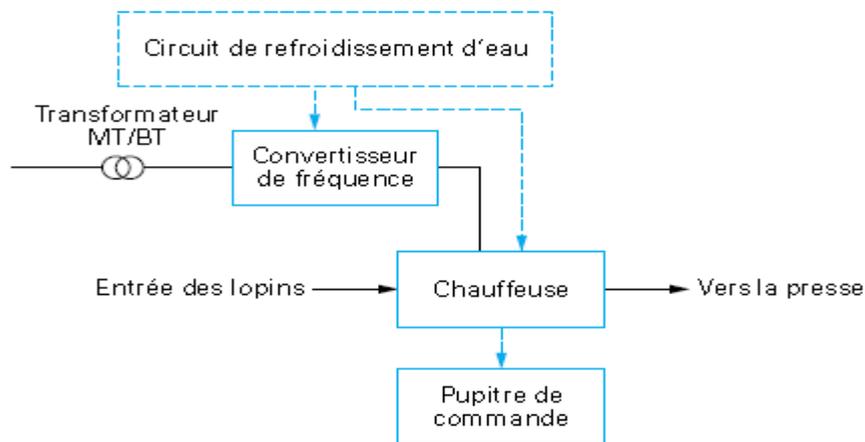


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse à induction (d'après EDF) [18].

➤ **Par conduction :**

Réchauffeurs par conduction de 10 à 1000 kVa avec travail plus professionnel. Ils sont limités à des parcelles très élancées Rapport diamètre/longueur élevé : supérieur à 8. Avec investissement Relativement faibles, ces matériaux permettent un chauffage plus rapide que les radiateurs à induction. Le principe du chauffage par conduction est l'effet Joule (figure II.10). La pièce à chauffer est placée entre deux électrodes. La chaleur qui en résulte, directement à l'intérieur de la parcelle, rend ce mode de chauffage très économe en énergie : presque 100 % efficace. Les radiateurs à conduction fonctionnent généralement à la fréquence du secteur. Schématiquement, ils comprennent : le transformateur BT/BT, le réchauffeur lui-même comprenant les électrodes d'alimentation en courant et le système de manipulation de la frite, le

système de refroidissement des électrodes et l'équipement de conditionnement (figure. II.11).

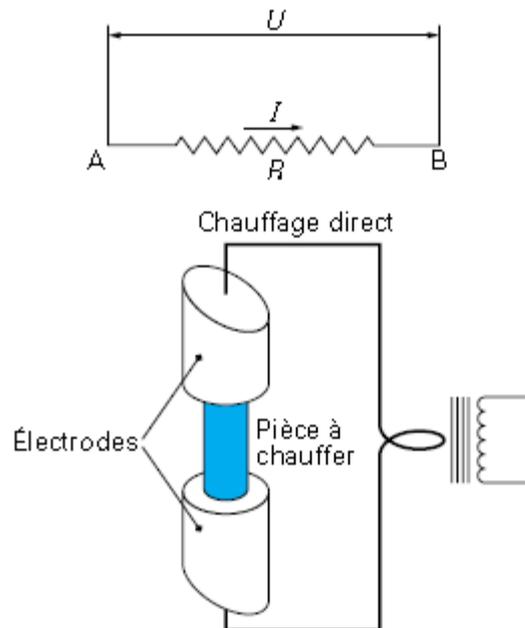


Figure II.10 : Principe du chauffage par conduction (D'après EDF) [18].

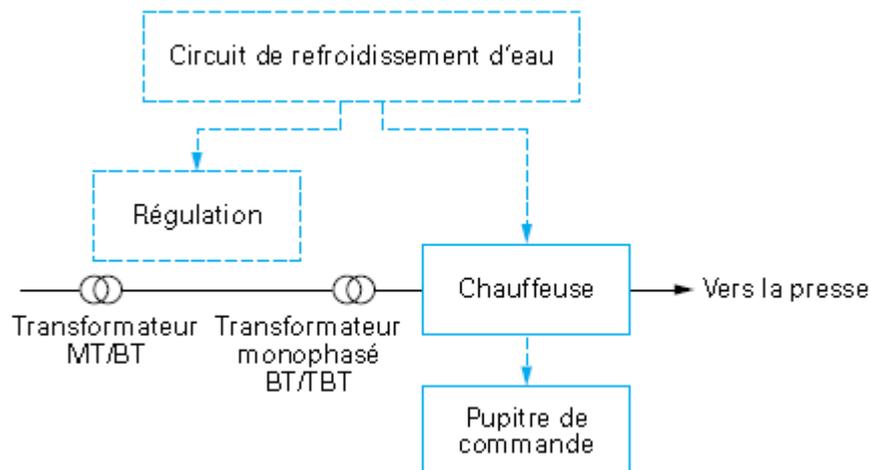


Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse à conduction (d'après EDF) [18].

I.10 Procédés de mise en forme des métaux

I.10.1 Introduction

Le formage par déformation plastique s'effectue à froid ou à chaud. Elle est étroitement liée au type cristallographique de l'alliage (la structure cubique face centrée offre le meilleur

alignement). Dans les matériaux poly cristallins, uniquement lorsque la contrainte ou la contrainte de déformation appliquée dépasse la limite d'élasticité du matériau.

I.10.2 Tréfilage

I.10.2.1 Principe

Le tréfilage est une technique utilisée dans le formage à froid des métaux pour réduire la section du fil par déformation plastique en tirant le fil à travers des trous calibrés d'une matrice sous traction et en présence d'un lubrifiant (figure I. 12).

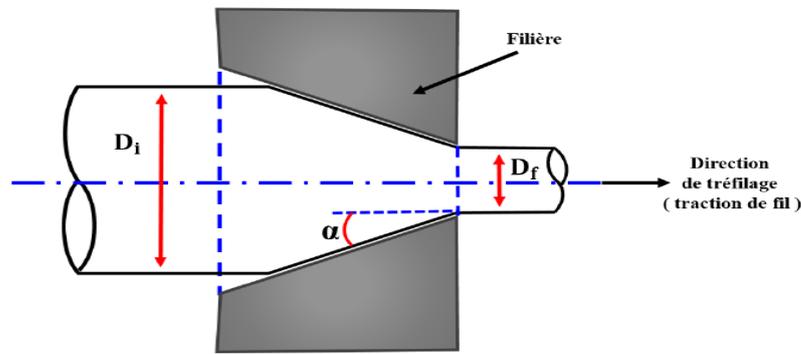


Figure I.12: Principe du tréfilage [5].

I.10.2.2 Texture de tréfilage

Au cours de la déformation plastique d'un matériau polycristallin, les grains subissent des rotations qui modifient leur orientation cristallographique. Ces rotations dépendent du mode de déformation imposé au matériau d'une part, et des systèmes de glissement activés dans chaque grain d'autre part. Ces changements d'orientation des grains génèrent dans le matériau la formation d'une texture de déformation. La texture de tréfilage est composée principalement de deux fibres $\langle 001 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ (où $\langle hkl \rangle$ sont les directions cristallographiques parallèles à l'axe du fil) [19,20]. Par ailleurs, un autre paramètre a été cité dans la littérature qui peut influencer les textures des fils tréfilés. Il s'agit de l'hétérogénéité de déformation dans la section du fil. En effet, les textures des fils tréfilés dépendent de la distance considérée par rapport au centre du fil. Le métal s'échauffe au cours du tréfilage et se restaure au moins partiellement [21]. Ces auteurs ont observé dans des fils tréfilés d'aluminium, un mélange de texture $\langle 001 \rangle$ (minoritaire) et $\langle 111 \rangle$ (majoritaire) au centre du fil, quel que soit le taux de réduction [17] (figure I.13).

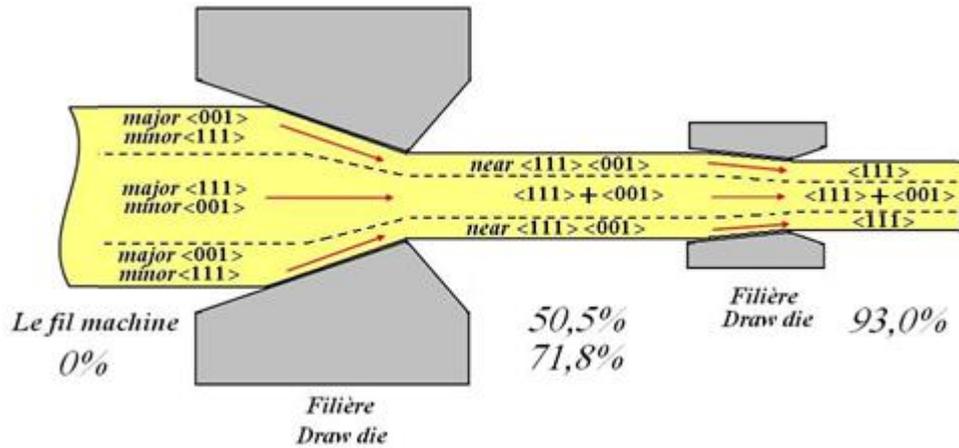


Figure I.13: Changement de texture au cours du tréfilage des fils d'aluminium de diamètre 9,5 mm. 15% de réduction à chaque passe à une vitesse de 20 m/min [22].

I.10.2.3 Outils et équipements industriels du tréfilage

Dans une machine à tréfiler multivoies (figure II.13) : Le fil est étiré entre chaque filière par un cône (cabestan) qui transmet l'effort nécessaire au tréfilage par friction. Les câbles, les lignes de vie et les treuils sont complètement immergés (ou pulvérisés) dans de l'huile ou des émulsions d'huile qui agissent comme des lubrifiants et des échangeurs de chaleur.

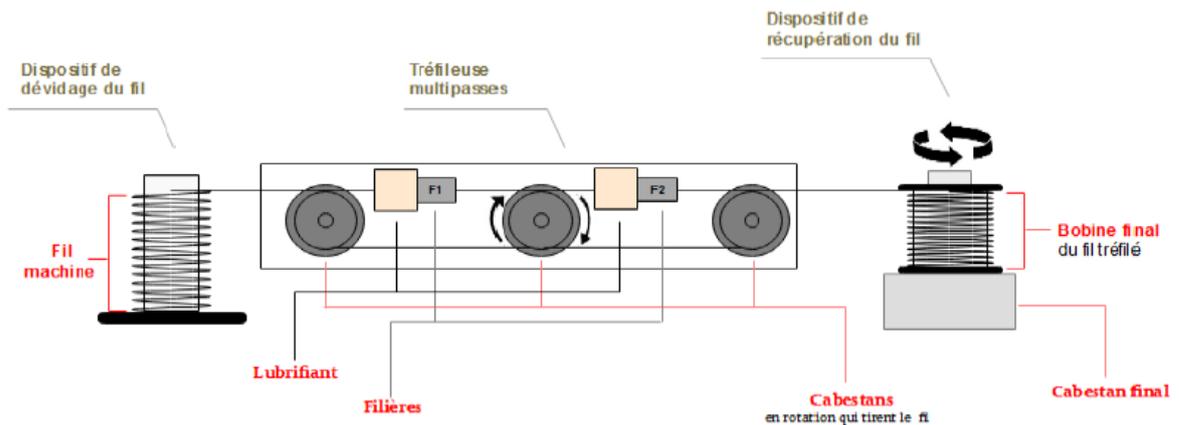


Figure I.13 : Tréfileuse multi passes [23].

