

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
X·0A:EX C://:A ·X CA·GO



FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

OPTION : Génie Mécanique

SPECIALITE : Fabrication Mécanique et Productique.

Présenté 'par :

Sara HAMMAD

Thème: *MATURATION - PROPRIETES DE L'ALLIAGE AlSi12CuMg COULE
EN SABLE PAR GRAVITATION*

Devant le jury composé de :

Mr. BILEK	Ali	Professeur	Président	UMMTO
Mr. BOURAS	Rachid	Professeur	Examineur	UMMTO
Mr. HAKEM	Ahmed	MCA	Directeur	UMMTO
Mr LOUTIS	SidAli	Doctorant	Co-promoteur	UMMTO

Présenté le : 11/07/2023 à 11h30 en Salle d'Habitat – Département d'Architecture

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 directeur de mémoire Monsieur Ahmed HAKEM Maître de Conférences de classe A (MCA) et à mon Co-promoteur Mr LOUTIS au Département de Génie Mécanique, Faculté de Génie de la Construction, Université Mouloud MAMMERRI de Tizi Ouzou 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, du Hall de Technologie d'Oued Aïssi, de la Société Nationale des Véhicules Industriels de Rouïba (Alger) et de l'Entreprise Electro – Industries de Fréha (Azazga) respectivement Mr LARBI et à l'Unités Fonderie Aluminium coulée par gravité et sous pression par injection.

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 : Houria, Katia, Tahar, Jugurta et à mes neveux : Kamal, Ouassime et ma belle nièce Lina, toute ma famille,
- A toute la promotion 2023 FMP et mes proches et mes camarades qui m'aiment,
- A ma joie et mon bonheur Massinissa Kheffache qui m'a aidé et ma encouragé dans mes années universitaires ;
- Et aux gens qui me sont les plus chers au monde.

Sara

Liste Des Abréviations

Z	: Nombre atomique
M	: Masse atomique
CFC	: Cubique a face centrées
Al	: Aluminium
Cu	: Cuivre
Zn	: Zinc
Mg	: Magnésium
σ_e (MPa)	: Limite d'élasticité
σ_m (MPa)	: Résistance maximale à la traction
σ_r (MPa)	: Résistance à la rupture
A%	: Elongation ou allongement en pourcent
Z%	: Coefficient de striction
Z_u%	: Allongement de striction
σ (MPa)	: Contrainte
ε (%)	: Déformation
K (J/cm²)	: Résilience
S (cm²)	: Surface
H	: Dureté
T(°C)	: Température
HB	: Dureté brinell
Hv	: Dureté vickers
Hv_{0,05}	: Micro Dureté A 50g
Rv	: Etat revenu
Kcv (J/cm²)	: Résilience en v
F	: Etat brut de coulée
M0h, M6h, M12h	: Etats maturés (0, 6, 12) h
S	: Sable
K	: Coquille coulée sous pression
d	: Densité
E (GPa)	: Module d'élasticité
Etat ST₆ ou Y23	: Sable – trempe – maturation - revenu
Etat SF ou Y20	: Sable brut de coulée
α	: Phase riche en élément de solvant : Al
β	: Phase riche en élément de soluté : Si
E	: Eutectique
ΔL(mm)	: Accroissement de longueur
L₀ (mm)	: Longueur initiale
ε_r	: Déformation rationnelle

$V_0(\text{mm}^3)$: Volume initial
$V(\text{mm}^3)$: Volume instantané
F (N)	: Force
S_0	: Surface initiale
CFC	: Cubique à face centrée
CC	: Cubique centré
HC	: Hexagonal compact
K_t	: Concentration de contraintes
D (mm)	: Diamètre de la bille
d (mm)	: Diamètre de l'empreinte
T46	: Trempe – maturation – revenu
SNVI	: Société Nationale du Véhicule Industriel
EI	: Electro-industrie
ENIEM	: Entreprise Nationale des Industries Électro-Ménagers
NF A57-130	: Norme française

Liste Des FIGUERES

Fig.I.1.1 : Microstructures de l'eutectique Al-Si.....	8
Fig.I.1.2 : Microstructure de l'hyper eutectique Al-Si après modification [6].....	9
Fig.I.1.3 : Diagramme de phases d'une transformation eutectique	11
Fig.I.1.4 : Diagramme d'équilibre Al-Si	12
Fig.I.1.5 : Coupe schématique d'une pièce	13
Fig.I.2.1 : Coupes schématiques d'une pièce	20
Fig.I.3.1 : Aluminium après traitement thermique	26
Fig.I.3.2 : Classement des méthodes d'observation sur l'échelle de pouvoir de résolution.....	27
Fig.I.3.3. Microscope optique	29
Fig.I.3.4 : Microscope électronique à balayage	29
Fig.I.3.5 : Microscope électronique à transmission	30
Fig.I.3.6 : Microstructure de silicium Avant modification	32
Fig.I.3.7 : Microstructure de silicium Apres modification.....	32
Fig.I.4.1 : Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.....	33
Fig.I.4.2 : Comportements caractéristiques en traction. a-fragile, b-ductile, c- élastique non linéaire	34
Fig. I.4.3 : Diagramme contrainte-déformation.....	34
Fig. I.4.4 : Principe de l'essai Brinell	36
Fig.I.4.5 : Principe de l'essai Vickers	37
Fig.I.4.6 : Conditions pour les mesures répétitives (essai Vickers)	38
Fig.I.4.7 : L'appareil d'essai utilisé est un mouton pendulaire (mouton de Charpy)	39
Fig.I.5.1 : Types de défauts ponctuels	42
Fig.I.5.2 : (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis	43

Fig.I.5.3 : Dislocation mixte	43
Fig.I.5.4 : Joints de grains	44
Fig. I.5.5 : Représentation schématique d'un pore.....	45
Fig. I.5.6 : Différents précipités	46
Fig. I.5.7 : mécanismes de diffusion à l'échelle atomique	47
Fig. II.1.1 : Lingots D'aluminium Neufs	49
Fig. II.1.2 Retours De Fonderie	50
Fig.II.1.3 : Four De Fusion.....	50
Fig.II.1.4 : Four De Maintien.....	51
Fig.II.1.5 : Poche De Coulée.....	51
Fig.II.1.6 : Plaques Modèles	52
Fig.II.1.7 : Châssis Supérieur – Châssis Inférieur	52
Fig.II.1.8 : Poste Pour Le Moulage En Sable	52
Fig.II.1.9 : Poste De Démoulage.....	52
Fig.II.1.10 : Grenailleuse	52
Fig.II.1.11 : Eprouvettes En Sable.....	53
Fig.II.1.12 : Éprouvettes En Sable Finies	53
Fig.II.1.13 : Poste De L'ébarbage.....	53
Fig.II.1.14 : Scie Mécanique De Type ALMOSMA3	54
Fig.II.1.15 : Tour Universel De Type SN40SN 50C	54
Fig.II.1.16 : Fraiseuse Verticale FV1, 5 ALMO.....	55
Fig.II.1.17 : Meule	55
Fig.II.1.18 : Eprouvette cylindrique de traction en sable.....	56
Fig.II.1.19 : Echantillons	56
Fig.II.1.20 : Dimensionnement des éprouvettes coulées en sable NF A 57 130	56
Fig.II.1.21 : Echantillon De Dureté Et De Mdurete.....	56
Fig.II.1.22 : Echantillon De µstructure	56
Fig.II.1.23 : Eprouvette De Résilience.....	57
Fig.II.1.24 : Démentions Des Eprouvette De Résilience	57

Fig.II.1.25 : Four De Trempe	58
Fig.II.1.26 : Four De Revenu.....	58
Fig.II.1.27 : Machine De Traction	59
Fig.II.1.28 : Pendule De Charpy	59
Fig.II.1.29 : Eprouvettes De Résilience.	60
Fig.II.1.30 : Duromètre.....	60
Fig.II.1.31 : Polisseuse de 150W	61
Fig.II.1.32 : Polisseuse de finition	61
Fig.II.1.33 : l'attaque chimique.....	61
Fig.II.1.34 : Microscope Optique.....	62
Fig.II.1.35 : Microscope électronique à balayage.....	62
Fig.II.2.1 : Cycle thermique de l'AlSi12CuMg	69
Fig.II.2.2 : Eprouvette coulée en sable, normalisée (SNVI)	70
Fig.II.2.3 : Echantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique	71
Fig.III.1 : Courbes de traction	77
Fig.III.2 : (f) - graphe et (g) - histogramme de la contrainte maximale.....	78
Fig.III.3 : graphe et (g) - histogramme de la contrainte moyenne d'élasticité	79
Fig.III.4 : graphe et (g) - histogramme de la contrainte moyenne de rupture.....	79
Fig.III.5 : graphe et (g) - histogramme de la dureté Brinell	80
Fig.III.6 : graphe et (g) - histogramme de la microdureté	80
Fig.III.7 : graphe et (g) – histogramme du module d'Young moyen	81
Fig.III.8 : graphe et (g) – histogramme de l'allongement moyen	81
Fig.III.9 : graphe et (g) – histogramme du coefficient moyen de striction	82
Fig.III.10 : graphe et (g) – histogramme de l'allongement moyen de striction....	82
Fig.III.11 : graphe et (g) – histogramme de la résilience moyenne	83
Fig.III.12 : Structures micrographiques de l'alliage de fonderie AlSi12CuMg....	84
Fig.III.13 : Microstructures obtenues au MEB de l'alliage de fonderie AlSi12CuMg	84
Fig.III.14 : Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l'alliage de fonderie AlSi12CuMg	85

Liste Des Tableaux

Tableau.I.1.1 : Groupe d'alliages d'aluminium.....	5
Tableau.I.1.2 : Désignation des états de livraison	5
Tableau.I.1.3 : Désignations des états métallurgiques.....	6
Tableau.I.1.4 : Compositions normalisées sur les pièces selon la norme NF EN 1706(en % pondéral).....	7
Tableau.I.1.5 : Aptitudes technologiques et d'usage des alliages d'aluminium moulés.....	8
Tableau.I.2.1 : Composition chimique de L'A-S12 suivant la norme NFA57130	15
Tableau.I.2.2 : Composition des lingots AS12 livrés par l'aluminium Français1	15
Tableaux.I.3.1 : conditions des traitements thermiques.....	25
Tableau.I.4.1 : Les dimensions des éprouvettes de résilience	39
Tableau II.2.1 : Composition chimique de l'alliage AlSi10Mg*****	
Tableau.II.2.2 : Caractéristiques et désignation à l'états sable*****	
Tableau II.2.3 : Résultats de l'analyse chimique après contrôle sur éprouvettes coulées en sable.....*****	
Tableau.II.2.4 : La composition chimique de l'alliage AlSi12CuMg	64
Tableau.II.2.5 : Composition du sable de retour	65
Tableau.II.2.6 : Caractéristique du sable au niveau du laboratoire.	65
Tableau.II.2.7 : Caractéristiques du sable dans les conditions d'atelier	65
Tableau.II.2.8 : Composition du sable au secteur du noyautage.....	66

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I.1 - ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1 - ALUMINIUM 3

I.1.2 - PROPRIETES DE L'ALUMINIUM..... 3

a. PROPRIETES PHYSIQUES 3

b. PROPRIETES MECANIQUES..... 3

c. PROPRIETES CHIMIQUES 3

d. PROPRIETES DE MISE EN FORME..... 4

I.1.3 - ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM..... 4

I.1.4 - CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM..... 4

I.1.5 - DIAGRAMME D'EQUILIBRE ALUMINIUM-SILICIUM (Al-Si). 12

I.1.6 - MOULAGE EN FONDERIE 13

CHAPITRE I.2 - CARACTERISATION ET MODE D'ELABORATION DE L'ALLIAGE A-S12

I.2.1 - INTRODUCTION 14

I.2.2 - COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ALLIAGE AS12..... 14

I.2.2.1 - COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ALLIAGE AS12 DANS LA

NORME NF A57-130	14
I.2.2.2 - COMPOSITION DES LINGOTS AS12 LIVRES PAR L'ALUMINIUM FRANÇAIS	15
I.2.3 - INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION.....	15
I.2.4 - LA FUSION	16
I.2.4.1 - REGLES DE FUSION.....	16
I.2.5 - L'AFFINAGE	17
I.2.5.1 - PROCEDES D'AFFINAGE DANS LE CAS DE LA COULEE EN SABLE.....	17
a. Double affinage	17
b. Affinage au sodium (sans poudre de PACZ)	18
I.2.5.2 - CONTROLE DE L'AFFINAGE.....	18
I.2.5.2 - PROCEDES D'AFFINAGE DANS LE CAS DE LA COULEE EN COQUILLE	19
I.2.6 - DEGAZAGE	19
I.2.7 - LE MOULAGE.....	19
I.2.7.1 - MOULAGE EN SABLE	19
I.2.7.2 - MOULAGE EN COQUILLE.....	20
I.2.7.3 - COULEE CENTRIFUGE	21
I.2.7.4 - MOULAGE AU PLATRE	21
I.2.7.5 - MOULAGE SOUS PRESSION (jusqu'à 1500 bars)	21
I.2.7.6 - MOULAGE-FORGEAGE.....	21
I.2.7.7 - MOULAGE A LA CIRE PERDUE	21
CHAPITRE I.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES ET MICROSTRUCTURE	
I.3.1 - LES FOURS	22
I.3.1.1 - LES FOURS DE FUSION	22
I.3.1.1.1 - LE FOUR A CREUSET.....	22
I.3.1.1.2 - FOURS DE MAINTIEN	22

I.3.2 - TRAITEMENTS THERMIQUES.....	23
I.3.2.1 - IMPORTANCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES POUR L'ALUMINIUM	23
I.3.2.2 - PRINCIPAUX TYPES DE TRAITEMENTS THERMIQUES	23
I.3.2.2.1 - TRAITEMENT D'HOMOGENEISATION	23
I.3.2.2.2 - TRAITEMENT D'ADOUCCISSEMENT	23
I.3.2.2.3 - TRAITEMENT DE TREMPE STRUCTURAL	24
I.3.2.2.4 - CONDITIONS DES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES 40 000	25
I.3.2.3 - CONSIGNES DE TRAITEMENTS DES ALLIAGES.....	26
I.3.2.3.1 - ALLIAGES ALUMINIUM –CUIVRE.....	26
I.3.2.3.2 - ALLIAGES ALUMINIUM – SILICIUM	26
I.3.2.3.3 - ALLIAGES ALUMINIUM –MAGNESIUM.....	26
I.3.2.3.4 - ALLIAGES ALUMINIUM – ZINC	26
I.3.3 - LA MICROSTRUCTURE.....	26
I.3.3.1 - MACROSTRUCTURE.....	27
I.3.3.2 - OBJECTIFS DE LA MACROSTRUCTURE	27
I.3.3.3 - MICROSTRUCTURE	27
I.3.3.4 - EXAMEN DE MICROSTRUCTURE.....	27
I.3.3.5 - OBSERVATION PAR MICROSCOPIE	27
I.3.3.6 - PARAMETRES MICROSTRUCTURAUX	30
I.3.3.7 - IMPORTANCE DE LA MICROSTRUCTURE	32
I.3.3.8 - LES PRINCIPALES MICROSTRUCTURES DES ALLIAGES 40000	32

CHAPITRE I.4 - PROPRIETES ET ESSAIS MECANIQUES

I.4.1 - PROPRIETES MECANIQUES	33
I.4.2 - ESSAIS MECANIQUES	33
I.4.2.1 - ESSAI DE TRACTION	33
I.4.2.2 - ESSAI DE DURETE	36
I.4.2.2.1 - ESSAI BRINELL	36
I.4.2.2.2 - ESSAI VICKERS	38
I.4.2.2.3 - ESSAIS DE RESILIENCE	39
a. L'éprouvette	39
b. Machine de résilience	40

CHAPITRE I.5 - LES DEFAUTS CRISTALLINS ET DIFFUSION

I.5.1 - LES DEFAUTS CRISTALLINS	41
I.5.1.1 - LES DEFAUTS PONCTUELS	41
a. Lacune	41
b. Atome Auto Interstitiel	41
c. Atome Étranger En Substitution	41
d. Atome Étranger En Insertion	41
I.5.1.2 - DÉFAUTS À UNE DIMENSION (DEFAUTS LINEAIRES)	42
I.5.1.2.1 - DISLOCATION COIN	43
I.5.1.2.2 - DISLOCATION VIS	43
I.5.1.2.3 - DISLOCATION MIXTE	43
I.5.1.2.4 - LE VECTEUR DE BURGERS	44
I.5.1.3 - DÉFAUTS À DEUX DIMENSIONS (défauts plans)	44
I.5.1.3.1 - LES JOINTS DE GRAINS	44
I.5.1.3.2 - JOINTS DE MACLES	45

I.5.1.4 - DÉFAUTS TROIS DIMENSIONS (défauts volumiques)	45
I.5.1.4.1 - LES PORES	45
I.5.1.4.2 - LES INCLUSIONS.....	45
I.5.1.4.3 - LES PRECIPITES	47
I.5.2 - LA DIFFUSION.....	47
I.5.2.1 - DEFINITION.....	47
I.5.2.2 - MECANISMES DE LA DIFFUSION	47
I.5.2.3 - LOIS DE LA DIFFUSION	47
I.5.2.3.1 - ETAT STATIONNAIRE (première loi de Fick)	47
I.5.2.3.2 - ETAT NON STATIONNAIRE (deuxième loi de Fick)	48

PARTIE II – PARTIE EXPERIMENTAL

CHAPITRE II.1 – APPAREILLAGE

II.1.1 – INTRODUCTION.....	49
II.1.2 - APPAREILLAGE.....	49
II.1.2.1 - MATIERE PREMIERE.....	49
II.1.2.2 - FOUR DE FUSION.....	50
II.1.2.3 - FOUR DE MAINTIEN.....	50
II.1.2.4 - POCHE DE COULEE.....	51
II.1.2.5 - POSTE POUR LE MOULAGE EN SABLE.....	51
II.1.2.6 - GRENAILLEUSE.....	52
II.1.2.7 - EPROUVETTES EN SABLE.....	53
II.1.2.8 - POSTE POUR L’EBARBAGE	53
II.1.2.9 - SCIE MECANIQUE.....	53
II.1.3 - USINAGE DES EPROUVETTES ET DES ECHANTILLONS	54
II.1.3.1 - LA MEULE	55

II.1.3.2 - EPROUVETTES ET ECHANTILLONS.....	56
II.1.4 - FOUR ET ETUVE DES TRAITEMENTS THERMIQUES.....	57
II.1.4.1 - FOUR DE TREMPE	57
II.1.4.2 - FOUR DE REVENU.....	58
II.1.5 - MACHINES D’ESSAIS MECANQUES.....	59
II.1.5.1 - MACHINE DE TRACTION.....	59
II.1.5.2 - MACHINE ESSAI DE RESILIENCE.....	59
II.1.5.3 - DUROMETRE	60
II.1.6 – POLISSAGE.....	61
II.1.6.1 - LES POLISSEUSES	61
II.1.6.2 - ATTAQUE CHIMIQUE	61
II.1.7 - MICROSCOPE	62
II.1.7.1 - MICROSCOPE OPTIQUE	62
II.1.7.2 - MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	62

CHAPITRE II.2 - METHODES EXPERIMENTALES ET ELABORATION

II.2.1 - MATERIAU ETUDIER.....	63
II.2.2 - ALLIAGE DE FONDERIE A TRAITEMENT THERMIQUE.....	63
II.2.2.1 - CARACTERISTIQUES MECANQUES	63
II.2.2.2 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	63
II.2.3 - ELABORATION DE L’AlSi12CuMg.....	63
II.2.3.1 - LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L’AlSi12CuMg SUIVANT LA NORME AF. A57-130.....	63
II.2.3.2 - FOUR DE FUSION	64
II.2.3.3 - CHARGEMENT DU FOUR DE FUSION.....	64
II.2.4 - MOULAGE	64

II.2.4.1 - CARACTERISTIQUES DU SABLE DE MOULAGE	64
II.2.4.2 - MOULAGE EN SABLE.....	65
II.2.4.3 - MOULAGE (NOYAUTAGE).....	66
II.2.4.4 - MOULAGE EN COQUILLE	66
II.2.5 - LA COULEE	66
II.2.6 - OPERATION DE DEMOULAGE	67
II.2.6.1 - MOULAGE EN SABLE.....	67
II.2.6.2 - MOULAGE EN COQUILLE	67
II.2.7 - OPERATIONS DE POINÇONNAGE.....	67
II.2.8 - TRAITEMENT THERMIQUE.....	67
II.2.8.1 - CONDITIONS POUR QUE L'ALLIAGE PUISSE SUBIR UN TRAITEMENT THERMIQUE	68
II.2.8.2 - DIFFERENTES PHASES DU TRAITEMENT THERMIQUE ...	68
II.2.8.3 - CHAUFFAGE ET MAINTIEN.....	68
II.2.8.4 - LA TREMPE.....	68
II.2.8.5 - DURCISSEMENT STRUCTUREL	68
II.2.9 - ESSAIS MECANIQUES	69
II.2.9.1 - ESSAIS DE TRACTION.....	69
II.2.9.2 - ESSAIS DE DURETE	71
II.2.10 - EXAMEN MICROGRAPHIQUE	
II.2.10.1 - PREPARATION DES SURFACES	71
II.2.10.2 - ATTAQUE CHIMIQUE	72
II.2.10.3 – MICROSCOPIE.....	72

PARTIE III – RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III MATURATION - PROPRIETES DE L'ALLIAGE AlSi12CuMg COULE EN SABLE PAR GRAVITATION

III.1 – INTRODUCTION	73
III.2 - EFFETS DE LA COULEE EN SABLE ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ESSAI DE TRACTION	73
III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION	75
III.3.2 - INFLUENCE DU TEMPS DE MATURATION DE L'ALLIAGE DE FONDERIE ALSI12CuMg SUR LES PROPRIETES MECANQUES	78
III.3.2.1 – RESISTANCE.....	78
III.3.2.2 – DUCTILITE.....	81
III.4- MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE DE FONDERIE AlSi12CuMg.....	84
III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIE	85
III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON LES TRAITEMENTS THERMIQUES	86
III.7 – CONCLUSION	86
CONCLUSION GENERALE	87
Références	

RESUME

Pour améliorer considérablement les propriétés mécaniques de l'aluminium à l'état pur, nous avons intervenu sur trois facteurs clés :

01 - Modification de l'aluminium par ajout de trois principaux éléments ayant de très faibles densités dont 12% de silicium, une faible quantité de cuivre et de magnésium inférieur à 1% avec ($\text{Cu} \leq 1\%$, $\text{Mg} \leq 1\%$) pour obtenir ainsi un alliage de fonderie $\text{AlSi}_{12}\text{CuMg}$ à partir de l'alliage $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ livré gracieusement par la Société Nationale des Véhicules Industriels (SNVI) de Rouïba (Alger),

02 - Moulage en sable par gravité : Etat brut de coulée noté - SF présentant une microstructure grossière,

03 - Pour chercher à augmenter plus les caractéristiques de résistances de l'état SF et obtenir essentiellement de grandes contraintes d'élasticité, de grands modules de rigidité avec de faibles déformations, l'alliage $\text{AlSi}_{12}\text{CuMg}$ est soumis aux durcissements structuraux de maturation par pas de 6h faisant ainsi apparaître des précipités de différents genres qui entravent au glissement de dislocations.

Les résultats ainsi obtenus lors de notre étude nous montrent que l'état SM12h est le compromis de résistance et de ductilité maximale.

Mots clés : Al-Si, sable, gravité, propriétés mécaniques, maturation.

ABSTRACT

Pure aluminum has poor mechanical properties. To improve them considerably, we acted on three main factors:

01 - Modification of aluminum by adding three main elements with very low densities including 12% silicon, a small amount of copper and magnesium less than 1% with ($\text{Cu} \leq 1\%$, $\text{Mg} \leq 1\%$) to obtain thus an $\text{AlSi}_{12}\text{CuMg}$ foundry alloy from the $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ alloy delivered free of charge by the National Company of Industrial Vehicles (SNVI) of Rouïba (Algiers),

02 - Gravity sand casting: As-cast condition noted - SF with coarse microstructure,

03 - To seek to further increase the resistance characteristics of the SF state and essentially obtain high elasticity stresses, large moduli of rigidity with low deformations, the $\text{AlSi}_{12}\text{CuMg}$ alloy is subjected to structural maturation hardening in steps of 6 hours thus causing precipitates of different kinds to appear which hinder the sliding of dislocations.

The results thus obtained during our study show us that the SM12h state is the compromise of resistance and maximum ductility.

Keywords: Al-Si, sand, gravity, mechanical properties, maturation.

INTRODUCTION GENERALE

L'aluminium est un matériau couramment utilisé dans de nombreux domaines de notre société moderne en raison de ses propriétés uniques telles que sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa conductivité. Cependant, malgré ses avantages, l'utilisation généralisée de l'aluminium soulève des préoccupations environnementales et sanitaires croissantes. Dans ce mémoire, nous présentons notre étude qui porte principalement sur quatre volets suivants :

01 - Elaboration par fusion du métal avec ajout de trois (3) principaux éléments avec - 12% de Si, $Cu \leq 1\%$ et $Mg \leq 1\%$ à la matrice Al à partir de lingots en $AlSi_{10}Mg$ livré par Péchiney pour l'obtention de l'alliage de fonderie $AlSi_{12}CuMg$ qui régit notre étude,

02 - Moulage en sable par gravité – état de référence – brut de coulée noté – F,

03 - Pour augmenter encore plus les propriétés mécaniques de cet alliage à l'état brut de coulée - F, on a recours à l'application des traitements thermiques de durcissement structural par précipitation en faisant varier le temps de maturation par pas de 6h avec les états suivants – Maturation zéro (0) heure noté - M0h, Maturation six (6) heures noté - M6h et Maturation douze (12) heures noté - M12h,

04 – Puis on procède à la caractérisation mécanique de l'alliage de fonderie obtenu par les essais de traction, de dureté HB, de micro dureté Hv et de résilience. Pour identifier complètement le matériau, l'étude sera suivie de sa microstructure pour évaluer les différentes structures.

L'alliage obtenu par fonderie est utilisé dans la fabrication de diverses pièces qui doivent supporter des sollicitations mécaniques importantes et des actions thermiques modérées. Ces différentes réalisations font partie des composants rentrant dans diverses applications de la SNVI de Rouïba (Alger) et de l'Electro Industries de Fréha (Tizi Ouzou).

L'objectif visé est d'étudier l'influence du temps de maturation par incrément de 6h sur l'évolution des caractéristiques de traction, de dureté Brinell, de micro dureté Vickers, de résilience et microstructurales de l'alliage de fonderie $AlSi_{12}CuMg$ coulé en sable par gravité.

PRESENTATION DU MEMOIRE

Ce mémoire comprend une introduction générale, trois grandes parties, une conclusion générale et on termine par une liste de références bibliographiques.

LA PARTIE I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Elle se subdivise en cinq chapitres.

Chapitre I.1 – Aluminium et ses alliages,

Chapitre I.2 – Elaboration de l’alliage d’aluminium $AlSi_{12}CuMg$,

Chapitre I.3 - Traitements thermiques, diffusion, précipitation et structures,

Chapitre I.4 – Propriétés et Essais mécaniques,

Chapitre I.5 - Défauts cristallins.

