

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY de TIZI-OUZOU



جامعة مولود معمري - تيزي وزو

Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

OPTION - Génie Mécanique
SPECIALITE – Génie Des Matériaux

Présenté par
MEHDI Zohra

THEME

**DETERMINATION DES PROPRIETES ELASTIQUES PAR LES ESSAIS DE
TRACTION ET D'ULTRASON DE L'ALLIAGE DE FONDERIE AISi13Mg**

Devant le jury composé de

M ^f .	BILEK	Ali	Professeur	UMMTO	President
M ^f	ZAZI	Nacer	Professeur	UMMTO	Examineur
M ^f .	HAKEM	Ahmed	MCA	UMMTO	Directeur
Mr	TAZROUT	Mohand	MCB	CRTI	Co-Rapporteur

Promotion : 2018

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé plus particulièrement au sein de la Société Nationale des Véhicules Industriels (SNVI), Unité Fonderie Aluminium de Rouïba et des laboratoires: de Mécanique des Sciences Des Matériaux du Département de Génie Mécanique et de Hasnaoua I de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et d'ultrasons du Centre de Recherche des Technologies Industriels (CRTI) de Chéraga d'Alger.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur Ahmed HAKEM (MCA) et directeur de mon mémoire d'avoir accepté de m'encadrer et de diriger ce modeste travail dont je lui témoigne toute ma gratitude pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a laissé dans la conduite de ma recherche et pour tous les conseils qu'il m'a prodigués durant cette étude.

Je tiens à remercier le personnel de la bibliothèque et du laboratoire des Sciences Des Matériaux de Département de Génie Mécanique ainsi que celui de la SNVI de Rouïba et du CRTI de Chéraga.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements pour monsieur BILEK Ali professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.

Que monsieur TAZEROUT Mohand ainsi que l'Ingénieur du Laboratoire d'ultrasons de CRTI Mr CFEURFA Said trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements pour leurs aides précieuses.

J'exprime ma gratitude à monsieur ZAZI Nacer professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu pour la concrétisation de ce travail.

Divers personnes ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je tiens à leur exprimer mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Partie I : Aperçu bibliographique	
Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages	
I.1.1.Introduction.....	3
I.1.2. But recherché des alliages d'aluminium.....	3
I.1.3.Propriétés de l'aluminium.....	4
I.1.3.1. Propriétés physiques.....	4
I.1.3.2.Propriétés mécaniques.....	4
I.1.3.3. Propriétés chimiques.....	5
I.1.4.Alliages a base d'aluminium.....	5
I.1.4.1.Alliages corroyés (de corroyages).....	5
I.1.4.1.1.Alliages trempant.....	5
I.1.4.1.2.Alliages non trempant.....	6
I.1.4.2.Alliages moulés (de moulage).....	6
I.1.4.2.1.Alliages AL-Si.....	6
I.1.4.2.2.Alliages 44100 (Al-Si13 Alpax).....	7
I.1.4.2.3.Alliages Al-Si-Mg.....	7
I.1.4.2.4.Alliages (Al-Mg).....	7
I.1.4.2.5Moulages spéciaux.....	7
I.1.4.3.Alliages de frittage.....	7
I.1.5.Désignation des alliages d'aluminium.....	7
I.1.5.1.Désignation de la composition.....	7
I.1.5.2.Désignation numérique.....	8
I.1.5.3.Désignation symbolique.....	8
I.1.6.Etats de livraison et états métallurgiques.....	8
I.1.6.1.Etats de livraison.....	8
I.1.6.2.Etats métallurgiques.....	9
I.1.7.Diagramme d'équilibre Al-Si.....	12
I.1.7.1.Influence du silicium.....	12
Chapitre I.2 : Elaboration des alliages d'aluminium	
I.2.1.Introduction.....	13
I.2.2.Domaine d'utilisation.....	13
I.2.3. Minerais et traitement.....	13
I.2.3.1.Extraction de l'alumine de la bauxite par hydrométallurgie.....	13
I.2.3.2.Electrométallurgie.....	14
I.2.3.3.Affinage de l'aluminium avant coulée.....	15
I.2.4.Matériels utilise.....	16

I.2.4.1.Le four de fusion.....	16
I.2.4.2.Le four de maintien.....	16
I.2.4.3.La poche de coulée.....	16
I.2.5.Règles de fusion.....	17
I.2.5.1.Température.....	17
I.2.5.2.Gaz et oxydation.....	17
I.2.5.3.Fer.....	17
I.2.5.4.Flux.....	17
I.2.6. La Coulée.....	17
I.2.6.1.Dégazage.....	17
I.2.6.2.L'affinage.....	18
I.2.7.Influence des éléments d'addition.....	18
I.2.7.1.Silicium.....	18
I.2.7.2.Fer.....	19
I.2.7.3.Cuivre, Nickel, Zinc.....	19
I.2.7.4.Manganèse.....	19
I.2.7.5.Magnésium.....	19
I.2.7.6.Titane.....	19
I.2.7.7.Cobalt.....	19
I.2.8.Le moulage.....	19
I.2.8.1. Moulage en sable.....	19
I.2.8.2. Moulage en coquille.....	20
I.2.9.Défauts des pièces moulées.....	21
I.2.9.1.Grains insuffisamment fins.....	21
I.2.9.2.Piqures.....	21
I.2.9.3.Retassures.....	21

Chapitre I.3. Traitements thermiques, précipitations et structures

I.3.1.Introduction.....	22
I.3.2.désignations des traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	22
I.3.2.1.Recuit d'homogénéisation.....	22
I.3.2.2.La trempe.....	22
I.3.2.3.Traitement de maturation (vieillessement naturel).....	22
I.3.2.4.Revenu (vieillessement artificielle).....	23
I.3.3.Microstructure.....	23
I.3.3.1.La macrographie.....	23
I.3.3.2. La micrographie.....	23
I.3.4.Paramètres micro structuraux.....	24
I.3.4.1.Observation par microscope optique.....	24
I.3.4.1.1.Grains et joints de grains.....	24
I.3.4.1.2.Phase.....	24
I.3.4.1.3.Précipités.....	25
I.3.4.1.4.Pores.....	25
I.3.4.2.Observation par microscope électronique.....	25

I.3.4.2.1. Microscopie électronique à balayage.....	25
I.3.4.2.2. Microscope électronique de transmission.....	26
I.3.5. Importance de la métallographie.....	26

Chapitre I.4 : Propriétés et essais mécaniques

I.4.1. Les propriétés mécaniques.....	27
I.4.1.1. Les propriétés élastique (déformation élastique).....	27
I.4.1.2. Comportement élasto-plastique.....	27
I.4.1.3. Déformation plastique (plasticité).....	28
I.4.1.4. Ténacité.....	28
I.4.1.5. Ductibilité.....	28
I.4.2. Les essais mécaniques.....	29
I.4.2.1. Les essais destructifs.....	29
I.4.2.1.1. Essai de traction.....	29
I.4.2.1.2. Essai de résilience ou essai Charpy.....	32
I.4.2.1.3. Essai de dureté.....	33
a-définition.....	33
b-Principe de l'essai.....	33
c-Types d'essai.....	34
I.4.3. les essais non destructifs.....	36
I.4.3.1. Les différentes techniques de contrôles non destructifs.....	36
I.4.3.2. Domaines d'utilisation.....	36
I.4.3.3. Les principaux défauts rencontrés.....	36
a-Défauts d'élaboration et de transformation.....	36
b-Défauts de fabrication ou d'assemblage.....	36
c- Défauts de fonctionnement.....	37
I.4.3.4. Les ultrasons.....	37
a-les ondes longitudinales (OL).....	37
b-les ondes transversales (OT).....	37
I.4.3.5. Les techniques de contrôle par ultrasons.....	37
a-Le contrôle par contact.....	37
b-Méthode par réflexion.....	38
c-transmission.....	38
d-Le contrôle par immersion.....	39
I.4.3.6. Les équipements.....	39
I.4.3.7. Avantages, inconvénients.....	40

Chapitre I.5: Défauts cristallins

I.5.1. Introduction.....	41
I.5.2. Les défauts cristallins.....	41
I.5.2.1. Défauts ponctuels (sans dimension).....	41
I.5.2.1.1. Lacune.....	42

I.5.2.1.2. Atome auto interstitiel.....	42
I.5.2.1.3. Atome étranger en substitution.....	42
I.5.2.1.4. Atome étranger en insertion.....	42
I.5.2. 2. Les défauts linéaires : (dislocations).....	42
I.5.2.2.1. Les dislocations coin.....	42
I.5.2.2.2. Les dislocations vis.....	43
I.5.2.2.3. Dislocation mixte.....	43
I.5.2. 2.4. Vecteur de burger b.....	44
I.5.2. 3. Défaut à deux dimensions (défauts surfaciques).....	44
I.5.2.3.1. Joints de grains.....	44
I.5.2.3.2. Macle.....	45
I.5.2.4. Les défauts à trois dimensions (défauts volumiques).....	45
I.5.2.4.1. Les pores.....	45
I.5.2.4.2. Les inclusions.....	45
I.5.2.4.3. Les précipités.....	45
I.5.3. La diffusion.....	46
I.5.3.1. Définition.....	47
I.5.3.2. Mécanisme de la diffusion.....	47
I.5.3.3. La loi de la diffusion.....	47
I.5.3.3.1. Etat stationnaire (première loi de fick).....	47
I.5.3.3.2. Etat non stationnaire.....	48

Partie II : Méthodes expérimentales

Chapitre II.1: appareillages

II.1.1. Introduction.....	49
II.1.2. Appareillages.....	49
II.1.2.1.Matière première.....	49
II.1.2.2. Four de fusion.....	49
II.1.2.3.Four de maintien.....	50
II.1.2.4.Poche de coulée.....	50
II.1.2.5.Poste pour le moulage en sable.....	50
II.1.2.6.grenailleuse.....	51
II.1.2.7. Eprouvettes en sable.....	51
II.1.2.8.Poste pour l'ébarbage.....	51
II.1.2.9. Fraiseuse.....	52
II.1.2.10.Une meule.....	52
II.1.2.11.Four de trempe.....	52
II.1.2.12.Four de revenu.....	52
II.1.2.13.Machine de traction.....	53
II.1.2.14.Les polisseuses.....	53
II.1.2.15.duromètre.....	54
II.1.2.16. Microscope.....	54
a-Microscope optique.....	55
b-Microscope électronique à balayage.....	55

II.1.2.17. l'ultrason.....	55
Chapitre II.2 : Méthodes expérimentales et élaborations	
II.2.1. Matériau étudié.....	56
II.2.2. Elaboration du matériau étudié.....	56
II.2.2.1. La fusion.....	56
II.2.2.2. Dégazage.....	56
II.2.2.3. L'affinage.....	57
II.2.2.4. La coulée.....	57
II.2.2.5. Moulage sable.....	57
II.2.3. Traitements thermiques.....	57
II.2.3.1. Cycle thermique.....	58
II.2.4. Essais mécaniques.....	58
II.2.4.1. Essais de traction.....	58
II.2.4.2. Essais de dureté.....	59
II.2.4.3. Essais de microdureté.....	59
II.2.5. Examen micrographique.....	59
II.2.5.1. Préparation des surfaces.....	59
II.2.5.2. Attaque chimique.....	60
II.2.5.3. Microscopie.....	60
II.2.5.3.1. Microscope optique.....	60
II.2.5.3.2. Microscope à balayage (MEB).....	60
 Partie III. Résultats et interprétations	
III.1. Effet de la maturation sur l'évolution des propriétés de traction et structurales de l'alliage.....	61
III.1.1. Introduction.....	61
III.1.2. Effet de durcissement par précipitation sur l'essai de traction.....	62
III.1.2.1. Caractéristiques de résistances.....	62
III.1.2.2. Caractéristiques de ductilités.....	68
III.1.2.3. Microstructures de l'alliage AlSi13Mg.....	71
III.1.2.4. Interprétations et discussions.....	72
III.2. détermination des propriétés élastiques par ultrason de l'alliage de fonderie AlSi13Mg.....	73
III.2.1. Signaux.....	73
III.2.2. Caractéristiques élastiques par ultrason.....	74
III.2.3. Etude comparative des propriétés élastiques de traction et ultrason de l'alliage de fonderie AlSi13Mg.....	76
 Conclusion générale.....	 78
 Références bibliographique.....	 79

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

Al : Aluminium.

Si : Silicium.

Mg : Magnésium.

Cu : Cuivre.

Z : Nombre atomique.

CFC : Cubique à faces centrées.

M : Masse atomique.

d : Densité.

L_0 : longueur initiale (mm).

S_0 : section initiale (mm^2).

F : effort de traction (N).

R_m : Résistance à la rupture.

R_e : Résistance à la limite d'élasticité.

A% : Allongement à la rupture.

L_u : est la longueur de l'éprouvette à la rupture en U.

Z% : Coefficient de striction.

Z_U % : Allongement de striction.

S : Surface (cm^2).

W : Travail ou énergie (J).

σ : Contrainte.

σ_c : Contrainte conventionnelle.

σ_r : Contrainte rationnelle.

E : module de Young (GPa).

ε : Déformation.

K : constante.

n : coefficient d'écroutissage.

: Coefficient de poisson.

H : Dureté.

HB : Dureté brinell.

HV : Dureté Vickers.

D : Diamètre de la bille en millimètres.

d : Diamètre de l'empreinte en millimètre.

HR : Dureté Rockwell.

HRB : Dureté Rockwell à bille.

HRB : Dureté Rockwell à cône diamant.

K : Résilience (J/Cm^2).

KCV : Résilience de l'éprouvette en V (J/Cm^2).

J : flux.

D : Est le coefficient de diffusion en m^2/s .

C : est la concentration de l'espèce diffusante.

Do : constante.

T : la température (C°).

Q_o : une énergie d'activation de la diffusion.

grad C : le gradient de la concentration.

: Ecotype.

F : Etat de brut de coulée.

T : Etat trempé.

M (0,...,24) h : Etats maturés.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1.1	Microstructures de l'eutectique Al-Si.....	7
Figure I.1.2	Diagramme d'équilibre Al-Si.....	12
Figure I.2.1	Procédé Bayer.....	14
Figure I.2.2	Procédé général.....	15
Figure I.2.3	Le cycle de vie de l'aluminium.....	16
Figure I.2.4	Coupes schématiques d'une pièce.....	20
Figure I.4.1	Courbe contrainte-déformation.....	27
Figure I.4.2	aire sous tendue par la courbe rationnelle de ténacité.....	28
Figure I.4.3	Comportement possible du matériau.....	29
Figure I.4.4	Principe de l'essai.....	30
Figure I.4.5	Eprouvette de traction.....	30
Figure I.4.6	Machine de traction.....	31
Figure I.4.7	Montage de l'éprouvette entre les deux mors de la machine de traction	31
Figure I.4.8	Courbe de traction.....	31
Figure I.4.9	Module de Young.....	32
Figure I.4.10	Eprouvette Charpy normalisée.....	32
Figure I.4.11	Machine de résilience.....	33
Figure I.4.12	essai Charpy.....	33
Figure I.4.13	Principe de l'essai de brinell.....	34
Figure I.4.14	Principe de l'essai Vickers.....	35
Figure I.4.15	Essai de dureté Rockwell avec bille.....	35
Figure I.4.16	Essai de dureté Rockwell avec cône.....	35
Figure I.4.17	Contrôle par contact.....	37
Figure I.4.18	Contacte par réflexion.....	37
Figure I.4.19	Contrôle par transmission.....	38
Figure I.4.20	Contrôle par immersion.....	38
Figure I.4.21	Différents type d'appareils.....	39
Figure I.5.1	principaux défauts ponctuels dans les cristaux.....	40
Figure I.5.2	Dislocation coin.....	42
Figure I.5.3	Dislocation vis.....	42
Figure I.5.4	Dislocation mixte.....	43
Figure I.5.5	Joints de grains.....	44
Figure I.5.6	Représentation d'un pore.....	44
Figure : I.5.7	Représentation schématique de précipités dans les solides cristallins	45
Figure I.5.8	Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique.....	46
Figure II.1.1	Lingots d'aluminium neufs.....	48
Figure II.1.2	Retours de fonderie.....	48
Figure II.1.3	Four de fusion.....	48
Figure II.1.4	Four de maintien.....	49

Figure II.1.5	Poche de coulée.....	49
Figure II.1.6	Châssis supérieur – Châssis inférieur.....	49
Figure II.1.7	Poste pour le moulage en sable.....	50
Figure II.1.8	Poste de démoulage.....	50
Figure II.1.9	Grenailleuse.....	50
Figure II.1.10	Empreintes supérieure et inférieure du moule en sable.....	50
Figure II.1.11	Poste de l'ébarbage.....	50
Figure II.1.12	Fraiseuse.....	51
Figure II.1.13	Meule.....	51
Figure II.1.14	Four de trempe.....	52
Figure II.1.15	Four de revenu.....	52
Figure II.1.16	Machine de traction.....	52
Figure II.1.17	Polisseuse à deux disques.....	52
Figure II.1.18	Polisseuse à un disque.....	52
Figure II.1.19	Duromètre.....	53
Figure II.1.20	Faciès de rupture.....	53
Figure II.1.21	Microscope optique.....	54
Figure II.1.22	Microscope électronique à balayage.....	54
Figure II.1.23	Appareil de mesure d'ultrason.....	54
Figure II.1.24	Mesure en largeur.....	54
Figure II.2.1	Cycle Thermique.....	57
Fig. II.2.2	Formes et dimensions des éprouvettes de traction coulées en sable.....	57
Figure II.2.3	échantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique	58
Fig.III.1	Courbes de traction de la contrainte en fonction de la déformation de l'alliage AlSi13Mg aux états: (a)- brut de coulée, (b)- < M0h >, (c)- < M6h >, (d)- < M12h >, (e)- < M18h >, (f)- < M24h > et (g)- groupement des 6 états correspondants avec : < >- contrainte moyenne, (%)- déformation...	63
Fig.III.2	(a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la contrainte maximale < σ_m > en fonction du temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg.....	64
Fig.III.3	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de la contrainte moyenne d'élasticité < σ_e > en fonction du temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg.....	64
Fig.III.4	(a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la contrainte moyenne de rupture < σ_r > en fonction du temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg.....	65
Fig.III.5	(a)- graphe, (b)- histogramme et (c) – secteur de la dureté Brinell < HB > en fonction du temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg.....	65
Fig.III.6	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de la microdureté moyenne < $Hv_{0,05}$ > en fonction de temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg	66
Fig.III.7	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de module d'Young < E > en fonction de temps de maturation de l'alliage AlSi13Mg.....	66

Fig.III.8	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen ν en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	67
Fig.III.9	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de l’allongement $A\%$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	67
Fig.III.10	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur du coefficient de coefficient moyen de striction $Z\%$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	68
Fig.III.11	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de l’allongement moyen de striction $Z_u\%$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	68
Fig.III.12	(a)- graphe, (b) histogramme et (c) – secteur de la résilience moyenne K_{cv} en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	69
Fig.III.13	Structures micrographiques de l’alliage eutectique AlSi13Mg.....	70
Fig.III.14	Microstructures obtenues au MEB de l’alliage eutectique AlSi13Mg.....	71
Fig.III.15	Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l’alliage eutectique AlSi13Mg.....	71
Fig.III.16	Signaux enregistrés sur les éprouvettes prismatiques d’ultrason d’épaisseur ($e = 20$ mm) et de largeur ($l = 55$ mm) de l’alliage de fonderie AlSi13Mg aux états brut de coulée: F et maturés notés: $\langle M12h \rangle$ et $\langle M24h \rangle$	73
Fig.III.17	(a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du module d’Young moyen en épaisseur $\langle E_{ép} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	73
Fig.III.18	(a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du module d’Young moyen en largeur $\langle E_{larg} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	74
Fig.III.19	(a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen en épaisseur $\langle \nu_{ép} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	74
Fig.III.20	(a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen en largeur $\langle \nu_{larg} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	75
Fig.III.21	Groupement de – a – graphes et b – d’histogrammes de comparaison des modules d’Young moyens en épaisseur, largeur et en traction $\langle E_{ép, larg, traction} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	75
Fig.III.22	Groupement de – a – graphes et b – d’histogrammes de comparaison des coefficients de poisson moyens en épaisseur, largeur et en traction $\langle \nu_{ép, larg, traction} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1.1	Groupe d'alliages d'Aluminium.....	8
Tableau I.1.2	Désignation des états livraison.....	9
Tableau I.1.3	Désignation des états métallurgiques.....	9
Tableau I.1.4	Aptitudes technologiques et d'usage des alliages d'aluminium moulés. Code A=excellent, B=bon, C=moyen, D=médiocre, E=impropre.....	10
Tableau I.1.5	Compositions normalisées sur pièces selon norme NF EN 1706 (en % pondéral). Quand une seule valeur est indiquée, elle correspond à un max autorisé.....	11
Tableau II.2.1	Composition chimique de l'alliage étudié.....	55
Tableau II.2.2	Composition des lingots AlSi13, livrés par l'Aluminium Français...	55

INTRODUCTION GENERALE

Cette présente étude consiste principalement à étudier l'influence du temps de maturation en le variant par pas de six heures suivi immédiatement d'un vieillissement artificiel respectif sur l'évolution des propriétés de traction, de dureté, de microdureté, de résilience et de microstructure de l'alliage eutectique AlSi13Mg. Cet alliage est élaboré par la méthode de moulage en sable en utilisant le mode de coulée par gravitation et en considérant six états: F - brut de coulée, état de référence et maturations avec variation du temps par incrément de 6h (0, 6, 12, 18 et 24) h.

Grâce à sa moyenne résistance à la traction, ses excellentes conductibilités thermique et électrique et sa bonne résistance à la corrosion dans différents milieux, cet alliage constitue souvent une solution prometteuse à l'avenir dans la lutte contre la pollution à cause de leur propriété de légèreté réduisant ainsi la consommation en carburant. Cet alliage présente une très bonne coulabilité et il est très utilisé comme accessoires dans plusieurs réalisations de formes compliquées et de très faibles épaisseurs (couvercles, corps de pompe, pistons de moteurs, poulies de commande, culasses, bâtis, carcasses de boites à vitesse et d'avance...etc.).

Les pièces élaborées à partir de cet alliage font partie des composants rentrant dans diverses réalisations de la SNVI de Rouïba.

L'alliage qui régit notre étude est une nuance à 13% Si massique utilisée par la division fonderie aluminium de la SNVI de Rouïba et répondant aux exigences du marché national dans de très nombreux domaines industriels.

Le but des essais mécaniques est d'obtenir des valeurs des caractéristiques mécaniques qui seront ensuite utilisables dans le calcul de résistance des matériaux en service.

PRESENTATION DU MEMOIRE

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

PREMIERE PARTIE

Cette première partie nous livre un aperçu bibliographique et contient cinq chapitres.

Chapitre I.1 - Aluminium et ses alliages,

Chapitre I.2 - Elaboration de l'alliage AlSi13Mg,

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

Chapitre I.4 - Propriétés et Essais mécaniques,

Chapitre I.5 - Défauts cristallins.

DEUXIEME PARTIE

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

Chapitre II.1 - Appareillage,

Chapitre II.2 - Méthode expérimentale et élaboration de l'alliage AlSi13Mg.