Le fil passe à travers l'outil (filière) à l'entrée de la machine à tréfiler. A la sortie de la filière, le fil est enroulé autour d'un cabestan pour le tirer lorsque la traction requise à travers l'outil est atteinte, le fil est tendu et déplacé à la même vitesse que le cabestan, s'il n'est pas glissé.

I.10.3 La lubrification en tréfilage

La déformation continue du fil dans la filière de tréfilage nécessite l'utilisation d'un lubrifiant limitant les frottements fil/filière. Par conséquent, le lubrifiant a les effets suivants :

- Limiter l'effort à exercer pour obtenir la déformation du métal.
- Assurer un régime de lubrification stable.
- Eviter l'apparition de défauts en surface du fil [24].

Un bon lubrifiant de tréfilage doit donc posséder comme propriétés :

- Une viscosité suffisante.
- Une bonne résistance à la mise en pression.
- Une bonne résistance à la température.
- Une bonne résistance au cisaillement.
- Une bonne stabilité chimique dans le temps.

En pratique, selon les tréfileuses, le lubrifiant est soit une huile minérale pure, soit une graisse soluble [25].

I.10.4 Filière

Une filière de tréfilage est constituée d'un noyau dur en carbure de tungstène lié au cobalt assurant la réduction de section. Dans certains cas, pour limiter l'usure des filières et leur échauffement au passage du fil, des noyaux en diamant peuvent être utilisés. Une monture en acier ou en aluminium vient enserrer le noyau pour lui permettre de résister aux fortes pressions appliquées au cours du tréfilage [26].

Les paramètres géométriques de filière jouent un rôle primordial dans l'opération de tréfilage. La figure I.14 donne les éléments géométriques couramment utilisés dans le procédé de tréfilage et met en évidence trois zones principales :

- Zone I admission du lubrifiant ;
- Zone II cône de travail
- Zone III portée calibrant [27].

Globalement, la qualité du tréfilage dépend de plusieurs paramètres extrinsèques au matériau à tréfiler, nous citons entre autres : le demi angle du cône de travail (α), le taux de réduction la portée calibrant (P), le coefficient de frottement à l'interface fil – filière (μ) la contre traction (σ_b) due au cabestan de tirage précédent la contrainte de tréfilage (σ_f) [28].

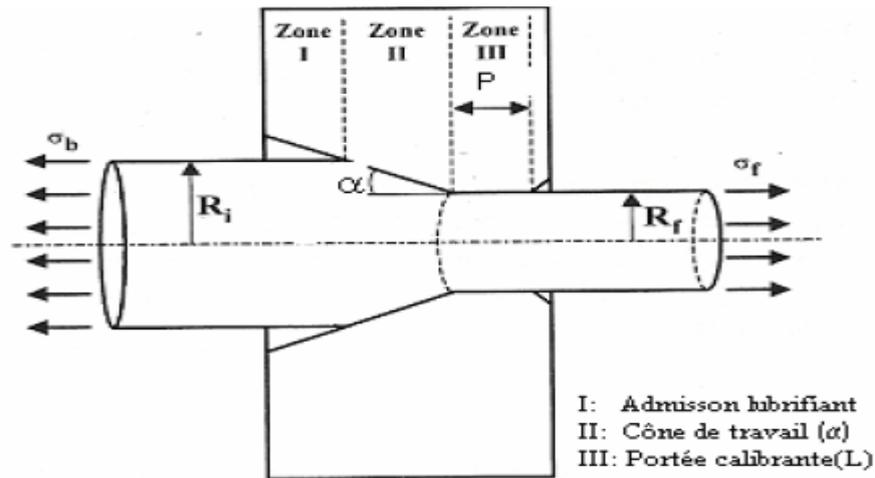


Figure I.14: Schématisation des zones de tréfilage d'éléments géométriques [29].

I.11 Emboutissage

I.11.1 Introduction

L'emboutissage est un procédé de formage de tôles par déformation plastique, qui permet la réalisation de produits aux formes plus ou moins complexes non développables. Une productivité élevée et une faible perte de matière en font un procédé particulièrement compétitif pour le moulage de composants automobiles structuraux ou cosmétiques, les emballages pour l'industrie de l'emballage, ou encore les appareils et appareils électriques.

I.11.2 Principe

Dans le cas de l'emboutissage à simple effet, un poinçon placé sur une presse applique une force ou un déplacement sur une feuille initialement plane (appelée aussi flan) jusqu'à ce que celle-ci prenne la forme imposée par la matrice. L'emboutissage double effet est plus couramment utilisé dans l'industrie pour reprendre l'outillage utilisé dans l'emboutissage simple effet en ajoutant un serre-flan afin que le serrage puisse être appliqué sur le bord de la tôle lors de l'opération de formage après positionnement du flan entre le poinçon et la matrice (figure I-15 (a)), la descente du serre-flan permet de maintenir et de serrer le pourtour de la tôle tout au long de l'opération de formage bénéficiant d'un contrôle précis de la pression appliquée (figure I-15(b)). Le déplacement du poinçon peut alors entraîner la tôle dans la matrice en lui imposant une déformation importante, au-delà de sa limite élastique. Cette étape s'accompagne du glissement de la feuille sur le porte-bord et les matrices.

La déformation irréversible qui en résulte rapproche la forme de la pièce du produit fini (figure I-15 (c)). Le soulèvement du poinçon et de l'anneau de reliure fait sortir la pièce et, après le retour élastique, la pièce prend sa forme finale (figure I-15 (d)).

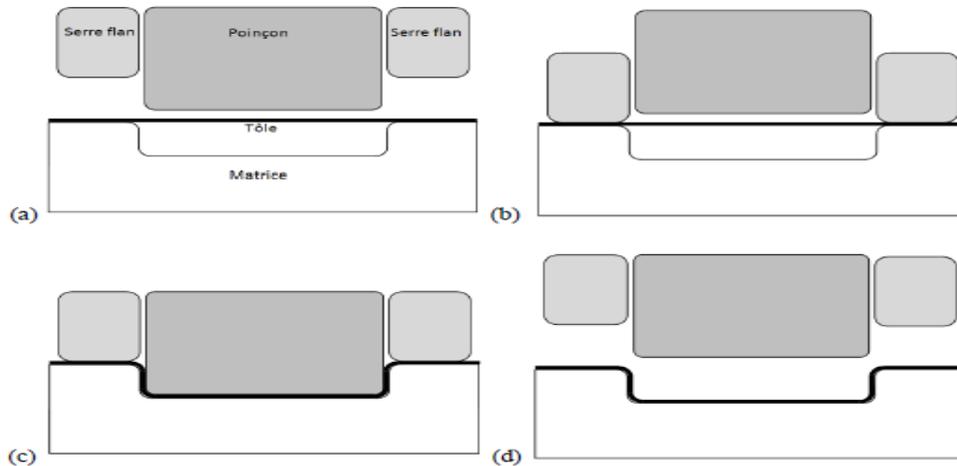


Figure I-15: Principales étapes d'une opération d'emboutissage. (a) Positionnement du flan, (b) serrage, (c) descente du poinçon et (d) remontée des outils mobiles. [30].

I.12 Estampage

I.12.1 Définition

-Est un façonnage par déformation plastique d'un morceau de métal (lopin) à l'aide d'outillage (matrice) permettant de lui donner une forme et des dimensions très proches de celles de la pièce finie.

I.12.2 Principe du procédé

Le processus d'estampage à chaud (figure I.16) consiste à utiliser une feuille composite à matrice thermoplastique préconsolidée, qui est placée sur une bande transporteuse, déplacée dans un four à infrarouge et chauffée au-dessus de la température de fusion de la matrice. Une fois la matrice en état fluide, la feuille est rapidement véhiculée sous la presse, rapidement formée et refroidie au contact du moule, la température de consigne est inférieure à la température de fusion de la matrice (La température du moule inférieur et du moule supérieur peut être différente).

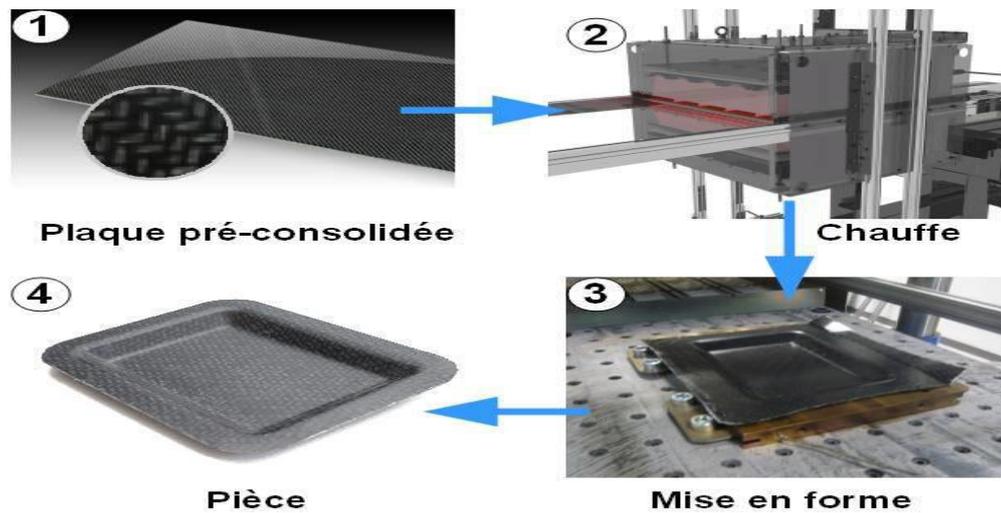


Figure I.16 : Schéma du procédé de thermo-estampage: 1) plaque pré-consolidée ; 2) chauffe dans le four ; 3) emboutissage du flan ; 4) pièce terminée [31].

I.13 Conclusion

Nous avons abordé d'une manière générale la déformation plastique, ainsi que les modes et types de ces déformations. Par la suite nous avons présenté les différents procédés de mise en forme des métaux.

