

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi-Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Matière



MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Physique des matériaux**

Thème

*Effet des traitements thermiques et thermomécaniques
Sur la microdureté d'un alliage Al-Mg-Si.*

Présenté par :

Widad TOUAITIA

Devant le jury :

BENMAKHLOUF Fella	Professeur	Université Larbi Tébessi	Président
FARH Hichem	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Rapporteur
HAFDALLAH Abdelkader	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Examineur

Date de soutenance : **24/06/2019**



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

Université Larbi Tébessi-Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Sciences de la Matière

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Physique des matériaux**



Thème

***Effet des traitements thermiques et thermomécaniques
Sur la microdureté d'un alliage Al-Mg-Si.***

Présenté par :

Widad TOUAITIA

Devant le jury :

BENMAKHOLOUF Fella	Professeur	Université Larbi Tébessi	Président
FARH Hichem	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Rapporteur
HAFDALLAH Abdelkader	M.C.A	Université Larbi Tébessi	Examineur

Date de soutenance : **24/06/2019**

Dédicace

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et Source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde mon cher père.

À la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore. que dieu te protège et te bénisse.

*À mes très chères sœurs:
Hanane, son mari et ses enfants, Sihem
et Spécialement ma sœur et confidente qu'elle était toujours avec moi Sabrin, son mari Bilel et leur petite adorable fille. Pour ces soutien moral leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

À mon cher frère Zoubir sa femme et ses enfants.

À mon petit frère oussama.

À l'esprit de mon grand-père décédé, qui a toujours voulu partager ces moments avec moi.

À mon oncle Hassan pour ces supports moral.

À mes chères ami (e)s pour leurs aides et support dans les moments difficiles.

À Tout ma famille.

Widad



Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et le miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, et clôturer un long chapitre d'études et de moment ardu de ma vie.

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire monsieur **FARH Hichem**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. Comme je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir fait profiter de son expérience.*

*Un grand merci aux membres du Laboratoire des **Composants Actifs et Matériaux** de l'Université Larbi Ben Mhidi d'Oum El Bouaghi.*

*Je remercie Madame **Benmakhlouf Fella** d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.*

*Je remercie Monsieur **Hafdallah Abdelkader** d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.*

*Je remercie Monsieur **Abderrachid Bechiri** de me aidé et conseillé.
bien sûr un grand merci à mes parents, mes amies **Baaloudj Oussama, Zerfaoui Hanine, Guedri Noussayba, Messadia Rokaya, Nour Eid et louafi Ahd** Pour ces soutien moral et leurs conseils*

Et enfin merci et pardon à tous ceux que nous ne pouvons citer qui nous ont aidés de près ou de loin.

Table des matières

Remerciements	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique	
I-1 Introduction	3
I-2 Description générale des matériaux	3
I-2-1 Classement des matériaux solides	3
I-2-2 Aluminium	3
I-2-3 Obtention de l'aluminium	4
I-2-4 Historique de l'aluminium	4
I-3 Les caractéristiques d'aluminium	5
I-3-1 Propriétés physiques de l'aluminium	5
I-3-2 Propriétés mécaniques de l'aluminium	6
I-3-3 Propriétés optiques	7
I-3-4 La conductivité électrique et thermique	7
I-3-5 Le recyclage	7
I-3-6 Résistance à la corrosion	7
I-4 utilisations de l'aluminium	8
I-4-1 Bâtiments	8
I-4-2 Emballage	8
I-4-3 Équipements mécaniques	9
I-4-4 Équipements électriques	9
I-4-5 Autres applications	9
I-5 Alliages à base d'aluminium	9
I-5-1 La classification des différents alliages d'aluminium	10
I-5-1-1 Les alliages à durcissement structural	10
I-5-1-2 Les alliages sans durcissement structural	10

I-5-2 Désignation des alliages d'aluminium	11
I-5-2-1 Désignation symbolique (Norme européenne)	11
I-5-2-2 Désignation numérique (Norme européenne).....	12
I-6 Alliages Al-Mg-Si, Série 6000	13
I-7 Les traitements thermiques	14
I-7-1 Réalisation d'un traitement thermique	16
Chapitre 2 : Procèdes de mise en forme des métaux	
II-1 Introduction	17
II-2 Généralités sur la mise en forme des métaux	17
II-2-1 La mise en forme à froid	18
II-2-2 La mise en forme à chaud	18
II-3 les Procédé de mise en forme des métaux	18
II-3-1 Procédé de forgeage	19
II-3-1-1 Forgeage à chaud (ou forgeage libre).....	19
II-3-1-2 Le forgeage à froid (ou extrusion)	20
II-3-2 Procédé d'Emboutissage	20
II-3-2-1 L'emboutissage à froid	21
II-3-2-2 L'emboutissage à chaud	22
II-3-3 Procédé de Filage	22
II-3-3-1 Le filage direct	22
II-3-3-1 Le filage inverse	23
II-3-4 Procédé de tréfilage	23
II-3-4-1 Les machine de tréfilage	24
II-3-5 Procédé de laminage	24
II-3-5-1 Principe de laminage	25
II-3-5-2 Types de laminage.....	26
II-3-5-2-1 Laminage à chaud	26
II-3-5-2-2 Laminage à froid	27
II-3-5-3 Projet et taux de déformation	27
Chapitre 3: Matériaux et Techniques Expérimentales	
III-1 Introduction	28
III-2 Compositions chimiques des alliages étudiés	28
III-3 Traitements thermiques et thermomécaniques appliqués.....	28
III-3-1 Traitements thermiques.....	28

III-3-2 Traitements thermomécaniques	29
III-4 Préparation des échantillons	31
III-5 Techniques expérimentales utilisées	32
III-5-1 Microscopie optique.....	32
III-5-2 Mesures de la microdureté Vickers (Hv)	33
III-5-3 Diffraction des rayons X (DRX)	35
chapitre 4: Résultats et discussion	
IV-1 Introduction	38
IV-2 Caractérisation par microscope optique (MO).....	38
IV-3 Analyse de la microdureté.....	38
IV-4 Analyse par diffraction des rayons X.....	41
Conclusion Générale	45
Références	46
Annexe.....	48
Résumé	50
Abstract	51
ملخص	52

Liste des figures

Figure I-1: Principales familles des matériaux	3
Figure I-2: Maille élémentaire	3
Figure I-3: Les étapes d'obtention d'aluminium	4
Figure I-4 : Forme cristalline de l'Aluminium (CFC)	6
Figure I-5 : câble électrique en aluminium (série 6000)	7
Figure I-6: Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural.....	16
Figure II-1: Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques.....	17
Figure II-2: Comparaison forge conventionnelle, forge de précision	19
Figure II-3: Procédé d'emboutissage	20
Figure II-4: Étapes de la production de canettes à partir de découpes circulaires par emboutissage profond, emboutissage de reprise et étirage de parois.	21
Figure II-5: Schéma du filage direct.....	23
Figure II-6: Schéma du filage inverse.	23
Figure II-7: Schéma de principe de tréfilage et fil dans la filière.....	24
Figure II-8: le laminage des tôles métalliques.....	25
Figure II-9: Principe de laminage.....	25
Figure II-10: Schéma d'une cage quarto de laminage	26
Figure II-11: Schéma de principe de laminage à chaud	27
Figure II-12: Schéma de principe de laminage à froid	27
Figure III-1: un échantillon d'épaisseur de 3 mm	28
Figure III-2: Four de traitement thermique NABERTHERM.	29
Figure III-3 : laminoir de type électrique 160 mm plaque + fil triphasé	30
Figure III-4: polisseuse mécanique (FORCIPOL 2).....	31
Figure III-5: papiers abrasifs.	31
Figure III-6: échantillon avant polissage	32
Figure III-7: échantillon après polissage	32
Figure III-8: Le microscope optique de type EUROMEX.	33
Figure III-9: Principe de la mesure de microdureté Vickers.	34
Figure III-10: la base carrée de l'empreinte est la moyenne des d1 et d2.....	34

Figure III-11: Microdureté AFFRI	35
Figure III-12: Famille de plans cristallins en condition de Bragg.	36
Figure III-13: Diffractomètre ARL EQUINOX.	37
Figure IV-1: Microstructure des échantillons d'alliage pour différents taux de réduction par laminage à froid : (a) 12,24%; (b) 32, 52 %; (c) 72, 22%.	39
Figure IV-2: Variation de la microdureté Vickers des échantillons d'un alliage Al-Mg-Si laminé à froid en fonction du taux de déformation	40
Figure IV-3: Variation de la microdureté Vickers des échantillons d'un alliage Al-Mg-Si laminé à froid et homogénéisée à 530°C en fonction du taux de déformation....	41
Figure IV- 4: Spectre de diffraction des rayons X de l'alliage non laminé (ϵ_0 (0%)).....	42
Figure IV- 5: Spectre de diffraction des rayons X de l'alliage laminé à froid avec un taux de déformation de 72.22 %.....	43
Figure IV- 6: Spectres de diffraction des RX de l'alliage non laminé et l'alliage laminé à froid à 72,22%.	44

Liste des tableaux

Tableau I-1: Production mondiale d'aluminium.....	5
Tableau I-2: La production d'alumine de 1960 à 2005.....	5
Tableau I-3: Propriétés mécaniques d'aluminium pur.....	6
Tableau I- 4: classifications des alliages d'aluminium	11
Tableau I-5: Désignation numérique et phases principales des alliages d'aluminium	12
Tableau III-1: la composition chimique de l'alliage étudié	28
Tableau III-2: Les différents taux de réduction.....	28
Tableau IV-1: Résultats des mesures de la microdureté d'alliage Al-Mg-Si laminée à froid...40	

Introduction Générale



Introduction générale

Les métaux ont une grande importance et une place unique dans le développement et la facilitation de nombreux domaines de notre vie quotidienne, en particulier les domaines industriel et technologique. Cela est dû à leurs propriétés physiques et mécaniques, qui peuvent être développées et étudiées jour après jour et promues par la recherche scientifique.

Parmi ces métaux, l'aluminium, qui n'était pas très important lors de sa première découverte, n'a donc pas été beaucoup utilisé.

Au milieu du XIXe siècle, l'aluminium devient l'un des métaux les plus précieux que l'or et de l'argent car sa production est coûteuse et limitée malgré ses faibles propriétés mécaniques. D'autres éléments tels que le cuivre, le magnésium, le silicium, etc. sont ajoutés pour améliorer ses propriétés et obtenir ce que l'on appelle des alliages d'aluminium. En raison de ce processus, l'aluminium et ses alliages sont devenus largement utilisés, jouent un rôle important dans l'industrie et occupent la deuxième place dans la construction de différentes pièces après le fer.

L'étude qui va être exposée au travers de ce mémoire porte sur les alliages d'aluminium plus précisément la série 6000, dont les principaux éléments d'additions sont le magnésium et le silicium. Ces alliages présentent des caractéristiques moyennes mais ont la particularité d'être facilement soudables (par rapport à d'autres alliages légers) et d'être très peu corrodés par l'eau de mer ou l'air. Ce sont les raisons pour lesquelles ils sont utilisés dans plusieurs domaines des transports maritimes, ferroviaires et routiers pour alléger les véhicules et pouvoir augmenter la charge embarquée...

Les alliages d'Al-Mg-Si sont faciles à mettre en forme par des procédés différents tels que le tréfilage et le laminage.

Le processus de laminage est un processus de production important dans les techniques de formage des métaux. L'objectif de laminage étant de réduire la surface de la section de la plaque utilisée pour la fabrication de nombreux produits et pièces dans les conceptions techniques.

Ce travail a pour but d'étudier l'effet des traitements thermiques sur la microdureté d'un alliage d'aluminium de la série 6000, ainsi que, l'influence combinée du taux de déformation à froid par laminage et la température d'homogénéisation sur la microdureté.

Ce mémoire se compose essentiellement d'une introduction générale et quatre chapitres.



Dans le premier chapitre, nous avons commencé par l'étude bibliographique d'aluminium et ses alliages particulièrement la série 6000(Al-Mg-Si), leurs applications et les traitements thermiques appropriés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un rappel sur les procédés de mise en forme des métaux basés sur le principe de la déformation plastique; précisément le procédé de laminage.

Le troisième chapitre est limité à la présentation des matériaux étudiés, à la préparation des échantillons d'alliages ainsi qu'à la description des techniques expérimentales utilisées.

Les résultats expérimentaux obtenus par les différentes techniques expérimentales et leurs discussions font l'objet du quatrième chapitre.

Finalement, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre ***1***



I-1 Introduction

Parmi les métaux les plus abondants dans la surface de la terre on parle de l'aluminium, qui est un métal blanc argenté, malléable de masse volumique 2.7 g/cm^3 et de température de fusion $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Le but de ce chapitre est de donner une vue générale sur l'aluminium et ces alliages, en particulier les alliages de la série 6000.

I-2 Description générale des matériaux

I-2-1 Classement des matériaux solides

Les matériaux sont classés en familles ou catégories selon leurs propriétés et leur origine (Figure I-1).

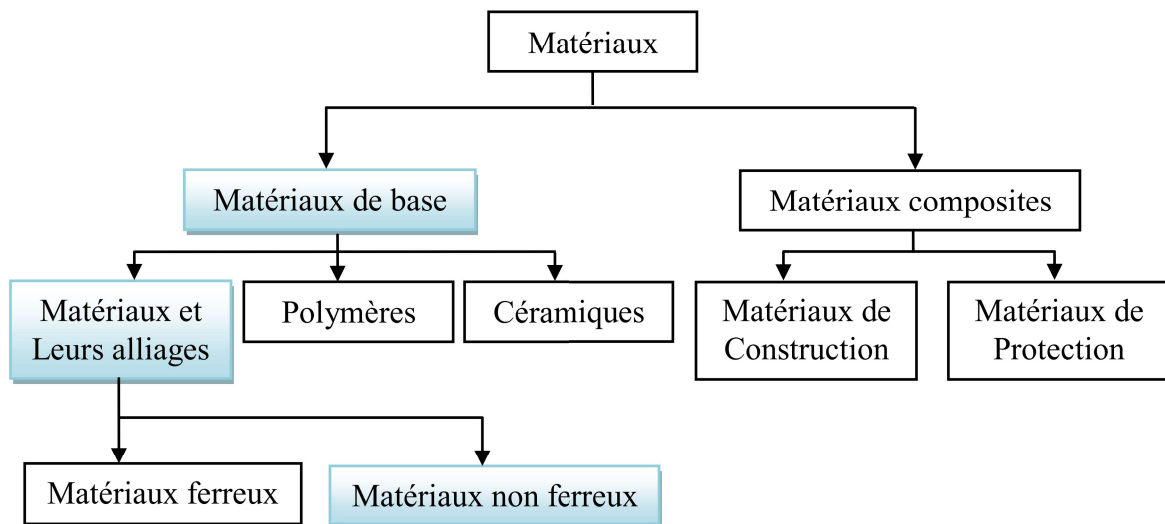


Figure I-1: Principales familles des matériaux [1].

Donc notre étude est basée sur un matériau métal non ferreux "l'aluminium"

I-2-2 Aluminium

L'aluminium est un élément chimique de symbole Al et de numéro atomique 13. Il cristallise dans le réseau C.F.C, comme il est montré sur la Figure I-2. [2]

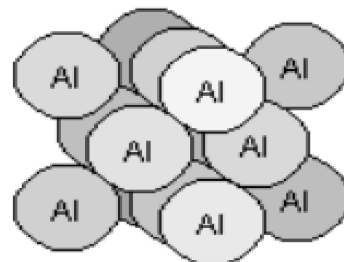
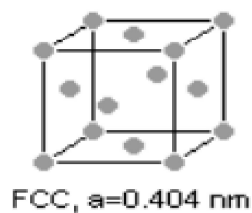


Figure I-2: Maille élémentaire



C'est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev juste après le silicium et l'oxygène, l'aluminium est trois fois plus léger que l'acier. Les seuls métaux plus légers que l'aluminium sont le lithium, le béryllium et le magnésium. C'est le métal le plus utilisé après le fer et l'acier malgré que sa production industrielle n'ait commencée qu'au début du XXème siècle. Les conductivités électrique et thermique de l'aluminium sont élevées, de plus sa légèreté fait de lui un matériau recherché dans plusieurs domaines [3, 4, 5].