LA PARTIE II - PARTIE EXPERIMENTALE

Elle comporte deux chapitres

Chapitre II.1 – Appareillage,

Chapitre II.2 – Méthodes expérimentales et élaboration.

LA PARTIE III - RESULTATS ET DISCUSSION

Cette partie est réservée à l’analyse des résultats expérimentaux suivie de leur interprétation et discussion.

Enfin le fruit de ce modeste travail est résumé en conclusion générale.

CHAPITRE I.1 – ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1 - ALUMINIUM

L'aluminium est l'un des éléments les plus abondants sur la terre, représentant environ 8% de la masse de la croûte terrestre.

Il se présente sous forme de silicates pauvres en aluminium ou de roches riches en alumine (45 à 60 %), la bauxite étant quasiment le seul aluminium présent. Depuis sa découverte en 1954, l'aluminium et ses alliages ont parcouru un long chemin. [1]

I.1.2 - PROPRIETES DE L'ALUMINIUM

a. PROPRIETES PHYSIQUES

Les principales propriétés physiques de l'aluminium sont les suivantes.

- Numéro atomique (Z) : 13.
- Masse atomique (A) : 26,98.
- Structure cristalline : cubique face centrée.
- La conductivité thermique à 200°C est de 0,52 cal/cm.s.°C.
- Coefficient de dilatation de 20 à 400°C : $26,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- Température de fusion (T_f) : 658°C.
- Conductivité : 34,5 m/Ω.mm².
- Résistivité à 20°C : 0,0278 Ω.mm²/m.
- Module de glissement : $2,7 \times 10^3$ kgf/mm².
- Coefficient de Poisson : 0,34.

La densité de l'aluminium est de 2700 kg/m³. [1]

b. PROPRIETES MECANIQUES

Compte tenu de sa structure cristalline (CFC), l'aluminium pur est très déformable à froid ou à chaud, de ce fait-il, est très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, de ce fait, il est très malléable (allongement de rupture 30 à 40%), il est peu tenace. Résistance à la rupture par traction $\sigma_R = 70$ à 100 N/mm² et il est de faible dureté.

- Module d'élasticité : il est à 66.6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et d'additions. Pour les alliages, le module est compris entre 69 et 72 GPa et particulièrement sensible à la teneur en silicium 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium varie de 2 à 18%.
- Module de torsion (cisaillement) : il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99.9% et 26 GPa pour l'aluminium commercial.
- Coefficient de poisson : il varie de 0.33 à 0.35. [1]

c. PROPRIETES CHIMIQUES

L'aluminium se caractérise par une résistance élevée à la corrosion due à la formation d'une couche protectrice (Al₂O₃) à sa surface. La pureté du métal augmente sa résistance à la corrosion des solutions salines, de l'eau de mer et du brouillard, et convient également à une utilisation dans les industries chimiques et alimentaires qui utilisent au moins 99,5 % d'aluminium. La plupart des acides minéraux (acide chlorhydrique, acide sulfurique) et des

acides organiques (acide trichloracétique) ainsi que la soude et la potasse attaquent l'aluminium. [1]

d. PROPRIETES DE MISE EN FORME

La température de fusion relativement basse de l'aluminium de 660°C le rend facile à fondre, ce qui est un avantage pour les opérations de coulée, et il est très malléable et peut être facilement formé à l'état solide par déformation plastique. [1]

I.1.3 - ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium non allié aux propriétés très réduites, on ajoute souvent d'autres éléments aux propriétés différentes, qui entrent en solution solide et peuvent également exister sous forme de phases intermétalliques.

La composition de sa phase et sa finesse, sa répartition et sa cohésion avec la matrice aluminium, sa fragilité inhérente, sa stabilité thermique et sa stabilité mécanique ont également un effet déterminant sur les performances des alliages d'aluminium.

Les alliages d'aluminium sont principalement divisés en trois catégories :

- **Alliages corroyés**

Produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le repoussage, le laminage, le forgeage, etc.

- **Alliages de moulage**

Produit obtenu par coulée en sable (sable) ou coquille (fer ou acier) ou coulée sous pression par une fonderie.

- **Alliages de frittage**

Un produit obtenu selon la méthode de la métallurgie des poudres, qui est une méthode révolutionnaire pour la production de pièces mécaniques. [2]

I.1.4 - CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Elle se fait suivant leur mode de transformation, on trouve les alliages de moulages, les alliages de corroyage, et les alliages élaborés par frittage. Pour notre étude nous intéresserons à l'alliage de moulage.

❖ ALLIAGES DE MOULAGE

Les alliages coulés sont fabriqués en faisant fondre des lingots de l'aluminium et en les versant dans des moules en sable ou des moules en acier. Ce procédé permet l'obtention des pièces aux formes plus ou moins complexes. Ces alliages contiennent généralement des quantités plus élevées d'éléments ajoutés pour faciliter le processus de coulée. [2]

a- Désignation des alliages de moulage

On désigne les alliages de moulages comme suit :

➤ **Désignation de la composition**

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

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

➤ **Désignation numérique**

La première partie de la désignation (EN AC-) est suivie de cinq chiffres représentant la composition chimique. Les deux premiers chiffres indiquent le groupe d'alliage et les trois derniers sa composition chimique. [2]

Groupe	Aluminium ou alliage
10000	Aluminium - (teneur > 99.00%)
20000	Aluminium - cuivre
30000	Aluminium - manganèse
40000	Aluminium - silicium
50000	Aluminium - magnésium
60000	Aluminium - magnésium - silicium
70000	Aluminium - zinc
80000	Autre alliages d'aluminium

Tableau I.1.1: Groupe d'alliages d'aluminium

➤ **Désignation symbolique**

La première partie de la désignation (EN AC-) est suivie des symboles chimiques de l'alliage, successivement suivis de leurs teneurs massiques prises dans l'ordre décroissant. [2]

Exemple : EN AC- $AlSi7Mg$

b- Etat de livraison - Etat métallurgique :

➤ **Etat de livraison**

Selon la norme NF EN 1706, les états de livraison sont désignés de la façon indiquée au tableau (I.1.2). [2]

Procédé de moulage	Désignation nouvelle norme NF EN 1706	Désignation ancienne Norme NF A03-002
Sable	S	Y2
Coquille	K	Y3
Sous pression	D	Y4

Tableau I.1.2: Désignation des états de livraison

➤ **Etats métallurgiques**

La désignation des alliages peut être suivie d'indications sur **les procédés**, et **les traitements thermiques**, selon la norme NF EN-1706.

• **Procédé :**

Les abréviations suivantes sont utilisées pour désigner les différents procédés de moulage :

S - moulage au sable, K - moulage en coquille, D - moulage sous pression et L - moulage de précision (cire perdue).

• **Traitements thermiques**

Selon la norme NF EN 1706, les états métallurgiques sont désignés de la façon indiquée au tableau. (I.1.3).

Etat métallurgique	Désignation
Brut de fonderie	F
Recuit	O
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation)	T1
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement naturel (maturation)	T4
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel ou sur-revenu (stabilisation)	T5
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximum	T6
Traitement thermique de mise en solution et sous-vieillissement artificiel (sous-revenu)	T64

Tableau I.1.3 : Désignations des états métallurgiques.

Alliage		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Autre	
NF EN 1706 ⁽¹⁾	NF A 57-702												Chaque	Total
44100	A-S13	10,5 à 13,5	0,65	0,15	0,55	0,10		0,10	0,15	0,10	0,05	0,20	0,05	0,15
41000	A-S2GT	1,8 à 2,4	0,60	0,10	0,30 à 0,50	0,45 à 0,65		0,05	0,10	0,05	0,05	0,05 à 0,20	0,05	0,15
42100	A-S7G03	6,5 à 7,5	0,19	0,05	0,10	0,25 à 0,45			0,07			0,08 à 0,25	0,03	0,10
42200	A-S7G06	6,5 à 7,5	0,19	0,05	0,10	0,45 à 0,70			0,07			0,08 à 0,25	0,03	0,10
43300	A-S10G	9,0 à 10,0	0,19	0,05	0,10	0,25 à 0,45			0,07			0,15	0,03	0,10
45000	A-S5U3	5,0 à 7,0	1,0	3,0 à 5,0	0,20 à 0,65	0,55	0,15	0,45	2,0	0,30	0,15	0,25	0,05	0,35
45100	A-S5U3G	4,5 à 6,0	0,60	2,6 à 3,6	0,55	0,15 à 0,45		0,10	0,20	0,10	0,05	0,25	0,05	0,15
46300	A-S7U3G	6,5 à 8,0	0,8	3,0 à 4,0	0,20 à 0,65	0,30 à 0,60		0,30	0,65	0,15	0,10	0,25	0,05	0,25
46000	A-S9U3	8,0 à 11,0	1,3	2,0 à 4,0	0,55	0,05 à 0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25	0,05	0,25
47000	A-S12U	10,5 à 13,5	0,8	1,0	0,05 à 0,55	0,35	0,10	0,30 /	0,55	0,20	0,10	0,20	0,05	0,25
48000	A-S12UNG	10,5 à 13,5	0,7	0,8 à 1,5	0,35	0,8 à 1,5		0,7 à 1,3	0,35			0,25	0,05	0,25
21000	A-U5GT	0,20	0,35	4,2 à 5,0	0,10	0,15 à 0,35		0,05	0,10	0,05	0,05	0,15 à 0,30	0,03	0,10
71000	A-Z5G	0,30	0,80	0,15 à 0,35	0,40	0,40 à 0,70	0,15 à 0,60	0,05	4,50 à 6,0	0,05	0,05	0,10 à 0,25	0,05	0,15
51100	A-G3T	0,55	0,55	0,05	0,45	2,5 à 3,5			0,10			0,20	0,05	0,10
51300	A-G6	0,55	0,55	0,10	0,45	4,5 à 6,5			0,10			0,20	0,05	0,15
51200	A-G10S	2,5	1,0	0,10	0,55	8,0 à 10,5		0,10	0,25	0,10	0,10	0,20	0,05	0,15

Tableau I.1.4 : Compositions normalisées sur pièces selon norme NF EN 1706(en % pondéral).

Quand une seule valeur est indiquée, elle correspond à un max autorisé.

Alliage	Aptitude Au Moulage En général	Stabilité Dimensionnelle	Comportement à l'atmosphère		Aptitude à l'anodisation		Aptitude au soudage à l'arc
			Général	marine	Production	Décoration	
42100	B	B	B	B	A	E	B
42200	B	B	B	B	A	E	B
43300	B	B	B	B	A	E	B
44100	A	A	B	B	A	E	A

Tableau I.1.5 : Aptitudes technologiques et d'usage des alliages d'aluminium moulés. Code A=excellent, B=bon, C=moyen, D=médiocre, E=impropre.

c- Alliages Al-Si

Les alliages au silicium sont les plus nombreux parmi ceux du moulage, ils existent plusieurs variantes environ 70% du tonnage des pièces moulées.

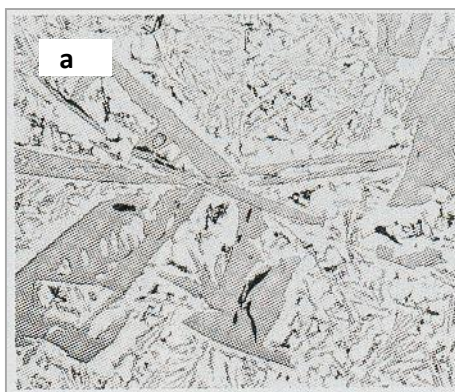
Ils peuvent être coulés soit en sable ou en coquille, ou bien sous pression, leurs caractéristiques mécaniques dépendent de leurs compositions et du mode de coulée.

Leurs domaines d'applications sont très nombreux (automobile, aéronautique industrie et le domaine maritime...).

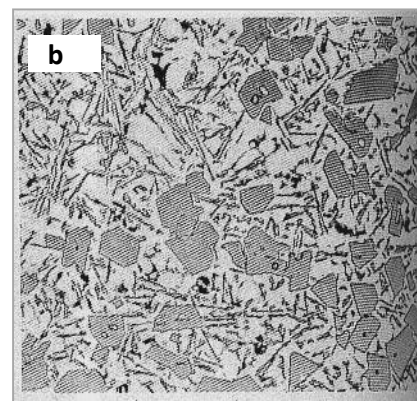
Ces alliages au magnésium, au zinc ont une excellente résistance à la corrosion à l'opposé des alliages contenant de fortes additions de cuivre (au moins 2 à 3%) qui ont une mauvaise résistance à la corrosion.

Les caractéristiques mécaniques de ces alliages dépendent de leur composition chimique, ainsi que du mode d'élaboration et des traitements thermiques effectués.

La figure ci-dessous nous montre la microstructure de l'eutectique Al-Si avant et après modification. [3]



a- avant modification,



b- après modification

Fig.I.1.1 : Microstructures de l'eutectique Al-Si.

Quelques alliages d'aluminium-silicium

- **AlSi7Mg et ses variantes (AlSi7, 3Mg et AlSi7, 6Mg)** : Peut être traité thermiquement, a de bonnes propriétés de moulage au sable et de moulage sous pression, une bonne capacité de soudage, une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne résistance à la corrosion. Dans la plupart des pays industrialisés ces alliages dominent les alliages coulés dans les secteurs suivants : Automobile (roues, bras de suspension, poutres, pivots, étriers, blocs-cylindres, etc.), aéronautique (carters, boîtes de vitesses, prises d'air mobiles) etc.) et armement.
- **AlSi7Mg** : Il peut également être moulé sous pression et utilisé pour plusieurs pièces mécaniques. Cependant, il est souvent remplacé par l'alliage AlSi7Mg.
- **Al Si 13 (ALPAX)** : C'est le plus ancien et il est encore largement utilisé dans la fabrication d'appareils électroménagers, de construction et de machines en raison de son excellente formabilité et de sa bonne résistance à la corrosion.

La structure et les propriétés des alliages Al-Si sont fortement influencées par les éléments ajoutés suivants :

- **Sodium :**

Empêche la formation de cristaux primaires de silicium et modifie la structure eutectique. Le silicium dans la composition eutectique a généralement une morphologie en aiguille, mais l'ajout de sodium lors de la coulée peut modifier cette morphologie (Fig. I.1.2) : le silicium devient sphérique.



Fig.I.1.2 : Microstructure de l'hyper eutectique Al-Si après modification.

- **Phosphore :**

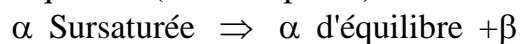
Contrairement au sodium, ce composé agit comme un germe pour les cristaux primaires de silicium.

- **Magnésium :**
(0,3 à 1%) il permet d'améliorer considérablement leurs propriétés mécaniques. Les alliages Al-Si-Mg sont durcis sables par précipitation contrôlée de composé Mg_2Si .
- **Cuivre :**
(3-5%) Améliore les propriétés mécaniques des alliages Al-Si. L'ajout de magnésium améliore la réactivité au traitement thermique. Un alliage Al-Si-Cu ayant une composition Si proche de la composition eutectique présente une excellente résistance thermique et un faible coefficient de dilatation. [3]

d- Précipitation

Il est connu que la solubilité limite est connue pour diminuer avec la température. Par conséquent, un alliage dont l'état d'équilibre correspond à un système monophasique (phase α) à une température donnée peut devenir diphasique à des températures plus basses. Ce processus correspond à une transition à l'état solide avec un nombre de phases croissant, appelée précipitation. En d'autres termes : La précipitation est la formation d'une nouvelle phase à partir d'une solution solide qui est sursaturée (sursaturée) avec un soluté après une diminution de la température.

La phase α sursaturée aux basses températures est homogène mais instable du point de vue thermodynamique. Elle donne naissance après un temps de vieillissement à deux (02) phases d'équilibre : la solution solide sursaturée d'équilibre (α d'équilibre) et la phase d'équilibre (seconde phase) selon la réaction suivante:



Ce retour à l'équilibre peut s'effectuer de deux façons :

- Précipitation continue ;
- Précipitation discontinue ou cellulaire.

Dans tous les deux cas, la précipitation comporte deux (02) étapes successives

- La germination des particules de précipité β de taille, de forme, de composition et de structure différente de celle de la phase initiale α -matrice.
- La croissance de ces particules.

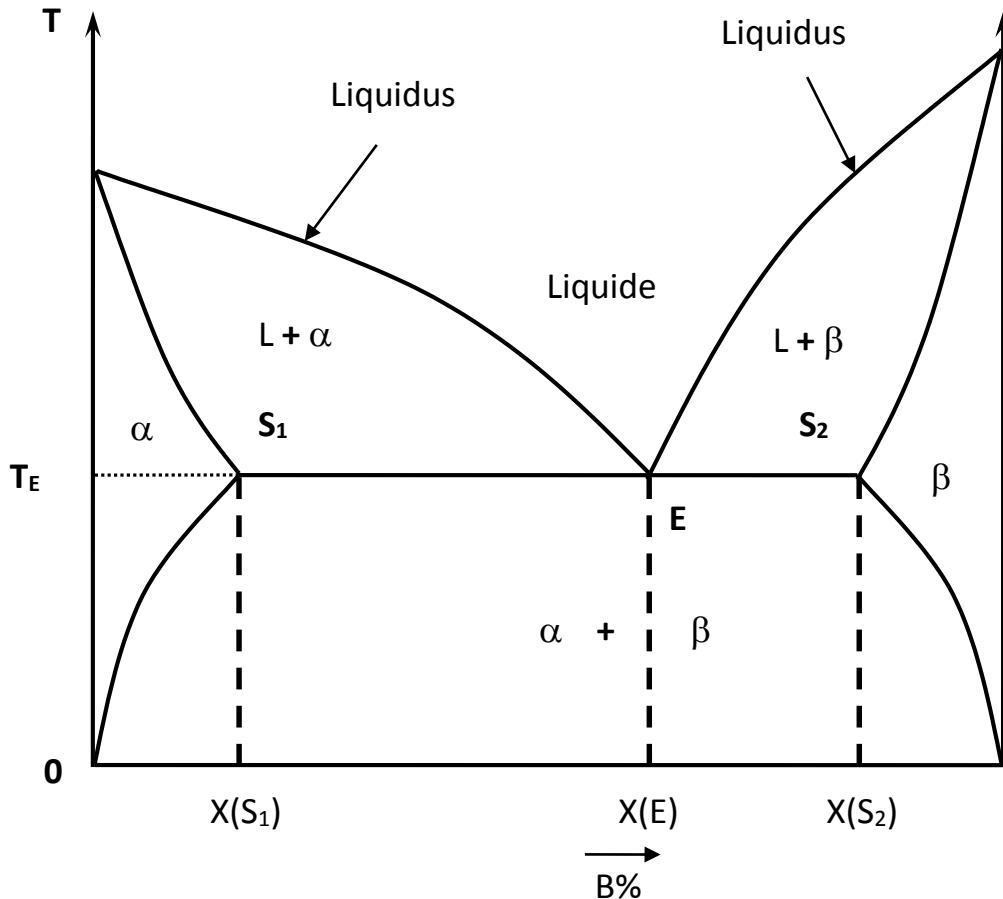


Fig.I.1.3 : Diagramme de phases d'une transformation eutectique.

Alliages ou $X(S_1) = X(E)$:

L'alliage le plus usité, contient 10 à 13 % Si ; il a une très bonne tenue à la corrosion. Sa structure comporte l'eutectique E ($\alpha + \beta$) et, souvent des cristaux primaires de silicium. Pour toute température supérieure à T_E l'alliage est entièrement à l'état liquide.

Sa solidification se produit à la température T_E où la structure se différencie selon la forme que prend le silicium :

a- Eutectique aciculaire :

Le silicium existe en flocons épais et orientés au hasard qui apparaissent sous forme d'aiguilles au microscope. La présence de traces de phosphore (10 à 15 ppm) favorise cette structure couramment obtenue avec les alliages industriels. Dans les alliages hyper eutectiques, le phosphore est utilisé comme agent de raffinage, de sorte que la structure eutectique sera aciculaire.

b- Eutectique lamellaire :

Le silicium est sous forme de lamelles. C'est la forme naturelle de l'eutectique lorsque l'alliage est exempt d'impuretés. Dans les alliages industriels cette structure est obtenue par affinage de l'eutectique par l'antimoine.

c- Eutectique fibreux ou modifié :

Le silicium se présente sous forme de fibres allongées. La structure eutectique est ensuite modifiée par ajout d'éléments modificateurs tels que le sodium ou le strontium. L'action de ces éléments est entravée par la présence de phosphore, il faut donc utiliser des alliages à faible teneur en phosphore pour obtenir une bonne structure modifiée. [4]

Alliages ou $X(E) < X < X(S_2)$: appelés aussi alliages hyper eutectiques. Leur étude est similaire à celle menée pour les alliages hypo eutectiques, la phase pro eutectique étant cette fois-ci β à la température T_E .

I.1.5 DIAGRAMME D'EQUILIBRE ALUMINIUM-SILICIUM (AL-SI)

Le diagramme d'équilibre Aluminium Silicium est simple, il montre la composition des phases et la structure de l'alliage selon la température et la concentration en silicium.

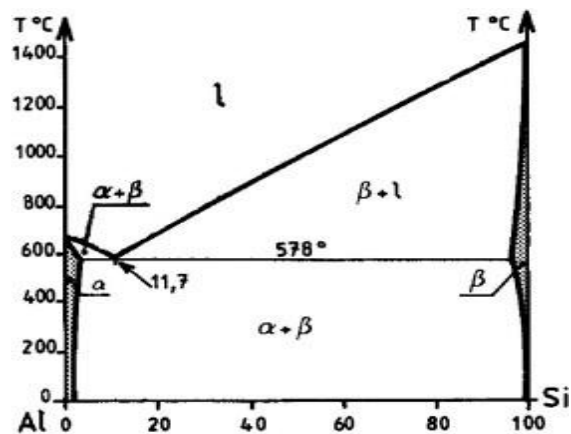


Fig.I.1.4 : Diagramme d'équilibre Al-Si.

On distingue sur ce diagramme :

- Solution alpha : Riche en aluminium, le maximum est de 1,65 % de silicium à 577°C .
- Eutectique (alpha+bêta) : Contient 11,7 % de silicium à 577°C .
- Hypo eutectiques : Constitués d'alpha et de l'eutectique (alpha+bêta).
- Hyper eutectiques : Constitués de bêta et de l'eutectique (alpha+bêta).
- Liquidus : Formé par deux branches de courbes CED.

- Solidus : Formé par la branche de courbe CA et le palier eutectique AEF.
- Solution bêta : Pauvre en aluminium, contient au maximum 97 % de silicium à 20°C.

Influence du silicium :

➤ Avantages

- Améliore la coulabilité.
- Diminue la criquabilité et les retassures.
- Abaisse le coefficient de dilatation.

➤ Inconvénients

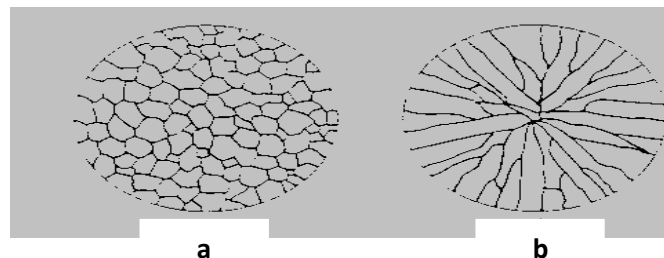
- La faible solubilité du silicium dans l'aluminium rend l'alliage difficilement usinable et fragile. [5]

I.1.6 - MOULAGE EN FONDERIE

La fonderie a pour but de produire des pièces moulées ayant leur forme définitive et leurs côtés exactes ou presque.

Parmi les différents moulages on a :

- **Moulage en sable** : le métal se solidifie dans une cavité limitée par du sable comprimé : les parties creuses étant obtenues en disposant des noyaux. Le refroidissement des pièces est très lent. La microstructure consiste en une zone de peau colonnaire et une zone équiaxe très développée (fig. I.1.5, a).
- **Moulage en coquille** : la coquille est un moule métallique ayant la forme exacte de la pièce à obtenir. Le refroidissement est rapide et la microstructure entièrement colonnaire (fig. I.1.5, b).
- **Moulages spéciaux**: de nouvelles techniques de moulage ont été mises au point, telle la coulée centrifuge pour l'obtention des tuyaux, et même pour la réalisation des pièces de forme complexe; tel est le moulage sous pression dans lequel le métal est injecté liquide ou pâteux, dans un moule métallique froid ou légèrement chauffé : cette technique permet l'obtention de petites pièces en série très importante ; elle se pratique surtout pour des alliages assez fusibles à base de plomb, de zinc, d'aluminium, d'étain, et même parfois pour les laitons. Ce moulage sous pression a été étendu à l'obtention de pièces en matière plastique. [5]



a- coulée en sable, b- coulée en coquille

Fig. I.1.5 : Coupe schématique d'une pièce

CHAPITRE I.2 - CARACTERISATION ET MODE D'ELABORATION DE L'ALLIAGE A-S12

I.2.1 - INTRODUCTION

L'alliage de fonderie A-S12 (Al-12% masse Si) de désignation numérique 47000. Il donne des résultats surs, reproductibles et conformes à la norme à condition que :

- La composition chimique de l'alliage reste dans les tolérances prévues par la norme EN1676(NF A57-130).
- L'emploi des flux soit observé conjointement aux règles générales de fusion.

L'AS12 présente deux qualités dominantes, qui sont :

- Une excellente coulabilité qui permet de l'employer pour des pièces minces ou ayant des formes compliquées ;
- Une bonne résistance aux agressions atmosphériques qui permet de l'employer longtemps à l'extérieur sans nuire à sa qualité.

Il est utilisé dans les domaines suivants :

- Pièces de carrosserie d'automobile.
- Pièces pour chemins de fer ;
- Pièces pour le bâtiment (fenêtres, dormants...)
- Moules et banches pour béton ;
- Carters, éléments de moteur ;
- Pièces pour l'industrie électrique (flasques et stators de moteur, serre barre, blocs de jonction, pinces de suspensions...)
- Pièces pour industrie chimique et alimentaire (plateau de filtre, accessoire de mélangeurs...)

I.2.2 - COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ALLIAGE AS12 :

I.2.2.1 - COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ALLIAGE AS12 DANS LA NORME NF A57-130 :

La désignation de l'alliage est représentée par la lettre A qui désigne l'aluminium suivi du principal métal d'addition et son pourcentage.

A	S	12
Aluminium	Silicium	12% de silicium

Sachant que la représentation symbolique des métaux est comme suivie :

A: Aluminium,
S: Silicium,
G: Magnesium,
U : Cuivre,
Z : Zinc.

Sa composition chimique correspondant aux tolérances de composition dans les pièces coulées au sable ou en coquille est résumée dans le tableau suivant :

Norme	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Ni%	Pb%	Sn%	Ti%	Autres
NF A57-130	10,5 à 13,5	0,7 (0,8)	0,9 (1,0)	0,05-0,55	0,35	0,10	0,3	0,2	0,1	0,15 (0,20)	0,25

Tableau I.2.1 : Composition chimique de L'A-S12 suivant la norme NF A57-130

I.2.2.2 - COMPOSITION DES LINGOTS AS12 LIVRES PAR L'ALUMINIUM FRANÇAIS

Le tableau ci-dessous présente de manière concise la composition chimique des lingots AS12, qui sont utilisés pour garantir facilement la composition requise dans les pièces.