Références bibliographiques

- [1] T. Richeton, Dynamique et complexité de la déformation plastique: étude par émission acoustique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG), (2006).
- [2] R. MAHFOUDI, Manel. "Étude de l'Effet de la Déformation à Froid sur les Propriétés Mécaniques des Fils tréfilés en Acier Perlitique, (2022).
- [3] J.P. Poirier, Plasticité à haute température des Solides cristallins, Ed. Eyrolles, Paris, (1976).
- [4] K. Mokrani, Microstructure et caractérisation d'un acier BS2, Mémoire de master, Université Mohamed Kheider Biskra, (2019).
- [5] T. Richeton, Dynamique et complexité de la déformation plastique: étude par émission acoustique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG), (2006).
- [6] I. Lakhtine, Métallographie et Traitements thermiques des métaux, 3^{ème} édition Mir, Moscou, (1982).
- [7] J.P. Bâillon, J. M. Dorlot, Propriétés Mécaniques des Matériaux, Presse internationale polytechnique, Montréal, (2010).
- [8] S. Jakani, Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé, thèse de doctorat, Université Paris sud-Orsay, (2004).
- [9] D.A. Hughes, Proceedings of the Sixteenth Riso International Symposium on Material Science, Edited by N. Hansen, D. Juul Jensen, Y.L. Liu, B. Ralph, Roskilde, Denmark, p. 63, (1995).
- [10] D.A. Hughes, N. Hansen, Materials Science and Technology, Vol.7, p. 544, (1991).
- [11] D.A. Hughes, Proceedings of the Sixteenth Riso International Symposium on Material Science 21, Edited by N. Hansen, D. Juul Jensen, Y.L. Liu, B. Ralph, Roskilde, Denmark, (2000).
- [12] M. Hatherly, A.S. Malin, Metals Tech., Vol. 6, p. 308, (1979).
- [13] N. Hansen, Materials Science and Technology, Vol. 6, p. 1039, (1990).
- [14] N. Hansen, Scripta Metallurgica and Materialia, Vol. 27, p. 1447, (1992).
- [15] R.D. Doherty, D.A. Hughes, F.J. Humphreys, current issues in recrystallization: a review, Materials Science and Engineering A, Vol. A238 p. 219, (1997).
- [16] B. Bay, N. Hansen, D.A Hughes, D. Kulhmann-Willsdorf, Acta Metallurgica and Materialia, Vol. 40, N°2, p. 205, (1992).

- [17] A. Diha, Etude du fluage des fils d'aluminium tréfilés, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [18] K. Boussaha, Fabrication D'un Moyeu De Roue Par Estampage. Université Badji Mokhtar Annaba,2018-2019.
- [19] I. L. Dillamore, W.T. Roberts, Metallurgical Reviews Vol. 10, p.22, (1965).
- [20] H. J. Shin, H.T. Joeng, D.N. Lee, Mater Sci, Eng, Vol, A279, p244 ,(2000).
- [21] C. J. Mc. Hargue, L. K. Jetter, J.C. Ogle, Transactions of the Metallurgical Society of A.I.M.E, Vol. 215, p 831, (1959).
- [22] S. Jakani, Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé, thèse de doctorat, Université Paris sud-Orsay, (2004).
- [23] G. Vega, Optimisation de la mise en forme par tréfilage: approche expérimentale, modélisation et simulation numérique (Doctoral dissertation, Lille 1 ,2009).
- [24] C. Levrau, Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec des savons secs (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris), (2006).
- [25] B. Beausir, Plasticité cristalline des matériaux hexagonaux sous cisaillement: application au Magnésium (Doctoral dissertation, éditeur non identifié), (2007).
- [26] A. Lamontagne, Etude des mécanismes physiques responsables des évolutions microstructurales des aciers perlitiques au cours du tréfilage et du vieillissement post-tréfilage (Doctoral dissertation, INSA de Lyon), (2014).
- [27] G. Vega et al, Comportement mécanique en grandes déformations : cas du tréfilage d'un cuivre, 9ième Congrès de Mécanique, F.S Semlalia, Marrakech.
- [28] J. P. YU, N., & LE ROY, Tréfilage des fils cuivreux ultra-fins. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, (M646), M646-1, (1995).
- [29] K. Lücke and M. Holscher, Textures and Microstructures, p.585, (1991).
- [30] G. Altmeyer, Modélisation théorique et numérique des critères d'instabilité plastique. Application à la prédiction des phénomènes de striction et de localisation lors d'opérations d'emboutissage doctorat, Arts et Métiers Paris Tech, (2011).
- [31] K. Le Meur, Etude du procédé d'estampage de plaques composites thermo-plastiques et recherche d'une méthodologie efficiente pour l'analyse de la faisabilité d'une pièce complexe (Doctoral dissertation, INSA de Lyon),(2015).

Chapitre II
Essais mécaniques

II.1 Introduction

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

- La forme de l'éprouvette dont le matériau est testé, c'est ce qu'on appelle un échantillon normalisé
- Comment la force est appliquée à l'échantillon, c'est ce qu'on appelle un test standardisé.

II.2 Essais de traction

II.2.1 Introduction

Les essais de traction consistent à soumettre une éprouvette à une force de traction et à mesurer la déformation résultante. Ainsi, la contrainte appliquée peut être liée à la déformation mesurée pour comprendre le module élastique, caractériser le comportement de la déformation plastique, mesurer la ductilité, la limite élastique, etc. Ces informations peuvent ensuite être liées à la structure du matériau. Afin de mieux comprendre les propriétés mécaniques des matériaux étudiés, des essais de traction ont été réalisés.

L'essai de traction est effectué afin de déterminer sa limite élastique R_e (N/mm^2), sa résistance à la rupture R_f (N/mm^2) et son allongement A (%).

II.2.2 Principe d'essai de traction

Les essais ont été effectués sur une machine de traction (figure II.1) en augmentant lentement et progressivement la tension entre les mâchoires de la machine de traction, variant en force de 0 à F . L'équipement adapté à la machine peut mesurer à chaque endroit Contrainte ou charge de traction (à l'aide d'un dynamomètre) et allongement de l'éprouvette (à l'aide d'un extensomètre).

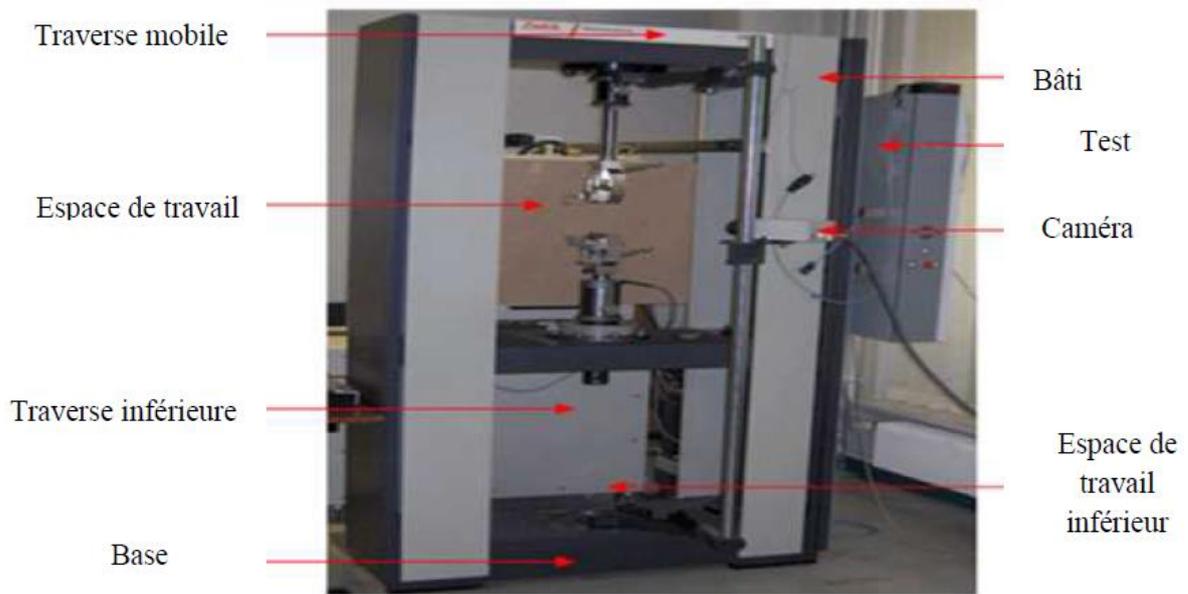


Figure II.1: Machine d'essai de traction [1].

II.2.3 Contraintes et déformations

- **a) Contrainte :** est la charge rapportée (F) à la section initiale (S_0). La contrainte conventionnelle (Nominale) se note σ , par définition :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{II.1})$$

- **b) Déformation conventionnelle :** est l'allongement absolu (Δl) rapporté à la longueur initiale (l_0). La déformation conventionnelle se note (ε). Par définition :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{II.2})$$

II.2.4 Courbe contrainte-déformation

Rappelons que la courbe charge-déplacement de traction $F = f(\Delta l)$, où $\Delta l = l - l_0$ est l'allongement absolu de l'éprouvette après application de la charge (F), est une propriété de l'éprouvette. Ceci peut être modifié pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'échantillon. Par conséquent, nous obtenons $\sigma = f(\varepsilon)$ [courbe contrainte-déformation].

À titre d'exemple, la figure II.2 représente la courbe de traction d'un métal à comportement ductile. Une courbe de traction de ce type permet de déterminer les caractéristiques mécaniques essentielles.

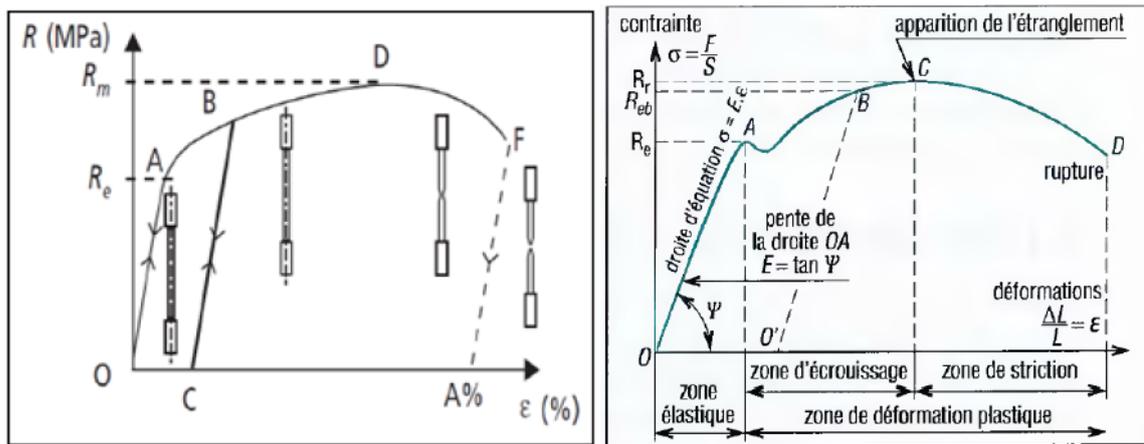


Figure II.2: Courbes conventionnelles typiques de traction avec les étapes d'endommagement d'éprouvette [2 ,3].