I-2-3 Obtention de l'aluminium

À partir des bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60 %) on fait sortir d'alumine (broyée puis attaquée à chaud par la soude après séparation des oxydes de fer et de silicium).

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve [6].

Il faut environ 4 tonnes de bauxite pour produire 2 tonnes d'alumine dont on extraira un tonne d'aluminium. Les gisements de bauxite déjà identifiés assurent de nombreuses années d'exploitation et l'utilisation de nouvelles ressources est à l'étude [7].

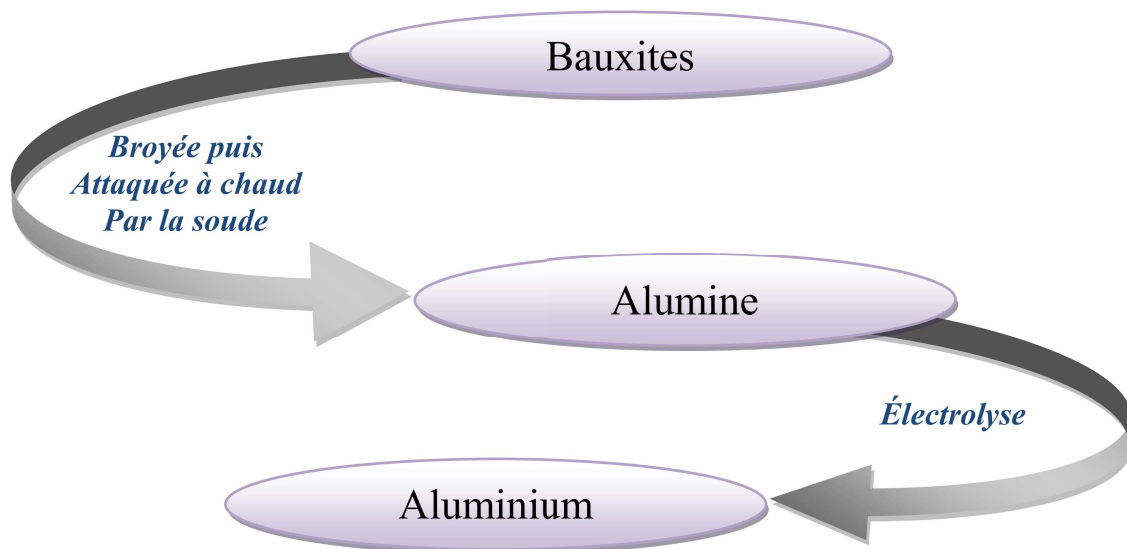


Figure I-3: Les étapes d'obtention d'aluminium

I-2-4 Historique de l'aluminium

L'aluminium pur n'existe pas à l'état naturel, il est abondant dans la nature sous forme de silicates, argiles, sulfates...etc. Sa première apparition en 1825 lors d'une présentation à l'académie des Sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, il a obtenu



chimiquement un lingot de l'aluminium. Jusqu'à 1886, cette méthode de laboratoire fut sa seule utilisée pour produire de l'aluminium.

En 1886: Invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA).

Depuis et grâce à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport, l'emballage et d'autres domaines l'aluminium a connu un développement très important. [6, 8]

Production mondiale d'aluminium	En tonne
1880	12
1890	165
1900	7 800
1910	43 800
1920	158 000

Tableau I-1: Production mondiale d'aluminium. (Source : Larousse de l'industrie).

Année	Production mondiale (en tonnes)	% de croissance	Nombre de nations productrices	% de production des 3 plus grandes nations productrices
1960	6 744 000		18	73
1970	20 766 000	208	24	50
1980	33 381 000	61	24	50
1990	40 105 000	20	25	48
1995	43 948 000	10	27	47
2000	52 945 000	20	29	46
2005	65 080 000	23	27	48

Tableau I-2: La production d'alumine de 1960 à 2005 [9]

I-3 Les caractéristiques d'aluminium

I-3-1 Propriétés physiques de l'aluminium

L'aluminium est de numéro atomique 13, et de structure cristalline de type cubique à faces centrées [10].

Les propriétés physiques de l'aluminium sont:

- ✓ Paramètre de maille: 0.405 nm à 25°C.



- ✓ Masse volumique à 25°C: 2.698 g/Cm³
- ✓ Point de fusion: 660 °C.
- ✓ Coefficient de dilatation moyen entre 20°C et 300°C: $2,55 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.
- ✓ Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda = 217.6 \text{ W/m. K}$
- ✓ Résistivité électrique à 20 °C : $\rho = 2.63 \mu\Omega. \text{ Cm}$.
- ✓ Module d'élasticité: 68000 MPa.

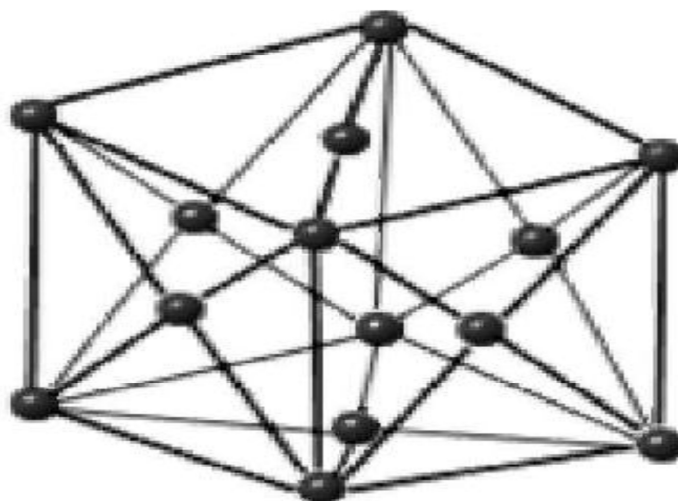


Figure I-4 : Forme cristalline de l'Aluminium (CFC) [10]

I-3-2 Propriétés mécaniques de l'aluminium

L'aluminium pur possède les propriétés mécaniques suivantes :

- ▶ Léger.
- ▶ Ductile et il résiste à la corrosion.
- ▶ Une très bonne conductivité thermique et électrique.

Ces propriétés sont très réduites et insuffisantes pour son utilisation dans des déverses domaines, peut améliorer ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques, selon les cas. [3, 11-13]

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

Etat du métal	Charge de rupture à la traction	Allongements de rupture à la traction
Coulé	5 à 9 Kg/mm ²	0 à 5 %
Laminé et recuit	8 à 10 Kg/mm ²	30 à 40 %
Laminé et écroui	20 à 25 Kg/mm ²	2 à 5 %

Tableau I-3: Propriétés mécaniques d'aluminium pur [13]



Il est important de connaître les limites du matériau avant de l'utiliser car on a par exemple la résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont différentes de celles de l'acier, à l'état recuit il apparaît une excellente ductilité par rapport aux aciers. L'aluminium est un matériau relativement élastique mais peu malléable. [12]

I-3-3 Propriétés optiques

La réflexion de l'aluminium brillant est excellente et change avec la longueur d'onde dans le spectre du visible, il est à l'ordre de 85% à 90%, Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface tels que le polissage et la brillance. l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde a un pouvoir émissif très faible de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation. [13]

I-3-4 La conductivité électrique et thermique

L'aluminium fournit une excellente prise électrique, et est utilisé de plus en plus pour les lignes à haute tension parce qu'un poids inférieur à celui du cuivre, et aussi il offre un fort pouvoir caloporteur comme l'utilisation dans des dispositifs de refroidissement. [14]



Figure I-5: câble électrique en aluminium (série 6000)

I-3-5 Le recyclage

Le recyclage de l'aluminium plus efficace par rapport à d'autres métaux, et ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir d'un minerai (plan économique), et l'expérience montre que les déchets d'aluminium ont une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles car une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite, en évitant l'étape de l'électrolyse, ce qui nécessite beaucoup d'énergie et d'éviter les polluants associés émissions.

L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités.

I-3-6 Résistance à la corrosion

La non corrosion ou plus précisément la faible corrosion d'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale... milieux dans lesquels les conditions



d'emploi peuvent être sévères. D'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à traitements de coloration. [13]

I-4 utilisations de l'aluminium

Grâce à ses propriétés mécaniques et électriques on peut citer les principales utilisations de l'aluminium et ses alliages. [10]

I-4-1 Bâtiments (21 %)

Dans ce domaine on peut citer les cadres de portes et de fenêtres, les bardages de façades ou encore les toitures qui se font de plus en plus avec de l'aluminium. et comme l'aluminium a une bonne formabilité, il sera possible de produire économiquement des profilés de formes complexes pour les cadres de portes et de fenêtres. de plus, sa légèreté et sa bonne résistance à la corrosion (pour la garantie décennale) et son aspect décoratif (anodisé ou peint) le rendent attractif pour l'industrie du bâtiment.

I-4-2 Emballage (21 %)

Beaucoup d'emballages sont produits en aluminium, on peut en citer les boîtes de conserve, les boîtes de boisson ou encore les feuilles minces pour l'emballage alimentaire. L'aluminium n'est pas toxique. Il est facile à mettre en forme. Il a une bonne résistance à la corrosion et peut être recyclé économiquement. Pour ces raisons, l'aluminium est très utilisé pour les boîtes boissons (100 % aux États-Unis, 50 % en Europe) et beaucoup de produits sont enveloppés dans de la feuille mince d'aluminium avec ou sans papier (aluminium ménager, beurre, cigarettes, chocolat etc...). Les petites boîtes de conserves et les boîtes de boissons sont en aluminium car ce matériau a été le premier à permettre la fabrication de couvercles à ouverture facile (sans outil). Cela résulte de deux avantages de l'aluminium par rapport aux autres matériaux :

- * Possibilité de faire une incision par un coup de presse qui diminue localement l'épaisseur du métal (permettant l'ouverture du couvercle par déchirement).

- * Possibilité de filer un rivet intégré dans le couvercle donnant la possibilité de fixer un anneau d'ouverture sur le couvercle sans le perforer donc sans risque de fuite et de contamination extérieure.



I-4-3 Équipements mécaniques (7 %)

Beaucoup d'équipements mécaniques et accessoires sont à base d'aluminium ; citons les rivets, boulons, renforts de portières ou de capots de voitures.

I-4-4 Équipements électriques (9 %)

L'aluminium est un bon conducteur de l'électricité. Il est léger et présente de bonnes caractéristiques mécaniques. Tous les câbles électriques de transport et de distribution extérieurs sont en aluminium, ainsi que la plupart des équipements utilisés dans les postes de transformation.

I-4-5 Autres applications (17 %)

Il s'agit d'un grand nombre d'applications diverses et variées qui constituent individuellement de faibles tonnages et qui vont des meubles de bureau ou d'appartement aux panneaux de signalisation routière, etc... Pour la plupart de ces utilisations, la bonne résistance à la corrosion de l'aluminium est un avantage apprécié. De plus, les propriétés mécaniques de l'aluminium sont bien différentes de celles de l'acier. Parmi les principales différences avec l'acier, notons l'élasticité et la densité qui sont trois fois moins élevées. La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont tout aussi différentes de celles de l'acier. C'est pourquoi il est important de bien connaître les limites du matériau avant de l'utiliser pour la construction des bateaux. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés. En premier lieu, il faut retenir ce paradoxe « Plus on soude l'aluminium, plus on l'affaiblit ». Cette situation se produit en raison d'un changement des propriétés métallurgiques de l'aluminium de base dans une zone localisée dite: Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Cette zone détrempee apparaît inévitablement dans chacune des zones soudées. La chaleur du bain de fusion provoque un cycle thermique tout autour des cordons de soudures (s'étendant sur 25 millimètres de chaque côté de l'axe du cordon).

I-5 Alliages à base d'aluminium

Puisque les propriétés de l'aluminium pur sont faibles, donc, si nous voulons l'améliorer et augmenter ses domaines d'utilisation on fait ce qu'on appelle les alliages d'aluminium qui sont obtenus en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément leur microstructure. Les principaux éléments qui sont en général ajoutés sont : Mg, Si, Mn, Fe, Cr et le Cu.



I-5-1 La classification des différents alliages d'aluminium

La classification des différents alliages d'aluminium est contrôlée par un institut américain, the American National Standards Institute (ANSI) [15], elle donne deux types:

- ❖ Les alliages à durcissement structural.
- ❖ les alliages sans durcissement structural.

Cette différence entre les alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage. Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable. [16]

I-5-1-1 Les alliages à durcissement structural

Le durcissement structural de l'aluminium est obtenu par un processus comportant : [17, 18]

- La mise en solution des éléments durcissant.
- La trempe, c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- Vieillessement à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

I-5-1-2 Les alliages sans durcissement structural

Ces alliages ne durcissent pas par traitements thermiques, mais peuvent avoir une haute résistance par écrouissage, c'est-à-dire, par déformation plastique à froid. Ils sont la plupart du temps utilisés dans la fabrication des produits plats comme feuille mince et lame.[19] Différents mécanismes de durcissement interviennent dans ces alliages pour moduler les propriétés mécaniques tels que:

-Le durcissement par écrouissage: tels que la déformation par l'étirage et tréfilage permet d'accroître la limite élastique au détriment de l'allongement. Donc c'est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage. La restauration des propriétés initiales des alliages peut être obtenue suite aux traitements thermiques appropriés. [10]

-Le durcissement par l'effet de phase dispersée: lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en



aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite. [3]

-Le durcissement par addition en solution: la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage. [20, 21]

	Alliages à durcissement structural	Alliages sans durcissement structural
Série	2000	1000
	4000	3000
	6000	5000
	7000	

Tableau I-4: classifications des alliages d'aluminium [10]

I-5-2 Désignation des alliages d'aluminium

I-5-2-1 Désignation symbolique (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret -
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci.

Exemple:

EN AC-ALCu4MgTi: alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de Manganèse et de titane. [7]

Un chiffre placé dans le groupe des lettres précises la teneur de l'élément symbolisé par des lettres dont les principales lettres utilisées sont:

- Cuivre U
- Manganèse M
- Magnésium G
- Zinc Z
- Nickel N



- Silicium S
- Titane T

I-5-2-2) Désignation numérique (Norme Européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret –
- cinq chiffres représentant la composition chimique :
- 2 premiers indiquent le groupe d'alliage
- 3 derniers indiquent la composition chimique.

Exemple:

EN AC-21000: alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane. [7]

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium(Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-

Tableau I-5: Désignation numérique et phases principales des alliages d'aluminium [22]



Les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres:

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.
- Les troisième et quatrième sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage.

La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage de l'aluminium.

I-6 Alliages Al-Mg-Si, Série 6000

Les alliages qui forment à l'état d'équilibre une solution solide faiblement alliée ou des phases intermétalliques sont les alliages d'aluminium les plus distingués.

Dans le cas des alliages d'aluminium de la série 6000 (alliages à solution solide type Al-Mg₂Si) les principales additions sont le magnésium et le silicium qui se combine pour former le composé Mg₂Si, et parfois un peu de cuivre, cette série fait partie de la catégorie des alliages à durcissement structural. Ces alliages sont généralement livrés après homogénéisation, trempe et vieillissement naturel. [23, 24].

