

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

OPTION : Génie Mécanique

SPECIALITE : Fabrication Mécanique et Productique.

Présenté par:
DALI AREZKI

**Thème: Influence de la maturation sur les caractéristiques
mécaniques et microstructurales de l'alliage de corroyage
AlCu3Si2Mg.**

Devant le jury composé de:

Mr. DJEBBAR	Arezki	Professeur	Président	UMMTO
Mr. HAKEM	Ahmed	Maître de Conférences	Rapporteur	UMMTO
Mr. SEGHIR	Mustapha	Maître Assistant	Examineur	UMMTO

Présenté le: 20/12/2018 à 14h en Salle: C01

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

ⵝⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ



Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire

en vue de l'obtention du

Diplôme **de Master** en Génie Mécanique

Option: Fabrication Mécanique et **P**roductive.

THEME

**Influence de la maturation sur les caractéristiques
mécaniques et microstructurales de l'alliage de corroyage
AlCu3Si2Mg.**

Proposé et dirigé par :
Ahmed HAKEM Maître de Conférences

Présenté par:
DALI AREZKI

ANNEE: 2017 - 2018

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et le courage afin de réaliser ce mémoire de Master.

J'adresse mes vifs remerciements à mon promoteur Mr Ahmed HAKEM Maître de Conférences au Département de Génie Mécanique d'avoir accepté de m'encadrer, de diriger ce modeste travail et d'avoir assisté à sa finalisation.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner et de juger ce modeste travail.

Je tiens aussi à remercier le personnel de la bibliothèque de Génie Mécanique, du laboratoire de SDM de Hasnaoua II et du Hall de Technologie de Oued Aïssi.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin trouvent ici, mes remerciements les plus vifs et ma profonde reconnaissance.

DEDICACES

Je dédie ce travail à toute ma famille qui m'a été la source d'encouragement et d'assurance durant mon séjour à l'université:

- A mes très chers parents à qui je dois tout,
- A mes très chers frères et sœurs et toute ma famille,
- A mes proches et mes camarades qui m'aiment,
- Et aux gens qui me sont les plus chers au monde.

Arezki

SOMMAIRE

Nomenclature des symboles utilisés

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 01

PARTIE I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I.1 - ALUMINIUM ET SES ALLIAGES 03

I.1.1 – HISTORIQUE 03

I.1.2 - FABRICATION DE L’ALUMINIUM 03

I.1.2.1 - Production d’alumine 03

I.1.2.2 - Production de l’aluminium 03

I.1.3 - PRINCIPALES PROPRIETES DE L’ALUMINIUM 04

I.1.3.1 - Propriétés physiques 04

I.1.3.2 - Propriétés mécaniques 04

I.1.3.3 - Propriétés chimiques 04

I.1.3.4 - Propriétés de mise en forme 05

I.1.4 - ALLIAGES A BASE D’ALUMINIUM 05

I.1.4.1 - Alliages corroyés 05

I.1.4.2 - Alliages de moulage 05

I.1.4.3 - Alliages de frittage 05

I.1.5 - CLASSIFICATION DES ALLIAGES D’ALUMINIUM 05

I.1.5.1 - Alliages de corroyage 05

I.1.5.2 - Alliages élaborés par frittage 06

I.1.5.3 - Alliages de moulage 07

I.1.5.4 - Alliage de fonderie 07

I.1.6 - DESIGNATION DES ALLIAGES EN ALUMINIUM 07

I.1.6.1 - Alliages moulés 07

I.1.6.1.1 - Désignation numérique 08

I.1.6.1.2 - Désignation symbolique 08

I.1.6.1.3 - Etats métallurgiques 09

I.1.6.2 - Alliages corroyés 09

I.1.6.2.1 - Désignation de la composition 09

I.1.6.2.1.1 - Partie commune aux désignations numériques et symboliques 09

I.1.6.2.1.2 - Désignation numérique (NF EN 573-1)	09
I.1.6.2.2 - Etats de livraison - Etats métallurgiques	10
I.1.6.3 - Les alliages aluminium-cuivre (ALCU4 %)	
I.1.6.3.1 - Diagramme d'équilibre AL-CU 4%	11
I.1.6.3.2 - Morphologie de la précipitation	12
I.1.6.4 - Diversité des alliages d'aluminium	13
I.1.6.5 - Quelques alliages d'aluminium - cuivre	13
I.1.6.6 - Utilisation des alliages d'Aluminium	15
CHAPITRE I.2 ELABORATION DES ALLIAGES ALUMINIUM	18
INTRODUCTION	18
I.2.1 - LE MINERAI DE L'ALUMINIUM	18
I.2.2 - EXTRACTION DE L'ALUMINE PURE (OXYDE D'ALUMINIUM) A PARTIR DE LA BAUXITE	19
I.2.3 - LE PROCESSUS HALL-HEROULT	19
I.2.4 - L'ALLIAGE 2017A	20
I.2.4.1 - Composition chimique de l'alliage 2017A	20
I.2.4.2 - Influence des éléments d'adition	20
I.2.5 - ELABORATION ET PREPARATION DE L'ALLIAGE 2017A	21
I.2.5.1 - Transformation de l'alliage d'aluminium	21
I.2.5.2 - Principe de laminage	21
CHAPITRE I.3 – TRAITEMENTS THERMIQUES	23
INTRODUCTION	23
1.3.1 - CYCLE THERMIQUE	23
1.3.2 - PRINCIPAUX TYPES DE TRAITEMENTS THERMIQUES	24
1.3.2.1 - Les traitements d'homogénéisation	25
1.3.2.2 - Les traitements d'adoucissement	25
1.3.2.3 - Les traitements de trempe structurale	25
1.3.3 - MISE EN SOLUTION	25
1.3.3.1 - Trempe	25
1.3.3.2 - Maturation (vieillissement naturel)	26
1.3.3.3 - Revenu (vieillissement artificiel)	26
1.3.3.4 - Le recuit	27
1.3.4 - PRINCIPE DE DURCISSEMENT STRUCTURAL	27

1.3.4.1 - Microstructure	28
1.3.4.2 - La macrographie	28
1.3.4.3 - La micrographie	28
1.3.4.3.1 - Observation par microscopie	29
1.3.5 - IMPORTANCE DE LA METALLOGRAPHIE	29
CHAPITRE I.4 - ESSAIS MECANIQUES	30
INTRODUCTION	30
I.4.1 - ESSAI DE TRACTION	30
I.4.1.1- Démentions des éprouvettes	30
I.4.1.2 - Courbe contrainte-déformation pour un matériau ductile	31
I.4.1.3 - Exploitation de la courbe	32
I.4.1.4 - Contraintes et déformations vraies	33
I.4.2 - ECROUISSAGE	34
I.4.2.1 - Le taux	34
I.4.2.2 - Le coefficient d'écrouissage n	34
I.4.3 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX	34
I.4.4 - LA DURETE	35
I.4.4.1 - Types d'essais	35
I.4.5 - DUCTILITE	37
I.4.6 - TENACITE	37
I.4.7 - LES ESSAIS DE FISSURATION	38
I.4.7.1 - La résilience	38
CHAPITRE I.5 - DEFAUTS CRISTALINS ET DIFFUSION	39
I.5.1- DEFAUTS CRISTALLINS	39
I.5.1.1 - Les défauts ponctuels	39
I.5.1.2 – Lacune	39
I.5.1.3 - Atome auto interstitiel	39
I.5.1.4 - Atome étranger en substitution (3)	39
I.5.2 - ATOME ÉTRANGER EN INSERTION (4)	40
I.5.3. DÉFAUTS À UNE DIMENSION (DEFAUTS LINEAIRES)	40
I.5.3.1 - Dislocation coin	41
I.5.3.2 - Dislocation vis	41
I.5.3.3 - Dislocation mixte	41

I.5.3.4 - Le vecteur de Burgers	41
I.5.3.5 - Défauts à deux dimensions (défauts plans)	42
I.5.3.5.1 - Les joints de grains	42
I.5.3.5.2 - Joints de macles	42
I.5.3.6 - Défauts trois dimensions (défauts volumiques)	42
I.5.3.6.1 - Les pores	43
I.5.3.6.2 - Les inclusions	43
I.5.3.6.3 - Les précipités	43
I.5.4 LA DIFFUSION	44
1.5.4.1 – Définition	44
1.5.4.2 - Mécanismes de la diffusion	44
1.5.4.3 - Lois de la diffusion	45
1.5.4.4 - Etat stationnaire (première loi de Fick)	45
1.5.4.5 - Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick)	45

PARTIE II – PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II.1 - APPAREILLAGE	47
II.1.1 - INTRODUCTION	47
II.1.2 - APPAREILLAGE	47
II.1.2.1 - Le laminage	47
II.1.2.2 – Scie mécanique	48
II.1.2.3 - Usinage des éprouvettes et des échantillons	48
II.1.2.4 - Ebavurage	49
II.1.2.5 - Eprouvettes et échantillons	49
II.1.2.6 - Traitement thermique	50
II.1.2.6.1 - Four de trempe	50
II.1.2.6.2 - Etuve	50
II.1.2.7 - Essais mécaniques	51
II.1.2.7.1 - Machine de traction	51
II.1.2.7.2 - Machine de résilience	52
II.1.2.8 - Les polisseuses	52
II.1.2.9 - Durometre et microdurometre	53
II.1.2.10 - Attaque chimique	53
II.1.2.11 - Microscope	53

II.1.2.11.1 - Microscope optique	53
II.1.2.11.2 - Microscope électronique à balayage	54
CHAPITRE II.2 – MATERIAUX ET MODES OPERATOIRES	55
II.2.1 - MATERIAUX ETUDIE	55
II.2.2 - ÉLABORATION DU MATERIAU ETUDIE	55
II.2.2.1 – Electrolyse	55
II.2.2.2 – Mélange	56
II.2.2.3 – Laminage	56
II.2.2.4 – Usinage	56
II.2.2.4.1 – Découpage	56
II.2.2.4.2 – Tournage	56
II.2.2.4.3 – Fraisage	56
II.2.3 – TRAITEMENTS THERMIQUES	56
II.2.3.1 – Différentes étapes :	56
II.2.3.2 – Cycle thermique	57
II.2.4 – ESSAIS MECANIQUES	57
II.2.4.1 – Essais de traction	57
II.2.4.2 – Essais de dureté et de microdureté	58
II.2.4.3 – La résilience	59
II.2.5 – EXAMEN STRUCTURAL	60
II.2.5.1 – Dressage	60
II.2.5.2 – Dégrossissage	60
II.2.5.3 – Finissage	60
II.2.6 – ATTAQUE CHIMIQUE	60
II.2.7 – MICROSCOPIE	61
II.2.7.1 – Microscope optique	61
II.2.7.2 – Microscope électronique à balayage (MEB)	61
PARTIE III – RESULTATS ET DISCUSSION	
INFLUENCE DE LA MATURATION SUR LES	62
CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET MICROSTRUCTURALES	
DE L'ALLIAGE DE CORROYAGE ALCU3SI2MG	
III.1 - INTRODUCTION	62

III.2 - EFFETS DU MODE D'ELABORATION ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ESSAI DE TRACTION	63
III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION	64
III.3.1 - Courbes moyennes de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg	64
III.3.2 - Influence du temps de maturation et du mode d'élaboration de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg sur les propriétés mécaniques	73
III.3.2.1 - Résistance	73
III.3.2.2 - Ductilité	78
DISCUSSION	80
III.4 - MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE DE LAMINAGE AlCu3Si2Mg	82
III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIE	84
III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON Les traitements thermiques	85
III.7 - CONCLUSION	85
CONCLUSION GENERALE	86
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87
RESUME	

Nomenclature des symboles utilisés

σ^m	-	Contrainte maximale à la traction en (MPa)
Z	-	Nombre atomique
M	-	Masse atomique
CFC	-	Cubique à faces centrées
Al	-	Aluminium
Cu	-	Cuivre
Si	-	Silicium
Mg	-	Magnésium
E	-	Module d'Young en (GPa)
σ^r	-	Contrainte de rupture à la traction (MPa)
Z%	-	Coefficient de striction
Z_u%	-	Allongement de striction
σ^e	-	Limite d'élasticité (MPa)
$\varepsilon\%$	-	Déformation en %
A%	-	Allongement à la rupture e %
HB	-	Dureté Brinell
Hv_{0,1}	-	Microdureté Vickers de masse 100g
Kcv	-	Résilience en (J/cm ²)
W	-	Energie absorbée par la rupture en (J)
S₀	-	Section initiale (mm ²)
L₀	-	Longueur initiale (mm)
F	-	Effort de traction (N)
n	-	Coefficient d'écrouissage
v	-	Coefficient de poisson
T	-	Température en °C
D	-	Diamètre de la bille (mm)
d	-	Diamètre de l'empreinte (mm)
L	-	Ecartement entre outillages
l1	-	Longueur de la partie calibrée étroite
l2	-	Ecartement entre les parties parallèles larges

l3	-	Longueur totale
b2	-	Largeur dans la zone d'épaulement
b1	-	Largeur dans la zone de la longueur de référence
h	-	épaisseur de l'éprouvette
σ_n	-	contrainte nominale.
ϵ_n	-	déformation nominale.
Re	-	limite apparente d'élasticité (MPa).
Rm	-	résistance maximale à la traction (MPa).
j	-	- le flux de matière
p	-	- Puissance
Ni	-	Nickel
Nb	-	Niobium
P	-	Phosphore
Pb	-	Plomb
Se	-	Sélénium
S	-	Soufre
Ta	-	Tantale
Th	-	Thorium
Ti	-	Titane
V	-	Vanadium
Zn	-	Zinc
Zr	-	Zirconium
N	-	Azote
Be	-	Béryllium
Bi	-	Bismuth
B	-	Bore
Cd	-	Cadium
Cr	-	Chrome
Co	-	Cobalt
Sn	-	Etain
Fe	-	Fer
Mn	-	Manganèse

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 - Diagramme de phases du système binaire aluminium-cuivre	12
Figure I.2 - Microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 500°C. b) par refroidissement rapide à partir de 500°C	12
Figure I.3 - Quelques profilés laminés en alliages d'aluminium	15
Figure I.4 - Domaines d'utilisation des alliages d'aluminium	17
Figure I.5 - Etapes de production de l'aluminium	18
Figure I.6 - Schéma d'une électrolyse produisant l'aluminium pur	20
Figure I.7 - Principe de laminage	22
Figure I.8 - Tôle d'aluminium produite par coulée continue.	22
Figure I.9 - Cycle thermique	23
Figure I.10 - Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium	26
Figure I.11 - Cycle thermique du durcissement structural	27
Figure I.12 - Diagramme d'équilibre partiel Al-Cu	27
Figure I.13 - Eprouvette de traction	30
Figure I.14 - Dimension d'éprouvette de traction	31
Figure I.15 - Schéma d'une éprouvette de traction et son évolution en cours d'essai	31
Figure I.16 - Courbe contrainte déformation d'un matériau ductile	32
Figure I.17 - Courbes de traction possibles	34
Figure I.18 - Essai de dureté Brinell	35
Figure I.19 - Principe de l'essai Vickers	36
Figure I.20 - Principe de l'essai Rockwell B (HRB).	37
Figure I.21 - Courbe de traction montrant la ténacité	38
Figure I.22 - Essai de Charpy	38
Figure I.23 - Types de défauts ponctuels	40
Figure I.24 - (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis	40
Figure I.25 - Dislocation	41
Figure I.26 - Joints de grains	42
Figure I.27 - Représentation schématisée d'un pore	43
Figure I.28 - Différents précipités	44

Figure I.29 - Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique	45
Figure II.1 - Schéma de principe d'élaboration par laminage	47
Figure II.2 - Scie mécanique de type ALMOSMA3	48
Figure II.3 - Tour universel de type SN40SN 50C	48
Figure II.4 - fraiseuse verticale FV1, 5 ALMO	49
Figure II.5 - Meule	49
Figure II.6 - Eprouvette cylindrique de traction	49
Figure II.7 - Eprouvette de résilience	49
Figure II.8 - Echantillon pour l'essai de dureté, de microdureté et de structure	50
Figure II.9 - Four de trempe	50
Figure II.10 - Etuve utilisée	51
Figure II.11 - Machine de traction	51
Figure II.12 - Eprouvettes de traction	51
Figure II.13 - Pendule de Charpy	52
Figure II.14 - Eprouvettes de résilience	52
Figure II.15 - Polisseuses	52
Figure II.16 - Duromètre	53
Figure II.17 - Microduromètre	53
Figure II.18 - Microscope optique	54
Figure II.19 - Microscope électronique à balayage	54
Figure II.20 - Cycle Thermique	57
Figure II.21 - Formes et dimensions de l'éprouvette de traction	58
Figure II.22 - Formes et dimensions de l'échantillon pour l'essai de dureté et de microdureté	59
Figure II.23 - Formes et dimensions de l'éprouvette de résilience	59
Figure III.1 - Courbe de traction (contrainte – déformation) de l'alliage de laminage AL Cu ₃ Si ₂ Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.	72
Figure III.2 – (a) graphe et (b) histogramme de la contrainte maximale (< σ^m >- temps de maturation) (c) - secteur< σ^m > de l'alliage de laminage ALCu ₃ Si ₂ Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté :	73

<M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ;
<M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.3 – (a) graphe et (b) histogramme de la contrainte moyenne de d'élasticité ($\langle \sigma^e \rangle$ - temps de maturation) (c) - secteur $\langle \sigma^e \rangle$ de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.4 – (a) graphe et (b) histogramme de la contrainte moyenne de rupture ($\langle \sigma^r \rangle$ - temps de maturation) (c) - secteur $\langle \sigma^r \rangle$ de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.5 – (a) graphe et (b) histogramme de la dureté brinell ($\langle HB \rangle$ - temps de maturation) (c) - secteur $\langle HB \rangle$ de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.6 – (a) graphe et (b) histogramme de la microdureté de la zone noir ($\langle H_{v0.1} \rangle$ - Zn temps de maturation) (c) - secteur $\langle H_{v0.1} \rangle$ - Zn de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.7 – (a) graphe et (b) histogramme de la microdureté de la zone blanche ($\langle H_{v0.1} \rangle$ - Zb temps de maturation) (c) - secteur $\langle H_{v0.1} \rangle$ - Zb de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.8 – (a) graphe et (b) histogramme de la comparaison des microdureté Vickers des zone noir noté : Zn, zone blanche noté : Zb et de leur moyenne noté : $(Zn + Zb)/2$ ($\langle H_{v0.1} \rangle$ - Zb, Zn et $(Zn + Zb)/2$ - temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et mûré noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ;

<M10h> ; <M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ;
<M24h>.

Figure III.9 – (a) graphe et (b) histogramme du module de Young moyenne 77
noté : (<E> - temps de maturation),(c) - secteur <E> de l’alliage de laminage
ALCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et
maturé noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ;
<M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.10 – (a) graphe et (b) histogramme de l’allongement moyen (<A%> - 78
temps de maturation),(c) - secteur <A%> de l’alliage de laminage ALCu3Si2
Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et maturé noté :
<M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ; <M14h> ;
<M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.11 – (a) graphe et (b) histogramme du coefficient moyen de striction 79
(<Z%> - temps de maturation),(c) - secteur <Z%> de l’alliage de laminage
ALCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et
maturé noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ;
<M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.12 – (a) graphe et (b) histogramme de l’allongement moyen de 79
striction (<Zu%> - temps de maturation),(c) - secteur <Zu%> de l’alliage de
laminage ALCu3Si2 Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté :
T et maturé noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ;
<M12h> ; <M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.13 – (a) graphe et (b) histogramme de résilience moyenne (<Kcv> - 80
temps de maturation),(c) - secteur <Kcv> de l’alliage de laminage
ALCu3Si2Mg aux états (a) brute de coulée noté : F; (b) trempé noté : T et maturé
noté : <M0h> ; <M2h> ; <M4h> ; <M6h> ; <M8h> ; <M10h> ; <M12h> ;
<M14h> ; <M16h> ; <M18h> ; <M20h> ; <M22h> ; <M24h>.

Figure III.14 – Structure micrographique de l’alliage de laminage ALCu3Si2Mg 82

Figure III.15 – Microstructures obtenue au MEB de l’alliage de laminage 83
ALCu3Si2Mg

Figure III.16 – Faciès de ruptures en traction obtenues au MEB de l’alliage de 83
laminage ALCu3Si2Mg

Figure III.17 – Faciès de ruptures en résilience obtenues au MEB de l’alliage de 84

laminage $AlCu_3Si_2Mg$

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 - Familles d'alliages d'aluminium corroyés	06
Tableau I.2 - Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages	08
Tableau I.3 - Désignation des états métallurgiques	09
Tableau I.4 - Quelques groupes d'alliages d'aluminium	10
Tableau I.5 - Désignation des états métallurgiques de base	11
Tableau. I.6 - Composition chimique de l'alliage 2017A	20
Tableau. I.7 - Influence des éléments d'adition	21
Tableau II.1 - Composition chimique de l'alliage étudié	55
Tableau II.2 - Composition pondérale du réactif	60

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique. Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherches sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères...etc., mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

L'aluminium à l'état pur présente de faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments d'addition et l'application de traitements thermiques provoquent la précipitation de certaines phases dans la matrice d'aluminium. L'alliage est alors généralement plus résistant mais aussi moins ductile que l'aluminium pur. Il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium corroyés qui diffèrent par leurs éléments d'addition principaux; Al-Cu (série 2000), Al-Mn (série 3000), Al-Si (série 4000), Al-Mg (série 5000), Al-Mg-Si (série 6000) et les alliages Al-Mg-Zn (série 7000). La faible masse volumique des alliages d'aluminium associée à leurs bonnes caractéristiques mécaniques intéresse l'industrie du transport (ferroviaire, navale, routière, aéronautique).

Dans cette étude, je me suis intéressé à l'élaboration puis aux effets de modification de la microstructure de l'alliage de corroyage à 3% de Cu, 2% de Si et quelques traces de Mg ($Mg < 1\%$), désigné **AlCu3Si2Mg** par traitements thermiques d'homogénéisation suivie d'une trempe structurale et d'une variation de temps de maturation par pas de 2h suivi immédiatement de revenus, sur les caractéristiques mécaniques de traction, de dureté, de microdureté et de résilience en considérant 15 états du matériau : brut de coulée noté : F, trempé noté : T et variation du temps de maturations par pas de 2h désignés M0h, M2h, M4h, M6h, M8h, M10h, M12h, M14h, M16h, M18h, M20h, M22h et M24h.

L'alliage étudié a été élaboré par laminage. Les pièces élaborées à partir de ces alliages font partie des composants rentrant dans diverses réalisations.

Ce travail comprend une introduction générale et trois parties.

La première partie : nous livre un aperçu bibliographique et contient cinq chapitres :

- Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages,

- Chapitre I.2 : Elaboration de l'alliage d'aluminium,
- Chapitre I.3 : Traitements thermiques,
- Chapitre I.4 : Essais mécaniques,
- Chapitre I.5 : Défauts cristallins.

La deuxième partie : sera consacrée aux méthodes expérimentales utilisées pour les caractérisations mécanique et métallographique de l'alliage étudié et se scinde en deux chapitres :

- Chapitre II.1 : Appareillage,
- Chapitre II.2 : Méthode expérimentale et élaboration de l'alliage de corroyage AlCu3Si2Mg.

La troisième partie : est réservée à l'analyse des résultats expérimentaux suivie de leur interprétation et discussion.

En fin le fruit de ce travail est résumé en conclusion générale.

Partie I

APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I.1 - ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	03-17
Chapitre I.2 - ELABORATION DE L'ALLIAGE $\text{AlCu}_3\text{Si}_2\text{Mg}$ à partir d'AlSi_7Mg	18-22
Chapitre I.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES	23-29
Chapitre I.4 - ESSAIS MECANIQUES	30-38
Chapitre I.5 - DEFAUTS CRISTILLINS	39-46

CHAPITRE I.1 - ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1 – HISTORIQUE:

A l'état naturel, l'aluminium pur n'existe pas. Très abondant dans la nature, ce métal se présente surtout sous formes d'hydroxydes. Après sa découverte en 1808 par le physicien anglais **Humphrey DAVY** (1778-1829), l'aluminium fut isolé pour la première fois en 1825 par le chimiste danois Hans **OERSTED** lors d'une réaction chimique impliquant un amalgame du potassium. Le chimiste allemand **Friedrich WOHLER** améliora le procédé d'Oersted en utilisant le potassium métallique entre 1827 et 1845. L'aluminium a connu un développement spectaculaire en 1854 Symbolisée par la Présentation à l'Académie des sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le **premier métal non ferreux**; en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc Puis le cuivre dans les années 1950. [2]

I.1.2 - FABRICATION DE L'ALUMINIUM :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (la composition moyenne est de 55% d' Al_2O_3 , 5% SiO_2 , 15% Fe_2O_3 et 25 % de perte au feu), constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

I.1.2.1 - Production d'alumine :

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par la soude. On obtient une liqueur après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

I.1.2.2 - Production de l'aluminium :

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). L'aluminium de la première fusion contient le fer de 0.1%, qui est inférieur à la limite de la solubilité du fer en aluminium à la température ambiante. D'ailleurs peu de produits sont élaborés à partir de l'aluminium de la première fusion, une grande quantité

d'alliages de recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits, ceci augmente la teneur du fer en alliages d'aluminium. Les phases riches de fer représentent un site favorable pour les réactions cathodiques et de formation des piqûres. Le fer est plus noble que l'aluminium, sa présence dans une solution solide d'aluminium affecte la cinétique de la dissolution constitue un facteur significatif de la corrosion dans les alliages d'aluminium. Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite.

I.1.3 - PRINCIPALES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM :

I.1.3.1 - Propriétés physiques :

L'aluminium est un élément du troisième groupe du tableau de Mendeleïev. Son nombre atomique $Z=13$, sa masse atomique $M=26,98$ sa température de fusion est 660°C et celle d'ébullition est 2500°C , son réseau est cubique à faces centrées de paramètre $a= 4,0412 \text{ \AA}$. L'aluminium a une bonne conductivité thermique et électrique, sa masse volumique est de 2699 kg/m^3 pour un titre de 99,95%, cette valeur est légèrement modifiée par d'autres éléments.

Sa caractéristique physique la plus importante est sa faible densité: $2,7\text{g/cm}^3$. [1], [3]

I.1.3.2 - Propriétés mécaniques :

L'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme et cela grâce à sa structure CFC.

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium pur sont:

- Le module d'élasticité est de $66,6 \text{ GPa}$, autant que des impuretés en présence et les éléments d'addition, cette valeur augmente,
- Le coefficient de poisson varie de $(0,33 - 0,35)$,
- Le module de torsion est égal à 25GPa pour l'aluminium pur titré à 99.9% et de 26GPa pour l'aluminium commercial.

I.1.3.3 - Propriétés chimiques :

L'aluminium est un métal éminemment oxydable, il se distingue par sa résistance à la corrosion élevée du fait de la formation, à la surface, d'une couche protectrice d'alumine (Al_2O_3). Lorsque il y a contact de l'aluminium avec certain corps comme l'eau de mer et les solutions salines, cette couche d'alumine peut être altérée, l'oxydation de l'aluminium se poursuit alors très rapidement.

La plupart des acides minéraux attaquent l'aluminium surtout l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et les acides organiques.

I.1.3.4 - Propriétés de mise en forme :

La température de fusion de l'aluminium est relativement basse 660°C d'où une facilité de fusion qui représente un avantage pour les opérations de fonderie, il est très ductile, on peut facilement mettre en forme à l'état solide par déformation plastique.

I.1.4 - ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM : [3]

A fin d'améliorer les mécaniques de l'aluminium non allié à caractéristiques très réduite, on procède souvent à l'addition d'autres éléments de nature différentes, ces éléments en solution solide peuvent également être présents sous forme de phase intermétallique. La composition des phases, leur finesse, répartition et cohérence avec la matrice d'aluminium, fragilité intrinsèque et stabilité thermique et mécanique sont également déterminantes pour les propriétés d'alliage d'aluminium.

On distingue trois grandes catégories d'alliages d'aluminium

I.1.4.1 - Alliages corroyés :

Produits obtenus par les procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage et le formage.

I.1.4.2 - Alliages de moulage :

Produits obtenus par fonderie par coulée en sable (moule en sable) ou en coquille (moule en fonte ou en acier) ou encore par coulée sous pression.

I.1.4.3 - Alliages de frittage :

Produits obtenus par la méthode de la métallurgie des poudres qui est une méthode révolutionnaire d'élaboration de pièces mécaniques.