OA : allongement élastique linéaire, réversible.

AD : allongement élastique plus allongement plastique permanente réparti. La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent

(**OC**). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (**CB**).

DF: apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles.

En **F** : la rupture de l'éprouvette

Re: limite d'élasticité (MPa)

Rm: résistance à la traction (MPa)

Rp0,2 ou **Re0,2**: limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% d'allongement plastique (MPa) La limite élastique, notée Re0,2 correspond au point où le comportement cesse d'être élastique pour devenir plastique. Pour certains matériaux, le passage d'une zone à l'autre pouvant être progressif (figure II.3), il est nécessaire de définir un critère permettant de fixer tout de même une valeur de Re. Ainsi on choisit souvent Re0,2 qui correspond après décharge à un allongement plastique (ou rémanent) de 0,2%. On définit des limites conventionnelles à 0,2% ; 0,1 % ; 0,02 % ou 0,01 %.

A% : allongement pourcent après rupture (%)

Z%: coefficient de striction (%)

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \tag{II.3}$$

$$R_e = \frac{Fm}{S_0} \quad (\text{II.4})$$

$$A\% = \frac{Lu - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

$$Z\% = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \quad (\text{II.6})$$

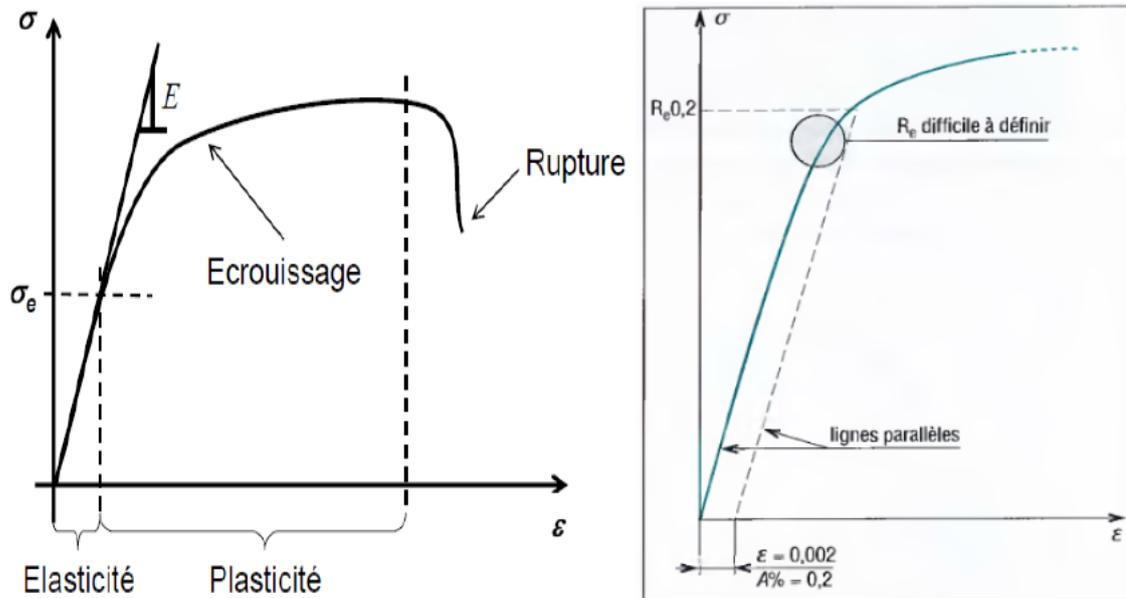


Figure II.3: Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et $R_{p0.2}$ [4].

Des courbes conventionnelles ont ainsi été obtenues en enregistrant F et ΔL pendant les essais en rapportant la force à la pièce initiale pour déduire de la contrainte et de l'allongement à la longueur initiale pour déduire l'allongement relatif. On obtient ainsi une courbe indépendante de la taille de l'échantillon utilisé.

➤ Les caractéristiques en rapport avec l'essai de traction

En utilisant les résultats des courbes de traction on peut mieux comprendre les caractéristiques, [9].

- ❖ **La rigidité :** Est une propriété importante qui dépend des énergies de liaison entre les atomes qui composent le matériau métallique. La rigidité est principalement mesurée par le module de Young (E). Plus le module d'élasticité est élevé, plus le matériau est dur.
- ❖ **La résistance:** Indique la contrainte maximale (R_m) qu'un matériau peut supporter avant de se rompre (fissures). Cette résistance dépend de la solidité de la liaison (force

du joint, force de liaison), mais aussi de la forme de la pièce et des imperfections du matériau et de l'éprouvette.

- ❖ **La ductilité** : est la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. La ductilité est directement proportionnelle à l'allongement (A%).

A l'inverse, lorsque l'ensemble est très faible ou nul, on parle alors de matériau fragile. Les matériaux fragiles peuvent avoir une résistance très élevée.

Si $A\% \geq 5\%$ les matériaux sont considérés comme ductiles.

Si $A\% < 5\%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou cassants.

- ❖ **La Malléabilité**: c'est la propriété physique de pouvoir subir des déformations plastiques sans se fissurer.
- ❖ **La ténacité**: fait référence à l'énergie absorbée par un matériau lorsqu'il se brise. Cela montre qu'il peut résister à la propagation soudaine des fissures. Sa valeur est égale à la surface sous la courbe de traction. Cette propriété est plus importante pour les matériaux en céramique

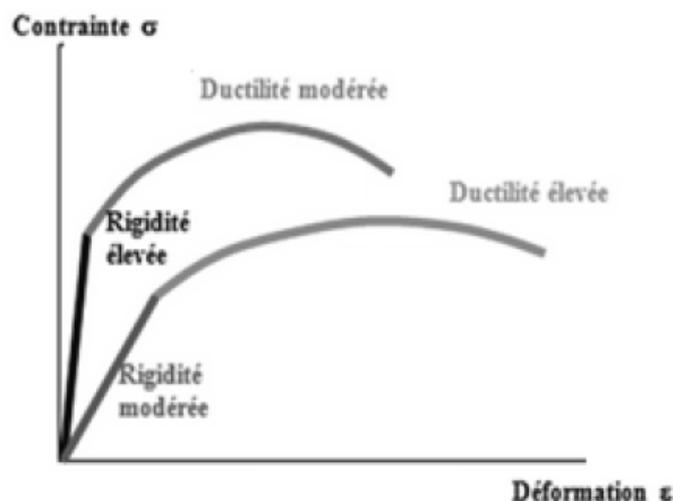


Figure II.4 : Rigidité et ductilité des matériaux [4].

II.2.5 Caractéristiques mécaniques des métaux en traction

Un métal tendre verra sa surface marquée par un choc, alors qu'un métal dur ne laissera pas apparaître de traces ; l'élasticité : elle comprend non seulement la capacité d'un métal à se déformer sous la traction puis à reprendre sa forme d'origine, mais aussi sa résistance à la traction avant de casser.

II.2.6 Déformation plastique

Est une déformation qui est permanente ou irréversible après la suppression de la charge appliquée et qui s'accompagne de déplacement des atomes permanents.

II.2.7 Loi de Hook

Pour la plupart des métaux soumis à des contraintes de traction relativement faibles, la contrainte et la déformation sont proportionnelles selon la relation suivante :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{II.7})$$

Cette égalité est appelée *loi de Hook* et la constante de proportionnalité E (GPa) est appelée *Module d'élasticité, ou Module de Young*.

II.2.8 Module d'élasticité

Le module d'élasticité E ou module de Young donné par la pente de la partie élastique de la courbe contrainte σ – déformation ε (figure II.4). Ce module élastique est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou molécules constituant le matériau. On peut considérer que ce module est la rigidité ou la résistance à la déformation élastique d'un matériau.

II.2.9 Limite de proportionnalité

Correspond à la fin du domaine proportionnel, on peut écrire la limite proportionnelle comme suite :

$$\sigma = \frac{F_{pr}}{S_0} \quad (\text{II.8})$$

II.2.10 La limite d'élasticité

Correspond le point B (figure II.2), qui donne la valeur de la contrainte nominale à partir de laquelle le matériau commence à se déformer d'une façon irréversible. On peut écrire la limite d'élasticité comme suite :

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{II.9})$$

II.2.11 La limite d'écoulement

Représenté par le segment horizontal, appelé aussi le palier d'écoulement. La limite d'écoulement est la contrainte à partir de laquelle la déformation croît sans accroissement notable de la charge.

$$\sigma_{ec} = \frac{F_{ec}}{S_0} \quad (\text{II.10})$$

II.2.12 La résistance à la traction

Correspond le point D de la courbe contrainte-déformation (figure II.2) qui est définie par la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (\text{II.11})$$

II.2.13 La contrainte à la rupture

Correspond le point E de la courbe contrainte-déformation (figure II.2) qui est définie par la contrainte à la rupture de l'éprouvette.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (\text{II.12})$$

II.3 Essais de dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées duromètres, a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure. Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension. Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell.

II.3.1 Machines d'essai et éprouvettes

-L'appareil choisit la dureté (figure. II.5). Les éprouvettes peuvent être constituées de différents métaux, alliages et formes de carrés différents, de rayons différents (10, 15, 20, 25, 30 mm), d'une hauteur d'au moins 15 mm afin qu'elles puissent être tenues par les

doigts. La surface de l'éprouvette doit être polie et nettoyée avant de pouvoir être utilisée dans le testeur de dureté.

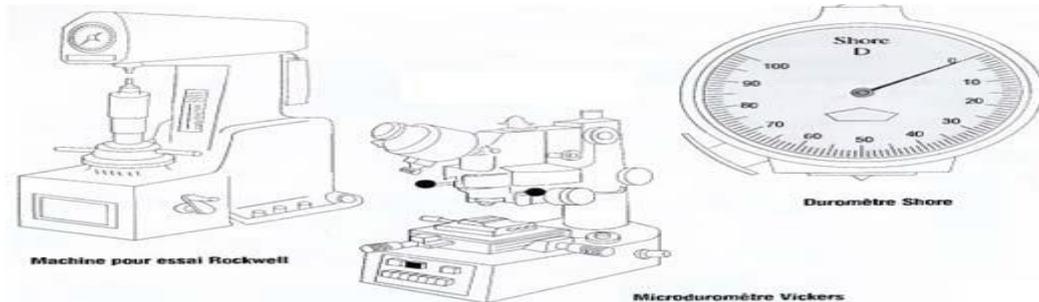


Figure II.5: Dispositif pour l'essai de dureté [2].