Fe%	Si%	Cu%	Zn%	Mg%	Mn%	Ni%	Pb%	Sn%	Ti%	Co%
0,40 à 0,65	10,5 à 13,5	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,1

Tableau I.2.2 : Composition des lingots AS12 livrés par l'aluminium Français.

I.2.3 - INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION

- **Silicium**

Les propriétés de cet élément, qui a une teneur proche de l'eutectique Al-Si, sont les suivantes :

- Il présente une excellente fluidité lors de la coulée.
- Il n'y a pas de risque de fissuration.
- Son coefficient de dilatation est faible (20×10^{-6} entre 0 et 100°C).
- Il subit une faible contraction lors de la solidification (11%).
- Il offre une bonne résistance aux chocs.
- Il est bien adapté à l'étanchéité.
- Il présente une bonne aptitude à la soudabilité.
- Il résiste bien aux conditions atmosphériques. Cependant, cette teneur a tendance à provoquer des retassures internes dans les pièces moulées.

- **Fer**

La teneur en fer doit être inférieure à 0.75%, au-delà de ce pourcentage, il y aura formation d'un constituant lamellaire qui diminue considérablement les caractéristiques mécaniques dans l'alliage, en particulier l'allongement et la charge à la rupture. Par contre, une teneur en fer proche du maximum tend à diminuer les retassures internes (max 1,2%).

Précautions

- Éviter l'emploi de creusets en fonte ;
- Potier soigneusement tous les outils de fusion et de coulée (cuillères pour couler en coquille).

- **Cuivre, Nickel, Zinc**

Lorsque leurs teneurs dépassent les tolérances de la norme, on note une sensible baisse des allongements ainsi qu'une faible résistance à la corrosion causée principalement par le cuivre.

- **Manganèse et cobalt**

Aux teneurs indiquées par la norme, ces éléments n'ont pas d'influence sur les caractéristiques mécaniques ; ils peuvent retarder l'apparition du constituant fragile Al-Si-Fe d'un AS12 riche en fer ou susceptible de s'enrichir en fer. Ces teneurs admettent le mélange accidentel de jets d'AS10G ou d'AS9KG, avec le risque que comporte l'apport par ces jets de magnésium.

- **Magnésium**

Au-delà du maximum de la norme (0,10%) les allongements diminuent rapidement.

- **Titane**

Une teneur en titane proche de 0,10% provoque un affinage du grain de l'alliage d'où une légère amélioration des allongements et une atténuation des effets néfastes provoqués par un gazage anormal du métal. Au-dessus de 0,10% en cet élément, les caractéristiques mécaniques diminuent très rapidement et ce, d'autant plus que la teneur en fer est plus élevée.

- **Cobalt**

Comme le manganèse, il combat l'action néfaste du fer ; dans l'AS12, il est considéré comme une impureté mais non nuisible à l'alliage jusqu'à une teneur maxi de 0,20%.

I.2.4 - LA FUSION

Il est recommandé d'adopter la même proportion de jets dans toutes les charges. [6]

I.2.4.1 - REGLES DE FUSION

a. Température

Le maintien prolongé à l'état liquide et la surchauffe favorisent l'oxydation et l'absorption de gaz : ils tendent à donner à l'alliage un grain grossier, il faut donc :

- Fondre en un temps minimum ;
- Contrôler la température à l'aide d'un pyromètre régulièrement étalonné.

b. Gaz et oxydation

Gaz et oxydes sont cause de défauts altérant la santé des pièces, il faut donc :

- Eviter toutes traces d'humidité ;
- Utiliser des lingots ou des déchets propres ;
- Décrasser seulement quand cela est nécessaire ;
- Réduire au maximum la hauteur de la chute du métal lors de tous transvasements.

c. Fer

- Utiliser des flux absolument secs ;
- Utiliser des flux appropriés à l'alliage considéré.

d. Flux

- Utiliser des flux absolument secs ;
- Utiliser les flux appropriés à l'alliage considéré pour une opération déterminée suivant un processus déterminé.

I.2.5 - L'AFFINAGE

- C'est l'affinage qui confère à l'alliage toutes ses propriétés ; il sera donc fait dans des conditions précises : de température, de temps et de proportion des produits affinant.
- Le métal affiné doit être coulé dans un temps strictement limité, sinon l'effet de l'affinage disparaît.
- Les transvasements de métal affiné détruisent partiellement l'effet de l'affinage.

Les produits employés pour cet affinage sont :

- Le sodium métallique ;
- Les mélanges de sels de sodium sous forme de poudres.

I.2.5.1 - PROCEDES D'AFFINAGE DANS LE CAS DE LA COULEE EN SABLE

On décrit ici trois procédés qui s'appliquent uniquement à l'AS12, le premier procédé est le plus adapté vu qu'il est pratique et sûr.

a. Double affinage

- Dans le four de fusion, une fois le métal complètement fondu (vers 650°C), décrasser le bain et le recouvrir avec 0.6% (du poids total de la charge) de poudre de PACZ DK.

- Une fois le métal est sorti du four soit par la sortie du creuset du four (cas du creuset amovible) ou par transvasement du métal dans un creuset chauffé au rouge (car d'un four de fusion basculant), dans ce dernier cas, il est utile avant transvasement d'enfoncer plusieurs fois la couche de poudre au fond du métal au moyen d'une cloche à trous.
- On introduit dans le métal sorti du four le sodium entre 740 et 780°C. Le poids du sodium est entre 0.06 et 0.07% du poids total du métal fondu.
- Attendre cinq minutes au minimum.
- Couler généralement entre 700 et 730°C. Le temps entre l'introduction du sodium et la coulée ne doit pas dépasser dix à douze minutes (cette règle est impérative).

b. Affinage au sodium (sans poudre de PACZ)

Ce procédé ne diffère du précédent affinage que par la suppression de poudre de PACZ, l'introduction du sodium restant la même. Ce procédé est moins sûr que le précédent et présente plus de dangers de piqûres.

1. Affinage à la poudre PACZ DK

- Protéger le métal, une fois fondu, par un peu de poudre PACZ DK (0,2 à 0,5%) ;
- Suivant la température de coulée des pièces, la température du métal sera portée à 780 et 820°C ;
- Sortir le métal du four et décrasser ;
- Répandre sur la surface du bain 1 à 2% du poids total du métal de poudre PACZ DK afin de retarder le refroidissement du creuset.
- Laisser la poudre en contact avec le métal pendant 10 à 15 minutes, puis enfoncer légèrement en surface, au moyen d'un écremoir potier et chaud ;
- Décrasser soigneusement ; détacher les croûtes de flux qui adhèrent aux parois du creuset.

I.2.5.2 - CONTROLE DE L'AFFINAGE

Le contrôle est fait rapidement et simplement ; il suffit de couler un barreau éprouvette en sable, et faire un examen du métal lors du refroidissement et la cassure de l'éprouvette nous renseigne sur l'efficacité de l'affinage.

- **Un alliage AlSi12 bien affiné présente**
 - Une peau d'oxyde épaisse ;
 - Une surface liquide bleutée après décrassage ;
 - Une cassure soyeuse, mate à grain très fin ;
 - Le barreau supporte une déformation importante par choc.
- **Un alliage AlSi12 moins affiné présente**
 - Une peau d'oxyde peu épaisse ;
 - Une surface liquide faiblement bleutée ;
 - Une cassure brillante à grains grossiers ;
 - Des difficultés d'usinage.

- **Un alliage AlSi12 sur affiné présente**
 - Une peau d'oxyde très épaisse ;
 - Une cassure présentant des piqûres.

I.2.5.2 - PROCEDES D’AFFINAGE DANS LE CAS DE LA COULEE EN COUILLE :

1^{er} Procédé

Dans le four de maintien on répand sur le métal, après écrémage, 0,5 à 1% de poudre PACZ DK ou BTK ; au bout de quelques minutes on écarte le flux pour puiser avec la cuillère de coulée ; on renouvelle l’affinage toutes les 30 à 45mn.

2^{eme} Procédé

Dans le four de maintien on garde la masse en fusion sous une couche de poudre PACZ DK ou BTK. Toutes les demi-heures environ, la couche est enlevée et remplacée, les quantités de poudre utilisées à la première introduction (0,2 à 0,4%) ; à chacune des suivantes (0,1 à 0,2%)

3^{eme} Procédé

On introduit, toutes les trente minutes environ, 0,01 à 0,02% de sodium (ces doses sont doublées pour la première introduction).

I.2.6 - DEGAZAGE

Si l'AlSi12CuMg est affiné avec de la poudre PACZ, et si le bain est déjà recouvert d'une petite quantité de poudre PACZ à la fin de la fusion, il n'est pas nécessaire d'utiliser un flux de dégazage.

Cependant, si un traitement auxiliaire est nécessaire, il est effectué avant l'affinage.

En revanche, le dégazage des fondants chlorés risque de réduire l'effet des sels d'affinage, auquel cas il faut immobiliser le métal avant affinage pendant 20 à 30 minutes.

I.2.7 - LE MOULAGE

Le moulage a pour but de produire des pièces ayant leurs formes définitives et leurs côtes presque exactes après démoulage, il est employé pour réaliser des pièces à géométries complexes qu'on ne peut pas réaliser par usinage. Parmi les nombreux procédés de moulage on trouve :

I.2.7.1 - MOULAGE EN SABLE

C'est le plus ancien procédé de moulage ; il est souple dans son application et permet de réaliser diverses pièces et de toutes dimensions, à l'unité ou en série.

Le moulage en sable consiste à couler le métal dans l'empreinte du moule en sable, réalisé d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Un moule simple comporte deux parties, partie supérieure et partie inférieure.

Les alliages d'aluminium solidifiés dans un moule en sable présentent une structure grossière qui altère leurs caractéristiques mécaniques (brut de coulé).

Le métal se solidifie dans une cavité limitée par du sable comprimé, les parties creuses étant obtenues en disposant des noyaux le refroidissement des pièces est très lent. La microstructure consiste en une zone de peau colonnaire et une zone très développée (fig.I.2.1. a) .

I.2.7.2 - MOULAGE EN COQUILLE

La coquille est un moule métallique ayant la forme exacte de la pièce à réaliser. Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, ces dernières sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation.

Les opérations à effectuer pour chaque coulée sont :

- Préparation des chapes (peinture spéciale et chauffage).
- Fermeture du moule et mise en place de la broche.
- Coulée du métal.
- Quand le métal est solidifié, extraction de la broche et ouverture du moule.
- Démoulage de la pièce.

Le moulage en coquille représente quelques avantages qui sont :

- Précision dimensionnelle.
- Bon état de surface.
- Réduction des surépaisseurs d'usinage.
- Rendement assez élevé.
- Réduction du rebut.
- Texture plus fine et caractéristiques mécaniques élevées.
- Le refroidissement des pièces est rapide et la microstructure est entièrement colonnaire (fig.I.2.1. b).

En théorie, tous les alliages d'aluminium peuvent être coulés, mais en pratique, les alliages d'aluminium à haute propriété de fissuration et à faible coulabilité sont difficiles à obtenir, comme certains alliages Al-Cu, Al-Zn et Al-Mg. [7]

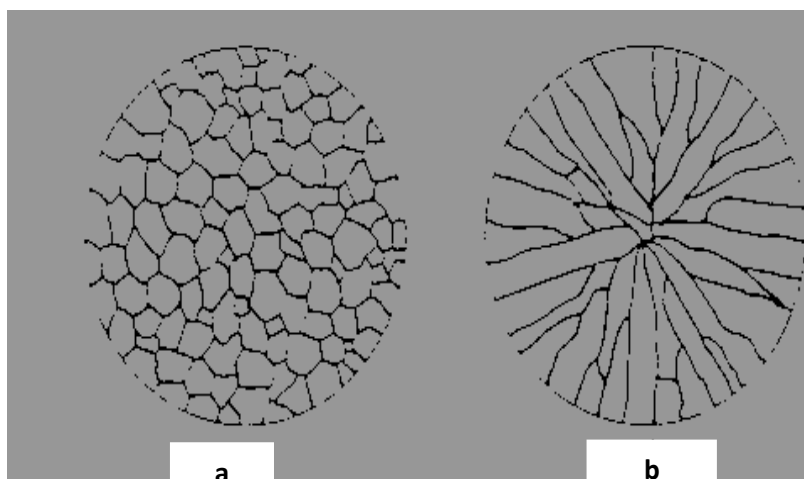


Fig. I.2.1 : Coupes schématiques d'une pièce

a- coulée en sable

b- coulée en coquille.

I.2.7.3 - COULEE CENTRIFUGE

Pour la fabrication de tuyaux ou de pièces de formes de révolution complexes.

I.2.7.4 - MOULAGE AU PLATRE

Utilisé pour des matériaux assez légers, notamment les céramiques.

I.2.7.5 - MOULAGE SOUS PRESSION (jusqu'à 1500 bars)

Par injection de métal liquide ou pâteux dans un moule métallique froid ou légèrement chauffé. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de petites pièces en grandes série. Elle est également utilisée pour produire de grosses plaques d'acier, la pression de gaz servant à refouler l'acier liquide dans le moule.

I.2.7.6 - MOULAGE-FORGEAGE

En appliquant une pression sur le liquide en cours de solidification à l'aide d'un piston ou d'un poinçon. Cette méthode a pour avantage l'absence de porosité, coulage de métaux peu fluides, fabrication de matériaux composites par imprégnation d'une préforme.

I.2.7.7 - MOULAGE A LA CIRE PERDUE

C'est un procédé connu depuis longtemps. Un modèle de la pièce réalisé en cire. Ce modèle ou, pour de petites pièces une grappe de modèles assemblés, est recouvert de plusieurs couches de réfractaire qui par cuisson forment un moule solide. La cire est évacuée par fusion et le métal coulé. Ce procédé permet une grande précision dimensionnelle. Il est notamment utilisé pour la fabrication des aubes de turbine des moteurs d'avion en superalliages à base de nickel et pour les prothèses dentaires. Il permet, grâce à un contrôle thermique adéquat d'obtenir une microstructure équiaxe ou colonnaire ou monocristalline. [7]

CHAPITRE I.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES ET MICROSTRUCTURE

I.3.1 - LES FOURS

I.3.1.1 - LES FOURS DE FUSION

I.3.1.1.1 - LE FOUR A CREUSET

Il est constitué d'une coque en tôle doublée de matériau réfractaire. Le métal fondu est contenu dans un récipient, qui est le creuset. Ce dernier est reçu par la partie centrale et posé sur un support réfractaire appelé fromage, le chauffage du four est assuré par un ou deux brûleurs à gaz à sa base, lors de la vidange le four est incliné pour assurer le fonctionnement. La capacité du four est exprimée en "minutes", une telle minute équivaut à un kilogramme de bronze en fusion. Étant donné que le bronze est un alliage de cuivre et d'étain, sa densité est de 8,2 kg/dm³, tandis que la densité de l'aluminium est de 2,7 kg/m³, son poids est donc trois fois celui du bronze et son volume est trois fois celui du même poids... On peut donc estimer qu'un creuset de capacité 100 points contient 1000 kg de bronze fondu et donc 330 kg d'aluminium.

a. Le creuset

C'est un récipient réfractaire utilisé pour la fusion des métaux. Il est généralement composé de graphite (35% de carbone) et de carbure de silicium (12%) mélangés à un liant argileux réfractaire. Du fait de sa fragilité lors des opérations de manutention, de stockage et d'installation du four, des précautions d'emploi sont nécessaires.

b. Le four à sole

Sont le plus souvent basculants. On distingue dans cette catégorie :

- Les fours électriques à résistance fixée sous la voûte, de capacité généralement supérieure à 500 Kg.
- Les fours à flammes directes, au fuel ou gaz qui ont un très bon rendement mais risquent davantage de gazer le métal. Ils augmentent aussi les pertes au feu.

c. Les fours à induction

Ils ont des rendements élevés mais ne conviennent qu'à un fonctionnement continu pour la production en série d'un alliage donné. Leurs installations sont assez chères. Une surveillance spéciale des turbulences est nécessaire pour éviter l'oxydation. Le métal obtenu était non gazé et de bonne qualité.

I.3.1.1.2 - FOURS DE MAINTIEN

Il est semblable au four de fusion, sauf qu'il est fixe. L'opération de chauffage est généralement assurée par un courant électrique. Ce four est utilisé pour stocker, et maintenir le métal liquide en température. Lors de prélèvement de métal fondu dans le creuset, on utilise des louches.

I.3.2 - TRAITEMENTS THERMIQUES

I.3.2.1 - IMPORTANCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES POUR L'ALUMINIUM

L'aluminium et un alliage d'aluminium couvrent un modèle étendu de caractéristique mécaniques, puisqu'en trouve à chaque extrémité de ce domaine :

- D'une part l'aluminium raffiné à l'étal recuit avec une résistance à la rupture de l'ordre de 50Mpa
- D'une part les alliages à haute résistance à la rupture de type AL (Zn – Mg – Si – Cu) fortement chargés en éléments d'addition et capables à l'état trempé revenu, d'une résistance à la rupture de 65 à 750Mpa

Une telle gamme d caractéristiques mécanique est obtenue non seulement en agissent sur la composition des alliages, mais aussi en effectuent des traitements thermiques qui permettent soit :

- Une diminution de la résistance mécanique, accompagnée d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (adoucissement).
- Une augmentation de la résistance mécanique (durcissement). [8]

I.3.2.2 - PRINCIPAUX TYPES DE TRAITEMENTS THERMIQUES

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

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliqués sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissements 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 /et un revenu produisant le durcissement.

I.3.2.2.1 - TRAITEMENT D'HOMOGENEISATION

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés, et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Il consiste en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450⁰ C à 610⁰C, qui ont pour principal but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide. [9]

I.3.2.2.2 - TRAITEMENT D'ADOUCCISEMENT

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 de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300⁰ C pendant 1 à 8 heures ;
- Le traitement de recristallisation qui consiste à un chauffage entre 300 et 400⁰ C avec un temps de maintien d'une 0,5 à 3 heures

➤ Dans la trempe structurale le traitement est un recuit de précipitation
En ne peut pas durcir A-S12 (47000). [9]

I.3.2.2.3 - TRAITEMENT DE TREMPE STRUCTURAL

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 d'un revenu produisant un durcissement. [10]

A. Mise En Solution

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 en 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 (corroyage, refroidissement de pièces moulées).

B. Trempe

Opération de refroidissement effectuée de façon telle que la solution solide obtenue à chaud à température appropriée, soit maintenue en état de sursaturation.

- **Etat de trempe fraîche**

État de l'alliage correspondant à la période de temps suivant immédiatement la trempe et pendant lequel les caractéristiques mécaniques n'ont pas sensiblement augmenté par durcissement structural.

La durée de cette période dépend essentiellement du milieu ambiant. Dans cet état, les produits présentent généralement une plus ou moins grande aptitude à la déformation.

- **Maturation**

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).

Pour certains alliages, cette évolution est le moyen normal d'obtention du durcissement structural.

Dans quelques cas, la température de maturation peut être légèrement supérieure à la température ordinaire afin d'accélérer l'évolution.

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

C. REVENU

Le durcissement peut être augmenté par un traitement à une température supérieure à l'ambiante : c'est le traitement de revenu ou vieillissement artificiel qui confère une microstructure différente de celle de la maturation et conduit à des caractéristiques supérieures.

Evolution de la solution solide sursaturée provoquée par maintien à une température appropriée, en vue d'obtenir le durcissement structural.

Les propriétés finales dépendant de la température et la durée du maintien à cette température (dans certains cas, la vitesse de montée en température joue également un rôle).

Le revenu permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté et les contraintes thermiques interne obtenues lors de la trempe.

I.3.2.2.4-CONDITIONS DES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES 40 000

Alliages	Etats	Mise en solution C°	Trempe	Maturation	Revenu
42 000		540°±5/10h	Eau froide	/	160°/4h
42 100	ST6	540°±5/10h	Eau froide	/	160°/4h-6h
42 100	KT6	540°±5/10h	Eau froide	/	160°/4h-6h
42 200	ST6	540°±5/10h	Eau froide	/	160°/6h
42 200	KT6	540°±5/10h	Eau froide	/	160°/6h
43 300		540°±5/10h	Eau froide	/	160°/6h
41 000	ST6	540°±5/4h	Eau froide	/	160°/6h
41 000	KT6	540°±5	Eau froide	/	160°/6h
48 000	KT6	505°±5	Eau chaude	/	210°/8h

Tableaux I.3.1 : conditions des traitements thermiques. [11]

I.3.2.3 - CONSIGNES DE TRAITEMENTS DES ALLIAGES

I.3.2.3.1 - ALLIAGES ALUMINIUM – CUIVRE

Les alliages de fonderie (A-U4NT ; A-U45 GT) et de forage (A- U4G ; A-U4Pb...) se trempent suivant la nuance entre 480 et 510°C, à l'eau froide. Le revenu vers 150-175° s'applique aux alliages de fonderie, quant aux alliages de forge on peut les faire revenir ou vieillir.

I.3.2.3.2 - ALLIAGES ALUMINIUM – SILICIUM

Alliages de fonderie à 10% de Si maximum se trempent à l'eau froide à 450°C suivi d'un revenu à 160°C. Les alliages hyper slicés pour piston en particulier se stabilisent uniquement vers 200°C pendant 8 heures ou 320°C pendant 4 heures.

I.3.2.3.3 - ALLIAGES ALUMINIUM – MAGNESIUM

Seuls les alliages de forges se font recuire ceci n'exclut pas la possibilité d'une stabilisation à basse température si c'est nécessaire.

I.3.2.3.4 - ALLIAGES ALUMINIUM – ZINC

Les alliages de forge se trempent à 400-470°C suivant nuance et subissent un revenu à 130-140°C ou une maturation pourront atteindre 45 jours pour l'A-ZUG. [12]



Fig. I.3.1 : Aluminium après traitement thermique

I.3.3 - LA MICROSTRUCTURE

Les propriétés mécaniques dépendent dans une très large mesure de la constitution du matériau, c'est-à-dire seulement de sa composition chimique, mais aussi de l'organisation des diverses phases présentes (leurs tailles et leur forme) donc de sa microstructure. Pour bien comprendre les comportements des matériaux en service et pour contrôler leurs propriétés, il est nécessaire de décrire et de quantifier leur microstructure.

Plusieurs types d'instruments (microscopie optique, microscopie électronique à transmission et à balayage) permettent d'étudier la microstructure des matériaux ; chacun à un domaine d'application particulier selon le grossissement qu'il permet d'atteindre et selon le genre d'observation que l'on cherche à faire.

La figure (I.3.2) montre ces différentes méthodes d'observation suivant l'échelle de pouvoir de résolution et de grossissement. [13]

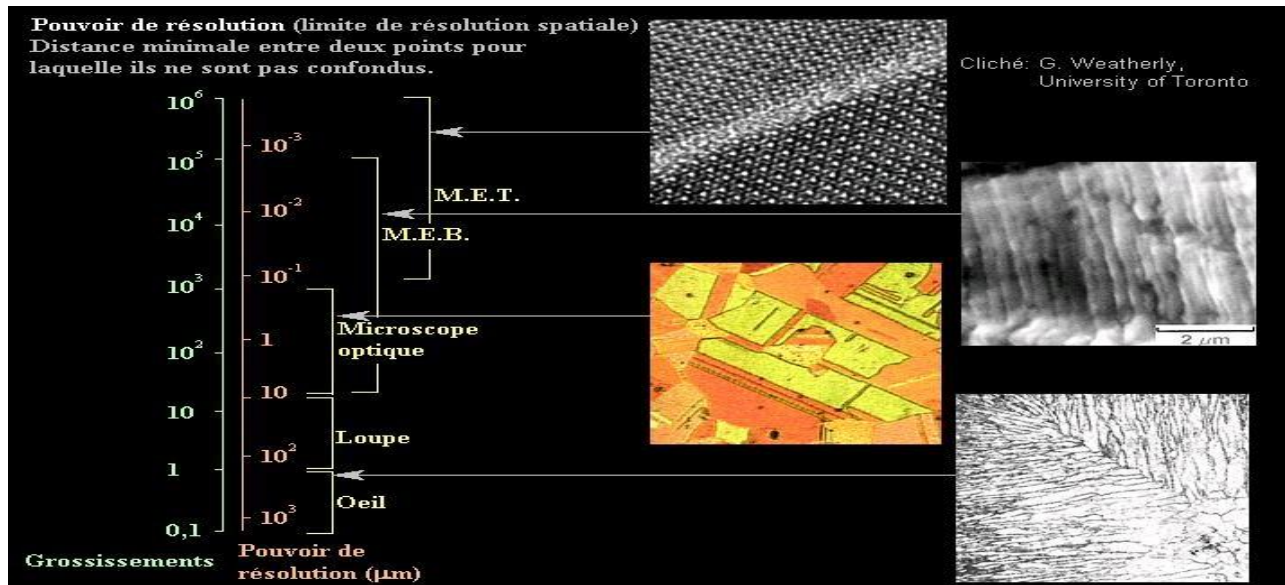


Fig. I.3.2 : Classement des méthodes d'observation sur l'échelle de pouvoir de résolution.

I.3.3.1 - MACROSTRUCTURE

On appelle macrostructure visible à l'œil nu (avec un grossissement ne dépassant pas 30-40 fois) que l'on distingue après une attaque de mise en évidence des grains.

La macrostructure peut être établie :

- D'après les cassures et coupes macrographique spécialement établies.
- D'après des coupes spéciales, c'est-à-dire des plaquettes prélevés sur de grosses ébauches (lingots, pièces de forage, etc.) ou sur des pièces dont la surface est rectifiée pour être soumise ensuite à l'attaque par un réactif approprié. [13]

I.3.3.2 - OBJECTIFS DE LA MACROSTRUCTURE

- ❖ Décrire les principales méthodes de microscopie optique (lumières visible) et électronique.
- ❖ Donner un aperçu des méthodes de préparation utilisées pour étudier les microstructures des matériaux et de leurs alliages en microscopie optique.
- ❖ Caractériser les microstructures des principaux matériaux et explique leurs formations en fonction des diagrammes d'équilibre et des cinétiques de transformation de phase.

Il est important de mettre en relation les mécanismes de transformation de phases des matériaux avec les diverses microstructures qui se forment, car ce sont celles-ci qui déterminent dans une large mesure les propriétés mécanique, physique et chimiques des matériaux. On rencontre, dans les matériaux, un grand nombre de microstructure, diverses : grains cristallins ou phase comportant souvent des précipités d'une ou plusieurs phases dispersées, sphérolithes, structures eutectiques lamellaires ou fibreuses, etc. [13]

I.3.3.3 - MICROSTRUCTURE

La microstructure décrit l'ensemble des grains ou des particules de taille microscopique, qui caractérise la structure d'un grand nombre de matériaux. La microstructure d'un matériau est donc formée par l'ensemble des grains, des particules ou des défauts observables par microscopie (optique et électronique).

Pour comprendre le comportement des matériaux, il faut établir la liaison entre des phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique et su microscopique et les propriétés du matériau. Cette liaison met en relation des phénomènes qui se déroulent à des échelles faisant intervenir neuf (09) ordres de grandeur du nanomètre.