TROISIEME PARTIE

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

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I.1 : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1. INTRODUCTION

A l'état naturel, l'aluminium pur n'existe pas. Très abondant dans la nature, ce métal se présente surtout sous formes d'hydroxydes. Après sa découverte en 1808 par le physicien anglais **Humphrey DAVY** (1778-1829), l'aluminium fut isolé pour la première fois en 1825 par le chimiste Danois Hans **OERSTED** lors d'une réaction chimique impliquant un amalgame du potassium. Le chimiste allemand **Friedrich WÖHLER** améliora le procédé d'Oersted en utilisant le potassium métallique entre 1827 et 1845. En France Henri **SAINTE CLAIRE DEVILLE** obtient le métal en réduisant le chlorure d'aluminium avec le sodium (métal) en 1854. Soutenu par Napoléon III, il créa un atelier expérimental et présenta les premiers lingots d'aluminium pur à l'Exposition universel de paris, en 1855. Depuis cette année l'aluminium a connu un développement spectaculaire. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et de ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par **Paul HEROULT** en France et Charles **MARTIN HALL** aux Etats-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux en tonnage et arrive en seconde position après les métaux ferreux. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. [8.11]

Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'aluminium : **léger, tenace, résistance à la corrosion, conducteur de la chaleur et de l'électricité, décoratif** ; les alliages d'aluminium se prêtent également à **tous les processus de transformation** : laminage, filage, matriçage, moulage, ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transport terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique.... [11]

I.1.2. BUT RECHERCHE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Le but recherché dans les alliages d'aluminium est de donner à celui-ci par des additions des métaux divers les qualités mécaniques qui lui manquent, tout en lui conservant ses propriétés fondamentales qui sont sa légèreté et sa malléabilité.

Les alliages d'aluminium contiennent donc en général de grosses proportions d'aluminium, par contre :

- **le silicium** : donne la fusibilité et favorise le moulage jusqu'aux limites des tolérances entre 9 et 10,5 % les variations du silicium ont peu d'influence sur les caractéristiques mécaniques, hors de ces limites, la structure cristalline et la façon dont l'alliage fait son retrait évolue si le silicium augmente, on risque d'avantage de voir apparaître dans les moulages des retassures internes.

Précautions : éviter tous mélange de jets d'autres alliages, diminuent ou augmentant la teneur en silicium au-delà des limites.

- **le zinc** : donne la résistance et la rigidité.
- **le cuivre et le nickel** : élèvent la température de fusion et permettent à l'alliage de travailler à des températures élevées.

- **le manganèse** : apporte de la dureté et améliore le polissage.
- **le magnésium** : permet le vieillissement (revenu à température ambiante), favorise l'in-oxydabilité et diminue la densité. Si la teneur en magnésium est supérieure à 0,35 % la dureté après traitement thermique croît rapidement, les allongements diminuent et l'alliage devient fragile. Pour le moulage en sable, il est préférable de limiter la teneur en magnésium à 0,30 %.

Si la teneur en magnésium est inférieure à 0,17 % la charge de rupture, la limite élastique et la dureté après traitement thermique diminue rapidement. La teneur en magnésium tend à diminuer pour les causes suivantes :

- ✓ Emploi de flux pour le traitement métallurgique du bain.
- ✓ Rectification d'un certain pourcentage de jets dans les charges.
- ✓ Maintien prolongé en fusion dans le cas de la coulée en coquille.
- ✓ Elle risque de ce fait, de descendre en dessous du minimum acceptable de 0,17 %.

Précaution :

Veiller à ne pas introduire dans les charges des jets d'autre alliages, ceux-ci doivent être classés avec soin, on peut les distinguer par des marques de peinture.

- **le fer** : la teneur en fer doit être inférieure à 0,65 %, si la teneur est supérieure le fer forme des cristaux lamellaires, qui diminuent les caractéristiques mécaniques, malgré la présence de manganèse aux teneurs prescrites.

Précaution :

- ✓ éviter d'utiliser des creusets en fonte.
- ✓ protéger soigneusement tous les outils de fusion et de coulée. [4.8.11]

I.1.3. PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

I.1.3.1. Propriétés physiques : L'aluminium est un élément du 3^{ème} groupe de la classification de Mendeleïev, dont :

- ✓ Son nombre atomique $Z = 13$.
- ✓ Sa masse atomique $M = 26,98 \text{ g/mol}$.
- ✓ Sa température de fusion est $660,4 \text{ °C}$, et celle d'ébullition est 2467 °C .
- ✓ Il cristallise dans un réseau CFC de paramètre $a = 4,0412 \text{ \AA}$.

Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7 g/cm^3 à température ambiante. Cette densité ne varie pas de façon sensible dans les alliages légers, elle reste toujours inférieure à 3 g/cm^3 . Sa conductibilité thermique est de 0.57 cal/cm.s.°C et sa conductibilité électrique est élevée ($2.6548 \text{ ohm. mm}^2/\text{m}$). [1.2.3]

I.1.3.2. Propriétés mécaniques : 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/mm^2 et il est de faible dureté. [1.3]

- **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%. [1]
- **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]

I.1.3.3. Propriétés chimiques : L'aluminium se distingue par sa résistance élevée à la corrosion du fait de la formation à la surface d'une couche protectrice (Al_2O_3).

La pureté du métal améliore sa résistance à la corrosion par les solutions salines et l'eau de mer ainsi que le brouillard aussi pour l'industrie chimique et agroalimentaire qui emploie un aluminium titrant au moins 99.5%.

La pluparts des acides minéraux attaquent l'aluminium, surtout l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique. Ainsi que les acides organiques, d'où l'emploi très répandu de ce métal dans l'industrie chimique. [5.6]

I.1.4. ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium non allié à caractéristiques très réduite, on procède souvent à l'addition d'autres éléments de nature différentes, ces éléments entrent en solution solide et peuvent également être présent sous forme de phases intermétalliques.

La composition de ces phases, leur finesse, répartition et cohérence avec la matrice d'aluminium, fragilité intrinsèque et stabilité thermique et mécanique sont également déterminantes pour les propriétés d'alliages d'aluminium.

On distingue trois grandes catégories d'alliages d'aluminium : [1.3]

I.1.4.1. Alliages corroyés (de corroyages) : Produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid, prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, profilés, tubes,...etc.) ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, forgeage et estampage. Suivant l'aptitude au durcissement par traitements thermiques on distingue :

I.1.4.1.1. Alliages trempant : c'est un alliage à durcissement structural, il est obtenu par traitement thermique.

Exemple : alliages Al-Mg-Si de la série 6000 : ils présentent les caractéristiques générales ci-dessous :

- ✓ Des caractéristiques mécaniques moyennes, mais suffisantes pour les applications prévues.
- ✓ Une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ce sont les alliages de filage par excellence, car ils permettent d'obtenir dans de très bonnes conditions économiques, des profils de forme pouvant être très complexe.
- ✓ Un bon comportement aux agents atmosphériques et une bonne aptitude au soudage et aux traitements de surface.
- ✓ Une bonne tenue aux basses températures mais une tenue à chaud limitée au-delà de 150°C. [4]

I.1.4.1.2. Alliages non trempant : c'est un alliage sans durcissement structurel, et avec ces alliages le durcissement est obtenu par l'effet combiné des éléments d'addition (durcissement par solution solide) et de l'écrouissage. De plus en combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitement thermique.

I.1.4.2. Alliages moulés (de moulage) : Produits obtenus par fonderie par coulée en sable (moule en sable) ou en coquille (moule en fonte ou en acier) ou encore par coulée sous pression. Les alliages appartiennent aux trois grandes familles suivantes :

- ✓ Aluminium de fonderie silicium (Al-Si), avec ou sans Magnésium.
- ✓ Aluminium- Silicium- Cuivre.
- ✓ Aluminium- Cuivre.
- ✓

Les autres familles sont : l'aluminium- Magnésium et l'aluminium- Zinc et divers.

Les deux premières familles sont les plus utilisées dans la fonderie. [4.6]

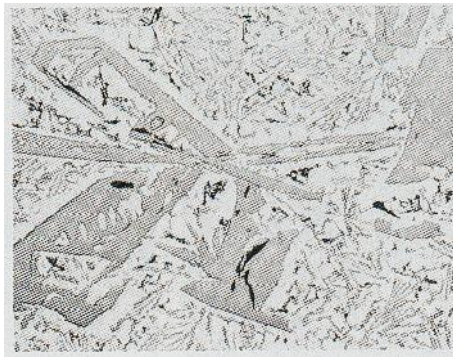
I.1.4.2.1. Alliages AL-Si : Les alliages au silicium sont les plus nombreux parmi ceux du moulage, il en existe plusieurs variantes environ 70% du tonnage des pièces moulées.

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

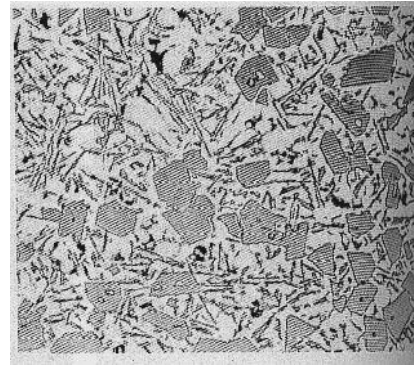
Leurs domaines d'applications sont très nombreux : appareils ménagers : brûleurs en A-M4, bras de suspensions automobile en A-S7G, blocs moteurs et culasses en A-S9U3, radiateurs de chauffage central en A-S12U.

Les alliages de fonderie au silicium, 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 des alliages dépendent de leur composition chimique, ainsi que du mode d'élaboration et des traitements thermiques effectués. **La figure I.1.1** nous montre la microstructure de l'eutectique Al-Si. [4]



a- avant modification,



b- après modification

Figure I.1.1. Microstructures de l'eutectique Al-Si

I.1.4.2.2. Alliages 44100 (Al-Si13 Alpax) : il est plus ancien et encore très utilisé du fait de son excellent aptitude au moulage et de sa bonne résistance à la corrosion (exemple : appareils ménagers, bâtiments, mécanique...).

I.1.4.2.3. Alliages Al-Si-Mg :

- ❖ l'alliage A-S7G, et ses variantes 42100 (A S7 G0, 3) et 42200 (A- S7 G0, 6) qui peuvent être traitées thermiquement, présentent de bonnes propriétés pour la coulée en sable et en coquille, une bonne aptitude à donner des pièces étanches au soudage, une bonne stabilité dimensionnelle à la corrosion.
- ❖ alliages 43300 (A-S10G) : pouvant également être coulés sous pression, sont utilisés pour des pièces mécaniques variées. Ils tendent cependant à être supplantés par les alliages A-S7G. [5]

I.1.4.2.4. Alliages (Al-Mg) : ces alliages présentent les qualités suivantes :

- ❖ usinage facile
- ❖ bonne aptitude à l'anodisation de protection et de décoration
- ❖ un aspect après polissage
- ❖ excellente tenue à la corrosion atmosphérique ou marine. [10]

I.1.4.2.5. Moulages spéciaux : De nombreuses nouvelles techniques de moulage ont été mise au point, telle la coulée centrifuge pour l'obtention des tuyaux et la réalisation des pièces de forme complexe ; c'est le cas du moulage sous pression dans lequel le métal est injecté liquide ou pâteux dans un moule métallique froid ou chauffé légèrement ; cette technique permet l'obtention de petites pièces en série très importante, elle se pratique essentiellement pour des alliages assez fusible à basse de zinc, de plomb, 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. [4]

I.1.4.3. Alliages de frittage : Produits obtenus par la méthode de la métallurgie des poudres qui est une méthode révolutionnaire d'élaboration de pièces mécaniques.

Suivant la méthode de la métallurgie des poudres, les alliages Al-Si, Al-Mg et Al-Cu additionnés respectivement d'une faible quantité de Cuivre plus magnésium (Al-Si), de silicium (Al-Mg), de manganèse plus nickel plus chrome (Al-Cu), constituent des alliages de fonderie qui possèdent aussi bien une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité, de bonnes propriétés mécaniques et une résistance de corrosion élevée. [4]

I.1.5. DESIGNATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Selon la norme NF EN 1780-1-2 et -3 la désignation des alliages d'aluminium est décrite de façon symbolique et numérique.

I.1.5.1. 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.

I.1.5.2. 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'alliages et les trois derniers indiquent sa composition chimique. [4]

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

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium- (teneur > 99,00)
2	Aluminium - cuivre
3	Aluminium - manganèse
4	Aluminium - silicium
5	Aluminium - magnésium
6	Aluminium- magnésium-silicium
7	Aluminium - zinc
8	Autre alliages d'Aluminium

Tableau I.1.1. Groupe d'alliages d'Aluminium

I.1.5.3. 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.

Exemple : EN AC- AL Si7 Mg.

I.1.6. ETATS DE LIVRAISON ET ETATS METALLURGIQUES

I.1.6.1. Etats de livraison : Selon la norme NF EN 1706, les états de livraison sont désignés de la façon indiquée au **tableau I.1.2** : [5]

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 livraison

I.1.6.2. Etats métallurgiques : Selon la norme NF EN 1706, les états de métallurgiques sont désignés de la façon indiquée au **tableau I.1.3** : [9]

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-vieillesissement artificiel (sous-revenu)	T64

Tableau I.1.3. Désignation des états métallurgiques

Alliage		Aptitude au moulage en général	Stabilité dimensionnelle	Comportement à l'atmosphère		Aptitude à l'anodisation		Aptitude au soudage à l'arc	Usinabilité
				Général	Marine	Production	Décoration		
10000	A5	C	A	A	A	A	A	B	D
21000	A-U5GT	B-C	C	D	E	C	B	D	A
41000	A-S2GT	C	B	B	B	A	A	B	B
42100	A-S7G0,3	B	B	B	B	A	E	B	B
42200	A-S7G0,6	B	B	B	B	A	E	B	B
43300	A-S10G	B	B	B	B	A	E	B	B
44100	A-S13	A	A	B	B	A	E	A	D
45000	A-S5U3	B	B	D	E	C	E	A	B
45100	A-S5U3G	B	B	D	E	C	E	B	B
46000	A-S9U3	B	B	D	E	C	E	D	B
46300	A-S7U3G	B	B	D	E	C	E	B	B
47000	A-S12U	A	A	D	E	C	E	A	C
48000	A-S12UNG	B	A	D	E	C	E	B	C
51100	A-G3T	C	B	A	A	A	A	A	A
51200	A-G10S	C	B	A	A	A		D	A
51300	A-G6	C	B	A	A	A	B	A	A
71000	A-Z5G	C	B	B	B	B	B	A	A

Tableau I.1.4. Aptitudes technologiques et d'usage des alliages d'aluminium moulés. Code A=excellent, B=bon, C=moyen, D=médiocre, E=impropre.

NF EN 1706 ⁽¹⁾	NF A 57-702	Alliage										Autre		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	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	1,5 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-S6U3	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	0,25
45100	A-S6U3G	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	0,85	0,15	0,10	0,25	0,05	0,25
46000	A-S6U3	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
49000	A-S12UNG	10,5 à 13,5	0,7	0,8 à 1,5	0,35	0,3 à 1,5		0,7 à 1,3	0,35			0,25	0,05	0,25
21000	A-UEGT	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	0,05	0,10
71000	A-Z5G	0,30	0,30	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.1.5. Compositions normalisées sur pièces selon norme NF EN 1706 (en % pondéral). Quand une seule valeur est indiquée, elle correspond à un max autorisé.

I.1.7. DIAGRAMME D'EQUILIBRE AL-SI [7]

Le diagramme d'équilibre Aluminium Silicium est simple, il indique les compositions des phases et la structure de l'alliage en fonction de la température et de la concentration en silicium.

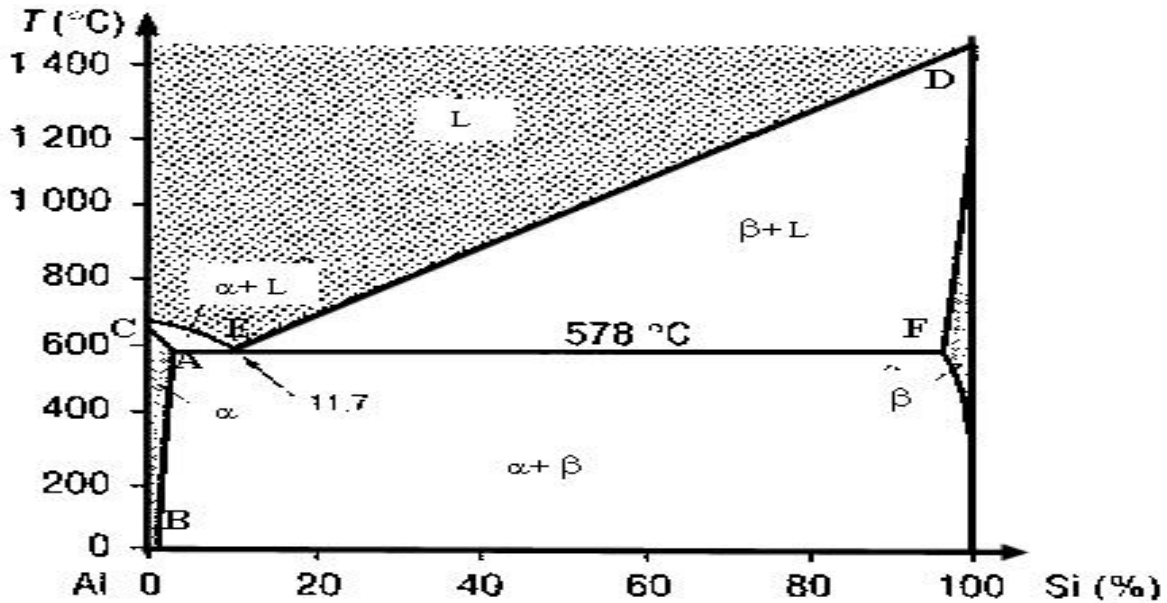


Figure I.1.2. Diagramme d'équilibre Al-Si

On distingue sur ce diagramme :

- ✓ Solution alpha : Riche en aluminium, le maximum est de 1,65 % de silicium à 577 $^{\circ}\text{C}$.
- ✓ Eutectique (alpha+bêta) : Contient 11,7 % de silicium à 577 $^{\circ}\text{C}$.
- ✓ Hypo eutectiques : Constitués de 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 $^{\circ}\text{C}$.

I.1.7.1. Influence du silicium :

➤ Avantages :

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

➤ Inconvénients :

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

CHAPITRE I.2. ELABORATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I.2.1. INTRODUCTION

La fonderie de moulage des alliages d'aluminium est apparue dès la mise au point du procédé de fabrication par électrolyse. Le moulage constitue le chemin le plus court du métal liquide à la pièce finie et les alliages prévus pour les moulages de forme doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques, une résistance à la corrosion élevée,....etc.

Le plus souvent on emploie les alliages Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (Al-Si), de silicium (Al-Si), de manganèse, de nickel, de chrome (Al-Cu). Pour affiner le grain et par suite améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculant (Ti, Zr, B, C, V,etc.). L'aluminium industriel est élaboré sous forme de tôles, profilés, barres, fils et autres. [4]

Les alliages d'aluminium de moulage sont souvent différencier de la façon suivant :

- alliage de premier fusion, lorsque l'aluminium en provenance directement d'électrolyse est utilisé comme métal de base,
- alliage de deuxième fusion ou d'affinage élaboré à partir de déchets triés (retours). [1]

I.2.2. DOMAINE D'UTILISATION

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale, bâtiment (toiture, façades, aménagement intérieur,.....), industrie électrique (câbles et appareillages), boîtes boisson..... Etc.

L'aluminium pur n'a pas une très grande résistance mécanique mais ses alliages peuvent avoir des propriétés remarquables. 75 % des structures des avions Airbus et Boeing sont en aluminium. [6]

I.2.3. MINERAIS ET TRAITEMENT

L'aluminium est très répandu dans la nature, 8 % de l'écorce terrestre. Le principal minerai est **la bauxite**, elle contient : [5]

- ✓ **45 à 60 % d'aluminium hydratée, $Al_2 O_3, n H_2 O$ (n vaut 1 au 3 selon le type de bauxite).**
- ✓ **20 à 30 % d'oxyde ferrique, $Fe_2 O_3$, et diverses impuretés.**

La production de l'aluminium à partir de la bauxite se fait selon un seul procédé, en trois étapes :

I.2.3.1. Extraction de l'alumine de la bauxite par hydrométallurgie : procédé de Bayer (Figure : I.2.1. Procédé Bayer). [7]

Procédé général

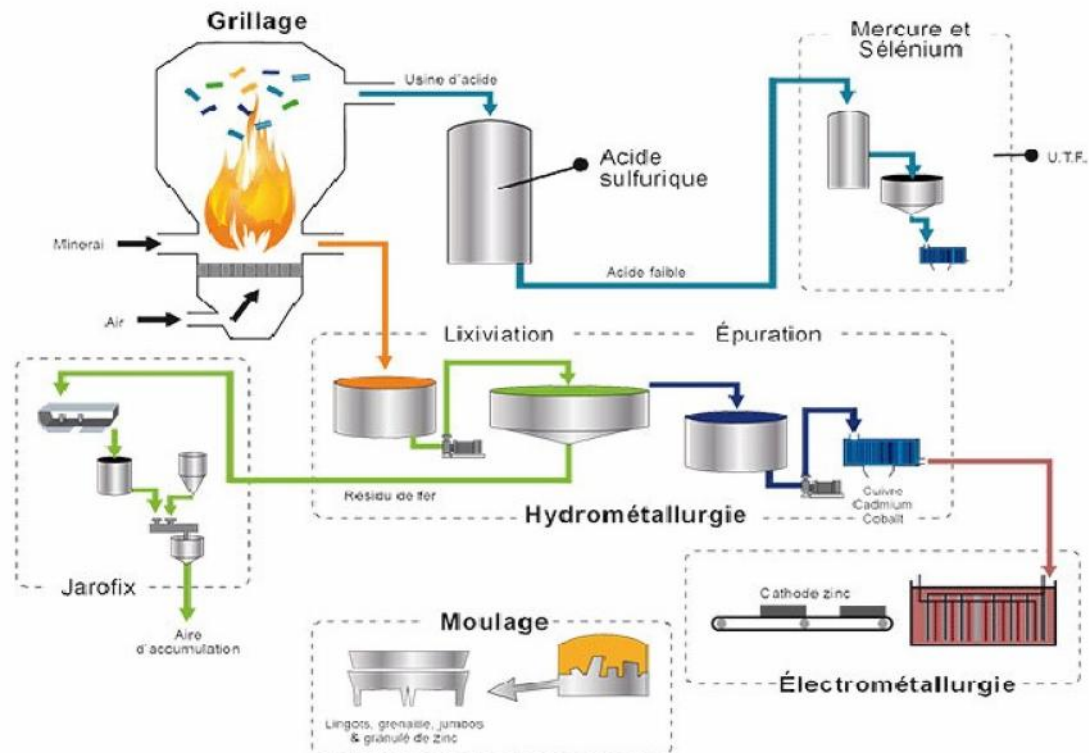


Figure I.2.2. Procédé général

I.2.3.3. Affinage de l'aluminium avant coulée : Les procédés sont complexes et intègrent le recyclage de l'aluminium de récupération (aluminium de deuxième fusion). [6]



Figure I.2.3. Le cycle de vie de l'aluminium

I.2.4. MATERIELS UTILISE :

I.2.4.1. Le four de fusion : il est composé d'une revole (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 350Kg, ce dernier est chauffé par l'intermédiaire de deux bruleurs à gaz. [2]

I.2.4.2. Le four de maintien : dont le creuset est de capacité de 150 Kg construit de la même façon que le four de fusion avec ses différentes louches en acier poteyés.

I.2.4.3. La poche de coulée : en graphite de 50 Kg est manipulée à l'aide d'un pont roulant. La poche est préalablement maintenue chauffée continuellement toute la journée à l'aide d'un bruleur à gaz qu'on remplit directement à partir du four de fusion en position avant, et à partir de cette poche montée sur un support pivotant et généralement munie d'un volant de manœuvre que l'on coule les moules préparer ou que l'on remplit le four de maintien. [2]

Remarque :

Les fours de fusion et de maintien ainsi la poche de coulée doivent être nettoyés et calcinés périodiquement à l'aide de matériel approprié.

Le pyromètre de type K : c'est un thermocouple standard qui permet de mesurer dans une gamme de températures comprise entre (-270 ÷ 1372) °C de composition : Chromel, alliage de (Ni Gr) et d'Alumel alliage de (Ni Al5 Si).