Ils ont les propriétés suivantes :

- ✓ Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être améliorées par addition de silicium qui formera avec le Mg, le précipité durcissant Mg₂Si.
- ✓ Ils ont une bonne résistance à la corrosion (pour certains alliages même dans l'atmosphère marine).
- ✓ Ils ont des propriétés de résistance au-dessus de 100°C.
- ✓ une bonne aptitude au soudage.
- ✓ Très bonne résistance à la corrosion, mais leur résistance à chaud est limitée. On peut les classer en deux classes:
- La première c'est là où les compositions contiennent un pourcentage élevé de magnésium et silicium tel que les alliages 6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...).



- Une deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. [10].

I-7 Les traitements thermiques

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. Pour les alliages d'aluminium, le terme traitement thermique est surtout utilisé pour les opérations visant à augmenter les propriétés mécaniques des alliages à durcissement structural. On désigne ces familles d'alliages comme traitables thermiquement de façon à les distinguer des familles d'alliages à durcissement par écrouissage dont les traitements thermiques en peu d'influence les propriétés mécaniques (limites élastiques et résistances à la traction). [20, 25]

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium sont généralement répartis en quatre différents types:

- Traitement d'homogénéisation.
- Traitement d'adoucissement.
- Traitement de durcissement structural.
- Traitement de vieillissement.

a. Traitement d'homogénéisation : Ce sont des traitements consiste à chauffer le matériau à une température relativement élevée appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils peuvent aussi minimiser les gradients de composition obtenus durant la solidification. Les domaines des températures d'homogénéisation s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590°C pour les alliages d'aluminium.

Ce traitement a pour but de dissoudre les phases présentes au sein de l'alliage, de sorte à réaliser une homogénéisation de celui-ci sous une seule et même phase. [26] Il est défini par le rapport de corroyage S/s avec :

S: section avant déformation.

s: section après déformation.

Il ne faut pas confondre le corroyage avec l'écrouissage.



L'écrouissage est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire (par fois à tiède). [24]

b. Traitement d'adoucissement : Les traitements d'adoucissement ont pour but d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. On note parmi ces traitements thermiques le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, et le traitement de recuit de précipitation dans le cas de matériaux trempés. Ce dernier traitement consiste en un chauffage assez prolongé à température élevée afin d'obtenir un adoucissement de l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage [10].

c. Traitement de durcissement structural : Ce type de traitement comprend généralement trois étapes distinctes:

1. Mise en solution solide

Le traitement de mise en solution solide peut être considéré comme un traitement d'homogénéisation et d'adoucissement. Ce traitement est effectué à température assez élevée, et permet de dissoudre les phases qui ont précipité dans l'alliage. Ceci contribue aussi à la diminution de la dureté du matériau. [5]

2. Refroidissement rapide

Le refroidissement rapide, ou bien trempe a pour but de conserver la solution formée à haute température à la température ambiante. La vitesse de refroidissement varie d'un alliage à un autre. La vitesse critique de trempe dépend de la vitesse de diffusion des éléments constituants l'alliage. [5]

3. Traitement thermique de revenu

Les traitements thermiques de revenu sont constitués d'un maintien à une température constante, ce qui engendre un durcissement important de l'alliage. [10]

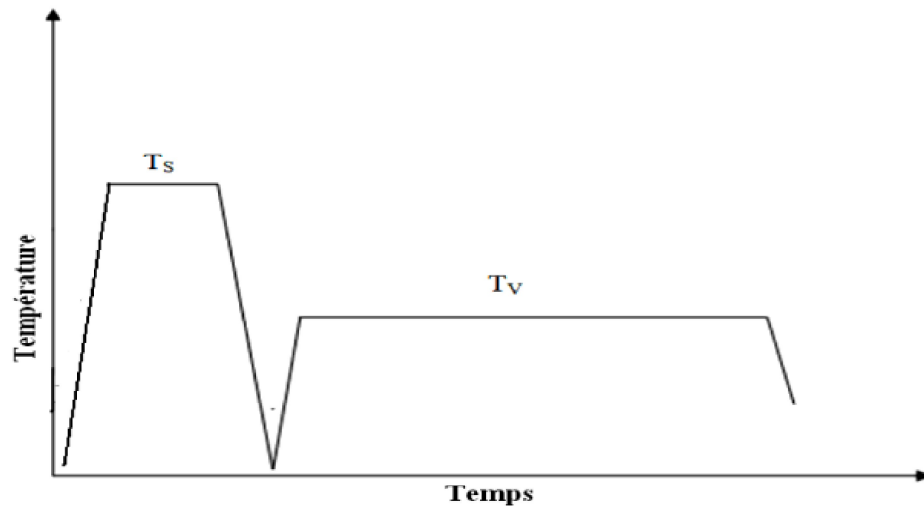


Figure I-6: Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural

Ts: Température minimale de mise en solution

Tv: Température d'adoucissement (ou de vieillissement)

4. Traitement de vieillissement

* Vieillissement naturel

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage. Certains alliages de la série 6XXX, en durcissant, peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante. [26]

Vieillissement artificiel

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, pendant un temps de maintien qui dépend suivant des objectifs voulus et la nature du matériau traité. Ce type de vieillissement accélère la précipitation et entraîne une dureté plus élevée par comparaison au vieillissement naturel. Il est effectué généralement à des températures variant dans l'intervalle [100°C - 240°C] dans le cas des alliages d'aluminium Al-Mg-Si. [10]

I-7-1 Réalisation d'un traitement thermique

Les traitements thermiques s'effectuent dans des fours présentant un moyen de contrôle de la température pour pouvoir effectuer les traitements de manière très précise et limiter les pertes de chaleur.[1]

Chapitre 2



II-1 Introduction

La mise en forme des matériaux métalliques est une opération qui assure la fabrication des pièces en production de grande série à faible coût. Ce chapitre a pour but de présenter les différents procédés de fabrication des pièces métalliques, puis décrit de manière détaillée les opérations de mise en forme par déformation plastique ; Il existe des nombreux procédés de mise en forme des matériaux métalliques. Notre étude va basée sur une méthode de formage sans enlèvement de matière à l'état massif s'appelé laminage.

II-2 Généralités sur la mise en forme des métaux

Le procédé de mise en forme d'un matériau afin de produire des pièces mécaniques ébauchées ou finies à haute caractéristiques. Cette mise en forme s'effectue à chaud ou à froid par déformation plastique. Selon l'état de départ du matériau métallique on les classer à trois types (le moulage, le façonnage et le frittage). La Figure (II-1) récapitule les principaux procédés de mise en forme des métaux utilisés actuellement. [27]

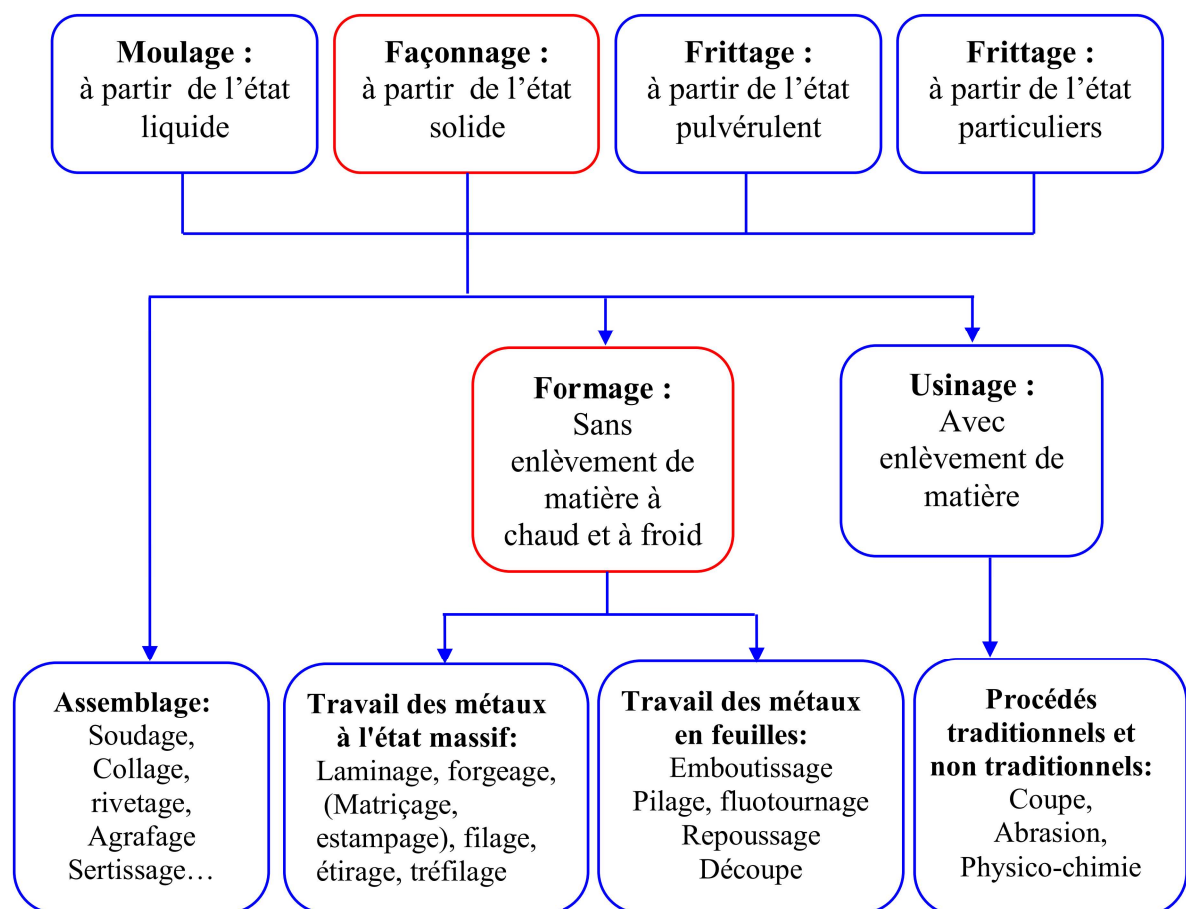


Figure II-1: Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques [27]



II-2-1 La mise en forme à froid

La mise en forme à froid signifie mise en forme d'un métal initialement à 20 °C ; en général, le matériau n'est pas réchauffé volontairement, ni avant, ni pendant l'opération de mise en forme.

D'une opinion physique, on suppose qu'il existe deux grandes classes de mécanismes microscopiques intervenant dans la déformation plastique de métaux :

- Les mécanismes athermiques, qui ne font pas intervenir l'agitation thermique des atomes, sont en général prédominants pour $T \leq 0,2$ ou $0,3 T_f$ (T et T_f températures absolues de déformation et de fusion du métal respectivement). [28]
- Les mécanismes activés thermiquement exigent au contraire l'intervention de l'agitation thermique ; ils sont donc surtout efficaces aux températures élevées ($T \geq 0,5 T_f$) ; il faut cependant noter qu'ils interviennent également aux très basses températures. [28]

II-2-2 La mise en forme à chaud

Mise en forme à chaud signifie préchauffer le métal avant mise en forme à la température la plus élevée possible, c'est-à-dire permettant l'obtention d'un produit aux propriétés acceptables.

Toute augmentation de la température du métal entraîne une augmentation de la distance entre les atomes, ce qui entraîne une diminution de la force de la liaison entre eux, de plus, les dislocations seront plus libres de se déplacer dans le cristal et donc le métalliseur sera réduit par l'augmentation de la température. Le formage à chaud est effectué à une température supérieure à la température de recristallisation du métal ou de l'alliage. [29]

II-3 les Procédé de mise en forme des métaux

La formation de matériaux est l'une des méthodes de production les plus utilisées dans les industries mécaniques et peut être réalisée à chaud ou à froid, ces procédés sont nombreuses et variées, tel que:

- ✓ Les Procédés de forgeage.
- ✓ Les Procédés d'Emboutissage.
- ✓ Les Procédés de Filage.
- ✓ Procédé de tréfilage.
- ✓ Procédé de Laminage.



II-3-1 Procédé de forgeage

Le forgeage consiste en des procédés de déformation plastique dans les quels une pièce métallique est mis en forme par l'intermédiaire d'outils ou de matrices (appelées aussi empreintes) [30]. D'autre façon on dit que ce procédé permet d'obtenir, à partir d'une pièce de formes géométriques simples (souvent un lopin issu de laminage), une pièce aux formes géométriques extérieures complexes.

Les matériaux utilisés lors des procédés de forgeage ont une bonne ductilité. Cette caractéristique représente l'aptitude de l'alliage à se déformer de manière plastique. Dans le cas de l'estampage ou du matriçage, le forgeage est un procédé en concurrence directe avec le moulage (excepté dans le cas de pièces de formes intérieures complexes). Les problématiques de tracé de pièces forgées sont identiques à celles des pièces moulées (plan de joint, dépouille, variation de section continue...).

La déformation plastique génère un fibrage qui améliore les performances mécaniques. Ce qui permet de réduire les dimensions, le poids, l'inertie, les vibrations, pour les même efforts.

Les techniques de forgeage plus récentes se regroupent sous le terme de forgeage de précision ou forgeage «net Shape». Cette technique se décline en trois processus de forgeage type : l'extrusion en matrice fermée (injection à froid), le forgeage à chaud suivi d'un calibrage, le forgeage à mi-chaud. [31]

Ce type de technique se caractérise par des matrices de formes géométriques complexes et précises car il n'y a pas de bavure (Figure II-2).



Figure II-2 : Comparaison forge conventionnelle, forge de précision [32]

II-3-1-1 Forgeage à chaud (ou forgeage libre)

Le forgeage à chaud s'effectue dans le domaine de déformation plastique du matériau par application d'un effort qui génère une contrainte supérieure à la limite de plasticité de la pièce à la température de chauffe [33]. Il est le plus souvent exécuté à chaud et conduit à l'obtention d'ébauche dont la forme est assez proche de la pièce finie. La matière d'œuvre est comprimée suivant une direction et se déplace librement suivant les deux autres.



Le forgeage libre permet de réaliser toutes les formes possibles quel que soit le matériau de la pièce mais il est utilisé pour réaliser des pièces unitaires ou en petite série.