I.1.5 - CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM : [2]

Suivant le mode de transformation des alliages on distingue:

I.1.5.1 - Alliages de corroyage :

Prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, profilés, tubes) ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, forgeage et estampage. Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique on distingue:

- **Alliages durcis par traitement thermique,**
- **Alliages non durcis par traitement thermique.**

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristique mécanique sont obtenus, on distingue les alliages à durcissement structural (trempant) et les alliages non susceptibles de durcissement structural (non trempant). Ces alliages se montrent avec des bonnes résistances mécaniques, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue, résistant aux corrosions et ayant une bonne conductibilité électrique. Le rayon des alliages varie après corroyage

- Composition des alliages corroyés

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'**Aluminium Association**, est **numérique à quatre** chiffres dont le premier chiffre est le premier (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium.

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	<u>Cuivre</u> (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	<u>Manganèse</u> (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	<u>Silicium</u> (Si)	-
Série 5000	5XXX	<u>Magnésium</u> (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	<u>Magnésium</u> (Mg) et <u>Silicium</u> (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	<u>Zinc</u> (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

Tableau I.1 - Familles d'alliages d'aluminium corroyés. [4]

Remarque :

La lettre A (ou B) peut suivre les quatre chiffres de la désignation numérique, par exemple 2017A. Il s'agit alors d'une composition légèrement différente et spécifique à un (ou plusieurs) pays ou à un producteur.

I.1.5.2 - Alliages élaborés par frittage :

Selon la méthode de la métallurgie des poudres, les alliages Al-Si, Al Mg et Al Cu, (Al Mg), de manganèse + nickel + chrome (Al Cu), constituent des alliages de fonderie qui possèdent aussi bien une coulabilité élevée.

Un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et porosité, de bonnes propriétés mécaniques et une résistance à la corrosion élevée.

Pour affiner le grain et améliorer les propriétés mécaniques, on introduit des inoculant (Ti, Zr, B, C1, V.). Additionnés respectivement d'une faible quantité de cuivre + magnésium (AlSi), de silicium

I.1.5.3 - Alliages de moulage :

Ils sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules en sable (moulage en sable), ou des moules en acier ou en Fonte (moulage en coquille). Par ce procédé, on élabore des pièces aux formes plus aux moins complexes : poignés de portes, blocs moteur...etc.

-moulage en sable : Le métal se solidifie dans une cavité limitée par du sable comprimé ; les parties creuses sont obtenues des noyaux. Dans ce genre de moulage le refroidissement des pièces est lent.

-moulage en coquille : la coquille est un métal ayant la forme exacte de la pièce désirée, le refroidissement des pièces dans ce genre de moulage est rapide.

I.1.5.4 - Alliage de fonderie :

Les alliages prévus pour les moulages de forme doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques, une résistance à la corrosion élevée, etc. .

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevées lorsque sa structure comporte un eutectique.

Un eutectique se forme dans nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limitée dans l'aluminium.

Le plus souvent on emploie les alliages Al Si, Al Cu, Al Mg, additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (Al – mg), de silicium (Al – Si), de manganèse, de nickel ou de chrome.

Pour affiner le grain et, par suite, améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculant (Ti, Zr, b Cl, V, etc.).

I.1.6 - DESIGNATION DES ALLIAGES EN ALUMINIUM :

La désignation est composée successivement des éléments suivant :

I.1.6.1 - Alliages moulés :

La désignation de ces alliages d'aluminium est décrite de façon symbolique et numérique dans la norme NF EN 1780-1 et -3. La correspondance des éléments avec l'ancienne désignation AFNOR apparaît dans le **(tableau I.1)**.

Eléments d'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR	Eléments d'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR
Aluminium	Al	A	Nickel	Ni	N
Antimoine	Sb	R	Niobium	Nb	Nb
Azote	N	Az	Phosphore	P	P
Béryllium	Be	Be	Plomb	Pb	Pb
Bismuth	Bi	Bi	Sélénium	Se	Se
Bore	B	B	Silicium	Si	S
Cadium	Cd	Cd	Soufre	S	F
Chrome	Cr	C	Tantale	Ta	Ta
Cobalt	Co	K	Thorium	Th	Th
Cuivre	Cu	U	Titane	Ti	T
Etain	Sn	E	Tungstène	W	W
Fer	Fe	Fe	Vanadium	V	V
Magnésium	Mg	G	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Mn	M	Zirconium	Zr	Z

Tableau I.2 - Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages.**I.1.6.1.1 - Désignation numérique :**

La première partie de la désignation (EN AC-) est suivie de cinq (5) chiffres représentant la composition chimique : Les deux première chiffres indiquent le groupe d'alliages et les trois derniers indiquent la composition chimique.

Exemple : EN AC-42000 : est un alliage d'aluminium à 7% de silicium et des traces de magnésium.

La désignation est composée successivement des éléments suivant :

- Le préfixe EN suivi d'un espace
- La lettre A, qui représente l'aluminium
- La lettre C, qui représente les produits moulés (caste)
- Un tiret

I.1.6.1.2 - Désignation symbolique :

-La première partie de la désignation(EN AC -) est suivie des symboles chimiques des éléments d'addition (**tableau I.1**), successivement suivi de leurs teneurs massiques pris dans l'ordre décroissant.

Exemple : EN AC- AlSi7Mg

I.1.6.1.3 - Etats métallurgiques : Selon la norme NF EN 1706 les états métallurgiques sont maintenant désignés de la façon indiquée au **(tableau I.3)**. [1]

Etats métallurgiques	Désignation
Brut de fonderie.	F
Recuit	O
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation).	T ₁
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement naturel (maturation).	T ₄
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel (sur_ revenu) de stabilisation	T ₅

Tableau I.3 - Désignation des états métallurgiques.

I.1.6.2 - Alliages corroyés : [5]

I.1.6.2.1 - Désignation de la composition :

I.1.6.2.1.1 - Partie commune aux désignations numériques et symboliques :

- La désignation est composée successivement des éléments suivant :
- Le préfixe EN suivi d'un espace ;
- La lettre À, qui représente l'aluminium ;
- La lettre W, qui représente les produits moulés (caste) ;
- Un tiret.

I.1.6.2.1.2 - Désignation numérique (NF EN 573-1) :

- La première partie de la désignation (EN AW) est suivie de quatre chiffres représentant la composition chimique et si nécessaire, une lettre identifiant une variante nationale attribuée par ordre alphabétique.

- La signification des quatre chiffres est la suivante :

Le premier chiffre indique le groupe d'alliages selon le tableau I-5 (les chiffres de 0 et 9 sont réservées à l'usinage privé des réducteurs).

Pour le groupe 1 : les deux derniers chiffres indiquent le pourcentage minimal d'aluminium au-delà de 99,00%, et le deuxième chiffre indique des modifications dans les limites d'impuretés ou dans les éléments (zéro correspond à des limites d'impuretés naturelle).

pour les groupes 2 à 8 : les deux derniers chiffres servent seulement à identifier l'alliage, tandis que le deuxième chiffre indique les modifications de l'alliage (zéro correspond à l'alliage originale).

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium (teneur $\geq 99,00\%$)
2	Aluminium – cuivre
3	Aluminium- manganèse
4	Aluminium – silicium
5	Aluminium – magnésium
6	Aluminium - magnésium silicium
7	Aluminium – zinc
8	Autres alliages d'aluminium

Tableau I.4 - Quelques groupes d'alliages d'aluminium.

Exemple : EN AW -2024 est un alliage d'aluminium à 4% de cuivre et 1,5% de magnésium.

I.1.6.2.1.3 - Désignation symbolique (NF EN 57362) :

Elle est destinée à compléter la désignation numérique définie avant.

Elle utilise les symboles chimiques et est placée entre crochets après la désignation à quatre chiffres. les désignations de l'aluminium non allié destiné au corroyage sont constituées du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

Exemple : EN AW-1199 [Al 99,99] ;

EN AW-1070 [Al 99,7] ;

Si un élément est ajouté en faible teneur à l'aluminium non allié , le symbole correspondant à cet élément sera ajouté sans espace après le pourcentage de pureté.

Exemple : EN AW-1100 [Al 99,00 Cu] ;

Pour les alliages d'aluminium corroyés, la désignation est constituée du symbole (Al) suivi d'un espace et des éléments d'addition principaux .Ces symboles sont en suite suivis par des nombres exprimant la teneur de ces éléments.

Ils sont ordonnées par teneur décroissantes (ou par ordre alphabétique en cas de teneurs identiques) et sont limités à quatre .

Exemple : EN AW-6061 [Al Mg 1 Si Cu] ;

EN AW-2011 [Al Cu 5 Pb Bi] ;

EN AW-2014 [Al Cu Si Mg] ;

EN AW-7050 [Al Zn 6 Cu mg Zr] .

I.1.6.2.2 - Etats de livraison - Etats métallurgiques : [1]

Ils sont conformes à la norme afnor NF EN 515 qui désigne :

L'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T voir (**Tableau I.5**).

Le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres complémentaires voir (**tableau I.5**).

Désignation	Etat métallurgique
F	Etat brut de fabrication
O	Etat recuit
H	Etat écroui et éventuellement stabilisé
T	Etat durci par traitement thermique

Tableau I.5 - Désignation des états métallurgiques de base.

I.1.6.3 - Les alliages aluminium-cuivre (ALCU4 %) : [3]

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Certains alliages possèdent des Caractéristiques mécaniques qui répondent très bien aux besoins du domaine aéronautique, Comme par exemple l'alliage 2024 utilisé dans les structures des avions et le revêtement de leur fuselage. L'aéronautique est donc un grand « consommateur » d'alliages d'aluminium,

La série 2XXX contient des alliages avec le cuivre comme un élément de durcissement perfection. Souvent le magnésium est ajouté pour augmenter le maximum de résistance. Ces alliages obtiennent leur très haute résistance par la précipitation des phases CuAl_2 et/ou CuMgAl_2 . Les alliages de ce groupe sont caractérisés par de haute résistance à la corrosion et très faible extrudabilité et soudabilité. Ils sont largement utilisés dans l'industrie de l'aviation et l'espace, mais également comme Pièces de machine, boulons et rivets.

I.1.6.3.1 - Diagramme d'équilibre AL-CU 4% :

Le diagramme de phases du binaire Al-Cu nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al- 4 % masse Cu est monophasé : il s'agit d'une solution solide désordonnée d'aluminium dans laquelle le cuivre est en substitution (phase α). En dessous de 500°C, l'alliage devient biphasé et les deux phases, α et $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ coexistent. Il y a donc précipitation de phase θ dans la solution α . Au fur et à mesure que l'alliage est refroidi (on considère un refroidissement lent pour être le plus proche possible des conditions d'équilibre), la proportion de $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ augmente. A la température ambiante, les pourcentages massiques d'équilibre sont de 93 % de phase α et de 7 % d' Al_2Cu . La solubilité de l'élément cuivre dans l'aluminium (phase α) est d'environ 0,02 % à température ambiante.

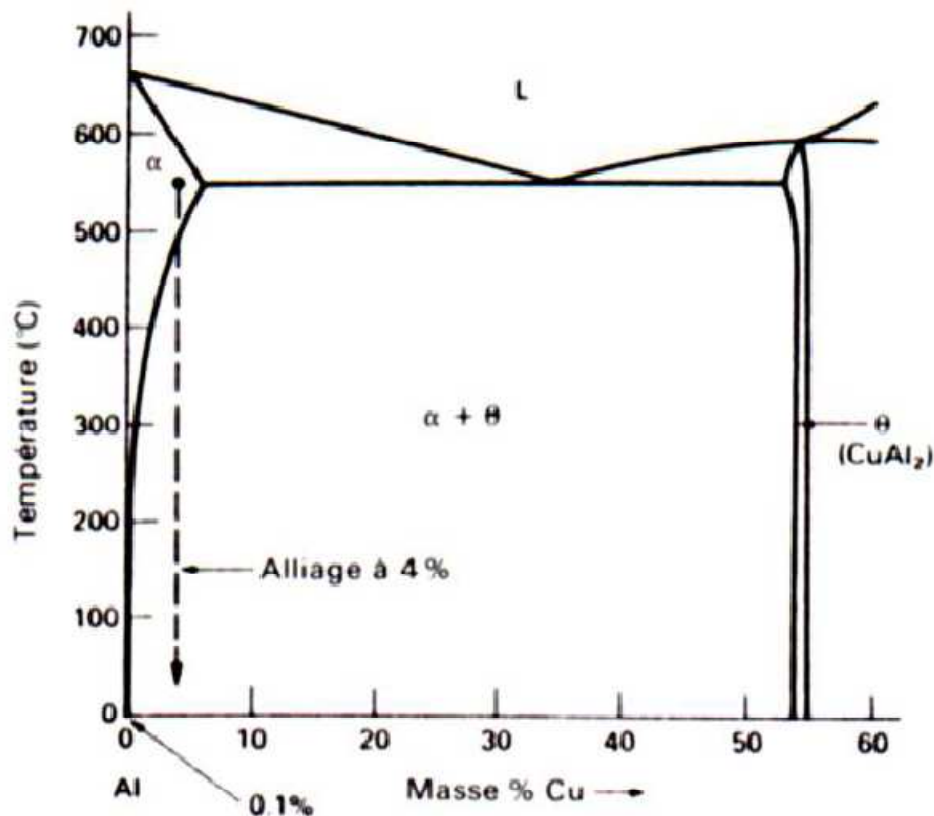


Figure I.1 - Diagramme de phases du système binaire aluminium-cuivre.

I.1.6.3.2 - Morphologie de la précipitation :

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés. Dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés,

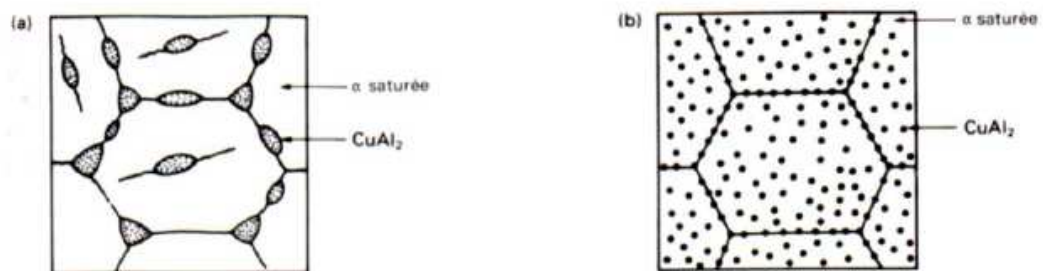


Figure I.2 - Microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 500°C. b) par refroidissement rapide à partir de 500°C.

Quand on refroidit lentement, l'enthalpie libre de précipitation est faible et le taux de germination est faible aussi. Pour assurer la proportion d'équilibre en Al_2Cu , les rares germes doivent croître en de gros précipités très distants les uns des autres. Les dislocations n'ont pas de mal à contourner les précipités et l'alliage ainsi obtenu a de faibles caractéristiques mécaniques.

Si au contraire, on refroidit l'alliage rapidement, la structure obtenue est beaucoup plus fine. Comme l'énergie motrice est élevée, le nombre de germes l'est aussi. Les précipités, quoique petits, sont très rapprochés. Les dislocations mobiles ont du mal à les franchir et l'alliage est ainsi plus dur. Si on refroidit trop rapidement, on n'a pas de précipitation du tout. Cependant, il est possible d'augmenter considérablement la dureté de l'alliage en lui faisant subir un vieillissement.

I.1.6.4 - Diversité des alliages d'aluminium :

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisateurs envisagées. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi, le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal 2000 pour le Cuivre, 3000 pour le Manganèse, 4000 pour le Silicium, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si et 7000 pour le Zinc. D'une famille à une autre les propriétés sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables et résistants à la corrosion tandis, que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique. Les alliages de la série 3000 se caractérisent par une faible résistance mécanique mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium, en plus ils ont une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage, en plus d'une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation [5].

I.1.6.5 - Quelques alliages d'aluminium _ cuivre :[3]

De nombreux alliages certains étant commercialisés depuis longtemps entrent dans cette famille. Leur durcissement est obtenu essentiellement par la précipitation des formes transitoire des phases Al_2Cu et $Al_2Cu Mg$.

Ces alliages peuvent être classés en quatre familles :

Alliages pour mise en forme :

- **Alliage 2117 :**

Très faiblement chargé en cuivre et en magnésium, cet alliage a des caractéristiques modestes mais une aptitude à la mise en forme particulièrement grande ; aussi est – il particulièrement bien adapté pour exécuter les pièces embouties de carrosseries automobiles et ceci d'autant plus qu'il peut facilement être soudé électriquement par point sans traitement de surface préalable.

Alliages pour bonne résistance mécanique

- **Alliage 2017 :**

Cet alliage, durci la phase Al_2Cu et, mais à un degré moindre, par $\text{Al}_2\text{Cu Mg}$, est essentiellement utilisé à l'état T4. Très connu sous la dénomination « Duralumin », il peut être considéré comme étant à l'origine de l'aluminium dans l'aviation et même à l'origine du développement de l'aviation elle-même.

- **Alliage 2024 :**

Cet alliage, plus performant que le précédent, est utilisé dans les deux états T4 et T6 (durcissement dû à $\text{Al}_2\text{Cu Mg}$ et, à un degré moindre, à Al_2Cu). Il est utilisé dans le domaine du transport (structures d'ales et de fuselage, pales d'hélicoptère en aéronautique), de la mécanique (mâts, charpentes ...), de l'armement (engins de franchissement) et du sport (cannes pour la pêche, arcs, flèches...).

- **Alliage 2014 :**

Il a déjà fait l'objet, à l'état T6, de nombreuses applications aéronautiques (en France : pièces forgées et matricées pour les avions Jaguar, Airbus, d'hélicoptère SA 330, tôles épaisses pour structure intégrale des avions Mirage III et IV de Dassault), en armement (galet et moyeux pour chenilles de chars, corps de propulseur), en mécanique (poutrelles).

Alliages pour résistance mécanique à chaud

- **Alliage 2618 :**

Alliage dont le durcissement est obtenu par phase $\text{Al}_2\text{Cu Mg}$ et qui présente, par ailleurs, une forte proportion de phases insolubles du type Al_9FeNi . Utilisé depuis de nombreuses années pour la fabrication des disques et aubes de compresseur en raison de sa bonne tenue à 200-250°C, cet alliage a été retenu pour la construction du concorde par suite de sa bonne résistance au fluage à 120-150°C et ceci pour des durées atteignant 30000 heures, de sa bonne tenue à la fatigue à 20°C et à 150°C, et de sa bonne résistance à la corrosion sous tension.

Alliages pour décolletage

L'addition d'éléments tels que le plomb, le bismuth ou le cadmium, permet d'éviter les copeaux longs lors de l'usinage et de favoriser leur fragmentation fine et régulière sur tours automatiques et à grande vitesse.

Deux alliages sont actuellement commercialisés :

- **Alliage 2030 :**

Cet alliage, dont la bonne aptitude au décolletage est obtenue par l'addition de plomb, est utilisé, particulièrement en France, depuis de nombreuses années : il présente des

caractéristique mécaniques relativement élevées à l'état T4 et également une bonne aptitude à l'anodisation, ce qui permet d'obtenir :

- ✓ une protection efficace pour les pièces soumises à des atmosphères corrosives,
 - ✓ une dureté superficielle élevée qui confère une grande résistance à l'abrasion et de bonnes qualités de frottement,
 - ✓ une couche autolubrifiante après imprégnation, ce qui est particulièrement efficace pour les pièces filetées, des possibilités de coloration.
- **Alliage 2011 :**

Cet alliage a également une bonne aptitude au décolletage grâce aux additions de plomb et de bismuth. Il présente, par rapport au 2030, l'avantage d'une meilleure aptitude à la déformation à chaud (filage à plus grande vitesse, possibilité d'obtention des pièces par matriçage), mais en contrepartie, l'inconvénient d'être plus corrodable : en atmosphère industrielle ou maritime, il ne doit pas être utilisé sans protection (l'anodisation constitue la meilleure protection) ; par ailleurs, sa sensibilité à la corrosion sous tension, notable à l'état T3, est peu accentuée à l'état T8.

I.1.6.6 - Utilisation des alliages d'Aluminium : [2]

L'aluminium est un excellent matériau d'emballage, en raison de son innocuité, de son imperméabilité et de son opacité aux rayons ultraviolets. Il est surtout utilisé dans la fabrication de profilés laminés : cornières, profils en U, en double T, tubes de sections ronde ou rectangulaire.

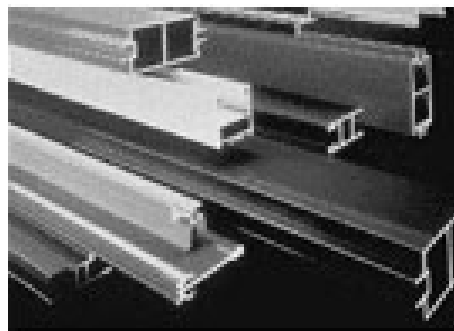


Figure I.3 - Quelques profilés laminés en alliages d'aluminium.

Une grande quantité d'alliages d'aluminium est dépensée à la fabrication de rivets et de boulons. Dans le bâtiment, l'aluminium présente de nombreux atouts en termes de développement durable :

- sa légèreté permet d'alléger les structures,
- la rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des

réalisations techniques performantes pour longtemps : profilés à coupure thermique, fenêtres ou menuiseries durablement étanches, garantissant une parfaite isolation thermique et acoustique, intégration aux façades de châssis de panneaux solaires pour la production d'électricité renouvelable, etc.

- sa résistance à la corrosion réduit les travaux de maintenance et étend la durée de vie des constructions,

- ininflammable, non toxique au contact, non émetteur de poussière ni de vapeur, l'aluminium dans le bâtiment est un matériau sain et sûr.

L'aluminium est 100% recyclable. Dans les secteurs du bâtiment et du transport, le taux d'aluminium récupéré et recyclé atteint 95%.

Du point de vue du développement durable, le recyclage de l'aluminium représente donc des avantages décisifs :

- il permet une importante économie de ressource,
- il n'utilise que 5% de l'énergie nécessaire à la production primaire,
- il émet 95% de gaz à effet de serre en moins.

➤ **Influence des éléments d'addition :**

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant)
- les alliages à durcissement structural (alliages trempant)

Cette différence entre 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.

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0.2}$, l'allongement à la rupture $A\%$, la dureté HB),
- la masse volumique,
- les conductivités électrique et thermique,

- la résistance à la corrosion,
- l'aptitude au soudage,
- l'usinabilité,
- l'aptitude à la déformation,
- l'aptitude à l'anodisation.

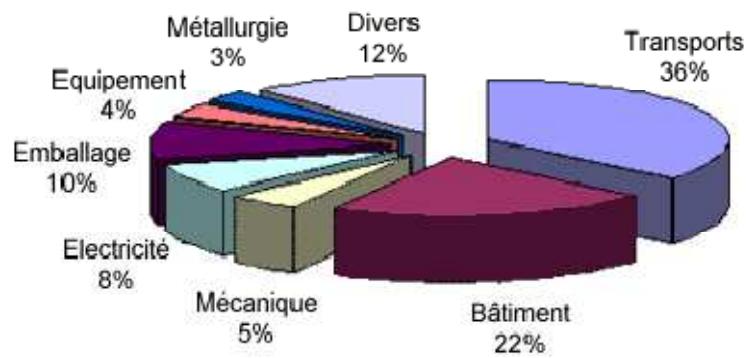


Figure I.4- Domaines d'utilisation des alliages d'aluminium.

CHAPITRE I.2 - ELABORATION DES ALLIAGES ALUMINIUM – CUIVRE

INTRODUCTION : [6]

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, l'aluminium est peu à peu devenu l'un des principaux métaux industriels. Des produits de haute technologie aux canettes de boissons, l'aéronautique, l'automobile etc. il s'en consomme plus de 30 millions de tonnes par an dans le monde. C'est à partir de la mine que commence la longue série de transformations de la Bauxite en métal. Toute une filière est née en amont et aval de cette pièce maîtresse de l'industrie de l'aluminium qu'est l'usine d'électrolyse.

I.2.1 - LE MINERAI DE L'ALUMINIUM : [11,12]

La production au niveau industriel de l'aluminium commence à partir de la bauxite, celle-ci se présente sous forme de poudre, granules, roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Elle contient entre 45 et 60% en poids d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) appelé alumine.

La teneur de la bauxite en oxyde de fer est relativement élevée, ce qui lui donne la couleur rouge. La bauxite blanche, est celle qui contient peu de fer, mais beaucoup de silice. Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison de leur faible teneur en silice (< 5%) [A]. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire, nécessaire à la fabrication de l'aluminium après une série de traitements. La figure I.2 illustre les principales étapes de production de l'aluminium.

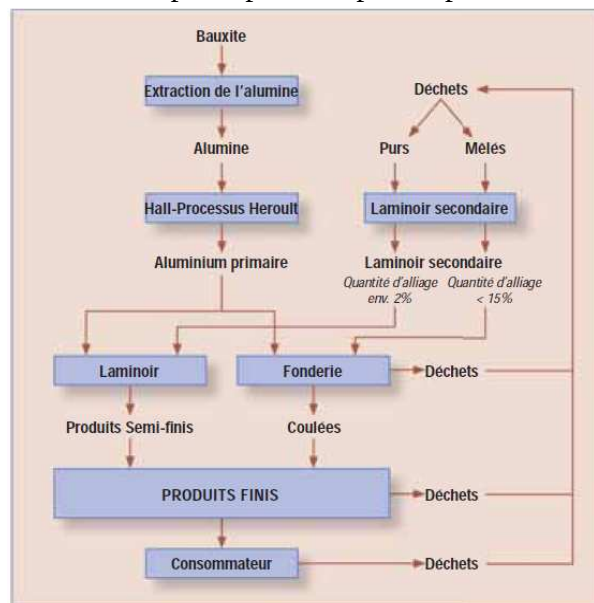


Figure I.5 - Etapes de production de l'aluminium. [8]

I.2.2 - Extraction de l'alumine pure (oxyde d'aluminium) à partir de la bauxite :

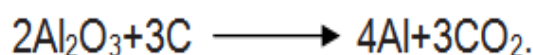
La récupération de l'alumine commence par un concassage et une trituration fine de la bauxite, puis de son chauffage sous pression à l'hydroxyde de sodium. Dans ce processus, un aluminat de sodium soluble dans l'eau est formé avec des résidus insolubles de fer, titane et silicium, appelés "boue rouge" qui sont séparés par sédimentation. A cette solution très diluée d'aluminat de sodium l'on rajoute des "germes cristallins" d'hydroxyde d'aluminium frais pour amorcer la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium pur ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Par le biais de la calcination à 1200°C , l'eau est éliminée de l'hydroxyde d'aluminium et il reste l'alumine anhydre pure (oxyde d'aluminium).

I.2.3 - Le processus Hall-Héroult: transformer l'alumine en aluminium.

L'obtention de l'alumine pure nécessite un processus électrochimique qui permettra d'extraire l'aluminium de son oxyde.

Comme le point de fusion de l'oxyde d'aluminium est très élevé, 2050°C , il est mélangé à de la cryolite qui réduit le point de fusion à 950°C . De plus, la cryolite fait augmenter la conductivité et en conséquence, l'apport d'électricité.