II.3.2 Essai de dureté Brinell

Principe d'essai de Brinell : L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à essayer un pénétrateur, en forme de bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D , sous une charge F bien déterminée, et à mesurer sur l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, deux diamètres d_1 et d_2 à 90° l'un de l'autre (figure. II.6). La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement.

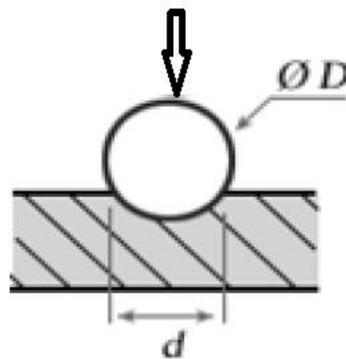


Figure II.6: Principe d'essai de Brinell [5].

HB = Dureté Brinell.

F = Force appliquée [N]

D = Diamètre de la bille (mm)

d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille (mm)

g: Accélération de pesanteur ($g=9,80665\text{m/s}^2$)

$$HB = \frac{2F}{g\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad HB = \frac{0.102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{et} \quad HB = \frac{0.0649F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.13})$$

II.3.2 .1 Le matériau à tester

La surface doit être plane et nettoyée (sans lubrifiant, oxyde ou calamine). Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante afin que la pénétration de la bille ne déforme pas le matériau. Dans le cas contraire, la mesure ne serait pas fiable. Il faut une épaisseur d'au moins huit fois la profondeur h de l'empreinte.

II.4 Variante: Essai de dureté Meyer

Le pénétrateur est identique au pénétrateur de la dureté Brinell. D'une manière plus générale, on utilise le même duromètre que celui utilisé pour la dureté Brinell. La mesure est effectuée avec les mêmes principes que la dureté Brinell. Les valeurs de dureté Meyer sont calculées avec la formule suivante :

$$HM = 0.102 \frac{4F}{\pi d^2} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : Constante} = \frac{1}{g} = \frac{1}{8.8066} = 0.102$$

II.5 Essai de dureté Rockwell

Le test de dureté Rockwell est un test de pénétration. Il existe en fait plusieurs cartouches perforantes fabriquées à partir de cônes de diamant ou de billes d'acier trempé polies. Pour obtenir la valeur de dureté Rockwell, la pénétration résiduelle d'un pénétrateur avec une petite charge appliquée est mesurée.

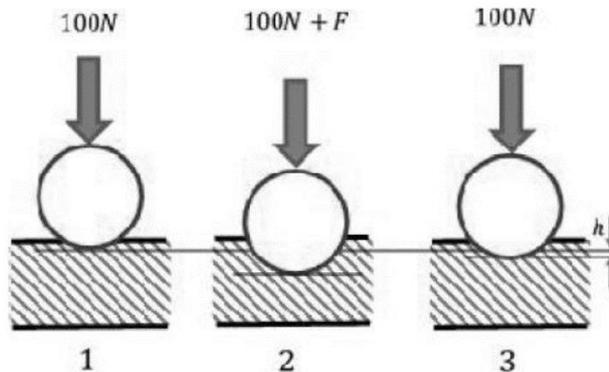


Figure. II.7 : Principe de la Rockwell [5].

L'essai se déroule en trois phases :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell.
- Application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P .
- Relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de r étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1 .

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

Échelle B, E et F

$$\text{HRB} = 130 - r$$

Échelle C

$$\text{HRC} = 100 - r$$

Conditions d'essai

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de 0,002 mm.

II.5.1 Les différentes échelles

Le tableau II.1, indique les différentes échelles de dureté Rockwell en fonction des types de pénétration et des charges F .

Tableau II.1: Différentes échelles de dureté Rockwell [6].

Échelle	Symbole	Pénétrateur	Valeur de la force totale F0 + F1 (N)	Application
A	HRA	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	588.6	Carbure, acier et en épaisseur mince
B	HRB	Bille d'acier de 1,588 mm (1/16 de pouce) de diamètre	981	Alliage de cuivre, acier doux, alliage d'aluminium Matériaux ayant une résistance à la rupture comprise entre 340 et 1000 MPa
C	HRC	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	1471.5	Acier, fonte, titane Matériau ayant une dureté résistance à la rupture supérieure à 1000 MPa
D	HRD	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	981	
E	HRE	Bille d'acier de 3,175 mm (1/8 pouce) de diamètre	981	Fonte, alliage d'aluminium et de fonte
F	HRF	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	588.6	Alliage de cuivre recuit, fine tôle de métal.
G	HRG	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	1471.5	Cupro-nickel, alliage cuivre-nickel-zinc

Remarque : Les deux échelles les plus utilisées sont les échelles B et C.

II.6 Dureté Rockwell superficielle

Ces balances sont utilisées pour les produits très fins et pour mesurer la dureté des revêtements. Les deux échelles utilisées sont les échelles N (cône de diamant) et T (bille d'acier). Dans les deux cas, la charge initiale (F_0) était de 29,4 N. Chaque balance peut être utilisée avec une charge totale de 147 N, 294 N ou 441 N. Il existe également des échelles pour W (boule de 3,175 mm de diamètre), X (boule de 6,350 de diamètre) et Y (boule de 12,70 mm de diamètre). Dans ce cas, une unité de dureté Rockwell correspond à une dépression de 0,001 mm.

Pour les échelles N et T, la dureté est donnée par la formule :

Tableau II.2: Compatibilité des unités de dureté Rockwell pour les échelles N et T [7].

Échelle	Symbole	Pénétrateur	Valeur de la force totale $F_0 + F_1$ (N)
N	HR15N	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	15
N	HR30N	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	30
N	HR45N	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	45
T	HR15T	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	15
T	HR30T	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	30
T	HR45T	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	45
T	HR15Y	Bille d'acier de 12,7 mm de diamètre, utilisée principalement pour les revêtements de type abrasables	147

II.7 Essai de dureté Vickers

II.7.1 Principe

Principe de la dureté Vickers La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à

l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

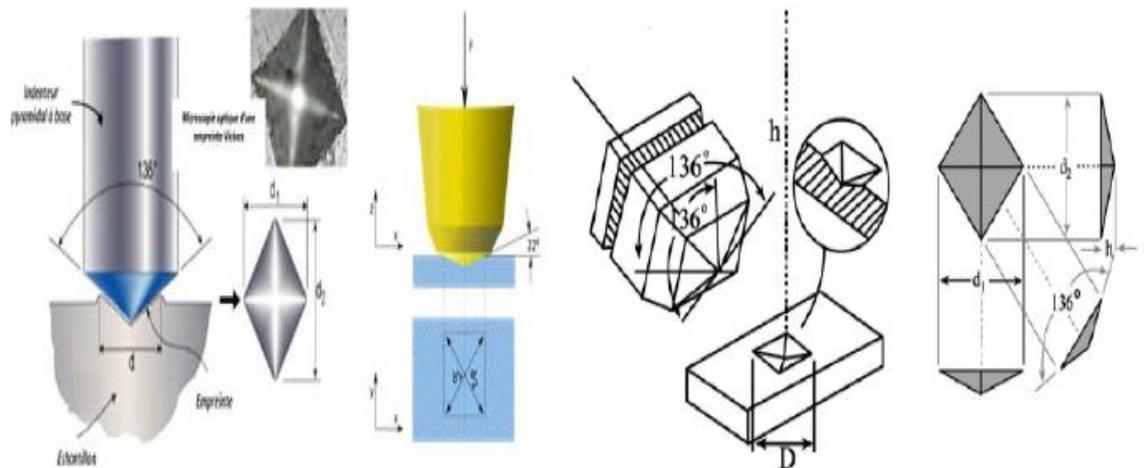


Figure. II.8 : Principe d'essai de dureté Vickers [8].

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d} \quad \text{Avec : } d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{II.15})$$

HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée (N)

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)

Le degré de dureté, noté H_v , est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

Norme Européenne pour la dureté Vickers:

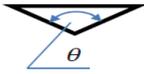
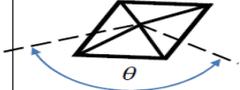
- EN ISO 6507-1 - Essai de dureté Vickers - Méthode d'essai
- EN ISO 6507-2 - Essai de dureté Vickers - Entretien de l'équipement

Tableau II.3: Comparaison entre les méthodes par pénétration [4].

Type d'essai	Préparation de la pièce	Utilisation Principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage ou meulage).	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes.
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre OO par exemple). La présence de rayures donne des valeurs sous estimées.	En atelier	L'essai est simple et rapide. Convient bien pour des duretés plus élevées (supérieures à 400 Brinell). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces (il est nécessaire que la pièce soit parfaitement stable). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.
Vickers	État de surface très soigné (on obtient de petites empreintes, la présence d'irrégularité gêne la lecture).	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces de petites dimensions.

II.8 Différentes méthodes d'essai de dureté

Tableau II.4: Différentes méthodes d'essai de dureté [5].

Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	diamant
Forme	sphère	cône	Sphère	Pyramide à base carrée
Dimensions	 D=10mm ; 5mm ; 2,5 mm ; 1mm.	 $\theta = 120^\circ$	 D=1,587 mm D=3,175 mm	 $\theta = 136^\circ$

II.9 Mesure de microdureté

Faits sous très faible charge, les essais de microdureté permettent des mesures très localisées (sur environ $100 \mu\text{m}^2$).

À l'aide d'un microduromètre, on peut par exemple déterminer la dureté d'une phase donnée dans un échantillon polyphasé ou celle d'un échantillon très fragile et mince. Correspondant au diamant qui ne peut être rayé que par un autre diamant.

II.10 Essai de dureté Knoop

L'essai dureté Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique. La forme du pénétrateur en diamant est pyramidale avec une surface inférieure rectangulaire, l'angle entre deux surfaces opposées est de $172^\circ 30'$ et l'angle entre les deux autres surfaces est de 130° . Les forces appliquées sont inférieures à 1 kgf. Le pénétrateur laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0,01 et 0,1 mm ($D = 7d$ et $H = \frac{D}{30}$), [15,17].