II-3-1-2 Le forgeage à froid (ou extrusion)

Le forgeage à froid est un procédé permettant d'obtenir une dent forgé présentant une haute résistance, une bonne précision dimensionnelle et un état de surface nécessitant moins d'opérations d'usinage de finition. Mais le forgeage à froid demande des presses de puissance élevée, donc coûteuses. Il n'intéresse que les faibles déformations et peut entraîner des problèmes métallurgiques. [29]

II-3-2 Procédé d'Emboutissage

Emboutir:« Travailler une plaque de métal au marteau et sur une enclume, de manière à la rendre concave d'un côté et convexe de l'autre » [34] donc l'emboutissage est un procédé de mise en forme des tôles d'acier [35], qui consiste à venir déformer plastiquement une tôle métallique mince (en général d'épaisseur inférieure à 3 mm) pour générer, à partir d'une surface souvent plane, une forme complexe de géométrie non développable. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie automobile pour fabriquer les ouvrants des véhicules (portières, capot, coffre, toit ...) mais également dans les industries aéronautique, de l'électroménager, de l'emballage alimentaire, etc. [36]

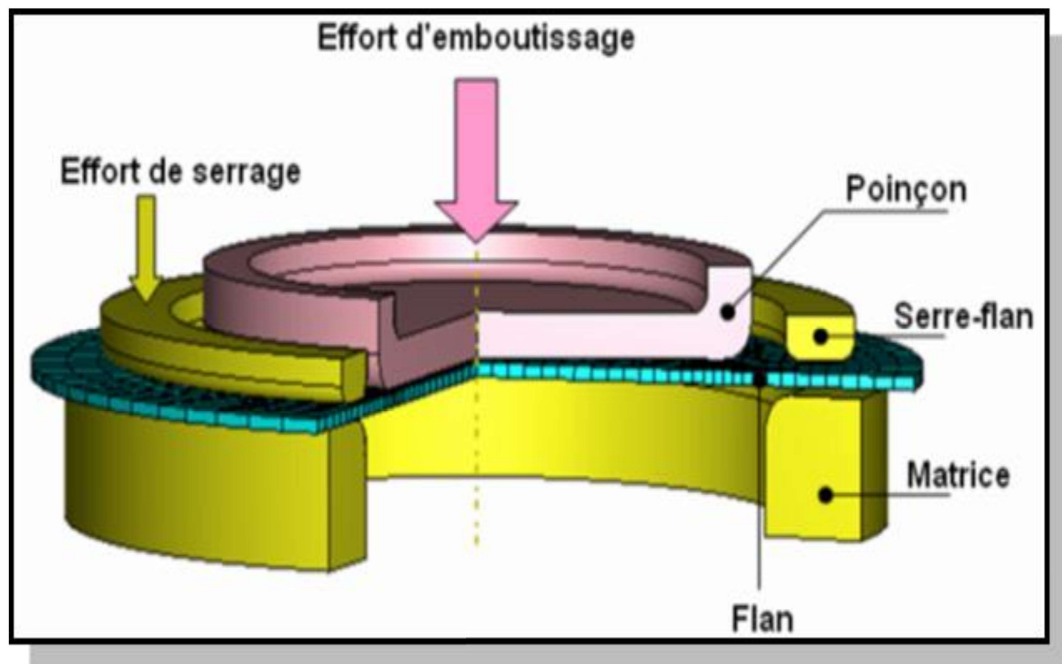


Figure II-3: Procédé d'emboutissage [37]



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

- une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce.
- un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle
- un serre-flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.
- des joncs sont parfois utilisés pour freiner le glissement de la tôle (retenue de l'acier). [38]



Figure II-4: Étapes de la production de canettes à partir de découpes circulaires par emboutissage profond, emboutissage de reprise et étirage de parois.

Il existe deux techniques d'emboutissage [39]:

II-3-2-1 L'emboutissage à froid

Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est utilisée sur un outillage double effet ou un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique. En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes. A ceci, il faut ajouter d'une part l'effet de



l'écrouissage apparaissant lors de la mise en forme et se traduisant par un durcissement structural et une baisse de la ductilité. D'autre part, la création de contraintes résiduelles au sein de la pièce finie en limite ses applications (risque de rupture fatigue). [37]

II-3-2-2 L'emboutissage à chaud

Principalement utilisé sur presses hydrauliques simple ou double effet, le formage de fonds de réservoir en acier est le plus important domaine d'application. Cette technique facilite la déformation du matériau, permet l'emboutissage de pièces profondes par chauffage du flan (et de la matrice) et évite l'écrouissage et la formation de contraintes résiduelles. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid du fait de l'inertie de chauffage. De plus les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement.

Enfin, cette technique nécessite des mises au point de la sécurité plus importantes. [40]

II-3-3 Procédé de Filage

Le filage consiste à placer du métal solide dans un outillage appelé généralement conteneur et de la faire ressortir par un orifice plus petit en exerçant une poussée. À partir d'un certain effort, il y a un écoulement plastique à travers la filière. Cette dernière peut avoir des formes variées. [28]

II-3-3-1 Le filage direct

La billette est un cylindre plein de métal chauffée, et placée dans le conteneur. Un poinçon exerce une poussée. Le métal est d'abord plaqué contre la filière et file à travers la filière en prenant sa forme définitive Figure II-5. [28]

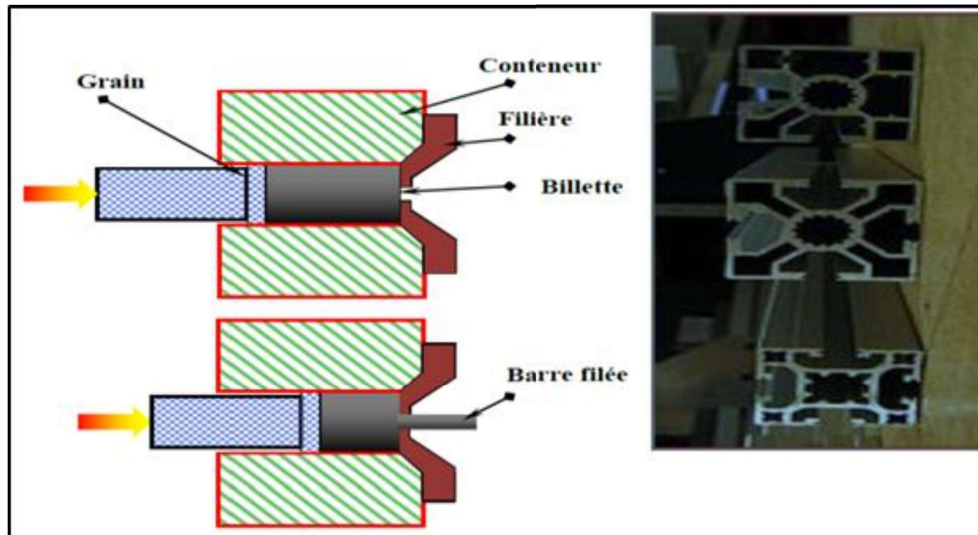


Figure II-5: Schéma du filage direct.

II-3-3-2 Le filage inverse

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

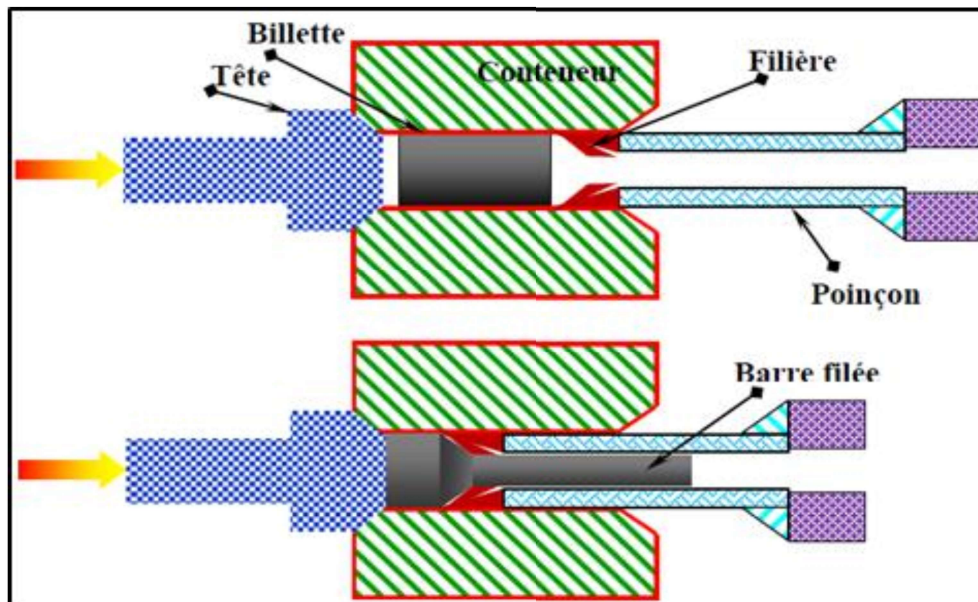


Figure II-6: Schéma du filage inverse.

II-3-4 Procédé de tréfilage

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique en forçant son passage dans une filière, le métal s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. La filière forme un cône de



demi-angle au sommet appelé angle de filière. Du fait de la symétrie axiale du procédé, la déformation est dite axisymétrique.

Le taux de déformation par tréfilage est défini par la relation suivante :

$$\varepsilon = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) \cdot 100\% \quad (\text{II-1})$$

ε : Taux de réduction en %.

S_0 : Section initial du fil machine en mm².

S : Section final du fil tréfile en mm².

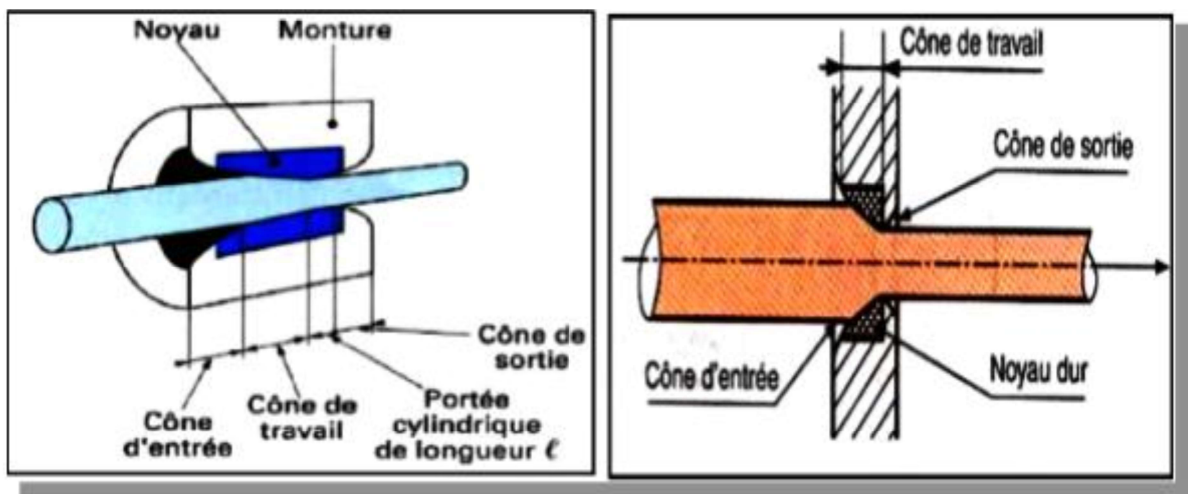


Figure II-7: Schéma de principe de tréfilage et fil dans la filière [41].

II-3-4-1 Les machines de tréfilage

Les types de tréfileuses sont:

- Les machines mono passes.
- Les machines multiples (tréfileuses continues, tréfileuses à accumulation, tréfileuses à glissement)

II-3-5 Procédé de Laminage

Cette opération peut intervenir à chaud ou à froid ; elle consiste à déformer plastiquement le métal à l'aide de deux cylindres pour obtenir des tôles plates. Le métalliste fortement écroui et souvent présente une texture à la suite de cette transformation. [1] La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient de façon discontinue par passes successives dans le même laminoir ou en continu en utilisant des laminoirs placés en série.

Au cours du laminage, la déformation plastique du métal se fait essentiellement dans le sens du déplacement du lingot dont la longueur augmente à chaque passe. [28]

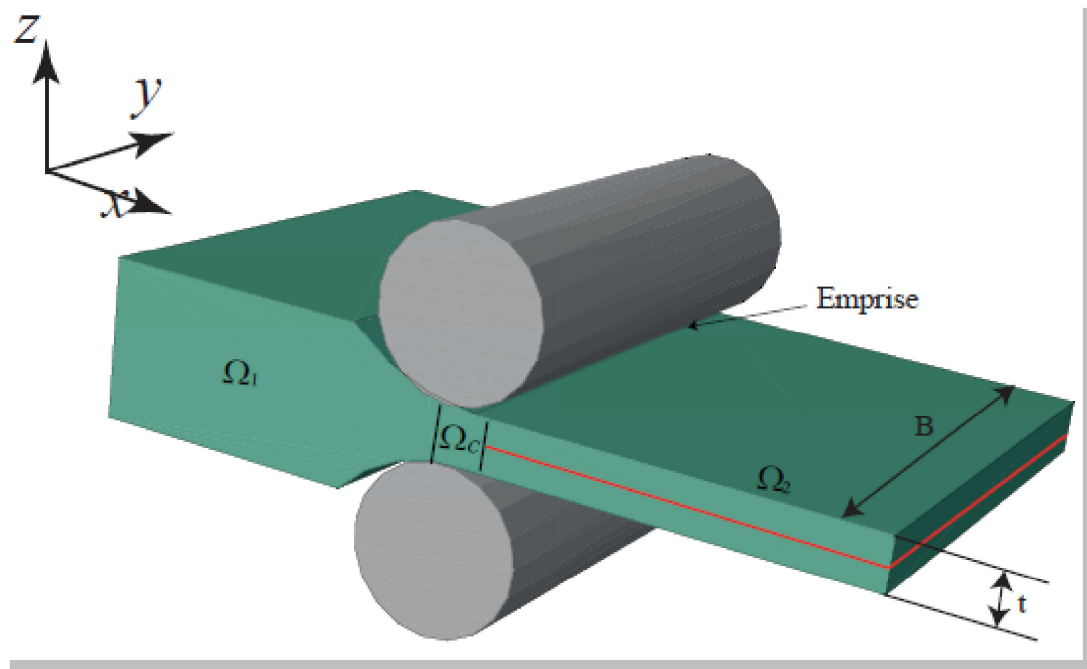


Figure II-8: le laminage des tôles métalliques [42]

II-3-5-1 Principe de laminage

Le laminage consiste à faire passer entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale du lingot. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés (figure II-9). Il se crée donc des forces de frottement qui entraînent l'aluminium par ses deux faces et le forcent à passer entre les cylindres.

L'effort appliqué est supérieur à la résistance à la déformation du métal. Ses grains s'allongent. Son épaisseur diminue et il s'écroute. Sa résistance à la déformation augmente, sa limite d'élasticité aussi. [28,38]

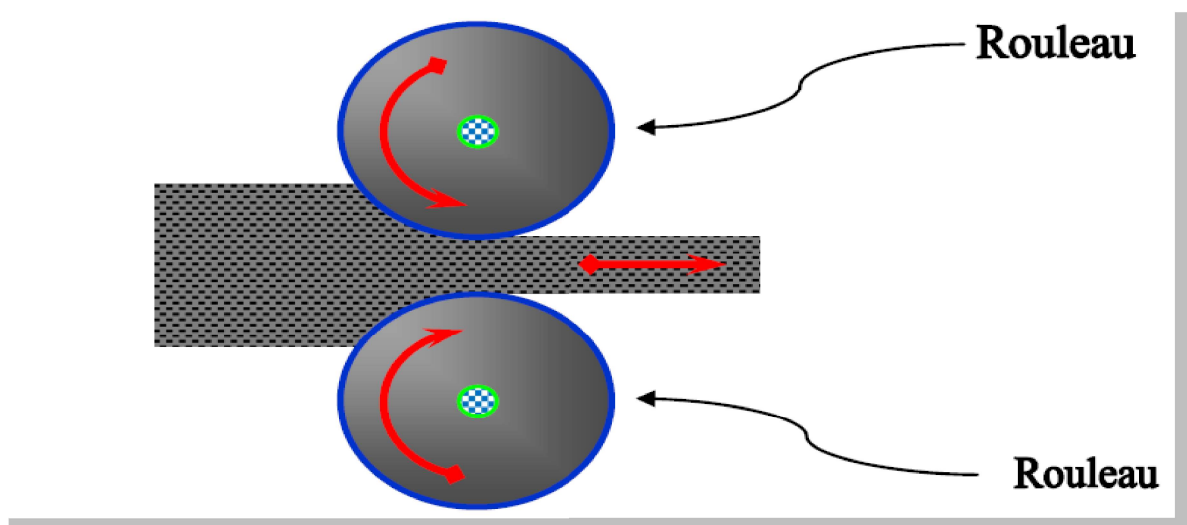


Figure II-9: Principe de laminage [28]



II-3-5-2 Types de laminage

II-3-5-2-1 Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales: la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid. [43]

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit.

Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface. Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand. Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise. [28]

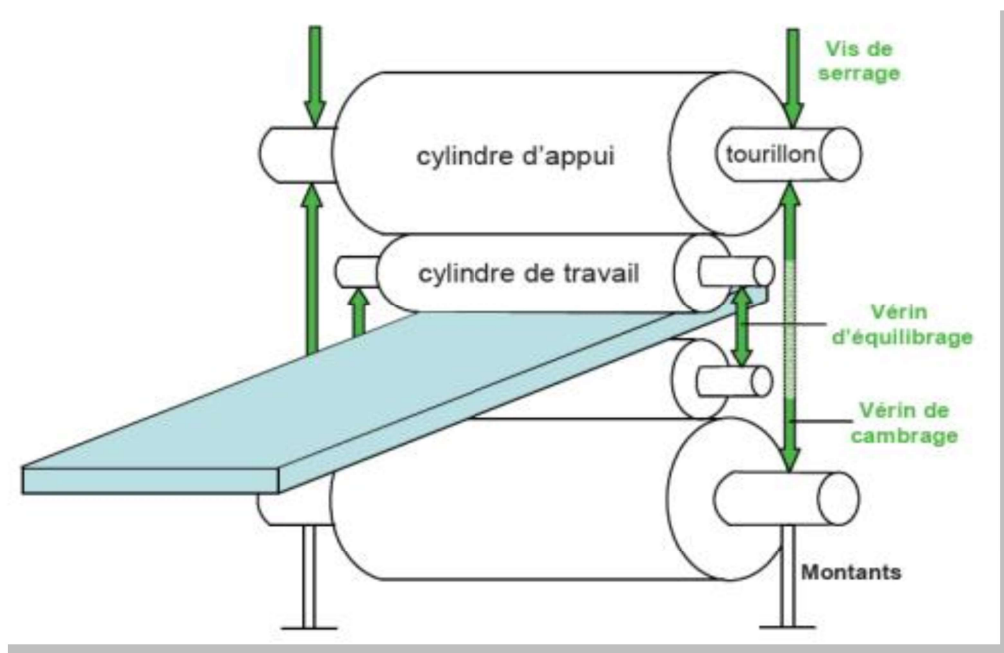


Figure II-10: Schéma d'une cage quarto de laminage [43]

Les outils utilisés pour les transformations à chaud sont analogues à ceux employés pour les autres produits sidérurgiques ; ce sont :

- Soit le train à bandes ou le laminoir Steckel.

Pour les produits plats minces conditionnés sous forme de bobine.



- Soit les trains duo ou quarto pour les tôles fortes.
- Soit les trains duo et trio pour les produits longs.

Il y'a recristallisation des grains après passage dans les cylindres (figure II-11).

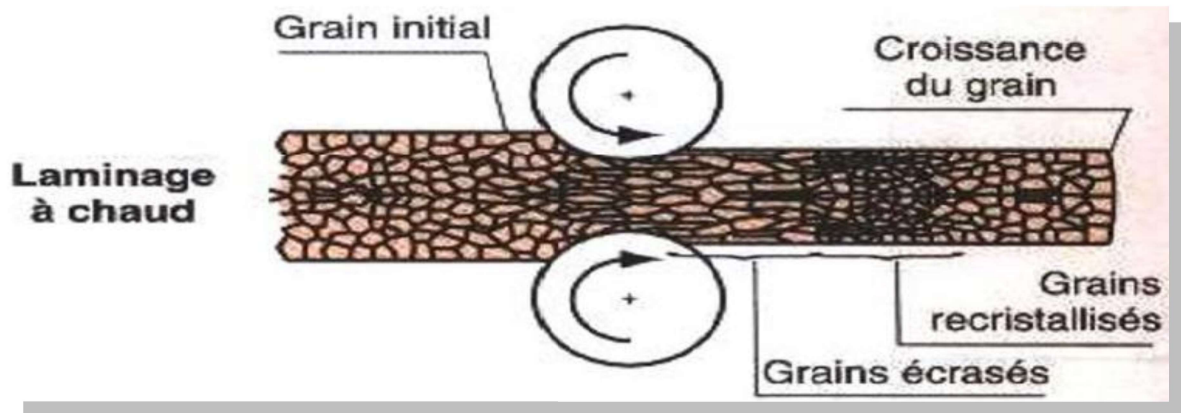


Figure II-11: Schéma de principe de laminage à chaud [41]

II-3-5-2-2 Laminage à froid

Le laminage à froid provoque un écouissage qui introduit dans le métal de nombreux défauts et en particulier une forte densité de dislocation. L'énergie interne du métal écroui est alors supérieure à l'énergie du cristal parfait. [44]

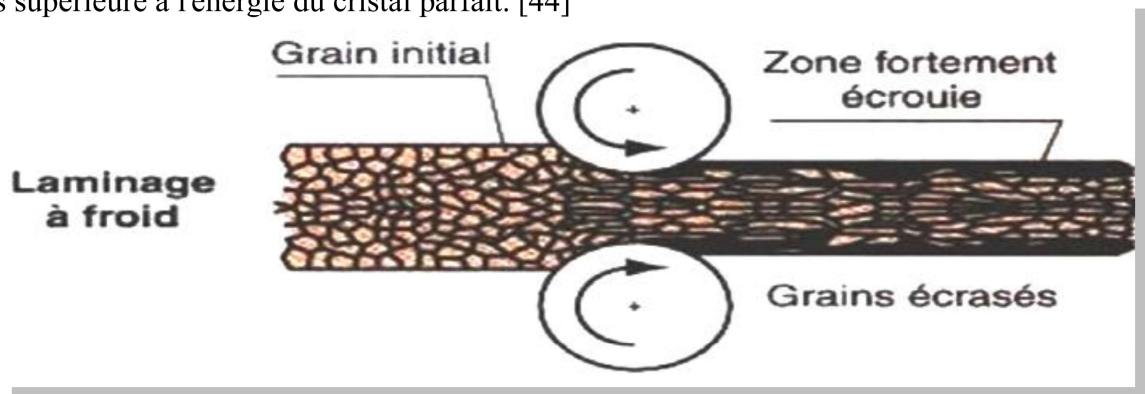


Figure II-12 : Schéma de principe de laminage à froid [38]

II-3-5-3 Projet et taux de déformation

La différence entre l'épaisseur de la pièce métallique initiale et laminée s'appelle le projet. Donc si t_0 est l'épaisseur initiale et t_f est l'épaisseur finale, puis le projet d est donné par [45]:

$$d = t_0 - t_f \quad (II-2)$$

Le taux de déformation par laminage est défini par la relation suivante [29]:

$$\varepsilon = \left(\frac{h_0 - h}{h_0} \right) \cdot 100\% \quad (II-3)$$

ε : taux de réduction.

h et h_0 : hauteur final et hauteur initial de la tôle non laminée en mm.

Chapitre **3**



III-1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter notre alliage, les traitements thermiques appliqués et les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des échantillons telles que le microscope optique, la micro-dureté et la diffraction des rayons X (DRX).

III-2 Compositions chimiques des alliages étudiés

Dans ce travail notre choix s'est porté sur un alliage à base d'aluminium du système Al-Mg-Si fourni par le département de métallurgie (Université de Manchester).

La composition initiale en éléments d'addition de cet alliage est donnée dans le tableau III-1.

Mg%	Si%	Cu%	Fe%	Mn%	Cr%	Zn%	Ti%	B%	Al%
0.35	0.30	0.001	0.17	0.030	0.001	0.003	0.010	0.0011	Balance

Tableau III-1: la composition chimique de l'alliage étudié.

L'alliage étudié est réceptionné se forme d'une tôle d'épaisseur de 3 mm.



Figure III-1: un échantillon d'épaisseur de 3 mm

III-3 Traitements thermiques et thermomécaniques appliqués

Les échantillons de l'alliage ont été étudiés dans différents états suite à l'application de différents traitements thermiques et thermomécaniques.

III-3-1 Traitements thermiques

Le système Al-Mg-Si constitue une classe importante d'alliages industriels à caractéristiques mécaniques moyennes, qui sont obtenues par application des traitements thermiques. Ces derniers ont été effectués dans un four du type NABERTHERM. Les échantillons d'alliage ont subi les traitements thermiques avec une vitesse de chauffage de 5°C/min. comportant les étapes suivantes :



- Mise en solution (homogénéisation), à une température élevée (530 °C) pendant un temps du maintien.
- Trempe à l'eau froide (refroidissement rapide) afin d'obtenir à la température ambiante, une solution solide sursaturée.



Figure III-2: Four de traitement thermique NABERTHERM.

III-3-2 Traitements thermomécaniques

Le traitement thermomécanique appliqué dans ce travail est le laminage à froid.

La mise en forme de tôles métalliques par laminage est une technique très courante. Cette technique a pour but de diminuer l'épaisseur d'un métal pour l'utiliser dans l'industrie. Néanmoins, il semble probable que cette technique influe sur les propriétés du matériau.

Dans cette étude, la déformation du matériau a été effectuée en utilisant un laminoir électrique 160 mm plaque + fil triphasé, équipé de deux cylindres de 90 mm de diamètre. L'épaisseur finale de l'alliage est de 0,15 mm.

Pour réaliser cette étude plusieurs taux de déformation par laminage sont mesurés (Tableau III-2). Les différents taux de réduction de l'épaisseur ϵ sont calculés à partir de l'équation (II-3).



		Épaisseur (mm)	Variation d'épaisseur (%)
Laminage 1	Avant	3	0
	Après	2.63	12.24
Laminage 2	Avant	2.63	12.24
	Après	2.04	32.52
Laminage 3	Avant	2.04	32.52
	Après	1.24	58.46
Laminage 4	Avant	1.24	58.46
	Après	0.83	72.22

Tableau III-2: Les différents taux de réduction.



Figure III-3 : laminoir de type électrique 160 mm plaque + fil triphasé

III-4 Préparation des échantillons

Pour l'étude métallographique, l'observation en microscope optique nécessite une bonne préparation de la surface. Les échantillons traités ont subi un polissage mécanique et ensuite une attaque chimique.

a) Polissage des échantillons

Les échantillons sont polis mécaniquement sur une polisseuse mécanique (FORCIPOL 2), avec des papiers abrasifs en carbure de silicium, du grade 100 jusqu'au grade 2000, placés sur un disque rotatif puis la finition avec la pâte diamantée de granulométrie

6 μm et 3 μm . Suivi d'un nettoyage à l'eau distillée et séché à l'air, à la fin de chaque étape de polissage pour enlever les plus grosses particules qui pourraient se griffer sur la surface.





Figure III-4: polisseuse mécanique (FORCIPOL 2).

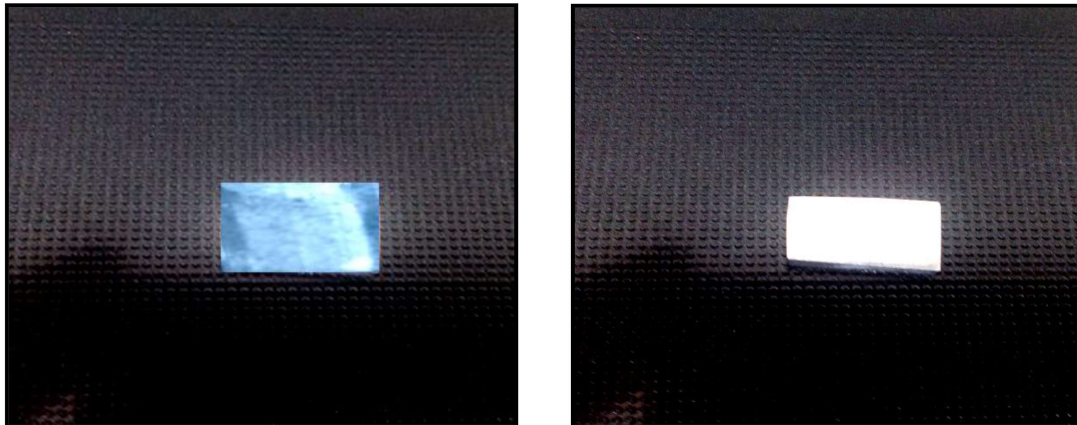
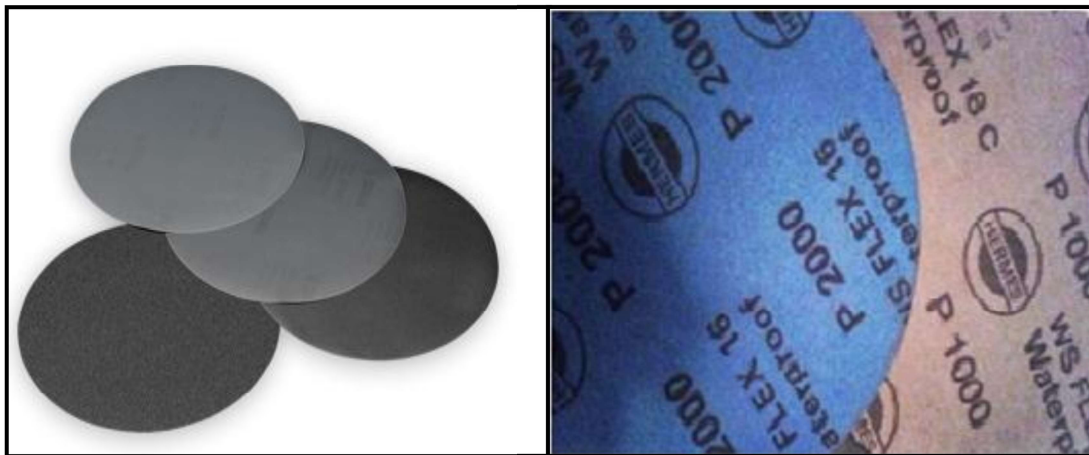


Figure III-5: papiers abrasifs.



Figure III-6: échantillon avant polissage

Figure III-7: échantillon après polissage

b) attaque chimique

La mise en évidence des phases présentes et les joints des grains est obtenue suite à une attaque chimique par un réactif d'attaque approprié, dit Killer dont la composition est de:

- Acide fluorhydrique HF : 5 ml.
- Acide Chlorhydrique HCl: 9 ml.
- Acide nitrique (HNO₃): 17 ml.
- Eau distillée H₂O : 78 ml.

La durée d'attaque dans le bain varie de 20 à 30 secondes.

III-5 Techniques expérimentales utilisées

III-5-1 Microscopie optique

La microscopie optique sert à déterminer où à observer la microstructure de l'échantillon (taille des grains, forme des grains ainsi que celles des précipités,...etc.), ainsi que les évolutions microstructurales des alliages ayant subi des traitements thermiques (isothermes et isochrone). La structure peut être modifiée par tous les traitements mécaniques, thermiques et chimiques que subit le métal indépendamment des transformations physico-chimiques qui peuvent résulter de ces traitements.

Les microscopes optiques métallographiques permettent l'observation par réflexion d'une surface métallique parfaitement plane, obtenue par polissage mécanique et ayant subie des traitements thermiques voulus. On colore différemment les phases composant des alliages étudiés par un réactif. [17]

Pour notre étude métallographique. Les échantillons sont observés avec un microscope optique de type EUROMEX équipé d'une caméra photographique qui permet la production d'un grand nombre de différentes images microscopiques avec des grossissements différents, comme on peut l'observer par ordinateur (Figure III-8).