L'électrolyse a lieu dans un grand conteneur en acier revêtu au carbone ou au graphite, contenant des tiges d'acier pour conduire l'électricité. Les parois et le fond cladés au carbone forment la cathode et la coulée d'oxyde-cryolite d'aluminium est l'électrolyte. Les plaquettes de carbone pendues sur un montage au-dessus de la coulée servent d'anodes. Lors de l'électrolyse, le carbone de l'anode réagit à l'oxygène de l'alumine, et lors d'une réaction secondaire, de l'aluminium métallique est produit avec la formation de dioxyde de carbone:



L'aluminium liquide a une densité plus élevée que la coulée d'électrolyte et se dépose au fond du pot. Il est coulé en gueuse. Par le biais de ce processus, de l'aluminium d'une pureté de 99,0 – 99,9% est produit dont la plus grande partie est utilisée pour la production des alliages d'aluminium. Grâce à une électrolyse additionnelle, la pureté de l'aluminium peut être augmentée à 99,98% pour les produits semi-finis et à 99,99% pour les gueuses. Cet aluminium pur a une résistance très élevée à la corrosion et est particulièrement approprié pour l'anodisation. Il est utilisé pour briller des produits tels que les garnitures décoratives, les réflecteurs, les feuilles pour les condensateurs d'électrolyte et pour les tubes utilisés dans l'industrie chimique et alimentaire. Comme plus l'aluminium n'est pur, plus son coût

n'augmente, la pureté d'un aluminium spécifique utilisé pour un produit est déterminée par les exigences de son application. [7]

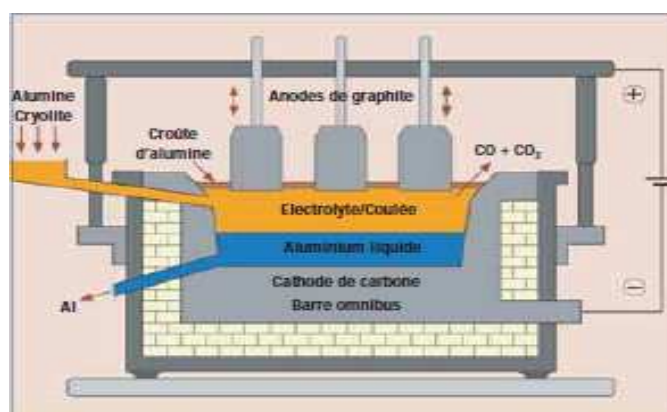


Figure I.6 - Schéma d'une électrolyse produisant l'aluminium pur.

L'aluminium pur présente certaines propriétés intéressantes, mais pour les améliorer ou pour lui donner des nouvelles, on lui ajoute des éléments d'alliages, ces alliages sont catégorisés comme alliages corroyés et alliages de moulage.

Dans notre travail on va étudier comment obtenir un alliage de corroyages de la série (2000) qui est l'alliage 2017A. Qui contient comme élément d'alliage principal le cuivre.

I.2.4 - L'alliage 2017A : [9,12]

Il considère comme l'un des alliages les plus anciennes, également très connu sous la dénomination Duralumin, peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même. Il est toujours très utilisé, à l'état T4. Il est considéré comme un alliage à durcissement structural utilisé dans les structures à résistance mécanique très élevée.

I.2.4.1 - Composition chimique de l'alliage 2017A :

Alliage	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)
2017A	0,20 - 0,8	0,7	3,5 - 4,5	0,40 - 1,0	0,40 - 1,0	0,10

Tableau. I.6 : Composition chimique de l'alliage 2017A. [13]

I.2.4.2 - Influence des éléments d'addition : ils sont classés dans le **tableau. I.6** suivant :

Élément d'alliage	Son rôle
Cu	Résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu. Bonne tenue à chaud.

	Aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels. Résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive. relativement élevée à l'état trempé revenu
Si	Coulabilité
Fe	Diminue les retassures internes
Mn	Aptitude a la déformation Resistance a la corrosion, Aptitude ou brasage et soudage
Mg	Caractéristiques mécaniques élevés Resistance a la corrosion, Soudabilité
Cr	soudabilité et taille de grain moyenne

Tableau. I.7 - Influence des éléments d'addition. [10]**I.2.5 : ELABORATION ET PREPARATION DE L'ALLIAGE 2017A : [12]**

Les alliages sont préparés après la sortie de l'aluminium pur des cuves on vide alors les poches de coulée dans des moules ou dans des fours ou l'aluminium en fusion est maintenu a une température de 650 680°C. En ajoutes les éléments d'alliages de notre alliage 2017A, qui son pré mélangés avec unes grandes précision selon les rosettes et qui se présentent sous forme de petites lingots, sont ajoutés a l'aluminium pur. L'alliage est purifié en injectant des éléments de gaz dans le métal en fusion.et on enlève ensuite les impuretés qui Flottent a la surface. Le métal en fusion est finalement coulé dans des petits lingots.

I.2.5.1 : Transformation de l'alliage d'aluminium :

Puisque notre alliage est un alliage de corroyage alors son élaboration pris en considération leur capacité à être mise en forme a l'état solide avec des déférentes types de mise en forme connus tel que le laminage, le tréfilage, le forgeage, l'extrusion etc.

Dans notre cas la transformation de notre alliage 2017A : en va utiliser la mise en forme par laminage. On utilise comme produit départ un produit moulé dont la forme respect les contraintes de fabrication.se produit appelé lingots de laminage.

I.2.5 .2: Principe de laminage : [11]

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme le métal, alliages ou tout autre matériau sous forme pâteuse. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres

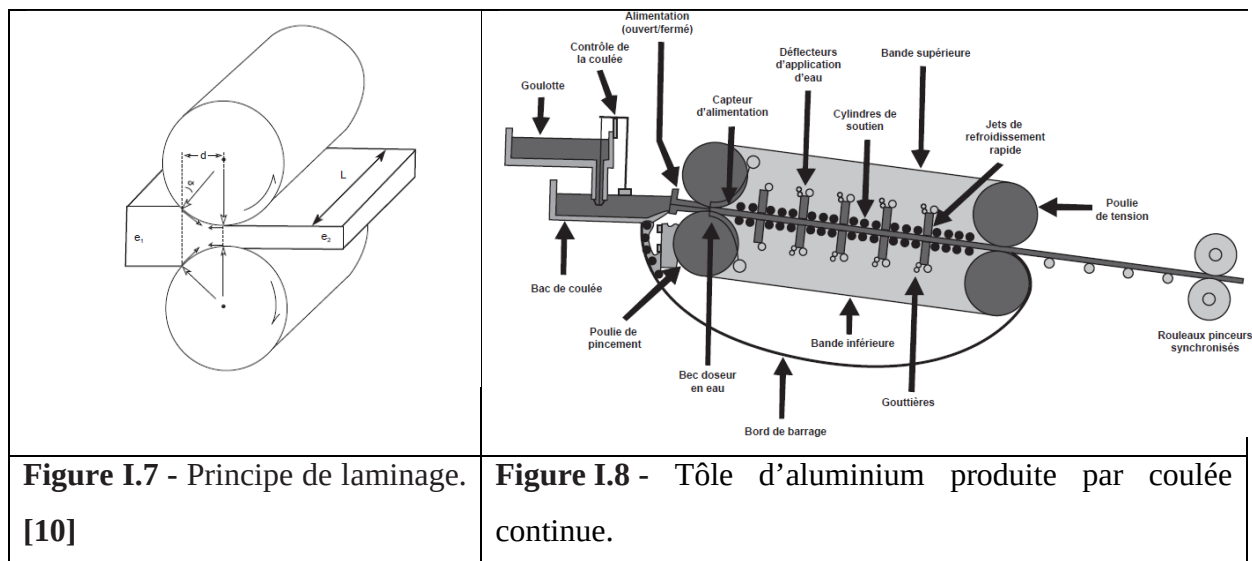
tournant dans des sens opposés, appelés *rouleaux*. Il existe aussi des opérations de laminage particulières utilisant plus de deux rouleaux.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau. Il permet également la production de barres profilées (produits longs).

Il existe de nombreux types de laminoirs :

- laminoir à produits plats
- laminoirs industriels pour les métaux
- laminoir à verre afin de produire les verres imprimés
- laminoir à produits longs
- laminoirs universels (métaux)
- laminoirs à fils
- laminoirs de bijoutiers

La figure suivante illustre le procédé de laminage où une tôle est engagée entre les deux cylindres tournant en sens inverse. La tôle d'épaisseur e_1 doit pouvoir s'engager entre les cylindres où elle sera déformée en compression pour ressortir à une épaisseur e_2 correspondant à l'ajustement du jeu entre les cylindres.



Note: Dans notre cas les barres d'aluminium sont très longues, elles sont de longueur 6m, et de diamètre 55 mm. On utilise alors un type de laminage un peu compliqué qui demande des laminoirs spéciaux utilisés généralement dans l'industrie pour obtenir des barres longues à formes cylindriques. C'est le laminage à produits longs, ou laminage par coulée continue. Le schéma suivant illustre le procédé de laminage par coulée continue.

CHAPITRE I.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES

INTRODUCTION : [3]

La notion de traitement thermique recouvre un ensemble d'opération ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de températures convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques : ductilité, dureté, limite d'élasticité...etc.

Ces traitements thermiques peuvent agir dans deux sens à savoir :

- Soit dans le sens d'une diminution de la résistance mécanique, accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement).
- Soit au contraire dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique (Ce sont les traitements de durcissement).

1.3.1 - CYCLE THERMIQUE : [6]

La variation de la température du métal en fonction du temps est appelée cycle thermique.

Le cycle thermique comporte généralement trois étapes (**figure I .6**)

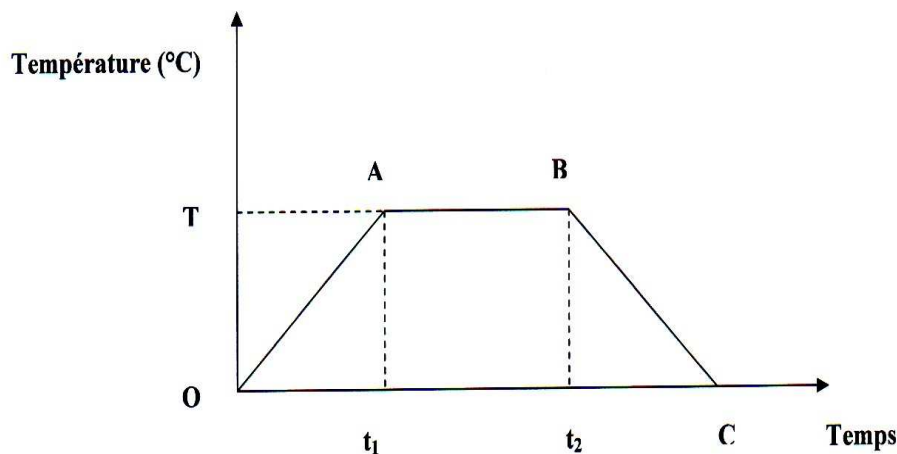


Figure I.9 - Cycle thermique.

➤ **Chauffage (Courbe OA):**

Le chauffage (généralement assez lent) est effectué de la température ambiante Jusqu'à une température T dite la température de traitement thermique.

➤ **Le maintien (droite AB) :**

La température est maintenue constante, de temps T_1 au T_2 . Cette durée dépend de la conductibilité thermique de l'alliage à traiter et de la cinétique des réactions qui se déroulent dans cet alliage à la température de traitement.

➤ **Refroidissement (courbe BC) :**

Durant cette opération la température du métal est ramenée à la température ambiante.

Le refroidissement peut être rapide ou lent, la vitesse de refroidissement dépend type de traitement et influe sur les caractéristiques finales du matériau traité.

Remarque :

- **Durant le chauffage :**

La surface de la pièce s'échauffe plus vite que le cœur du métal .Il est donc évident qu'il faut maintenir la pièce à la température T pour égaliser les deux températures, ce gradient de température est d'autant plus élevé que la pièce est volumineuse ou que son matériau est mauvais conducteur de la chaleur.

- **Au Refroidissement :**

La surface de la pièce se refroidit plus vite que le cœur, la vitesse de refroidissement au cœur de la pièce dépend du milieu de refroidissement.

Milieus de refroidissement :

- Faible vitesse : Au four, à l'air ;
- Vitesse moyennes : à l'air soufflé, dans l'huile ;
- Grandes vitesse : dans l'eau douce, dans l'eau salée

1.3.2 - Principaux types de traitements thermiques : [7,9]

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliques sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou en fin de transformation.
- Les traitements de trempe structurale comportent :
 - Une mise en solution.
 - Une trempe.
 - Une maturation ou un revenu produisant le durcissement.

1.3.2.1 - Les traitements d'homogénéisation :

Ce sont des traitements comportent un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits de fonderie ou corroyés, et destinés plus souvent à en faciliter la transformation à chaud au à froid (filage, forgeage, laminage...etc.).

Ils consistent en générale en maintiens de 6h à 48h à des températures allant de 450°C à 610°C, qui ont pour but dissoudre les phases métalliques et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

1.3.2.2 - Les traitements d'adoucissement :

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont des traitements de Restauration et des recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium. Seules les températures traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300°C pendant 1 à 8 heures ;
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°C pendant 0,5 à 3 heures.

1.3.2.3 - Les traitements de trempe structurale :

Traitement thermique complet assurant un durcissement structural.

Ce traitement comprend généralement :

Une mise en solution suivie immédiatement :

- D'un refroidissement convenable (Trempe) ;
- D'une maturation ou revenu produisant un durcissement.

1.3.3 - MISE EN SOLUTION : [1,8]

Opération consistant à maintenir pendant une durée et à une température suffisante, un alliage à l'état solide de façon que les éléments d'addition solubles soient dissous de quantité convenable dans l'aluminium.

Suivant les alliages, la mise en solution peut être effectuée par une opération spéciale (mise en solution séparée) ou s'accomplir spontanément au cours d'une transformation à chaud (refroidissement des pièces moulées).

1.3.3.1 - Trempe :

Après sa mise en solution solide, l'alliage se refroidit assez rapidement pour que la solution solide reste sursaturée en éléments d'addition à la température ambiante, après cette opération l'alliage est en état de trempe fraîche avec des caractéristiques mécanique qui n'ont pas sensiblement augmentées par durcissement mais une bonne plasticité.

En effet, dans les alliages d'aluminium, pour que les caractéristiques mécaniques soient optimales, il faut que la concentration de la solution solide soit sensiblement la même qu'à la température de mise en solution, ce qui n'implique pas nécessairement que refroidissement soit très rapide. C'est là qu'intervient la notion de vitesse critique de trempe qui peut être considérée comme la vitesse minimale qui permette d'obtenir à la température ambiante la solution solide sursaturée.

1.3.3.2 - Maturation (vieillissement naturel) :

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel.

(Evolution spontanée à la température ordinaire de la solution solide sursaturée).

Le comportement des alliages lors de la maturation est très variable d'une famille à l'autre.

Après cette évolution, l'alliage est à l'état **mûri**.

1.3.3.3 - Revenu (vieillissement artificiel) :

Le revenu (maturation artificielle) se pratique après la trempe, par chauffage on adopte les plus souvent 4 heures à $160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ou $155^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. La température et la durée de revenu influent beaucoup sur les caractéristiques mécaniques. Il permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté et les contraintes thermiques internes obtenues lors de la trempe. Lorsque la température du revenu monte, la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, mais l'allongement diminue.

Le but de revenu est diminuer les effets de la trempe d'homogénéisation et stabiliser les propriétés mécaniques et d'atténuer ou faire disparaître les tensions internes.

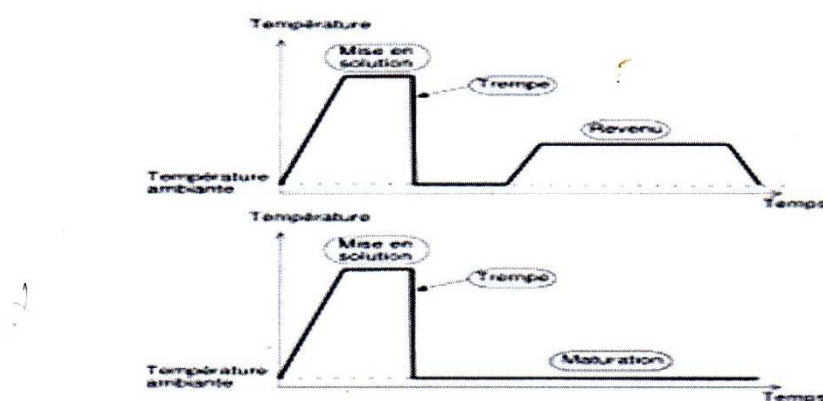


Figure I.10 - Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium. [2]

En vue d'obtenir une augmentation des caractéristiques mécaniques par durcissement structural.

1.3.3.4 - Le recuit :

Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. A l'occasion d'un recuit, les grains (monocristaux) du métal se reforment. Ce procédé est utilisé pour éliminer les effets de phénomènes mécaniques ou thermiques considérés comme néfastes. Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce. Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage).

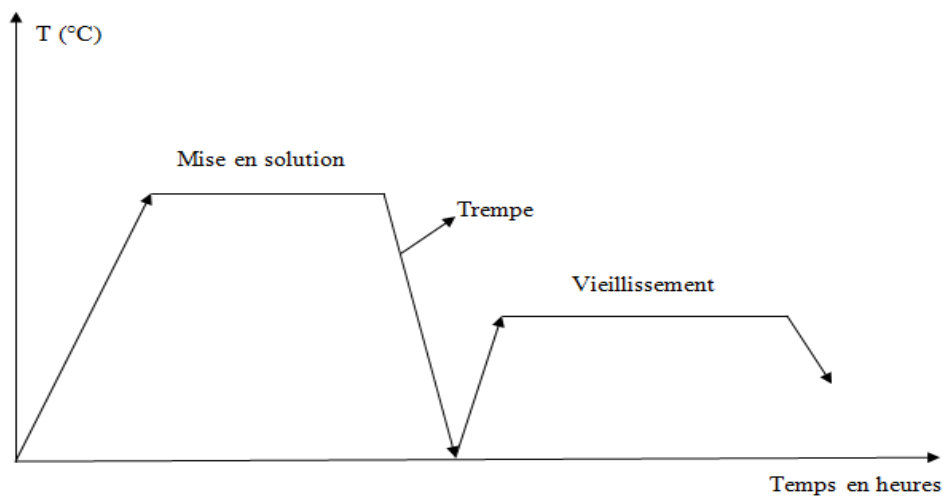


Figure I.11 - Cycle thermique du durcissement structural.

1.3.4 - PRINCIPE DE DURCISSEMENT STRUCTURAL :

Au cours du durcissement structural et pendant le vieillissement, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et la durée de vieillissement. Ce phénomène est très complexe, pour mieux comprendre le processus de durcissement structural on prend l'exemple de l'alliage Al-4 %Cu (Fig. II.2), qui serve de base pour l'étude des phénomènes de précipitation.

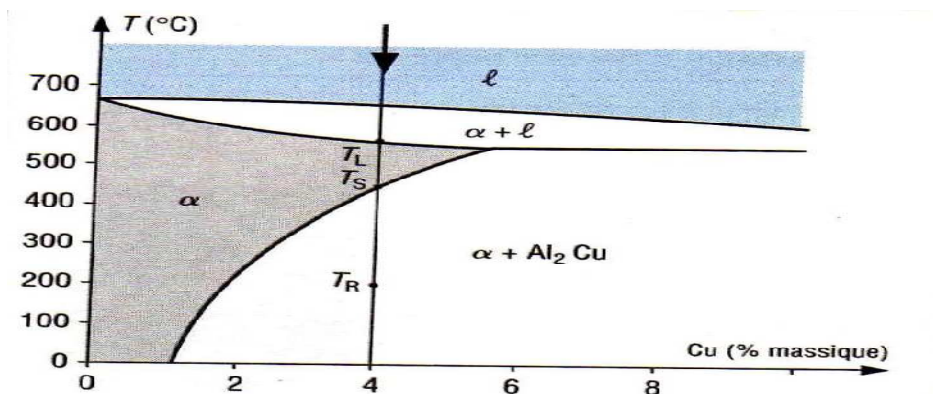


Figure I.12 - Diagramme d'équilibre partiel Al-Cu. [4].

D'après le diagramme Al - Cu (**Fig. I.12**), la solution solide α possède une grande étendue qui croît avec la température. Pour des températures inférieures à 548°C ou plus exactement entre la température T_L et T_s (mise en solution), l'alliage Al-4%Cu est constitué d'une solution solide homogène α ou les atomes de cuivre sont répartis au hasard dans le réseau cristallin

1.3.4.1 - Microstructure :

La microstructure décrit l'ensemble des grains ou des particules microscopiques qui caractérisent la structure d'un grand nombre de matériaux.

On peut caractériser la microstructure des matériaux à différentes échelles selon ce que l'on cherche à observer. Pour chaque échelle il faut faire appel à un outil de taille appropriée, de l'échelle macroscopique à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au μm), le microscope électronique (observation 100 au nm) et la diffraction des rayons X dont la longueur d'onde est de l'ordre du dixième de nm, on étudie les structures cristallines [3,15].

1.3.4.2 - La macrographie :

La macrographie consiste en un examen d'ensemble d'une structure métallique ou d'alliage qui s'effectue à l'œil nu, ou avec de faible grossissement (inférieur à 100). Cet examen peut aussi s'effectuer sur des sections prélevées sur des ébauches (lingots, pièces de forge...) que sur des produits finis. Il permet de déterminer l'allure de la constitution cristalline de grandes surfaces qui doivent être soigneusement polies d'un papier émeri fin en évitant tout écrouissage au cours de travail. Puis cette surface soumise à une attaque par des réactifs appropriés. Ce réactif agit par une dissolution à vitesse inégale de la surface métallique et crée ainsi des différences de niveau permettant l'observation. La macrographie met en évidence :

- la grosseur et la forme des grains : de petits grains traduisent en général un refroidissement rapide alors que les gros grains supposent un refroidissement lent.
- les traitements mécaniques en observant la déformation des grains (déformation à froid, la différence de taille de grain (déformation à chaud)
- La répartition d'inclusion ou de cavités.

1.3.4.3 - La micrographie:

La micrographie a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions métalliques, des microfissures et aussi de l'organisation de diverses phases présentes (leur taille, leur forme, leur distribution) donc sa microstructure. L'obtention de la

surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique.

1.3.4.3.1 - Observation par microscopie :

La micrographie a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions métalliques, des microfissures et aussi de l'organisation de diverses phases présentes (leur taille, leur formes et leur distribution).

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique.

➤ Observation par microscope optique :

Du fait de son pouvoir de résolution insuffisant, il n'est utilisé que pour la détermination de la structure et la texture granulaire des matériaux étudiés.

➤ Microscopie électronique à balayage :

est utilisé afin d'observer plus finement l'état de surface des matériaux et rendre compte des précipités grossiers présents dans les divers matériaux. Le principe de l'imagerie **MEB** consiste à composer une image de surface à partir des électrons secondaires éjectés du matériau sous l'effet du faisceau primaire. L'énergie de ces électrons dépend directement de l'énergie des électrons primaires et du numéro atomique de l'élément qui interagit avec le faisceau primaire [3].

1.3.5 - IMPORTANCE DE LA METALLOGRAPHIE :

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques.

Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées : Mise au point, utilisation, détérioration par corrosion

Grâce à de nombreux microscopes optiques et caméras vidéo, il est possible de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1000 fois. De ces nombreuses observations, et grâce à une bonne connaissance de la physique des solides et des diagrammes de phases des matériaux, une analyse précise peut être menée, et de nombreux paramètres tels que la vitesse de refroidissement ; la grosseur des grains ; l'homogénéité ; la présence d'impuretés peuvent être visualisés, et on peut très rapidement avancer dans la compréhension des diagrammes d'équilibre.

CHAPITRE I.4 - ESSAIS MECANQUES

INTRODUCTION :

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages : aptitude à la déformation par traction ou compression, résistance à la pénétration.....etc. .

Les résultats obtenus, par ces différents essais qui en œuvrent des techniques particulières, sont en relation directe avec la structure du métal et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles d'utilisation.

I.4.1 - ESSAI DE TRACTION : [1]

Le plus simple et le plus courant. Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte déformation.

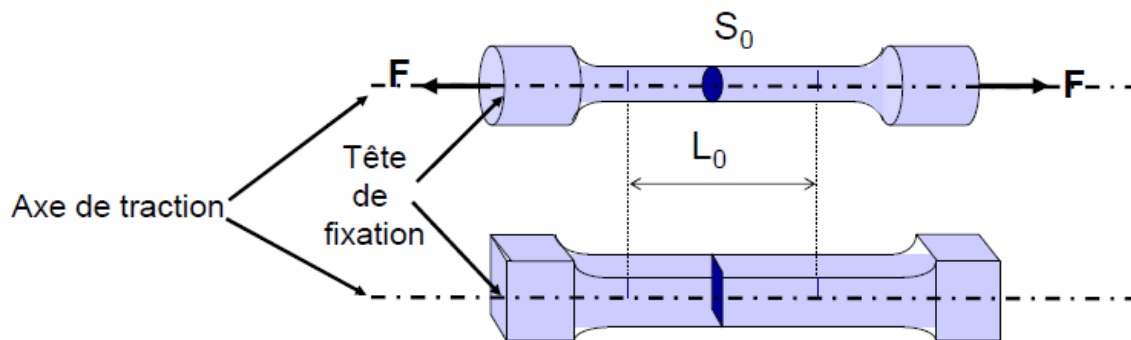


Figure I.13 - Epreuve de traction.

Ce type d'essai est normalisé par des réglementations nationales ou internationales :

- Géométrie des éprouvettes
- Machine d'essai et leur étalonnage
- Techniques expérimentales mises en œuvre.

I.4.1.1- Déformations des éprouvettes :

Selon les normes internationales les éprouvettes de traction doivent satisfaire des conditions normalisées suivantes :

Les dimensions des éprouvettes sont fixées par des normes en fonction du type d'alliage (acier, fonte, aluminium...etc.), de la forme (rond, plate, fil..) et des dimensions des sections.

Pour les d'aluminium de forme (d ou b > 0,04mm), la norme est **NF A 03-251**.

Et le dimensionnement normalisé est : $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$.

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

Avec : $K = 5,65$ et s_0 : section initial en mm^2

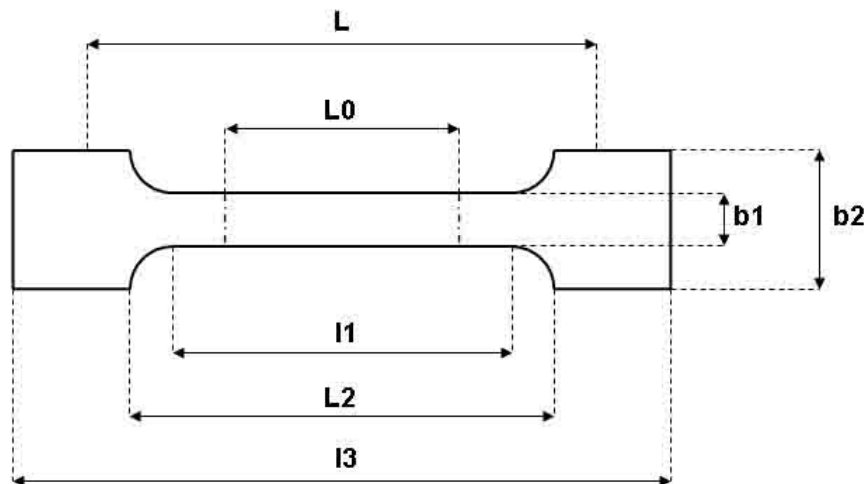


Figure I.14 - Dimension d'éprouvette de traction.

L_0 = Longueur de référence

L = Ecartement entre outillages

l_1 = Longueur de la partie calibrée étroite

L_2 = Ecartement entre les parties parallèles larges

l_3 = Longueur totale

b_2 = Largeur dans la zone d'épaulement

b_1 = Largeur dans la zone de la longueur de référence

h = épaisseur de l'éprouvette

I.4.1.2 - Courbe contrainte-déformation pour un matériau ductile : [1,2]

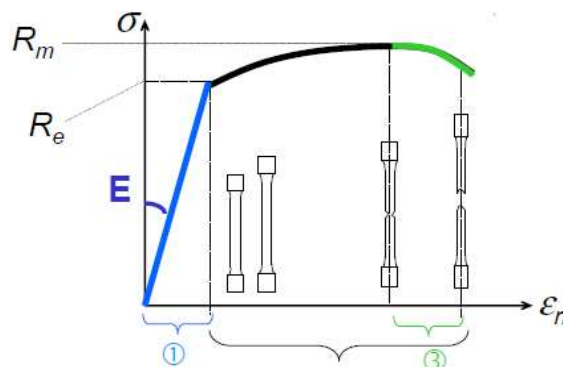


Figure I.15 - Schéma d'une éprouvette de traction et son évolution en cour d'essai.

La Courbe si dessus montre l'évolution d'une éprouvette de traction en cour d'essai de traction pour un matériau ductile

Avec : $\sigma_n = F / S_0$: contrainte nominale.

$\epsilon_n = \Delta L / L_0$: déformation nominale.

$R_e = F_e / S_0$: limite apparente d'élasticité (MPa).

$R_m = F_m / S_0$: résistance maximale à la traction (MPa).

1 : domaine élastique : (la déformation est réversible) :

2 : domaine plastique : (déformation est réversible) déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée laisse apparaître un allongement plastique.