Plusieurs étapes de grossissement sont donc nécessaires, pour passer de l'échelle de l'aube d'une turbine à gaz 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 μ m), le microscope électrique (observation de 100 μ m au nm) et la diffraction des rayons X pour l'analyse de l'arrangement à l'échelle atomique (observation à l'échelle du nm).

Les éléments de la microstructure d'un matériau sont en général définis par plusieurs paramètres : composition arrangement atomique, quantité relative, morphologie, taille. [13]

I.3.3.4 - EXAMEN DE MICROSTRUCTURE

Pour étudier la microstructure, on attaque le métal préalablement poli à l'aide d'un réactif approprié. On l'observe ensuite au microscope métallographique sous grossissement de 50 à 1000 fois, ou après une préparation spéciale, au microscope électrique sous un grossissement allant jusqu'à 150 000 fois. [14]

I.3.3.5 - 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 forme 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. [14]

A. Observation Par Microscope Optique

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

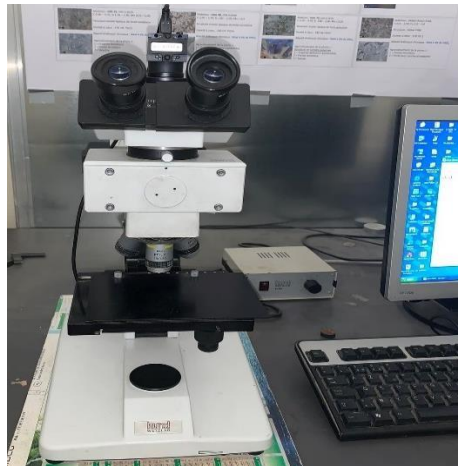


Fig. I.3.3. Microscope optique

B. Observation Par Microscope Electronique

Le microscope électronique permet d'étudier en détail la structure fine du métal. L'une des plus grandes réalisations dans ce domaine est l'observation directe des défauts de structure cristalline.

❖ Microscope Electronique à Balayage

Il est utilisé pour une observation plus fine des états de surface ainsi que des dépôts grossiers présents dans divers matériaux.

Le principe de l'imagerie SEM est d'utiliser les électrons secondaires émis par le matériau sous l'action du faisceau principal pour synthétiser l'image de surface. L'énergie de ces électrons dépend directement de l'énergie des électrons primaires et du numéro atomique de l'élément avec lequel le faisceau d'électrons primaires interagit. [14]



Fig.I.3.4 : Microscope électronique à balayage

❖ Microscope électronique de transmission

Il est utilisé pour observer la microstructure des matériaux dans les moindres détails. Le principe est de tirer parti des propriétés observées des électrons traversant la lame échantillon.



Fig.I.3.5 : Microscope électronique à transmission

❖ **Microscope ionique à émission de champ**

Permet de prendre la relève du microscope électronique de transmission en visualisant à l'échelle atomique les sites cristallographiques et les défauts de structure. [14]

I.3.3.6 - PARAMETRES MICROSTRUCTURAUX

A. Grains Et Joints De Grains

Un métal est formé d'une multitude de petits volumes polyédrique appelés grains. Les régions ou les grains se touchent sont appelées joints de grains. Chaque grain est en fait un monocristal, c'est-à-dire un empilement régulier d'ions métalliques dont la cohésion est assurée par un gaz d'électrons.

L'orientation du réseau cristallin propre à chaque grain est différente et le matériau est dit poly cristallin. Dans le cas très particulier où le matériau n'est constitué que d'un seul grain, il est monocristallin. Dans le cas les plus simples (matériaux purs, solutions solides), tous les cristaux ont une structure et une composition identique : le matériau est monophasé. Mais en général le matériau est polyphasé.

Dans la plupart des cas, les grains ont la forme de polyèdres à facettes multiples et la structure du joint dépend de l'orientation des faces de ces polyèdres, les unes par rapport aux autres. Les joints de grains des matériaux métalliques sont plus facilement attaqués par des acides que le cristal, ce qui les rend visibles au microscope optique. [8]

Il existe trois types principaux de joints de grains :

- **Joint cohérent :**
Lorsque chaque cristallite reste parfaite jusqu'à l'interface.
- **Joint semi –cohérent :**
Lorsqu'il existe entre deux empilements parfaits une zone de transition bien ordonnée.

- **Joint désordonné :**

Lorsqu'il existe entre deux empilements parfaits, une zone neutre non donnée.

B. La phase

Une phase est une partie du système dans laquelle la composition (nature et concentration des constituants présents) et l'organisation atomique (structure cristalline ou amorphe) sont fixées.

Dans un système en équilibre, chaque phase a une composition fixée qui est homogène dans toute son étendue. Dans les systèmes hors d'équilibre, très fréquemment rencontrés dans les matériaux, la composition peut varier en fonction du temps et de la localisation à l'intérieur du matériau considéré. Chaque phase est séparée des autres phases du système par une interface. Les phases amorphes et cristallines se distinguent par leurs arrangements atomiques différents. [15]

C. Les précipités

Un nombreux métal ne sont que très peu ou pas du tout solubles dans l'aluminium solide, par exemple le fer ou le titane (solubilité maximale de 0.03%).

Au –dessus de 700°C, dans le métal liquide, ces atomes étrangers sont encore intimement mélangés aux atomes d'aluminium, mais au moment de la solidification ils ont « expulsé » du réseau qui constituent les atomes d'aluminium. Les atomes étrangers par exemple les atomes de fer, se combinent alors avec des atomes d'aluminium pour former des cristaux propres dans lesquels on trouve trois (03) atomes d'aluminium pour un atome de fer.

La composition de ces précipites cristallins est alors Fe-Al₃. Dans d'autres cas les atomes étrangers précipitent seuls (silicium) ou encore en compagnie d'un autre espère atomique (par exemple magnésium et silicium). De tels précipités n'apparaissent pas seulement lors de la solidification, mais peuvent aussi se former à l'états solide aux températures dépassent 200°C environ.

Les précipites (cristaux du second type) apparaissent dès que la teneur en atomes étrangères est supérieure à la limite de solubilité à l'état solide. Dans le cas du silicium par exemple dont la solubilité maximale dans l'aluminium est de 1.65%, il y à apparition de précipités dès que la teneur de silicium dépasse 1.65%. [16]

D. Les pores

Dans des blocs de métal brut de coulée, on peut mettre en évidence trois types de cavités :

- Les retassures, provoquées par la forte diminution de volume que subit le métal en passant de l'état solide,
- Les inclusions d'air, provoquées par l'air qu'a pénétré dans le métal lors de la coulée et n'a pas pu s'échapper avant la solidification ;
- Les pores d'hydrogène dans lesquels s'est rassemblé l'hydrogène lors de la solidification.

Les ségrégas d'hydrogène apparaissent dans la structure de coulée sous forme de pores de 0.001 à 0.5 mm de diamètre. Ces pores peuvent se former nom seulement pendant, mais encore après la solidification, d'où la distinction entre la porosité

primaire et secondaire. Plus la teneur du métal liquide en hydrogène est élevée et plus la solidification est lente plus la porosité primaire est forte. [16]

I.3.3.7 - IMPORTANCE DE LA MICROSTRUCTURE

La microstructure détermine les propriétés d'un très grand nombre de matériaux. C'est grâce à la modification contrôlée de la microstructure lors de la fabrication ou de la transformation que l'ingénieur en matériau obtient une large gamme de propriétés. Une variation de la microstructure au cours du temps lors de l'utilisation du matériau entraîne une modification importante de ses propriétés (phénomène de vieillissement).

Pour obtenir des matériaux faibles, il est indispensable de maîtriser les phénomènes de vieillissement qui sont le résultat de modifications physiques ou de réactions chimiques. [16]

I.3.3.8 - LES PRINCIPALES MICROSTRUCTURES DES ALLIAGES 40000

L'alliage 44100 est le plus utilisé, sa structure comporte l'eutectique ($\alpha + \text{Si}$) et souvent, des cristaux primaires de silicium (fig I.3.6). A la solidification de l'eutectique, le silicium se dépose d'abord sous forme de gros cristaux aciculaires qui jouent le rôle d'entailles internes dans la solution solide α plastique. Les propriétés mécaniques de cette structure sont basses.

Et pour affiner la structure et éliminer les cristaux de silicium en excès, les silumines sont inoculés au sodium (0.05 à 0.08%) par addition au bain de sels de 67% NaF et et 33% NaCl.

En présence du sodium les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent et l'alliage hyper eutectique (eutectique) devient hypo eutectique. Dans ce cas, au lieu du silicium excédentaire, on observe dans la structure de l'alliage l'apparition des cristaux de la solution α (fig. I.3.7)

Dans ces conditions l'eutectique acquiert une structure plus fine et se compose de petits cristaux des solutions solide $\beta(\text{Si})$ et α .

Pendant la solidification, les cristaux de silicium se couvrent d'une pellicule de silicium de sodium ($\text{Na}_2 \text{Si}$) qui rend malaisée leur croissance. Cette structure inoculée améliore les propriétés mécaniques de l'alliage. [17]



Fig. I.3.6 : Microstructure de silicium

Avant modification



Fig. I.3.7 : Microstructure de silicium

Après modification

CHAPITRE I.4 - PROPRIETES ET ESSAIS MECANQUES

I.4.1 - PROPRIETES MECANQUES

Certains termes utilisés pour décrire les propriétés mécaniques des matériaux, tels que la résistance et la ténacité, sont devenus des termes courants. Mais en science des matériaux, ces termes ont des significations spécifiques basées sur des métriques bien définies et quantifiables qui reflètent la façon dont un matériau réagit à une charge appliquée.

Dans cette section, nous définirons les propriétés mécaniques les plus élémentaires. [18]

I.4.2 - ESSAIS MECANQUES

I.4.2.1 - ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction est un essai très répandu. Il consiste en un allongement forcé d'une éprouvette de forme définie (Fig. I.4.1), en mesurant en même temps la force nécessaire à chaque instant. L'éprouvette dispose de deux têtes par lesquelles elle est fixée dans la machine à traction et une zone plus mince dans laquelle la déformation est localisée.

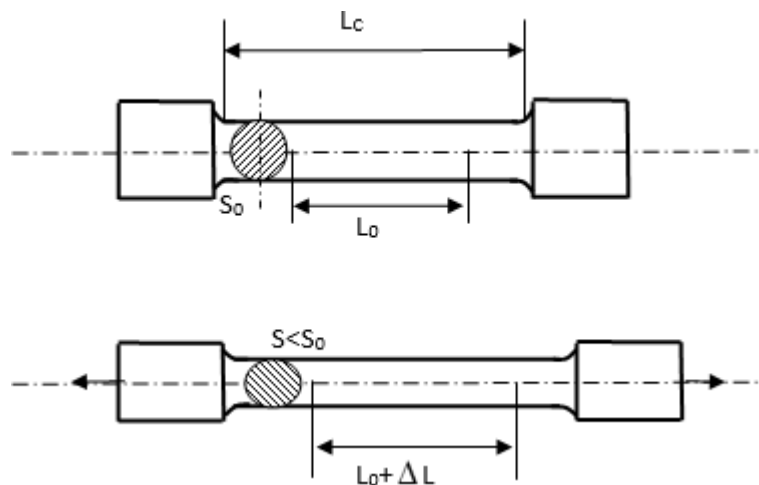


Fig. I.4.1 : Schéma d'une éprouvette cylindrique de traction et son évolution au cours de l'essai.

La déformation est mesurée au moyen d'un extensomètre attaché à l'éprouvette, Le résultat d'un tel essai est la contrainte nominale $\sigma = \frac{F}{S_0}$, en fonction de la déformation

nominale $\varepsilon = \frac{\Delta L}{S_0}$, ce qui est résumé dans une courbe de traction. La figure I.4.2

représente schématiquement trois types de courbes qui correspondent à trois comportements possibles des matériaux : fragile, ductile, élastique non linéaire. Selon AFNOR les dimensions (L_0 et s_0) doivent satisfaire à la relation suivante : $L_0 = k \sqrt{s_0}$ avec ($k = 5, 65$ et $L_0 \geq 20\text{mm}$).

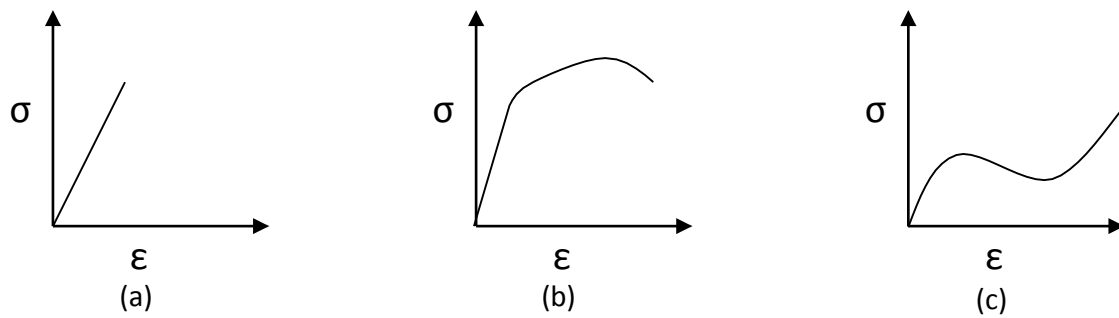


Fig.I.4.2 - Comportements caractéristiques en traction. a-fragile, b-ductile, c- élastique non linéaire

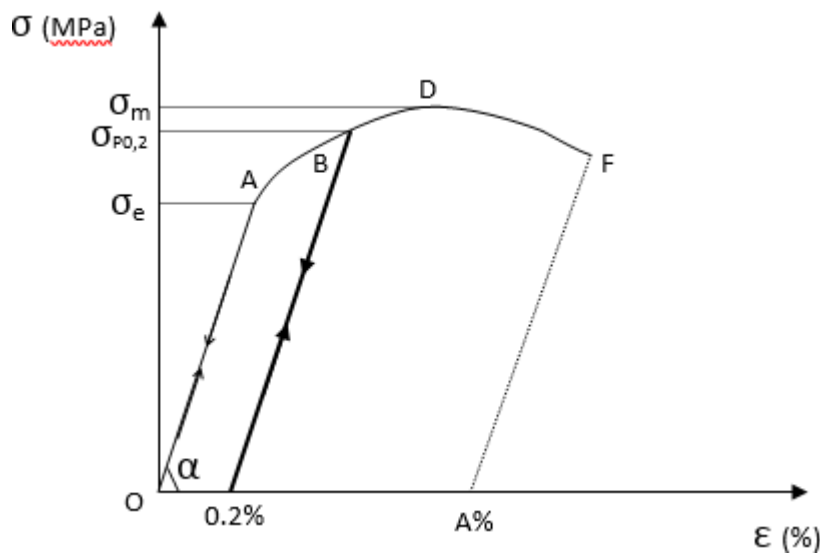


Fig. I.4.3 – Diagramme contrainte - Déformation

Lecture et interprétation de la Courbe de traction :

- **Partie OA :** allongement élastique linéaire, réversible, l’allongement est proportionnel à la charge.
- **Au-delà d’A :** déformation plastique permanente + déformation élastique.
- **Partie AD :** Allongement élastique + allongement plastique réparti.
- **Partie DF :** apparition et progression d’une **striction** (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. Le coefficient de striction est :

$$Z = \frac{S_0 - S_F}{S_0} \times 100$$

S_0 : section initiale de l’éprouvette, S_F : section finale de la surface de rupture.

➤ **Allongement après rupture (en %) :**

L’allongement après rupture représente la différence de la longueur L_u de l’éprouvette reconstituée après rupture et la longueur initiale L_0 rapportée à la longueur initiale.

$$A (\%) = \Delta L / L_0 \times 100 = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100$$

➤ **Striction :**

La striction est définie par :

- Le coefficient de striction : $Z (\%) = [(S_0 - S_u) / S_0] \times 100$
- L'allongement de striction : $Z_u (\%) = [(S_0 - S_u) / S_u] \times 100$

➤ **Ductilité :**

La ductilité du matériau est appréciée à partir de la valeur du coefficient de striction Z qu'on va voir par la suite :

- Si $A\% \geq 5\%$ le matériau est considéré comme ductile,
- Si $A\% < 5\%$ le matériau est considéré comme fragile.

Z% (coefficient de striction) et Kcv (résilience) sont également des indicateurs : son comportement durant la striction, par la valeur du coefficient de striction Z.

- Si $Z > 0,5$ est grand, le matériau est ductile ;
- Si $Z < 0,1$ est faible, le matériau est semi-fragile.

C'est un atout important pour la mise en forme des matériaux.

Pour le matériau fragile, la rupture a lieu dans le domaine élastique (absence de striction).

On peut retirer de la courbe de traction les informations suivantes :

Le module d'Young E :

La pente de la partie linéaire initiale de la courbe de traction correspond au module d'Young E.

$$\text{Avec } E = \tan \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ et } E = \sigma_e / \varepsilon_e$$

La limite d'écoulement $\sigma_{p0,2}$:

Elle correspond à la contrainte à laquelle une déformation plastique de 0,2% est atteinte. Pour la déterminer, on trace une ligne parallèle à la partie linéaire initiale de la courbe de traction coupant l'axe de déformation à 0,2%. Ceci s'impose si la fin de la partie linéaire initiale ne peut pas être déterminée sans ambiguïté.

La limite élastique $\sigma_e = F_e / S_0$

Elle peut surtout être observée dans les aciers ferritiques à faible teneur en carbone. Elle correspond à la fin de la partie élastique de la courbe de traction marquée par une légère chute en contrainte, cette chute provient du fait que dans la partie élastique, les atomes de carbone retiennent les dislocations. Au moment où la contrainte dépasse la force de rétention, les dislocations se libèrent et agissent sur d'autres dislocations qui se libèrent à leur tour et ainsi de suite. Puisque cette libération de dislocations commence à un endroit dans l'éprouvette, l'avalanche doit traverser toute l'éprouvette, ce qui peut être observé sous forme de front de déformation avançant.

Pendant que l'avalanche avance, la contrainte est celle qui permet le mouvement des dislocations libérées. Ainsi la contrainte reste plus ou moins constante jusqu'à ce que toutes les dislocations soient libérées.

La résistance à la traction $\sigma_m = F_m / S_0$

La résistance à la traction correspond à la contrainte maximale de la courbe. [19]

La déformation homogène :

Jusqu'à la contrainte maximale, l'éprouvette se déforme d'une manière homogène. En dressant une ligne parallèle à la pente initiale de la courbe de traction, on peut déterminer la déformation homogène à l'intersection de cette ligne avec l'axe de déformation. Une fois le maximum en contrainte nominale atteinte, la déformation devient instable et se localise, accompagnée d'une diminution locale de la section de l'éprouvette, jusqu'à ce que la rupture finale intervienne. On parle de striction. Sur l'éprouvette cassée, on mesure ensuite la section locale pour déterminer la réduction en section A, qui est, avec la déformation homogène, une mesure de ductilité du matériau.

Avec $\sigma_r = F_r / S_0$

Dimensions σ (MPa) = F (N) / S_0 (mm²)

I.4.2.2 - ESSAI DE DURETE

Dans l'essai de dureté, la résistance d'un matériau contre l'intrusion d'un corps est déterminée. Il existe plusieurs standards d'essai de dureté qui nécessitent la déclaration suivant quel standard, la dureté est mesurée. Les trois techniques les plus répandues sont la mesure selon Brinell, selon Vickers et selon Rockwell. Le point commun de ces trois mesures est qu'un corps de géométrie définie est enfoncé dans l'éprouvette en appliquant une force définie. La profondeur d'intrusion est ensuite mesurée. [19]

I.4.2.2.1 - ESSAI BRINELL

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 :

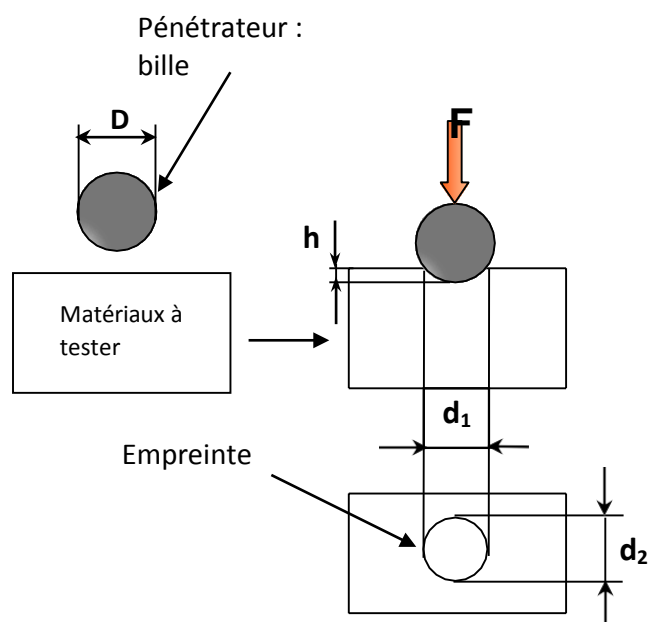


Fig. I.4.4 - Principe de l'essai Brinell.

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

F : charge d'essai en newtons.

D : diamètre de la bille en millimètres.

d : diamètre de l'empreinte en
Millimètre, avec

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Pour éviter la déformation et la détérioration de la bille, l'usage de l'essai Brinell est limité aux matériaux tels que HBS < 350 ou HBW < 650.

Conditions de l'essai :

- L'essai est effectué à température ambiante ;
- La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes ;
- On prépare la surface pour éviter toute altération ;
- L'épaisseur minimale de l'éprouvette est fonction du diamètre de l'empreinte, pour l'aluminium et ses alliages l'épaisseur de l'éprouvette doit être d'au moins dix fois la profondeur de l'empreinte ;
- L'espacement des empreintes pour des essais successifs doit être :
 - $a \geq 3d$; $b \geq 6d$ pour l'aluminium et ses alliages.
 - $a \geq 2,5d$; $b \geq 4d$ pour les aciers.

Les distances **a** et **b** sont représentées sur le schéma de la figure ci-dessous (Fig. I.4.5).

$$HV = 0,102 \frac{2F \cdot \sin(136^\circ / 2)}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

d_1 et d_2 diagonales de la base carrée de la pyramide droite

F(N) : charge d'essai en newtons.

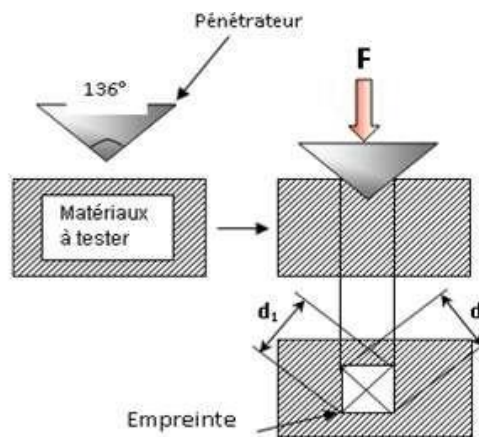


Fig.I.4.5 - Principe de l'essai Vickers

I.4.2.2.2 - ESSAI VICKERS

Le projectile perforant est une pyramide rhomboïdale à base carrée et dont l'angle des faces opposées au sommet est égal à 136° . L'empreinte est une pyramide creuse dont la diagonale moyenne d (en millimètres) est la moyenne des deux diagonales d'un carré élémentaire mesurée avec un équipement optique approprié. La charge d'essai $F(N)$ est choisie dans la gamme normalisée. La dureté est donnée par le rapport de F (force en Kg à l'origine) au côté de l'empreinte pyramidale, exprimé sans cote :

Le domaine d'application de l'essai Vickers concerne toutes les pièces plus dures que l'essai Brinell et dont les dimensions peuvent atteindre de faibles épaisseurs.

Conditions de l'essai :

- L'essai est effectué à température ambiante ;
- Les charges doivent être appliquées sans choc ni vibration. Le temps d'application est de 10 à 15 secondes ;
- Une préparation de la surface est nécessaire pour éviter toute altération ;
- L'épaisseur de la pièce doit être $\geq 1,5d$;
- L'espacement des empreintes pour des essais successifs doit répondre aux normes suivantes (fig.I.4.6) :
 - $a \geq 3d$ et $b \geq 6d$ pour l'aluminium et ses alliages ;
 - b et $a \geq 2,5d$ pour les aciers.
- La charge d'essai doit être :
 - $49N \leq F \leq 1180N$ pour l'aluminium et ses alliages et le cuivre et ses alliages ;
 - $49N \leq F \leq 981N$ pour les aciers.

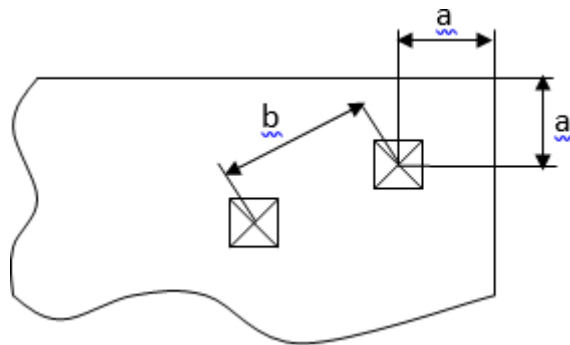


Fig.I.4.6 - Conditions pour les mesures répétitives (essai Vickers)

I.4.2.2.3 - ESSAIS DE RESILIENCE :

La connaissance des caractéristiques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent les matériaux fragiles, ces conditions ont un facteur commun qui est une concentration de contrainte liée à la présence d'un défaut et elles varient fortement en fonction de la température, de la vitesse de déformation et des dimensions des pièces sollicitées. Un des moyens les plus classiques et le plus anciens pour caractériser la fragilisation d'un matériau sous l'action d'un choc est l'essai de résilience. Il est fréquemment appelé essai de résilience **Charpy** ou même essai **Charpy**.

Et ce dernier permet d'évaluer les risques de rupture fragile d'un matériau donné. C'est un paramètre important pour la classification des matériaux, si on considère que parmi les modes de ruine d'une construction ou d'une pièce mécanique, c'est celui qui peut être considéré comme le plus dangereux.

a. L'éprouvette

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**).

Les dimensions générales des éprouvettes sont les suivantes :

Dimensions en mm	Eprouvette en V	Eprouvette en U
Longueur	55	55
Hauteur	10	10
Largeur	10	10
Hauteur éprouvette à fond d'entaille	8	5
Rayon à fond d'entaille	0,25	1
Angle de l'entaille	45°	Bords parallèles

Tableau I.4.1 : Les dimensions des éprouvettes de résilience

b. Machine de résilience

L'appareil d'essai utilisé est un mouton pendulaire

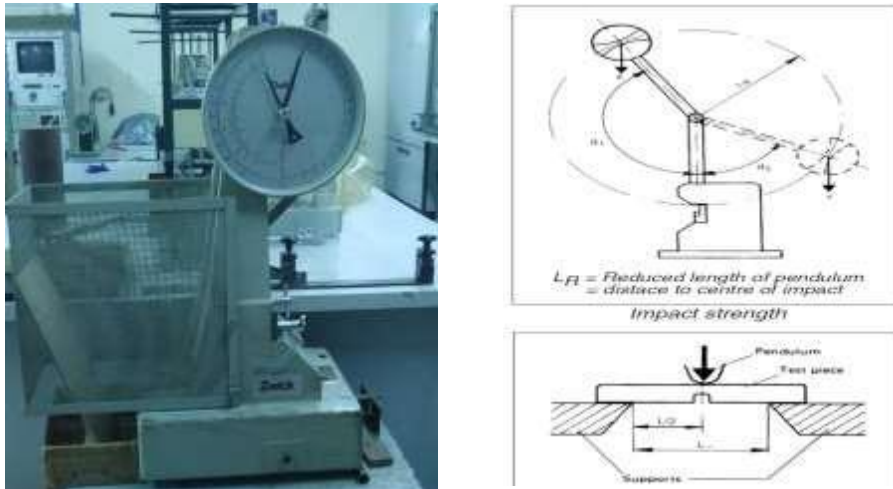


Fig.I.4.7 : L'appareil d'essai utilisé est un mouton pendulaire (*mouton de Charpy*)

La mesure instantanée de l'effort étant pratiquement impossible, on lui substitue la mesure du travail dépensé pour rompre une éprouvette constituée du matériau à étudié.