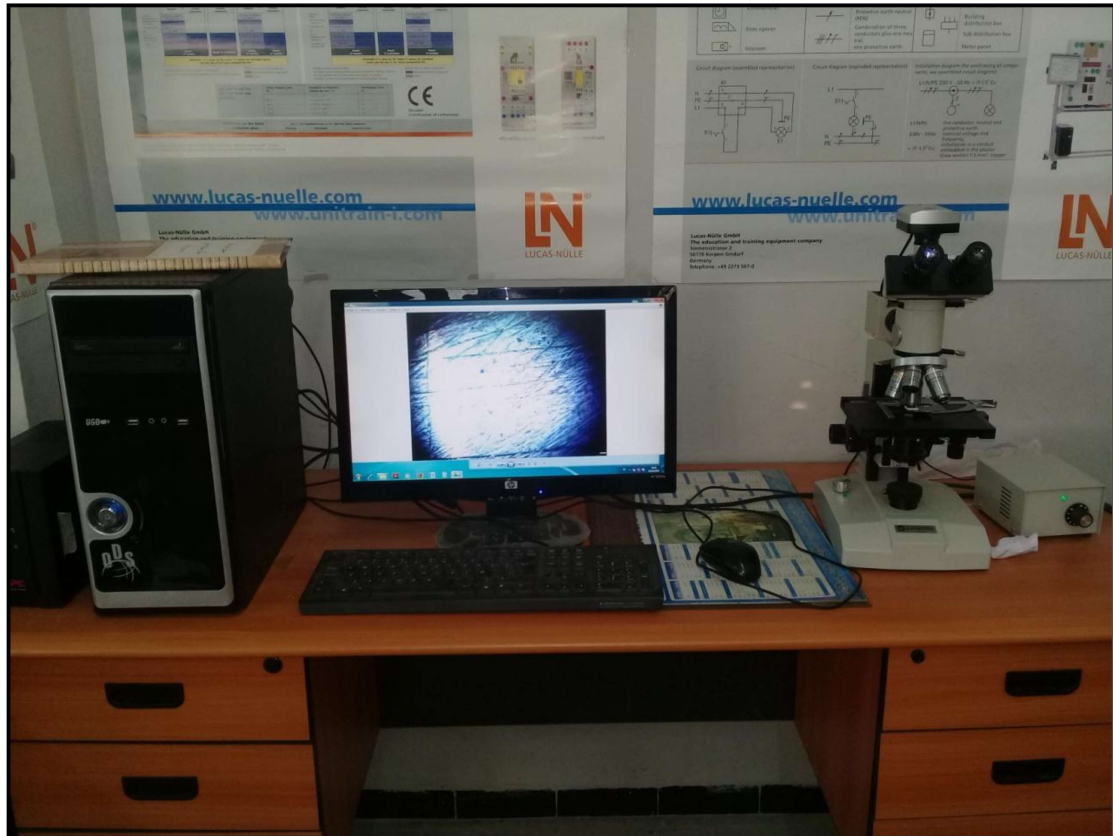


Figure III-8: Le microscope optique de type EUROMEX.

III-5-2 Mesures de la microdureté Vickers (Hv)

La microdureté Vickers est une caractéristique mécanique des alliages suivie durant les traitements thermique ou thermomécaniques. Elle permet la mesure de la dureté des matériaux sans les endommager. La dureté d'un métal est définie comme la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible.

Le principe de l'essai consiste à exercer sur la surface de l'échantillon à étudier une force constante pendant un temps (t) donné à l'aide d'un poinçon en diamant très dur appelé pénétrateur, ce dernier a une forme pyramidale à base carrée (Figure III-9), la dureté Vickers (Vickers Hardness) est alors définie par le quotient de la charge appliquée F par la surface de l'empreinte permanente S.

F : la charge appliquée (en kg) par le pénétrateur.

S : la surface latérale (en mm²) de l'empreinte pyramidale. Elle est définie par :

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (\text{III-1})$$



La dureté Vickers H_v est liée à la charge appliquée (F) et la longueur de la diagonale de l'empreinte (d) par la relation :

$$H_v = \frac{1.854 \cdot F}{d^2} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (\text{III-2})$$

Avec l'angle θ , au sommet entre deux faces opposées, est de $136^\circ \pm 0,5^\circ$; Il suffit de mesurer la longueur de la diagonale de la base carrée de l'empreinte pour accéder à la valeur de la dureté Vickers; on tire les valeurs de la dureté à partir de deux longueurs d_1 et d_2 des deux diagonales et on fait la moyenne et ceci est répété pour dix empreintes (Figure III-9) ; on prend ensuite la valeur moyenne de ces dix mesures, laquelle sera prise comme la valeur de H_v pour le matériaux (ou l'état) étudié.

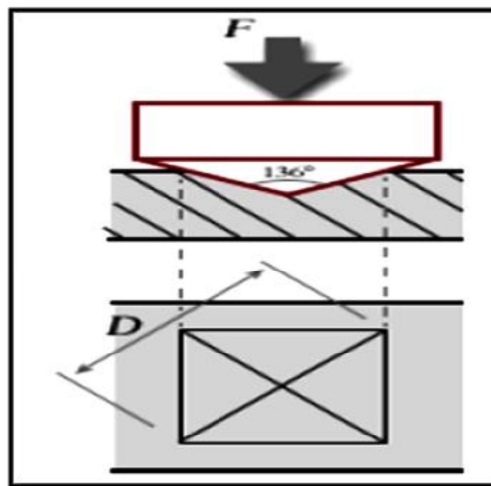


Figure III-9: Principe de la mesure de microdureté Vickers.

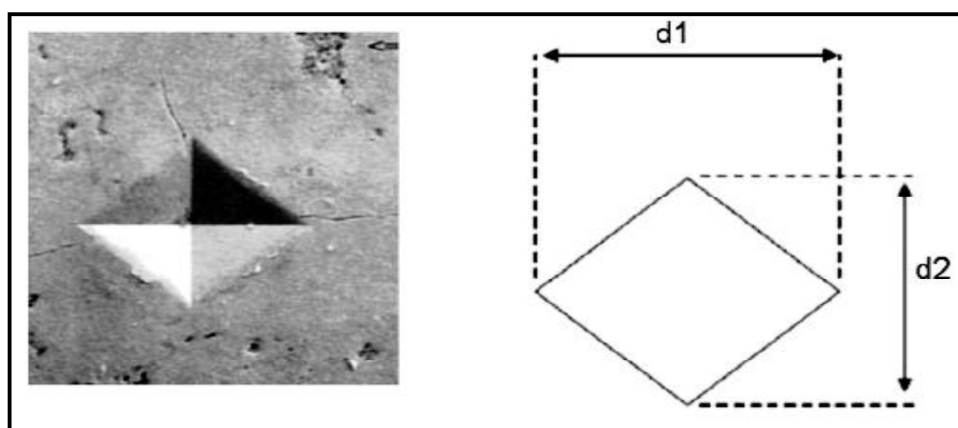


Figure III-10: la base carrée de l'empreinte est la moyenne des d_1 et d_2

Le pénétrateur de type Vickers est utilisé pour les essais de dureté et les essais de microdureté. Les essais de dureté correspondent à des charges comprises entre 5 et 100 Kg



force et les essais de microdureté correspondent à des charges inférieures à 1000 g et relatent la dureté sur des domaines microscopiques.

Dans notre étude, les échantillons prélevés pour la microdureté Vickers ont été tout d'abord été polis jusqu'à un polissage à la pâte diamantée de granulométrie 1 μ m. Les mesures sont réalisées sous une charge de 300 g appliquée pendant 15 secondes, à l'aide d'un microduremètre Vickers de marque "AFFRI" (figure III-10). Pour chaque échantillon, la valeur de la microdureté correspondant représente la moyenne de quatre mesures prises sur la coupe longitudinale de nos échantillons.



Figure III-11: Microdureté AFFRI

III-5-3 Diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X (diffractométrie X) permet de déterminer les distances interatomiques et l'arrangement des atomes dans les réseaux cristallins. Comme les rayons X sont diffractés de façon différente par les constituants du réseau suivant la construction de ce dernier, l'irradiation de la matière par rayons X permet de connaître sa nature cristallographique. L'étude des structures cristallines est effectuée avec des échantillons monocristallins, par contre pour la caractérisation des matériaux on utilise plus souvent des échantillons poly cristallins ou des poudres. De nombreuses applications ont ainsi été développées permettant, par exemple, d'identifier les formes cristallographiques ou phases, de déterminer les contraintes internes et les textures, ou encore de caractériser la surface d'un matériau.

Le diffractomètre à rayon X est constitué de trois parties:



1- la source des rayons X: C'est un tube contenant deux pôles, l'un est un filament (Cathode) chauffé par l'effet Joule l'autre s'appelle l'anode qui est une plaque de Cuivre pour la plupart des diffractomètres. Les deux pôles soumissent à un potentiel de quelques dizaines de kilovolts qui accélèrent les électrons venant du filament. L'interaction électron-matière va entraîner la matière dans un état excité, la désexcitation est faite par l'émission de rayons X ; ce dernier est mono-chromatisé par un filtre métallique (nickel).

2- le porte échantillon: Cette partie peut avoir beaucoup de formes et beaucoup de fonctions (fixe, rotatif) selon la nature des échantillons (solide, poudre...etc.) et aussi selon les conditions expérimentales choisies.

3- le détecteur des rayons X diffractés: La matière va émettre un rayonnement de même longueur d'onde que le rayonnement incident mais dans des directions différentes de celle du faisceau initial. Chaque atome va être la source d'un rayonnement diffusé et l'onde observée dans une direction donnée sera la résultante de la superposition des ondes provenant de chaque atome. La diffraction des rayons X par les cristaux doit vérifier la loi de Bragg:

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (\text{III- 3})$$

n : Ordre de la diffraction.

λ : Longueur d'onde du faisceau de rayons X.

d_{hkl} : Distance réticulaire.

θ : Angle d'incidence des rayons X.

Quand la différence de marche entre les rayons incidents et les rayons diffractés par les plans atomiques est égale à un nombre entier de fois la longueur d'onde, il y a interférence constructive. Soit 2θ l'angle entre la direction des rayons incidents et celle des rayons diffractés (figure III-12)

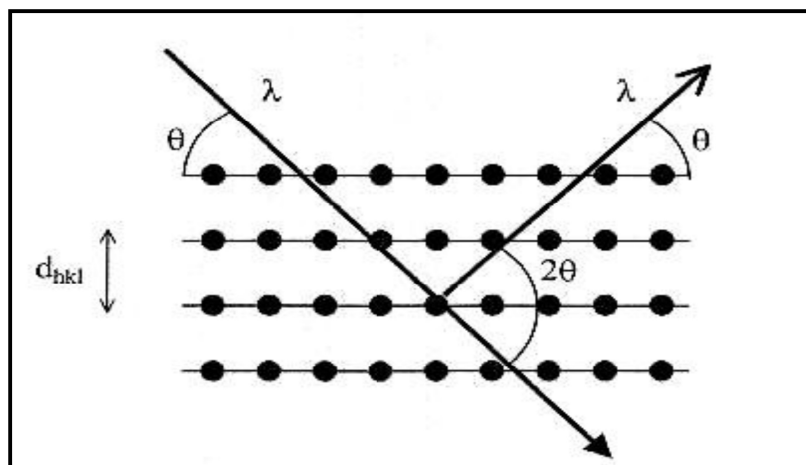


Figure III-12: Famille de plans cristallins en condition de Bragg.



Dans notre travail, l'enregistrement de nos spectres a été effectué par un diffractomètre automatisé Siemens de type ARL EQUINOX opérant en géométrie Bragg-Brentano (figure III-13).



Figure III-13: Diffractomètre ARL EQUINOX.

Chapitre **4**



IV-1 Introduction

Ce chapitre représentés les résultats obtenus à partir de différentes techniques expérimentales. Commenant par les résultats de l'analyse microstructurale des échantillons d'alliage d'aluminium Al-Mg-Si obtenue par la microscopie optique, ensuite les résultats obtenus par d'autres techniques expérimentaux telles que la diffraction des rayons X et la micro dureté Vickers.

IV-2 Caractérisation par microscope optique (MO)

La figure IV-1 présente la microstructure typique des échantillons d'alliage d'aluminium Al-Mg-Si. Ces échantillons ont été laminés à froid jusqu'à une réduction d'épaisseur de 72,22 % après quatre passes de réduction successives. On observe l'allongement du grain selon la direction du laminage et la présence de précipités répartis d'une façon aléatoire à l'intérieur des grains. On observe aussi quelques grandes insolubles particules, qui ont été formés au cours du processus de fabrication de cet alliage, deviennent plus visibles progressivement avec les taux de déformation le long de la direction du laminage. Ceci est bon accord avec d'autres travaux de recherche. [46-48]

IV-3 Analyse de la microdureté

La figure IV-2 montre la variation de la microdureté (HV) en fonction des différents taux de déformation (0%, 12.24%, 32.52%, 58.46,25% et 72.22%). Les valeurs de la microdureté de ces échantillons sont présentées dans le tableau 1. On observe une Augmentation de la microdureté avec l'augmentation du taux de déformation [47-49]. Cette augmentation de la dureté est probablement due à la forte densité de dislocations introduites par la déformation de l'alliage par laminage à froid qui conduit à l'écroutissage de l'alliage. Ce résultat confirme les résultats obtenus par certains chercheurs [46, 47, 49].

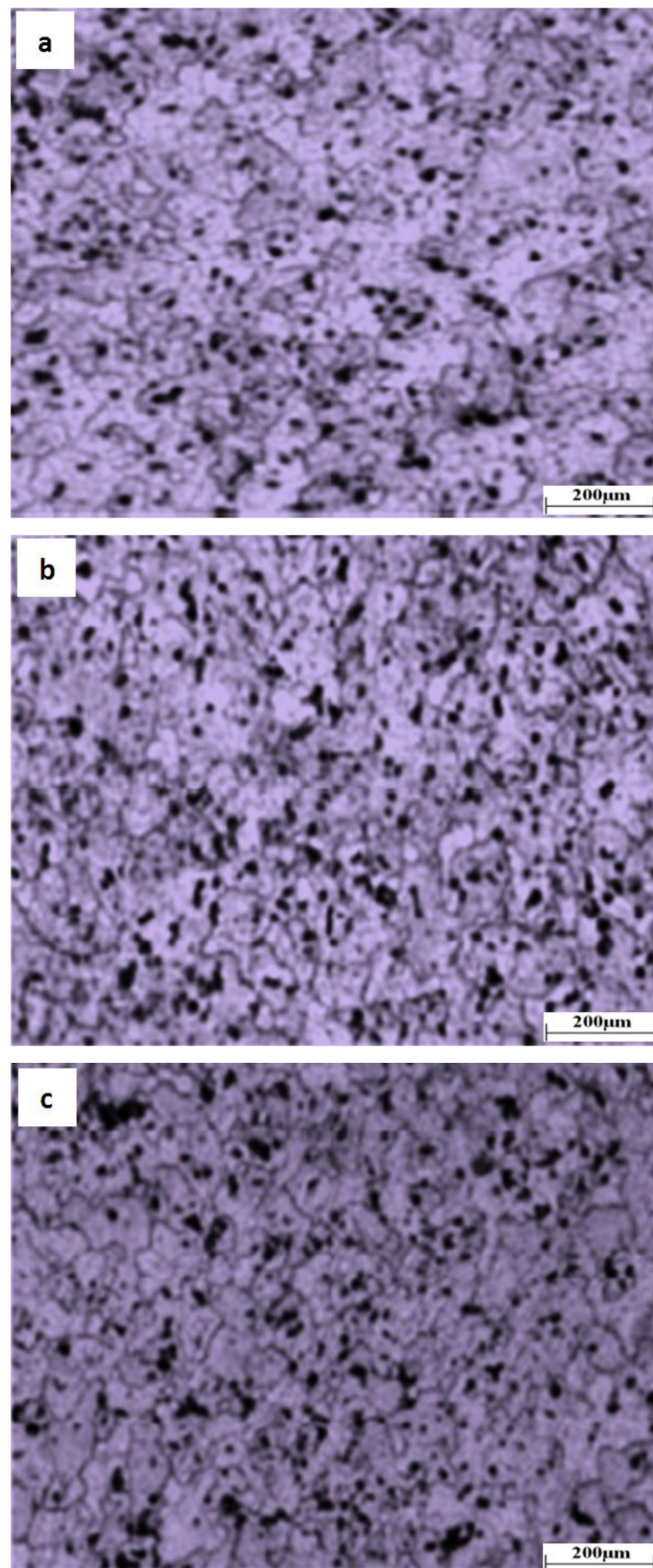


Figure IV-1: Microstructure des échantillons d'alliage pour différents taux de réduction par laminage à froid : (a) 12,24%; (b) 32, 52 %; (c) 72, 22%.