I.2.5. REGLES DE FUSION [6]

I.2.5.1. 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.

I.2.5.2. Gaz et oxydation : sont cause de défauts altérant la santé des pièces, il faut donc :

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

I.2.5.3. Fer :

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

I.2.5.4. Flux :

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

I.2.6. LA COULEE [3]

I.2.6.1. Dégazage : la solidification sous vide partiel au gaz de se dégager, refoulant la partie du métal liquide vers la surface, produisant le gonflement caractéristique analogue au rochage bien connu des fondeurs d'alliages cuivreux.

Par contre une surface plane est significative d'un alliage dégazé et sain. Une fois la masse liquide en fusion totale à environ 700 °C, est corrigée on introduit une quantité de dégazer qui se présente sous forme de pastille bleu. Ce dégazer a pour fonction de dégazage de désoxydant et d'affinage puis on procède à l'opération de décraassage à l'aide d'une louche, ensuite on introduit (1,5 à 2 %) de poudre appelée covéral 55 pour protection superficielle du bain liquide pour éviter toute oxydation à haute température et toute contamination extérieure.

Toutefois, si un traitement auxiliaire doit être fait, il sera fait avant l'affinage. D'autre part, le traitement de dégazage par des flux chlorés risque de diminuer l'action des sels d'affinage, il faut alors dans ce cas maintenir le métal au repos, avant l'affinage pendant 20 à 30 mn.

I.2.6.2. 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 et 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 : [2]

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

Un alliage d'aluminium 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 d'aluminium sous 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 d'aluminium sur affiné présente :

- ✓ Une peau d'oxyde très épaisse.
- ✓ Une cassure présentant des piqûres.

I.2.7. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION [4.5]

I.2.7.1. Silicium : Cet élément à une teneur voisine de l'eutectique Al-Si donne toutes ses propriétés :

- ✓ très bonne coulabilité.
- ✓ pas de risque de criques.
- ✓ faible coefficient de dilatation (20×10^{-6} entre 0 et 100 °C).
- ✓ faible retrait de fonderie : 11%.
- ✓ bonne résistance aux chocs.
- ✓ bonne aptitude à l'étanchéité.
- ✓ bonne aptitude à la soudabilité.

✓ bonne résistance à l'action des agents atmosphériques, par contre cette teneur a tendance à provoquer dans les pièces moulées, des retassures internes.

I.2.7.2. Fer : La teneur en fer doit être inférieure à 0,75 %, au-delà de 0,75 % de fer, il y a formation dans l'alliage d'un constituant lamellaire qui diminue considérablement les caractéristiques mécaniques, 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.

Précautions :

- ❖ éviter l'emploi de creusets en fonte ;
- ❖ poteyer soigneusement tous les outils de fusion et de coulée (cuillères pour coulée en coquille).

I.2.7.3. 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.

I.2.7.4. Manganèse : 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 AlSi13 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.

I.2.7.5. Magnésium : Au-delà du maximum de la norme (0,10 %) les allongements diminuent rapidement.

I.2.7.6. 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.

I.2.7.7. Cobalt : Comme le manganèse, il combat l'action néfaste du fer ; il est considéré comme une impureté mais non nuisible à l'alliage jusqu'à une teneur maxi de 0,20 %.

I.2.8. LE MOULAGE [8]

Le moulage a pour but de produire des pièces ayant leurs formes définitives et leurs cotes 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.2.8.1. 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), et 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.

I.2.8.2. 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 : [4]

- ✓ 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.

Théoriquement, on peut couler tous les alliages d'aluminium mais pratiquement ceux qui présentent une grande criquabilité et une coulabilité médiocre sont difficiles à mettre en œuvre, c'est le cas de certains alliages Al-Cu, Al-Zn, et Al-Mg.

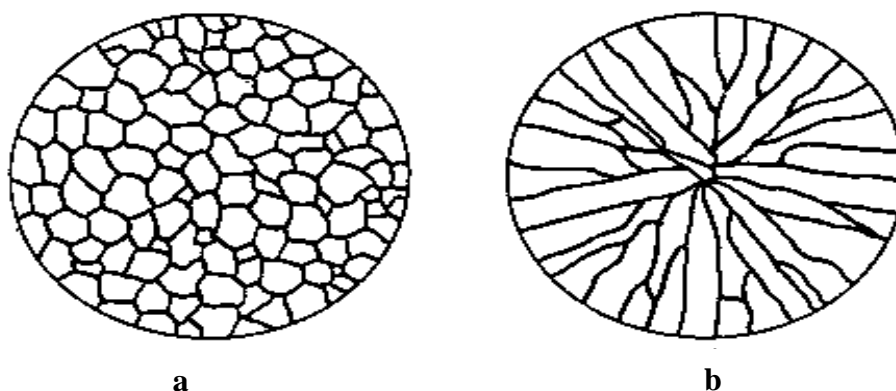









Figure I.2.4. Coupes schématiques d'une pièce
a : coulée en sable **b : coulée en coquille.**

I.2.9. DEFAUTS DES PIECES MOULEES [6.7]**I.2.9.1. Grains insuffisamment fins :****A Cause de l' :**

-  Affinage insuffisant.
-  Excès de fer.
-  Présence d'autres impuretés.




SOLUTION : Surveiller le potéyage des outils, de la coquille et des creusets en fonte.

I.2.9.2. Piqures :**A Cause de l' :**

-  Absorption des gaz à la fusion.
-  Affinage mal fait.
-  Poche insuffisamment séchée.
-  Moule trop humide.

Solution : l'emploi des refroidisseurs évite localement les piqures.

I.2.9.3. Retassures :**Causes :**

-  Retassures internes.
-  Retassures de surface pour le moulage en sable.
-  Pour le moulage en coquille les retassures apparaissent dans les zones mal nourries.

Solution: Vérifier le potéyage.

CHAPITRE I.3. TRAITEMENTS THERMIQUES, PRECIPITATION ET STRUCTURES

I.3.1. INTRODUCTION

Le traitement thermique est une opération de chauffer puis refroidir les métaux et les alliages afin de modifier leur structure et leurs propriétés surtout mécaniques en générale, dans un sens convenable à leur utilisation. Ils peuvent agir dans deux sens soient: dans le sens d'une diminution de la résistance mécanique, accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement), au contraire dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique (ce sont les traitements de durcissement). Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique. [1]

On peut diviser les traitements thermiques des alliages en trois types :

- ✓ Traitement d'homogénéisation.
- ✓ Traitement d'adoucissement.
- ✓ Traitement de trempe structurale.

I.3.2. DESIGNATION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALLUMINIUM

I.3.2.1. Recuit d'homogénéisation : Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés. Le recuit se fait pour rendre le matériau plus homogène et lui rendre ses propriétés antérieures.

Il consiste en général un maintien à une température suffisamment élevée afin de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide. [2.3]

I.3.2.2. La trempe : la trempe des alliages d'aluminium consiste à les chauffer à une température et la maintenir pour un certain temps et après, l'alliage doit être refroidi rapidement jusqu'à la température ambiante pour obtenir une solution solide, c'est le traitement de trempe. Aussitôt après trempe, l'alliage est dit dans un état de trempe fraîche, il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité. [2.3]

I.3.2.3. Traitement de maturation (vieillessement naturel) : Après la trempe l'alliage durcit plus en moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante, c'est la maturation ou le vieillissement naturel. Le phénomène est plus ou moins rapide suivant la température.

Le durcissement est stabilisé au bout d'un certain temps dépendant de la composition de l'alliage. En général quelques jours pour l'alliage de cuivre, une à quelques semaines pour les alliages de magnésium et silicium, quelques mois pour les alliages de zinc. Pendant les premières heures de la maturation, l'alliage peut être considéré dans l'état de trempe fraîche et présente une plasticité suffisante pour supporter des mises en forme importante. [2]

I.3.2.4. Revenu (vieillessement artificielle) : Le revenu se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe. Il permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté et les contraintes thermiques internes obtenues lors de la trempe. [2]

I.3.3. MICROSTRUCTURE

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

On peut caractériser la microstructure des matériaux à différentes échelles selon ce que l'on cherche à observer. Pour chaque échelle il faut faire appel à un outil de taille appropriée, de l'échelle macroscopique à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au μm), le microscope électronique (observation 100 au nm) et la diffraction des rayons X dont la longueur d'onde est de l'ordre du dixième de nm, on étudie les structures cristallines. [1.3]

I.3.3.1. La macrographie : La macrographie consiste en un examen d'ensemble d'une structure métallique ou d'alliage qui s'effectue à l'œil nu, ou avec de faible grossissement (inférieur à 100). Cet examen peut aussi s'effectuer sur des sections prélevées sur des ébauches (lingots, pièces de forge...) que sur des produits finis. Il permet de déterminer l'allure de la constitution cristalline de grandes surfaces qui doivent être soigneusement polies d'un papier émeri fin en évitant tout écrouissage au cours de travail. Puis cette surface soumise à une attaque par des réactifs appropriés. Ce réactif agit par une dissolution à vitesse inégale de la surface métallique et crée ainsi des différences de niveau permettant l'observation. [5]

La macrographie met en évidence, la grosseur et la forme des grains. Les petits grains traduisent en général un refroidissement rapide alors que les gros grains supposent un refroidissement lent. Les traitements mécaniques en observant la déformation des grains (déformation à froid, la différence de taille de grain (déformation à chaud), la répartition d'inclusion ou de cavités. [8]

I.3.3.2. La micrographie : a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions métalliques, des microfissures et aussi de l'organisation de diverses phases présentes (leur taille, leur forme, leur distribution) donc sa microstructure. L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique. [6.7]

I.3.4. PARAMETRES MICRO STRUCTURAUX

I.3.4.1. Observation par microscope optique : la microscopie optique est utilisée afin, de déterminer la structure et la texture granulaire des matériaux étudiés. [1]

I.3.4.1.1. Grains et joints de grains : un métal est formé d'un grand nombre de petits volumes distincts au microscope, de forme polyédrique, appelés grains qui sont séparés par des surfaces appelées joints de grains. Chaque grain représente un monocristal, c'est-à-dire qu'il est formé d'un empilement régulier d'ions métalliques dont la cohésion est assurée par des électrons. Dans le cas où le matériau n'est constitué que d'un seul grain, il est dit monocristallin.

Dans un examen micrographie, les grains qui sont des volumes apparaissent sous forme de plans et les joints qui sont des surfaces apparaissent sous forme de lignes. [8]

Il existe trois types principaux de joints de grains :

- ❖ **Joint cohérent :** lorsque chaque cristallite reste parfait jusqu'à l'interface.
- ❖ **Joint semi cohérent :** lorsque 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 ordonnée. La taille des grains joue un rôle important pour la mise en forme du métal. A l'état brut de coulée, la taille des grains est de 0.01 à 1 mm, on trouve de grains beaucoup plus grands. Un grain grossier est de toute façon indésirable.

I.3.4.1.2. Phase : une phase se caractérise par une composition chimique et un arrangement atomique, cristallin (avec une certaine structure) ou non. Un matériau comporte généralement plusieurs phases (désirées ou non), dont l'une au moins, appelée matrice, est percolant. La taille, la morphologie et la répartition spatiale de ces phases gouvernent de nombreuses propriétés d'emploi des matériaux et en particulier la résistance aux sollicitations mécaniques.

Une phase est une partie du système dans laquelle la composition (nature et concentration des constituants présents) et l'organisation atomique (structure cristalline, amorphe, etc.) sont fixées. [4.5]

Elles sont caractérisées par :

- ✓ La composition chimique, le type de réseau cristallin et les propriétés résultantes.
- ✓ La présence d'une surface de séparation avec les autres parties du système : interface.
- ✓ Un changement brusque de composition et de propriétés lors du passage à travers cette interface.

Suivant l'interaction physico-chimique des composants, les phases qui se forment dans les alliages métalliques peuvent être des solutions liquides, des solutions solides ou des combinaisons chimiques.

I.3.4.1.3. Précipités : de nombreux métaux ne sont que très peu ou pas du tous 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 sont expulsés du réseau que constituent les atomes d'aluminium.

Les atomes étrangers, par exemple les atomes de fer combinant alors avec des atomes d'aluminium pour former des cristaux propres, dans lesquels on trouve trois atomes d'aluminium pour un atome de fer, la composition de ces précipités cristallins est alors Fe Al₃.

Dans d'autres cas, les atomes étrangers précipitent seuls (silicium) ou encore en compagnie d'une autre espèce atomique (par exemple magnésium et silicium). De tels précipités n'apparaissent pas seulement lors de la solidification, mais peuvent aussi se former à l'état solide aux températures dépassant 200 °C environ.

Les précipités (cristaux du second type) apparaissent dès que la teneur en atomes étrangers 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 a apparition de précipités dès que la teneur en silicium dépasse 1,65 %. [3]

I.3.4.1.4. Pores : dans un bloc de métal brut de coulée, on peut mettre en évidence trois types de cavités :

- ✓ **Les retassures** provoquées par la forte diminution de volume du métal en passant de l'état liquide à l'état solide.
- ✓ **Les inclusions d'air** qui a pénétré dans le métal lors de la coulée et qui 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 pendant et 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. [7]

I.3.4.2. Observation par microscope électronique : le microscope électronique permet d'étudier en détail la structure fine (substructure) du métal. L'une des plus grandes réalisations dans ce domaine est l'observation directe des défauts de structure cristalline. [8]

I.3.4.2.1. Microscopie électronique à balayage : est utilisé afin d'observer plus finement l'état de surface des matériaux et rendre compte des précipités grossiers présents dans les divers matériaux. Le principe de l'imagerie MEB consiste à composer une image de surface à partir des électrons secondaires éjectés du matériau sous l'effet du faisceau primaire. L'énergie de ces électrons dépend directement de l'énergie des électrons primaires et du numéro atomique de l'élément qui interagit avec le faisceau primaire. [8]

I.3.4.2.2. Microscope électronique de transmission : est utilisé pour observer très finement la microstructure des matériaux. Le principe du microscope électronique de transmission est d'utiliser les caractéristiques des électrons qui traversent la lame d'échantillon observée. [8]

I.3.5. Importance de la métallographie : [2.3]

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

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

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

CHAPITRE I.4. LES ESSAIS MECANIQUES

I.4.1. LES PROPRIETES MECANIQUES [1]

Pour décrire les propriétés mécaniques des matériaux, plusieurs termes ont été utilisés tel que la résistance, la ténacité et la dureté. En science des matériaux, ces termes ont des significations basées sur des mesures quantifiables bien définies, déterminant le comportement ou la réponse d'un matériau à des sollicitations appliquées et parmi ces propriétés mécaniques on définit essentiellement :

I.4.1.1. Les propriétés élastique (déformation élastique) : l'essai de traction montre que pour de faibles déformations, on note d'abord un comportement élastique réversible au cours duquel la contrainte et la déformation sont proportionnelles, cela définit le module de Young. [3.5]

$$E = \sigma / \epsilon$$

Ce comportement élastique est limité à une contrainte σ_e appelée limite d'élasticité. [4]

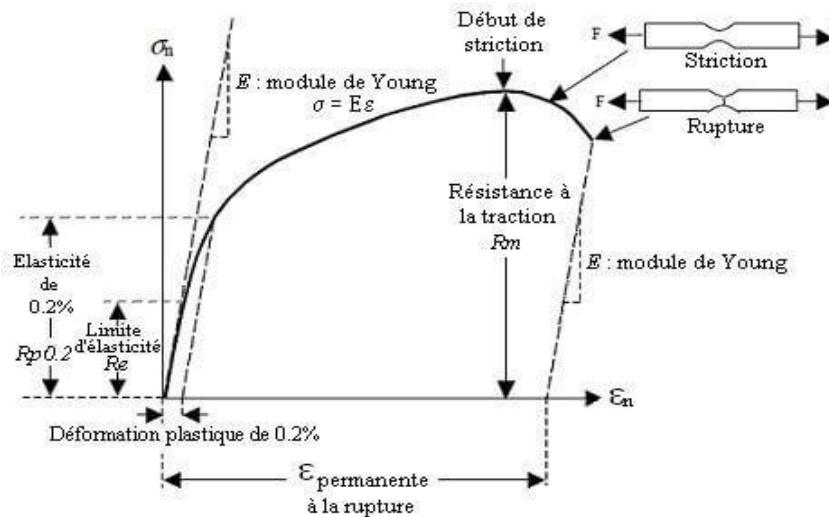


Figure I.4.1. Courbe contrainte-déformation

I.4.1.2. Comportement élasto-plastique : [3.4]

un matériau élasto-plastique est caractérisé par un seuil d'écoulement au-dessous duquel le comportement est purement élastique, alors qu'une fois celui-ci atteint la déformation n'est plus réversible. En principe, cette dernière est indépendante du temps : elle n'évolue pas, si la charge est maintenue constante, elle ne disparaît pas progressivement après décharge. De même, le seuil n'est fonction de la vitesse de déformation. En réalité les matériaux ont le plus souvent un comportement élasto-plastique. A basse température la composante de viscosité n'est pas la plus importante et il est donc possible de caractériser le matériau en terme de plasticité. En fait, s'il n'y avait pas de dislocations dans un cristal, sa résistance contre la déformation plastique serait d'un facteur plus élevée, car il est techniquement quasi impossible d'éviter la présence des dislocations dans un métal. Il s'agit donc de rendre plus difficile possible le mouvement des dislocations, pour agrandir la gamme de déformations élastique et évidemment les contraintes qui

peuvent être supportées par un matériau.

I.4.1.3. Déformation plastique (plasticité) : avant que la déformation élastique n'ait atteint sa limite théorique, il apparaît une déformation plastique et il est caractérisé par le fait que : [1.3]

- La contrainte de déformation n'est plus proportionnelle. Elles sont reliées par une loi : $\sigma = K \cdot \epsilon^n$. Avec n compris entre 0,1 et 0,5.
- La déformation n'est pas réversible, après relâchement des contraintes, il persiste une déformation permanente.
- Lors de relâchement des contraintes, il se produit un retour élastique selon un module égale à celui de la première déformation.

I.4.1.4. Ténacité : elle se définit comme capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture, elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de la fissure.

La ténacité représente donc la surface sous tendue par la courbe rationnelle comme la montre la figure suivante : [5]

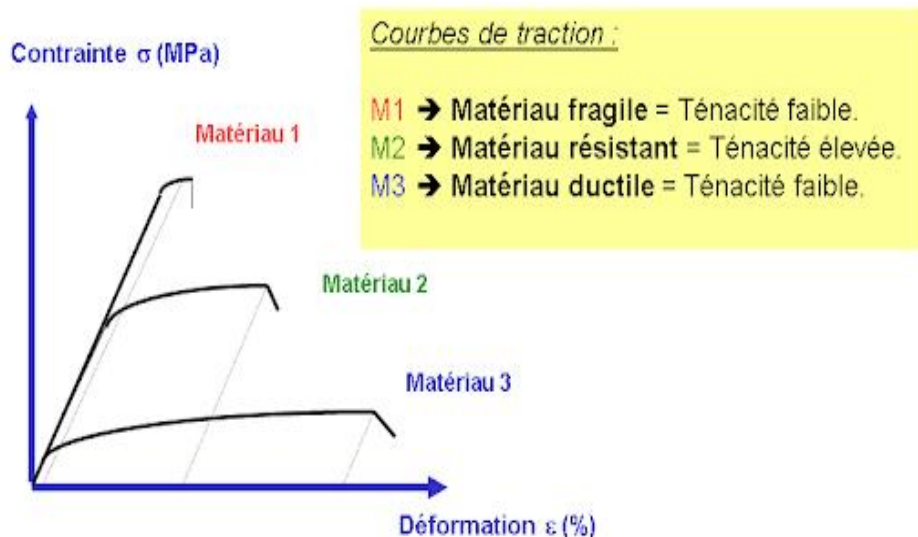


Figure I.4.2. Aire sous tendue par la courbe rationnelle de ténacité

I.4.1.5. Ductibilité : propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre (aptitude des matériaux à la déformation plastique), c'est un atout important pour la mise en forme des matériaux. [2]

la ductibilité d'un matériau est appréciée à partir de la valeur du coefficient de striction Z :

- ✚ Z est grand, le matériau est ductile.
- ✚ Z est faible, le matériau est semi fragile.
- ✚ Pour le matériau fragile, la rupture a lieu dans le domaine élastique (absence de striction).

La figure I.4.3 représente trois comportements possibles des matériaux : fragile, ductile et élastique non linéaire.

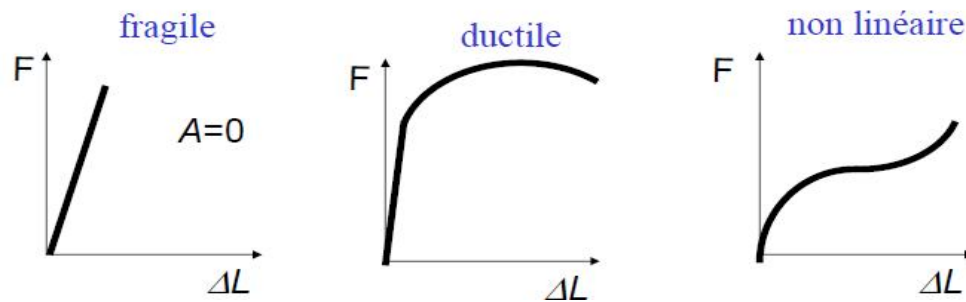


Figure I.4.3. Comportement possible du matériau

I.4.2. LES ESSAIS MECANIQUES [2.3]

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages, aptitude à la déformation par traction ou par compression, résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effort constant.

Généralement les cahiers de charges des grandes entreprises métallurgiques se basent sur les conditions de réceptions et emploi sur les résultats de mesure des quatre propriétés essentielles suivantes :

- ✓ Résistance à la rupture (**Rr**).
- ✓ Limite élastique (**Re**).
- ✓ Allongement relatif (**A%**).
- ✓ Résilience.

Les essais les plus utilisés de nos jours sont classés en deux catégories à savoir :

- ✓ Les essais destructifs.
- ✓ Les essais non destructifs.

I.4.2.1. Les essais destructifs : [3.13]

Les essais destructifs ont pour but de caractériser le comportement des matériaux en prélevant un échantillon de la pièce pour la soumettre à plusieurs essais afin d'obtenir des informations très précises sous la contrainte et d'en quantifier précisément les déformations.

Parmi les essais destructifs on distingue : l'essai de traction, l'essai de dureté, l'essai de résilience, l'essai de fatigue, l'essai de compression, l'essai de flexion, l'examen micrographique, l'examen macrographique.....etc.

I.4.2.1.1. Essai de traction : [11.13]

- ❖ **Principe de l'essai** : L'éprouvette elle est de section circulaire, carrée ou rectangulaire, est soumise à deux forces égales et opposées appliquées suivant son axe.

Sous l'action de ces forces qui croissent progressivement, l'éprouvette s'allonge jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques du matériau étudié.

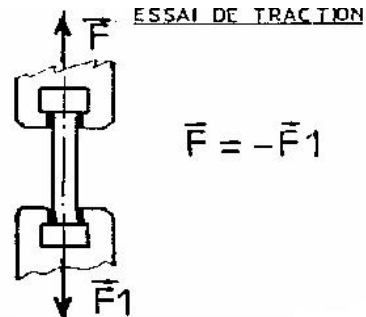


Figure I.4.4. Principe de l'essai

- ❖ **Description de l'éprouvette :** Elles comportent une partie calibrée soigneusement polie. Cette zone centrale est raccordée aux extrémités par des congés de rayon R. Les têtes d'amarrage, non normalisées, sont adaptées aux mâchoires de la machine de traction.