La masse frappante constitue un pendule articulé en **O** sur le bâti. L'éprouvette est placée sur 2 appuis en partie basse de façon à ce que le plan d'oscillation du pendule coïncide avec le plan médian de l'entaille pratiquée sur l'éprouvette.

Un crochet maintient le pendule en position haute.

Le crochet relevé, le pendule de poids **P** lâché d'une hauteur de **H₀** vient briser brutalement l'éprouvette et continuant sur sa lancée remonte jusqu'à la hauteur **H₁**, en fonction de l'énergie encore disponible. Il oscille et s'immobilise en partie basse.

L'aiguille entraînée pendant la descente donne l'angle maximum de déplacement.

Le travail de rupture de l'éprouvette est : $W = P (H_0 - H_1)$

Où **W** : est en **joule**,

P : Poids du mouton-pendule,

H₀ : Hauteur du mouton-pendule à sa position de départ,

H₁ : Hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée.

On appelle résistance aux chocs ou résilience **K** :

$$K = \frac{W}{S_{min}} \quad [K] : J/cm^2$$

Avec **S_{min}** : Section minimale (cm²).

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement une valeur en joule. [20]

CHAPITRE I.5 - LES DEFAUTS CRISTALLINS ET DIFFUSION

I.5.1 - LES DEFAUTS CRISTALLINS

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas composés de cristaux parfaits (dans lesquels tous les nœuds sont bien maintenus en place), ils ne sont généralement pas purs, et sont même souvent utilisés sous forme d'alliages, c'est-à-dire qu'ils contiennent des atomes étrangers ajoutés intentionnellement.

Cette condition produit un certain nombre d'anomalies dans le métal de base, qui peuvent être répertoriées sous la rubrique Crystal Defects.

Il existe quatre types de pannes :

- 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 précipites, des inclusions (les saletés) des pores.

I.5.1.1 - LES DEFAUTS PONCTUELS

En cristallographie, les défauts ponctuels sont des défauts qui existent à l'échelle atomique et peuvent être générés par agitation thermique, écrouissage, etc.

Ils affectent certaines propriétés physiques telles que la conductivité, le magnétisme, etc.

Ces pannes correspondent à 4 situations :

a. Lacune

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

b. Atome Auto Interstitiel

Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, on a affaire à auto- interstitiel [21].

c. Atome Étranger En Substitution

Des atomes extraterrestres occupent un nœud du réseau. Chimiquement, c'est une impureté, mais ici on l'appelle un élément d'alliage car cet atome étranger se dissout dans le métal de base (au lieu d'une solution solide). La présence de cet atome étranger provoque un léger déplacement des atomes environnants. [21]

d. Atome Étranger En Insertion

Lorsqu'un atome étranger de petite taille (4) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin. [21]

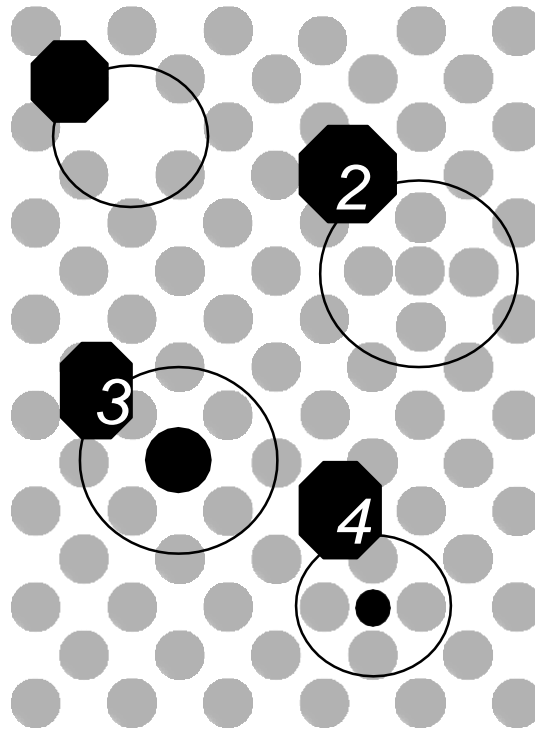


Fig.I.5.1 : Types de défauts ponctuels

I.5.1.2 - DÉFAUTS À UNE DIMENSION (DEFAUTS LINEAIRES)

Une façon d'expliquer le glissement est d'imaginer que le mouvement atomique plan à plan est rigide, c'est-à-dire que tous les atomes se déplacent simultanément. Un autre moyen plus économe en énergie de générer des diapositives consiste à "faire glisser" d'abord certaines maisons en cristal. C'est le concept de glissement partiel.

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

Luxations vis et luxations cunéiformes (Figure I.5.2).

Pour caractériser les dislocations, nous utilisons le concept de vecteurs et de circuits de Burgers.

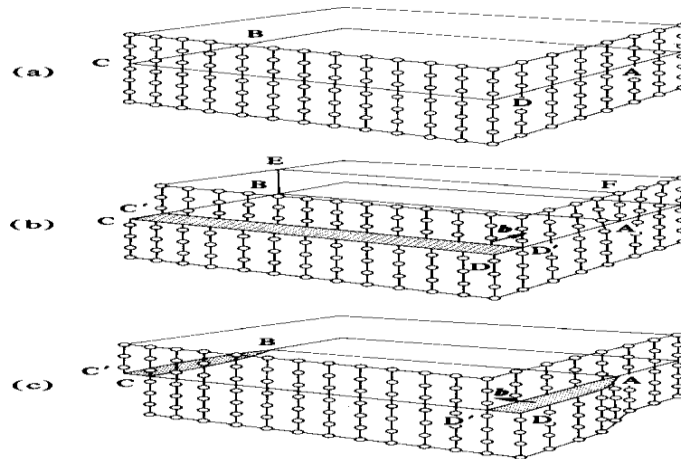


Fig.I.5.2 : (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis.

I.5.1.2.1 - DISLOCATION COIN

C'est un défaut linéaire dû à l'absence de demi-plans atomiques. Les dislocations de bord peuvent être représentées par des plans cristallins qui se terminent à l'intérieur du réseau cristallin. Près de la dislocation, le cristal se déforme, créant une contrainte de compression d'un côté et une contrainte de traction de l'autre.

I.5.1.2.2 - DISLOCATION VIS

Les dislocations vis correspondent à une séparation entre le réseau cristallin intact et une zone où le réseau cristallin subit un décalage partiel par rapport à la région environnante. Ce type de dislocation peut facilement changer de plan de glissement en raison de la symétrie radiale du champ de contrainte. Par ailleurs, une dislocation mixte se réfère à la combinaison des deux types de dislocations mentionnés précédemment.

I.5.1.2.3 - DISLOCATION MIXTE

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

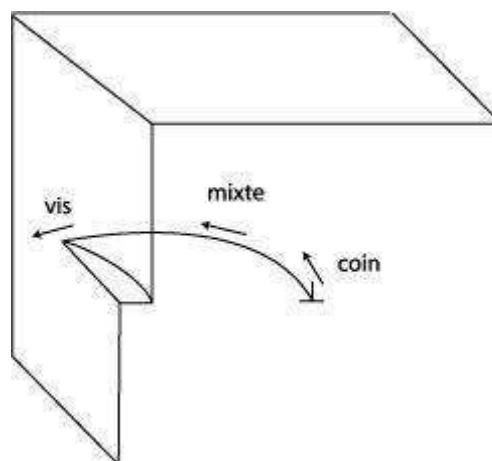


Fig.I.5.3 : Dislocation mixte

I.5.1.2.4 - LE VECTEUR DE BURGERS

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 : $b = \int u$. 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.5.1.3. 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.5.1.3.1. 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'accolement 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.

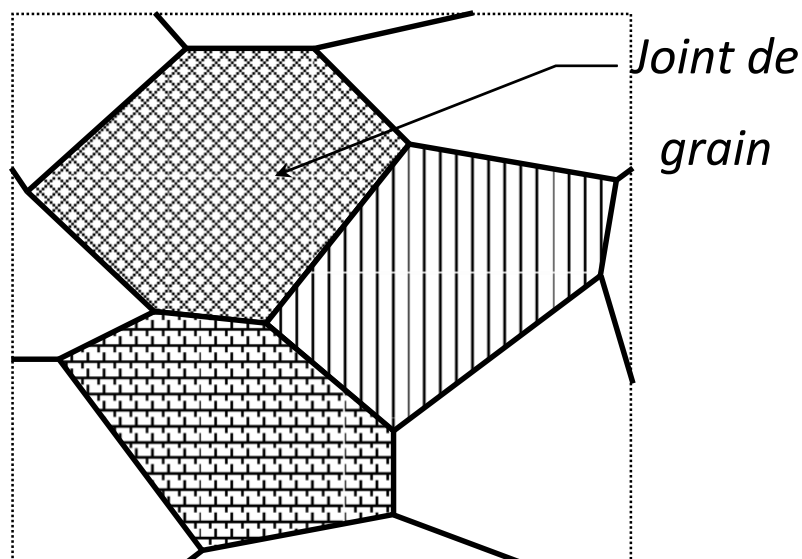


Fig.I.5.4 : Joints de grains

I.5.1.3.2 - 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 alignés comme se serait le cas dans un cristal unique. Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC.

I.5.1.4 - 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.5.1.4.1. LES PORES

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.

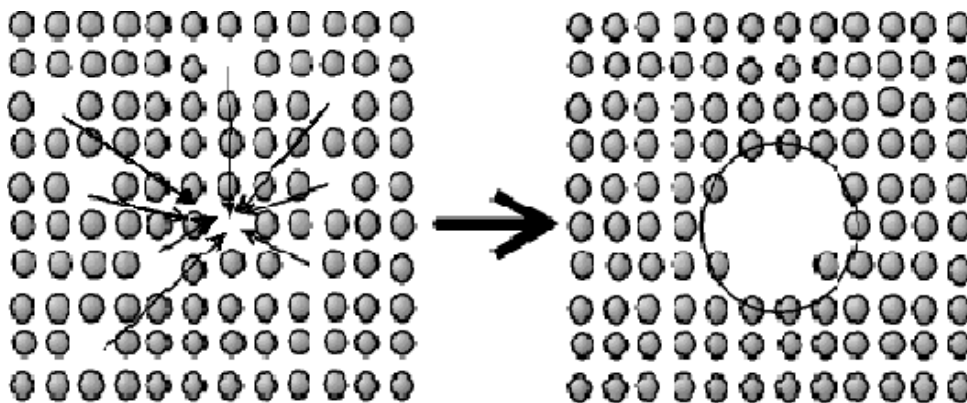


Fig. I.5.5 : Représentation schématique d'un pore.

I.5.1.4.2 - 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.5.1.4.3. LES PRECIPITES

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 ou 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 diffèrent légèrement les paramètres des deux réseaux. Ceci génère des distorsions élastiques à l'interface précipité-matrice.

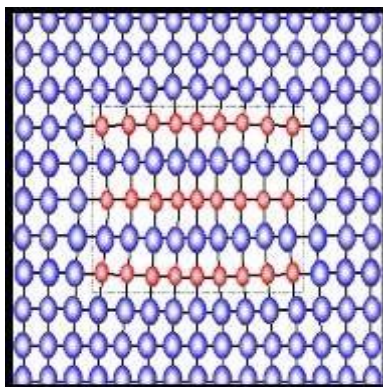
➤ **Les précipités semi-cohérents**

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 obtenue grâce à la présence de dislocations coin le long de l'interface.

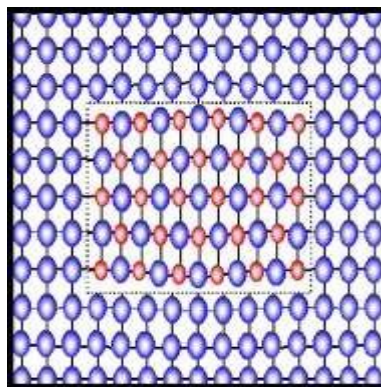
➤ **Les précipités incohérents**

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.

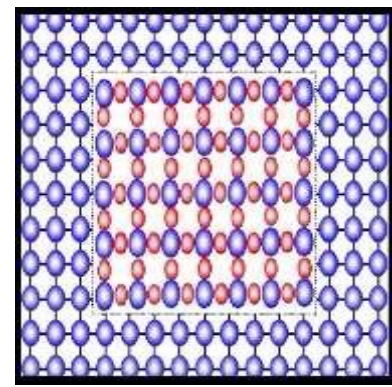
La figure (I.5.6) montre ces trois types de précipités.



(a) : Cohérent



(b) : Semi-cohérent



(c) : Incohérent

Fig. I.5.6 : Différents précipités

I.5.2 - LA DIFFUSION

I.5.2.1 - DEFINITION

La diffusion est un processus de déplacement des atomes à l'intérieur d'un solide sur des distances supérieures à la taille de la maille cristalline. Ce phénomène peut être causé par différents facteurs tels que la température, le gradient de concentration, etc.

Lorsque les atomes se déplacent à l'intérieur de leur propre réseau cristallin, on parle d'autodiffusion. En revanche, lorsque les atomes se déplacent vers un autre réseau cristallin, on parle d'hétéro-diffusion.

I.5.2.2. MECANISMES DE LA DIFFUSION

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 (fig I.5.7)

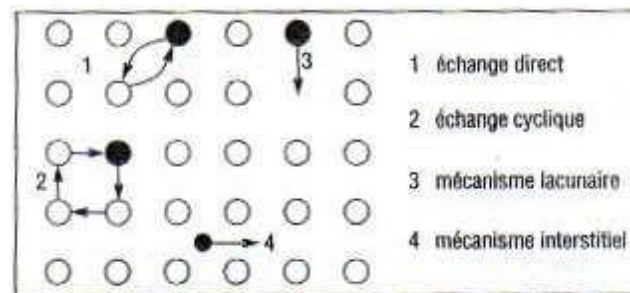


Fig. I.5.7 : mécanismes de diffusion à l'échelle atomique

I.5.2.3. 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.

I.5.2.3.1. 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

I.5.2.3.2. 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 $C = f(x, t)$

CHAPITRE II.1 - APPAREILLAGE

II.1.1 - INTRODUCTION :

La première partie du chapitre est consacrée aux différents dispositifs utilisés dans l'étude expérimentale, la deuxième partie traite des matériels et du mode de fonctionnement mis en œuvre et des essais réalisés dans le cadre de cet article.

Nous avons démarré le développement des alliages Al-Si12CuMg au niveau de la Fonderie d'Aluminium (Société Nationale des Véhicules Industriels - Division Fonderie Rouïba) puis nous avons réalisé différents traitements thermiques de l'Al-Si12CuMg au Département de Génie Mécanique (Hasnaoua II) dans le domaine du laboratoire de science des matériaux (SDM).

En plus des essais mécaniques : essais de dureté, essais de traction et enfin nous faisons des examens microscopiques au niveau du laboratoire métallurgique (SDM – Hasnaoua II).

II.1.2 - APPAREILLAGE :

Différents équipements utilisés dans la fonderie d'aluminium de la société "SNVI"
Une description détaillée de l'AlSi12CuMg que nous avons étudiée est :

II.1.2.1 - MATIERE PREMIERE :

Lingots neufs, retours de fonderie



Fig. II.1.1 : Lingots D'aluminium Neufs



Fig. II.1.2 : Retours De Fonderie

II.1.2.2 - FOUR DE FUSION :

La section atelier de la D F R comporte chacune trois fours de fusion en matériau réfractaire pour les isoler du milieu environnant et contenant un creuset en graphite.

- Charge total : 350 kg
- Moyen de chauffage : le gaz.
- Tension : $T=380$ V.



Fig.II.1.3 : Four De Fusion

II.1.2.3 - FOUR DE MAINTIEN :

- Charge : 150kg
- Température maximale : $T_{Max}=1000$ °C
- Tension : $T = 380$ V



Fig.II.1.4 : Four De Maintien

II.1.2.4 - POCHE DE COULEE :

- Charge : 50Kg



Fig.II.1.5 : Poche De Coulée

II.1.2.5 - POSTE POUR LE MOULAGE EN SABLE :

Tout d'abord, le moule a deux cadres, un supérieur et un inférieur, et deux plaques modèles, chacune contenant quatre empreintes d'échantillons d'essai et des systèmes de coulée.



Fig.II.1.6 : Plaques Modèles



Fig.II.1.7 : Châssis Supérieur – Châssis Inférieur



Fig.II.1.8 : Poste Pour Le Moulage En Sable



Fig.II.1.9 : Poste De Démoulage

II.1.2.6 - GRENAILLEUSE :

Pour enlever le sable fin coincé. Encore en partie projection, particules métalliques à grande vitesse.

A tension : **380V**



Fig.II.1.10 : Grenailleuse

II.1.2.7 - EPROUVETTES EN SABLE :

Les éprouvettes réalisés après les opérations



Fig.II.1.11 : Eprouvettes En Sable



Fig. II.1.12 : Éprouvettes En Sable Finies

II.1.2.8 - POSTE POUR L'EBARBAGE :

Il sert à séparer le système de coulée de la pièce.



Fig.II.1.13 : Poste De L'ébarbage

II.1.2.9 - SCIE MECANIQUE :

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

- Tension : $T=380V$;
- Puissance : $P=1,5Kw$;
- Poids : $600Kg$.



Fig.II.1.14 : Scie Mécanique De Type ALMOSMA3.

II.1.3 - USINAGE DES EPROUVETTES ET DES ECHANTILLONS :

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 : $f=50Hz$



Fig.II.1.15 : Tour Universel De Type SN40SN 50C

Fraiseuse verticale FV1, 5 ALMO

- Tension de service : 380V,
- Puissance totale : 5KW,
- Poids : 1520Kg



Fig.II.1.16 : Fraiseuse Verticale FV1, 5 ALMO.

II.1.3.1 - LA MEULE :

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



Fig.II.1.17 : Meule

II.1.3.2 - EPROUVETTES ET ECHANTILLONS :

Après le processus de moulage au sable, nous avons obtenu les pièces suivantes, et certainement en ce qui concerne les mesures nécessaires. Et en viens de présenter quelques photos des échantillons.



Fig.II.1.18 : Epreuve cylindrique de traction en sable.



Fig.II.1.19 : Echantillons

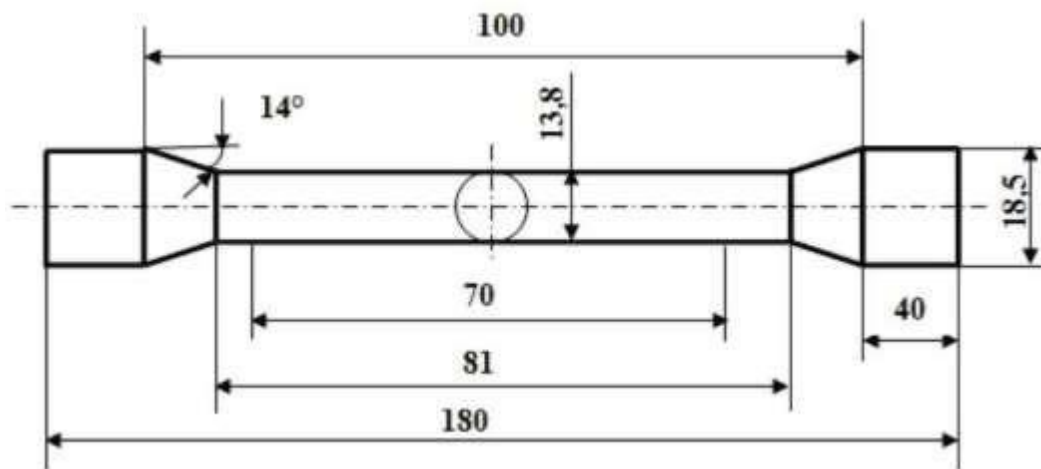


Fig.II.1.20 : Dimensionnement des épreuves coulées en sable NF A 57 130

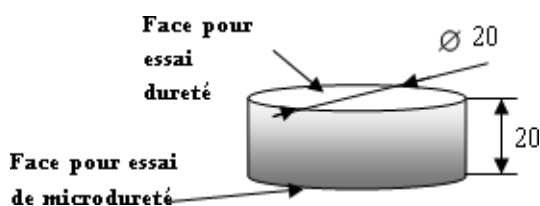


Fig.II.1.21 : Echantillon De Dureté Et De μ dureté

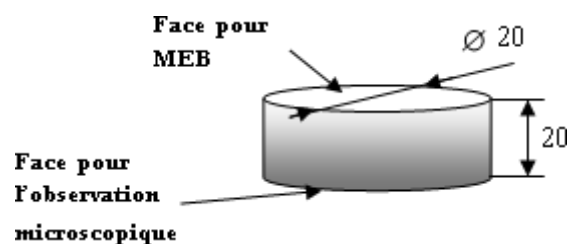


Fig.II.1.22 : Echantillon De μ structure

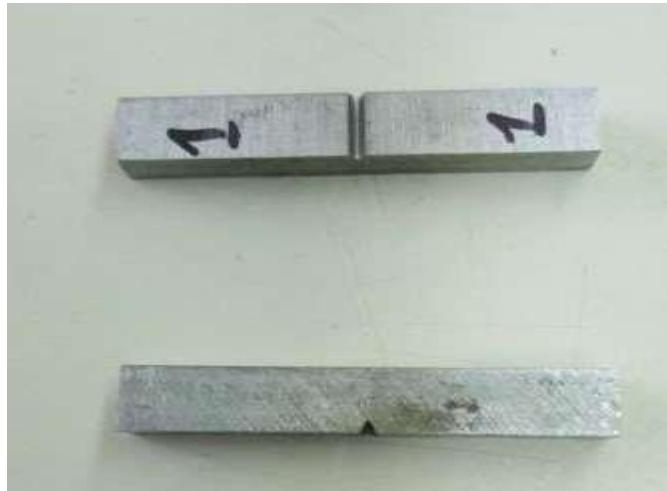


Fig.II.1.23 : Eprouvette De Résilience.

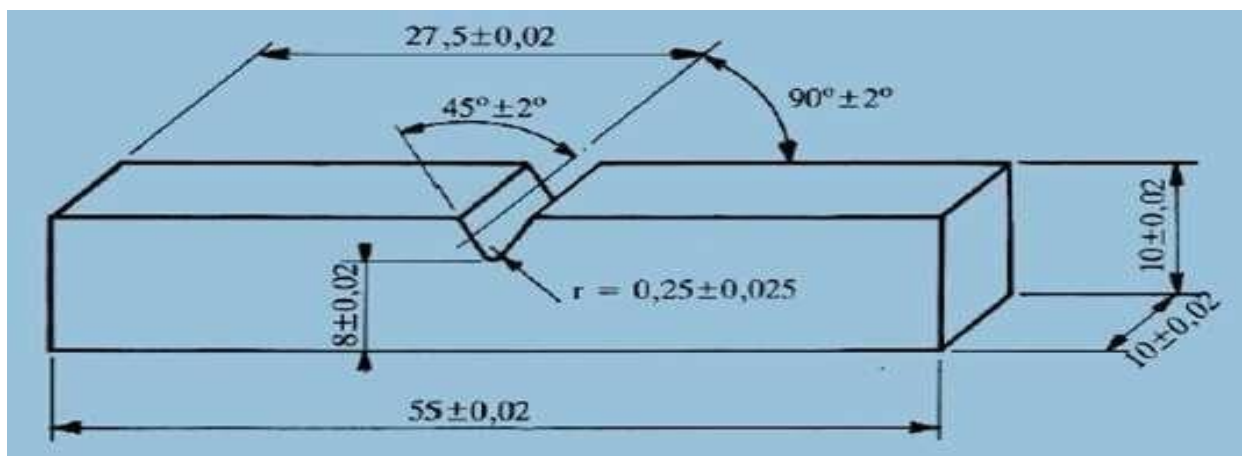


Fig.II.1.24 : Démentions Des Eprouvette De Résilience V.

II.1.4 - FOUR ET ETUVE DES TRAITEMENTS THERMIQUES :

II.1.4.1 - FOUR DE TREMPE :

C'est un four à résistance électrique alimenté sous une tension de 380V et de puissance 11KW allant jusqu'à 1200°C en température de chauffage, construit en tôle et profilés robustes, il est isolé avec de la laine d'alumine pour la rendre plus légère et isolée thermiquement. Un contact électrique coupe le circuit de résistances dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique.



Fig.II.1.25 : Four De Trempe

II.1.4.2 - FOUR DE REVENU :

C'est un four à résistance électrique alimenté sous une tension de 380V et de puissance de 7KW allant jusqu'à 700°C en température de chauffage, équipé d'un thermocouple et d'une turbine pour convection forcée. La porte du four se ferme à l'aide d'un système vis écrou papillon permettant un bon serrage. Son isolation est faite par la laine d'alumine pour le rendre plus léger. Les deux fours sont munis d'un régulateur de type (OMRON) alimenté sous une tension de 220V allant jusqu'à 1200°C en température.



Fig.II.1.26 : Four De Revenu

II.1.5 - MACHINES D'ESSAIS MECANQUES :**II.1.5.1 - 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 effectués.



Fig.II.1.27 : Machine De Traction

II.1.5.2 - MACHINE ESSAI DE RESILIENCE :

Principe du test de résilience : Il consiste à casser une éprouvette avec une entaille au milieu et posée sur deux supports d'un seul coup de pendule. On détermine l'énergie absorbée W dont on déduit la force de rebond.

L'élasticité est l'énergie nécessaire pour provoquer la rupture de l'échantillon, exprimée en joules par centimètre carré.

Machine d'essai : Le couteau fixé sur le marteau oscille autour de l'axe O dans le plan vertical. Une partie de l'énergie stockée lors de la chute du pendule est utilisée pour fracturer l'échantillon. Le centre de gravité du pendule est toujours proche de la pale du pendule.



Fig.II.1.28 : Pendule De Charpy

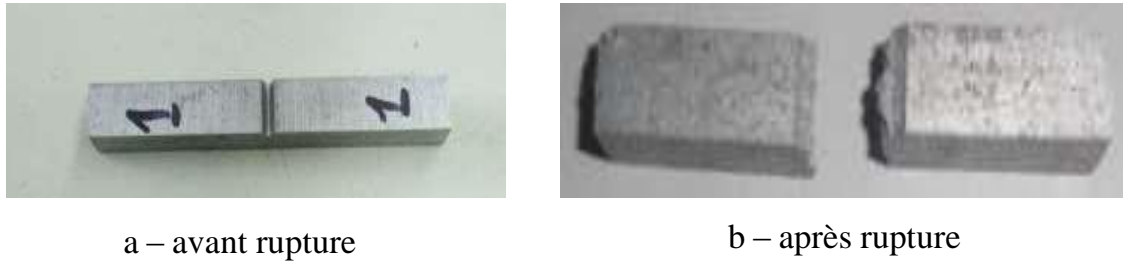


Fig.II.1.29 : Eprouvettes De Résilience.