3 : la striction et la rupture : (déformation irrémédiable) apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles.

Domaine élastique : la contrainte est proportionnelle à la déformation (loi de Hooke) : constante de proportionnalité E (module d'Young).

I.4.1.3 - Exploitation de la courbe :

La figure si dessous montre les déférents paramètres qui caractérisent la zone élastique et la zone de déformation plastique.

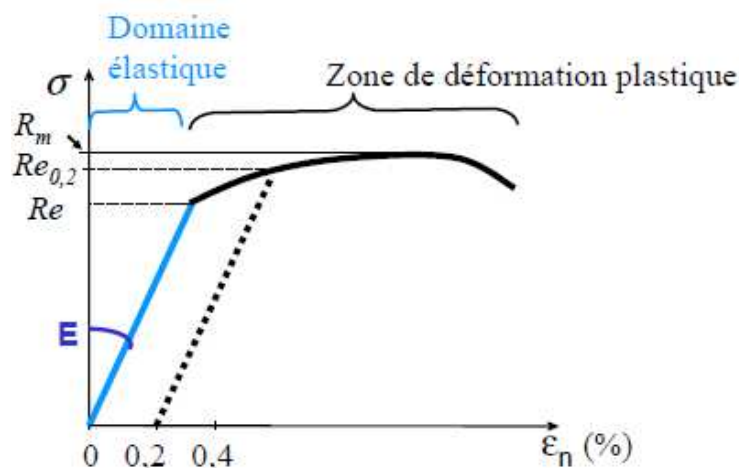


Figure I.16 - Courbe contrainte déformation d'un matériau ductile.

- **Module d'Young E:**

$$\sigma_n = E \epsilon_n$$

- **Limite d'élasticité Re** = limite entre zones élastique et plastique : limite d'élasticité conventionnelle **Re(0.2)**

(Contrainte correspondant à 0,2 % de déformation)

- **Résistance à la traction R_m** : contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction
- **Allongement $A\%$** : si $A\%$ allongement à la rupture

Alors on peut écrire : $A = (L_f - L_0)/L_0 = \Delta L / L_0$

- **Striction Z** : variation de section à l'endroit où la rupture s'est produite elle est donnée par la formule suivante :

Coefficient de striction :

$$Z \% = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100$$

- **Allongement à la striction Z_u** :

$$Z_u \% = \frac{S_o - S_u}{S_u} \cdot 100$$

I.4.1.4 - Contraintes et déformations vraies : [1,2]

Grandeurs rapportées aux dimensions instantanées

- **Contrainte vraie : $\sigma = F / S$** avec : S est la section à l'instant considéré

Au cours d'une déformation plastique, le volume se conserve

$$S_0 L_0 = S L$$

- **Déformation vraie ϵ** :

Pour une déformation élémentaire: $\epsilon = dL/L$

ϵ vraie s'écrit comme suit :

$$\epsilon = \int_{L_0}^L dL/L = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + e)$$

On peut relier grandeurs nominales (rapportées aux dimensions initiales) et grandeurs vraies et on écrit :

$$\epsilon_n = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \qquad \epsilon = \ln(1 + \epsilon_n)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} (1 + \epsilon_n) = \sigma_n (1 + \epsilon_n)$$

I.4.2 - ECROUISSAGE : de formation plastique d'un alliage métallique qui s'accompagne d'un durcissement du à une très grande augmentation de la densité des dislocations qui peut atteindre jusqu'à : $10^{12} \text{ cm} / \text{cm}^3$.

I.4.2.1 - Le taux d'écrouissage : le métal qui a subi une certaine déformation plastique dit écroui. Le taux d'écrouissage est égal aux taux de déformation. Son intensité peut caractériser, selon le type de déformation imposé, par la valeur : $\frac{\Delta L}{L}$ Allongement, par la valeur de réduction :

$$\frac{S_0 - S}{S}, \text{ ou d'épaisseur : } (E - e)/e.$$

I.4.2.2 - Le coefficient d'écrouissage n : est défini analytiquement dans la partie plastique (non linéaire) d'une courbe de traction rationnelle selon loi: Ludwik-Hollomon

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon^n$$

ou bien :

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n$$

Avec : σ_0 , k et n sont des constantes; k est parfois appelée consistance.

n : coefficient d'écrouissage ou coefficient de consolidation.

I.4.3 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX :

Trois comportements possibles : fragile, ductile et élastique non linéaire : sont représentés sur la figure suivante

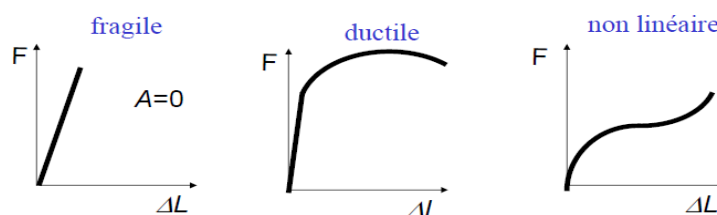


Figure I.17 - Courbes de traction possibles. [2]

1 : matériaux fragile :

Domaine plastique n'existe pas elle caractérise les métaux fragile comme le verre, les céramiques, le béton, les polymères thermodurcissables...etc.

2 : matériaux ductiles :

Déformation plastique permanente et importante on trouve ce type de graphes dans les métaux, alliages, polymères plastiques...etc.

3 : élastomères :

Déformation plastique non proportionnelle à la charge.

I.4.4 - LA DURETE : [1,2]

La mesure de la dureté correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété mécanique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration

I.4.4.1 - Types d'essais :

Ils existent plusieurs essais mais les plus utilisés sont l'essai de BRINELL, VICKER, ROCKWELL.

1 - Essai Brinell (NF EN 10003-1 à 3) : Le pénétrateur est une bille en acier trempé (dureté HBS) ou en carbure de tungstène (dureté HBW) de diamètre D (mm). L'empreinte est une calotte sphérique de diamètre moyen d (en mm, moyenne de deux diamètres orthogonaux mesurés à l'aide d'un appareil optique approprié).

La charge d'essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée à D Et au matériau testé. La dureté est donnée par le rapport de F (en kg force à l'origine) à la surface de l'empreinte, exprimée sans dimension :

$$HBW = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

F : est la force appliquée en kilogramme-force (kgf) ; Si F est Newton, il faut multiplier F par 0,102

D : le diamètre de la bille en millimètre (mm).

d : le diamètre de l'empreinte laissée par la bille en millimètre (mm).

h : profondeur en millimètre (mm)

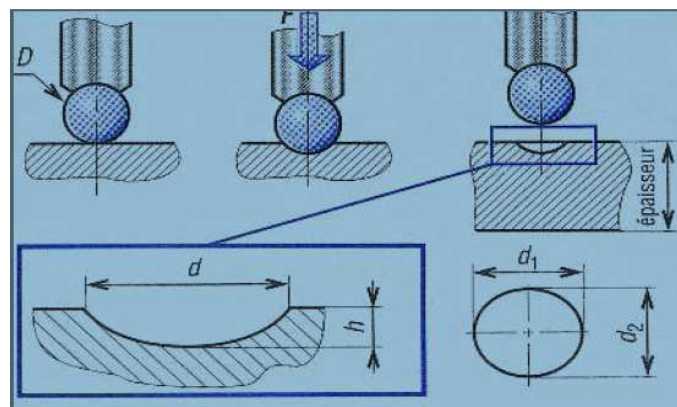


Figure I.18 - Essai de dureté Brinell.

2 - Essai de micro dureté Vickers : [1]

L'essai de la microdureté Vickers consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136° , sous une charge F , et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté est donnée par le rapport de F (en kg-force à l'origine) à la surface latérale de l'empreinte pyramidale, exprimée sans dimension :

$$HV = 0,102 \frac{2F \cdot \sin (136^\circ/2)}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

$$H_V = F / S$$

$$S = d^2 / (2 \cdot \sin A/2)$$

$$HV = 0,189 F / d^2$$

d : diagonale moyenne de l'empreinte en millimètres.

A : angle au sommet du pénétrateur : 136° .

F : charge d'essai en newtons, celle qu'on a appliquée est de 10 g.

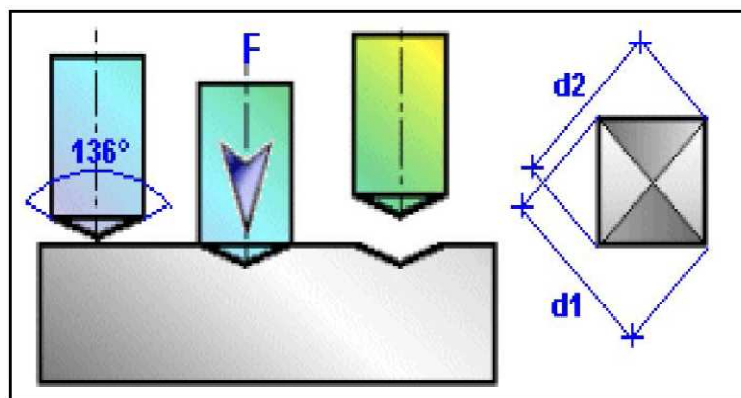


Figure I.19 - Principe de l'essai Vickers.

3 - Essai de dureté Rockwell :

Le pénétrateur est soit une bille en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté est définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge.

Pour les fortes duretés, on utilise un pénétrateur en diamant conique (essai HRC)

Pour les faibles duretés, on utilise un pénétrateur en acier trempé avec bille (essais HRB et HR F).

❖ Exécution de l'essai :

- Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une pré charge F_0 . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures.

- Une surcharge F_1 est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale d'essai F ; le pénétrateur descend.
- La surcharge est retirée, entraînant une légère remontée du pénétrateur en raison de la disparition d'une partie élastique de la déformation.
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement h de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous pré charge F_0 . pénétrateur descend.

a - Essai Rockwell C (HRC) : [1,2]

Le pénétrateur est un cône en diamant d'angle au sommet 120° . L'accroissement se mesure en unité égal à 0,002 mm. La charge utilisée est 150 N dont 10 N de pré charge. Cet essai est utilisé pour qualifier les aciers durs. Aciers trempés.

b - Essai Rockwell B (HRB) :

En utilise le même principe que la dureté (HRC). Le pénétrateur est une bille d'acier trempé de diamètre 1,59mm. L'accroissement se mesure également en unité à 0,02 mm. La charge utilisé est 100 N dont 10 N de pré charge .cette essai est utilisé en aciers doux, non trempé, alliages d'aluminium et non ferreux.

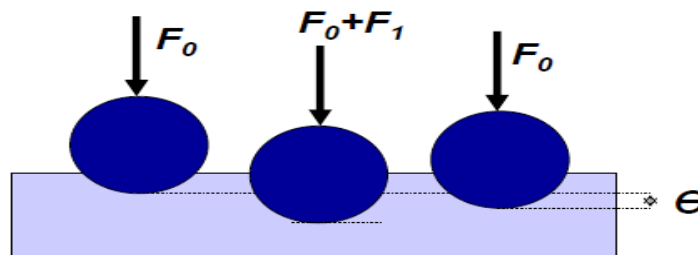


Figure I.20 - Principe l'essai Rockwell B (HRB).

I.4.5 - DUCTILITE : Propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre (aptitude des matériaux à la déformation plastique). C'est un atout important pour la mise en forme des matériaux.

I.4.6 - TENACITE : La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures. L'aire sous la courbe de traction $F(L)$ représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette.

La ténacité s'exprime par la relation suivante :

$$W = \int_0^{L_f} F(\Delta L).dL$$

I.4.7 - LES ESSAIS DE FISSURATION : [2]

I.4.7.1 - La résilience :

L'essai Charpy : a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce que l'on appelle leur **résilience**, c'est-à-dire l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section égale à 1cm^2 en utilisant un mouton-pendule.

L'éprouvette de référence utilisée est un barreau de longueur 55 mm, à section carrée de dix par dix millimètres et entaillée sur une profondeur de 5 mm. L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V. Comme il ne s'agit pas d'une fissure parfaite mais d'une entaille, on peut observer une dispersion des résultats liée à la nucléation d'une fissure principale au fond de l'entaille.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le mouton remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

La résilience, généralement notée K_{CV} se calcule comme suit :

$$K_{cv} (J / \text{cm}^2) = \frac{M \cdot g \cdot \Delta h}{1 \text{ cm}^2}$$

Avec : La résilience K_{cv} : l'énergie consommée lors de la rupture d'éprouvettes de référence de section égale à 1cm^2 au cours d'un essai Charpy.

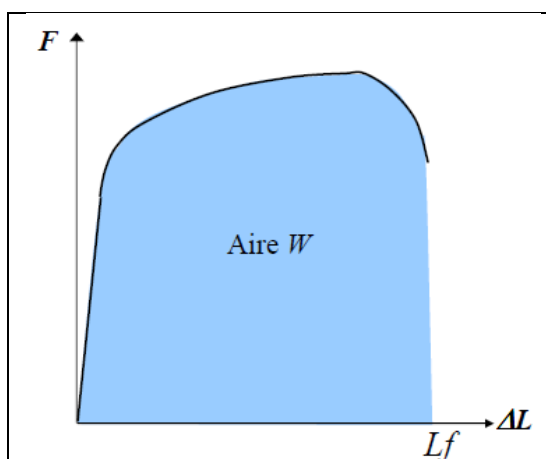


Figure I.21 - Courbe de traction montrant la ténacité.

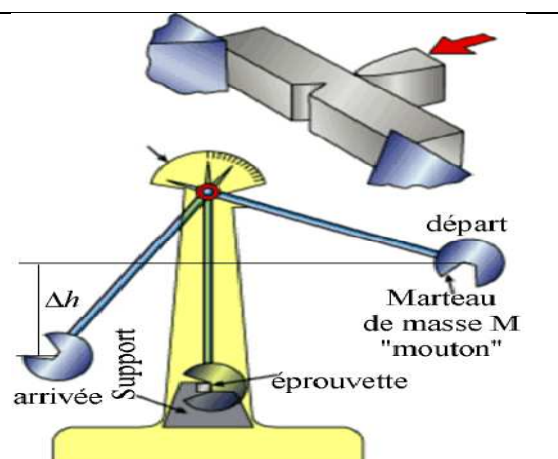


Figure I.22 - Essai de Charpy.

CHAPITRE I.5 - DEFAUTS CRISTALLINS ET DIFFUSION

I.5.1- DEFAUTS CRISTALLINS : [1]

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas constitués de cristaux parfaits (dans lesquels tous les nœuds seraient bien à leurs places), ils ne sont généralement pas purs et souvent, même, ils sont utilisés sous forme d'alliage c'est-à-dire qu'ils contiennent des atomes étrangers ajoutés volontairement.

Cette situation va engendrer la présence dans le métal de base d'un certains nombres d'anomalies que l'on peut répertorier sous le titre de défauts cristallins.

On distingue quatre types de défauts :

- Les défauts ponctuels, de dimension 0 : ils concernent un nœud unique, et ne perturbe que les quelques nœuds voisins, par exemple les atomes interstitiels.
- Les défauts linéaires ; Les dislocations, dimension 1 : il ne concerne que les nœuds situés sur une courbe, et ne perturbent que quelques nœuds voisins.
- Les défauts plans, de dimension 2 : surfaces, joints de grains, joints de macles.
- les défauts en volume, de dimension 3 : des précipités, des inclusions (les saletés) des pores.

I.5.1.1 - Les défauts ponctuels :

En cristallographie, les défauts ponctuels sont des défauts qui existent au niveau des dimensions atomiques, et peuvent être créés par agitation thermique, écrouissage,...

Ils influent sur certaines propriétés physiques tels que la conductibilité électrique, les propriétés magnétiques,...

Ces défauts correspondent à 4 situations :

I.5.1.2 – Lacune :

La lacune caractérise l'absence d'un atome d'un site normale du réseau cristallin 1.

I.5.1.3 - Atome auto interstitiel :

Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, on a affaire à auto- interstitiel (2)

I.5.1.4 - Atome étranger en substitution (3) :

Un atome étranger occupe un nœud du réseau. Chimiquement, il s'agit d'une impureté, mais on dit ici qu'il s'agit d'un élément d'alliage car cet atome étranger est dissous dans le métal de base (solution solide de substitution). La présence d'un tel atome étranger provoque de légers déplacements des atomes environnants

I.5.2 - ATOME ÉTRANGER EN INSERTION (4) :

Lorsqu'un atome étranger de petite taille (4) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin.

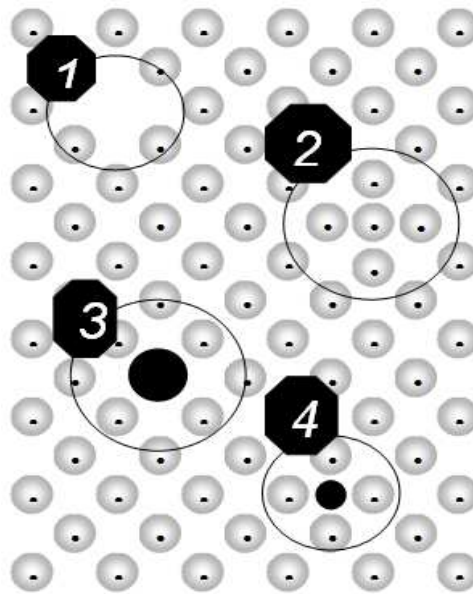


Figure I.23 - Types de défauts ponctuels.

I.5.3. DÉFAUTS À UNE DIMENSION (DEFAUTS LINEAIRES) :

Une façon d'expliquer le glissement consiste à imaginer que les mouvements atomiques plan sur plan se font de manière rigide, c'est-à-dire que tous les atomes se déplacent en même temps. Une autre façon plus économique en énergie de produire un glissement est de faire « glisser » certaines parties du cristal avant d'autres. C'est le concept de glissement localisé.

A un instant donné, on peut définir une frontière entre la partie du plan qui a déjà glissé et la partie du plan qui est encore « intacte ». Cette frontière correspond à un défaut linéaire appelé dislocation. Il faut essentiellement distinguer deux types de dislocation :

Les dislocations vis et dislocation coin (Fig. I.16).

Pour caractériser une dislocation on utilise le concept de vecteur et de circuit de Burgers.

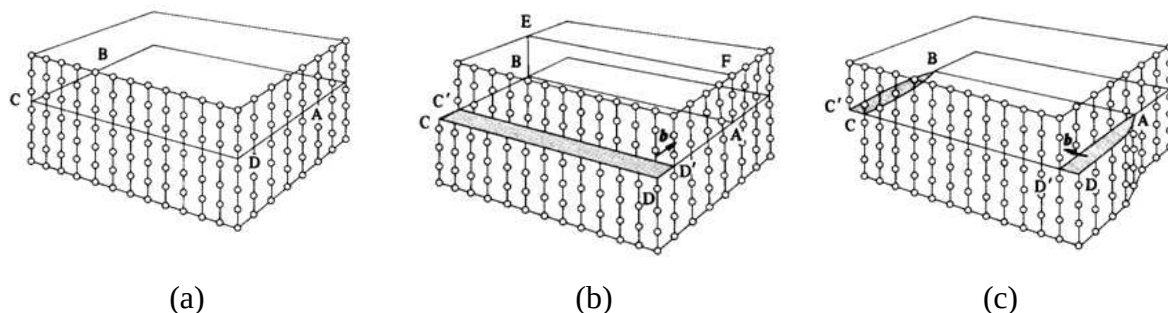


Figure I.24 - (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis.

I.5.3.1 - Dislocation coin :

Elle est le défaut linéaire résultant de l'absence d'un demi-plan atomique. La dislocation coin peut être représentée par un plan cristallographique qui se termine à l'intérieur du réseau cristallin. Au voisinage de la dislocation le cristal est déformé entraînant des contraintes de compression d'un côté et de traction de l'autre côté.

I.5.3.2 - Dislocation vis :

Les dislocations vis peuvent être comprises comme la ligne de séparation entre le réseau cristallin non perturbé et une zone de décalage partiel du réseau cristallin par rapport à la région avoisinante du réseau, ce genre de dislocation peut changer facilement de plan de glissement, car le champ de contrainte a une symétrie radiale. Et on désigne par une dislocation mixte la combinaison des deux types suscités:

I.5.3.3 - Dislocation mixte : (Figure I.25)

Elle est le résultat de l'existence des deux dislocations linéaire ; vis et coin.

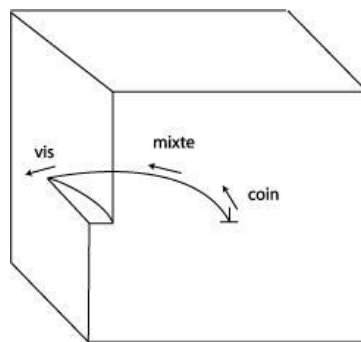


Figure I.25 – Dislocation.

I.5.3.4 - Le vecteur de Burgers : [2]

Le vecteur de Burgers se définit comme étant le vecteur nécessaire à boucler un circuit initialement fermé dans le cristal parfait et qui se trouve ouvert lorsqu'il enlace la ligne de dislocation. Ce vecteur n'est pas quelconque dans un cristal mais représente une translation du réseau. Par exemple dans l'aluminium cubique faces centrées, le vecteur de Burgers traditionnellement rencontré est $b = a/2 [110]$, de norme $|b| = 0.29 \text{ nm}$. En termes plus mathématiques, il s'agit de l'intégrale du déplacement sur un circuit fermé enlaçant la ligne de dislocation u : $b = \oint u$. Physiquement, le vecteur de Burgers représente l'amplitude de la déformation transportée par une dislocation. Comme les dislocations sont des objets flexibles, deux dislocations peuvent interagir pour former une troisième dislocation si et seulement si la quantité de déformation est conservée : on parle de jonction attractive. Il s'ensuit qu'à un

nœud entre plusieurs dislocations, la somme des vecteurs de Burgers est nulle (analogue de la loi de Kirchhoff).

I.5.3.5 - Défauts à deux dimensions (défauts plans) :

Ce sont par exemple les surfaces libres telles que les perturbations du voisinage des atomes de surface qui ont perdu certains de leurs voisins, et les interfaces entre grains, ou entre phases différentes. Nous citerons aussi les joints de grains et les joints de macles.

I.5.3.5.1 - Les joints de grains :

Les matériaux cristallins utilisés couramment sont rarement constitués d'un seul cristal (à l'exception de certains cas : les semi-conducteurs, diodes et transistors) : ils sont formés d'un ensemble de petits cristaux ; des grains qui forment un milieu continu. Les surfaces d'accrolement des grains adjacents sont des joints de grains ; ils assurent la cohésion entre des cristaux d'orientation différente. L'épaisseur d'un tel joint est de deux ou trois distances inter atomiques.

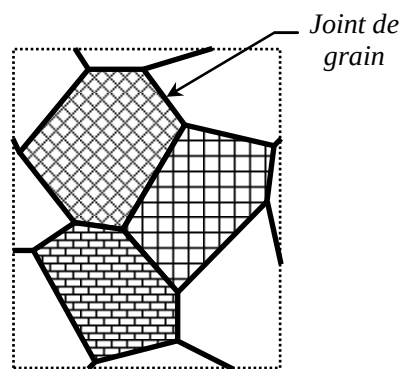


Figure I.26 - Joints de grains.

I.5.3.5.2 - Joints de macles :

C'est un plan dans lequel les nœuds restent correctement ordonnés selon le système cristallin du métal et duquel les réseaux des deux cristaux sont symétriques et non pas aligné comme se serait le cas dans un cristal unique. Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC.

I.5.3.6 - Défauts trois dimensions (défauts volumiques) :

Les défauts volumiques sont essentiellement des cavités, des phases non désirées, des inclusions (morceaux de matière étrangère, provenant de l'élaboration, par exemple particules venant d'un creuset).ils proviennent notamment de l'élaboration du matériau (frittage des céramiques, métallurgie des poudres ou capillaires de fluide pour les cavités) ou de l'endommagement de celui-ci lors de son utilisation.

I.5.3.6.1 - Les pores : (Figure I.27)

Ce sont des cavités à l'intérieur du cristal rempli de gaz. On a deux types de pores : les pores inter granulaires ou les intra granulaires qui se disposent respectivement le long des joints de grains ou à l'intérieur des grains, ils possèdent deux caractéristiques importantes qui sont :

- La taille ;
- La morphologie.

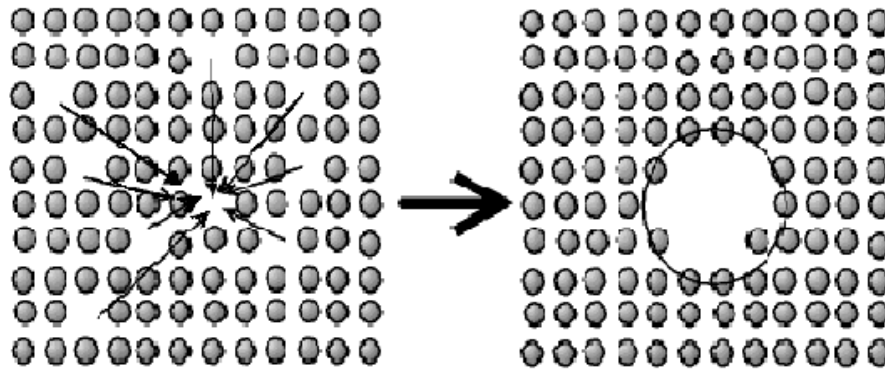


Figure I.27 - Représentation schématique d'un pore. [1]

I.5.3.6.2 - Les inclusions :

Sont des saletés qui proviennent de l'élaboration du métal à l'état liquide, ce sont le plus souvent des oxydes, des sulfures ou des silicates. Ces inclusions sont des particules étrangères solides, liquides ou gazeuses.

I.5.3.6.3 - Les précipités :

Sont des particules de seconde phase, de composition chimique différente de la matrice et se forment par réactions entre métal de base et un ou plusieurs de ses éléments d'alliage où entre ses éléments d'alliage eux même. Les précipités peuvent être classés en trois types selon le degré de cohérence cristallographique qu'ils présentent avec la matrice dont laquelle ils sont inclus.

- Les précipités cohérents

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice, les réseaux cristallins de la matrice et du précipité sont semblables, seul diffère légèrement les paramètres des deux réseaux. Ceci génère des distorsions élastiques à l'interface précipité-matrice.

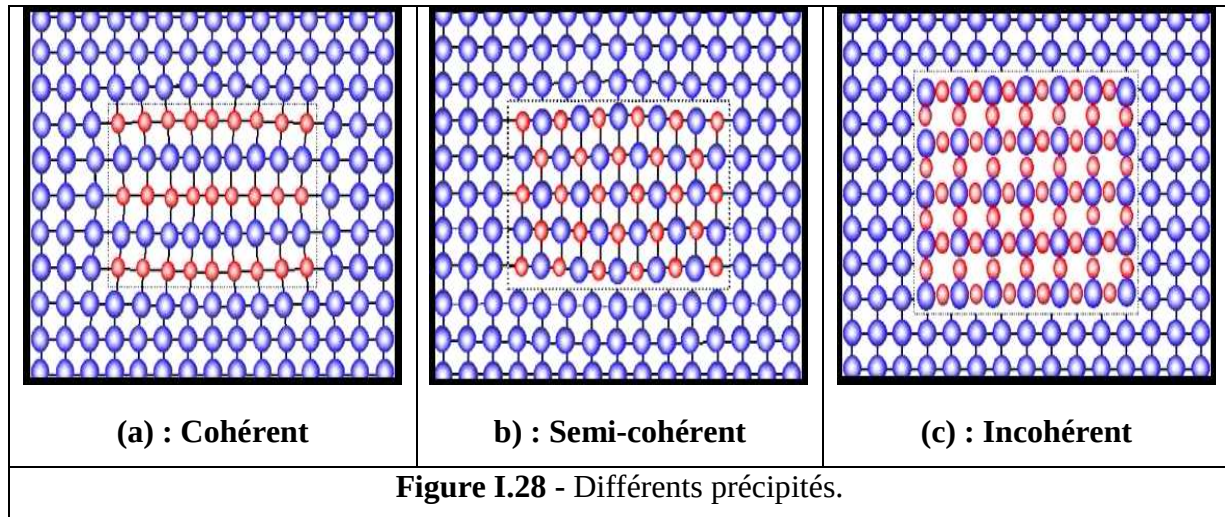
- Les précipités semi-cohérents

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice seulement selon certains plans et il n'y a aucune continuité selon les autres plans ; la semi-cohérence est parfois obtenues grâce à la présence de dislocations coin le long de l'interface.