Etat de fil	Nombre d'essais	Taux de déformation ε (%)				
		ε_0 (0%)	ε_1 (12.24%)	ε_2 (32.52%)	ε_3 (58.46%)	ε_4 (72.22%)
Non recuit	1	49,32	61,24	64,5	66,24	71,22
	2	50,02	61,72	65,32	67,25	71,36
	3	50,14	62,14	65,4	66,8	70,86
	4	49,56	61,28	64,78	66,65	70,45
Microdureté (HV)		49,76	61,59	65,00	66,73	70,97

Tableau IV-1: Résultats des mesures de la microdureté d'alliage Al-Mg-Si laminée à froid.

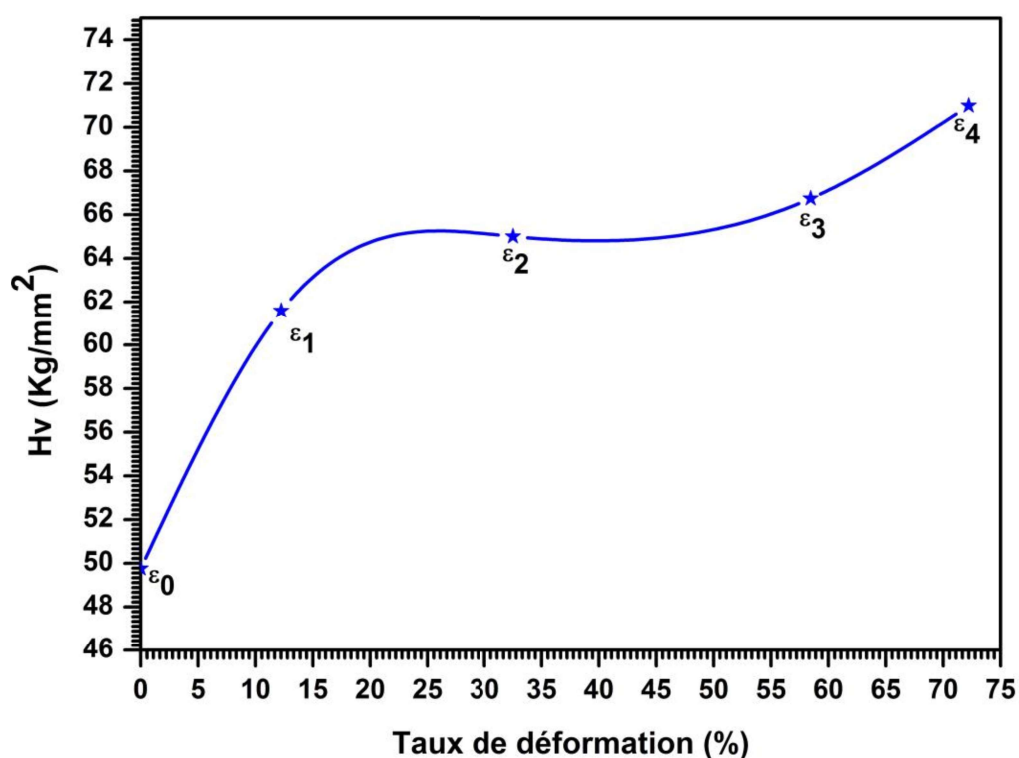


Figure IV-2: Variation de la microdureté Vickers des échantillons d'un alliage Al-Mg-Si laminé à froid en fonction du taux de déformation.

La variation de la microdureté (HV) en fonction du différent taux de déformation (0%, 12.24%, 32.52%, 58.46, 25% et 72.22%) et homogénéisée à 530° pendant 30 minute et 1 heure est représentée sur la figure IV-3, On observe clairement une diminution de la dureté



avec l'augmentation du temps de maintien au cours de ce traitement thermique. Cette diminution de la microdureté est attribuée au phénomène d'adoucissement de l'alliage poussé par le traitement d'homogénéisation, ce qui rend l'augmentation de la ductilité de l'alliage Al-Mg-Si laminé à froid.

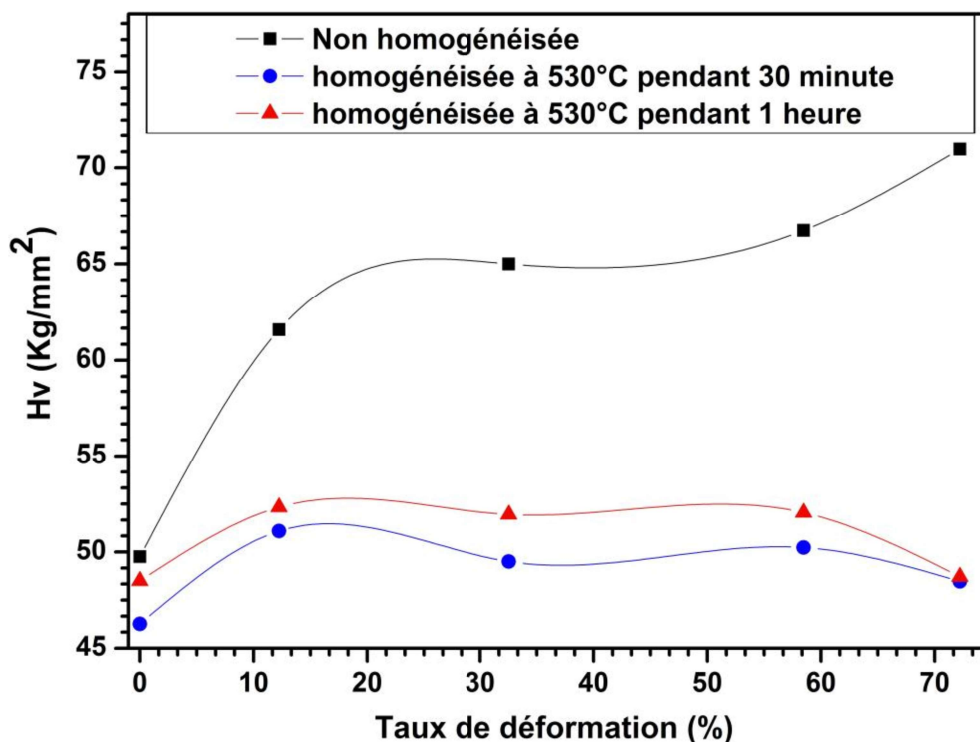


Figure IV-3: Variation de la microdureté Vickers des échantillons d'un alliage Al-Mg-Si laminé à froid et homogénéisée à 530°C en fonction du taux de déformation.

IV-4 Analyse par diffraction des rayons X

La technique de diffraction des rayons X (DRX) est utilisée pour la détermination de la structure des cristaux. Cette méthode est très sensible à toute perturbation de la périodicité du réseau cristallin.

Le spectre de diffraction des rayons X de l'alliage Al-Mg-Si étudié à l'état de réception (ϵ_0 (0%)) de l'alliage Al-Mg-Si est représenté dans la figure IV-4. On observe des pics correspondant à la structure cubique à face centrée CFC de la matrice α -aluminium, Le pic le plus intense est le pic (111) de l'aluminium pur d'après les fichiers ASTM.

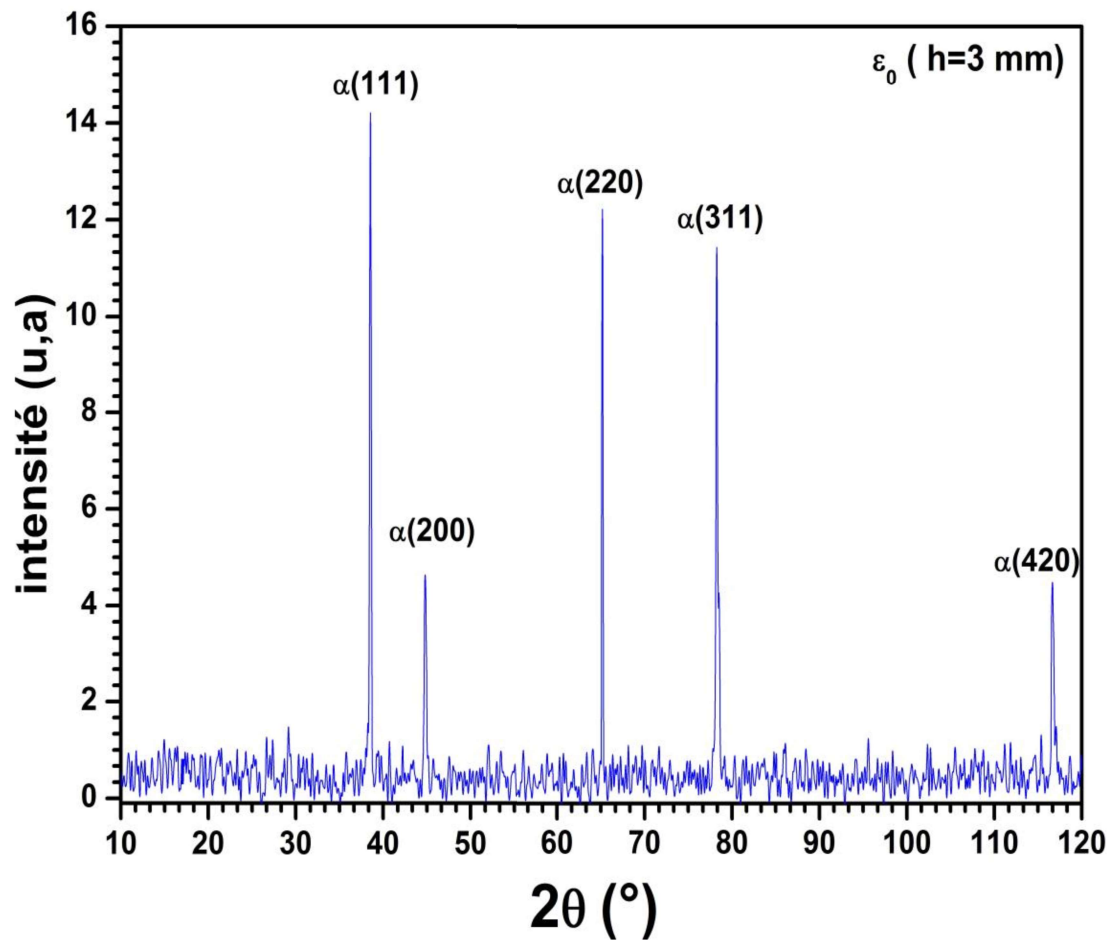


Figure IV-4: Spectre de diffraction des rayons X de l'alliage non laminé (ϵ_0 (0%))

Le Spectre de diffraction des rayons X des échantillons de l'alliage laminé à froid avec un taux de déformation de 72,22% est représenté dans la figure IV-5. On Note également que les cas de diffraction n'ont pas changé après le processus de laminage de l'alliage. Ce résultat a été obtenu par Wang et al [48] qui ont étudié un alliage d'aluminium laminé 5052 AA, et par Menasria et Chaabani qui ont étudié un alliage d'aluminium de la série 6000, laminé à froid. [29].

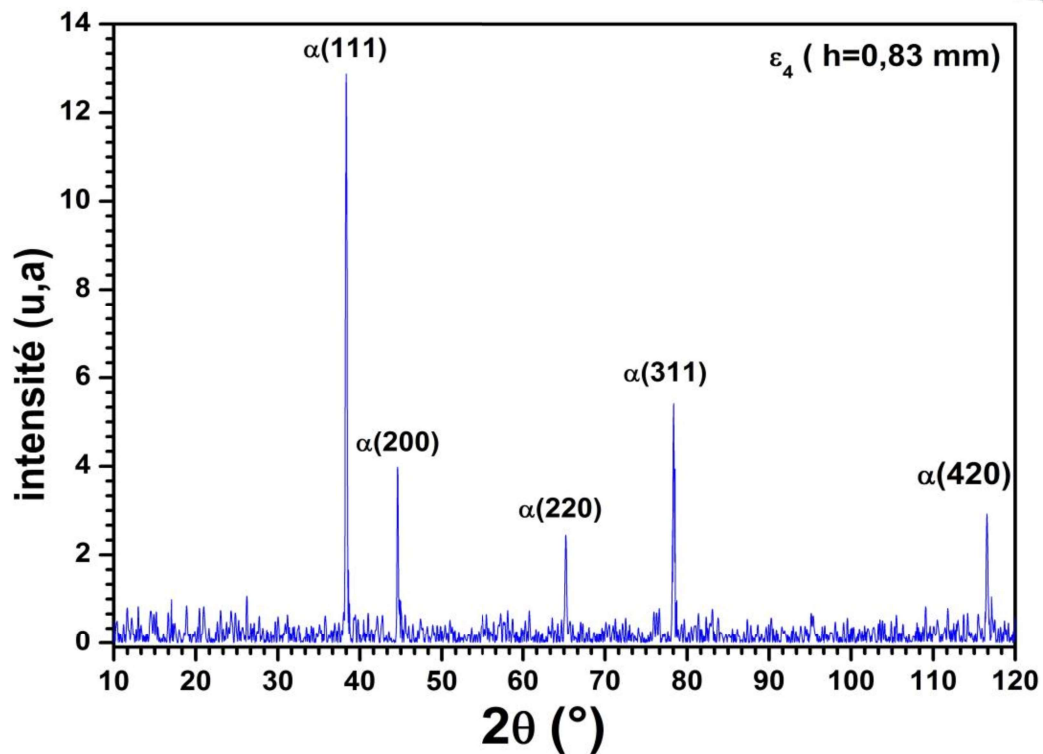


Figure IV-5: Spectre de diffraction des rayons X de l'alliage laminé à froid avec un taux de déformation de 72,22%.

Le décalage des pics dans les spectres de diffraction des RX de l'alliage non laminé et l'alliage laminé à froid à 72,22% sont présentés dans la figure III-5. On note un déplacement des pic vers les basses positions dans le cas de l'alliage laminé à froid à 72,22% par rapport à celui obtenue dans le cas de l'alliage non laminé, comme le pic (111) initialement localisé par l'angle deux thêtas $2\theta=38,54^\circ$ se déplace dans une nouvelle position $2\theta=38,34^\circ$. Ce déplacement peut être lié à l'apparition des précipités internes, qu'ont été formées durant la déformation plastique par laminage à froid.