II.1.5.3 - DUROMETRE :

C'est un duromètre de type WOPERT DIA TESTOR RC, constitué de deux parties, la première est la partie d'essai ; elle nous permet d'effectuer les trois types d'essai ; Rokwell, Veckers, et brinell. Il est muni d'un sélectionneur de charge et d'un plateau où table sur laquelle les éprouvettes sont posées.

Quant à la deuxième partie elle nous permet de mesurer l'empreinte des billes où des pyramides à un grossissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli. Se duromètre est alimenté sous une tension de 220V et d'une fréquence de 50 Hz.



Fig.II.1.30 : Duromètre

II.1.6 - POLISSAGE :

II.1.6.1 - LES POLISSEUSES :

Obtenez une surface plane et une qualité miroir. Cette opération de polissage est réalisée à l'aide de deux polisseuses :

1. Polisseuse de type (STRUERS) alimenté sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W munie d'un dispositif d'arrosage ;
2. Polisseuse de même type sous la même tension mais de puissance de 432W.



Fig.II.1.31 : Polisseuse de 150W



Fig.II.1.32 : Polisseuse de finition

II.1.6.2 - ATTAQUE CHIMIQUE

L'attaque a pour but d'améliorer les joints des cristaux après polissage de finition et de différencier la composition des alliages utilisés. On rince et sèche les échantillons avant de les attaquer chimiquement, ce qui consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif le temps nécessaire à température ambiante, puis à nettoyer les échantillons sous jet d'eau et à l'aide d'un séchoir



a) Les échantillons sous l'attaque chimique



b) Le produit de l'attaque chimique

Fig.II.1.33 : l'attaque chimique

II.1.7 - MICROSCOPE :

Afin de continuer à observer les différentes structures de surface des alliages étudiés après polissage et attaque chimique, deux types de microscopes ont été utilisés, caractérisés par :

II.1.7.1 - MICROSCOPE OPTIQUE :

C'est un microscope polyvalent ZEISS avec une tension de 220 V, une fréquence de 50 HZ et une puissance de 100 W. Il est équipé d'une caméra automatique avec une résolution de 40 à 1000 fois.



Fig.II.1.34 : Microscope Optique

II.1.7.2 - MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE :

EDAX est un microscope environnemental ESEM XL30 de marque Philips pour la microanalyse par rayons X à dispersion d'énergie.



Fig.II.1.35 : Microscope électronique à balayage ESEM XL30 Philips du LPCM (UMMTO)

CHAPITRE II.2 - METHODES EXPERIMENTALES ET ELABORATION

II.2.1 - MATERIAU ETUDIÉ :

Durant toutes nos expériences, nous avons utilisé l'alliage de fonderie AlSi12CuMg, contenant 12 % de silicium en pourcentage massique). Cet alliage de fonderie à traitement thermique est de type 47000.

Nous considérons une série d'alliage précédent, obtenues par Coulée en sable.

II.2.2 ALLIAGE DE FONDERIE A TRAITEMENT THERMIQUE AISi10Mg (AS10G) :

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique d'alliage considéré selon la norme AFNOR NF A57-702 et selon l'analyse effective à la SNVI

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	≤0,55	9 ÷ 10,5	≤0,1	≤0,1	0,17 ÷ 0,4	≤0,5	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,2
% Selon SNVI	0,33	9,60	Trace	—	0,25	0,38	—	—	—	—

Tableau II.2.1 : Composition chimique de l'alliage AISi10Mg

II.2.2.1 - CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

Sur éprouvettes coulées à part suivant la Norme A.F. A57-130 et sur un alliage ayant subi obligatoirement un traitement de modification.

Mode de coulée	Etats		σ_r (MPa)	σ_e (MPa)	A%	Dureté (HB)
	Nouveaux	Anciens				
Sable	SF	Y20	150	90	3	55
	ST ₆	Y23	230	180	1	75

Tableau.II.2.2 : Caractéristiques et désignation en mode coulée en sable

II.2.2.2 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

- Conductibilité thermique à 20 °C : 0,36 μ th cm/cm².S.°C.
- Résistivité à 20 °C : 4,5 μ Ω cm²/cm.
- Coefficient de dilatation entre 20 et 100 °C : 20,5 * 10⁻⁶.
- Intervalle de solidification : 590 – 570 °C.
- Retrait moyen : 12 %

II.2.3 - ELABORATION DE L'AlSi12CuMg :

L'AlSi12CuMg donne des résultats surs, reproductibles et conformes à la norme. La composition chimique de l'AlSi12CuMg après analyse chimique. Le matériau utilisé est fourni par la SNVI Il s'agit de l'alliage à base d'aluminium AS10G auquel on a ajouté 2% de silicium et 0.95% de cuivre.

Après analyse, les éprouvettes coulées en sable ont la composition chimique suivante :

12,17% de silicium en pourcentage massique, une quantité de cuivre de 0,95% et de magnésium de 0,71% inférieure à 1% et quelques traces d'impuretés.

Eléments chimiques	Si	Cu	Mg	Fe
% selon analyse effectuée	12,17	0,95	0,71	0,63

Tableau II.2.3 : Résultats de l'analyse chimique après contrôle sur éprouvettes coulées en sable.

II.2.3.1 - LA COMPOSITION CHIMIQUE SUIVANT LA NORME AF. A57-130 :

La composition ci-dessous correspond aux tolérances de composition dans les pièces coulées en sable.

Norme	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Ni%	Pb%	Sn%	Ti%	Autres
NF A57-130	10,5 à 13,5	0,7 (0.8)	0,9 (1,0)	0,05- 0.55	0,35	0,10	0,3	0,2	0,1	0,15 (0,20)	0,25

Tableau.II.2.4 : La composition chimique de l'alliage AlSi12CuMg.

Un alliage entrant dans ces tolérances de composition, convenablement élaboré.

II.2.1.1 - FOUR DE FUSION :

Le four de fusion est composé d'une vérole (coquille extérieur) à l'intérieur il y'a deux couches de bétons : l'une est isolante et l'autre est réfractaire. Le four de fusion dont la charge est de 350 Kg, ce dernier est chauffé par l'intermédiaire de deux brûleurs à gaz. Le métal ainsi préparé dans le four est ensuite versé dans une poche de coulée de 50 Kg.

II.2.1.2 - CHARGEMENT DU FOUR DE FUSION :

D'abord on chauffe le creuset qui est en graphite pour éviter l'humidité et procéder à sa calcination. La charge totale du four est composée de 40 % (soient 140 Kg) de lingot neuf et de 60 % de retour (soient 210 Kg), au fond du creuset, en place les petites pièces (retour de fonderie) pour faciliter la fusion, puis on ajoute progressivement et au milieu on ajoute des lingots de l'Al-Si10Mg qui sont déjà préchauffer.

Après l'échauffement du métal à environ 500 °C, on met quelques pourcentages de AlMn10 et AlMg10 (soient 4 Kg de AlMn10 et 6 Kg de AlMg10) pour l'amélioration des caractéristiques de l'alliage et pour corriger le pourcentage de Mg qui se perd au cours de fusion et en dernier les grandes pièces du retour de fonderie. Une fois le four est plein en dégaze à l'aide d'un dégazer couveral 701 (CoV, tablettes à 200 g), qui sert aussi comme un désoxydant, il est additionné à une température $T = 680 - 720$ °C. à la fin de la fusion on couvre le bain avec le couveral 55 pour éviter les oxydations en contact avec l'air. Une fois la température de fusion est atteinte selon le besoin du Fondateur, dans notre cas 720 °C, Le métal est transvasé dans la poche de coulée qui est déjà préchauffer, elle est de (50 Kg). Par la suite en ajoute le couveral (32D) qui est le Sodium pour l'affinage du grain et diminuer la densité des grains.

On observe des grains d'impuretés qui monte à la surface d'où il fallait dégrasser le métal à l'aide d'un louche potier, pour enlever les impuretés à la surface enfin la température de coulée est contrôlée à l'aide d'un pyromètre dans le Four qui est répéter régulièrement.

II.2.2 - MOULAGE :**II.2.2.1 - CARACTERISTIQUES DU SABLE DE MOULAGE :**

Dans le cas de notre Fonderie, le sable de moulage est composé de :

Mélange de silice $\approx 72,5$, d'argile ≈ 12 % et d'eau ≈ 5 %, noir minéral (qui sert à donner un bon aspect à la pièce), les deux tableaux ci-dessous donne respectivement : La composition du sable de retour utilisé dans le moulage en sable, ainsi que les caractéristiques de ce dernier.

➤ **Composition du sable de retour :**

Silice	85 à 86 %
Argile	11,5 à 12,5 %
Noir minéral	Environ de 2,5 %
Argile active	8,05 à 8,75 % (70%)
Fines	3,0 à 3,5 %
Degré d'octithisation	2,5 %

Tableau.II.2.5 : Composition du sable de retour

➤ **Caractéristiques du sable :**

Caractéristiques relevées à une humidité appropriée au moulage.

Humidité	4,8 à 5,3 %
Perméabilité	95 à 115%
Compression	12 à 13 (PSI)
Cisaillement	3,6 à 4,4 (PSI)
Densité en vrac	0,7 à 0,9 g/cm ³
Serrage	45 à 50 %
CH moyen	17 à 18

Tableau.II.2.6 : Caractéristique du sable au niveau du laboratoire.

Ces résultats sont obtenus au laboratoire qui sont des conditions optimums, ce qui donnera dans les conditions d'atelier (avec un rapport de 0,9) les résultats suivants : avec toujours les mêmes taux d'humidité (4,8 à 5,3 %).

Perméabilité	> 110
Compression	10,8 à 11,7 (PSI)
Cisaillement	3,2 à 4 (PSI)
Densité en vrac	0,7 à 0,9 g/cm ³
Serrage	45 à 50 %
CH moyen	15 à 16

Tableau.II.2.7 : Caractéristiques du sable dans les conditions d'atelier.

II.2.2.2 - MOULAGE EN SABLE :

On prend le demi modèle, qui repose sur un bâti on le met sur une table de travail, par la suite on place le châssis inférieur et on met une poudre qui est le noir minéral pour avoir un bon aspect, on remplit le moule avec du sable progressivement, qui va être serrer

(entasser) à l'aide d'un fouloir, on ajoute le sable jusqu'au remplissage de la partie inférieure, on tourne le châssis inférieur, on enlève le demi modèle on a l'empreinte de la pièce sur le sable.

De la même manière on obtient l'empreinte de la partie supérieure de la pièce. une fois la partie supérieure est faite on va enlever notre demi modèle et vérifier le système de coulée qui sert à alimenter la pièce, il doit contenir : Entonnoir, le jet, le chenal, les attaques, la masselotte et des événements.

En fin les deux moules de la pièce sont assemblé, le moule est prêts pour la coulée.

II.2.2.3 - MOULAGE (NOYAUTAGE) :

Ce procédé est utiliser pour l'obtention des pièces qui contient un vide (noyau), cette opération est la même que le procéder dernier mais le sable utilisé est composé de :

Silicate de soude	Sorte de résine qui sous forme liquide environ $\approx 7\%$
Silice	Qui est le reste environ 93 %
CO ₂ (Gaz)	Qui est soufflé pour solidifier le sable à fin qu'il épouse la forme du moyeu.

Tableau.II.2.8 : Composition du sable au secteur du noyautage.

II.2.2.4 - MOULAGE EN COQUILLE :

Après la fusion du métal il est transmis vers le four de maintien qui est régler à une température $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$, on verse dans le four de maintien le couveral (32D) qui sert à l'affinage du grain, cette opération est régulière chaque trois quart d'heure et à l'aide d'une louche potier en dégrasse pour enlever les impuretés sur la surface du bain.

La coquille est un moule métallique, le moule de l'éprouvette est composé de deux parties, il comprend un système de coulé incorporé dans c'est deux parties.

Après l'affinage du métal dans le four de maintien, on chauffe le moule à une température maximale de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, afin que le métal puisse remplir toute l'empreinte et ne crique pas.

Puis la phase finale, on protège les deux chapes par couche poteyée. Le poteyage se fait par une poudre appelée : le Dycote 39 qui est une patte blanche en respectant la dose prescrite (1 Kg de cette poudre dans 8 litres d'eau) et on souffle à l'aide d'un pistolet.

Le Dycote 39 étant plus fin ce qui permet de donner un meilleur plan de pièce, une fois le moule est prêts, on remplit du four de maintien le moule de l'éprouvette à l'aide d'une louche, pour obtenir le moule voulue.

II.2.3 - LA COULEE :

Lorsque le métal est prêt, c'est-à-dire, La température de coulée est atteinte et contrôlée dans notre cas on a $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Cet alliage possède une remarquable aptitude au moulage ce sont donc les épaisseurs, formes et dimensions des pièces à couler qui imposeront la température de coulée, celle-ci est de $710 - 720\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- La composition chimique notamment la teneur en magnésium, est conforme elle est corrigée.
- Le dégazage et le décrassage.

On remplit la poche de coulée (50 Kg), par la suite on procède à la coulée du moule en sable, par contre la coquille à partir du four de maintien à l'aide d'une louche appropriée (coulée par gravitation), à une température $T = 720\text{ °C}$, on remplit totalement le moule en une seule fois jusqu'à ce que le métal remonte par les masselottes et affleure la partie supérieure du moule.

II.2.4 - OPERATION DE DEMOULAGE :

II.2.4.1 - MOULAGE EN SABLE :

Après la solidification de l'alliage dans le moule on va effectuer :

a) Décochage :

Cette opération consiste à séparer où bien à extraire la pièce du moule et la séparer du sable, cette opération s'effectue à l'aide d'une table vibrante.

b) Le sablage :

A l'aide d'une machine qui est la grenailleuse, on va nettoyer la pièce des grains de sable qui reste collé sur la surface des éprouvettes, ensuite les pièces sont évacuées au parachèvement effectuée comme suit :

c) L'ébarbage :

L'ébarbage est l'opération qui consiste à séparer la pièce du système de coulée, ainsi qu'à supprimer les traces et les bavures éventuelles qui peuvent survenir par la meule où bien la brosse métallique, pour effectuer ces opérations, l'ébarbeur doit connaître le plan de la pièce afin de ne pas éliminer des parties fines qui font partie intégrante de la pièce.

II.2.4.2 - MOULAGE EN COQUILLE :

Après la solidification de l'alliage AlSi12Mg dans le moule métallique, il est passé directement à l'opération de parachèvement (ébarbage), c'est-à-dire séparer le système de coulée des éprouvettes, ensuite l'opération de meulage et de finition de l'état de surface des pièces.

II.2.5 - OPERATIONS DE POINÇONNAGE :

Les éprouvettes sont poinçonnées afin de les numéroter par ordre et de les séparer des éprouvettes en sable et en coquille.

II.2.6 - TRAITEMENT THERMIQUE :

Un traitement thermique est une opération (où une succession d'opération) au cours de laquelle la température varie tout en gardant le métal à l'état solide.

L'alliage AlSi12Mg peut subir un traitement thermique c'est le cas le plus général, lorsque l'on cherche des bonnes caractéristiques mécaniques.

Les traitements thermiques sont des opérations qui comportent des cycles thermique chauffage et refroidissement contrôlés et effectués pour :

- Résistivité.
- Corrosion sous tension.
- Corrosion intergranulaire.
- Améliorer la stabilité dimensionnelle des pièces.

II.2.6.1 - CONDITIONS POUR QUE L'ALLIAGE PUISSE SUBIR UN TRAITEMENT THERMIQUE :

L'alliage doit contenir des éléments de composition permettant le durcissement structural ce sont :

- Le Magnésium.
- Le Zinc.
- Le Cuivre.

Ces éléments se combinent avec les éléments principaux de l'alliage.

II.2.6.2 - DIFFERENTES PHASES DU TRAITEMENT THERMIQUE :

On distingue quatre phases :

- Chauffage de mise en solution à une température proche de la température de début de fusion de l'alliage.
- Trempe.
- Maturation.
- Revenu.

II.2.6.3 - CHAUFFAGE ET MAINTIEN :

Les éprouvettes sont chauffées jusqu'à une température $T = 450 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, puis elles sont maintenues, pendant une durée de maintien de dix heures (10h) à une température constante $T = 540 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans les alliages du type AlSi12Mg, la température doit être choisie la plus proche possible de la température du début de fusion.

L'alliage étant toujours à l'état solide, les phénomènes de diffusion à l'état solide ne sont pas instantanés et il faut maintenir la pièce à cette température pendant un temps assez long (8 à 10 heures). Car durant le chauffage, la surface de la pièce s'échauffe plus vite que le cœur du métal. Dans notre cas on a utilisé un four à ventilation forcée, pour homogénéiser la température, qui est contrôlé régulièrement à l'aide d'un pyromètre.

II.2.6.4 - LA TREMPE :

Cette opération consiste à assurer par un refroidissement approprié le maintien à l'état de sursaturation de la solution solide. La trempe doit être suffisamment rapide (Max 12 secondes), pour éviter une précipitation grossière du composé défini (vitesse critique de trempe), les éprouvettes ne sont jamais employées juste après la trempe en raison de leurs fragilités, d'où la nécessité de leurs subir un traitement de revenu.

II.2.6.5 - DURCISSEMENT STRUCTUREL :

Peut se faire sous deux formes :

- Maturation \longrightarrow à température ambiante
- Revenu \longrightarrow température entre 150°C et 220°C .

a) La maturation :

La maturation est le vieillissement naturel, qui se fait à l'air ambiant, pendant un certain temps.

b) Le revenu :

Ce traitement est réalisé sur des éprouvettes ayant subi une trempe pour diminuer la fragilité due à la trempe en adoucissant et éliminant les contraintes interne, le revenu se fait pendant quatre heures (4h) à une température $T_R = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dans notre cas on prend un intervalle de maturation après trempe de :

Maturation 0h+Revenu : 05 éprouvettes de sable et 05 éprouvettes de coquille.

Maturation 6h+Revenu : 05 éprouvettes de sable et 05 éprouvettes de coquille.

Maturation 12h+Revenu : 05 éprouvettes de sable et 05 éprouvettes de coquille.

C) Cycle thermique de l'alliage AlSi12CuMg :

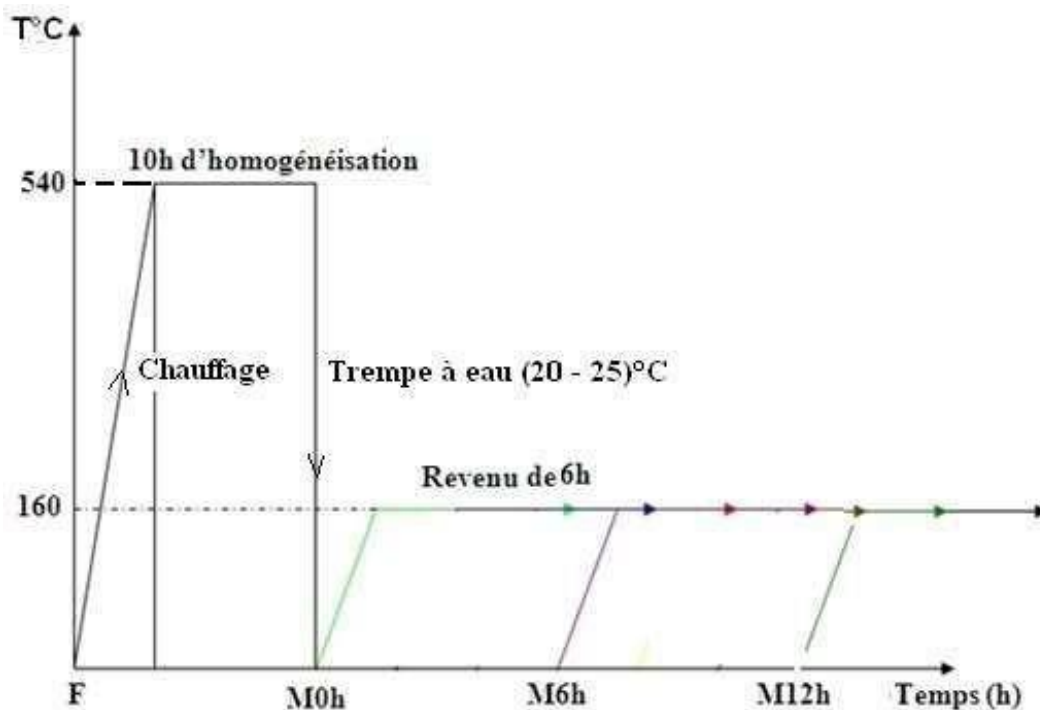


Fig.II.2.1 : Cycle thermique de l'AlSi12CuMg

II.2.7 - ESSAIS MECANIQUES

Pour notre étude expérimentale nous avons opté pour deux essais mécaniques la dureté et la traction.

II.2.7.1 - ESSAIS DE TRACTION

Cet essai a pour but la caractérisation d'un matériau en traction, c'est-à-dire déterminer sa résistance à la traction. Les caractéristiques qu'on peut obtenir de cet essai sont

- Résistance à la rupture R_r .
- Résistance à l'élasticité R_e .
- L'allongement A .
- Le module de Young E .

Les éprouvettes sont solidement maintenues par leurs têtes à l'aide des deux mâchoires (mors) de la machine, dont l'une est fixe, l'autre 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.

a). Forme et dimension des éprouvettes

L'essai est normalisé sous la norme DIN 50 145, la forme de l'éprouvette est cylindrique selon la forme de base du matériau.

■ Éprouvettes en sable :

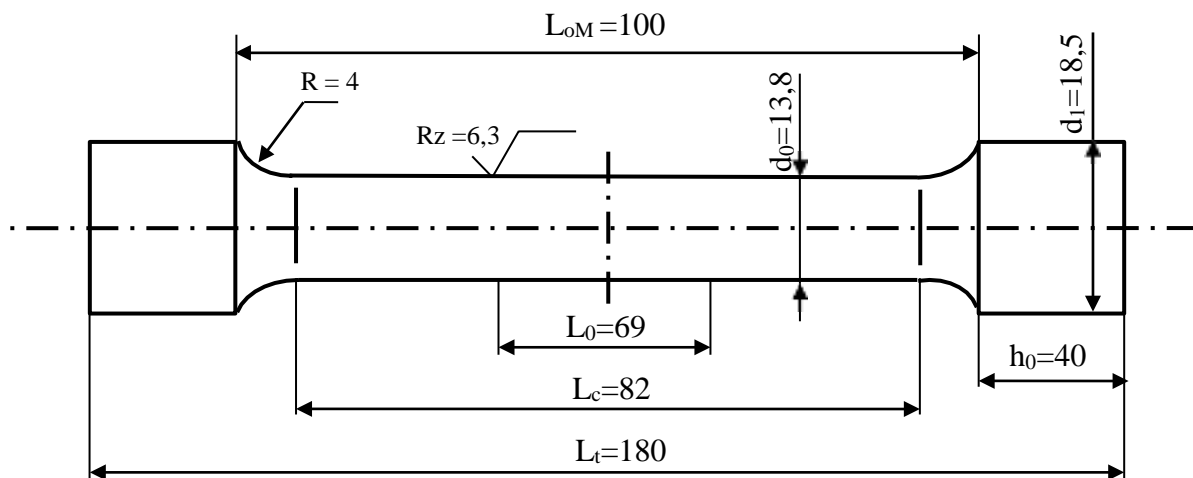


Fig.II.2.2 : Eprouvette coulée en sable, normalisée (SNVI)

b). Différentes étapes de l'essai de traction

Les éprouvettes sont numérotées de 1 à 5, on trace à l'intérieur de L_c , la longueur L_0 , ensuite on mesure sur trois points le diamètre d_0 . Le diamètre moyen sera retenu pour le calcul de la section.

On insère l'éprouvette entre les mâchoires ou mors d'amarrage de la machine, réglée au préalable.

La vitesse de traction répond aux prescriptions de la Norme DIN 50 145, à savoir $30N/mm^2.S$ pour les matériaux dont le module de Young est supérieur à $150\ 000\ N/mm^2$, ceci pour le domaine élastique.

La charge de la limite élastique est relevée ainsi sur machine ou sur graphe, si la courbe représente un palier d'écoulement, sinon on détermine la limite conventionnelle à 0.2%. La variation de l'allongement est lue sur l'éprouvette après rupture en mettant bout à bout les deux parties.

II.2.7.2 - ESSAIS DE DURETE

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à contrôler. On exerce une charge consistante, ensuite on mesure la dimension de l'empreinte. Plus l'empreinte est grande, plus le métal est mou ou doux.

La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface projetée de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S}$$

Le pénétrateur est une bille en acier traité de différents diamètres $\Phi 2.5$ mm, $\Phi 5$ mm ou $\Phi 10$ mm, en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau.

La charge doit satisfaire la condition suivante :

$$P = 30 D^2 \text{ A.F. A57-130}$$

Une éprouvette est prélevée sur la même longueur servant aux essais mécaniques, dans notre cas, un rond de $\Phi 28$ mm et de longueur de 15 mm est découpé avec une scie. Puis dressé et poli au papier granulométrie. Cinq mesures sont ainsi réalisées sur l'appareil de dureté pour chaque état.

Dans ce travail on a choisi l'essai Brinell. Le diamètre de la bille égal à 2,5mm, sous une charge de 60 kg. Après quelques minutes on mesure le diamètre de l'empreinte grâce à une règle, puis on lit la valeur de la dureté correspondante au diamètre.

La forme des échantillons utilisés lors des essais est indiquée par la figure (Fig.II.2.3)

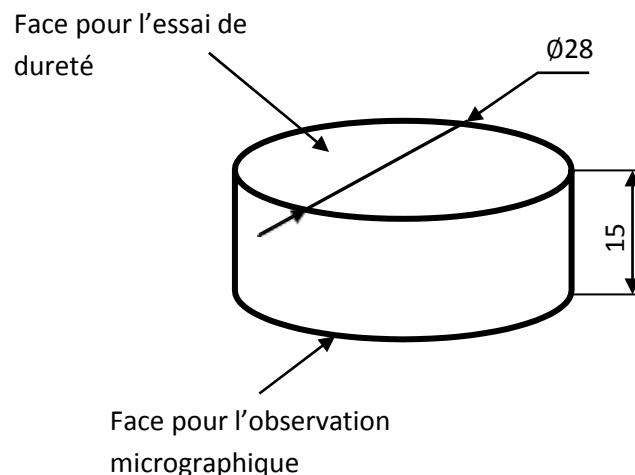


Fig.II.2.3 : Echantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique

II.2.8 - EXAMEN MICROGRAPHIQUE

II.2.8.1 - PREPARATION DES SURFACES

Les échantillons sont découpés des éprouvettes de traction, à l'aide d'une scie mécanique. Ces échantillons sont polis mécaniquement afin de rendre les deux faces de l'échantillon planes et brillantes de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. Le polissage comporte trois phases :

❖ Dressage

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

❖ Dégrossissage

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

❖ Finition

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.2.8.2 - ATTAQUE CHIMIQUE

Pour faire apparaître les joints de grains, on utilise une solution d'attaque au chlorure de zinc préparé comme suit :

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

II.2.8.3 - MICROSCOPIE

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.