- Les précipités incohérents

Ont un réseau cristallin trop différent de celui de la matrice. Pour qu'il existe une continuité entre les deux réseaux l'interface matrice-précipité est semblable à un joint de grain quelconque.

La figure (I.28) montre ces trois types de précipités.



I.5.4 LA DIFFUSION : [2]

1.5.4.1 – Définition :

Une diffusion est un déplacement d'atomes dans un solide à des distances supérieures au paramètre de maille. La force motrice phénomène peut être la température, le gradient de concentration etc....

Lorsque l'atome diffuse dans son propre réseau on dit qu'il y a autodiffusion. Par contre quand des atomes diffusent dans un autre réseau, il y a hétéro-diffusion.

1.5.4.2 - Mécanismes de la diffusion :

➤ Autodiffusion :

Pour qu'un atome que ce soit un atome du réseau ou un atome étranger en substitution dans ce réseau puisse diffusé vers la lacune voisine, il faut qu'il y ait énergie cinétique d'activation de diffusion des atomes due à l'agitation thermique suffisamment élevé pour écarter les atomes voisins et ainsi atteindre la lacune ; le phénomène de diffusion s'effectue donc grâce à la présence des lacunes en équilibre dans le cristal.

Plus la température est élevée plus sera grande la fraction d'atomes ayant une énergie cinétique minimale requise pour occuper une lacune voisine. Ce qui montre que la diffusion est un phénomène activé thermiquement. **(Figure I.29)**

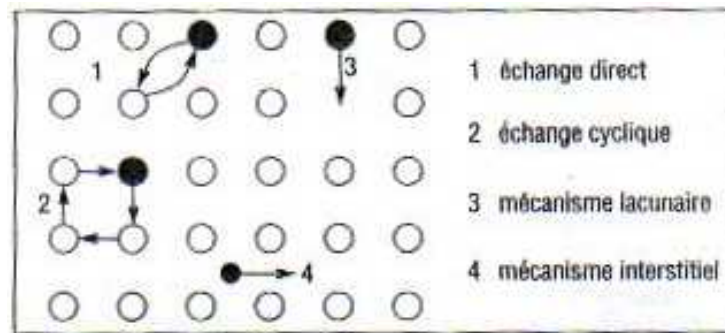


Figure I.29 - Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique.

➤ **Diffusion d'atomes de soluté en insertion :**

Lorsqu'un atome étranger est en solution solide d'insertion occupant un site formé par les atomes de la matrice, il possède une énergie cinétique minimale qui lui permet de s'insérer dans la matrice et occuper un site semblable voisin. (Figure)

1.5.4.3 - Lois de la diffusion :

Les lois de la diffusion permettent de déterminer la concentration en élément diffusant dans le solide. Deux cas sont possibles :

- Etat stationnaire : lorsque le gradient de concentration est constant
- Etat non stationnaire : lorsque le gradient de concentration varie dans le temps.

1.5.4.4 - Etat stationnaire (première loi de Fick) :

La première loi de Fick (1855) est purement phénoménologique et s'apparente aux célèbres lois de Fourier. En effet après de nombreuses expériences, Fick a remarqué que le flux de matière est proportionnel au gradient de la concentration.

Le flux est donné par la loi suivante :

$$j = -D \cdot \text{grad}C$$

C est la concentration de l'espèce diffusante.

D est le coefficient de diffusion en m^2/s et dépend fortement de la température. En effet $D = D_0 \cdot \exp(-Q_0/RT)$ où D_0 est une constante, R la constante des gaz parfaits, T la température en K et Q_0 une énergie d'activation de la diffusion.

grad C est le gradient de la concentration et le signe (-) indique que le flux va des endroits les plus concentrés vers les moins concentrés.

1.5.4.5 - Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick) :

Lorsque le gradient est variation dans le temps et change en fonction de la distance x , il est défini par une fonction à deux variables. On détermine alors la concentration comme la solution d'une équation différentielle du second ordre.

Pour un problème à une dimension la seconde loi de Fick est donnée par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)$$

Avec **C** la concentration de l'espèce, **D** le coefficient de diffusion et **x** la distance.

La solution est **C = f(x, t)**.

Lors de la diffusion les atomes sautent d'une position d'équilibre à une autre et parfois à des distances plus grandes que le paramètre. Ce saut n'est alors possible que si l'atome est dans un état énergétique lui permettant de passer la barrière de potentiel opposée par d'autres atomes. Ce déplacement exige un apport d'énergie extérieure (la chaleur par exemple).

On distingue généralement 4 types de mécanismes de diffusion des atomes.

Partie II

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II.1 - Appareillage 47-54

**CHAPITRE II.2 - Méthode expérimentale et
élaboration** 55-61

CHAPITRE II.1 - APPAREILLAGE

II.1.1 - INTRODUCTION:[3]

Ce chapitre est consacré d'une part à la présentation des différents types d'appareils utilisés au cours de notre étude expérimentale, d'autre part il décrit les différents modes opératoires après avoir réalisé les essais mécaniques.

Les traitements thermiques de l'alliage de corroyage $\text{AlCu}_3\text{Si}_2\text{Mg}$ et les essais mécaniques de traction, de dureté brinell HB, de microdureté $\text{Hv}_{0,1}$, de résilience ainsi que les examens micrographiques ont été réalisés au niveau de différents laboratoires de département de Génie Mécanique, par contre l'analyse chimique de l'alliage, la microstructure électronique à balayage et la résilience ont été réalisées respectivement au sein des laboratoires de l'ENIEM, de Hasnaoua et de l'Eléctro-Industries d'Azazga.

II.1.2 - APPAREILLAGES:[1,2]

Les différents dispositifs utilisés dans notre étude sont:

II.1.2.1 - Le laminage :

Le laminage s'effectue à partir de billettes (blooms, brames ou larget), il permet d'obtenir des produits finis de formes marchandes.

- Des produits laminés à chaud
 - Produits plats comme des plaques d'une épaisseur entre 5 à 25 mm, des bobines de tôle d'une épaisseur entre 1 à 5 mm, elles sont débitées des feuilles ou feuillards.
 - Produits longs comme des barres, rails, poutrelles, profilés divers, ...
- Les produits laminés à froid sont repris après un laminage à chaud pour obtenir des bobines de tôle d'une épaisseur entre 0,1 à 3 mm, elles sont débitées par la suite en feuilles ou feuillards.

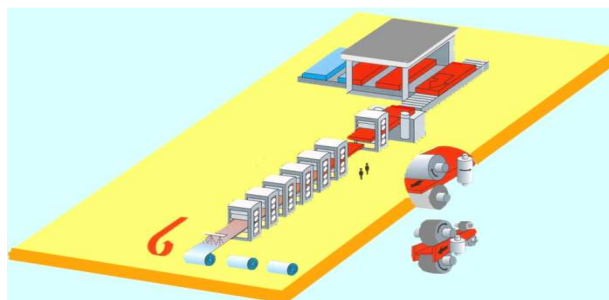


Figure II.1 - Schéma de principe d'élaboration par laminage. [6]

II.1.2.2 - Scie mécanique :

Le découpage du brut des éprouvettes, des échantillons pour la dureté, la microdureté et la microstructure, on a utilisé une scie mécanique (Figure II.1) avec les propriétés suivantes :

Tension $T=380V$,

Puissance $P=1,5Kw$,

Poids = 600Kg



Figure II.2 - Scie mécanique de type ALMOSMA3. [7]

II.1.2.3 - Usinage des éprouvettes et des échantillons : [5]

L'usinage des éprouvettes cylindriques de traction, de résilience et des échantillons a été réalisé sur un Tour universel et une fraiseuse verticale FV1, 5 ALMO au niveau du hall de technologie situé à Oued-Aissi et au niveau de l'ENEL d'Azazga.



Tour universel de type SN 40 SN 50C

Tension $T=380V$

Puissance $P=6,6Kw$

Poids = 1620Kg.

Fréquence $f=50Hz$

Figure II.3 - Tour universel de type SN40SN 50C



Fraiseuse verticale FV1, 5 ALMO
Tension de service 380V,
Puissance totale 5KW,
Poids 1520Kg

Figure II.4 - fraiseuse verticale FV1, 5 ALMO.

II.1.2.4 – Ebavurage : [4]

La meule :

La meule est utilisée pour enlever les bavures des éprouvettes et des échantillons provenant de l'usinage et du découpage



Figure II.5 – Meule.

II.1.2.5 - Eprouvettes et échantillons :



Figure II.6 – Eprouvette cylindrique de traction.

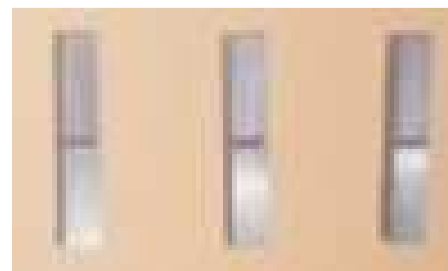


Figure II.7 – Eprouvette de résilience.

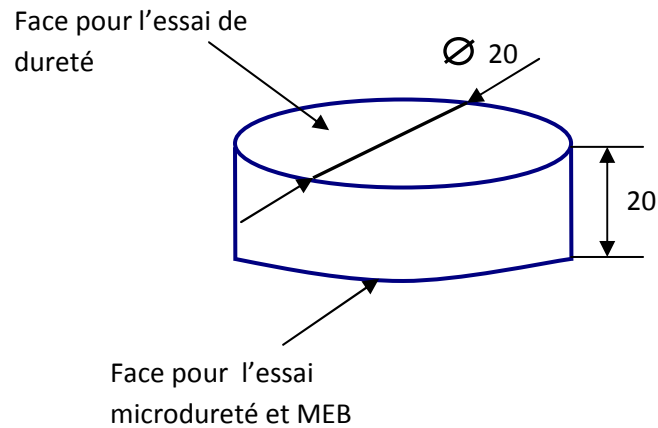


Figure II.8 - Echantillon pour l'essai de dureté, de microdureté et de structures.

II.1.2.6 - Traitements thermiques : [5,6]

II.1.2.6.1 - Four de trempe :

C'est un four à résistance électrique, construit en tôle et profilés robustes. Il est isolé avec de la laine d'alumine pour l'isolation thermique et le rendre plus léger. Un contact électrique coupe le circuit de résistances dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique.



Le four de trempe possède les caractéristiques suivantes:

- ♦ Tension T=380V
- ♦ Puissance P=11KW
- ♦ La température maximale 1200°C.

Figure II.9 - Four de trempe.

II.1.2.6.2 - Etuve : [1]

Nos traitements de revenus ont été réalisés dans une étuve de type MEMMERT alimentée par un courant de 380Volts. Elle est composée essentiellement de:

- 1 - Afficheur du temps (maintien),
- 2 - Indicateur du mode de fonctionnement,
- 3 - Indicateur de température de consigne (recommandée),
- 4 - Indicateur de régime de la ventilation,
- 5 - Indicateur de la température d'intervention du dispositif de sécurité.

L'étuve est dotée d'une ventilation naturelle par convection à thermosiphon. Le brassage d'air s'effectue par une turbine installée à l'intérieur, sur la paroi du fond de l'appareil.



Figure II.10 - Etuve utilisée.

II.1.2.7 - Essais mécaniques :

II.1.2.7.1 - Machine de traction :



Figure II.11 - Machine de traction.

Machine de traction: la machine de traction utilisée est de type IBERTEST alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge maximale de 400 KN dotée d'un microordinateur qui a pour utilité de suivre l'évolution des essais et de les sauvegarder pour ne pas perdre les résultats des essais effectuées.



a – avant rupture



b – après rupture

Figure II.12 - Eprouvettes de traction.

II.1.2.7.2 - Machine de résilience :**Figure II.13 - Pendule de Charpy.**

Machine d'essai: Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O. Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours voisin à l'arête de couteau du pendule.



a – avant rupture



b – après rupture

Figure II.14 - Eprouvettes de résilience. [5]**II.1.2.8 - Les polisseuses :**

Polisseuse à deux disques de type « Struers » alimentée sous une tension de 220 V et munie d'un dispositif d'arrosage.

Polisseuses à un disque de type « Struers » alimentée sous une tension de 220 V.

La vitesse de rotation du disque est (150 tr/mn et 300tr/mn).



a) Polisseuse à deux disques



b) Polisseuse de finition

Figure II.15 – Polisseuses.

II.1.2.9 - Duromètre et microduromètre :

L'essai de dureté a été réalisé avec un duromètre, ce dernier est muni d'une bille de diamètre 2,5, d'un sélecteur de charge de 15 kgf, une table sur laquelle on pose l'échantillon et d'un cadran permettant la mesure du diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur. Il possède les caractéristiques suivantes : Tension $T=220V$, Fréquence $f=50Hz$.

L'essai de microdureté a été réalisé avec un microduromètre, ce dernier est muni d'un diamant en forme pyramidale d'angle au sommet de 136° d'un sélecteur de charge de 100 g, une table sur laquelle on pose l'échantillon. Ce dernier affiche automatiquement le diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur ainsi que sa microdureté correspondante. Il possède les caractéristiques suivantes : Tension $T=220V$, Fréquence $f=50\text{ Hz}$



Figure II.16 – Duromètre.



Figure II.17 – Microduromètre.

II.1.2.10 - Attaque chimique :

L'attaque chimique a pour but de révéler les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'alliage utilisé, après le polissage de finition. On rince notre échantillon et on le sèche puis ensuite on le soumet à une attaque chimique qui consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif pendant un temps convenable à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on le sèche à l'aide d'un séchoir.

II.1.2.11 – Microscopes : [8]

II.1.2.11.1 - Microscope optique :

Pour procéder à l'observation des différentes structures de surfaces, après le polissage et l'attaque chimique, des échantillons de l'alliage étudié, on s'en est servi d'un microscope optique qui a les caractéristiques suivantes :

On a utilisé un microscope optique universel de type ZEISS, alimenté sous une tension de 220V avec une fréquence de 50 Hz et une puissance de 100W, muni d'un appareil-photo automatique et ayant un pouvoir de résolution allant de 50 à 1000 fois.

II.1.2.11.2 - Microscope électronique à balayage :

Le microscope électronique à balayage est un appareil d'observation d'état de surface ainsi que les précipités présents dans les matériaux plus finement. Le principe de l'imagerie(MEB) consiste à composer une image de surface grâce à des électrons secondaires éjectés du matériau sous l'effet du faisceau primaire. L'énergie de ces électrons dépend directement de l'énergie des électrons primaires et du numéro atomique de l'élément qui interagit avec le faisceau primaire.

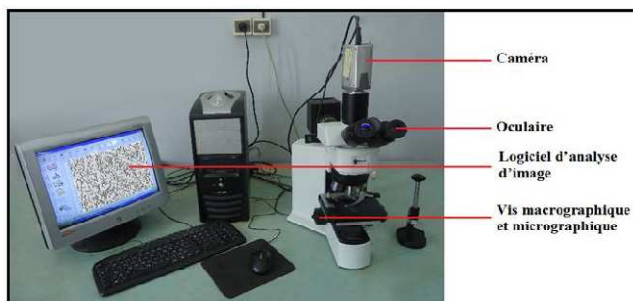


Figure II.18 - Microscope optique.



Figure II.19 - Microscope électronique à balayage.

CHAPITRE II.2 - MATERIAUX ET MODES OPERATOIRES

Dans ce qui suit, nous étudierons la séquence de précipitation dans le cas élémentaire d'un alliage d'aluminium de corroyage de désignation AlCu3Si2Mg qui contient environ 3% de cuivre, 2% de Silicium et < 1% de Magnésium en pourcentage massique, agents principaux d'améliorations respectifs des propriétés mécaniques et de fluidité. Nous vous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser le matériau étudié soumis aux traitements thermiques qui fait apparaître des précipités de différents genres qui entravent le glissement des dislocations en faisant varier le temps de maturation par pas de 2h sur une durée de 24h des différents états à savoir :

- Brut de coulée noté: F
- Etat trempé noté: T
- Temps de maturation notées M(0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24)h + Revenu à 165°C pendant 6h avec la moyenne de trois éprouvettes identiques pour chaque état considéré.

II.2.1 - MATERIAU ETUDIE :

Le matériau étudié est fourni par le hall de technologie d'Oued-Aissi. Il s'agit d'un alliage d'aluminium de corroyage de diamètre 20 mm de désignation chimique AlCu3Si2Mg et quelques traces d'impuretés, obtenu par laminage de composition chimique suivante:

Eléments	Cu	Si	Mg	Mn	Fe
(%)	2,97	1,60	0,8	0,72	0,41

Tableau II.1 - Composition chimique de l'alliage étudié.

II.2.2 - ÉLABORATION DU MATERIAU ETUDIE :

II.2.2.1 – Electrolyse :

L'aluminium obtenu est pur à 99% et doit être raffiné pour éliminer les impuretés (fer, silicium, zinc, titane,...). On emploie pour cela un procédé d'électrolytique dans le but d'augmenter la pureté de l'aluminium à 99,98% pour les produits semi-finis et à 99,99% pour les gueuses.

II.2.2.2 – Mélange :

L'aluminium pur présente certaines propriétés intéressantes, mais pour les améliorer on lui ajoute un pourcentage massique de cuivre (3%), de silicium (2%) et de magnésium (< 1%) pour se présenter sous forme d'alliages légers. Cet alliage sera catégorisé comme alliage de corroyage.

II.2.2.3 – Laminage :

Ce mode est obtenu par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans le sens opposé, appelés rouleaux.

II.2.2.4 – Usinage :

Dans notre étude nous avons usiné 45 éprouvettes cylindriques de traction, 45 éprouvettes de résilience et 60 échantillons à partir de cylindres de diamètre 20 mm et de longueur de 6m.

II.2.2.4.1 – Découpage :

Pour débiter les bruts des éprouvettes et des échantillons, on a utilisé une scie mécanique

II.2.2.4.2 – Tournage :

Le tournage des éprouvettes cylindriques de traction et le dressage des éprouvettes de résilience et des échantillons ont été exécuté sur un tour.

II.2.2.4.3 – Fraisage

Pour obtenir des dimensions des éprouvettes de résilience souhaitées, on a utilisé donc une fraiseuse verticale.

II.2.3 – TRAITEMENTS THERMIQUES : [4]

II.2.3.1 – Différentes étapes :

Après l'usinage de différents éprouvettes et échantillons, on procède aux traitements thermiques de durcissement structural. Tout d'abord on prélève trois éprouvettes de traction, trois éprouvettes de résilience et quatre échantillons usinés à l'état brut de coulée pris comme référence noté: F. Les autres éprouvettes et échantillons vont subir le traitement thermique qui se fait en quatre étapes suivantes:

Première étape: Chauffage et mise en solution avec homogénéisation à 500°C de manière à dissoudre totalement et à répartir d'une manière homogène les éléments ajoutés à l'aluminium. Il s'est fait dans un four de trempe avec un maintien de 10h.

Deuxième étape : suivi immédiatement d'une trempe à l'eau à température ambiante (20 - 25) °C. On obtient ainsi une solution solide fortement sursaturée, état notée: T.

Troisième étape : Traitements de maturation à température ambiante (20 - 25) °C par variation du temps par incrément de 2h notés: M0h, M2h, M4h, M6h, M8h, M10h, M12h, M14h, M16h, M18h, M20h, M22h, M24h.

Quatrième étape : suivi immédiatement d'un revenu à 165°C pendant 6h et d'un refroidissement à l'air libre pour chaque état considéré.

II.2.3.2 – Cycle thermique :

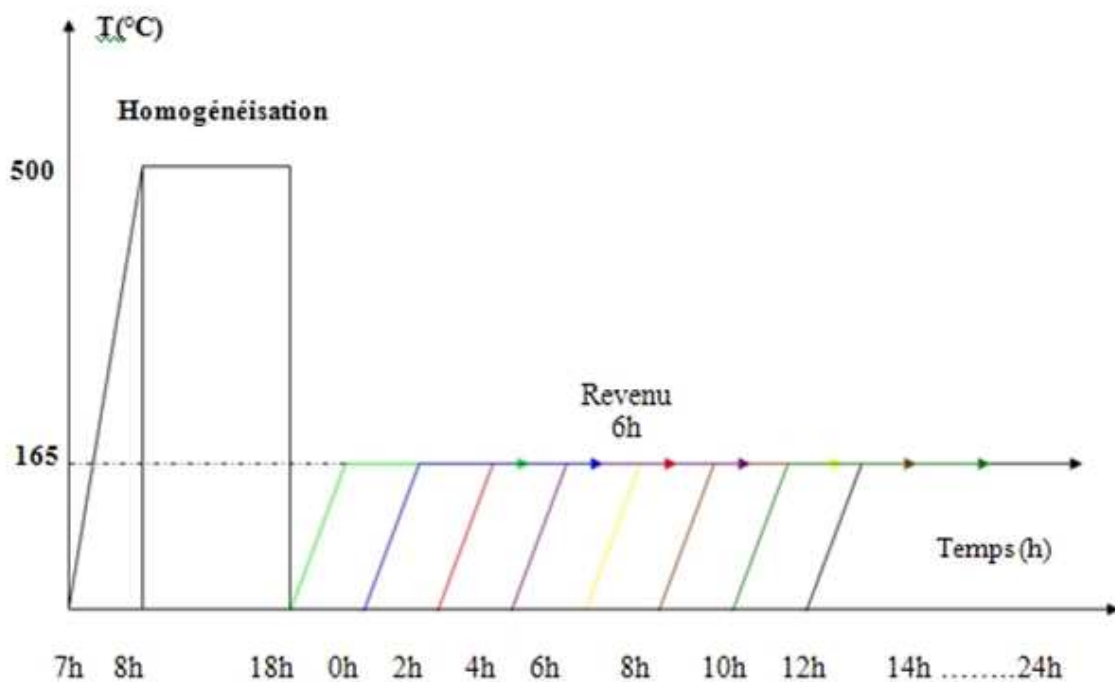


Figure II.20 - Cycle Thermique.

II.2.4 – ESSAIS MECANIQUES :

Nous avons effectué quatre essais mécaniques: la traction, la dureté HB, la microdureté $HV_{0,1}$ et la résilience Kcv.

II.2.4.1 – Essais de traction :

À l'aide de deux mors montés sur la machine de traction, on fixe une des éprouvettes par leurs têtes dont l'un est libre en translation. Ces mâchoires en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette. Des appareils, adaptés à la mâchoire, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et la déformation correspondante.

Cet essai à pour but la caractérisation d'un matériau en traction. Les caractéristiques qu'on peut tirer de cet essai sont

- ✚ La contrainte moyenne maximale de traction $\langle \sigma^m \rangle$,
- ✚ La contrainte moyenne d'élasticité $\langle \sigma^e \rangle$,
- ✚ La contrainte moyenne de rupture $\langle \sigma^r \rangle$,
- ✚ Le module moyen d'Young $\langle E \rangle$,
- ✚ L'allongement moyen en pourcent $\langle A\% \rangle$,
- ✚ L'allongement moyen de striction $\langle Z_u\% \rangle$,
- ✚ Et le coefficient moyen de striction $\langle Z\% \rangle$.

Forme et dimension de l'éprouvette

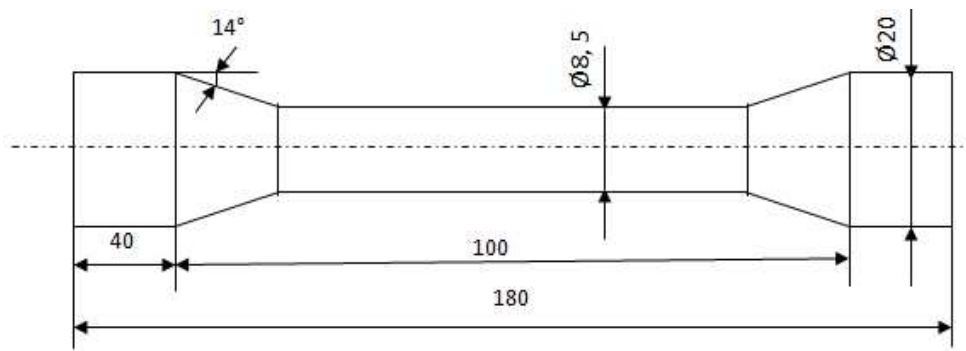


Figure II.21 - Formes et dimensions de l'éprouvette de traction. [1,4]

II.2.4.2 – Essais de dureté et de microdureté :

Dans ce travail, on a choisi l'essai Brinell HB pour déterminer la valeur de la dureté surfacique correspondante au diamètre.

La microdureté est destinée en principe à définir les propriétés à l'intérieur des phases (zone blanche et zone noire) constituant la matrice.

La forme des échantillons utilisés lors des essais est présentée par la **(figure II.22)**

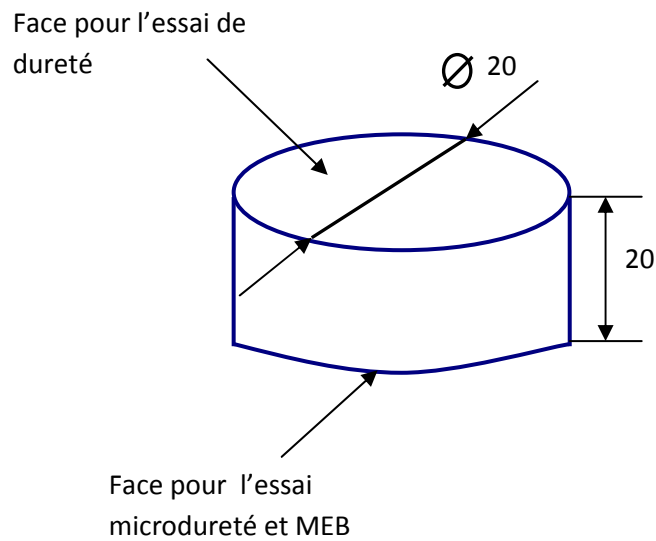


Figure II.22 - Formes et dimensions de l'échantillon pour l'essai de dureté et de microdureté. [3]

II.2.4.3 – La résilience :

L'éprouvette est constituée d'un barreau entaillé par usinage en son milieu. La forme de l'entaille la plus fréquente est la forme en V (type A dans la norme ASTM) d'une profondeur de 2 mm. Il existe également une éprouvette avec une entaille en U (type C dans la norme ASTM).

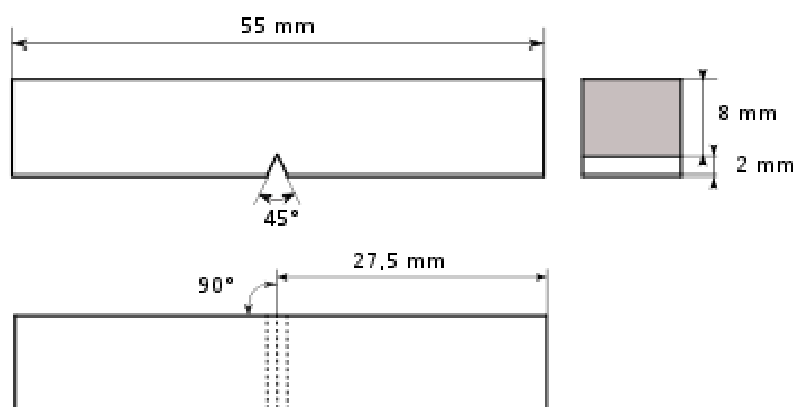


Figure II.23 – Formes et dimensions de l'éprouvette de résilience. [2]

II.2.5 – EXAMEN STRUCTURAL :

Préparation des surfaces: Les échantillons traités sont polis mécaniquement afin de rendre leurs deux faces planes et brillantes de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. Le polissage comporte trois phases.

II.2.5.1 – Dressage :

Le dressage a pour but de créer une surface plate d'examen qui est exécutée à l'aide de papier EMERI de granulométries P120, P240 et P400 sur une polisseuse avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement.

II.2.5.2 – Dégrossissage :

Cette phase, qui est la plus délicate, permet d'arriver à une surface lisse ne contenant que des très fines rayures invisibles à l'œil nu qui disparaîtront dans la dernière phase. Les granulométries des papiers utilisés sont P600, P800, P1200.

II.2.5.3 – Finissage :

Son objectif est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine.

II.2.6 – ATTAQUE CHIMIQUE :

Pour faire apparaître les joints de grains, on utilise une solution d'attaque au chlorure de zinc de préparation suivante:

On pèse 5g de NaOH dans une fiole, on ajoute 1g de ZnCl_2 puis on ajoute 100 ml d'eau. Après agitation la solution d'attaque est fin prête pour l'utilisation.