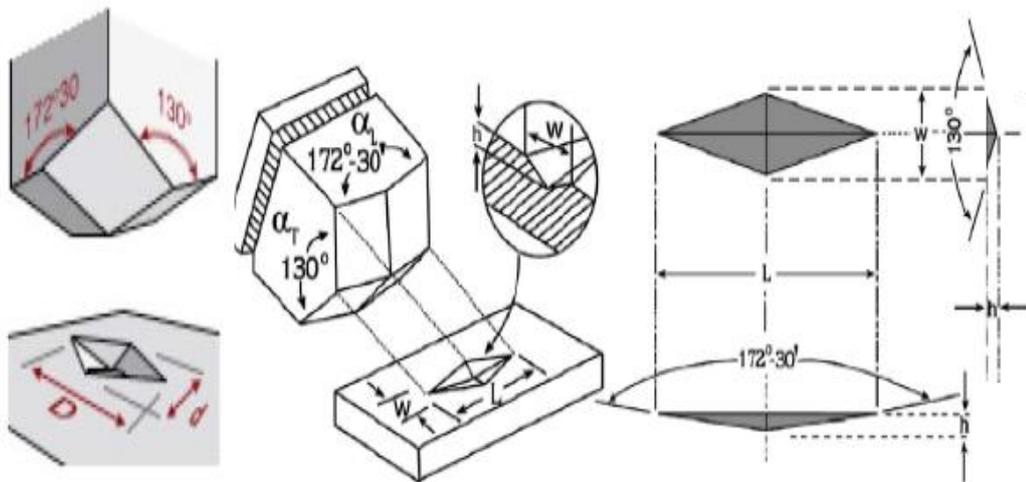


Figure. II.9: Schéma de principe d'un essai de dureté Knoop [7].

II.11 Essai de Résilience

II.11.1 Principe

L'élasticité, généralement symbolisée par K , indique la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Ce risque est amplifié à basse température. Elle est mesurée sur des machines de type Charpy (éprouvette sur deux supports) ou Izod (éprouvette enfoncée) (figure. II.10).

Le test est un test de comparaison entre matériaux, mesurant l'énergie qui doit être fournie à un re-swing pour casser un échantillon entaillé du matériau testé.

L'énergie (W) absorbée par l'échantillon est égale à la différence d'énergie potentielle du pendule entre le début ($W_0 = P.h_0$) et la fin ($W_1 = P.h_1$) :

$$W = P.h_0 - P.h_1 = P (h_0 - h_1) \quad (\text{II.16})$$

La résilience est égale au rapport de W à la section transversale du côté droit de l'encoche.

Deux cas :

$$K_{cu} \text{ ou } K_{cv} = \frac{w_0 - w_1}{s_0} \quad (\text{II.17})$$

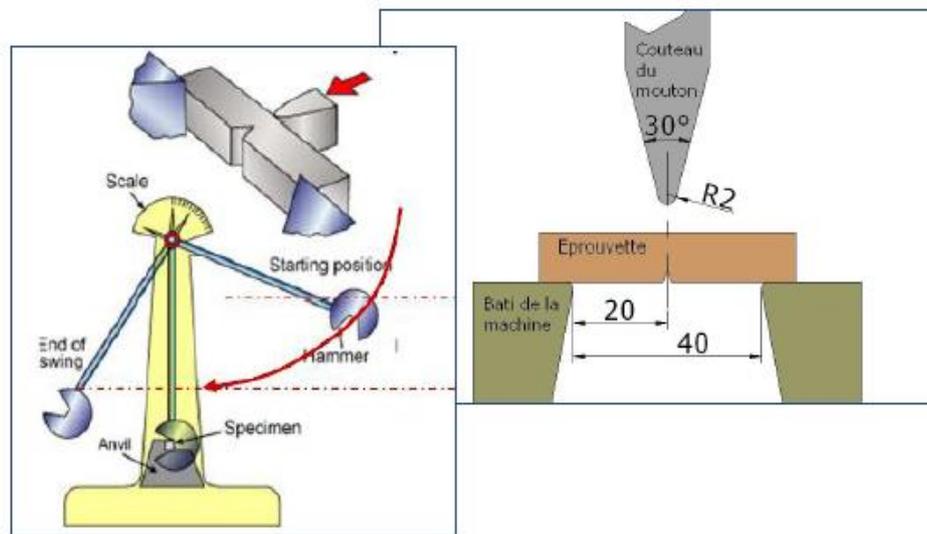


Figure II.10: Principe de l'essai de résilience et du montage de l'éprouvette [4].

II.11.2 Machine de l'essai

Le pendule Charpy permet des essais d'impact avec une capacité utile jusqu'à 750 J selon les versions. Ce test détermine l'énergie absorbée par un échantillon entaillé lors de la rupture. Le pendule se compose d'une pièce en fonte (appelée base) avec deux porte-échantillons, un pendule à bras oscillants, un système de levage à poussoir électrique et un mécanisme de déclenchement. Un affichage numérique permet de lire l'énergie absorbée par l'échantillon testé, ainsi qu'un frein qui ralentit rapidement les oscillations. L'équipement est disponible en différentes versions (ex : 150 Joules à 750 Joules) et est équipé de différents couteaux d'impact pour répondre à des normes strictes. L'étui de protection assure la sécurité.

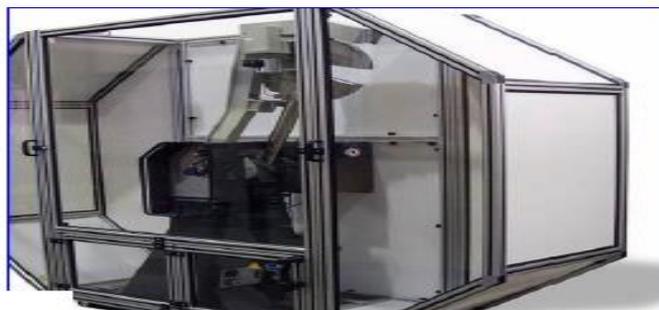


Figure II.11: Machine de l'essai de Résilience [9].

II.12 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons entamé, l'étude de principe de différents essais mécaniques tel que l'essai de traction, dureté et résilience. A travers ces essais nous avons déterminé les propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux (la résistance maximale, résistance à la pénétration, résistance aux chocs).

Références bibliographiques

- [1] M. Rassoul, L., & Ferhi, Etude, conception et fabrication d'un dispositif d'essais en traction biaxiale sur des éprouvettes cruciformes (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou). (2016).
- [2] J.L Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles: Dessins industriels et graphes, Matériaux, Eléments de construction, Économie et organisation d'entreprise, Automatismes, Automatique. AFNOR.NATHAN, (2001).
- [3] D. Michel, Aide-mémoire science des matériaux. DUNOD. Paris, (2005).
- [4] B. R. E. K Samir, Comportement Mécanique des Matériaux Métalliques (cours et exercices), (2021).
- [5] A. Tahar, Département Hydraulique Faculté de technologie 2eme Année Licence, (2020).
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_(mat%C3%A9riau)).
- [7] H. Güder, H., Şahin, E., Şahin, O., Göçmez, H., Duran, C., & Ali Çetinkara, Vickers and Knoop indentation microhardness study of β -SiAlON ceramic. Acta Physica Polonica A, 120(6), 1026-1033, (2011).
- [8] H. Güder, H., Şahin, E., Şahin, O., Göçmez, H., Duran, C., & Ali Çetinkara, Vickers and Knoop indentation microhardness study of β -SiAlON ceramic. Acta Physica Polonica A, 120(6), 1026-1033,(2011).
- [9] J. L. Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles Nathan, (2013).
- [10] G. Altmeyer, Modélisation théorique et numérique des critères d'instabilité plastique. Application à la prédiction des phénomènes de striction et de localisation lors d'opérations d'emboutissage (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech), (2011).

Chapitre III
Matériau étudié et techniques
expérimentales

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter des méthodes expérimentales permettant de déterminer d'une part les propriétés mécaniques des matériaux, comme les essais de traction et les essais de dureté, afin de pouvoir apporter des informations souvent complémentaires aux résultats produits par les techniques précédentes. Le matériel étudié dans ce mémoire est fabriqué par la société des industries du câble de Biskra (EN.I.CA. B), qui dispose d'un atelier de câblage destiné à la production de fils nus et de câbles basse tension. L'entreprise produit des fils de cuivre, d'aluminium et d'alliages d'aluminium de différents diamètres avec de bonnes propriétés mécaniques et électriques et certifiés selon les normes ISO.

III.2 Procédé de tréfilage

Le tréfilage est la réduction progressive de la section de fil façonné à froid par le passage du fil à travers des filières de diamètres décroissants.

Il utilise principalement la déformation plastique pour la réduction du fil [1].



Figure III.1: Tréfileuse horizontale de type DZWG1250/10 ,1.

III.3 Matériau étudié

Le matériau que nous avons étudié était du fil d'aluminium tréfilé avec un taux de réduction (ϵ %) de 65.26 ; 53.68 et 30.52 %, calculé selon l'équation III.1, à partir d'un fil machine de diamètre 9,5 mm (tableau III.1).

Les caractéristiques physiques et composition chimique représentées respectivement dans les tableaux III.2 et III.3.

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

ε : taux de réduction en %.

S_0 : section initial du fil machine en mm^2 .

S : section du fil tréfilé en mm^2 .

Tableau III.1 : Valeurs des taux de réduction.

Diamètre du fil (mm)	ε (%)
3.3	65.26
4.4	53.68
6.6	65.26

Tableau III.2: Caractéristiques physiques du fil d'aluminium [2].

Diamètre du fil machine (mm)	Rm (MPa)	A (%)	Conductibilité électrique $\text{m}^{-1} \cdot \text{mm} (20^\circ\text{c})$
9.5 ± 0.5	70-90	18	35.7

Tableau III.3 : Composition chimique du fil d'aluminium (composition massique %) [2].

Al	Cu	Fe	Si	Zn	Cr+Mn+Ti+V	Autre
99.5	0.01	0.2	0.08	0.05	0.01	0.02

III.3.1 Eprouvettes de traction et de dureté

III. 3.1.1 Eprouvettes de traction

L'éprouvette est obtenue par un prélèvement d'un fil machine d'aluminium de diamètre 9.5 mm et des fils d'aluminium tréfilés de diamètres respectivement 3,3; 4,4 et 6.6 mm ayant une longueur totale L_t de 250 mm et de longueur initiale de jauge L_0 de 80 mm (figure III.2).



Figure III.2: Eprouvettes des fils d'aluminium tréfilés.

III.3.1.2 Eprouvettes de dureté

Les éprouvettes sont obtenues par un prélèvement d'un fil machine d'aluminium de diamètre 9.5 mm et des fils d'aluminium tréfilés de diamètres respectivement 3,3; 4,4 et 6.6 mm ayant une épaisseur de 10 mm. Les échantillons subissent un polissage mécanique avec papiers abrasifs de différentes granulométries du 120 jusqu'à 1200, pour rendre la surface polie afin de mieux l'exploité pour une meilleure caractérisation de la dureté (figure III.3).