MATURATION - PROPRIETES DE L'ALLIAGE AlSi12CuMg COULE EN SABLE PAR GRAVITATION

III.1 - INTRODUCTION

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-Si occupe 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.).

L'ajout d'un pourcentage 12% de silicium qui donne de bonnes aptitudes à la coulée, de cuivre ($\leq 1\%$ Cu) et de Magnésium ($\leq 1\%$ 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.

La présente étude a pour objectif de déterminer l'influence d'une part de la coulée en sable par gravitation d'autre part des traitements thermiques de modification de la microstructure qui se déroule en cinq étapes suivantes

- 01- Chauffage à 540°C,
- 02- Mise en solution avec homogénéisation pendant 10 h,
- 03- Trempe structurale dans l'eau à température ambiante (20÷25) °C,
- 04- Maturations notées – M0h, M6h et M12h suivi immédiatement,
- 05- Un Revenu respectif à 160 °C pendant 6 h pour chacune des trois maturations des pièces métalliques destinées aux différentes réalisations sur l'évolution du comportement et de l'endommagement en traction, la dureté Brinell, la microdureté Vickers, la résilience et la microstructure en considérant quatre (4) états du matériau : brut de coulée noté - F et variation des temps de maturation par incrément de 6h désignés respectivement M0h, M6h, M12h de l'alliage de fonderie de désignation chimique AlSi12CuMg avec (12% Si, Cu $\leq 1\%$ 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 AlSi12CuMg sera soumis aux traitements spécifiques en cinq étapes.

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 Hv pour le champ de contraintes, la résilience la résistance au choc et la microstructure pour comparer les différentes structures.

III.2 - EFFETS DE LA COULEE EN SABLE 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 à celui de la déformation permanente; 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 :

1- Une 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.

2- Une 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.

Cette partie est déterminée par l'allongement $\langle A\% \rangle$, le coefficient de striction $\langle Z\% \rangle$, la résilience $\langle K_{cv} \rangle$ ou $\langle K_{cu} \rangle$ et le coefficient de concentration de contraintes $\langle K_s \rangle$.

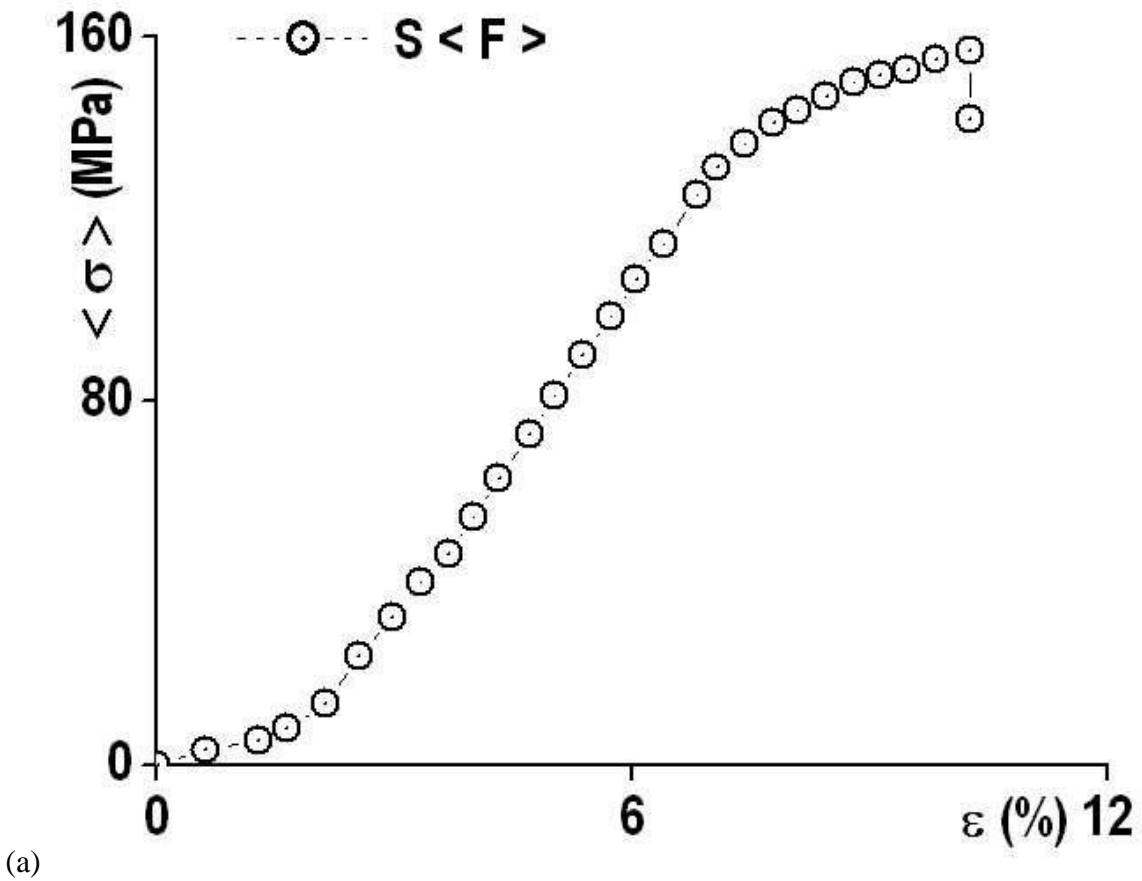
3- Et une deuxième partie plastique cette fois-ci hétérogène ayant pour travail nul présentant une rupture purement fragile de droite verticale - $\varepsilon\% = C_{ste}$

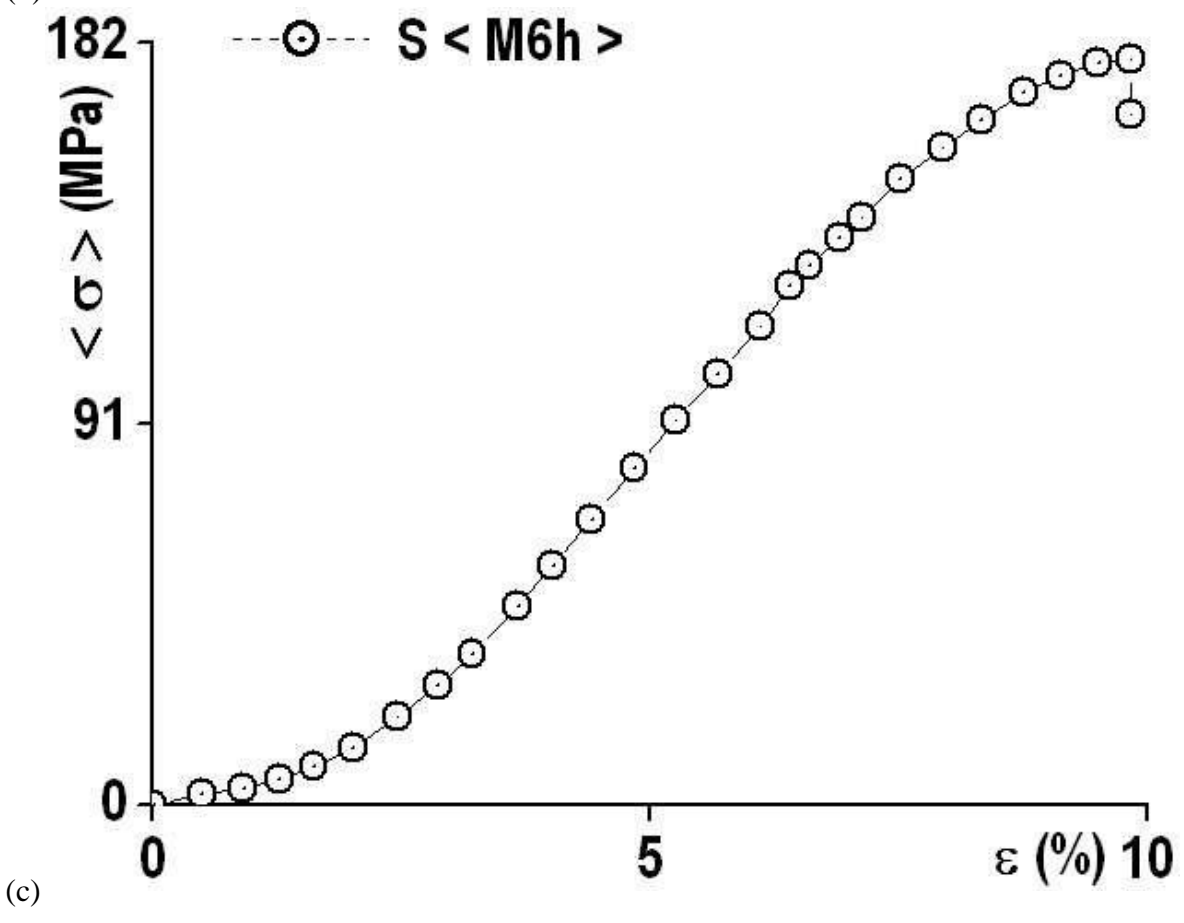
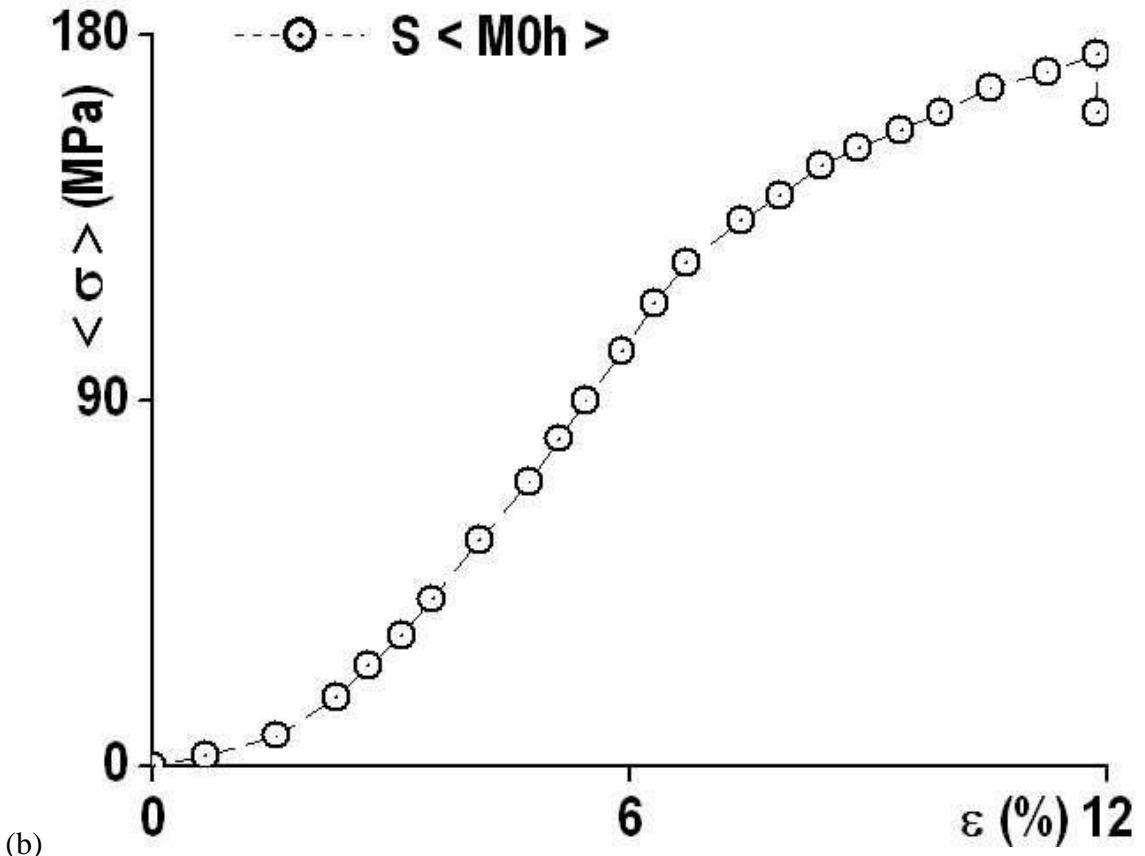
Pour la contrainte maximale $\langle \sigma^M \rangle$ on a la déformation qui est constante. Cette partie est déterminée par l'allongement nul, le coefficient de striction, la résilience et le coefficient de concentration de contraintes très faibles. Elle passe par une seule et unique étape - naissance instantanée des fissures et leur coalescence avec apparition de la striction et leur propagation brutale avec arrachement instantané de la totalité des grains formant la section de l'éprouvette sur un défaut.

III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

Les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de traction, de résilience, de dureté et de microdureté de l'alliage AlSi12CuMg sont représentées par les figures de 1 à 11 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 FONDERIE ALSI₁₂CUMG





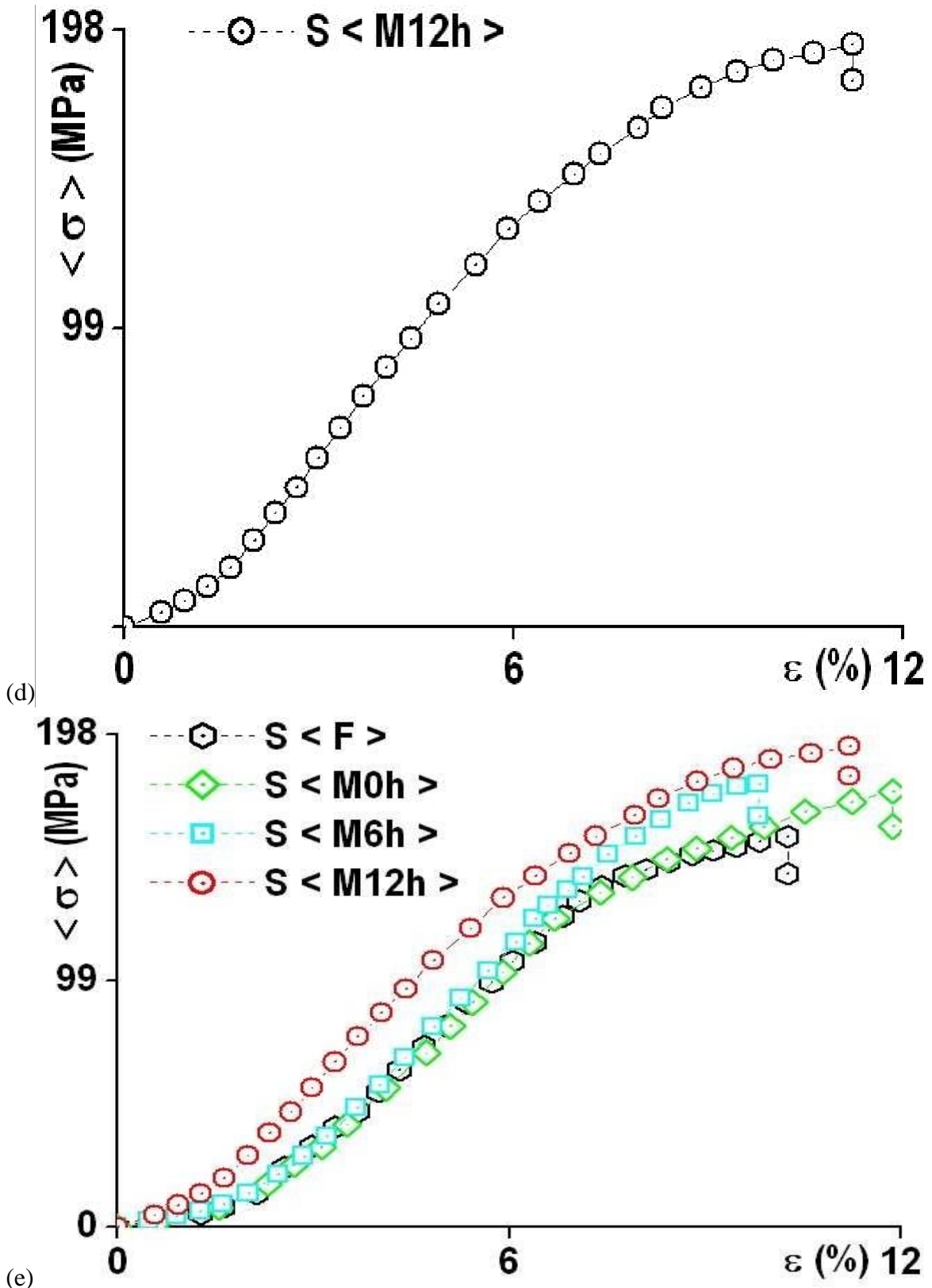


Fig.III.1 – Courbes de traction (contrainte – déformation) de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: < F >, et maturés notés: (b) – < M0h >, (c) - < M6h >, (d) - < M12h > et (e) – groupement des 4 états correspondants avec $\langle \sigma \rangle$ - contrainte moyenne, ϵ(%) – déformation, S - Sable .

Les Figures.III.1 - (a, b, c, d et e) représentent respectivement les courbes de traction moyennes (contraintes - déformations) de cinq éprouvettes de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg pour chacun des quatre états considérés qui sont : (a) - brut de coulée noté : < F > et maturés notés : (b) - < M0h >, (c) - < M6 > et (d) - < M12h >.

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.

La Figure.III.1 - (e) représente le groupement des courbes moyennes (contraintes - déformations) des quatre états du mode de coulée en sable par gravitation afin de déterminer le compromis de résistance.

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

Les figures III. [2 - 11] représentent les différents résultats obtenus au cours de notre étude des différentes propriétés mécaniques de notre l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg.

III.3.2 - INFLUENCE DU TEMPS DE MATURATION DE L'ALLIAGE DE FONDERIE ALSI₁₂CUMG SUR LES PROPRIETES MECANQUES DE

III.3.2.1 - RESISTANCE

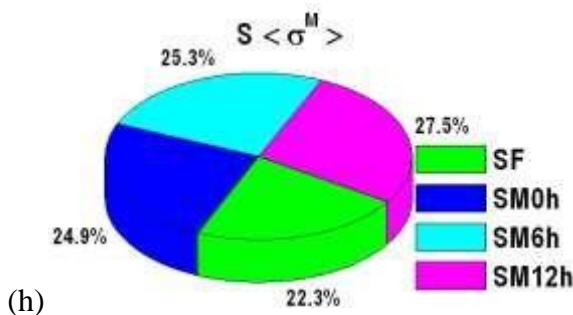
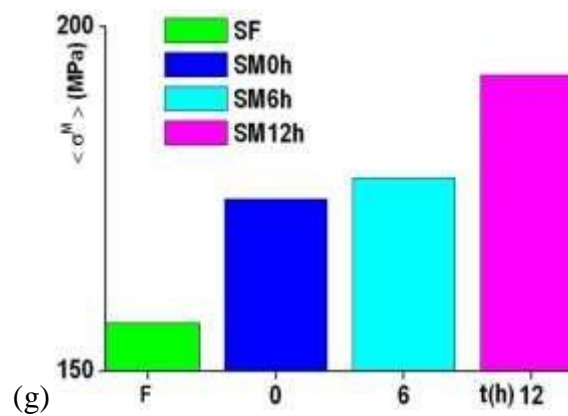
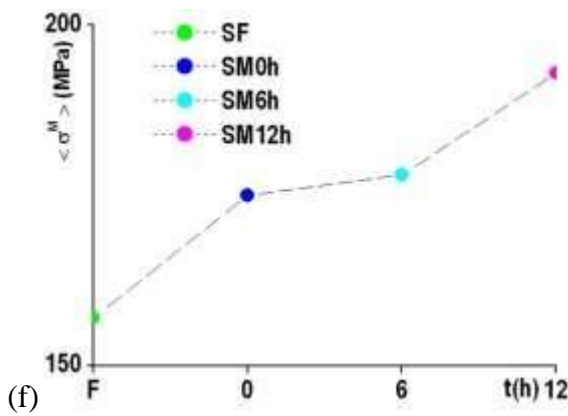


Fig.III.2 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la contrainte maximale ($\langle \sigma^M \rangle$ - temps de maturation), (h) – secteur $\langle \sigma^M \rangle$ de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: < F > et maturés notés : (b) - < M0h >, (c) - < M6h > et (d) - < M12h > avec $\langle \sigma^M \rangle$ - contrainte moyenne maximale, S - Sable.

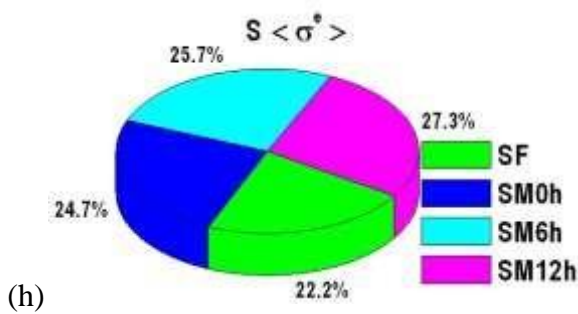
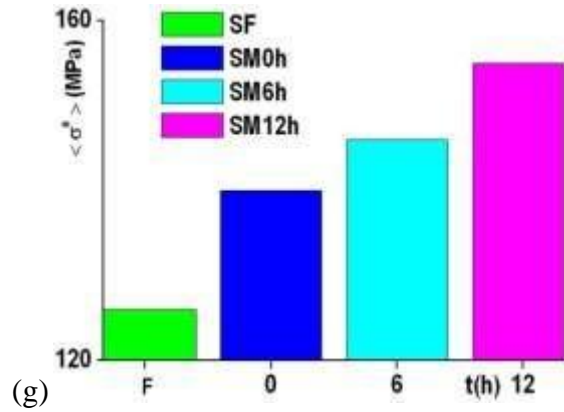
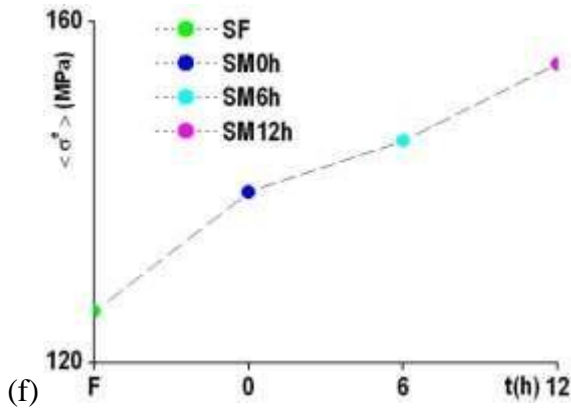


Fig.III.3 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la contrainte moyenne d'élasticité ($\langle \sigma^e \rangle$ – temps de maturation), (h) – secteur $\langle \sigma^e \rangle$ de l'alliage de fonderie $AlSi_{12}CuMg$ aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés: (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle \sigma^e \rangle$ - contrainte moyenne d'élasticité, S - Sable .

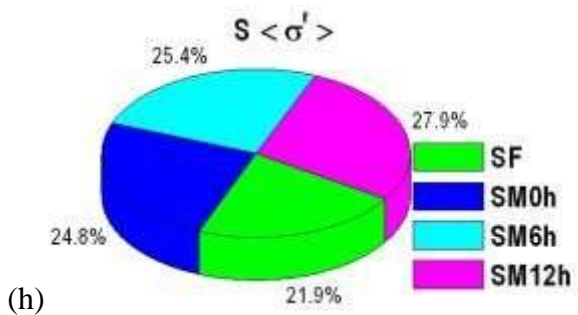
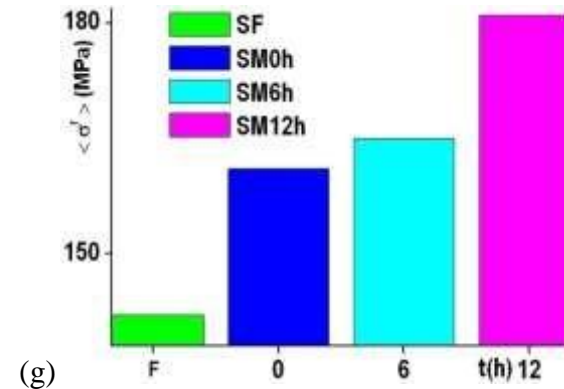
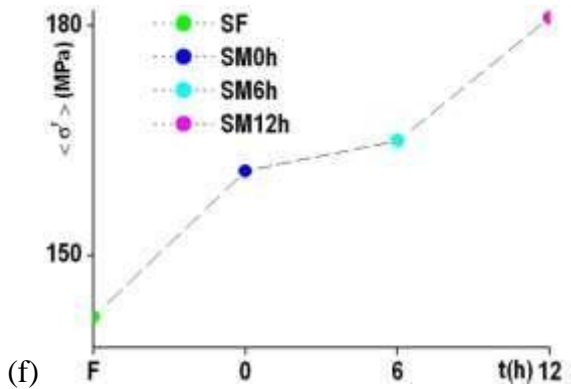


Fig.III.4 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la contrainte moyenne de rupture ($\langle \sigma^r \rangle$ – temps de maturation), (h) – secteur $\langle \sigma^r \rangle$ de l'alliage de fonderie $AlSi_{12}CuMg$ aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés : (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle \sigma^r \rangle$ - contrainte moyenne de rupture, S – Sable.

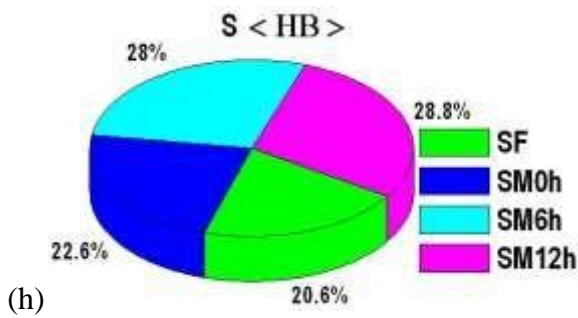
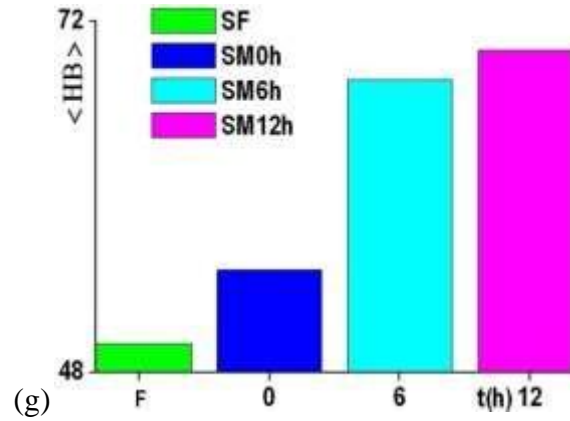
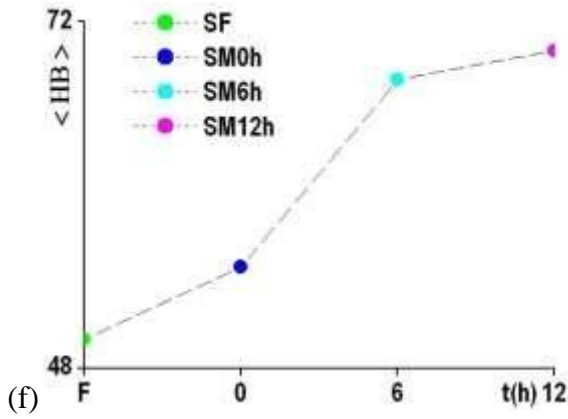


Fig.III.5 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la dureté Brinell (HB – temps de maturation), (h) – secteur < HB > de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: < F > et maturés notés: (b) – < M0h >, (c) - < M6h > et (d) - < M12h > avec < HB > - dureté Brinell moyenne, S - Sable.