H_2O	NaOH	ZnCl_2
100 ml	0,5 g	1 g

Tableau II.2 - Composition pondérale du réactif.

II.2.7 – MICROSCOPIE :

II.2.7.1 – Microscope optique :

Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différentes échelles.

II.2.7.2 – Microscope électronique à balayage (MEB) :

Pour une bonne résolution et des grossissements plus importants qu'en microscopie optique, on a eu recours au MEB. Ce dernier est à émission thermoélectronique, équipé d'un système d'analyse permettant de faire une étude qualitative et quantitative des différentes phases intermétalliques. Nous avons pris l'initiative de prendre en considération les états suivants F, M0h, M12h, et M24h afin de faciliter l'interprétation des résultats. Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différentes échelles.

Partie III

Résultats et discussion 62-85

INFLUENCE DE LA MATURATION SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET MICROSTRUCTURALES DE L'ALLIAGE DE CORROYAGE AlCu3Si2Mg.

III.1 - INTRODUCTION

La présente étude a pour but de déterminer l'influence de la variation du temps de maturation des pièces métalliques destinées aux différentes réalisations sur l'évolution du comportement et de l'endommagement en traction, la dureté Brinell, la microdureté, la résilience et la microstructure de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg en considérant quinze états du matériau : brut de coulée noté : F, trempé noté : T et temps de maturation désignées respectivement M0h, M2h, M4h, M6h, M8h, M10h, M12h, M14h, M16h, M18h, M20h, M22h et M24h. L'ajout d'un pourcentage de cuivre (3% Cu), de 2% de silicium qui donne de bonnes aptitudes à la coulée et de Mg ($\leq 1\%$ Mg) à l'aluminium sont les principaux agents d'amélioration des caractéristiques mécaniques en plus des traitements thermiques spécifiques qui font apparaître des précipités de différents genres qui entravent le mouvement de dislocations.

En raison de nombreux avantages qu'ils présentent les alliages d'aluminium ont fait l'objet de plusieurs études approfondies concernant leurs propriétés physiques et chimiques en général et mécaniques en particulier, parmi ces alliages ceux de la famille Al-Cu occupent une place particulière dans la fabrication et la réalisation de nombreuses pièces industrielles. Pouvant supporter de grandes charges mécaniques, ils sont très utilisés comme accessoires dans plusieurs réalisations (culasses, bâtis, corps de pompe, poulies de commande, carcasses de boîtes à vitesse et d'avance...etc.).

Dans notre contribution nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence du mode d'élaboration par laminage que des traitements thermiques de modification de la microstructure par chauffage, mise en solution avec homogénéisation, suivi d'une trempe structurale et par variation du temps de maturation aux états brut de coulée noté : F, trempé noté : T et maturations désignées 0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 14h, 16h, 18h, 20h, 22h et 24h par incrément de 2h sur les caractéristiques de résistances et de ductilité de l'alliage de désignation chimique AlCu3Si2Mg (avec 3% Cu, 2% Si et $Mg \leq 1\%$).

Pour chercher à augmenter plus les caractéristiques de résistances et obtenir essentiellement de grandes contraintes d'élasticité, de grands modules de rigidité avec de faibles déformations, l'alliage $\text{AlCu}_3\text{Si}_2\text{Mg}$ sera soumis aux traitements spécifiques.

Par contre la caractérisation mécanique de cet alliage est obligatoire car elle sert essentiellement par la suite aux calculs de l'ingénieur de conception au niveau du bureau d'études pour le dimensionnement des pièces soumises aux différentes sollicitations extérieures; pour cela quatre techniques sont utilisées; à savoir: la traction pour identifier les différentes contraintes, la dureté Brinell HB et la microdureté pour le champ de contraintes, la résilience la résistance au choc et la microstructure pour identifier les différentes structures.

III.2 - EFFETS DU MODE D'ELABORATION ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ESSAI DE TRACTION

Les caractéristiques élastiques, plastiques et de striction des matériaux sont des paramètres très importants lors de la conception des éléments entrant dans diverses réalisations soumises à des efforts extérieurs en général et mécaniques en particulier. En effet, la limite élastique fixe le seuil admissible à ne pas dépasser pour éviter aux pièces réalisées de franchir le domaine de la déformation réversible (élastique) à celui de la déformation permanente (plastique); l'élongation et la charge à la rupture nous renseignent respectivement sur la limites de déformabilité des matériaux destinés à subir des modifications géométriques et l'estimation de la résistance du matériau au-delà de laquelle ce dernier amorce son entrée dans la phase de la rupture.

Toutes les courbes obtenues présentent presque une même allure qui se distingue par trois régions différentes :

Une grande partie élastique linéaire d'équation $\sigma_e = E\varepsilon_e$: cette partie peut être expliquée par le mouvement des atomes liés par des forces électrostatiques. Les atomes d'un cristal possèdent un éloignement naturel pour lequel toutes ces forces s'équilibrent. L'application d'une force faible extérieure perturbe cet équilibre et les atomes s'éloignent les uns des autres jusqu'à ce que les forces interatomiques proviennent à annuler la force appliquée. Lorsque la force est supprimée, les atomes reviennent à leur position initiale d'où la déformation réversible (élasticité)

Une très grande partie plastique homogène de forme $\sigma = K\varepsilon^n$: avant que la déformation élastique n'ait atteint sa limite, apparaît une deuxième partie qui est la

déformation plastique; elle s'effectue principalement par un glissement d'une partie du cristal par rapport à l'autre suivant un nombre entier de distance inter réticulaires.

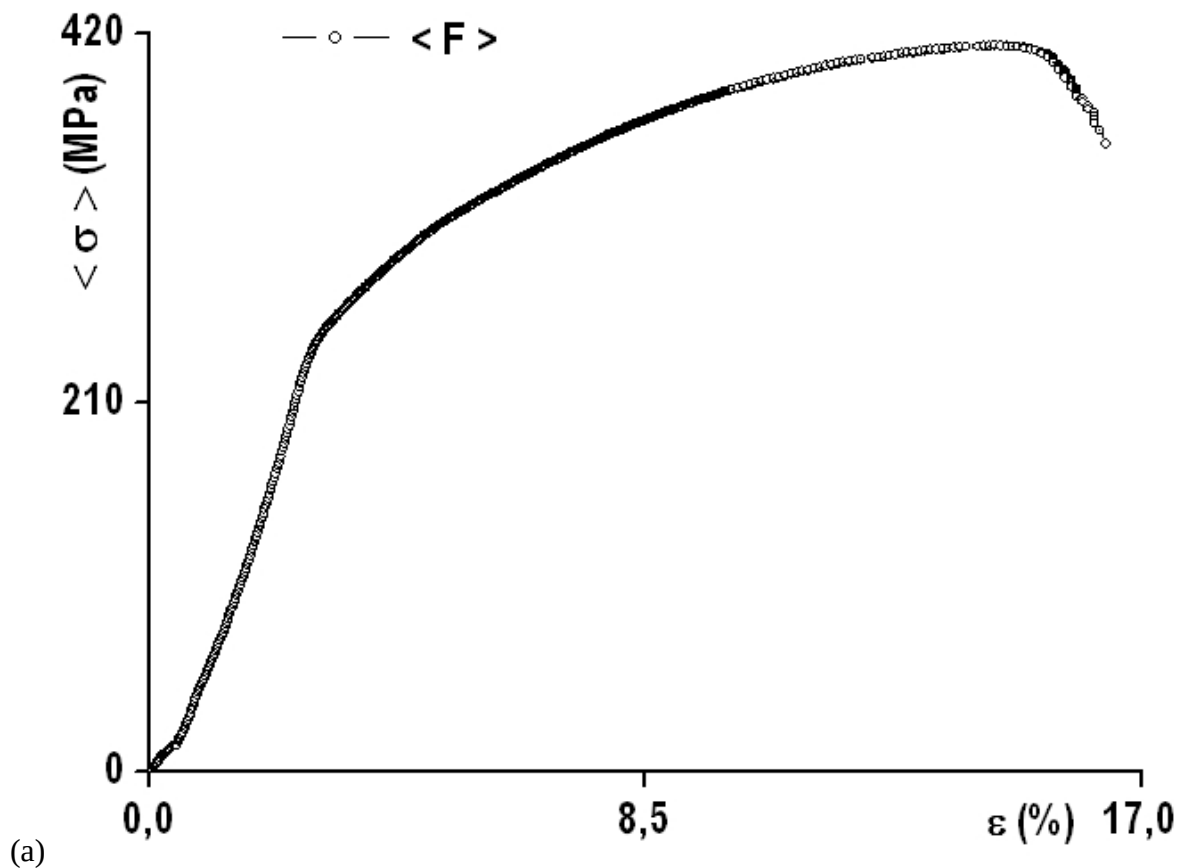
Ce glissement s'interprète par le mouvement des dislocations initiales mobiles ou créées lors de la déformation et leurs interactions avec divers obstacles présents dans le matériau.

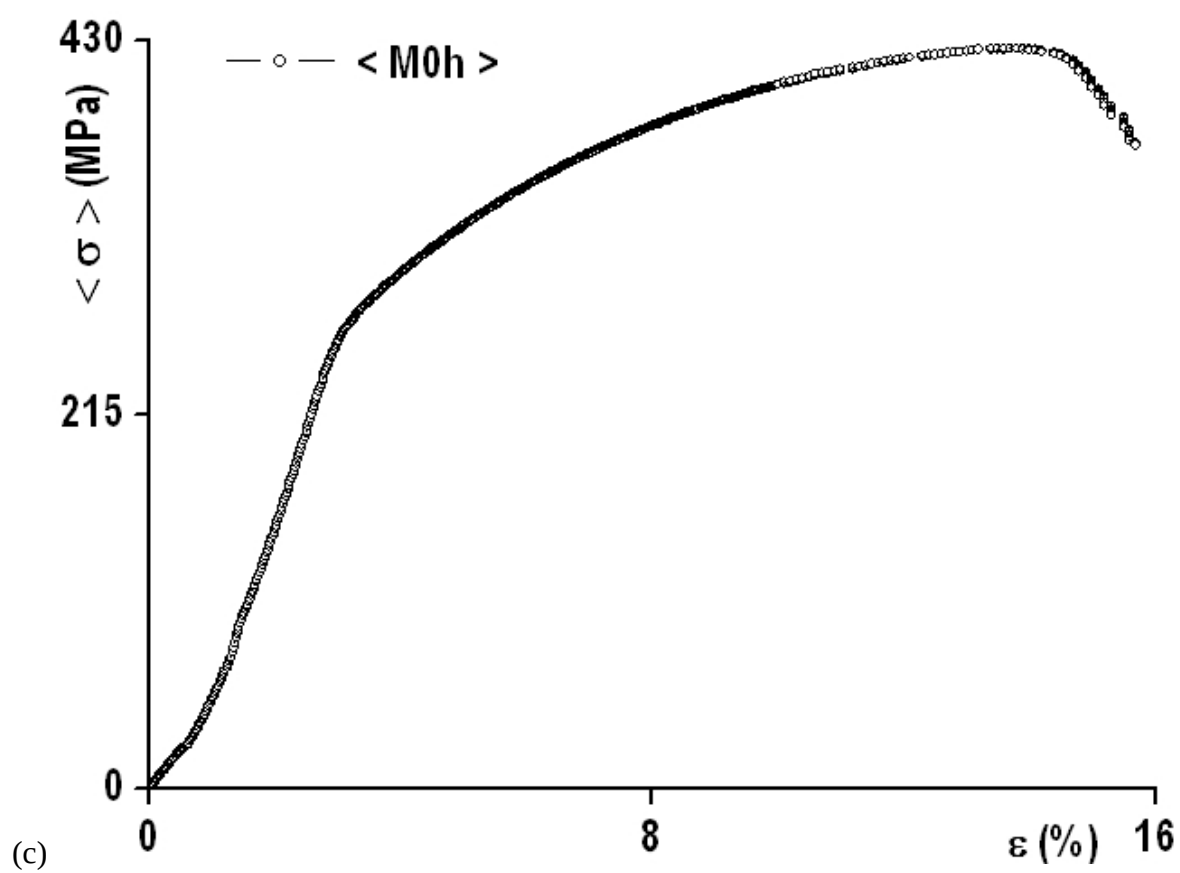
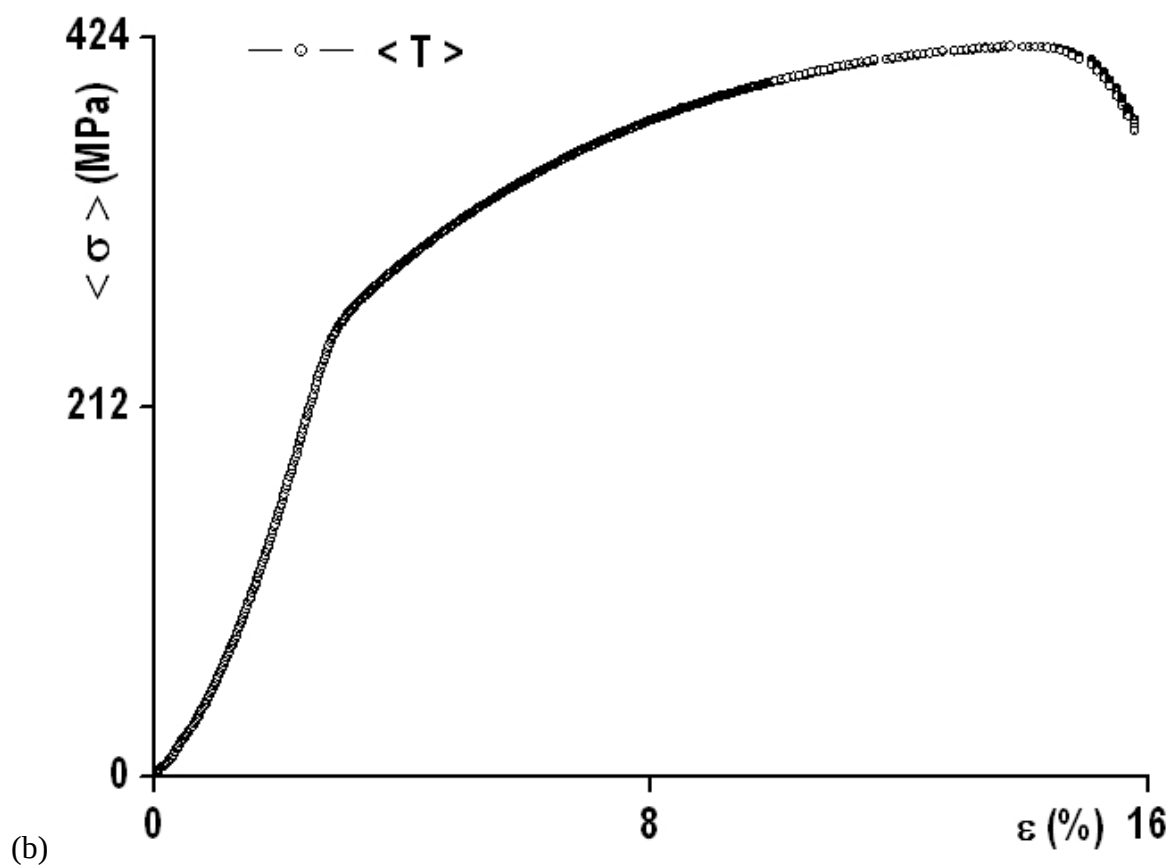
Et une deuxième partie plastique cette fois-ci hétérogène présentant une rupture ductile: déterminée par l'allongement $\langle A\% \rangle$, le coefficient de striction $\langle Z\% \rangle$, la résilience $\langle Kcv \rangle$ ou $\langle Kcu \rangle$ et le coefficient de concentration de contraintes $\langle Ks \rangle$. Elle passe par deux étapes, la première est la naissance des fissures et leur coalescence avec apparition de la striction et la seconde, leur propagation à travers toute la section de l'éprouvette.

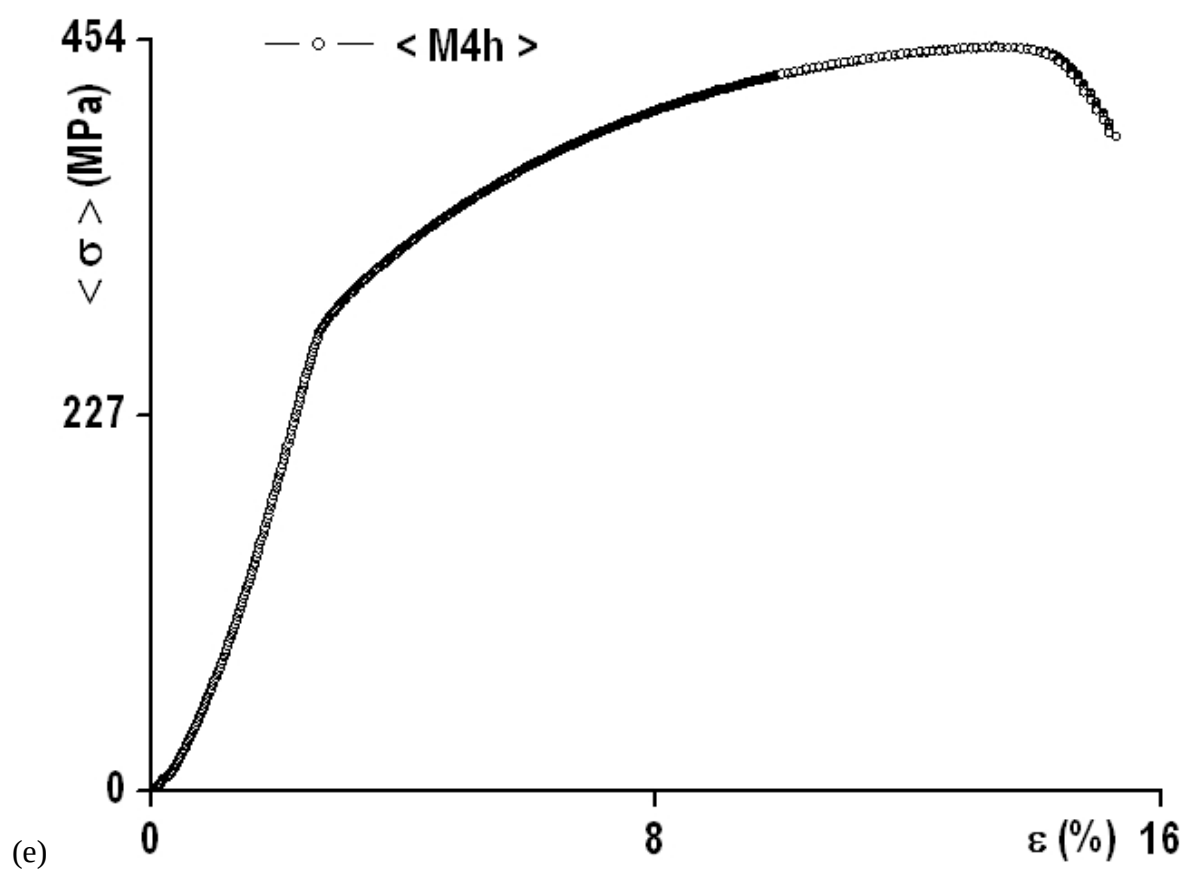
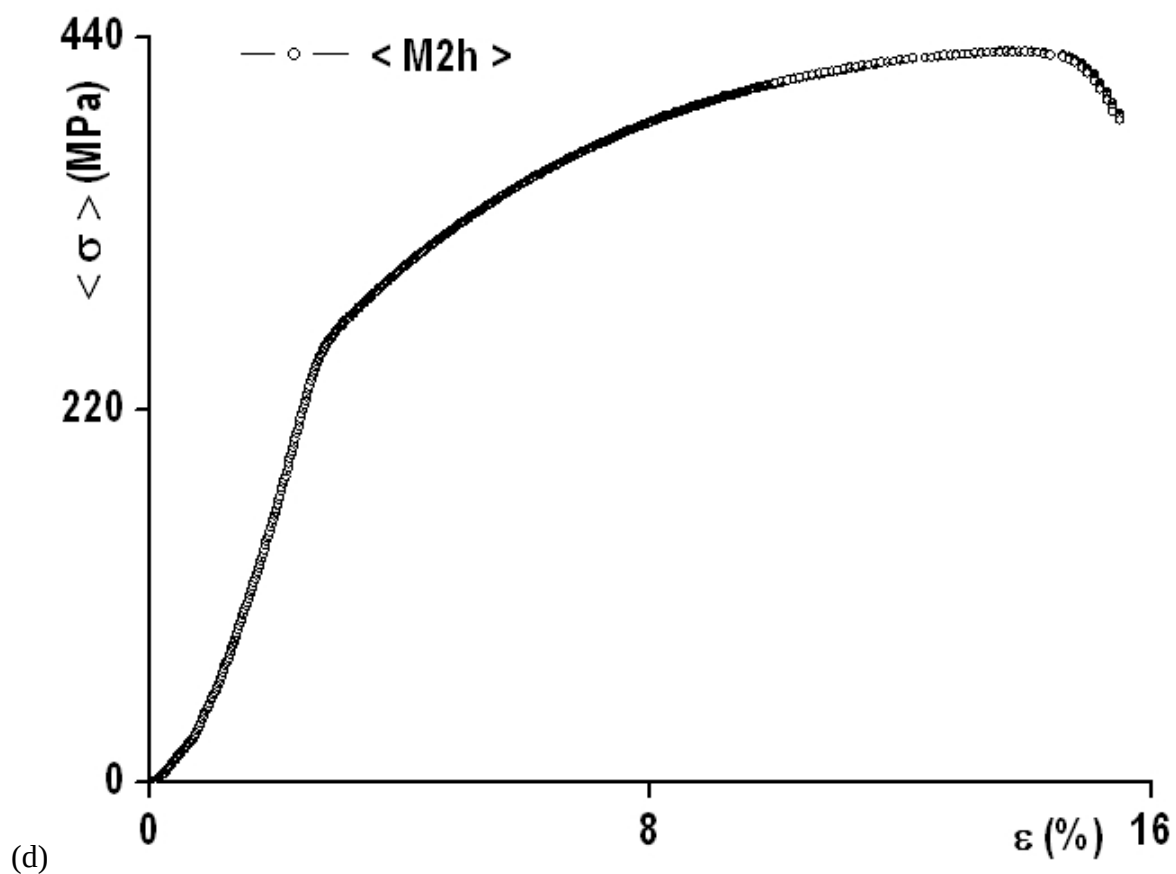
III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

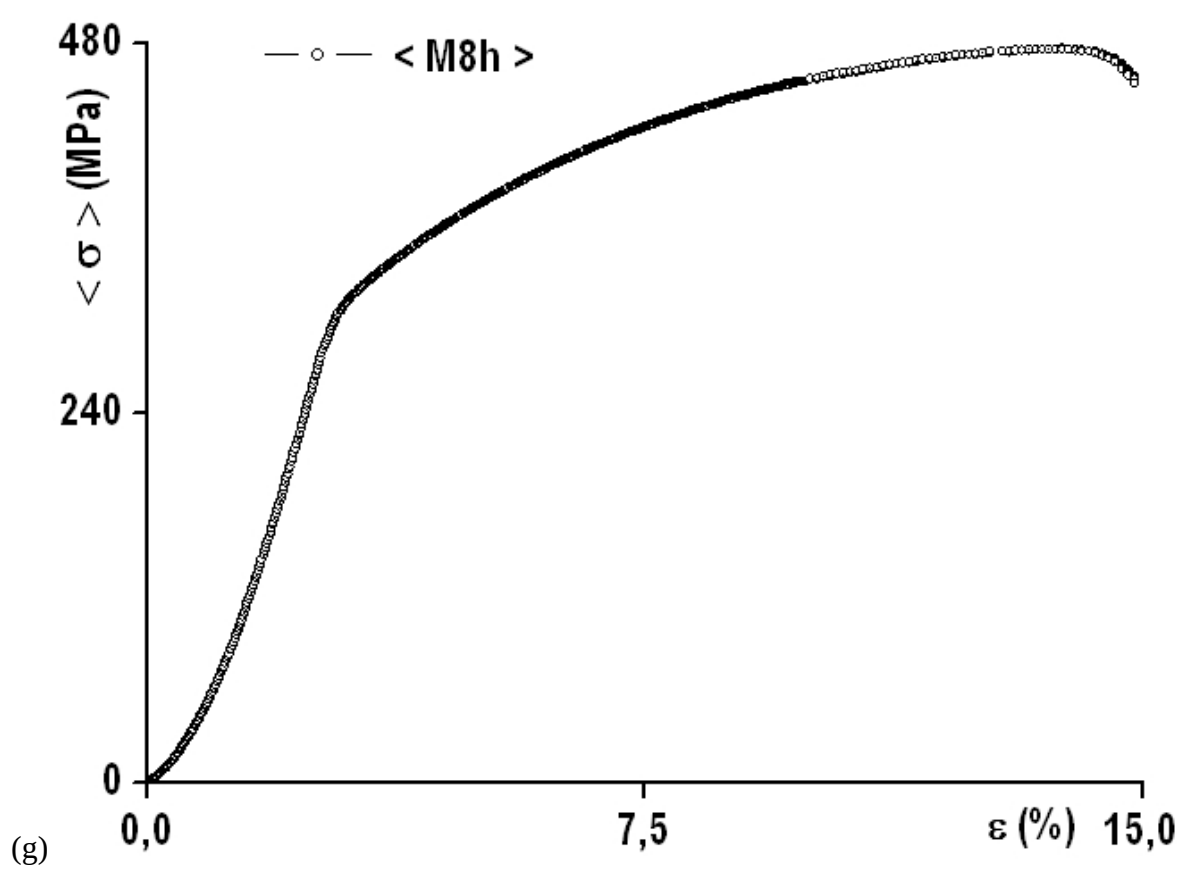
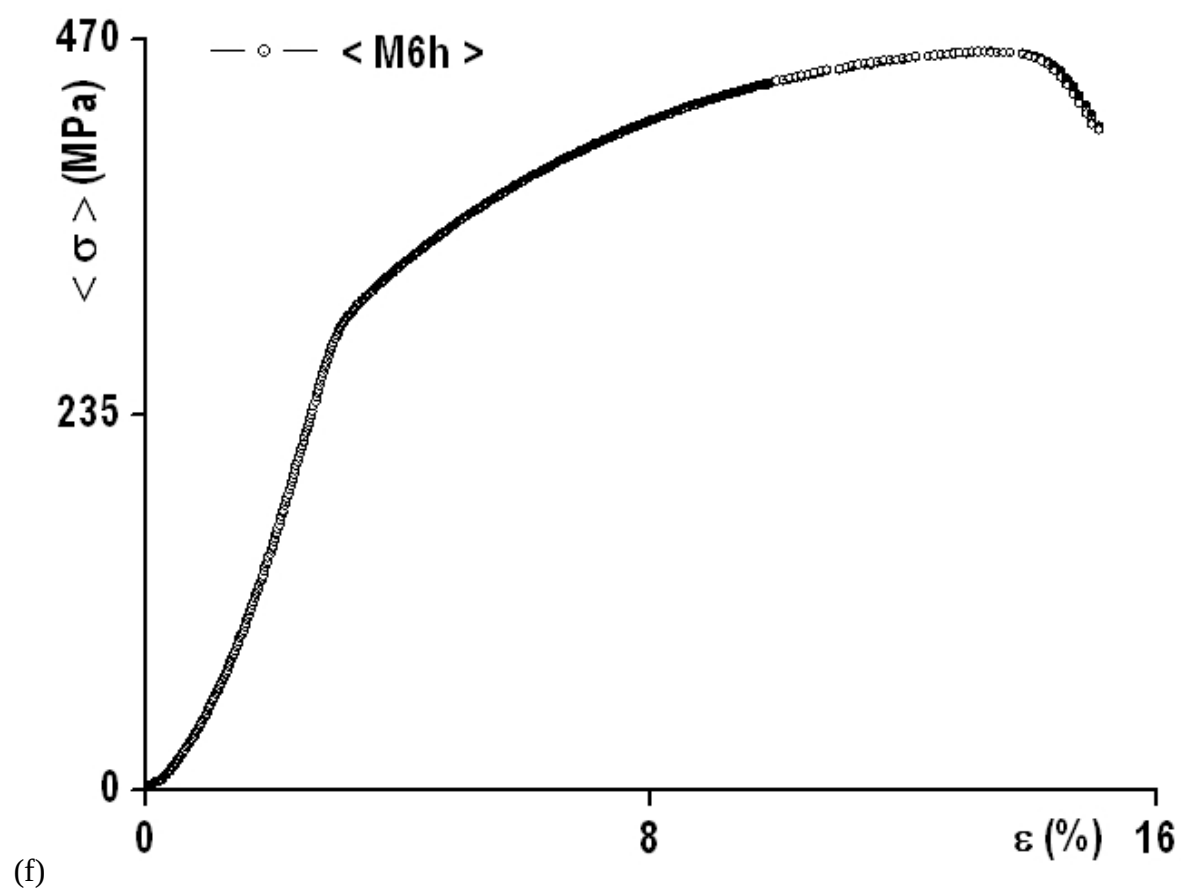
Les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de traction, de résilience, de microdureté et de dureté de l'alliage AlCu3Si2Mg sont représentées par les figures de 1 à 17 ci-dessous. Elles sont obtenues en moyennant une série de mesures de 5 éprouvettes identiques de cet alliage.