Figure III.3: Eprouvettes de dureté.

III.4 Techniques expérimentales

III.4.1 Traitement de recuit

Afin de connaître l'effet du traitement thermique sur les fils d'aluminium extrudés, dans notre étude, en première étape nous avons effectué un traitement de recuit sur les fils avec un pourcentage de réduction d'environ 65,26 %, 53,68 et 30, 52 % à une température de 450 °C pour le des temps de recuit qui sont : 1 heure, 2 heures, 4 heures et 6 heures. La deuxième étape nous avons effectué un recuit en variant la température de 150 ; 250 ; 350 et 450 °C pour temps fixe de 2h. Le four utilisé dans le laboratoire de traitement thermique (Université

Echahid Cheikh Larbi Tebessi Tebessa) est de type "Nabertherm" (figure III.4). Pour étudier les propriétés mécaniques de ces fils, ils ont été soumis à des essais de traction et de dureté.



Figure III.4: Four de traitement thermique (Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi Tebessa).

III.4.2 Essais de traction

Des essais de traction sont réalisés à température ambiante sur des fils tréfilés et recuits à une vitesse de déplacement de 3 mm/min sur une machine Zwick/Roell Z050, au Laboratoire de l'Université Badji-Mokhtar Annaba (figure.III.5). Ces tests nous permettent de déterminer des propriétés mécaniques telles que la résistance maximale à la rupture et la ductilité du matériau.



Figure III.5: Machine de traction (Zwick/Roell Z050) (Université Badji-Mokhtar Annaba).

III.4.3 Essai de dureté Brinell

La dureté est définie comme étant la capacité d'un métal ou d'un alliage métallique à résister à la déformation plastique, à un emplacement spécifique et localisé plutôt qu'à un emplacement

général. Elle est également définie comme la résistance du métal à l'indentation, aux rayures ou à l'abrasion. Elle est mesurée par l'empreinte laissée dans la matière par le pénétrateur sous une forme donnée. Selon la forme du pénétrateur et la nature de la mesure d'indentation (surface ou profondeur), il existe différents tests.

Le Principe d'essai Brinell : L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à tester un pénétrateur, en forme de bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre (D), 10 mm, sous une charge F bien déterminée, et à mesurer le diamètre de l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, (figure III.6). La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement.

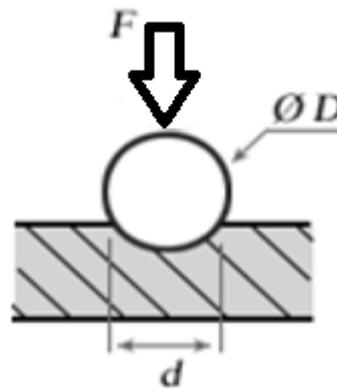


Figure III.6: Principe d'essai de Brinell.

HB: Dureté Brinell.

F: Force appliquée [N]

D: Diamètre de la bille (mm)

d: Diamètre de l'empreinte laissée par la bille (mm)

$$HB = \frac{0.1022 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{III.2})$$

Dans notre étude, nous avons effectué des essais de dureté Brinell (HB62.5) qui nous ont été un complément de caractérisation important afin de suivre l'évolution de la dureté des fils tréfilés et recuits pendant des temps de recuit variant de 1 heure jusqu'à 6 heures. Les mesures sont réalisées sous une charge de 62.5 Kg appliquée pendant 10 secondes à l'aide d'un duromètre de marque « INNOVATEST » (figure III.7). Pour chaque échantillon, la valeur de la dureté correspondant représente la moyenne de six mesures prises.



Figure III.7: Machine de dureté Brinell (INNOVATEST) (Université Badji-Mokhtar Annaba).

Références bibliographiques

- [1] S.A. Zhernov, F. Omelyanenkoi, A. F. Sirenko, Fizika Metallov IMetallovedenie, vol.58, no3, pp. 589-595, 1984.
- [2] A. Diha, Etude du fluage des fils d'aluminium tréfilés, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

Chapitre IV
Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Ce chapitre fournit des interprétations des résultats des tests, de la traction et de la dureté des fils d'aluminium tréfilés à différents taux de déformation de 30.52;53.68 et 65.26 %. Les essais de traction permettent d'évaluer les grandeurs caractéristiques mécaniques: limite d'élasticité, contrainte ultime, et ductilité. Les essais de dureté mesurent la résistance d'un matériau aux déformations permanentes par pénétration, rayure ou abrasion. La dureté dépend de la structure cristalline du matériau, de la disposition de ses atomes, de la présence d'impuretés et d'autres facteurs. Nous présentons ensuite les résultats obtenus grâce à ces essais et en faisons des interprétations permettant de comprendre les effets de la température et du temps de recuit et d'en tirer des conclusions.

IV.2 Essais de traction

Les essais de traction consistent à soumettre une éprouvette à une force de traction et à mesurer la déformation résultante. Ainsi, la contrainte appliquée peut être liée à la déformation mesurée pour comprendre le module élastique, caractériser le comportement de la déformation plastique, mesurer la ductilité, la limite élastique... etc.

Pour mieux connaître les propriétés mécaniques du matériau étudié, des essais de tractions sont réalisés au niveau du laboratoire de Université Badji Mokhtar Annaba, afin de déterminer sa limite élastique R_e (N/mm²), sa résistance à la rupture R_r (N/mm²) et son allongement A (%).

a) Essais de traction des fils d'aluminium tréfilés non recuits

La figure IV.1, présente des courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés de diamètre respectivement 3,3; 4,5 et 6,6 mm. Nous pouvons déduire que la résistance à la rupture des fils tréfilés augmente et l'allongement diminue lorsque le taux réduction augmente. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la densité des dislocations lors de la déformation plastique par tréfilage.

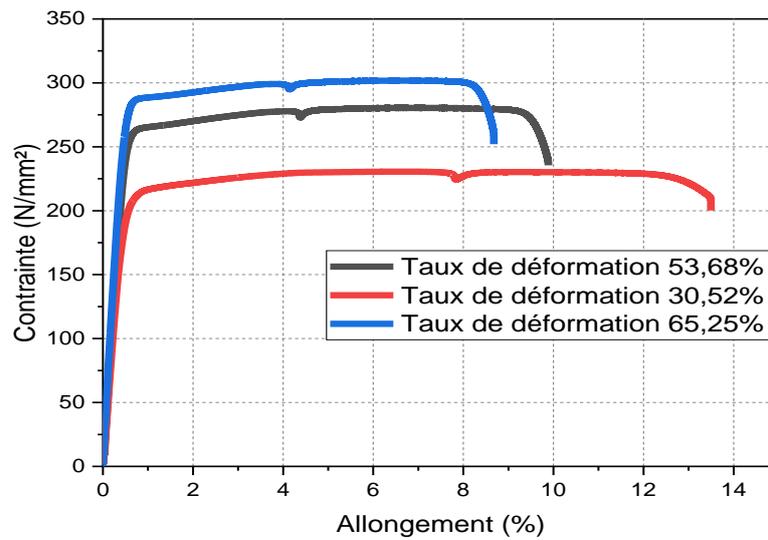


Figure IV.1: Courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés non recuits avec taux de réduction 30.26 %; 53.68% et 65.26%.

Tableau. IV.1 : Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés non recuits.

Taux de réduction (%)	Résistance élastique (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Déformation (%)
30.52	203.32	230,57	8.20
53.68	256.19	280,45	9.16
65.26	281.94	301,81	12.57

b) Effet de la température de recuit

La figure IV.2, présente des courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés à taux de réduction de 30.52 %, soumis à des températures 150, 250, 350 et 450 °C, pendant un temps de recuit de 2h. Nous remarquons plus la température de recuit augmente, plus la résistance de rupture du fil diminue.

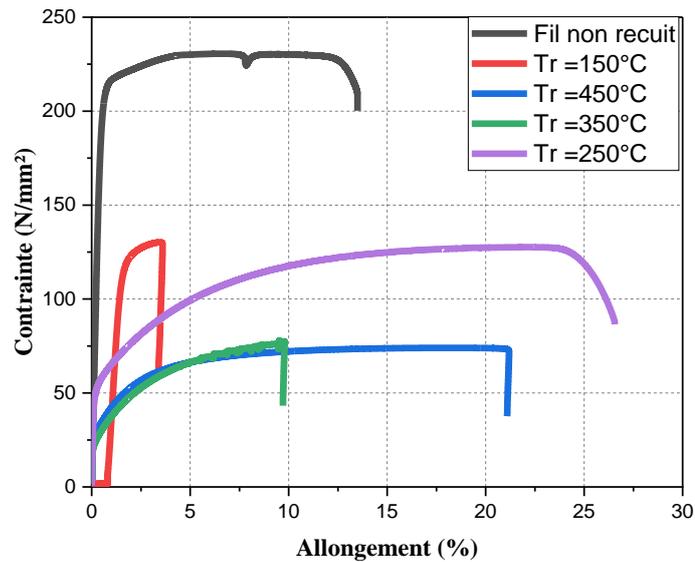


Figure IV.2: Courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés à taux de réduction de 30.52 %, soumis à des températures 150, 250, 350 et 450 °C, pendant un temps de recuit de 2h.

Tableau. IV.2: Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés recuits à différentes températures pendant de 2h de recuit.

Température de recuit (°C)	Résistance élastique (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Déformation (%)
150	113.70	130.21	3.41
250	51.12	127.23	26.55
350	25	77.37	9.71
450	22.66	73.52	21.09

c) Effet du temps de recuit

La figure IV.3, montre des courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés à taux de réduction de 30.52 %, soumis à une température de 450 °C, pendant de différents temps de recuit 1h, 2h, 4h et 6h. Nous constatons généralement plus le temps de recuit augmente, plus la résistance de rupture du fil diminue. Ce comportement est dû à la diminution de la densité des dislocations, puisque ce maintien de temps élevé provoque une agitation thermique importante au niveau de la microstructure.