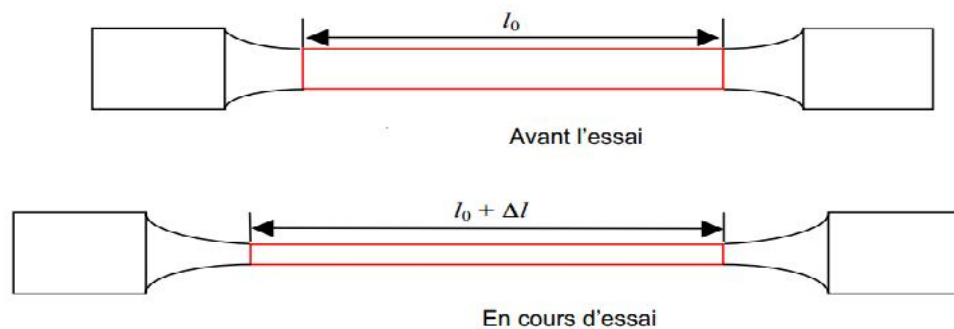


Figure I.4.5. Eprouvette de traction

L_0 : longueur initiale (mm).

S_0 : section initiale (mm^2).

F : effort de traction (N).

- ❖ **Machine de traction :** Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide qui comprend un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette, l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à un travers mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique (vérins), soit par des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre, ce qui permet d'obtenir un enregistrement de la courbe brute de traction caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie. [8]



Figure I.4.6. Machine de traction.



Figure I.4.7. Montage de l'éprouvette entre les deux mors de la machine de traction.

❖ **Courbe de traction :**

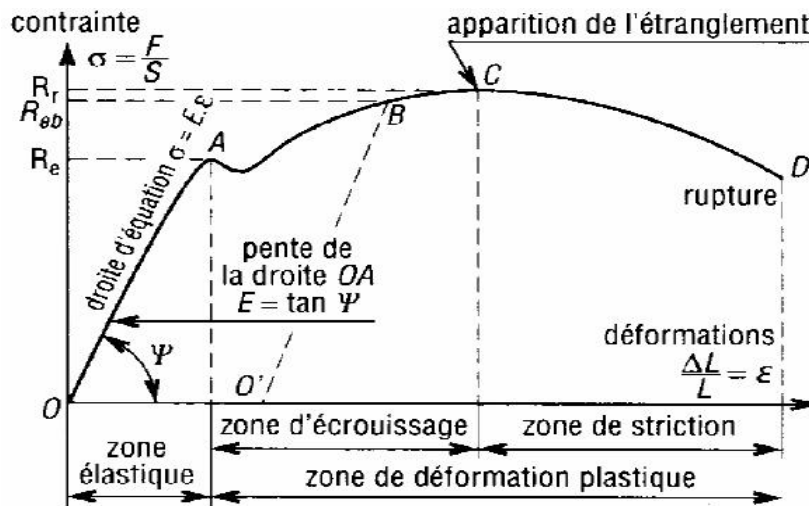


Figure I.4.8. Courbe de traction

OA : domaine élastique à déformation réversible, $R = E\epsilon$ (le coefficient de proportionnalité est le module de Young).

A : limite de domaine élastique.

AB : Domaine de déformation plastique répartie.

B : pont de charge maximale ou début de la striction.

BC : domaine de striction ou de déformation plastique localisée.

C : point de rupture de l'éprouvette.

❖ **Module d'Young :** La pente de la partie linéaire OE représente le module d'Young E (en MPa ou GPa) ou module l'élasticité.

On appelle loi de HOOK la relation suivant : $\dagger_{\text{élasticité}} = E \nu_{\text{élasticité}}$

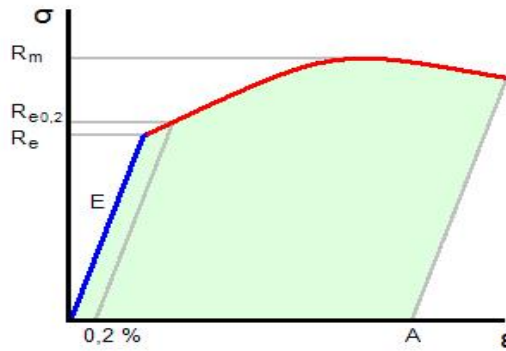


Figure I.4.9. Module de Young

σ : Est la contrainte.

E : Est le module de Young.

ϵ : Est la déformation.

I.4.2.2. Essai de résilience ou essai Charpy : [11]

❖ **Définition** : c'est un essai mécanique destructif, il est réalisé sur des éprouvettes normalisées ayant une entaille en V ou bien en U.

❖ **Principe de l'essai** : L'essai consiste à rompre en flexion par choc l'éprouvette entaillée en son milieu reposant sur deux appuis d'un seul coup de mouton-pendule Charpy, où on détermine l'énergie W absorbée par la rupture et déduire par la suite la résilience K_{cv} .

La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joules par centimètre carré.

Résilience = Energie absorbée par la rupture (W) (joules) / section de l'éprouvette (cm^2) ;

$$\text{Or : } K_{cv} \text{ ou } K_{cu} = W/S \quad (\text{Joules} / \text{cm}^2)$$

❖ **Eprouvette utilisée**: l'éprouvette de résilience a la forme d'un barreau prismatique de section carrée de 10mm de côté et de 55mm de longueur. Elles sont entaillées à mi-longueur sur toute la largeur de l'une de ses faces, et la raison de cette entaille c'est pour faire une concentration de contraintes pour arriver à rompre l'éprouvette.

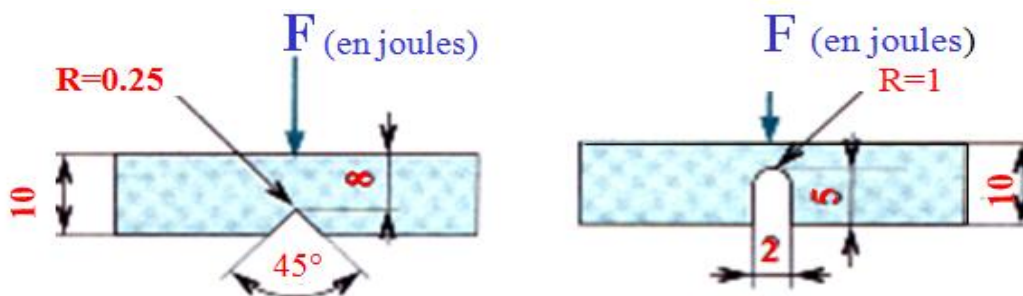


Figure I.4.10. Eprouvette Charpy normalisée.

❖ Machine de résilience :

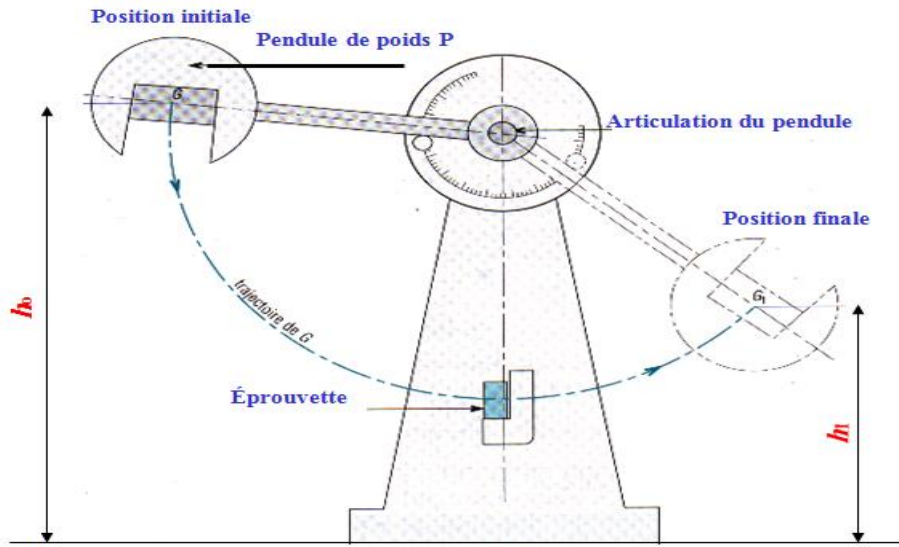


Figure I.4.11. Machine de résilience

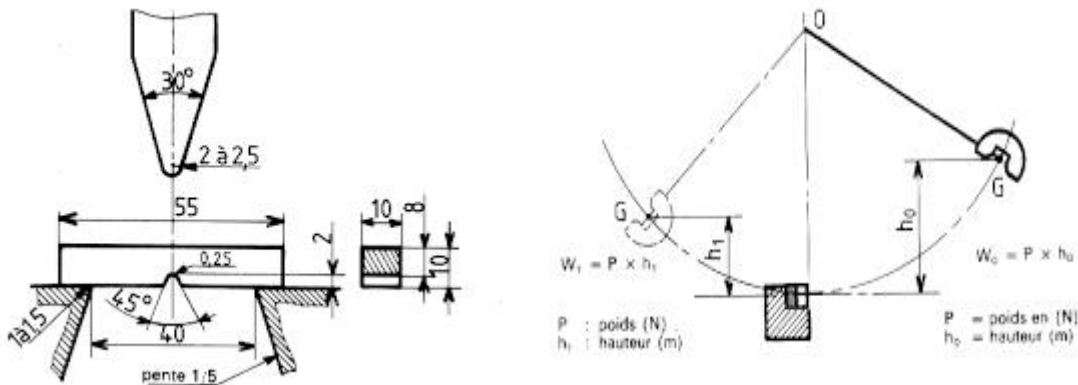


Figure I.4.12. Essai Charpy

I.4.2.1.3. Essai de dureté : [2]

a-Définition : La dureté est la résistance du matériau à sa pénétration et à la déformation par un corps plus dur que lui. L'essai de dureté est d'une grande utilité pour le métallurgiste pour sa simplicité d'effectuer un contrôle sur un matériau et de son caractère peu destructif.

b-Principe de l'essai : Il consiste à enfoncer le pénétrateur sur la surface du métal à étudier lors de pénétration avec une charge constante. Puis on mesure la dimension de l'empreinte et plus l'empreinte est grande, plus le métal est moins dur.

La dureté (H) est représentée par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte.

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

Avec :

- H : symbole de dureté, en MPa.
- F : charge d'essai, en N.
- S : surface de l'empreinte, en mm².

c-Types d'essai : [9]

- ✓ **Essai brinell (HB):** Il Consiste à imprimer dans le matériau à étudier, une bille de diamètre D sous l'effet d'une charge F. Le diamètre de l'empreinte qui subsiste sur la surface après suppression de la charge est soigneusement mesuré.

La dureté Brinell HB est le quotient de la charge P en daN par l'aire de l'empreinte exprimée en mm².

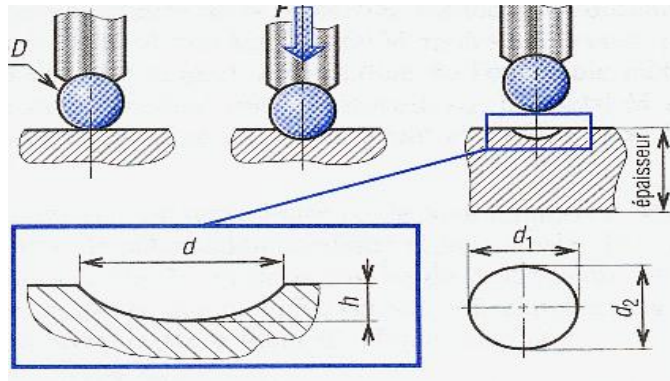


Figure I.4.13 : Principe de l'essai de brinell

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

Avec :

- F : Charge d'essai en Newtons.
- D : Diamètre de la bille en millimètres.
- d : Diamètre de l'empreinte en millimètre.

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

- ✓ **Essai Vickers (HV) :** La mesure de dureté Vickers se fait à l'aide d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carré, d'angle au sommet 136°, et à mesurer la diagonale d de l'empreint laissé sur la surface, après l'enlèvement de la charge, la dureté Vickers (Hv) est le quotient de la charge d'essai par l'aire de l'empreinte laissée sur la pièce.

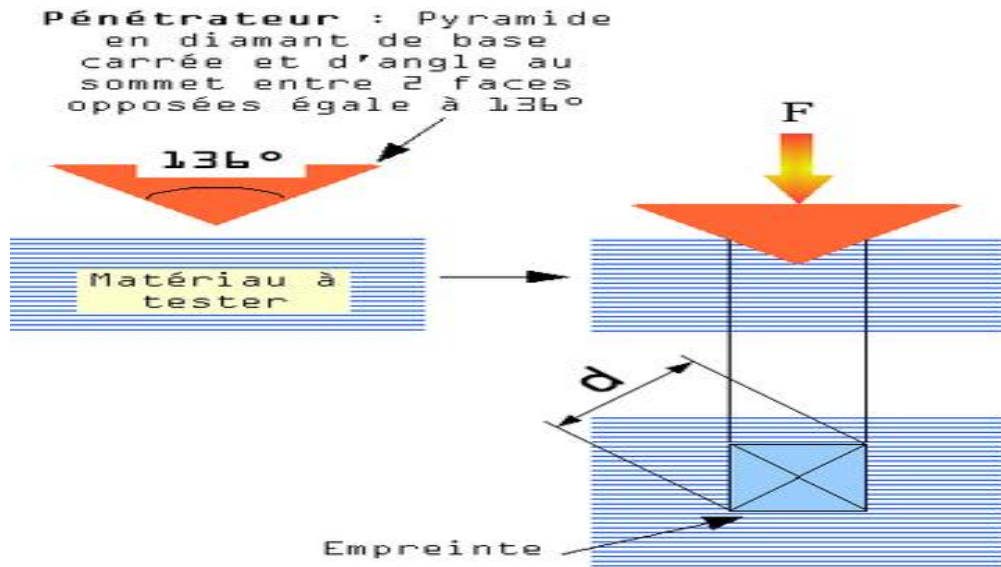


Figure I.4.14. Principe de l'essai Vickers

H_v : Dureté Vickers

p : Charge d'essai en daN

d : Diamètre de l'empreinte laissé sur la surface. ($d = d_1 + d_2 / 2$) (mm)

$$H_v = 1,8544 \times p / d \text{ (daN / mm}^2\text{)}$$

- ✓ **Essai Rockwell (HRB) ou (HRC)** : L'essai consiste à imprégner, on deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer. Un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille), on mesure l'accroissement rémanent l'épaisseur de la profondeur de pénétration.

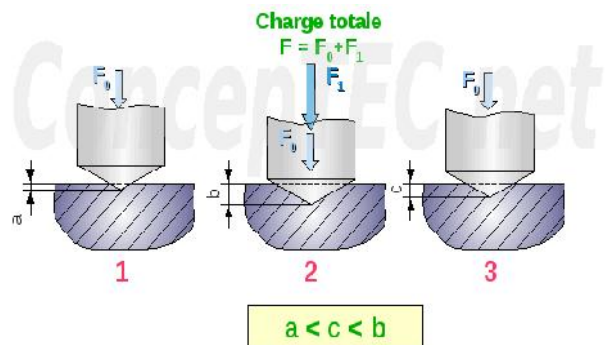
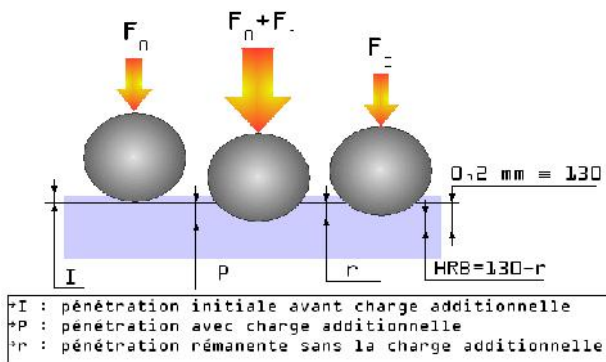


Figure I.4.15. Essai de dureté Rockwell avec bille

Figure I.4.16. Essai de dureté Rockwell avec cône

- ❖ **Micro-dureté** : Il est possible de faire des mesures de dureté sous très faible charges. Equipé d'un microscope métallographique, le micro-duromètre permet une étude très localisés de la surface du métal. Le pénétrateur est en général de type Vickers.

Les mesures de micro-dureté doivent être faites sous condition : [10.13]

- La vitesse de mise en charge.
- La charge appliquée.

- Le mode de polissage de la surface.

Pour obtenir des résultats satisfaisant, les mesures doivent être effectuées sur :

- De petits échantillons.
- Des matières dures et fragiles.
- Des phases d'un alliage.
- Des profils de diffusion.
- Des couches superficielles.

I.4.3. LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS [12]

I.4.3.1. Les différentes techniques de contrôles non destructifs :

Examen visuel : Cet examen permet l'appréciation de nombreux paramètres (forme, couleur, défauts externes). Le ressuage, La magnétoscopie, La radiographie, La gammagraphie, L'échographie ultrasonore, L'émission acoustique, courants de Foucault, étanchéité, thermographie infrarouge, analyse vibratoire, radiographie, magnétoscopie.....etc. [8.9]

I.4.3.2. Domaines d'utilisation : Les méthodes de C.N.D sont très utilisées dans :

- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- l'industrie navale (contrôle des coques).
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.....).
- l'aérospatiale et l'armée (dont la totalité des programmes sont confidentiels ou secret défense).
- l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.).
- le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).

I.4.3.3. Les principaux défauts rencontrés : Les défauts que l'on peut rencontrer ont trois origines :

a-Défauts d'élaboration et de transformation : [5.7]

- Pièces moulées : retassures, soufflures, criques.
- Pièces forgées : crevasses, craquelures.
- Pièces laminées: inclusions dans la barre.
- Pièces étirées : criques de surface.

b-Défauts de fabrication ou d'assemblage : [6]

- Pièces soudées: inclusions, soufflures, caniveaux près des cordons de soudure.
- Traitements thermiques: tapures, criques.
- Usinage : criques de rectification, pièces agressées par l'environnement (corrosion), rayures d'outils.

c- Défauts de fonctionnement : fatigue, contraintes excessives.

I.4.3.4. Les ultrasons : C'est une méthode de contrôle qui consiste à transmettre des impulsions acoustiques de hautes fréquences (supérieures à 30 kHz) appelées « ultrasons » dans un matériau et ces ondes se propagent dans le matériau. [12]

La présence d'une discontinuité (défaut interne) sur le trajet des ultrasons provoque la réflexion partielle des impulsions. Le signal réfléchi est recueilli par un capteur appelé « transducteur ultrasonore ».

Cette méthode permet de localiser les défauts internes avec précision et d'en apprécier leur forme avec une bonne rapidité et sans précautions particulières.

❖ **Les différents types d'ondes ultrasonores :**

a-Les Ondes Longitudinales (OL) : appelées également ondes de compression : l'oscillation engendre une vibration des particules dont le déplacement élémentaire est parallèle à la direction de propagation. La vitesse de propagation est définie par :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

b-Les Ondes Transversales (OT) : appelées également onde de cisaillement : le déplacement des particules est perpendiculaire à la direction de la propagation.

La vitesse de propagation des ondes transversales est définie par :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

I.4.3.5. Les techniques de contrôle par ultrasons : [12.13]

a-Le contrôle par contact : C'est la méthode la plus employée. On déplace le traducteur directement en contact avec la pièce, en assurant la transmission des ondes ultrasons par un couplant (huile, eau, etc.....). Dans cette technique, on distingue trois méthodes :

- ✓ Méthode par résonance (méthode peu utilisée et réservée à la mesure d'épaisseur).
- ✓ Méthode par réflexion.
- ✓ Méthode par transmission.

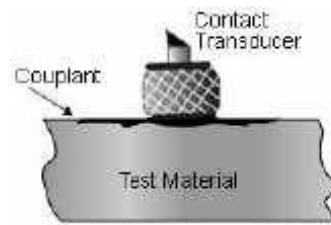


Figure I.4.17. Contrôle par contact

b-Méthode par réflexion : L'onde ultrason se propage dans la pièce, se réfléchit sur le fond de celle-ci ou éventuellement sur le défaut. La visualisation de l'amplitude de l'écho de fond et de l'écho de défaut, donne une indication quand à l'importance de l'anomalie, ainsi que sur sa position dans la matière.

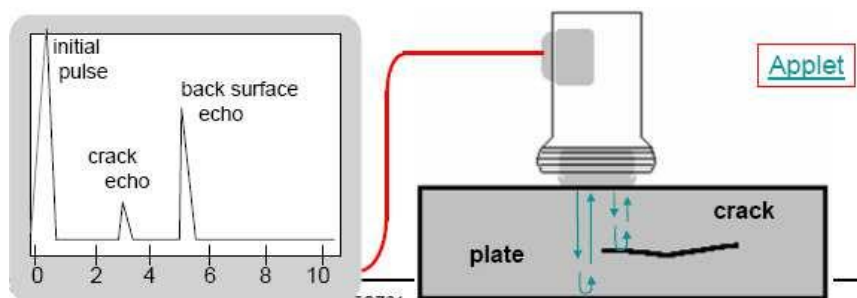


Figure I.4.3.18. Contacte par réflexion

c-Méthode par transmission : On utilise deux palpeurs : un émetteur et un récepteur. La visualisation sur l'écran de l'amplitude de l'écho transmis permet d'avoir une indication quant à l'importance du défaut (% d'atténuation de l'écho d'émission), mais ne permet pas de positionner ce défaut dans la matière. De plus il faut avoir accès des deux cotés de la pièce.

La détection s'effectue par perte du signal. Il est à noter que dans ce cas, les deux capteurs sont solidaires (E + R). Ce type de contrôle nécessite l'accès aux deux faces de la pièce.

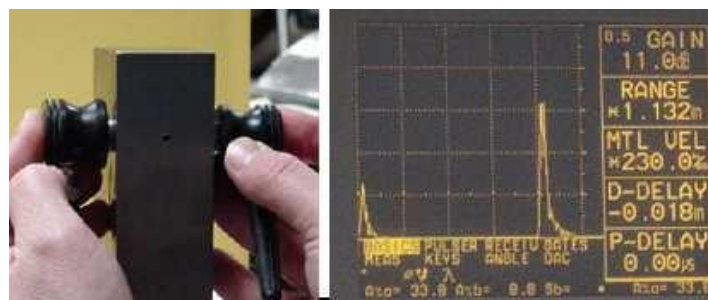


Figure I.4.219. Contrôle par transmission.

d-Le contrôle par immersion : La pièce et le traducteur sont complètement immergés dans une cuve contenant un liquide de transmission. Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce. Le couplage est en général assuré par le liquide de transmission (généralement de l'eau). Ce système est réservé aux pièces de faibles dimensions et aux contrôles en série.

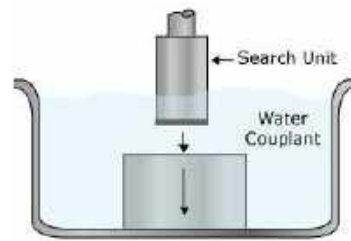


Figure I.4.20. Contrôle par immersion

I.4.3.6. Les équipements : L'appareillage de contrôle comprend principalement : un appareil émetteur / récepteur, un ou plusieurs transducteurs reliés à l'appareil par un ou plusieurs câbles de liaison. [8]

Le transducteur comporte un ou plusieurs éléments sensibles appelés transducteurs qui convertissent l'énergie électrique du signal d'émission en énergie acoustique (vibration ultrasonore) et inversement.

L'appareil de contrôle par ultrasons comporte principalement les ensembles fonctionnels suivants :

- Le circuit d'émission (générateur d'impulsions) qui fournit au transducteur l'énergie électrique nécessaire pour le mettre en vibration pendant un temps très bref.
- Le circuit de réception qui recueille (amplification) et met en forme les signaux (échos) reçus par le transducteur (traitement).
- Le circuit de balayage (visualisation) qui synchronise les différentes fonctions de l'appareil et génère la base de temps pour la visualisation des échos sur le tube cathodique.
- Le tube cathodique qui permet la visualisation des échos ultrasonores en fonction de leur date d'arrivée

Les transducteurs sont fabriqués dans une grande variété de modèles afin de répondre aux multiples applications. Ils sont classés suivants différents critères : à contact ou par immersion, simple (E+R dans le même boîtier) ou « dual » (E+R séparés), faisceau normal ou incident. Le choix d'un transducteur se fait en fonction du type d'application, de sa bande de fréquences et de sa taille.