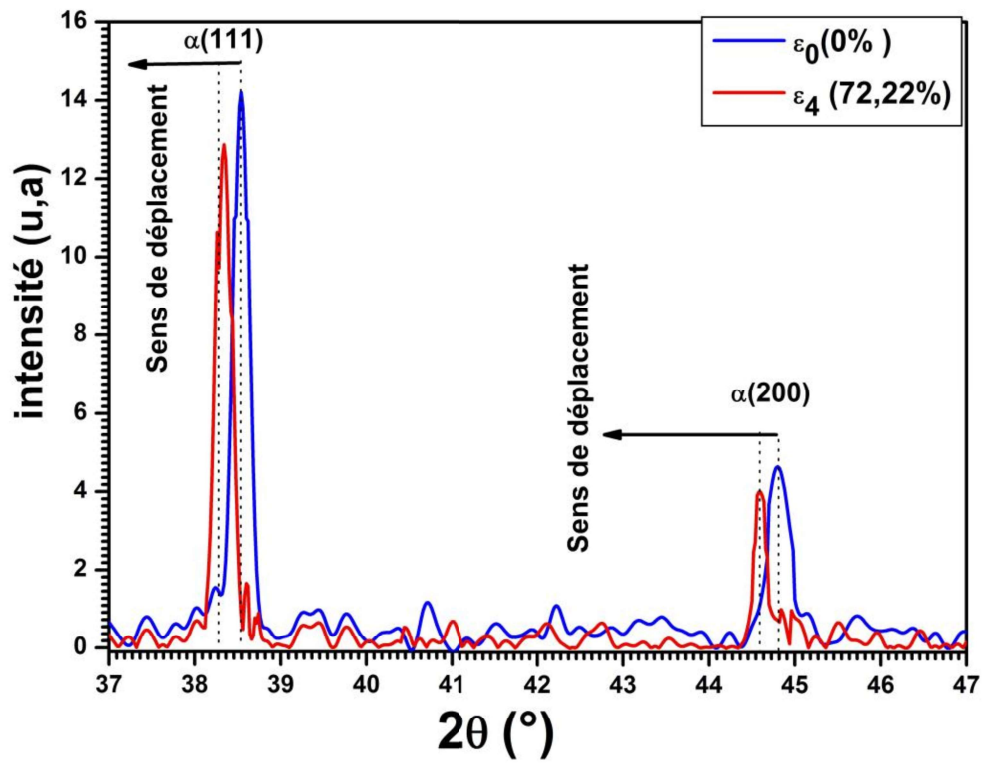


Figure IV-6: Spectres de diffraction des RX de l'alliage non laminé et l'alliage laminé à froid à 72,22%.

Conclusion Générale



Conclusion générale

Ce mémoire a pour but essentiel d'étudier l'effet des traitements thermiques sur la microdureté d'un alliage d'aluminium de la série 6000, ainsi que, l'influence de différent taux de déformation à froid par laminage.

Pour aboutir à nos objectifs, plusieurs techniques expérimentales ont été utilisé essentiellement, la microscopie optique, diffraction des rayons X (XRD) et la microdureté (Hv).

Les résultats expérimentaux obtenu sont montré que les traitements thermiques et la déformation des alliages d'aluminium Al-Mg-Si par laminage à froid, ont les effets suivants:

- Quelques grandes insolubles particules, qui ont été formés au cours du processus de fabrication de cet alliage, deviennent plus visibles progressivement avec les taux de déformation le long de la direction du laminage.
- La formation des dislocations lors de la déformation plastique par laminage à froid augmentent la microdureté.
- L'apparition des précipités internes dans le cas de l'alliage laminé à froid conduit à un décalage des pics (spectres de diffraction des RX) vers les bas angles.

Références

Références

- [1] A. Bourbia, Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba (2010).
- [2] S. Thibault, Thèse doctorat, Université de Basse-Normandie, Caen (2006).
- [3] F. Baira,, M. Zidani, H. Farh, S. Massoudi et al, International Journal of Engineering Research in Africa, 31 (2016) 20-28
- [4] S. Esmaeili, X. Wang, D. J. Lloyd et W. J. Poole, Métal. Mater. Trans., Vol. 34A, (2003), p 751-757.
- [5] S. Esmacili, X. Wang, D. J. Lloyd et W. J. Poolc, Métal. Mater. Trans., Vol. 34A, (2003), p751
- [6] A. Debih, Thèse doctorat, Université Ferhat Abbas, Setif (2018).
- [7] T.B.Vattier, Thèse doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France (2015).
- [8] H. Naoui, Mémoire de master, Mohamed Boudiaf, M'sila (2016).
- [9] P. Mouak, Thèse doctorat, Université d'Orléans, France (2010).
- [10] H. Farh, Thèse doctorat, Université Larbi Ben M'hidi,Oum el bouaghi (2012).
- [11] K. Djemml, H. Farh, R. Guemini, M. Zidani, F. Serradj, International Journal of Engineering Research in Africa, 28 (2017) 1-7
- [12] H. Belghit, H. Farh, T. Ziar, M. Zidani, M. Guemini, Arch Metall Mater, 63(4) (2018) 1643-1648
- [13] H. Farh, R. Guemini, F. Serradj, K. Djemmal, Turk.J.of Phy (35), (2010), p 116-122
- [14] M. Bayarassou, M. Zidani, H. Farh Diffusion Foundation, 18 (2018) 73-78
- [15] T. A. Association, « International alloy designations and chemical composition limit for wrought aluminum and wrought aluminum alloys », 2015.
- [16] H. Farh, K. Djemmal, F. Serradj, R. Guemini, Ann. Chim.Sci. Mat., Volume 35, N0 5, (2010), 283-289.
- [17] D. Far, Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2012).
- [18] A. Asserin-lebert, Thèse doctorat, Ecole National Supérieur des Mines, Paris(2005).
- [19] H. Nemour, Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba (2017).
- [20] A. Chaouaf, I. Trabelssi, Mémoire de master, Université Larbi Tébessi, Tébessa (2017).
- [21] www.alu.menzeken.com «Alliages d'aluminium » 2004.
- [22] T. Abid, Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2007).
- [23] F. Serradj, R. Guemini, H. Farh, K. Djemmal, Ann. Chim.Sci. Mat., Volume 35, N0 1, (2010), p 59-69
- [24] A. Fattah, N. Afify, A. Gadalla, A. Mossad, High Temp - High Press, 31, (1999), p 613
- [25] J. Dent, Journal of Dentistry, 25 (1997) 49-52.
- [26] F. Serradj, Thèse doctorat, Université Mentouri, Constantine (2014).
- [27] E. Felder, Techniques de l'ingénieur, Dunod, p3000 (2008).
- [28] S.M. Hirth, G.J. Marshall, S.A. Court et D.J. Lloyd, Mater. Sci. Eng., A, 319- 321, (2001), p 452.
- [29] مناصرية لبنى و شعباني أميرة, مذكرة ماستر فيزياء المواد بجامعة العربي التبسي, تبسة, (2018)

- [30] A. Thibault, Thèse doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France (2008).
- [31] L. Berviller, Thèse doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France (2005).
- [32] E. Doege and R. Bohnsack, *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (2000) 165-170.
- [33] L. Tapie, Thèse doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France (2007).
- [34] A. Khirani, Thèse de Magistère, Université Ferhat Abbas, Sétif (2010).
- [35] A. Col, *L'emboutissage des aciers*, Dunod, p450 (2010)
- [36] J. Coër, Thèse doctorat, Université Européenne de Bretagne-Sud, Bretagne (2013).
- [37] T. SEDRAT, Thèse de Magistère, Université Hadj Lakhdar, Batna (2007).
- [38] R. Farhani, H. Dekhli, Mémoire de master, Université Larbi Tébessi, Tébessa (2015).
- [39] S. J. Hu, Z. Marciniak, J. L. Duncan, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Elsevier, p211 (2002).
- [40] R. Djabri, I. Mihoubi, Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'SILA (2018).
- [41] J. Kesler, R. Bourgeois, H. Chauvel, *Memothech, Génie des matériaux*, Edition Casteila, Paris (2001).
- [42] K. Kpogan, Thèse doctorat, Université de Lorraine, France (2014).
- [43] A. Halloumi, Thèse doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France (2011).
- [44] Y. Boumelita, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba (2017).
- [45] I. Bengacemi, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba (2018).
- [46] H. Farh, H. Belghit, T. Ziar, A. Noua, F. Serradj, M. Zidani, *Diffusion Foundations*, 18 (2018) 14-18.
- [47] H. Farh, R. Guemini, F. Serradj, K. Djemmal, *Turkish Journal of Physics*, 34 (2010) 117-122.
- [48] B. Wang, X. H. Chen, F.S. Pan, J.J. Mao, Y. Fang, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25 (2015) 2481-2489.
- [49] M. Zidani, L. Bessais, H. Farh, M.D. Hadid, S. Messaoudi, D. Miroud, M.K. Loudjani, A.L. Helbert and T. Baudin, *Steel and Composite Structures*, 22 (4) (2016) 745-752.

Annexe

Fiche A.S.T.M de l'aluminium

Name and formula

Reference code: 00-004-0787
Mineral name: Aluminum, syn
PDF index name: Aluminum
Empirical formula: Al
Chemical formula: Al

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m
Space group number: 225

a (Å): 4,0494
b (Å): 4,0494
c (Å): 4,0494
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 2,70
Volume of cell (10⁶ pm³): 66,40
Z: 4,00
RIR: 3,62

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Alloy, metal or intermetallic
Common Phase
Educational pattern
Explosive
Forensic
NBS pattern
Pigment/Dye
Quality: Star (S)

Comments

Color: Light gray metallic
General comments: Mineral species of doubtful validity, *Am. Mineral.*, **65** 205 (1980).
Sample preparation: The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA.
Analysis: The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference).
Additional pattern: See ICSD 64700 (PDF 01-085-1327).
Temperature: Pattern taken at 25 C.

References

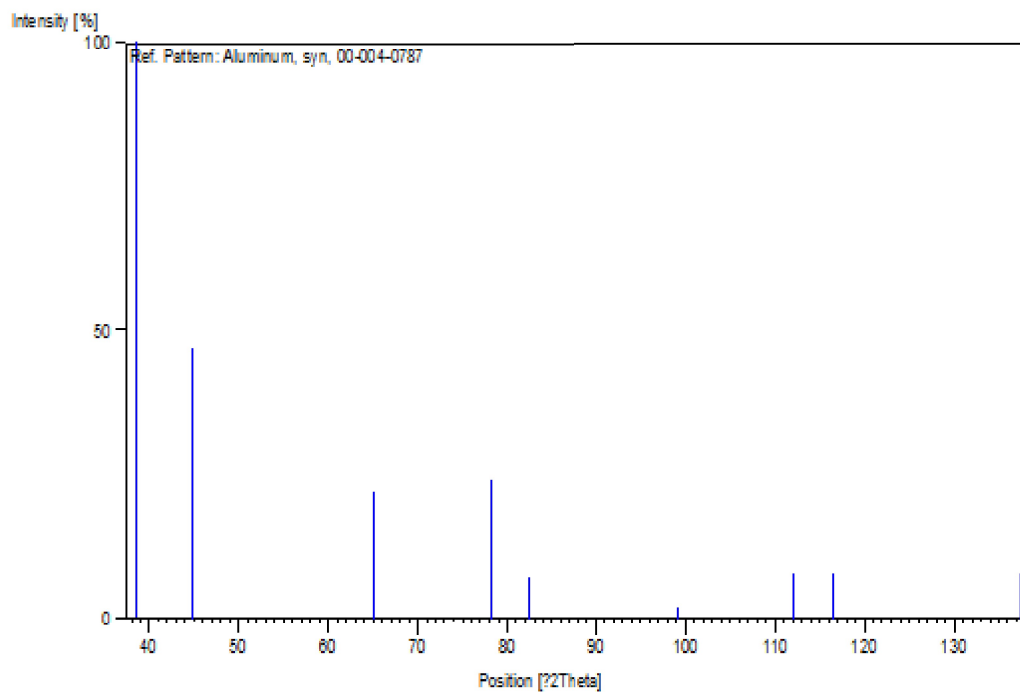
Primary reference:

Swanson, Tatge., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I*, 11, (1953)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2,33800	38,473	100,0
2	2	0	0	2,02400	44,740	47,0
3	2	2	0	1,43100	65,135	22,0
4	3	1	1	1,22100	78,230	24,0
5	2	2	2	1,16900	82,438	7,0
6	4	0	0	1,01240	99,081	2,0
7	3	3	1	0,92890	112,046	8,0
8	4	2	0	0,90550	116,574	8,0
9	4	2	2	0,82660	137,463	8,0

Stick Pattern



Résumé

Dans ce mémoire nous nous intéressons aux alliages Al-Mg-Si (série 6000) qui ont un grand intérêt vu leur utilisation privilégiée surtout dans l'industrie d'automobile et l'aéronautique. Ce travail a pour but d'étudier l'effet des traitements thermiques sur la microdureté d'un alliage d'aluminium de la série 6000, ainsi que, l'influence combinée du taux de déformation à froid par laminage et la température d'homogénéisation sur la microdureté. Pour suivre l'influence de ces traitements thermique et thermomécanique sur la microstructure et la microdureté, nous avons utilisé des techniques expérimentales telles que : la microscopie optique, diffraction des rayons X (XRD) et la microdureté (Hv).

La Caractérisation par microscope optique permet de déterminer la présence de précipités formés suite aux différents taux de déformation à froid par laminage.

Les résultats de la microdureté montrent que la microdureté augmente avec l'augmentation du taux de déformation, ainsi que le traitement d'homogénéisation diminue cette dureté.

L'analyse par diffraction des rayons X montre un décalage des pics vers les bas angles dans le cas de l'alliage laminé à froid.

Mots-Clés: Alliage Al-Mg-Si, Déformation par laminage, Traitement thermiques, Précipitation, Microdureté, Déformation plastique

Abstract

In this memoir we are interested in Al-Mg-Si alloys (series 6000) which are of great interest because of their privileged use, especially in the automotive and aeronautical industries. The purpose of this work is to study the effect of heat treatments on the microhardness of a 6000 series aluminum alloy, as well as the combined influence of the cold rolling deformation level and the homogenization temperature on the microhardness. To monitor the influence of these heat and thermo-mechanical treatments on microstructure and microhardness, we used experimental techniques such as: Optical Microscopy, X-ray diffraction (XRD) and micro-hardness (Hv).

Optical Microscope Characterization is used to determine the presence of precipitates formed as a result of different deformation level.

The results of microhardness show that microhardness increases with increasing deformation rate, and the homogenization treatment reduces this hardness.

X-ray diffraction analysis shows a shift from peaks to low angles in the case of cold-rolled alloy

Keywords: Alloy Al-Mg-Si, Roll forming, Heat treatments, precipitation, Microhardness, Plastic forming.

ملخص

في هذه المذكرة، نحن مهتمون بدراسة السبائك **Al-Mg-Si** (سلسلة 6000) والتي لها أهمية كبيرة بسبب استخدامها المتنوعة خاصة في صناعة وسائل النقل البري والجوي. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجات الحرارية على الصلادة لسبيكة ألومنيوم السلسلة 6000، وكذلك التأثير المشترك لكل من عملية الدرفلة على البارد بمعدلات تشوه مختلفة و درجة حرارة التجانس على الصلادة. لمتابعة تأثير هذه المعالجات الحرارية والميكانيكية الحرارية على البنية المجهرية و الصلادة، استخدمنا تقنيات تجريبية مثل: المجهر الضوئي، انعراج الأشعة السينية (XRD) و قياس الصلادة (Hv). استعمال المجهر الضوئي يسمح لنا بتحديد وجود الترسبات التي تشكلت بعد معدلات مختلفة من التشوه بواسطة الدرفلة على البارد.

اما قياس الصلادة فقد اظهرت النتائج انها تزداد بزيادة معدل تشوه السبيكة المدرفلة على البارد وكذلك المعالجة الحرارية بالتجانس تقلل من هذه الصلادة.

فيما يخص تحليل حيود الأشعة السينية فإنه يظهر انتقال الذروة بزواوية منخفضة في حالة السبائك المدرفلة على البارد.

كلمات مفتاحية: سبائك Al-Mg-Si، التشوه عن طريق الدرفلة، المعالجات الحرارية، الترسيب، الصلادة الدقيقة، التشوه البلاستيكي .