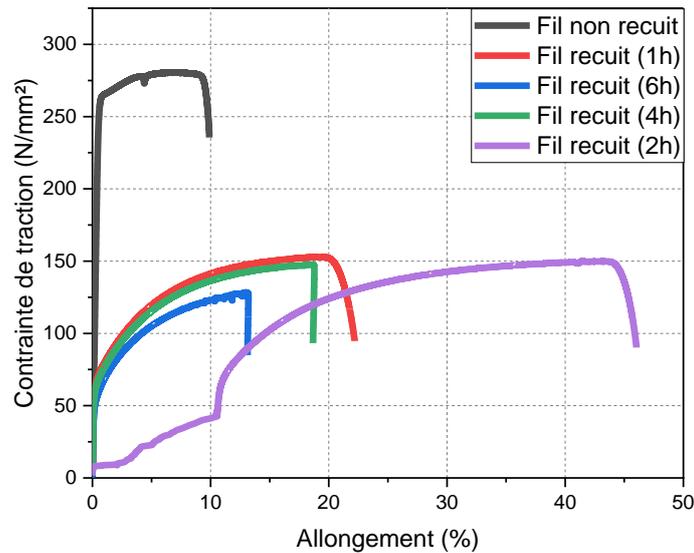


Figure IV.3: Courbes de traction des fils d'aluminium tréfilés, à taux de réduction 30.52 % pour une température 450 °C et pour des temps de recuits 1h, 2h, 4h et 6h.

Tableau. IV.3: Propriétés mécaniques des fils d'aluminium tréfilés recuits à différents temps de recuit à une température 450 °C.

Temps de recuit (h)	Résistance élastique (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Déformation (%)
1h	60	152,83	22
2h	56.81	150,07	46.92
4h	53.55	147,61	18.54
6h	47.02	128,35	13.10

IV.3 Essais de dureté

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer une charge ou force constante, 62.5 Kgf, pendant une durée déterminée 10 secondes, avec une bille en carbure de tungstène de 2,5 mm de diamètre.

Pour mieux connaître les propriétés mécaniques du matériau étudié, des essais de dureté sont réalisés au niveau du laboratoire de l'Université Badji Mokhtar Annaba, afin de déterminer la valeur de dureté et comparer les résultats obtenus entre les échantillons étudiés.

a) Essais de dureté des fils non traités d'aluminium tréfilé avec taux de réduction 0%,30.26%, 53.68% et 65.26%

La figure IV.4, présente la courbe de essais de dureté des fils non traités d'aluminium tréfilés avec taux de réduction 0%,30.26%, 53.68% et 65.26%. Nous pouvons déduire que plus le taux de déformation de ces fils augmente plus la dureté augmente. Donc c'est toujours l'augmentation de densité des dislocations au cours de la déformation plastique qui causera ce phénomène.

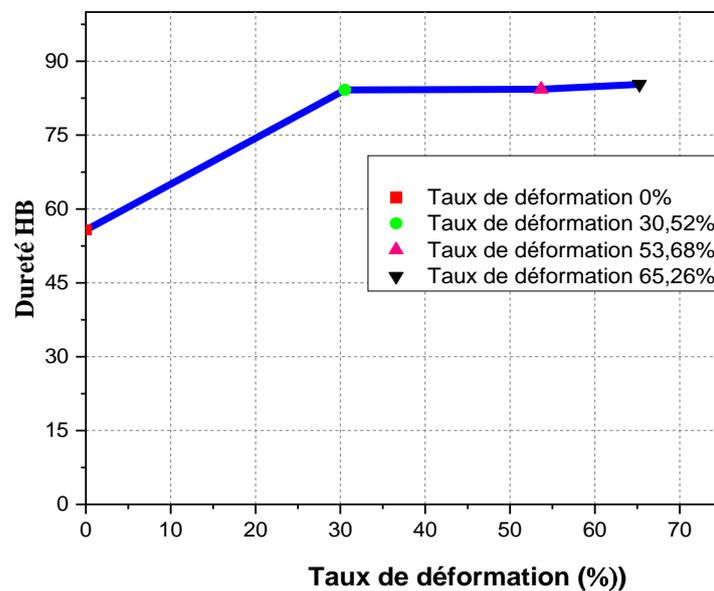


Figure IV.4: Courbes de dureté des fils non traités d'aluminium tréfilé avec taux de réduction 0%,30.26%, 53.68% et 65.26%.

Tableau. IV.4: Valeurs de dureté des fils non traités d'aluminium tréfilés avec taux de réduction 0 %, 30.26 %, 53.68 % et 65.26 %.

Taux de réduction (%)	dureté (HB)
0	55.71
30.26	84.17
53.68	84.33
65.26	85.3

b) Essais de dureté d'un fil d'aluminium tréfilé recuit de 2 h, à taux de réduction de 53.68 %

La figure IV.5, présente la courbe de dureté d'un fil d'aluminium tréfilé à taux de réduction de 53.68 %, soumis à des températures 150, 250, 350 et 450 °C, pendant un temps de recuit de 2h. Nous remarquons que la valeur de la dureté est en chute lorsque la température augmente.

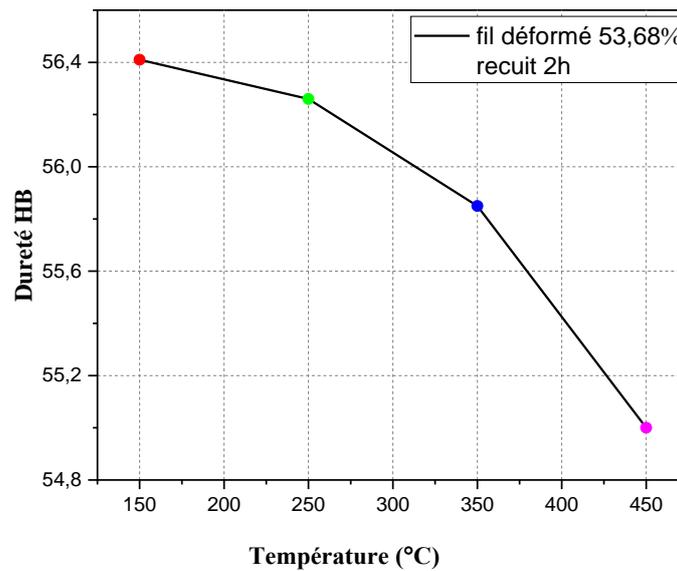


Figure IV.5: Courbe de dureté d'un fil d'aluminium tréfilé taux de réduction de 53.68 %, soumis à des températures 150, 250, 350 et 450 °C.

Tableau. IV.5: Valeurs de dureté d'un fil d'aluminium tréfilé à taux de réduction de 53.68 %, soumis à différentes températures.

Température de recuit (°C)	dureté (HB)
150	56.41
250	55.58
350	55.85
450	55

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de recherche était l'étude du comportement mécanique des fils d'aluminium tréfilés. Ces fils sont fabriqués par l'entreprise industriel du câblerie de Biskra (EN.I.CA.B). Pour cela, nous avons étudié des fils avec différents taux de réduction de 30,52 ; 53,68 et 65,26 %. A travers cette étude, nous venons d'exposer les différentes connaissances qui ont permis de comprendre les bonnes conditions d'utilisation de ces fils, ainsi que la détermination des mécanismes physiques régissant leur déformation plastique. L'essai de traction et la dureté Brinell a été utilisé.

Les principaux résultats obtenus sont résumés ci-dessous :

- 1- La résistance à la rupture des fils tréfilés augmente et l'allongement diminue lorsque le taux réduction augmente.
- 2- La résistance de rupture est inversement proportionnelle au temps de recuit.
- 3- L'augmentation de la résistance de fils tréfilés est causé par l'augmentation taux de déformation.
- 4- L'augmentation de la dureté est proportionnelle à l'augmentation du taux de réduction des fils tréfilés.
- 5- Nous avons constaté une diminution de la dureté de ces fils tréfilés et recuits, lorsque la température du recuit augmente ou le temps de recuit augmente. Cela à cause de l'adoucissement de ces fils tréfilés par l'agitation thermique.
- 6- Finalement nous pouvons déduire que une fois le taux de déformation plastique des fils d'aluminium tréfilés augmente, leurs comportements mécaniques vis-à-vis la résistance à la rupture et la dureté augmentent également. Cela a été clairement observé à cause de la densité des dislocations élevée lors de la déformation.

ملخص:

تعتمد هذه الدراسة على توصيف أسلاك الألمنيوم المتعرضة لتشوه اللدن بمعدل تخفيض 30.26% و 53.68% و 65.26%. أوضحت الدراسة أن سحب الأسلاك يؤدي إلى تغير في الخواص الميكانيكية في اختبارات الشد والصلادة. سجلت قيمة الصلادة ومقاومة الشد أعلى قيمة لها للسلك بمعدل تخفيض 65.26% ، حيث بلغت أقصى مقاومة شد لها قيمة 282 MPa ، وصلادة HB85 . عند المعالجة الحرارية للسلك بنفس معدل التخفيض ، وصلت قوة الشد القصوى إلى 114 MPa ، في حين أن قيمة الصلادة المسجلة هي HB56 عند درجة حرارة 150 درجة مئوية. لوحظ أنه كلما زاد زمن المعالجة انخفضت مقاومة الشد حيث بلغت أدنى قيمة لها 47 MPa عند 6 ساعات من المعالجة الحرارية.

الكلمات المفتاحية : معدل تخفيض, التشوه اللدن, مقاومة الشد, الصلادة, المعالجة الحرارية.

Résumé :

Cette étude est basée sur la caractérisation de fils d'aluminium soumis à une déformation plastique avec un taux de réduction de 30,26 % , 53,68 % et 65,26 % . Les résultats des essais de traction et de dureté ont montré que le tréfilage provoque une modification importante des propriétés mécaniques.

La valeur de dureté et de résistance à la traction a enregistré sa valeur la plus élevée pour le fil ayant un taux de réduction de 65,26 % , où sa résistance à la traction maximale a atteint une valeur de 282 MPa, et la dureté de HB85.

Lors du traitement thermique du fil du même taux de réduction, la résistance à la traction maximale a atteint 114 MPa, tandis que la valeur de dureté enregistrée est de HB56 à une température de 150 °C.

Il a été observé qu'à mesure que le temps de durcissement augmentait, la résistance à la traction diminuait alors qu'elle atteignait sa valeur la plus basse de 47 MPa à 6 heures de traitement thermique.

Mots clés : taux de réduction, déformation plastique, résistance à la traction, dureté, traitement thermique.

Abstract:

This study is based on the characterization of aluminum wires subjected to plastic deformation with a reduction ratio of 30.26%, 53.68% and 65.26%. The results of tensile and hardness tests showed that wire drawing causes a significant change in mechanical properties.

Hardness and tensile strength recorded their highest values for wire with a reduction ratio of 65.26%, where its maximum tensile strength reached a value of 282 MPa, and hardness of HB85.

During heat treatment of the wire with the same reduction ratio, the maximum tensile strength reached 114 MPa, while the hardness value recorded was HB56 at a temperature of 150 °C.

It was observed that as hardening time increased, tensile strength decreased, reaching its lowest value of 47 MPa at 6 hours of heat treatment.

Key words: reduction ratio, plastic deformation, tensile strength, hardness, heat treatment.