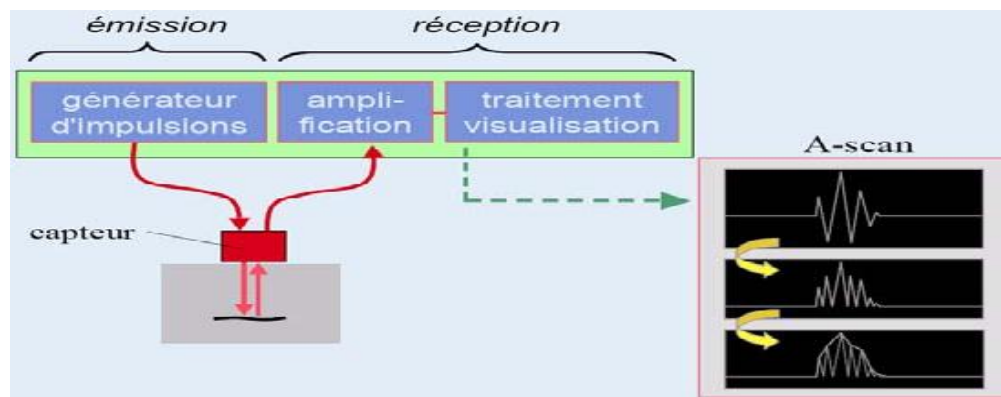


Figure I.4.21. Différents type d'appareils

I.4.7. Avantages, inconvénients : [12]

- ✚ Détection des défauts localisés dans le volume de la pièce.
- ✚ Grande sensibilité, mais qui dépend de l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du signal acoustique.
- ✚ Peut s'utiliser aussi bien sur des chantiers que dans un atelier.
- ✚ Méthode qui se prête bien à l'automatisation.
- ✚ Nécessité d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce afin d'assurer une continuité de la propagation.
- ✚ Nécessité d'un personnel expérimenté et qualifié afin d'interpréter correctement la nature des défauts et leurs dimensions.

CHAPITRE I.5. DEFAUTS CRISTALLINS

I.5.1. INTRODUCTION

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas constitués de cristaux parfaits, ils ne sont généralement pas purs et souvent ils sont utilisés sous forme d'alliage c'est-à-dire qu'ils contiennent des atomes étrangers ajoutés volontairement.

Un défaut est une imperfection ou une irrégularité, de l'ordre du diamètre des atomes, dans la structure cristalline. On classe habituellement les défauts cristallins selon leur géométrie et leur nombre de dimensions. Dans le présent chapitre, nous décrirons notamment les défauts ponctuels qui correspondent à la position d'un ou de deux atomes (défauts sans dimension), les défauts linéaires (à une dimension) et les défauts de surface (à deux dimensions), qu'on appelle parfois défauts d'interface. Nous parlons également des impuretés qui peuvent exister dans les solides sous forme de défauts ponctuels. [10]

I.5.2. LES DEFAUTS CRISTALLINS [6]

I.5.2.1. Défauts ponctuels (sans dimension) : En cristallographie, les défauts ponctuels sont des défauts qui existent au niveau des dimensions atomiques, ils influent sur certaines propriétés physiques tels que la conductibilité électrique, les propriétés magnétiques ...etc. Un défaut ponctuel typique est l'absence d'un atome (lacune), la présence d'un atome du réseau entre les atomes (défaut interstitiel), la présence d'un atome étranger entre les atomes du réseau (solution solide interstitielle) ou à la place d'un atome du réseau (solution solide de substitution).

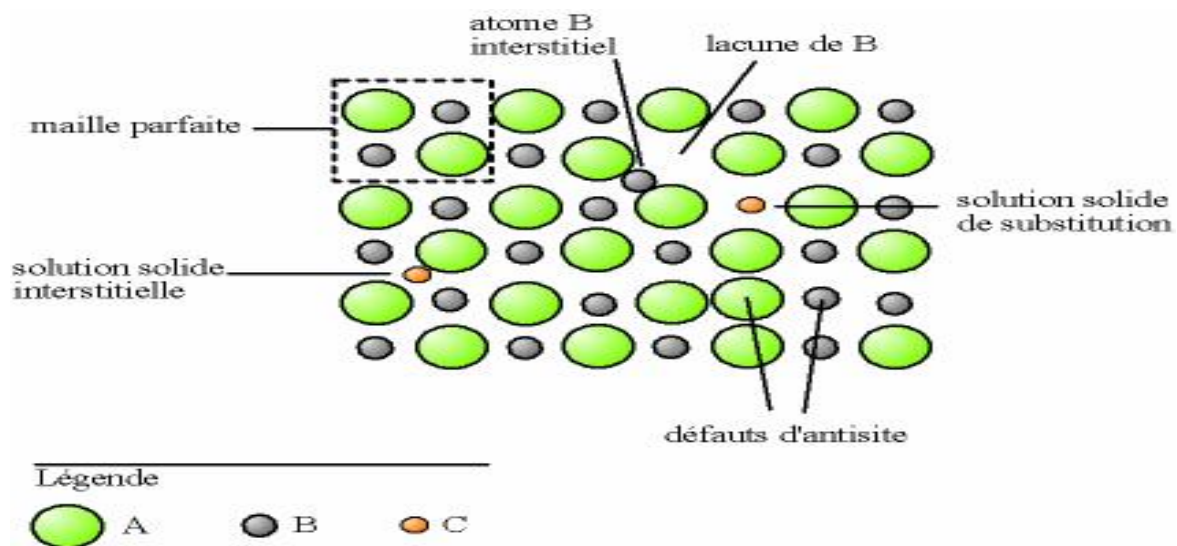


Figure I.5.1. Principaux défauts ponctuels dans les cristaux

I.5.2.1.1. Lacune : est un atome à un nœud du réseau, les lacunes jouent un rôle majeur dans le phénomène de diffusion à l'état solide, car c'est grâce à leur présence et que sous l'effet de l'agitation, un atome du cristal peut se déplacer de proche en proche dans le solide en occupant la lacune située à son voisinage immédiat.

On définit le nombre de lacune n par la formule suivante : $n_l = N \exp(-Q_l/KT)$

n_l : nombre de lacune présentes dans un ensemble de N atomes.

N : est le nombre de sites atomiques.

K : constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-38}$ j/k.

T : température absolue en Kelvins.

Q_l : représente l'énergie de formation d'une lacune.

I.5.2.1.2. Atome auto interstitiel : est un atome identique en insertion dans un site du réseau. Sa présence entraîne toute fois de très grandes distorsions du réseau dans son voisinage, c'est pour quoi son énergie de formation est très élevée de l'ordre de 4 à 5 ev, et sa concentration très faible voisin de 10^{-67} à la température ambiante ($T = 300$ °K) et à peine égale à 10^{-15} au voisinage de la température de fusion.

I.5.2.1.3. Atome étranger en substitution : un atome étranger occupe un nœud du réseau. Chimiquement, il s'agit d'une impureté mais on dit ici qu'il s'agit d'un élément d'alliage car cet atome étranger est dissous dans le métal de base (solution solide de substitution). La présence d'un tel atome étranger provoque de léger déplacement des atomes environnants. [3]

I.5.2.1.4. Atome étranger en insertion : lorsqu'un atome étranger de petite taille s'insère dans les espaces du réseau cristallin, la présence de cet atome en insertion conduit à la création d'un champ de contraintes internes car il est rare que l'atome en insertion soit suffisamment petit pour s'insérer dans le site sans déplacer les atomes voisins. [4]

I.5.2. 2. Les défauts linéaires : (dislocations)

Ces défauts, appelés dislocations, sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. Leur existence a été prouvée par plusieurs techniques expérimentales, notamment par le microscope électronique à transmission. Les dislocations peuvent adopter trois formes idéalisées : les dislocations coin ; dislocations vis et dislocation mixte.

I.5.2.2.1. Les dislocations coin : peuvent être représentées par un plan cristallographique qui se termine à l'intérieur du réseau cristallin. La dislocation coin ne peut pas changer de plan de glissement. Seul un processus de montée ou de descente ayant pour origine le phénomène de diffusion des lacunes permet un déplacement perpendiculaire au plan de glissement initial favorise par la température. En réalité, une ligne de dislocation est souvent un mélange entre les deux types de dislocation suivant l'angle entre le vecteur de Burgers et la ligne de dislocation.

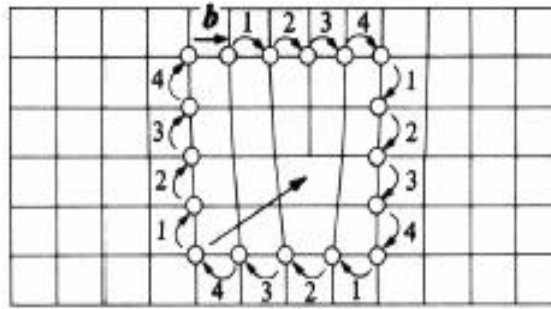


Figure I.5.2. Dislocation coin

I.5.2.2.2. Les dislocations vis : peuvent être comprises comme la ligne de séparation entre le réseau cristallin non perturbé et une zone de décalage partiel du réseau cristallin par rapport à la région avoisinante du réseau. La dislocation vis peut changer facilement le plan de glissement, car le champ de contrainte à une symétrie radiale.

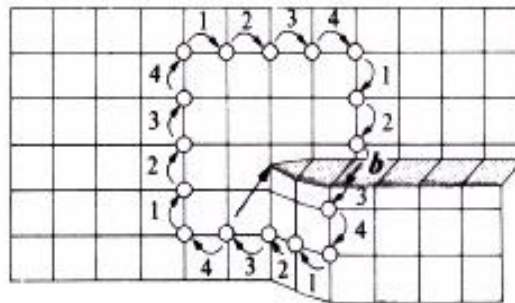


Figure I.5.3. Dislocation vis

I.5.2.2.3. Dislocation mixte : elle est le résultat de l'existence des deux dislocations linéaires, vis et coin, et on désigne par une dislocation mixte la combinaison des deux types suscités. La dislocation mixte est illustrée par un quart de boucle de dislocation dans un cristal, le vecteur Burgers de cette boucle reste le même en grandeur et en direction tout le long de la boucle.

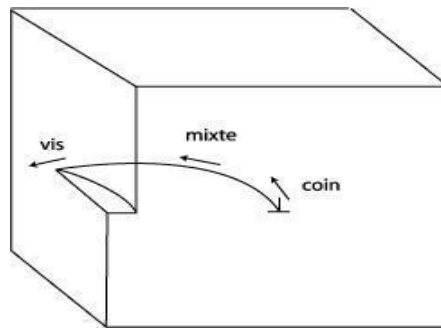


Figure I.5.4. Dislocation mixte

I.5.2. 2.4. Vecteur de Burger b:

Les dislocations sont caractérisées par leur vecteur de Burgers b . Ce dernier est défini comme le vecteur résultant d'une boucle fermée de vecteurs élémentaires du réseau autour de la dislocation, transférée dans une région du réseau non perturbée. Le vecteur de Burgers est perpendiculaire à la ligne de dislocation tandis que pour les dislocations vis le vecteur de Burgers y est parallèle. Physiquement, le vecteur de burgers représente l'amplitude de la déformation transportée par une dislocation.

Remarque : La ligne de dislocation ne peut s'arrêter à l'intérieur du cristal mais doit soit émerger sur une imperfection (surface, joint de grain, autre dislocation) soit se refermer sur elle (boucle de dislocation).

I.5.2. 3. Défaut à deux dimensions (défauts surfaciques) : [5]

I.5.2.3.1. 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.

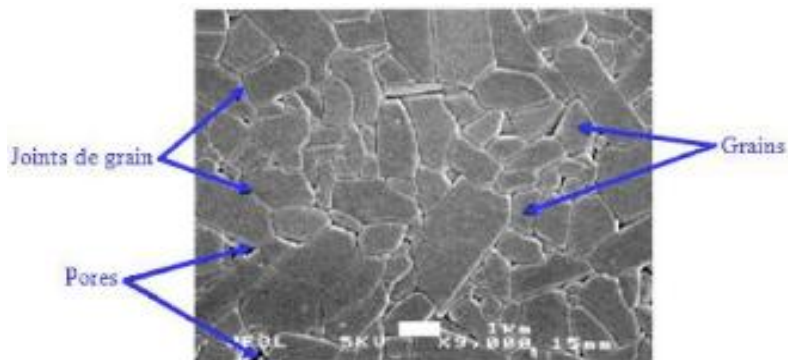


Figure I.5.5. Joints de grains

I.5.2.3.2. Joint de Macle : c'est un défaut d'empilement ou bien 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 ne sont pas alignés comme se serait le cas dans un cristal parfait. Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC, le plan A est appelé plan de macle. [2]

I.5.2.4. Les défauts à 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, exemple : particule venant d'un creuset) et les précipités. 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. [7]

I.5.2.4.1. 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 et la morphologie. [1]

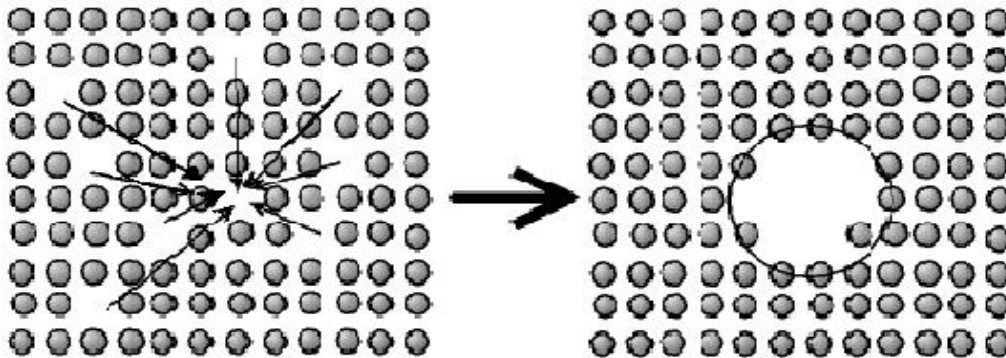


Figure I.5.6. Représentation d'un pore

I.5.2.4.2. Les inclusions : ce sont des particules indésirables qui proviennent de l'élaboration du métal à l'état liquide, ils sont le plus souvent des oxydes, des sulfures ou des silicates. Ces inclusions peuvent être des particules étrangères solides, liquides ou gazeuses. [2]

I.5.2.4.3. Les précipités : sont des particules de seconde phase, de composition chimique différente de la matrice et se forment par réaction 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. [1]

On a divers types de précipités : [9]

- **les précipités cohérents** : sont ceux qui présentent une continuité cristallographique avec la matrice. Les réseaux cristallins peuvent être légèrement différents.
- **les précipités semi cohérents** : ne présentent de cohérence cristallographique avec la matrice que sur certains plans à cause de la présence de la dislocation aux interfaces.
- **les précipités incohérents** : n'ont aucune relation cristallographique avec la matrice.

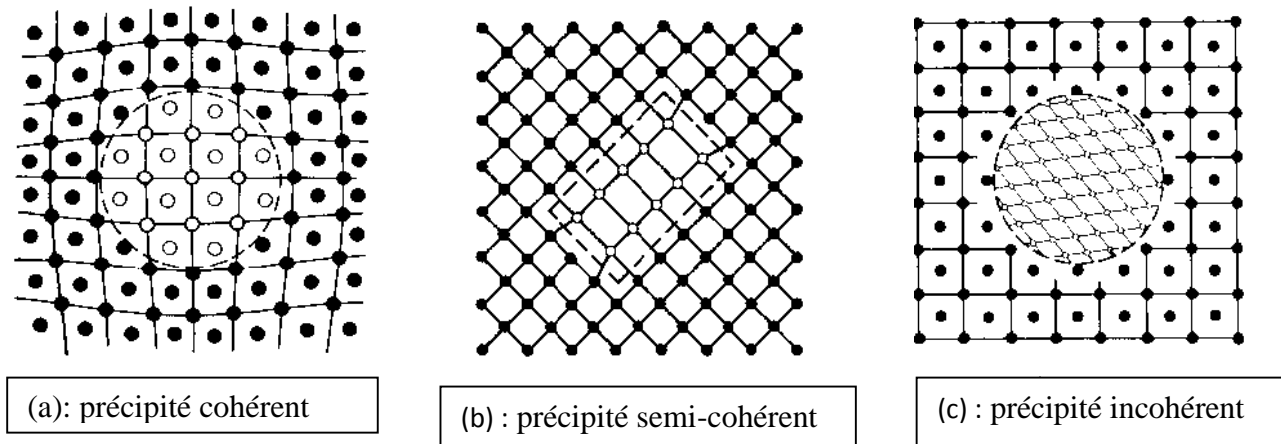


Figure I.5.7. Représentation schématique de précipités dans les solides cristallins.

I.5.3. LA DIFFUSION [8]

I.5.3.1. définition : une diffusion est un déplacement d'atomes dans un solide à des distances supérieures au paramètre de maille. La force motrice phénomène de la diffusion peut être la température, le gradient de concentrationEtc.

Lorsqu'un atome se diffuse dans son propre réseau, on dit qu'il y a autodiffusion et lorsque des atomes diffusent dans un autre réseau, il y a diffusion d'atome en insertion.

✚ **Loi de Fick** : Fick a remarqué que le flux de matière est proportionnel au gradient de la concentration.

Le flux est donné par la loi suivante :

$$J = -D. \text{grad } C$$

C : c'est la concentration de l'espèce diffusante en tout point d'abscisse x .

D : c'est le coefficient de diffusion en m^2/s et dépend fortement de la température.

J: c'est le flux d'une espèce chimique dans la direction x : quantité de matière traversant un plan perpendiculaire à la direction x par unité de surface et par unité de temps

I.5.3.2. Mécanisme de la diffusion : Le mouvement des atomes se produit grâce à leurs vibrations thermiques, dont l'amplitude augmente avec la température. [10]

Plusieurs mécanismes de déplacement peuvent être imaginés, mais seuls deux entre eux sont possibles :

- ✓ Echange directe
- ✓ Echange cyclique
- ✓ Mécanisme lacunaire
- ✓ Mécanisme interstitiel

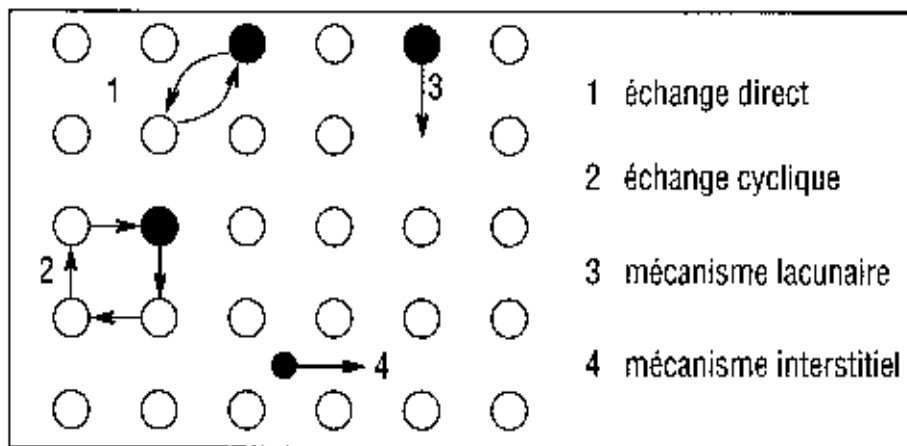


Figure I.5.8. Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique.

I.5.3.3. La loi de la diffusion : [6]

Les lois de diffusion permettent de déterminer la concentration en élément diffusant dans le solide.

Deux cas sont possibles :

I.5.3.3.1. Etat stationnaire (première loi de Fick) :

Le flux est donné par la loi suivant :

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

J : quantité de matière traversant un plan perpendiculaire à la direction x par unité de surface et par unité de temps.

C : la concentration de l'espèce diffusante.

D : le coefficient de diffusion en m^2/s est dépend fortement de la température.

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

En effet : $D = D_0 \cdot \exp(-Q_0/RT)$

Où :

D₀ : une constante

R : la constante des gaz parfaits

T : la température en K

Q₀ : une énergie d'activation de la diffusion.

I.5.3.3.2. Etat non stationnaire : lorsque le gradient de concentration varie dans le temps et change en fonction de la distance x, il est défini par la fonction suivante :

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

Avec :

c : la concentration de l'espèce

t : temps

D : le coefficient de diffusion

X : la distance

CHAPITRE II.1. APPAREILLAGES

II.1.1. INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents appareils utilisés au cours de l'étude expérimentale, tandis que la seconde est relative au matériau et aux modes opératoires mis en œuvre et des essais réalisés dans le cadre de ce mémoire.

Nous avons procédé à l'élaboration de l'alliage Al-Si13Mg au niveau de la fonderie d'Aluminium de la Société Nationale des Véhicules Industriels –Division de la Fonderie de Rouïba (SNVI), puis On a usiné aux dimensions normalisées des éprouvettes au niveau du Hall technologie de Oued-Aissi de département génie mécanique par contre, les traitements thermiques, les essais mécaniques : la traction, la dureté et en fin l'examen micrographique de l'Al-Si13Mg ont été réalisés au laboratoire de Science des Matériaux (SDM) du département de génie mécanique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et l'examen microstructural de même matériau ont été effectués au laboratoire du MEB situé au niveau de Hasnaoua I. Par contre les essais non destructifs sont faits au niveau du Centre de Recherche de Technologie Industrielle (CRTI) sis à Chéraga, Alger.

II.1.2. APPAREILLAGES

Les différents dispositifs utilisés dans notre étude sont :

II.1.2.1. Matière première : Lingots neufs et retours de fonderie



Figure II.1.1. Lingots d'aluminium neufs



Figure II.1.2. Retours de fonderie

II.1.2. Four de fusion: le secteur de l'atelier dispose de trois fours de fusion dans tous les cas, le four est composé de matériaux réfractaires permettant de l'isoler du milieu ambiant, et contient un creuset en graphite.

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



Figure II.1.3. Four de fusion

II.1.3. Four de maintien :

-Charge : 150kg

-Température maximale :

$$T_{\max}=1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

-Tension :

$$T = 380 \text{ V}$$

**Figure II.1.4. Four de maintien****II.1.2.4. Poche de coulée :**

Charge : 50 Kg

**Figure II.1.5. Poche de coulée****II.1.2.5. Poste pour le moulage en sable :**

D'abord le moule possède deux châssis, l'un supérieur et l'autre inférieur, Ainsi que deux plaques modèles chacune d'elle contient quatre empreintes d'éprouvettes et le système de coulée.

**Figure II.1.6. Châssis supérieur – Châssis inférieur**



Figure II.1.7. Poste pour le moulage en sable



Figure II.1.8. Poste de démoulage

II.1.2.6. Grenailleuse :

Elle sert à éliminer le sable fin collé
Encore sur les pièces par la projection
des billes métalliques à grande vitesse
-Tension : 380V



Figure II.1.9. Grenailleuse

II.1.2.7. Eprouvettes en sable :



Figure II.1.10. Empreintes supérieure et inférieure du moule en sable

II.1.2.8. Poste pour l'ébarbage :

Il sert à séparer le système de coulée
de la pièce



Figure II.1.11. Poste de l'ébarbage

II.1.2.9. Fraiseuse :

Utiliser pour l'usinage des éprouvettes .les propriétés suivantes :

- ✓ Tension électrique : 380 V.
- ✓ Fréquence : 50 Hz.
- ✓ Vitesse de coupe : $V_c = \text{tr/min.}$

II.1.2.10. Une meule :

Pour enlever les bavures qui restent en procédé à la finition de l'état de Surface.