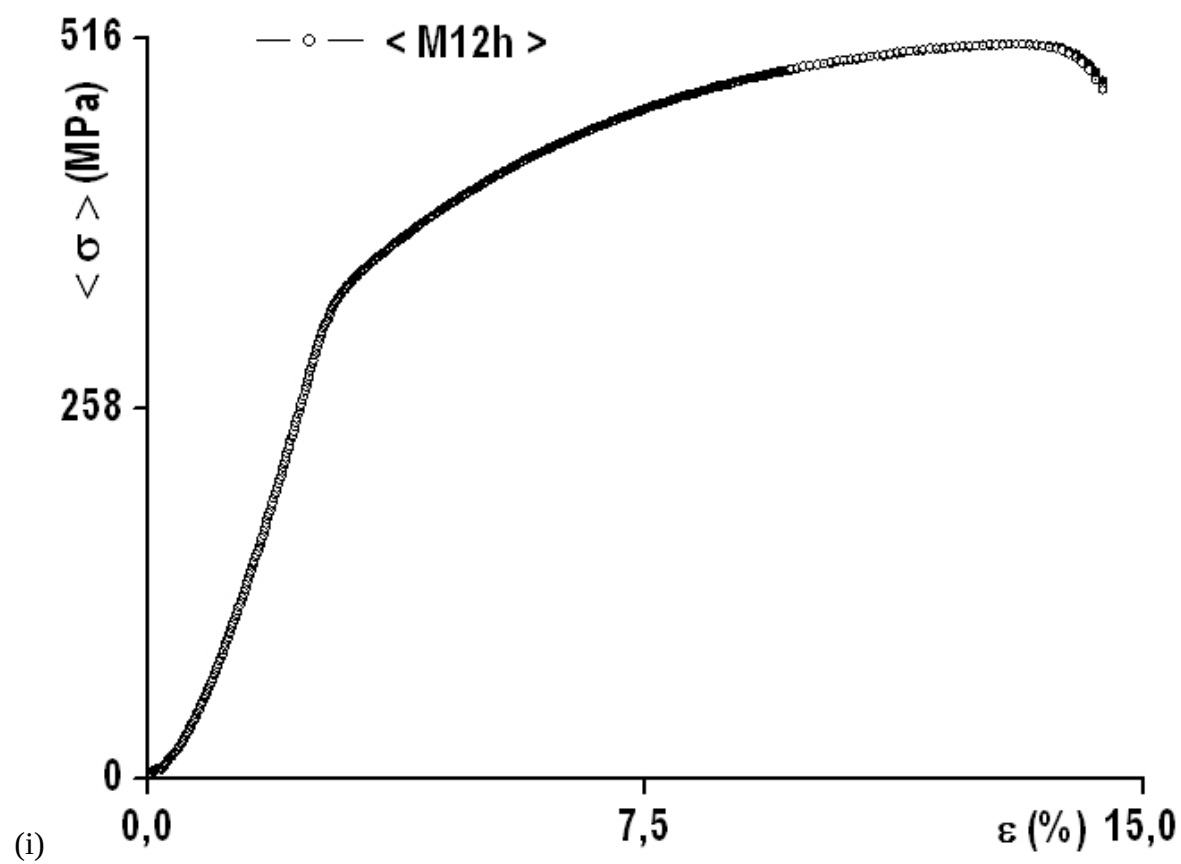
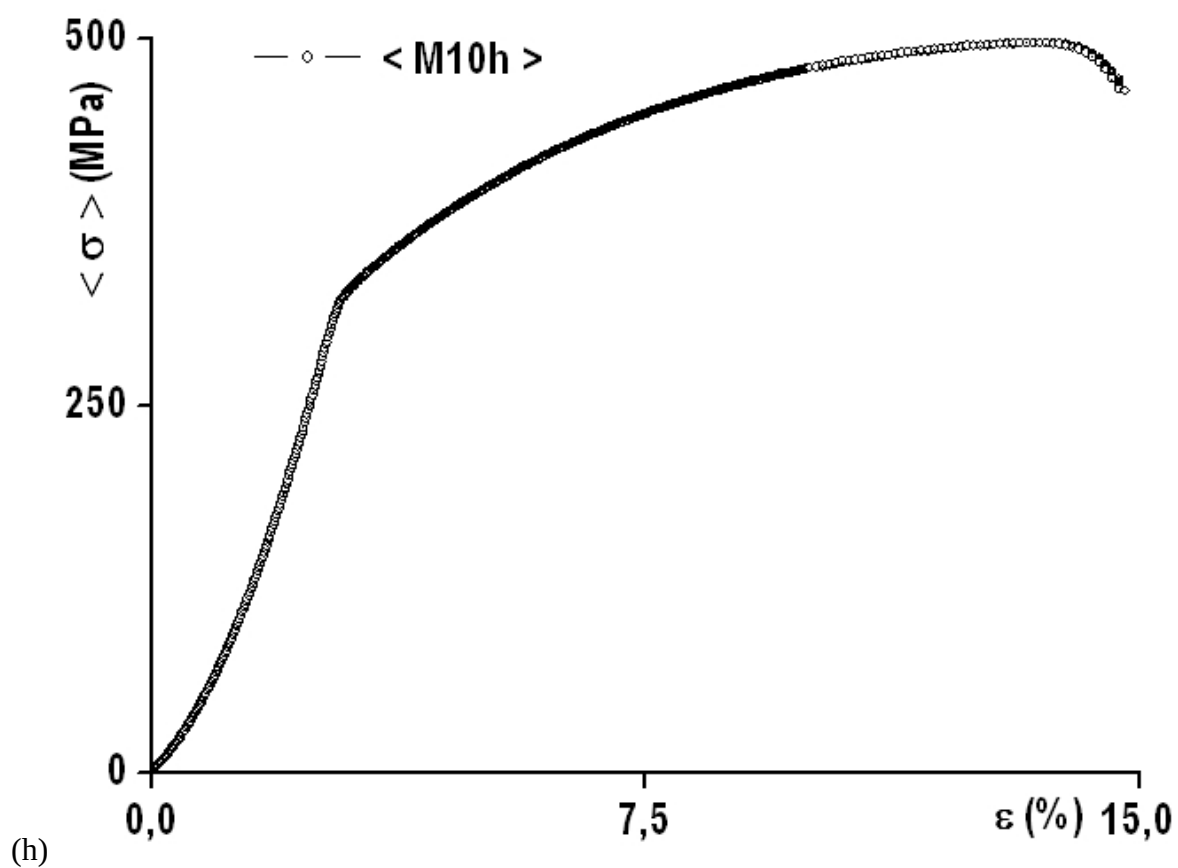
III.3.1 - Courbes moyennes de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg

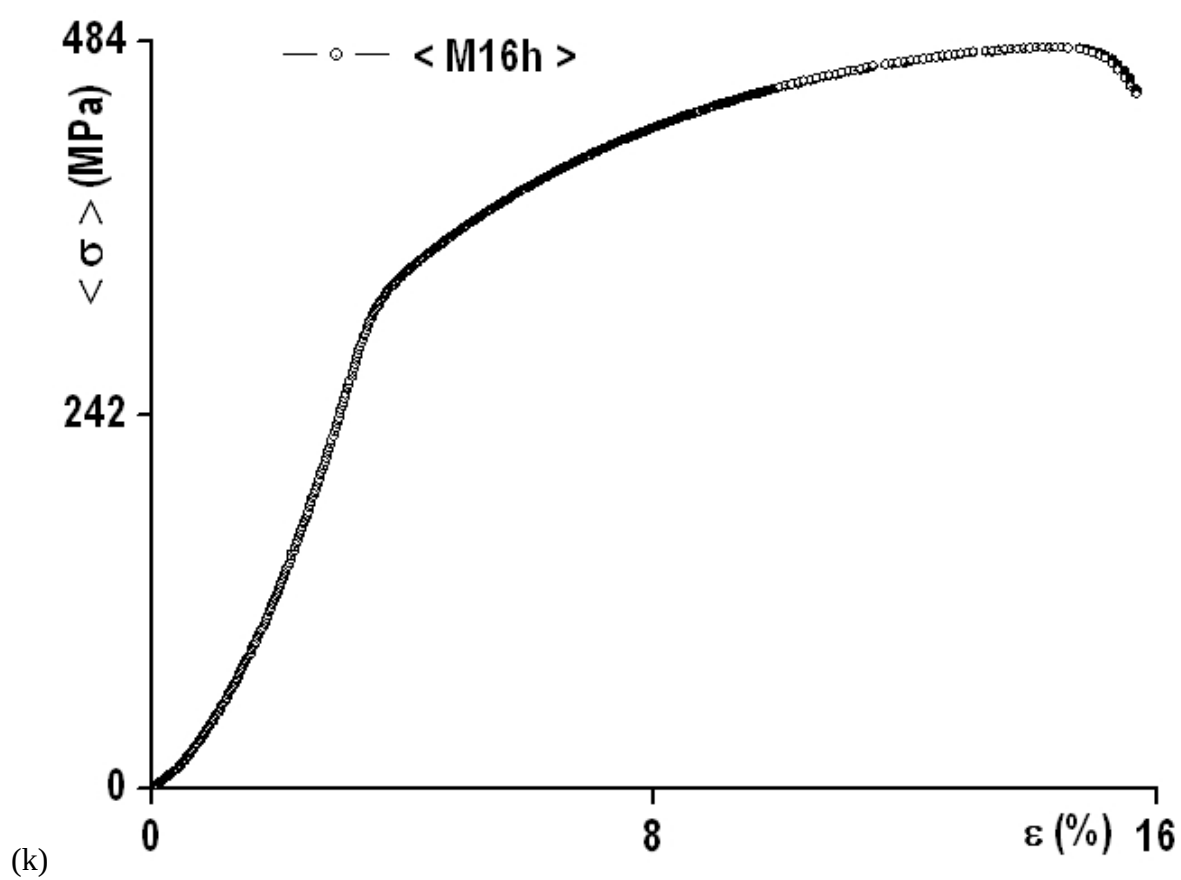
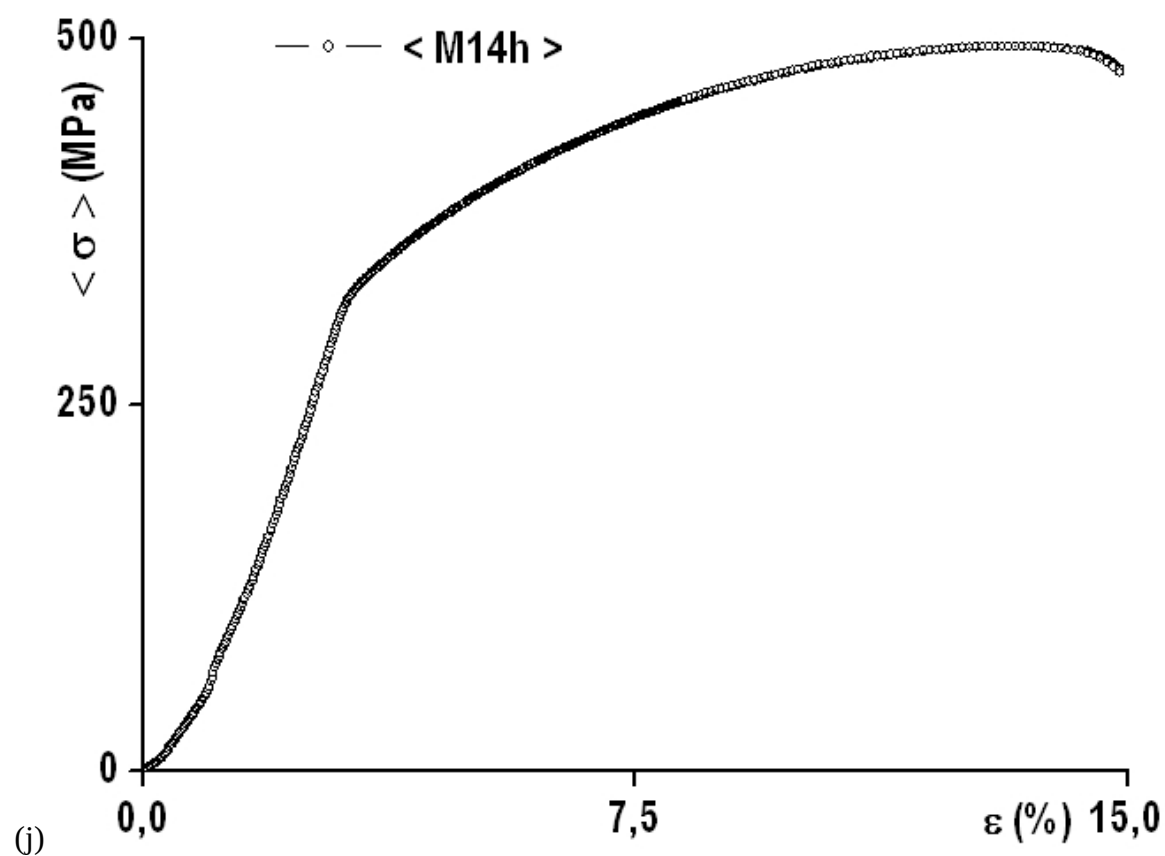


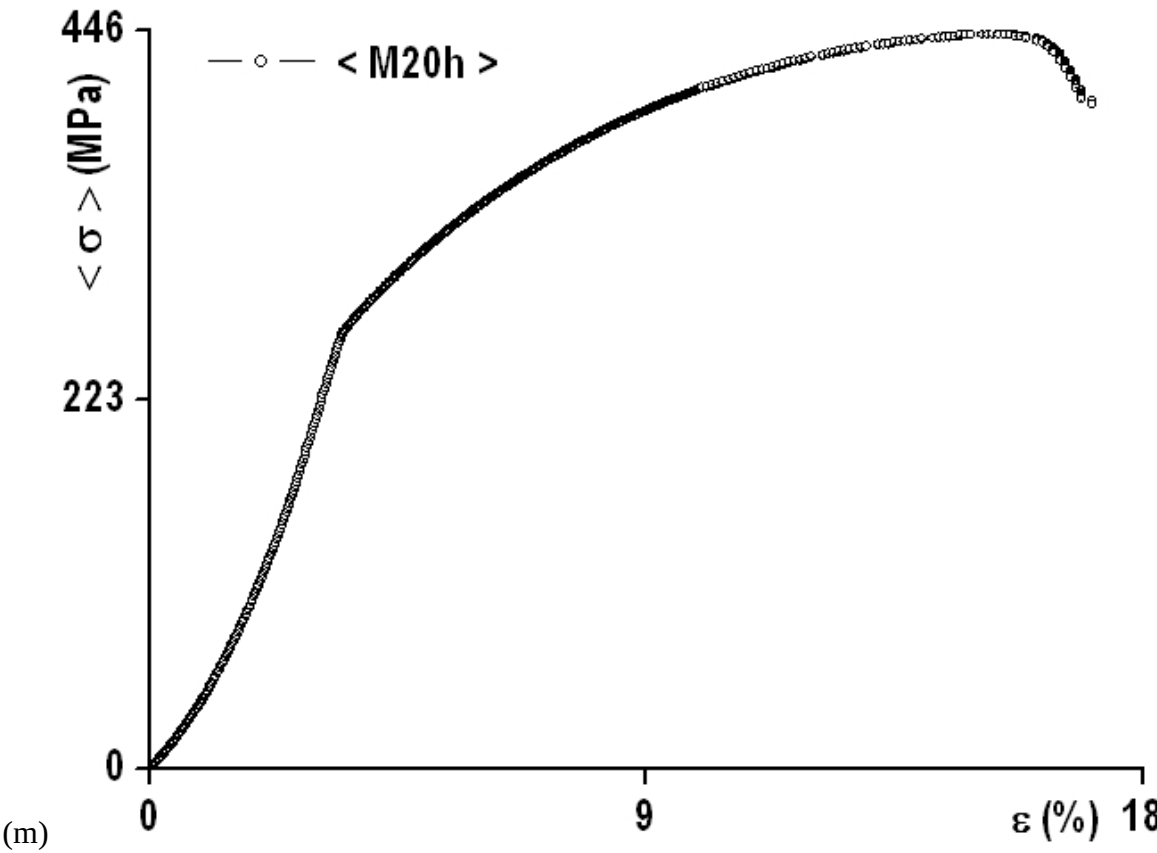
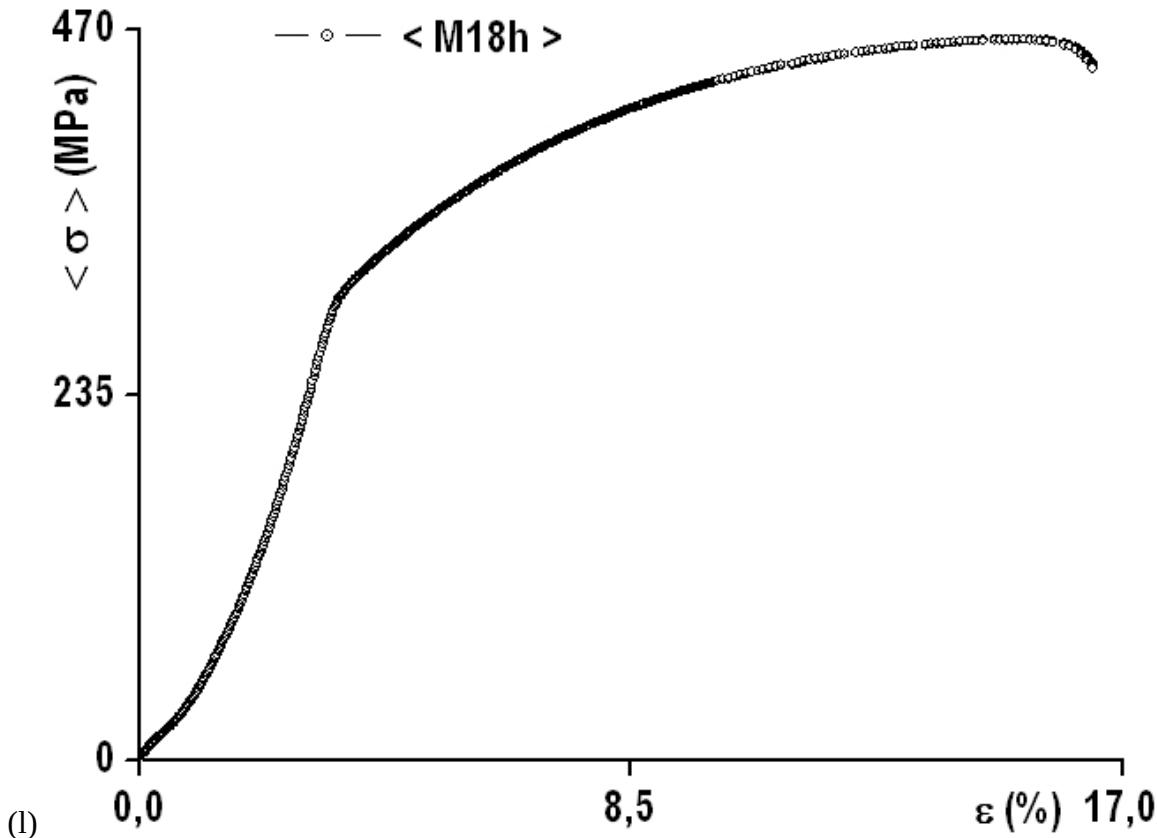












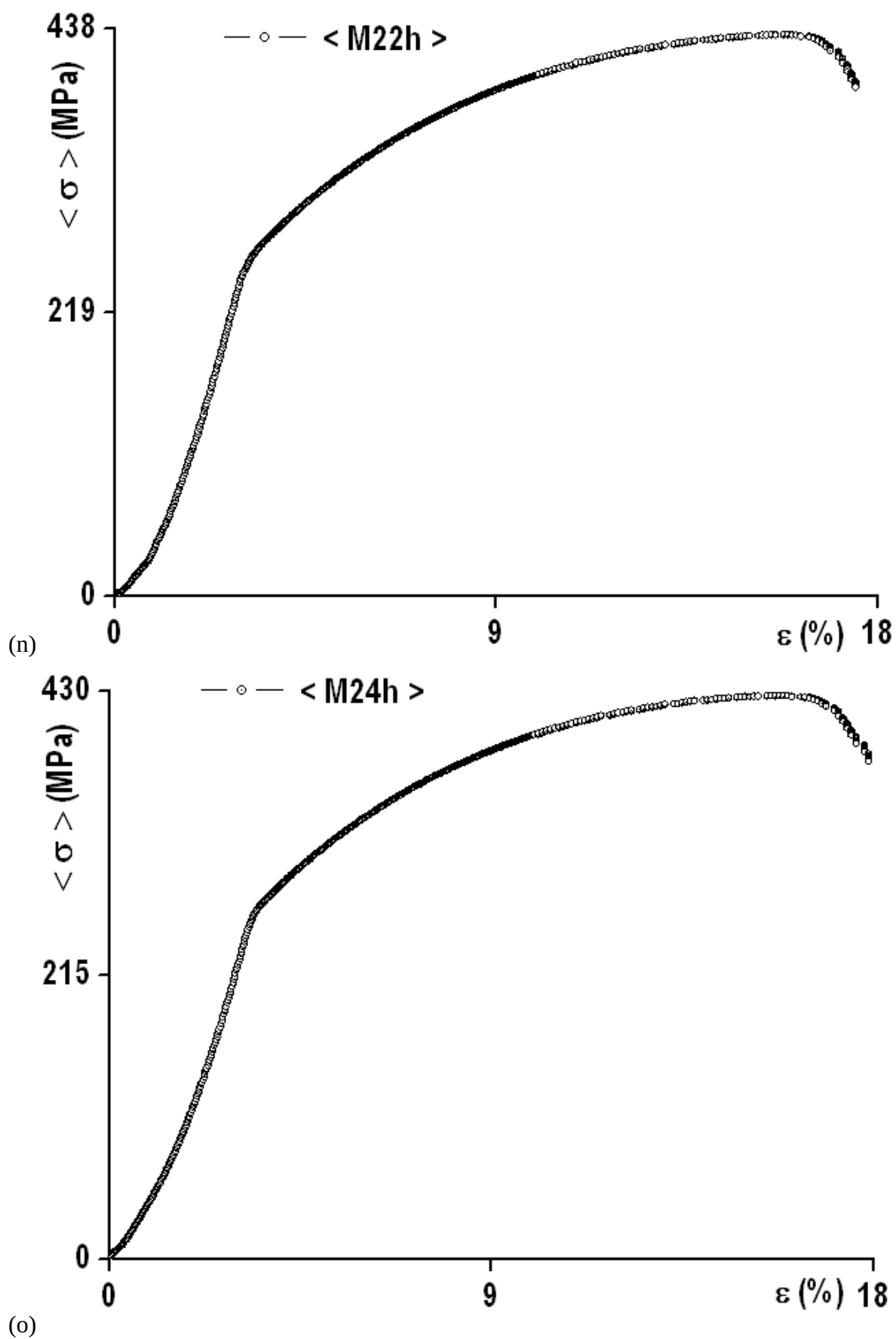


Fig.III.1 – Courbes de traction (contrainte – déformation) de l'alliage de laminage AlCu₃Si₂Mg

aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$, (b) – trempé noté: $\langle T \rangle$ et maturés notés: (c) – $\langle M0h \rangle$, (d) – $\langle M2h \rangle$, (e) – $\langle M4h \rangle$, (f) – $\langle M6h \rangle$, (g) – $\langle M8h \rangle$, (h) – $\langle M10h \rangle$, (i) – $\langle M12h \rangle$, (j) – $\langle M14h \rangle$, (k) – $\langle M16h \rangle$, (l) – $\langle M18h \rangle$, (m) – $\langle M20h \rangle$, (n) – $\langle M22h \rangle$, (o) – $\langle M24h \rangle$ avec $\langle \sigma \rangle$ - contrainte moyenne, $\varepsilon(\%)$ - déformation.

Les Figures.III.1- (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n et o) représentent respectivement les courbes de traction moyennes (contraintes - déformations) de cinq éprouvettes de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg pour chaque état des quinze considérés qui sont: (a) - brut de coulée noté : $\langle F \rangle$, (b) – trempé noté : $\langle T \rangle$ et maturés notés : (c) – $\langle M0h \rangle$, (d) – $\langle M2h \rangle$, (e) – $\langle M4h \rangle$, (f) – $\langle M6h \rangle$, (g) – $\langle M8h \rangle$, (h) – $\langle M10h \rangle$, (i) – $\langle M12h \rangle$, (j) – $\langle M14h \rangle$, (k) – $\langle M16h \rangle$, (l) – $\langle M18h \rangle$, (m) – $\langle M20h \rangle$, (n) – $\langle M22h \rangle$ et (o) – $\langle M24h \rangle$.

On regroupe à chaque fois cinq éprouvettes de chaque état dans un même graphe afin de voir si les résultats sont proches et en suite on fait une courbe moyenne de chaque état.

L'étude des courbes précédemment citées nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de chaque état du mode par laminage.

Les figures (III.2 – III.13) représentent les différents résultats obtenus au cours de notre étude des différentes propriétés mécaniques de notre l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg.