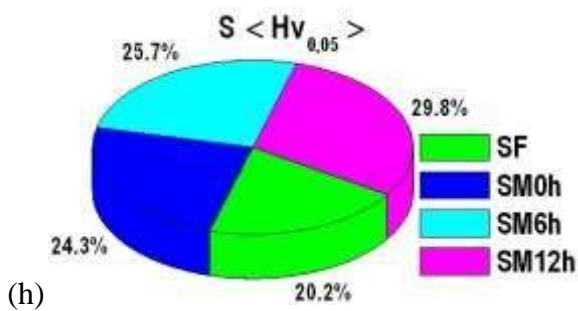
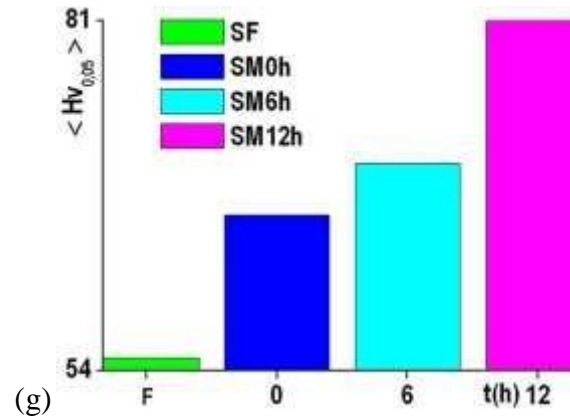
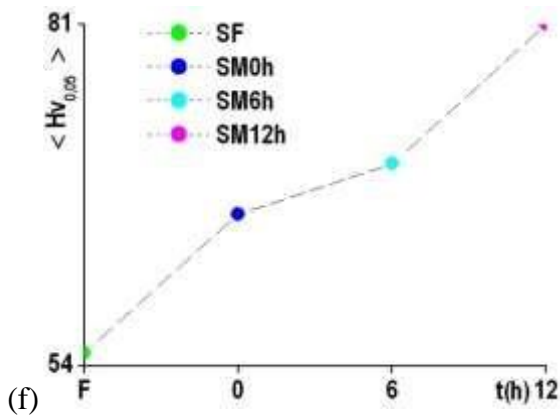


Fig.III.6 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la microdureté Hv_{0,05} – temps de maturation), (h) – secteur < Hv_{0,05} > de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: < F > et maturés notés: (b) – < M0h >, (c) - < M6h > et (d) - < M12h > avec < Hv_{0,05} > - dureté Vickers moyenne, S - Sable.

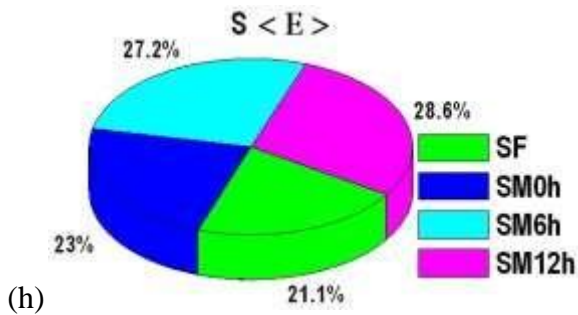
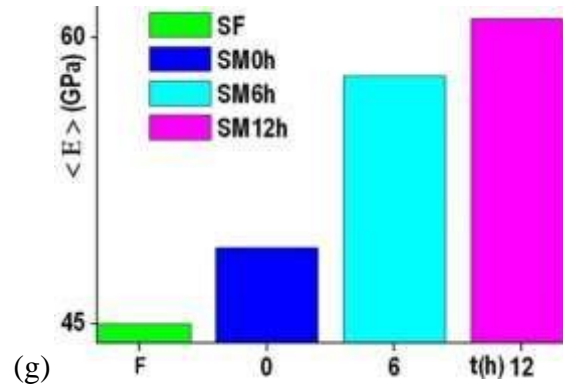
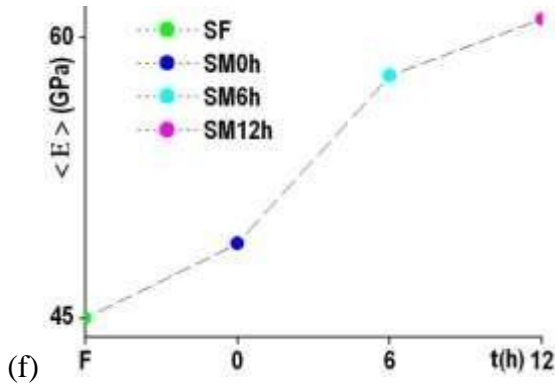


Fig.III.7 – (f) - graphe et (g) - histogramme du module d'Young moyen ($\langle E \rangle$ – temps de maturation), (h) – secteur $\langle E \rangle$ de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés : (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle E \rangle$ - module d'Young moyen, S - Sable .

III.3.2.2 - DUCTILITE

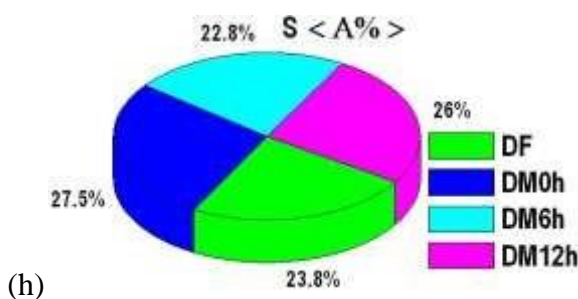
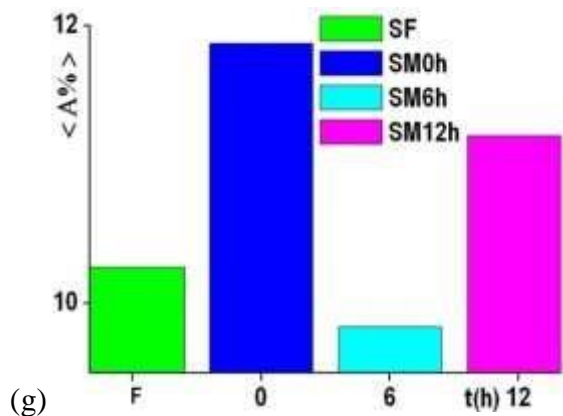
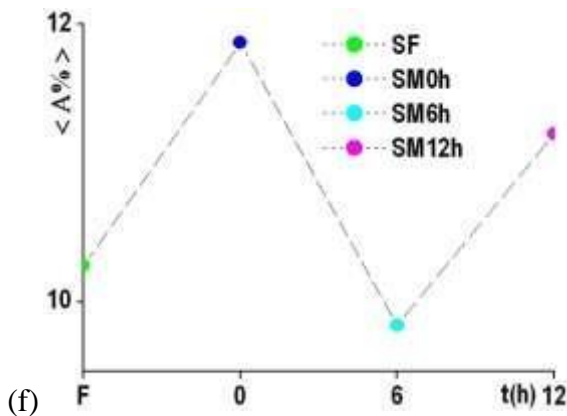


Fig.III.8 – (f) - graphe et (g) - histogramme de l'allongement moyen ($\langle A\% \rangle$ – temps de maturation), (h) - secteur $\langle A\% \rangle$ de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés : (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle A\% \rangle$ - allongement moyen en pourcentage, S – Sable.

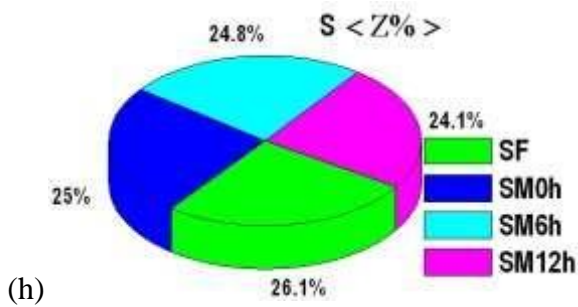
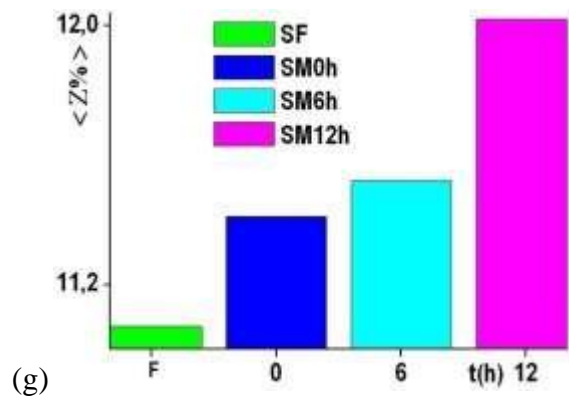
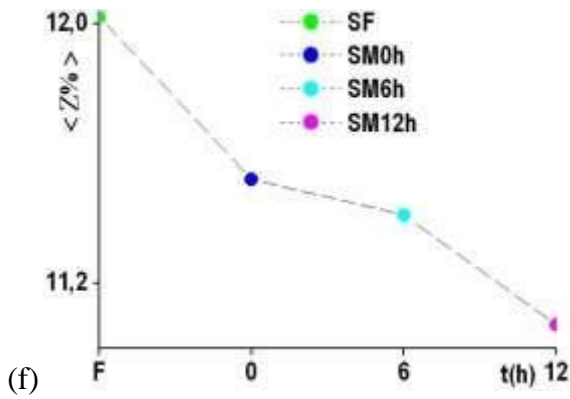


Fig.III.9 – (f) - graphe et (g) - histogramme du coefficient moyen de striction ($\langle Z\% \rangle$ - temps de maturation), (h) – secteur $\langle Z\% \rangle$ de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés: (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle Z\% \rangle$ - coefficient moyen de striction, S – Sable.

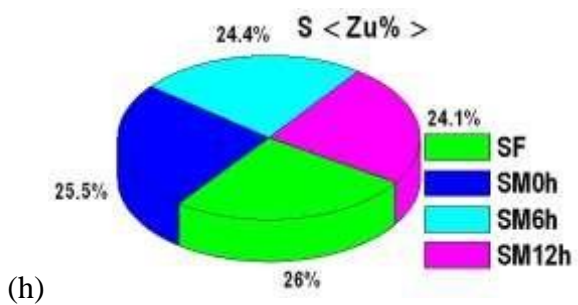
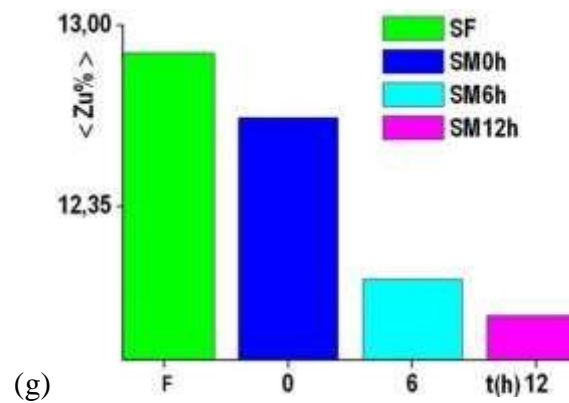
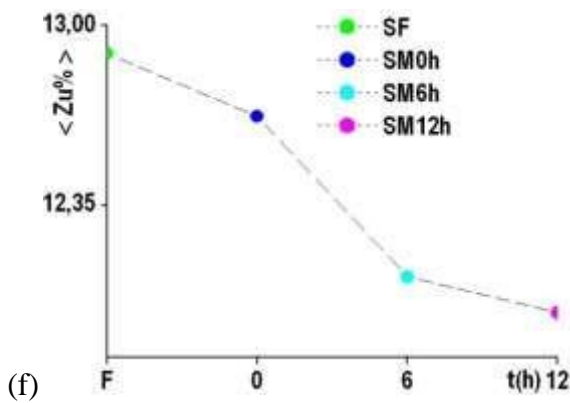


Fig.III.10 – (f) - graphe et (g) - histogramme de l’allongement moyen de striction ($\langle Zu\% \rangle$ - temps de maturation), (h) – secteur $\langle Zu\% \rangle$ de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés: (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle Zu\% \rangle$ - allongement moyen de striction, S - Sable.

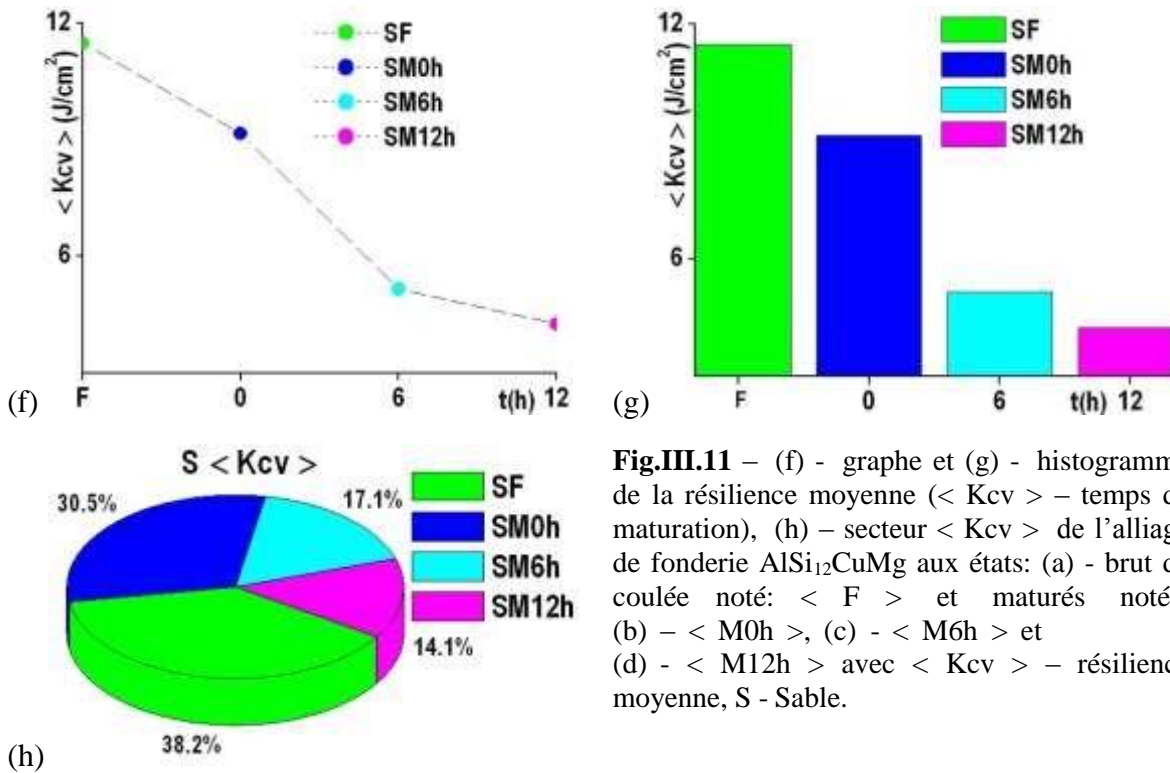


Fig.III.11 – (f) - graphe et (g) - histogramme de la résilience moyenne ($\langle Kcv \rangle$ – temps de maturation), (h) – secteur $\langle Kcv \rangle$ de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés: (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$ et (d) - $\langle M12h \rangle$ avec $\langle Kcv \rangle$ – résilience moyenne, S - Sable.

DISCUSSION

Dans ce mode de coulée en sable, on observe la courbe moyenne de l’état $\langle M12h \rangle$ est en dessus de toutes les courbes des autres états (Fig.III.1 – (e)) 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 $\langle HB \rangle$, la microdureté $\langle Hv_{0.05} \rangle$ 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 $\langle M12h \rangle$ Fig.III.[2 – 7] au détriment des propriétés mécaniques de ductilité extrinsèques qui sont $\langle A\% \rangle$ - allongement en pourcentage, $\langle Zu\% \rangle$ - 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 $\langle M12h \rangle$ Fig.III.[8 – 11].

Les Fig.III.1- [(a), (b), (c), (d) et (e)] courbes de traction et de comparaison (contrainte – déformation) moyennant une série de 5 éprouvettes identiques de l’alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états : (a) - brut de coulée noté : $\langle F \rangle$ et maturés notés : (b) – $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$, (d) - $\langle M12h \rangle$ et (e) – groupement de comparaison des 4 états correspondants nous montrent que :

- Les déformations à rupture ainsi que les énergies de rupture sont faibles sans présence du domaine plastique hétérogène car l’endommagement s’est produit d’une manière brutale ; 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 droite verticale : chute brutale de $\langle \sigma^M \rangle$ à $\langle \sigma^r \rangle$ avec - $\langle \epsilon^m \rangle = \langle \epsilon^r \rangle = Cste$ (Fig.III.1),

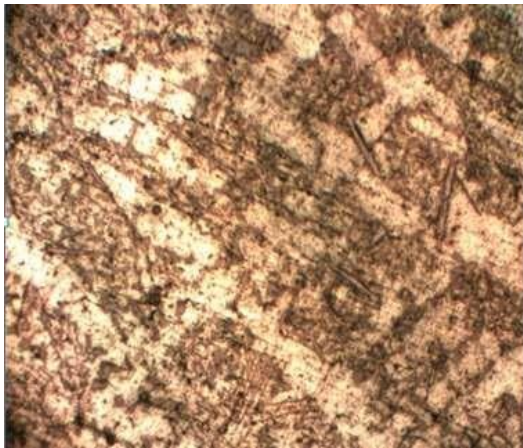
- Les allongements à la rupture sont faibles (Fig.III.8),
- Les valeurs des coefficients de striction Z sont faibles (Fig.III.9),
- La résilience Kcv est faible (Fig.III.11),
- les faciès de rupture en traction (Fig.III.14) présentent un aspect brillant à grains.

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

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

Dans ce cas, on est, probablement, en présence du mode de rupture des types I avec arrachements instantanés de toute la surface de l’éprouvette pour l’obtention d’une surface de rupture horizontale avec $\alpha = 0^\circ$.

III.4- MICROSTRUCTURE DE L’ALLIAGE DE FONDERIE AlSi12CuMg

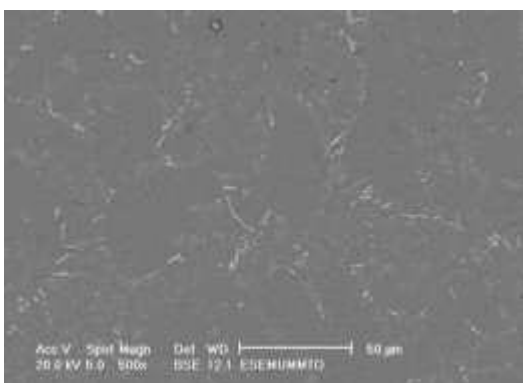


Fx100

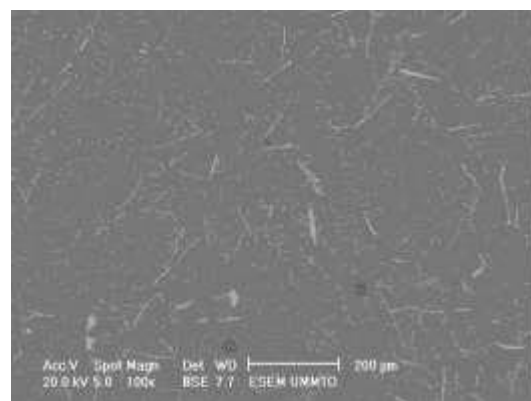


M12hx100

Fig.III.12 - Structures micrographiques de l’alliage de fonderie AlSi12CuMg

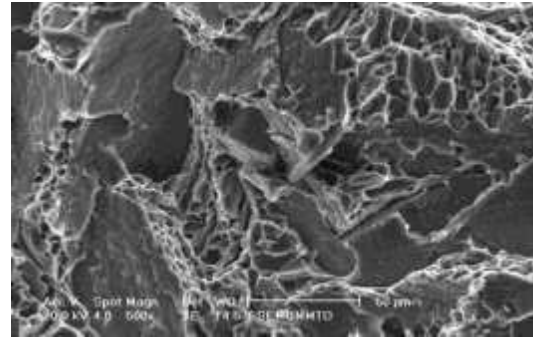
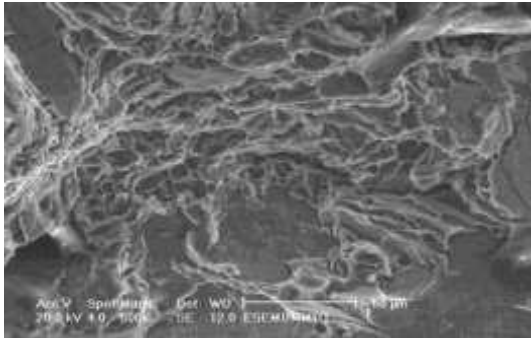


F



M12h

Fig.III.13 - Microstructures obtenues au MEB de l’alliage de fonderie AlSi12CuMg



F

M12h

Fig.III.14 - Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l'alliage de fonderie AlSi12CuMg

III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIE

Lors de la coulée en sable, la solidification se produit beaucoup plus lentement. Il en résulte une structure plus grosse Fig. III. (12 et13) (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 AlSi12CuMg 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'aditions (Si, Cu 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 d'une part par ajout volontaire de trois principaux éléments (Si, Cu, et Mg) à l'aluminium, d'autre part en provoquant la formation de précipités finement dispersés (Mg_2Si , Al_2Cu , $Al_2CuMg...$ 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'aditions (Si, Cu 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 microdureté.

III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Les Fig.III.1 – [(a), (b), (c), (d) et (e)] et les Fig. III.[2 – 11] 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 $\langle HB \rangle$, la microdureté moyenne $\langle Hv_{0,05} \rangle$, 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 $\langle Zu\% \rangle$ et la résilience moyenne $\langle Kcv \rangle$ en fonction du temps de maturation de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg aux états: (a) - brut de coulée noté: $\langle F \rangle$ et maturés notés: (b) - $\langle M0h \rangle$, (c) - $\langle M6h \rangle$, (d) - $\langle M12h \rangle$ et (e) – groupement des 4 états. Pour le mode de la coulée en sable, on constate que les graphes des contraintes, de la dureté Brinell, de la microdureté et du module d'Young en fonction du temps de maturation croissent de l'état brut de coulée, pour atteindre leurs valeurs maximales à l'état M12h 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, la microdureté 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 considéré car le processus de vieillissement naturel s'est achevé au bout de 12h de maturation suivi d'un revenu complet à 160°C pendant 6h.

III.7 - CONCLUSION

L'analyse des résultats expérimentaux montrent que le meilleur compromis de l'alliage de fonderie AlSi₁₂CuMg 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 de fonderie AlSi₁₂CuMg suivi d'une maturation de 12h pour les pièces de résistance. Donc l'alliage d'AlSi₁₂CuMg est un alliage de fonderie 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'influence du temps de maturation en le faisant varier par incrément de 6h de notation suivante – Maturation zéro heure : notée - M0h, Maturation six heures : notée - M6h et Maturation douze heures : notée - M12h sur l'évolution des caractéristiques de résistances, de ductilité et microstructurales de l'alliage de fonderie AlSi12CuMg coulé en sable par gravité.

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 ajout d'éléments d'additions (Si, Cu, Mg etc.) concernant l'alliage de fonderie AlSi12CuMg.

Les résultats nous montrent que l'alliage AlSi12CuMg possède des propriétés mécaniques intéressantes au temps de maturation noté – M12h.

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 en Al₂Cu, ce qui fait augmenter les différentes contraintes, la dureté Brinell et la microdureté Vickers de l'alliage.

Les quatre (4) temps de maturation respectifs suivis de revenus considérés provoquent la migration des éléments d'addition principalement (Si, Cu et Mg) vers les dislocations avec apparition de différents précipités (Mg₂Si, Al₂Cu, Al₂CuMg etc.) de différents genres qui bloquent leurs mouvements. Ces phénomènes conduisent à l'élévation des propriétés mécaniques de résistances 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 le temps de maturation noté – M12h à propriétés maximales suivie d'un revenu à 160°C pendant 6 heures avec un refroidissement à l'air libre.

Donc l'alliage de fonderie AlSi12CuMg est un matériau à traitement thermique.

Références Bibliographiques

- [1] Jean-Paul Baillon, Jean-Marie Dorlot, Des Matériaux, p.729, 3eme édition, école polytechnique de Montréal, Montréal (2000).
- [2] Jean Baralis, Gérard Maeder, Précis de Métallurgie : (Elaboration, structure-propriétés, normalisation), p.232, 1ereédition, Afnor-Nathan, Paris (1997).
- [3] M. Colombié et Coll, Matériaux industriels : Matériaux métalliques, p.867, Dunod, Paris (2000).
- [4] J. Philibert, A. Vignes, Y. Brechet, P. Combrade, Métallurgie du minerai au matériau, p.1107, Masson, Paris (1998).
- [5] G. Fancy Et Pompidou, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation, AFNOR 2 eme édition 1992.
- [6] Cahier de charge (fonderie d'aluminium) de SONACOM document N 8056, Année d'édition 1978.
- [7] Brunos DUBOS, Pierre SAINFORT. Techniques de l'ingénieur ; Durcissement par précipitation des alliages D'aluminium.
- [8] Roger DEVELAY, Techniques de l'ingénieur ; Traitements thermiques des alliages d'aluminium
- [9] Centre de formation professionnelle de La Baie, Cahier de notes de cours du DEP Fonderie–Module 18 section 3–Traitements thermiques sur alliages d'aluminium, 2012
- [10] Alliage-d-aluminium-evolution-de-la-microstructure-et-proprietes-mecanique. ; FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT DEPARTEMENT DE METALLURGIE, 2018
- [11] I. Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques, p.413, 4eme édition, Mir, Moscou (1986).
- [12] Recueil des normes françaises 1995 : Fonderie tome 3- alliages d'aluminium, de cuivre et autres non ferreux, p.521, 6emeédition, Afnor- Bnif, Paris (1995).
- [13] Des matériaux ; Jean-Paul Baillon, Jean-Marie Dorlot ; Presses inter Polytechnique, 2000
- [14] Gérard de Smet, La pratique des traitements thermiques des métaux industriels, Dunod, Paris (1972).
- [15] D. Altenpohl, Un regard à l'intérieur de l'aluminium, p.272, Feldmeilen, Suisse (1976)
- [16] Michel F. ashby, David R.H. Jones, Matériaux: microstructure et mise en œuvre (tome 2), p.385, Dunod , Paris (1991).
- [17] Pierre Papon, Jaques Leblond et Paul H.E. Meijer, Physique des transitions de phase: concepts et applications, p.406, 2eme édition, Dunod, Paris (2002).

- [18] J.U. Ejiofor and R.G. Reddy, Developments in the Processing and Properties of Particulate Al-Si Composites, JOM 49 (11) (1997) 31-37.
- [19] Centre d'apprentissage 3D ;Résistance des matériaux d'impression 3D : Module de Young et résistance à la traction
- [20] Bruce Chalmers, Structure et propriétés des solides : Introduction à la science des matériaux, p.159, Masson, Paris (1987).
- [21] Gérard Lesoult, Techniques de l'ingénieur : Solidification: Cristallisation et microstructures M 58, p.26, Dunod - Afnor, Paris (2000)