Figure II.1.12. Fraiseuse



Figure II.1.13. Meule

II.1.2.11. Four de trempe :

C'est un four à résistance électrique alimenté sous une tension de 380 V et de puissance 11 KW 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.

II.1.2.12. Four de revenu :

C'est un four à résistance électrique alimenté sous une tension de 380 V 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.



Figure II.1.14. Four de trempe



Figure II.1.15. Four de revenu

II.1.2.13. Machine de traction :

Pour réaliser l'essai de traction nous avons utilisé une machine de traction de type S.K.F, alimentée sous une tension de 220 V, ayant une charge maximale de 400 KN.



Figure II.1.16. Machine de traction

II.1.2.14. Les polisseuses : il s'agit de deux polisseuses, une à deux disques de type: (STRUERS) alimentée sous une tension de 220 V et d'une puissance de 150 W munie d'un dispositif d'arrosage et l'autre à un seul disque de même type alimentée sous la tension mais de puissance de 432 W.



Figure II.1.17. Polisseuse à deux disques



Figure II.1.18. Polisseuse à un disque

II.1.2.15. Duromètre :

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. Quand 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 220 V et d'une fréquence de 50 Hz.



Figure II.1.19. Duromètre

II.1.2.16. Microscope : Pour procéder à l'observation des différentes structures de surfaces, des alliages étudiés après leur polissage et attaque chimique, on a utilisé deux types de microscopes dont les caractéristiques :



Figure II.1.20. Faciès de rupture

a-Microscope optique :

C'est un microscope universel de type ZEISS alimenté sous une tension de 220 V, avec une fréquence de 50 HZ et une puissance de 100 W, muni d'un appareil photo automatique, ayant un pouvoir de résolution allant de 40 à 1000 fois.



Figure II.1.21. Microscope optique

b-Microscope électronique à balayage :

C'est un microscope environnemental de type ESEM XL 30 de marque Philips d'un EDAX pour microanalyse X par dispersion d'énergie.



Figure II.1.22. Microscope électronique à balayage

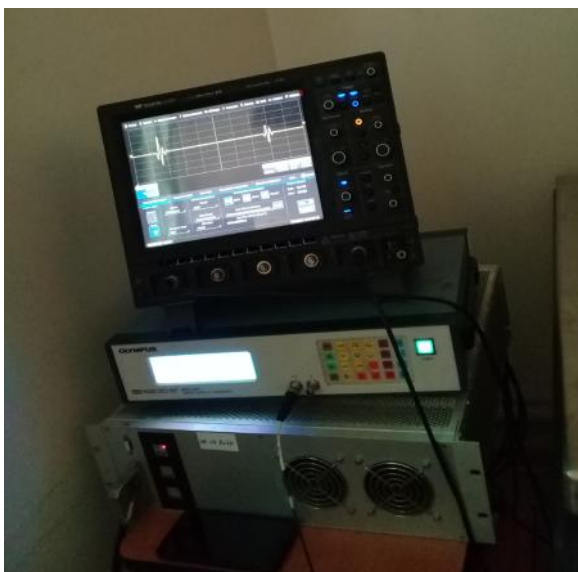
II.1.2.17. L'ultrason :

Figure II.1.23. Appareil de mesure d'ultrason



Figure II.1.24. Mesure en largeur

CHAPITRE II.2. METHODE EXPERIMENTALE ET ELABORATION

Après élaboration six états structuraux ont été pris en considération, sachant que le mode d'élaboration est la coulée en sable :

- Brut de coulée (état de référence),
- Une maturation de 0 heure,
- Une maturation de 6 heures,
- Une maturation de 12 heures,
- Une maturation de 18 heures,
- Une maturation de 24 heures.

II.2.1. MATERIAU ETUDIE

Le matériau étudié est fourni par S.N.V.I. Il s'agit d'un alliage à base d'aluminium contenant respectivement 13% de silicium en pourcentage massique et quelques traces de magnésium.

Sa composition chimique est donnée par le tableau ci- après :

Eléments	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
(%)	≤	11 ÷	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤
NFA57-702	0,7	13,5	0,1	0,15	0,1	0,3	0,05	0,1	0,05	0,15	0,2
(%) SNVI	0,64	12	trace	-	0,08	0,31	-	-	-	-	-

Tableau II.2.1. Composition chimique de l'alliage étudié

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
(%)			≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤
NFA57-702	0,4÷0,65	12,5÷13,5	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1

Tableau. II.2.2. Composition des lingots AlSi13, livrés par l'Aluminium Français

II.2.2. ELABORATION DU MATERIAU ETUDIE

II.2.2.1. La fusion : Après avoir chauffé le four, on introduit des lingots du métal à fusionner l'un après l'autre. Le bain de fusion n'est pas composé de lingots neufs seulement, mais il contient également une quantité de retour. Le retour est représenté par le système de coulée après ébarbage et les pièces rebutées. Le lit de fusion est composé de 50% de lingots neufs et 50% de retour.

II.2.2.2. Dégazage : Après la fusion totale du métal, à environ 700 °C, on introduit dans le bain deux pastilles de DEGAZER 701 SM, afin de dégager les gaz présent dans le four, la dose d'emploi est environ 0,25% de la charge totale. Ce produit joue aussi le rôle de désoxydant.

II.2.2.3. L'affinage : Après avoir dégazé et décrassé la surface du bain, on procède à l'affinage qui se fait à une température de 750 °C environ, en suivant les étapes suivantes

- Introduire 1 % d'une poudre appelée « COVERAL 36 A »,
- Attendre 10 à 15 minutes,
- Verser la poudre B, puis décrasser une deuxième fois la surface du bain,
- Introduire 1,5 à 2 % de poudre « COVERAL 55 », pour la protection du bain et décrasser.

II.2.2.4. La coulée : La coulée des éprouvettes a été faite à une température de 740 °C. Pour réussir la coulée, on doit remplir totalement le moule en une seule fois jusqu'à ce que le métal remonte par les masselottes et à fleur de la partie supérieure du moule.

II.2.2.5. Moulage sable : On pose deux châssis sur deux plaques modèles saupoudrées d'une poudre appelée « noir minéral », puis on remplit les deux châssis de sable de moulage. Ce dernier est un mélange de silice, 10 % d'argile et 4 % d'eau. Après avoir bien serré le sable sur l'empreinte, on ferme le moule qui est prêt à la coulée du métal liquide.

II.2.3. TRAITEMENTS THERMIQUES

Avant de commencer le traitement, on prélève 5 éprouvettes de sable qui vont rester sans traitement thermique (brute de coulée désignées par F). Les autres éprouvettes vont subir le traitement thermique suivant :

Traitement d'homogénéisation, il se fait dans un four de trempe à une température de 540 °C et un maintien de 10 h. Tout de suite, après avoir sortie les éprouvettes du four, elles sont plongées dans un bac d'eau à température ambiante à (20- 25) °C. La maturation est le vieillissement naturel, se fait à l'air ambiant. Puis le revenu se fait dans un four de revenu à température égale à 160 °C pendant 6h. Après traitement on a utilisé pour

Brut de coulée, état de référencé noté F - 05 éprouvettes de sable,

Maturation à 0h+Revenu - 05 éprouvettes de sable,

Maturation à 6h+Revenu - 05 éprouvettes de sable,

Maturation à 12h+Revenu - 05 éprouvettes de sable,

Maturation à 18h+Revenu - 05 éprouvettes de sable,

Maturation à 24h+Revenu - 05 éprouvettes de sable.

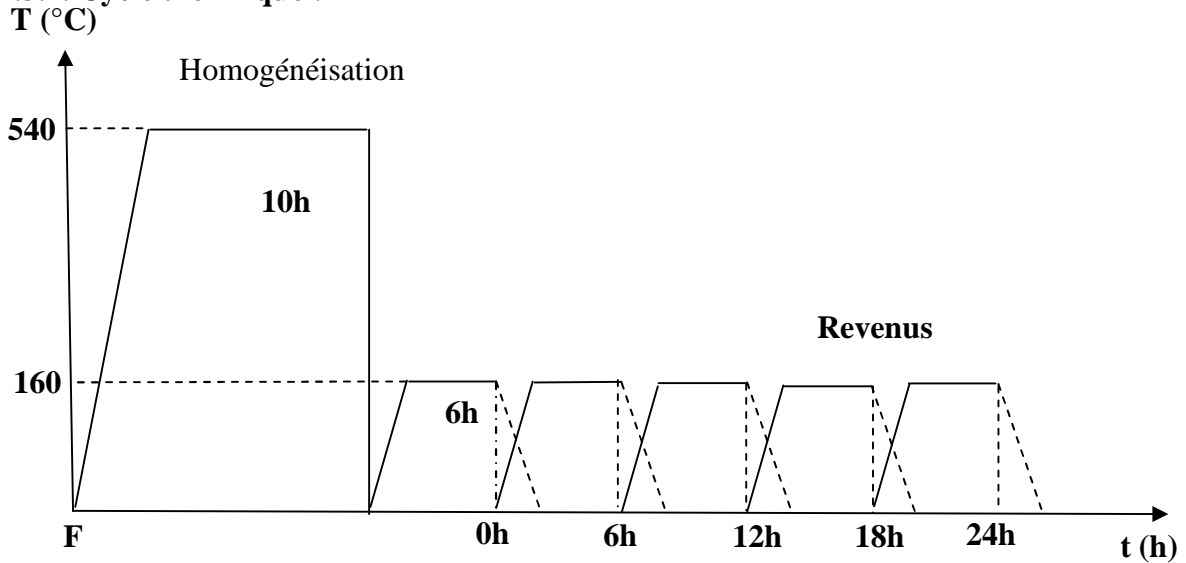
II.2.3.1. Cycle thermique :

Figure II.2.1. Cycle Thermique

II.2.4. ESSAIS MECANIKUES

Nous avons effectué deux essais mécaniques ; la dureté et la traction.

II.2.4.1. Essais de traction : Les éprouvettes sont solidement maintenues par leurs têtes à l'aide des deux mâchoires (mors) de la machine de traction, 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.

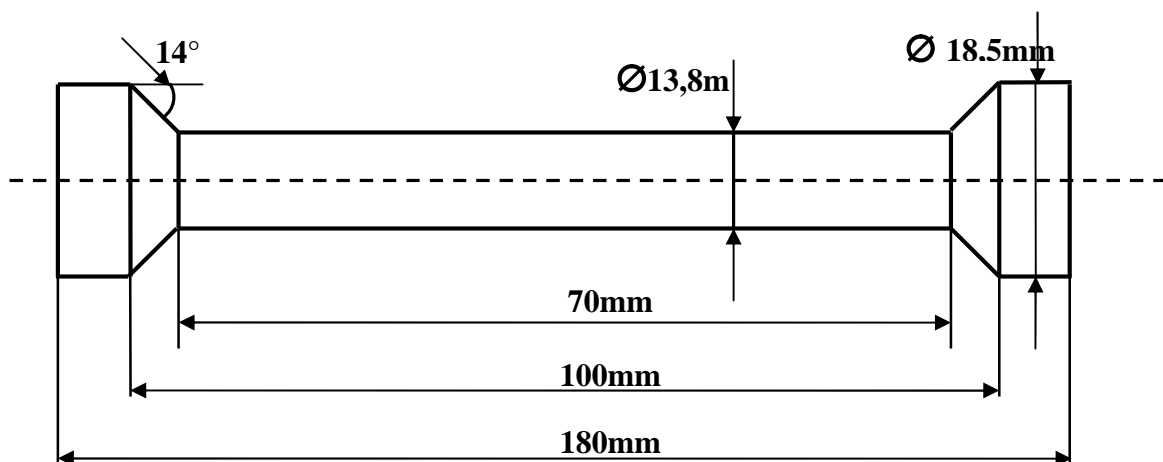


Figure II.2.2. Formes et dimensions des éprouvettes de traction coulées en sable

II.2.4.2. Essais de dureté : Dans ce travail on a choisi l'essai Brinell. Le diamètre de la bille égal à 2,5 mm, sous une charge de 60 Kg.F. 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 présentée par la figure suivante.

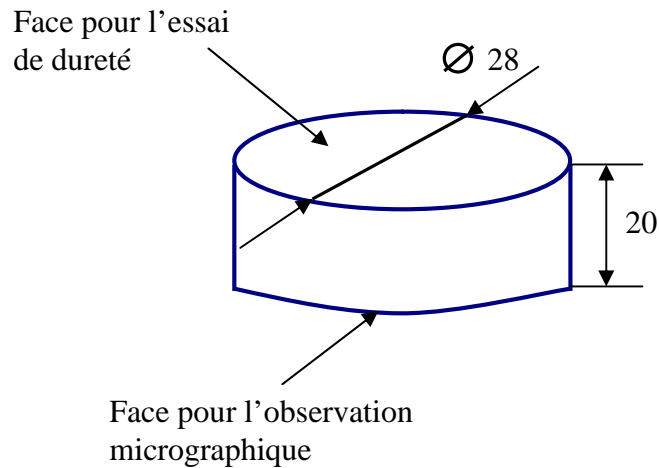


Figure II.2.3. Echantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique

II.2.4.3. Essais de microdureté : Nous avons utilisé un microduromètre Vickers équipé d'un écran pour permettre de positionner l'empreinte sur la phase désirée et par la suite mesurer le diamètre moyen des diagonales de l'empreinte, qui est nécessaire pour déterminer Hv. Les variations de microdureté avec les traitements thermiques peuvent-être déterminées à l'aide de la formule :

$$Hv = 1854.4 P/d^2$$

Où, P est la charge appliquée (gf) et d longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μ m). Dans notre cas les mesures de microdureté ont été effectuées sur microduromètre de type (LEITZ WETZLAR) à pénétration Vickers, une moyenne de trois mesures a été effectuée lors de chaque essai avec une charge de 0.05 Kg.

II.2.5. EXAMEN MICROGRAPHIQUE

II.2.5.1. Préparation des surfaces : Les échantillons sont découpés des éprouvettes de traction, à la 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 (l'abrasion) :** Le dressage a pour but de créer une surface plate d'examen. Il est fait sur papier émeri de granulométries P80, P120, P240, et P400, sur une polisseuse avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement.

- **Dégrossissage** : Cette phase, permet d'arriver à une surface lisse ne contenant que des très fines rayures invisibles à l'œil nu qui disparaîtront dans la dernière phase. Les granulométries des papiers utilisés sont P600, P800, P1200.
- **Finissage** : Son objectif est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine.

II.2.5.2. 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 d'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.2.5.3. Microscopie :

II.2.5.3.1. Microscope optique : Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé, on a pris des photos de différents grossissements à l'aide d'une caméra numérique. Le grossissement utilisé est X100 et X200.

II.2.5.3.2. Microscope à balayage (MEB) : Pour une bonne résolution et des grossissements plus importants qu'en microscopie optique, on a eu recours au MEB. Ce dernier est à émission Thermoélectronique, équipé d'un système d'analyse permettant de faire une étude qualitative et quantitative des différentes phases intermétalliques. Nous avons pris l'initiative de prendre en considération les états suivants F, 0h, 6h, 12h, 18h et 24h afin de faciliter l'interprétation des résultats. Pour chaque échantillon observé, on a pris des photos.

PARTIE III - RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1 - EFFETS DE LA MATURATION SUR L'EVOLUTION DES PROPRIETES DE TRACTION ET STRUCTURALES DE L'ALLIAGE

III.1.1 - 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 en général et mécaniques en particulier. Parmi ces alliages, les alliages de la famille Al- Si ont, en plus de leurs caractéristiques mécaniques élevées, présentent de bonnes propriétés de fonderie, l'augmentation de la teneur en silicium se traduit par une bonne coulabilité et une excellente aptitude au remplissage du moule qui est une caractéristique importante pour le moulage des pièces de grandes dimensions ou pour le remplissage de moules à géométrie complexe.

Cette présente étude porte sur l'influence aussi bien du mode d'élaboration en sable par coulée par gravité que des traitements thermiques de modification de la microstructure par chauffage, mise en solution avec homogénéisation, de trempe structurale et par variation des propriétés de résistances, de ductilité et microstructurales de l'alliage de désignation chimique *AlSi13Mg* (avec 13%Si et Mg 1%) et numérique 44000.

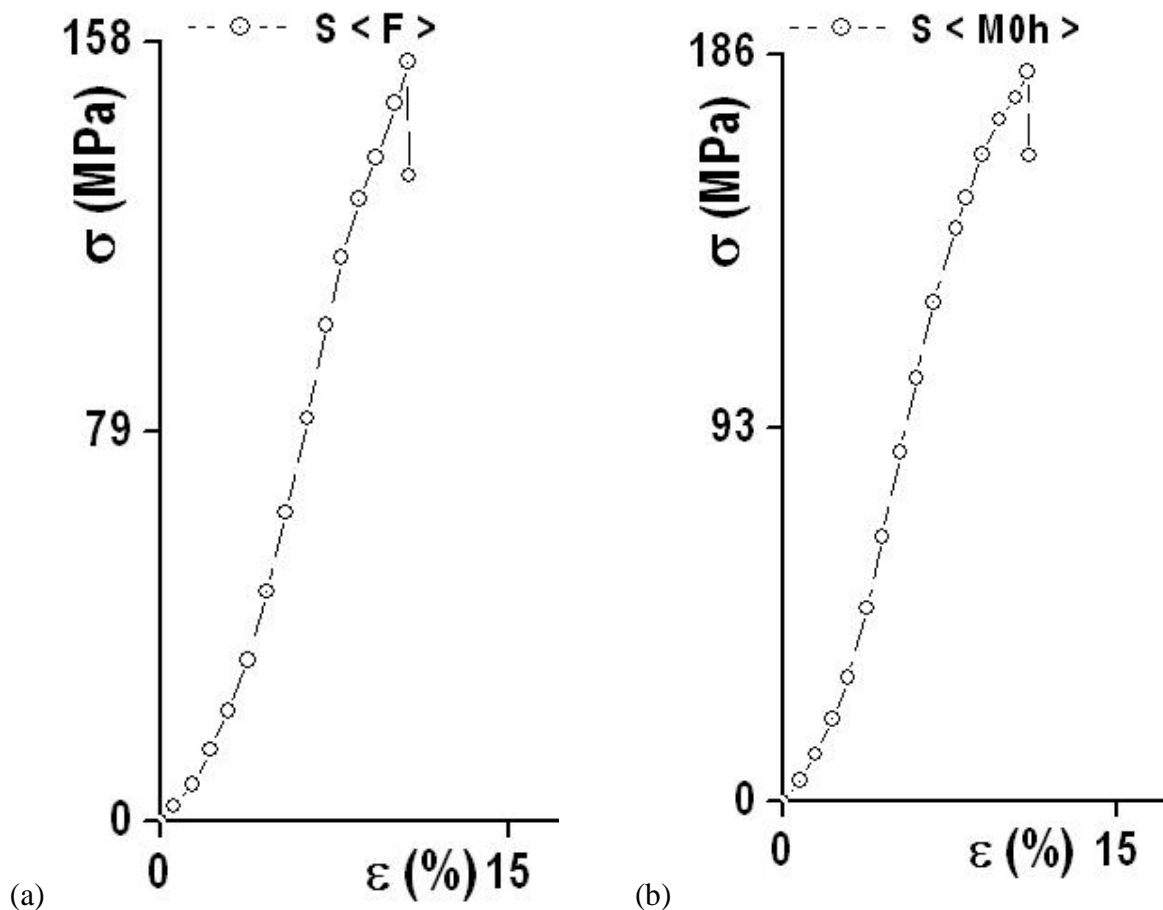
Pour chercher à augmenter plus les caractéristiques de résistances, l'alliage de désignation numérique 44000 est soumis aux traitements spécifiques ci-dessus.

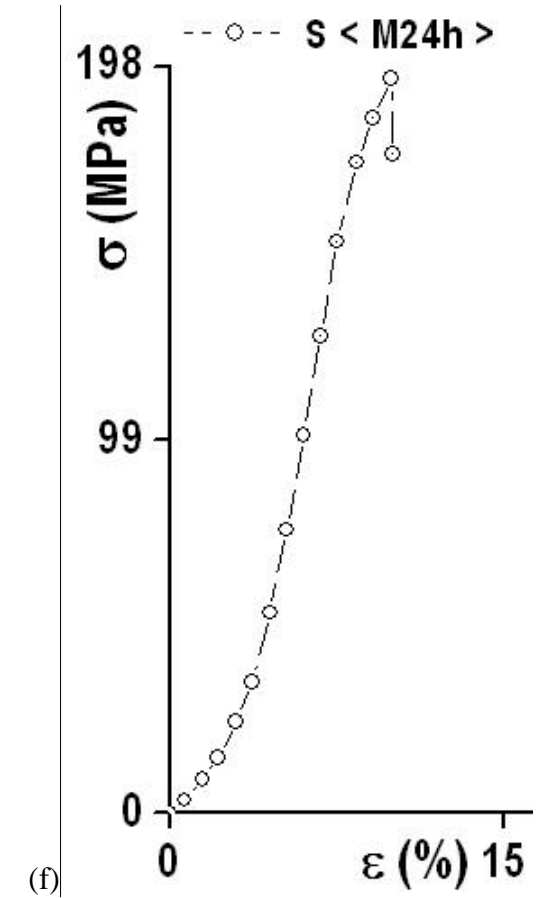
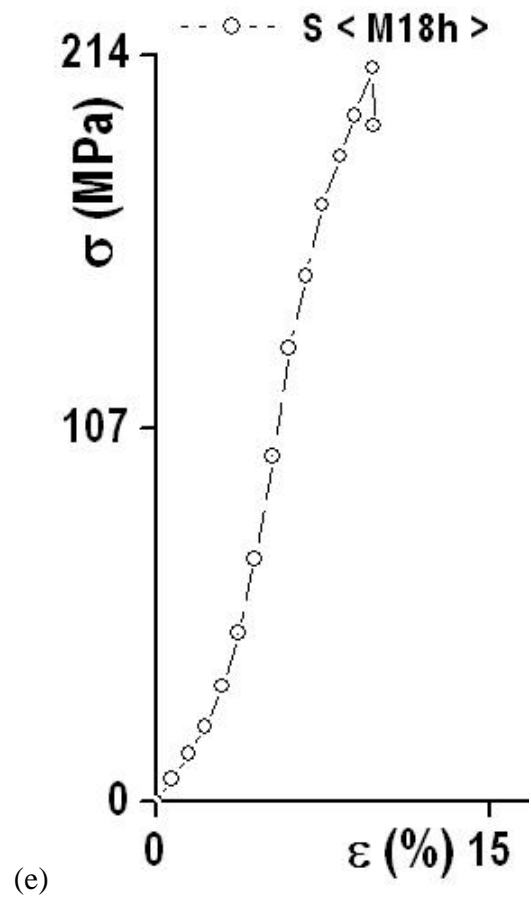
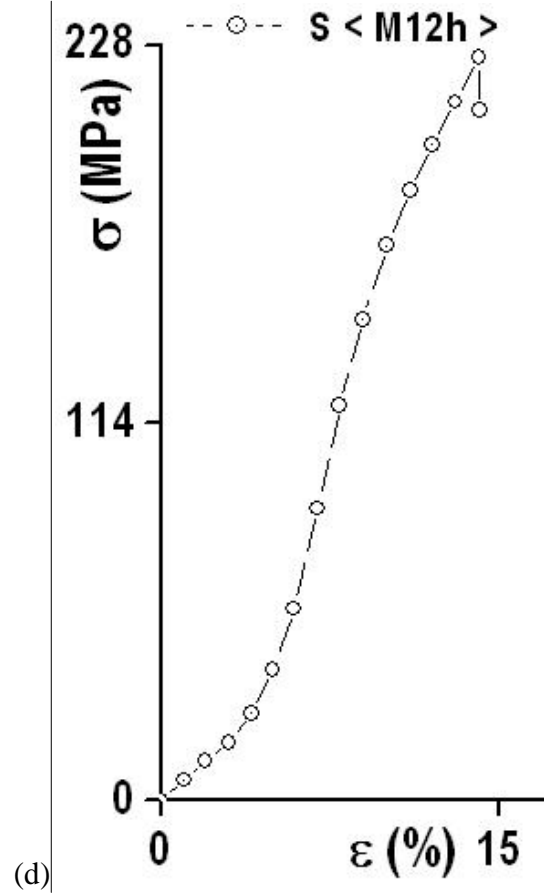
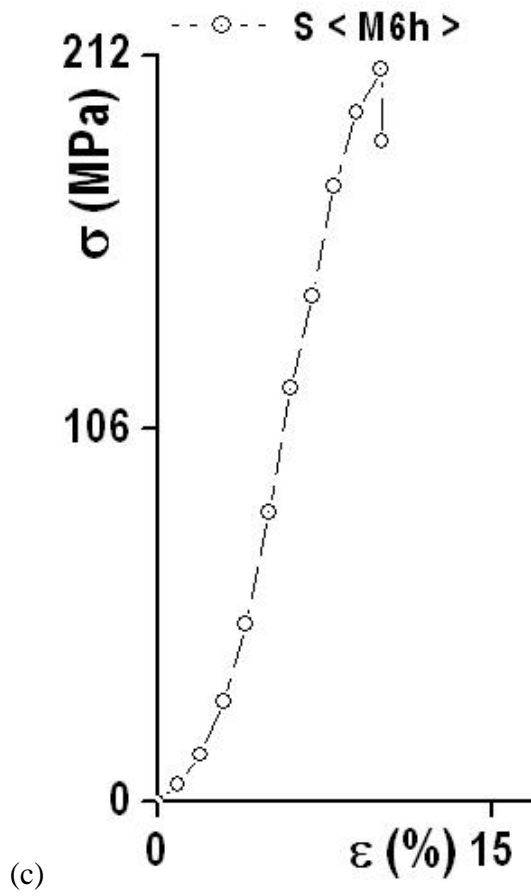
Effets des traitements thermiques sur les essais de dureté et de microdureté de la coulée en sable: Le champ de contraintes internes sert d'obstacle fort pour le mouvement de dislocations. Pour contrôler la déformation d'un matériau, il est donc nécessaire de connaître son état de contraintes. Les essais de dureté et de microdureté, techniques simples d'investigation sont des méthodes permettant de déterminer quantitativement l'intensité de ce champ. Pour les alliages légers, nous utilisons souvent la dureté Brinell et la microdureté

III.1.2 - EFFETS DU DURCISSEMENT PAR PRECIPITATION SUR L'ESSAI DE TRACTION

Les caractéristiques de traction des matériaux sont des paramètres très importants lors de 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 élastique à celui de déformation plastique, l'élongation et la charge à la rupture nous renseignent respectivement sur la limite 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. Tous ses paramètres sont déterminés à la suite de l'essai de traction.