III.3.2 - Influence du temps de maturation et du mode d'élaboration de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg sur les propriétés mécaniques de

III.3.2.1 - résistance

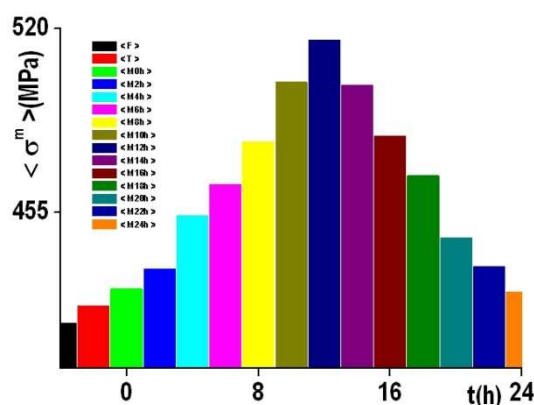


Fig.III.2 – histogramme de la contrainte maximale ($\langle \sigma^m \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

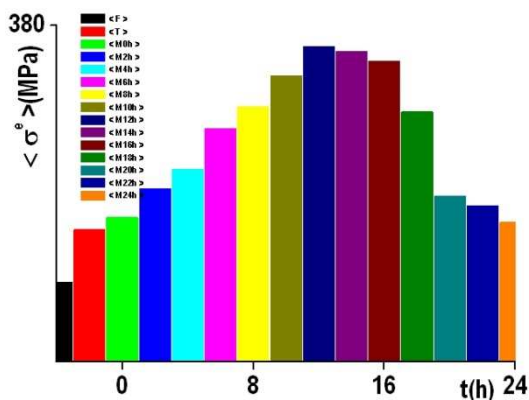


Fig.III.3 – histogramme de la contrainte d'élasticité ($\langle \sigma^e \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

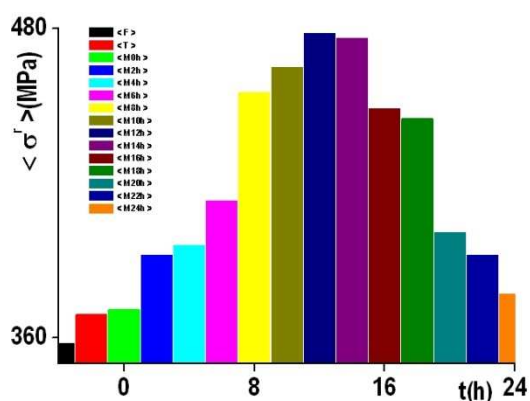


Fig.III.4 – histogramme de la contrainte de rupture ($\langle \sigma^r \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

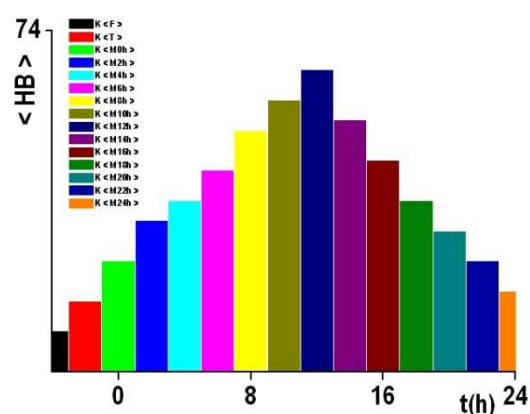


Fig.III.5 – histogramme de la dureté Brinell ($\langle HB \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

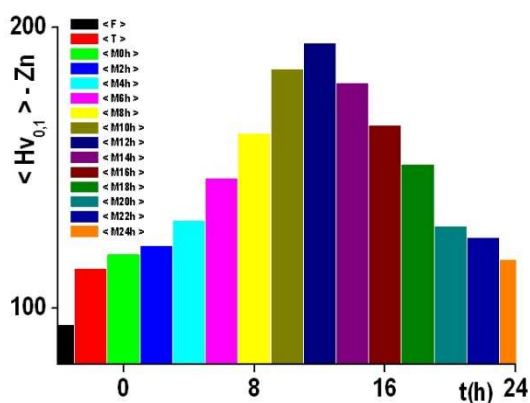


Fig.III.6 – histogramme de la microdureté de la zone noire ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Zn – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

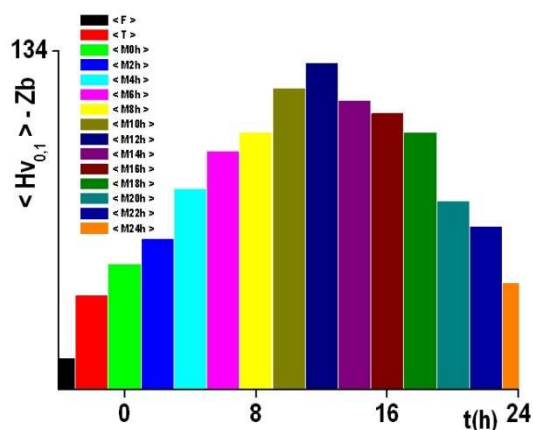


Fig.III.7 – histogramme de la microdureté de la zone blanche ($\langle Hv_{0,1} \rangle - Zb$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: < M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h >.

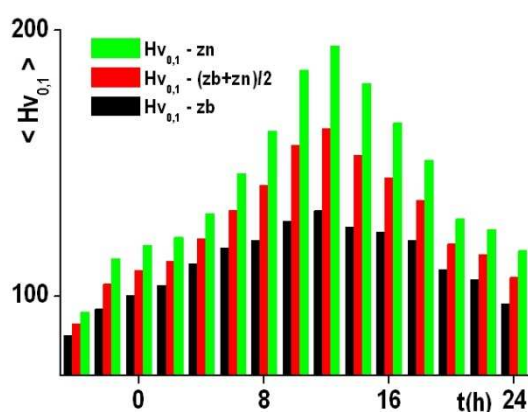


Fig.III.8 – histogramme de comparaison des microduretés Vickers des zones noire notée: Zn, blanche notée: Zb et de leur moyenne notée $(Zb+Zn)/2$ ($\langle Hv_{0,1} \rangle - Zn, Zb$ et $(Zb+Zn)/2$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: < M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h >.

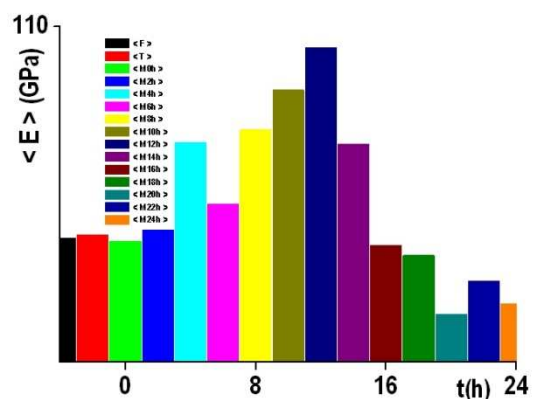


Fig.III.9 – histogramme du module d'Young moyen ($\langle E \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg par gravitation aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: < M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h >.

III.3.2.2 - ductilité

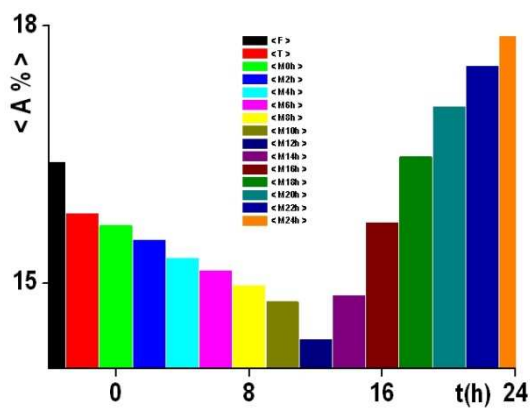


Fig.III.10 – histogramme de l'allongement moyen ($\langle A\% \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu₃Si₂Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

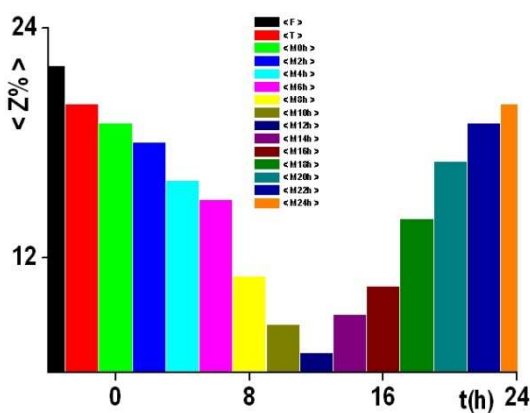


Fig.III.11 – histogramme du coefficient moyen de striction ($\langle Z\% \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu₃Si₂Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

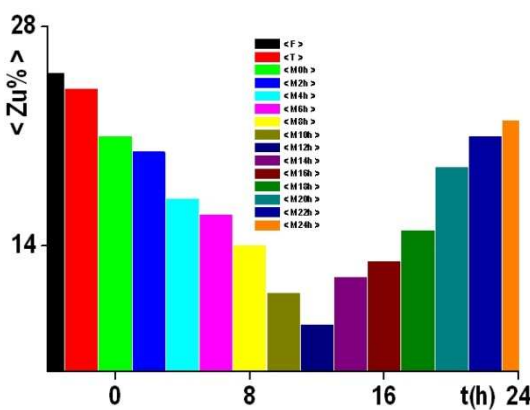


Fig.III.12 – histogramme de l'allongement moyen de striction ($\langle Zu\% \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu₃Si₂Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

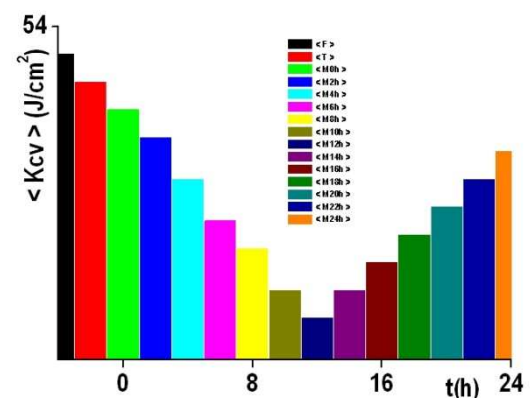


Fig.III.13 – histogramme de la résilience moyenne ($\langle Kcv \rangle$ – temps de maturation) de l'alliage de laminage AlCu₃Si₂Mg aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés: $\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$, $\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$.

DISCUSSION

Dans ce mode par laminage, on observe la courbe moyenne de l'état $\langle M12h \rangle$ est en dessus de toutes les courbes des autres états (Fig.III.1 – (p)) et que les propriétés mécaniques de résistances extrinsèques qui sont la résistance maximale à la traction $\langle \sigma^m \rangle$, la limite d'élasticité $\langle \sigma^e \rangle$, la résistance à la rupture $\langle \sigma^r \rangle$, la dureté $\langle HB \rangle$, les microduretés $\langle Hv_{0,1} \rangle$ et le module d'Young $\langle E \rangle$ croissent respectivement d'une façon brutale de l'état brut de coulée: $\langle F \rangle$ pour atteindre la valeur maximale à l'état $\langle M12h \rangle$ pour décroître jusqu'à $\langle M24h \rangle$ (Fig.III.2 – Fig.III.9) au détriment des propriétés mécaniques de ductilité extrinsèques qui sont $\langle A\% \rangle$ - allongement en pourcentage, $\langle Z\% \rangle$ - allongement à la striction, $\langle Z\% \rangle$ - coefficient de striction et $\langle Kcv \rangle$ - résilience qui décroissent d'une façon brutale respectivement de l'état brut de coulée: $\langle F \rangle$ jusqu'à l'état $\langle M12h \rangle$ pour enfin croître jusqu'à $\langle M24h \rangle$ (Fig.III.10 – Fig.III.13).

Les (Fig.III.1- (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k), (l), (m), (n), (o) et (p)) courbes de traction et de comparaison (contrainte – déformation) moyennant une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$, (b) – trempé noté: $\langle T \rangle$ et maturés notés: (c) – $\langle M0h \rangle$, (d) – $\langle M2h \rangle$, (e) – $\langle M4h \rangle$, (f) - $\langle M6h \rangle$, (g) – $\langle M8h \rangle$, (h) – $\langle M10h \rangle$, (i) - $\langle M12h \rangle$, (j) - $\langle M14h \rangle$, (k) – $\langle M16h \rangle$, (l) – $\langle M18h \rangle$, (m) – $\langle M20h \rangle$, (n) – $\langle M22h \rangle$, (o) – $\langle M24h \rangle$ et (p) – groupement de comparaison des 15 états correspondants nous montrent que:

- les déformations à rupture ainsi que les énergies de rupture sont grandes avec présence du domaine plastique hétérogène car l'endommagement s'est produit d'une manière progressive; de plus le tronçon de la courbe montrant le passage de la contrainte moyenne maximale $\langle \sigma^m \rangle$ à celle de la contrainte moyenne de rupture $\langle \sigma^r \rangle$ est une courbe de forme approximative parabolique: chute progressive de $\langle \sigma^m \rangle$ à $\langle \sigma^r \rangle$ avec $\langle \epsilon^m \rangle < \langle \epsilon^r \rangle$ (Fig.III.1),

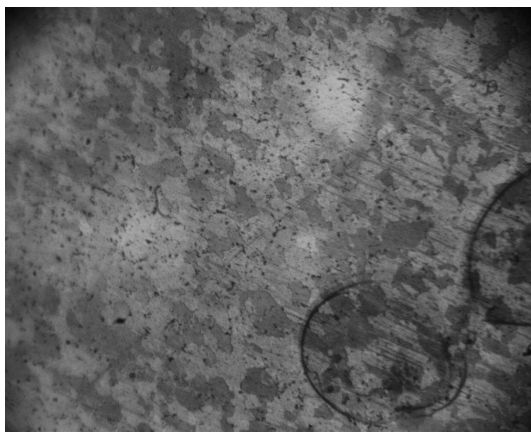
- Les allongements à la rupture : $A\% \gg 5\%$ (Fig.III.10),
- Les valeurs des coefficients de striction $Z \gg 0,1$ (Fig.III.11),
- La résilience Kcv est très grande (Fig.III.13),
- les faciès de rupture, respectivement de traction (Fig.III.16) présentent un aspect mate à grains.

Ces cinq critères et observations nous confirment que la rupture de notre alliage est une rupture ductile.

Les quinze courbes moyennes (contrainte – déformation) (Fig.III.1) font apparaître trois domaines: un grand domaine élastique, un premier grand domaine plastique homogène et un deuxième domaine cette fois – ci hétérogène très restreint ou l'endommagement instantané débute par une striction de l'éprouvette avec apparition et propagation progressive de la fissure sur un défaut.

Dans ce cas, on est, probablement, en présence de la superposition du mode de rupture des types II et III avec déplacements instantanés des deux glissements droit et vis pour l'obtention d'une surface de rupture inclinée approximativement à 45°.

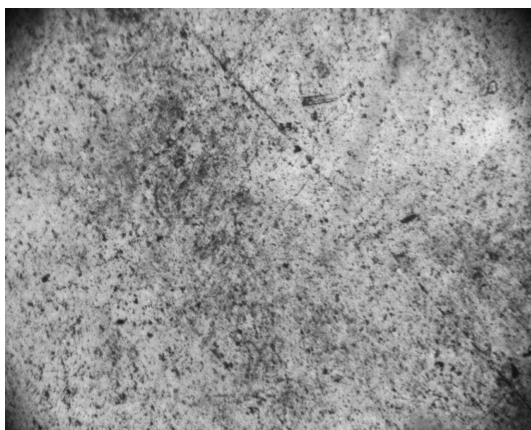
III.4 - MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE DE LAMINAGE $\text{AlCu}_3\text{Si}_2\text{Mg}$



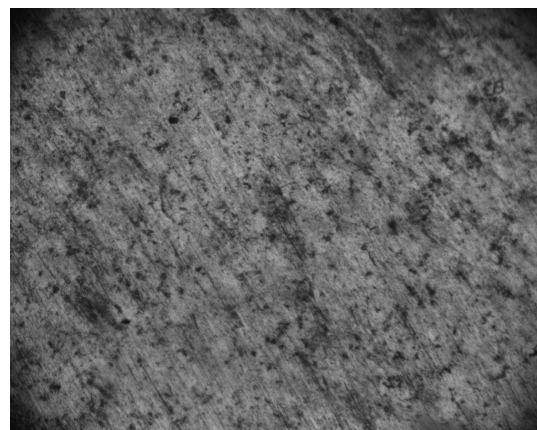
Fx100



M0hx100



M12hx100



M24hx100

Fig.III.14 - Structures micrographiques de l'alliage de laminage $\text{AlCu}_3\text{Si}_2\text{Mg}$

III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIE

Lors du laminage à chaud, la solidification se produit beaucoup plus rapidement. Il en résulte une structure plus fine Fig.III.14.15 (F). La grosseur du grain de métal exerce une action importante sur ses propriétés mécaniques. Ces propriétés, surtout sa ductilité et sa plasticité, sont plus prononcées lorsque le grain est petit. A l'état brut de coulée, l'alliage étudié AlCu3Si2Mg renferme généralement de gros grains répartis d'une façon aléatoire et formés après solidification et dans lesquels la distribution de la teneur en différents éléments d'additions (Cu, Si et Mg) est non uniforme. Ceci conduit à la formation des hétérogénéités structurales et locales qui engendrent un champ de contraintes variant d'un point à un autre du matériau, dans ce dernier, on est en présence alors des régions difficilement et facilement déformables, par conséquent, lors des sollicitations mécaniques extérieures, la déformation apparaît en premier lieu dans les régions favorables au glissement des dislocations. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié, il faut gêner le mouvement des dislocations dans toute la masse du matériau en provoquant la formation de précipités finement dispersés (Al_2Cu , Al_2CuMg , Mg_2Si , Cu, Si, Mg etc.), pour cela nous avons fait subir à l'alliage un traitement thermique qui s'effectue en quatre étapes. L'observation microscopique met en évidence dans l'alliage étudié aux états brut de coulée une répartition assez hétérogène des différents éléments d'additions (Cu, Si et Mg), par contre leurs répartitions dans la matrice aux états maturés et revenus sont homogènes. Lors de l'analyse des microstructures obtenues par la microscopie, nous avons remarqué que la taille des grains obtenue par l'état < M12h > sont plus fins que celle obtenue aux autres états, ce qui explique les résultats obtenus lors de l'essai de traction, de dureté et de microduretés.

III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON Les traitements thermiques

Les (Fig.III.1 – (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k), (l), (m), (n), (o) et (p) – Fig.III.2 - 13) montrent respectivement les courbes moyennes groupées de dépendance de la contrainte appliquée en fonction de la déformation, les graphes des résistances moyennes à la traction: $\langle \sigma^m \rangle$, $\langle \sigma^e \rangle$, et $\langle \sigma^r \rangle$, la dureté Brinell moyenne $\langle \text{HB} \rangle$, les microduretés moyennes $\langle \text{Hv}_{0,1} \rangle$, le module d'Young moyen $\langle E \rangle$, l'allongement moyen en pourcent $\langle A\% \rangle$, le coefficient de striction moyen $\langle Z\% \rangle$, l'allongement à la striction moyen $\langle \text{Zu}\% \rangle$ et la résilience moyenne $\langle \text{Kcv} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg aux états : (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$, (b) – trempé noté: $\langle T \rangle$ et maturés notés: (c) – $\langle \text{M0h} \rangle$, (d) – $\langle \text{M2h} \rangle$, (e) – $\langle \text{M4h} \rangle$, (f) - $\langle \text{M6h} \rangle$, (g) – $\langle \text{M8h} \rangle$, (h) – $\langle \text{M10h} \rangle$,

(i) - < M12h >, (j) - < M14h >, (k) – < M16h >, (l) – < M18h >, (m) – < M20h >, (n) – < M22h >, (o) – < M24h > et (p). Pour le mode de laminage, on constate que les graphes des contraintes, de la dureté Brinell, des microduretés et du module d'Young en fonction du temps de maturation croissent de l'état brut de coulée, pour atteindre leurs valeurs maximales à M12h puis décroissent jusqu'à l'état M24h au détriment des allongements, de la striction et de la résilience. Il ressort que les valeurs de la résistance à la traction, la résistance à la rupture, la limite d'élasticité, la dureté Brinell, les microduretés et le module d'Young de l'alliage à l'état de maturation M12h sont supérieures à celles des autres états. L'analyse de ces résultats nous montre que le compromis est l'état M12h pour des pièces de résistance quel que soit l'état car le processus de vieillissement naturel s'est achevé au bout de 12h de maturation suivi d'un revenu complet à 165°C pendant 6h.

III.7 - CONCLUSION

L'analyse des résultats expérimentaux montrent que le meilleur compromis de l'alliage de laminage AlCu3Si2Mg est la maturation de douze heures (12h) quels que soient les états considérés.

Afin de répondre aux exigences des constructeurs pour une utilisation rationnelle de ce matériau dans divers mécanismes soumis à des efforts mécaniques, il est préférable d'élaborer les différentes pièces destinées à l'usage de différentes natures de l'alliage AlCu3Si2Mg par laminage suivi d'une maturation de 12h pour les pièces de résistance. Donc l'alliage AlCu3Si2Mg est un alliage de corroyage à traitement thermique ayant de très bonnes propriétés mécaniques de résistances.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette présente étude, on s'est intéressé à l'étude de l'alliage de corroyage AlCu3Si2Mg obtenu par le procédé de laminage conjugué à celui du traitement thermique de maturation en faisant varier le temps de maturation par pas de deux heures sur les caractéristiques de résistances, de ductilité et structurales.

Le choix de cet alliage est dû au fait de sa large utilisation dans de nombreux domaines tandis que leurs traitements thermiques ont été choisis suite aux améliorations considérables de certaines propriétés mécaniques recherchées, qu'on peut obtenir aussi par des éléments d'additions.

Les résultats nous montrent aussi que l'alliage de corroyage AlCu3Si2Mg possède des propriétés mécaniques intéressantes à l'état de maturation 12heures quels que soient les états considérés.

La trempe provoque à l'intérieur de l'alliage un champ de contraintes résiduelles constituées d'un système équilibré de compression en surface et de tension au cœur suivi d'une grande précipitation d'Al₂Cu, ce qui fait augmenter les différentes contraintes, la dureté et les microduretés de l'alliage.

Les maturations suivies de revenu considérés provoquent la migration des éléments d'addition principalement (Cu, Si et Mg) vers les dislocations avec apparition de différents précipités (Al₂Cu, Al₂CuMg, Mg₂Si etc.). Ces phénomènes conduisent à l'élévation de propriétés de résistance au détriment de la ductilité.

D'une façon générale, si l'on veut obtenir une résistance mécanique élevée et conserver néanmoins des allongements substantiels, il faut plutôt choisir une maturation de 12 heures suivie d'un revenu à 165°C pendant 6 heures avec refroidissement à l'air libre pour chaque état respectif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PARTIE I

Chapitre I.1

- [1]. M.Colombié et Coll, Matériaux industriels : Matériaux métalliques Dunod, Paris (2000).
- [2]. Gilles Dour, Fonderie – Alliages-Procédés, Propriétés d’usage-Défauts, Aide-mémoire, 2^{ème} édition, l’usine nouvelle, Dunod, Paris, 2009.
- [3]. Alain Cornet et Françoise Hlawka, Métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique, Science des Matériaux, nouvelle édition, Technosup, Ellipses Edition Marketing S.A. 2010.
- [4]. Pierre Papon, Jaques Leblond et Paul H. E. Meijer, Physique des transitions de phase: concepts et applications, p.406, 2^{ème} édition, Dunod, Paris (2002).
- [5]. J. Bernart, A. Michel, J.Philibert et J. Talbot, Métallurgie générale, p. 665, Masson, Paris (1969 et 1984)

Chapitre I.2

- [1]. J. Philibert, A.Vignes, Y. Bréchet, P. Combrade, Métallurgie du minerai au matériau, cours et exercices corrigés, 2^e et 3^e cycles, Ecoles d’ingénieurs, Science SUP, p.1177, 2^e édition, Dunod, Paris (2002).
- [2]. J. Philibert, A.Vignes, Y. Bréchet, P. Combrade, Métallurgie du minerai au matériau, p.1107, édition Masson Paris (1998).
- [3]. AFNOR, Métaux non ferreux, tome1 : Produits en aluminium et alliages d’aluminium, caractéristiques et dimensions, 5^{ème} édition AFNOR Paris(1992).
- [4]. AFNOR, Métaux non ferreux, tome2, Produits en aluminium et alliages d’aluminium, Méthode d’essais et d’analyse, soudage, 5^{ème} édition AFNOR Paris(1992).
- [5]. Coordonné par Eric Felder, Pierre Guénin, Techniques de l’Ingénieur, mise en forme et fonderie, MC1- MC2- MC3, édition Techniques de l’Ingénieur (2002).
- [6]. Coordonné par Yves Desalos, Jacques Pagetti, Techniques de l’Ingénieur, traitements des métaux, MD1- MD2- MD3, édition Techniques de l’Ingénieur (2002).
- [7]. Coordonné par Bernard Jouffrey et Guy Murry, Techniques de l’Ingénieur, études et propriétés des métaux, MB1- MB2- MB3- MB4- MB5, édition Techniques de l’Ingénieur (2002)
- [8]. Sous les directions de Claude Genty, Techniques de l’Ingénieur, analyse et caractérisation, édition Techniques de l’Ingénieur (1996)
- [9]. Coordonné par Jacques Astier, Adrien Marcé, Techniques de l’Ingénieur, élaboration et recyclage des métaux, ME1 - ME2 - ME3, Techniques de l’Ingénieur (2002).
- [10]. Sous les directions de Jean- Claude Charpentier, Techniques de l’Ingénieur, Génie des Procédés, J1 - J2 - J3 - J4 - J5 - J6, édition Techniques de l’Ingénieur (1996).

- [11]. C. Chaussin, G. Hilly, Métallurgie : élaboration des métaux, tome 2, p.272, 9^{ème} édition Dunod, Paris(1984).
- [12]. Encyclopédie des Sciences Industrielles QUILLET : Mécanique-Généralités-Applications : M1, édition Quillet, Paris (1983).
- [13]. Dictionnaire Encyclopédie QUILLET : A-B ; S-T, édition Quillet, Paris (1979)

Chapitre I.3

- [1]. Jean Baralis, Gérard Maeder, Précis de Métallurgie : (Elaboration, structure-propriétés, normalisation), 1^{ère}édition, Afnor-Nathan, Paris (1997).
- [2]. I. Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques, p.413, 4^{ème} édition, Mir, Moscou (1986).
- [3]. C. Chaussin, G. Hilly, Métallurgie: alliages métalliques (Tome 1), 8^{ème} édition, Dunod, Paris (1976).
- [4]. M. Colombié et Coll, Matériaux industriels : Matériaux métalliques, Dunod, Paris (2000).
- [5]. J. Bernart, A. Michel, J.Philibert et J. Talbot, Métallurgie générale, p. 665, Masson, Paris (1969 et 1984).
- [6]. C. Vargel, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, p.267, Dunod, Paris (1979).
- [7]. Jean-Paul Baillon, Jean-Marie Dorlot, Des Matériaux, 3^{ème} édition, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal (2000)
- [8]. J. Philibert, A.Vignes, Y. Brechet, P. Combrade, Métallurgie du minerai au matériau, Masson, Paris (1998).
- [9]. Sylvain Jacob, Techniques de l'ingénieur: Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie, M 442, p.10, Dunod - Afnor, Paris (2000).

Chapitre I.4

- [1]. Gilles Dour, Fonderie – Alliages-Procédés, Propriétés d'usage-Défauts, Aide-mémoire, 2^{ème} édition, l'usine nouvelle, Dunod, Paris, 2009.
- [2]. Alain Cornet et Françoise Hlawka, Métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique, Science des Matériaux, nouvelle édition, Technosup, Ellipses Edition Marketing S.A. 2010.

Chapitre I.5

- [1]. Gilles Dour, Fonderie – Alliages-Procédés, Propriétés d'usage-Défauts, Aide-mémoire, 2^{ème} édition, l'usine nouvelle, Dunod, Paris, 2009.
- [2]. Alain Cornet et Françoise Hlawka, Métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique, Science des Matériaux, nouvelle édition, Technosup, Ellipses Edition Marketing S.A. 2010.

PARTIE II

Chapitre II.1

- [1]. Sylvain Jacob, Techniques de l'ingénieur: Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie M 442, , Dunod - Afnor, Paris (2000).
- [2]. Jean Baralis, Gérard Maeder, Précis de Métallurgie : (Elaboration, structure-propriétés, normalisation), , 1^{ère} édition, Afnor-Nathan, Paris (1997).
- [3]. M. Colombié et Coll, Matériaux industriels : Matériaux métalliques, Dunod, Paris (2000).
- [4]. Pierre Guenin, Techniques de l'ingénieur : Métallurgie des alliages de fonderies - Traité matériaux métalliques M 3521, Dunod - Afnor, Paris (2002).
- [5]. Roger Devalley, Techniques de l'ingénieur: Traitements thermiques des alliages d'aluminium M 1290, , Dunod - Afnor, Paris (2000).
- [6]. Jean-Paul Baillon, Jean-Marie Dorlot, Des Matériaux, 3^{ème} édition, école polytechnique de Montréal, Montréal (2000).
- [7]. I.F. Koblenev, Traitement thermique des alliages d'aluminium, Métallourguiya, Moscou (1966) en russe.
- [8]. Sylvain Jacob, Techniques de l'ingénieur: Données numériques sur les alliages d'aluminium de moulage M 449, Dunod - Afnor, Paris (2002).

Chapitre II.2

- [1]. Aide-Mémoire, Métallovédénie : Alumuniy i yévo splavov (Sciences des Métaux : Aluminium et ses Alliages), Métallourguiya, Moscou (1983) en russe.
- [2]. R. Quatermer, J.-P. Trotignon, Précis de construction mécanique :1. Dessin, conception et normalisation, 7^{ème} Edition, NATNAN-AFNOR, Paris (1978).
- [3]. J. Lignon, R. Maillebeau, Technique des fabrications mécaniques : Etude des matériaux II - Matériaux non ferreux, fascicule 21, Delagrave, Paris (1977).
- [4]. C. Vargel, Le Comportement de l'aluminium et de ses alliages, Bordas, Paris (1979), p. 267.
- [5]. U. Mezon, Variations du frottement intérieur à basses et à hautes amplitudes de déformation et sa relation avec le mouvement de défauts du réseau, Dans: Microplastitchnost (Microplasticité), Recueil d'articles, Métallourguiya, Moscou (1972), pp. 236-301 (en russe).
- [6]. J. L. Martin, Dislocations et plasticité des cristaux, Cahiers de physique, Ed. PPUR, Lausanne (2000).