III.1.2.1 – CARACTERISTIQUES DE RESISTANCES





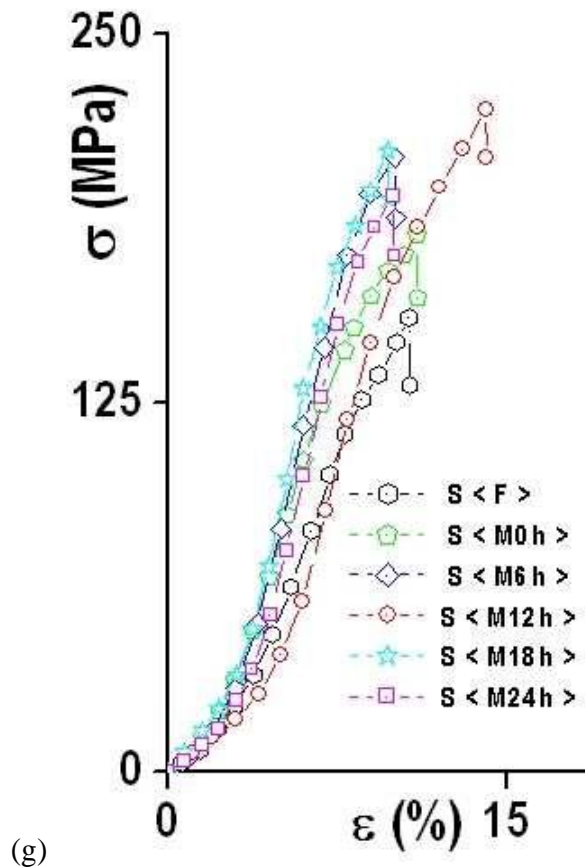


Fig.III.1 – Courbes de traction de la contrainte en fonction de la déformation de l’alliage AlSi13Mg aux états: (a) - brut de (b) – < M0h >, (c) - < M6h >, (d) - < M12h >, (e) – < M18h (f) – < M24h > et (g) – groupement des 6 états correspondants avec < > - contrainte moyenne, (%) - déformation.

Les **Figures.III.1-** ((a), (b), (c), (d), (e), (f)) représentent respectivement les courbes de traction moyennes (contraintes - déformations) de cinq éprouvettes de l’alliage AlSi13Mg pour chaque état des six considérés qui sont: (a) - brut de coulée noté : < F >, et

La **Figure.III.1 - (g)** représente le groupement des courbes moyennes (contraintes - déformations) des six états du mode de coulée en sable 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 Fig.III. [2 – 11] représentent respectivement l’évolution de la contrainte moyenne maximale, de la limite moyenne élastique, de la contrainte moyenne à la rupture, de la dureté Brinell moyenne, de la microdureté moyenne, du module d’Young moyen, du coefficient de poisson moyen, de l’allongement moyen, du coefficient moyen de striction, de l’allongement moyen de striction et de la résilience moyenne à travers les états considérés pour le mode de

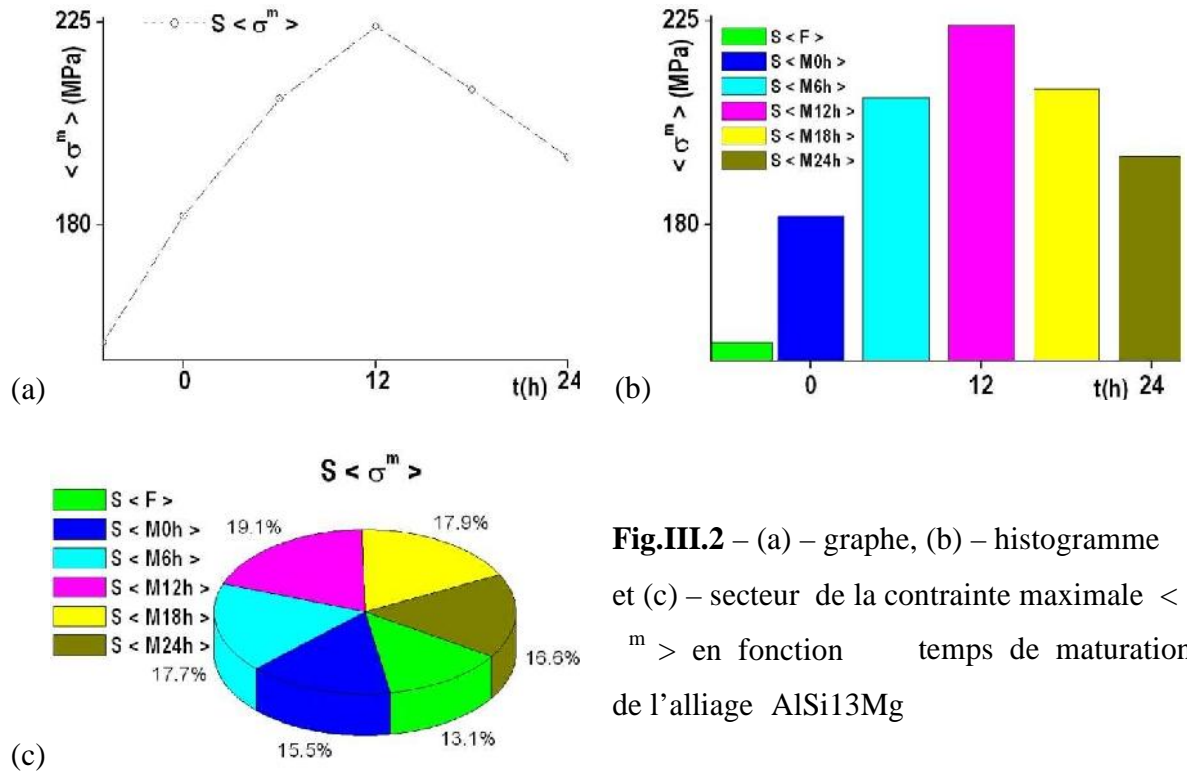


Fig.III.2 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la contrainte maximale $\langle \sigma^m \rangle$ en fonction temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

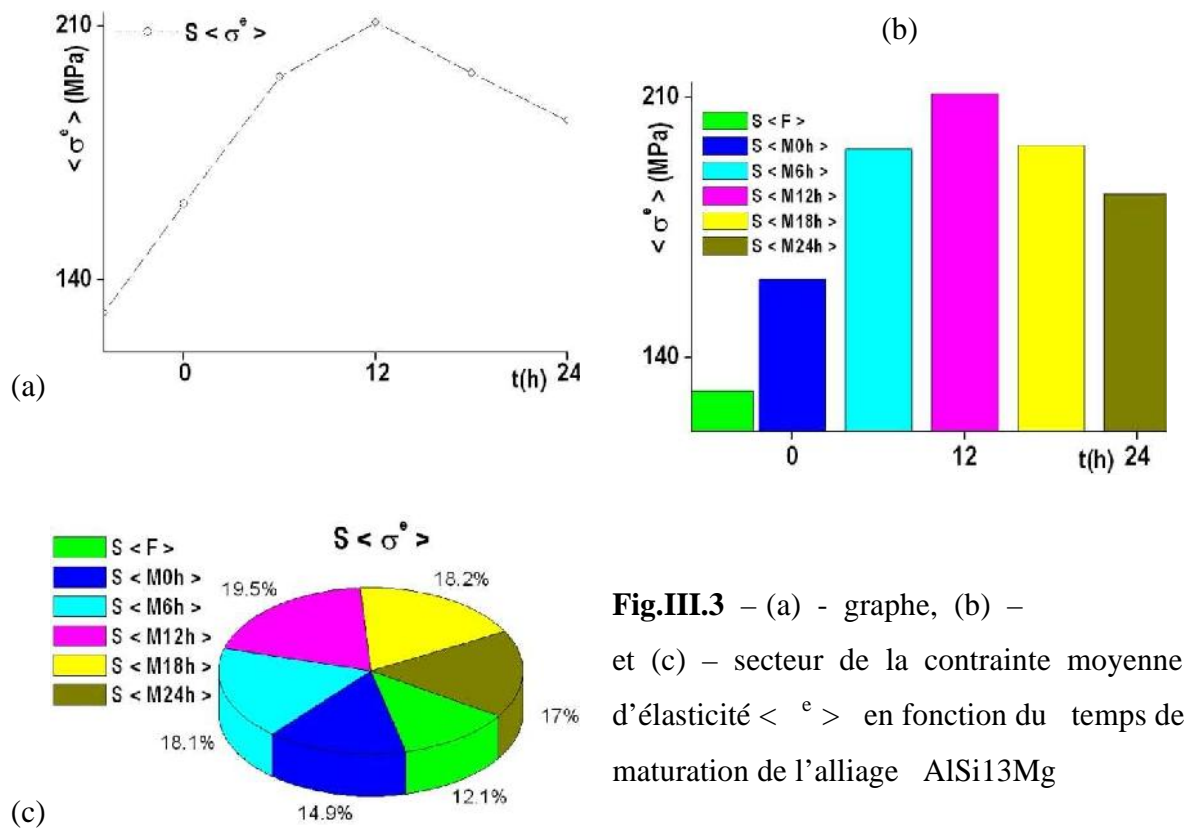


Fig.III.3 – (a) - graphe, (b) – et (c) – secteur de la contrainte moyenne d’élasticité $\langle \sigma^e \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

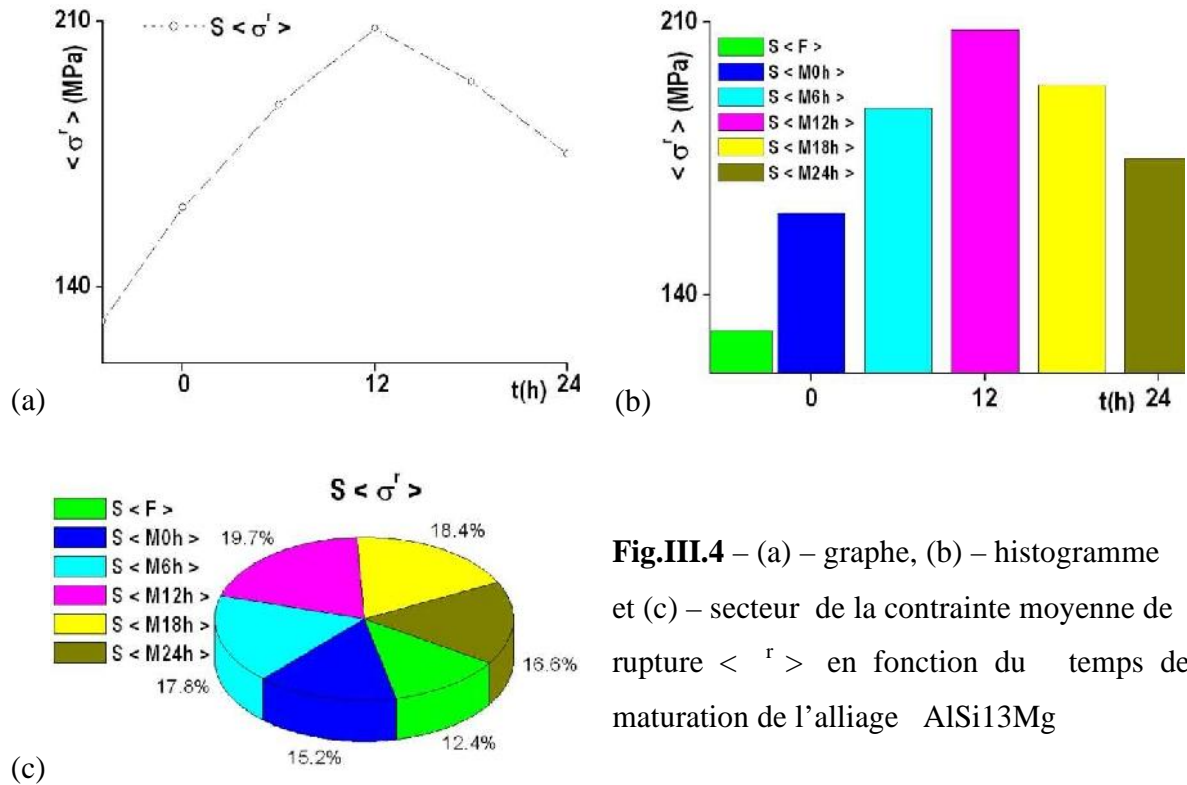


Fig.III.4 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la contrainte moyenne de rupture $\langle \sigma^r \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

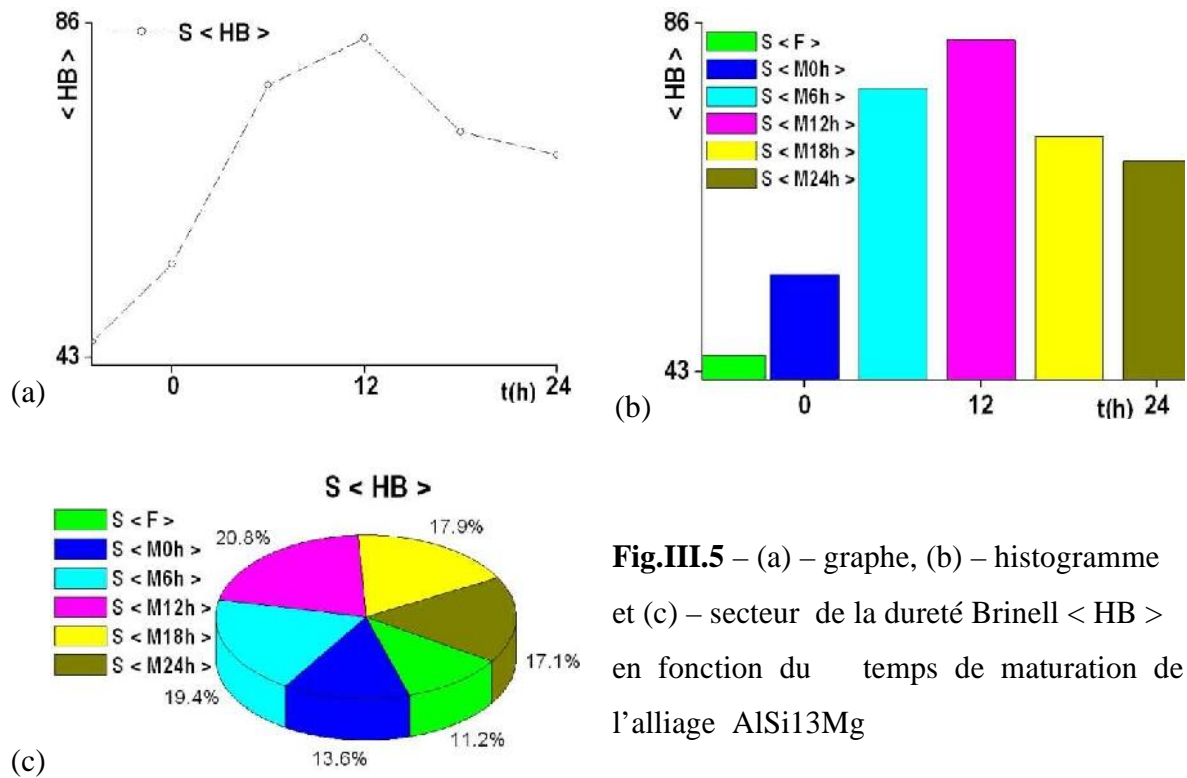


Fig.III.5 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la dureté Brinell $\langle HB \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

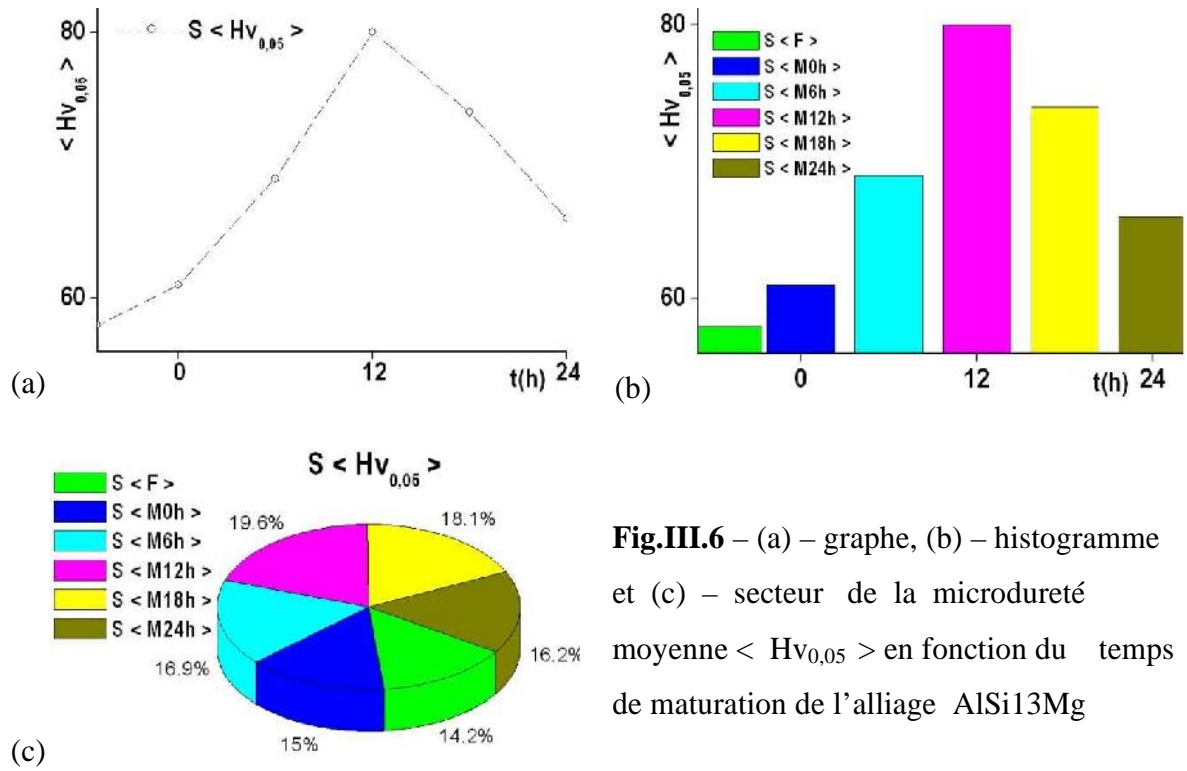


Fig.III.6 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la microdureté moyenne $\langle Hv_{0,05} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

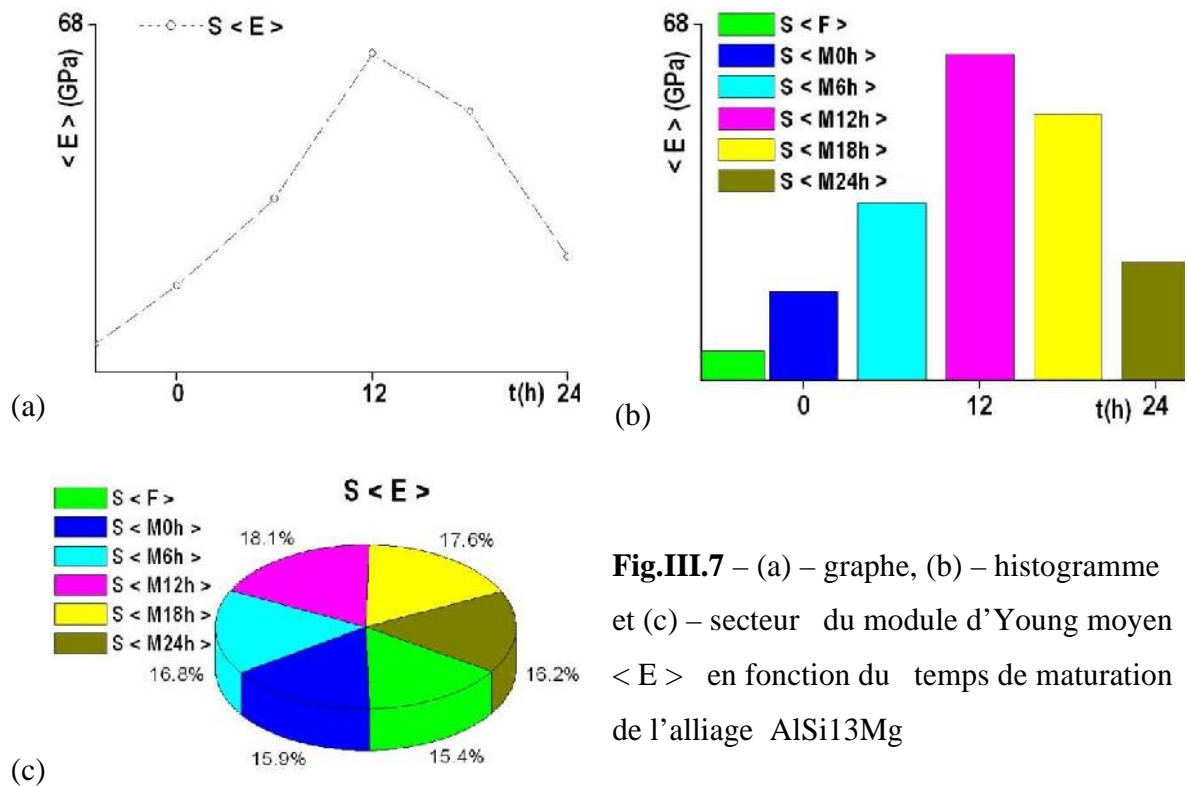


Fig.III.7 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur du module d’Young moyen $\langle E \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

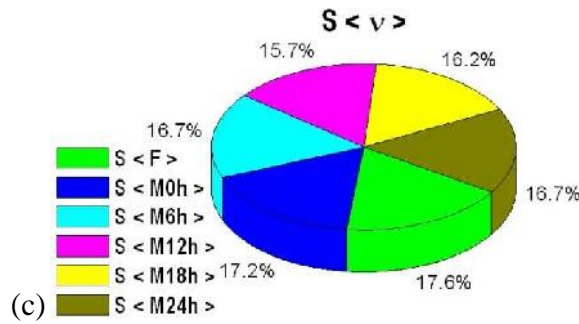
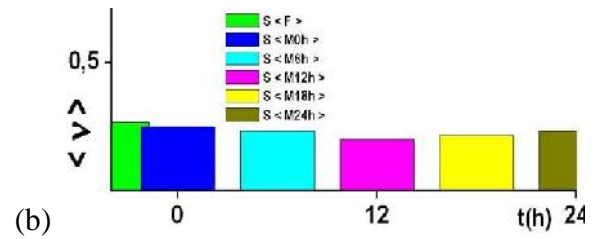
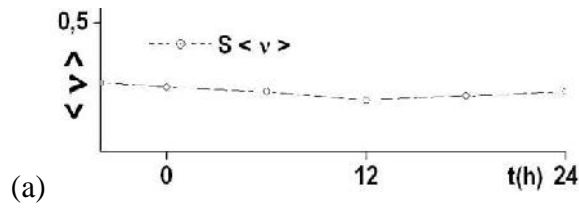


Fig.III.8 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen $\langle \nu \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

III.1.2.2 – CARACTERISTIQUES DE DUCTILITE

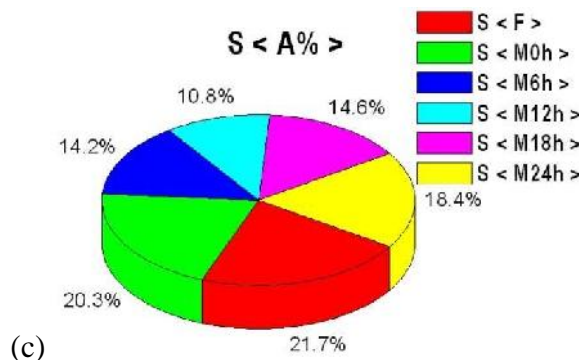
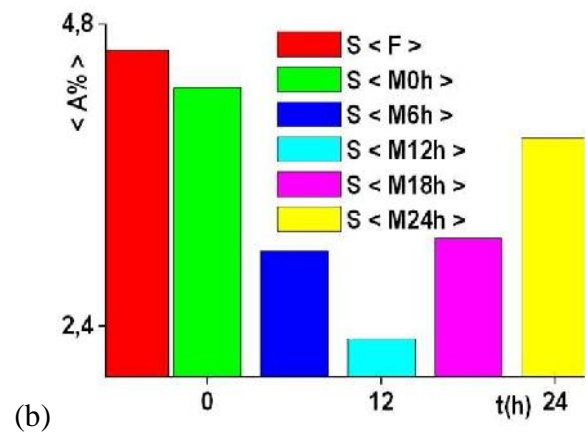
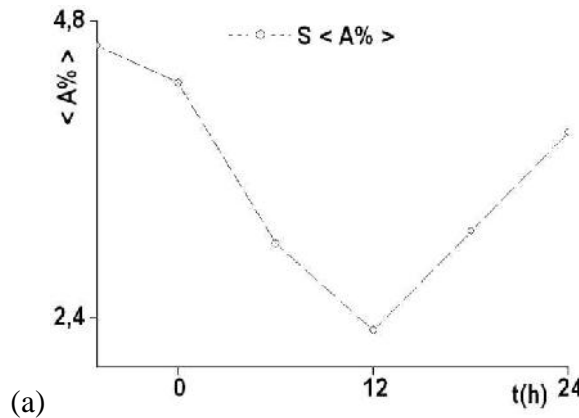


Fig.III.9 (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de l’allongement $\langle A\% \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

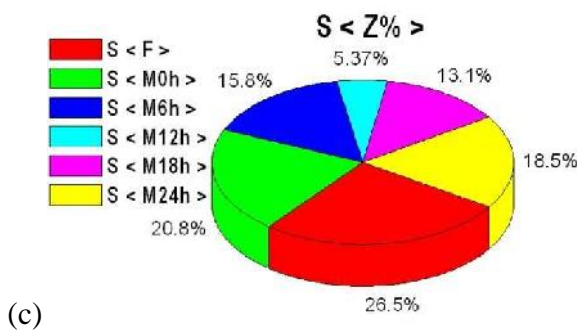
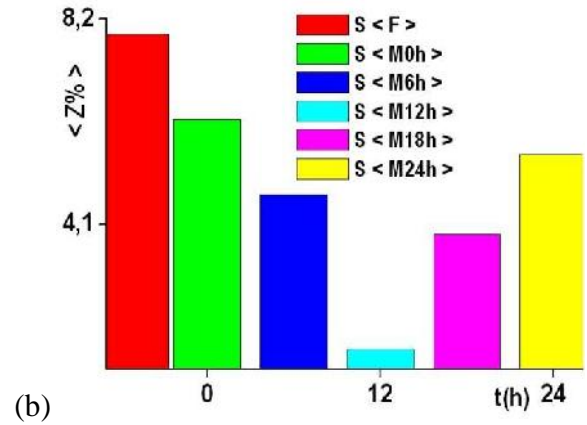
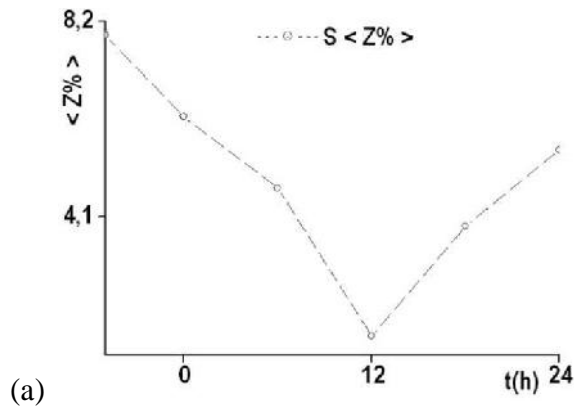


Fig.III.10 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur du coefficient moyen de striction $\langle Z\% \rangle$ en fonction du temps de

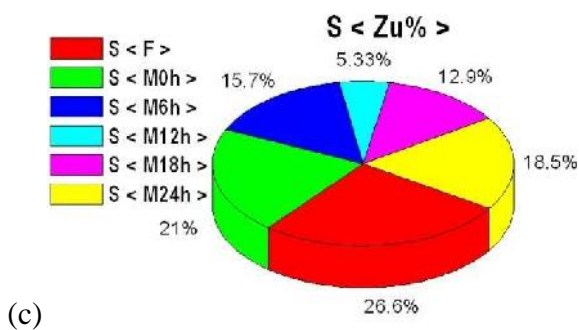
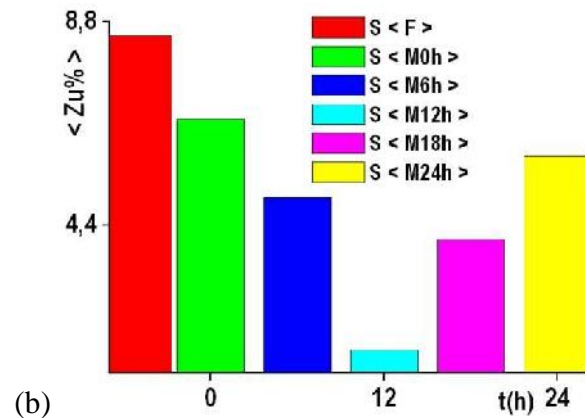
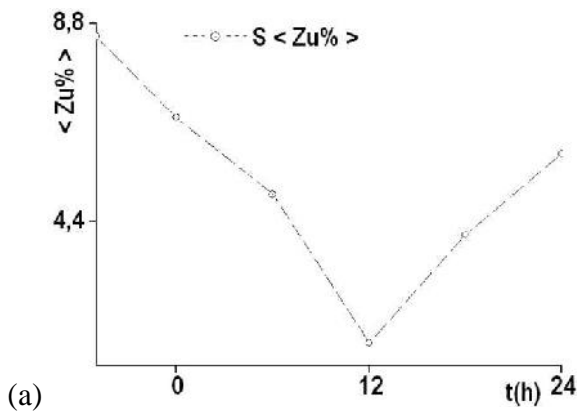


Fig.III.11 (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de l’allongement moyen de striction $\langle Zu\% \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

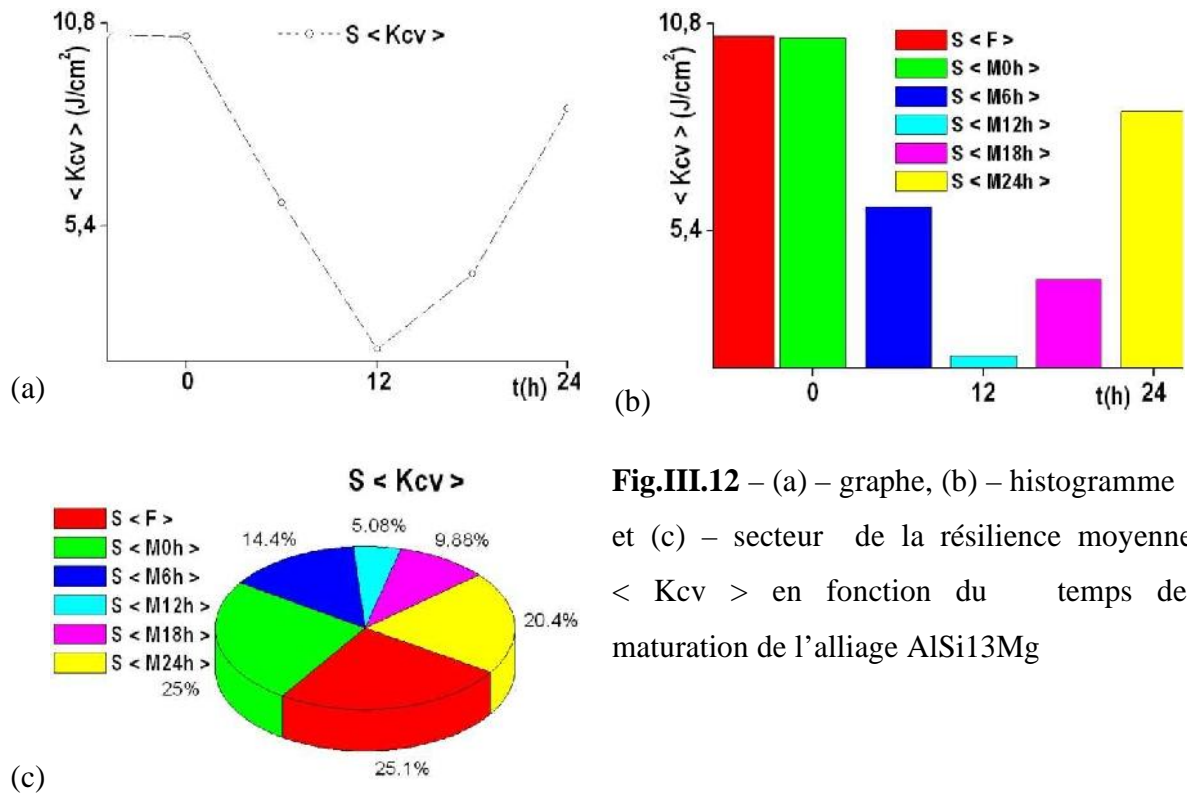
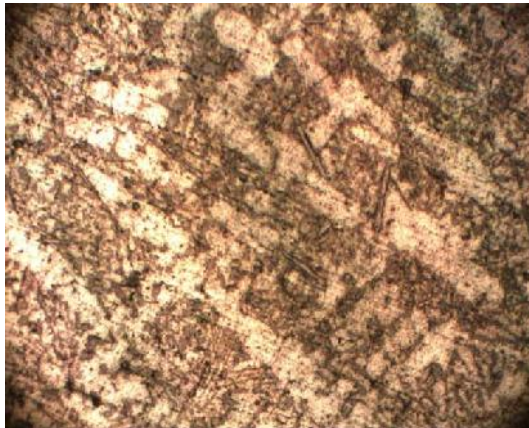


Fig.III.12 – (a) – graphe, (b) – histogramme et (c) – secteur de la résilience moyenne $\langle K_{cv} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

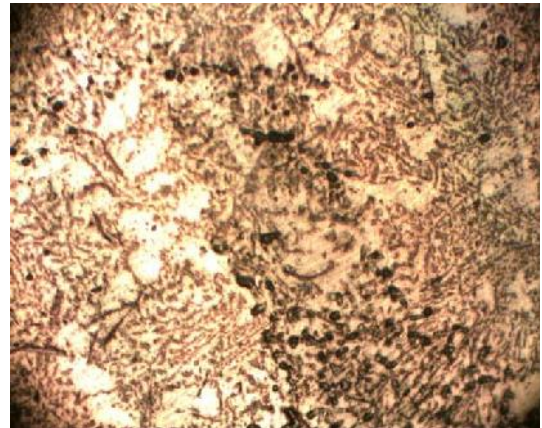
DISCUSSION

La Fig.III.1 – (g) nous montre que la courbe moyenne de l’état $\langle M12h \rangle$ est en dessus de toutes les courbes des autres états et les cinq propriétés mécaniques moyennes suivantes: la contrainte maximale à la traction $\langle \sigma^m \rangle$, la contrainte d’élasticité $\langle \sigma^e \rangle$, la contrainte à la rupture $\langle \sigma^r \rangle$, la dureté Brinell $\langle HB \rangle$, la microdureté Hv $\langle H_{v0,1} \rangle$ et le module d’Young $\langle E \rangle$ croissent respectivement d’une façon brutale de l’état brut de coulée: $\langle F \rangle$ (à propriétés de résistance minimales) pour atteindre la valeur maximale à l’état $\langle M12h \rangle$ (à propriétés de résistance maximales) pour décroître jusqu’à $\langle M24h \rangle$ (à propriétés de résistance minimales) (Fig.III.2 – Fig.III.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 $\langle K_{cv} \rangle$ – résilience qui décroissent d’une façon brutale respectivement de l’état brut de coulée: $\langle F \rangle$ (à propriétés de croître jusqu’à $\langle M24h \rangle$ (à propriétés de ductilité maximales) (Fig.III.9 – Fig.III.12) par contre le coefficient de poisson $\langle \nu \rangle$ reste presque invariant (Fig.III.8).

III.1.2.3 – MICROSTRUCTURES DE L'ALLIAGE AlSi13Mg



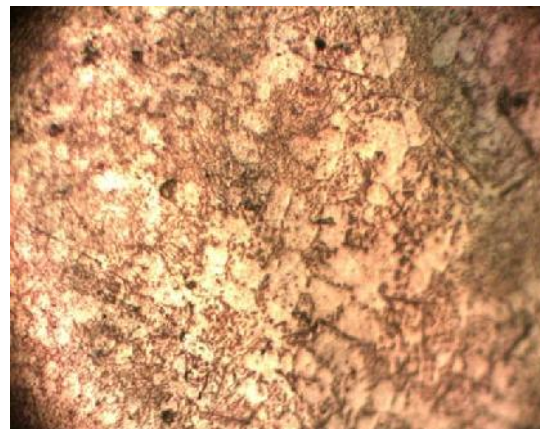
Fx100



M0hx100

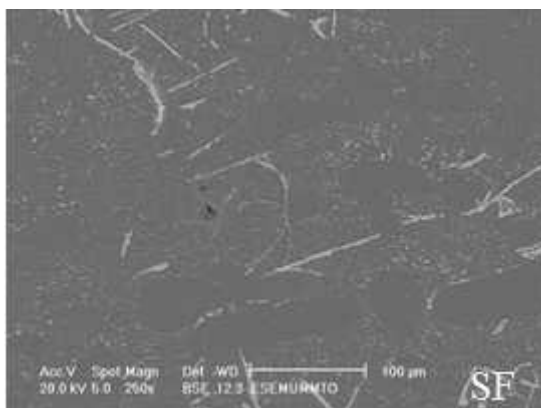


M12hx100

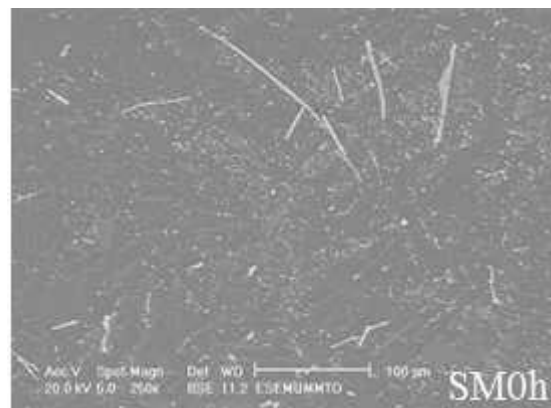


M24hx100

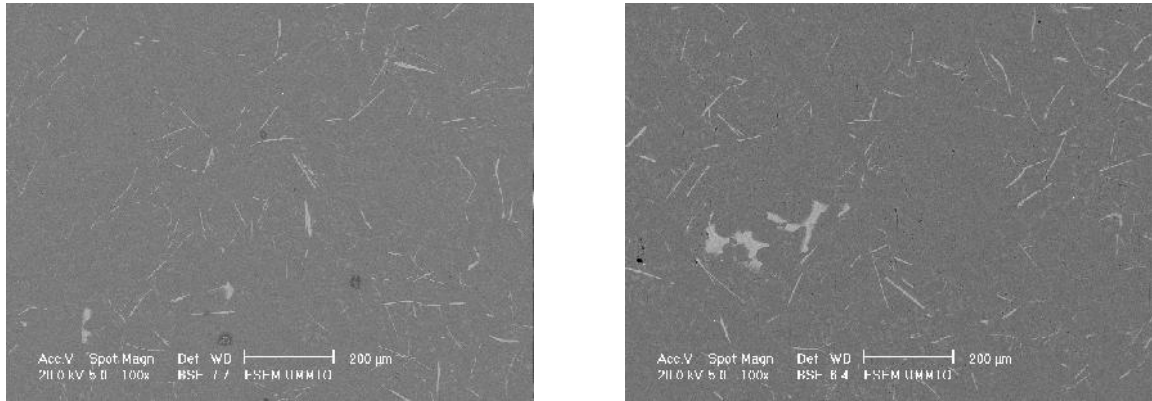
Fig.III.13 - Structures micrographiques de l'alliage eutectique AlSi13Mg



F



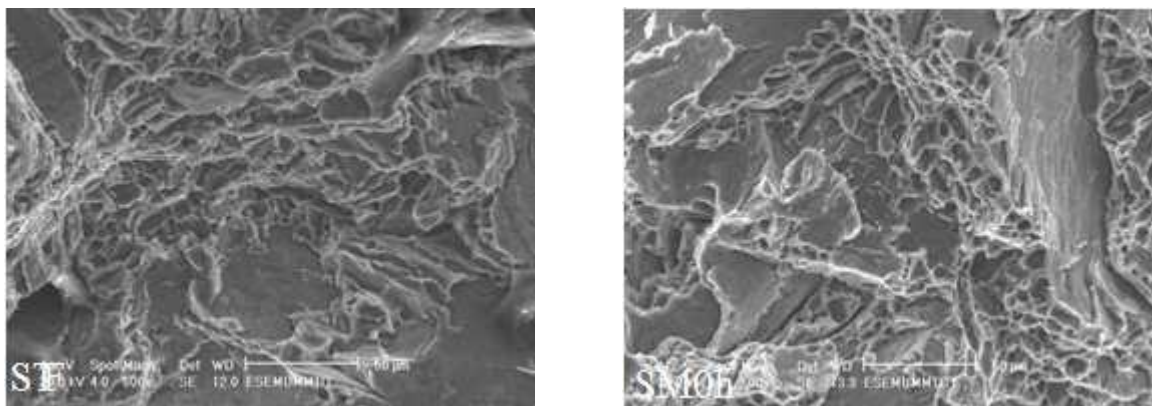
M0h



M12h

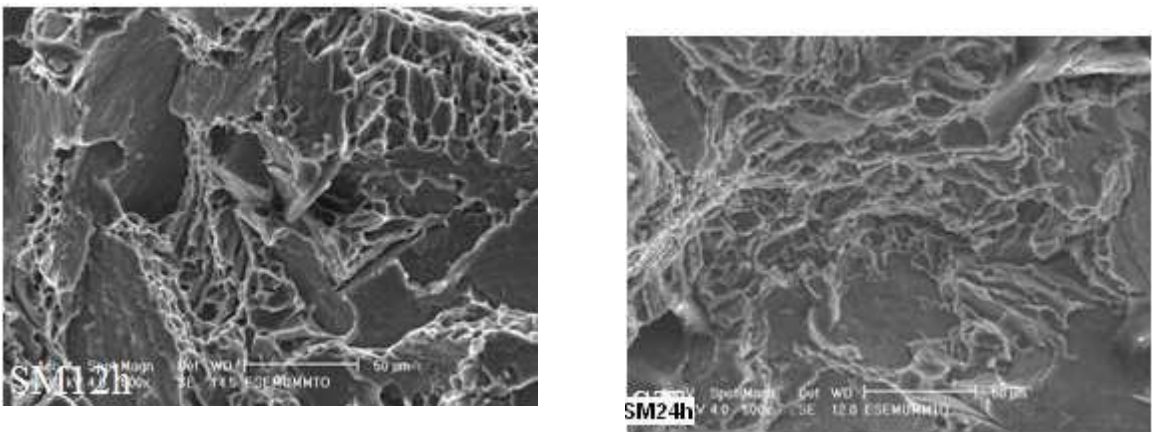
M24h

Fig.III.14 - Microstructures obtenues au MEB de l'alliage eutectique AlSi13Mg



F

M0h



M12h

M24h

Fig.III.15 - Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l'alliage eutectique AlSi13Mg

III.1.2.4 – INTERPRETATION ET DISCUSSION

A l'état brut de coulée, l'alliage étudié *AlSi13Mg* renferme généralement des dendrites formées après solidification. L'amélioration des caractéristiques de traction, de dureté et de

microdureté de l’alliage étudié aux traitements de maturation et de revenu pour le mode

d’élaboration en sable est dû probablement aux faits suivants : en présence de particules : éléments d’addition Si, Mg et de précipitées dans toute la masse de l’alliage, les dislocations doivent, pour poursuivre leur déplacement, soient contourner les particules, soient les cisailer; le mouvement des dislocations ne peut se poursuivre que si la contrainte extérieure

Quel que soient les états considérés du mode de coulée en sable, les propriétés de résistances croissent de l’état brut de coulée noté: F à l’état M12h, pour décroître jusqu’à

l’état M24h. Pour cela, les contraintes de résistances sont maximales au détriment de la ductilité quels que soient les états considérés pour le mode de coulée en:



Sable: à la maturation **M12h**

De même la courbe (contraintes - déformations) de la maturation **M12h** est au dessus

III.2 - DETERMINATION DES PROPRIETES ELASTIQUES PAR ULTRASON DE L’ALLIAGE DE FONDERIE AISi13Mg

III.2.1 - Signaux

Caractéristiques	Dimensions	Signaux	
		Transversaux	Longitudinaux
Etats	F		
M12h	épaisseur e = 20 mm		
	largeur l = 55 mm		

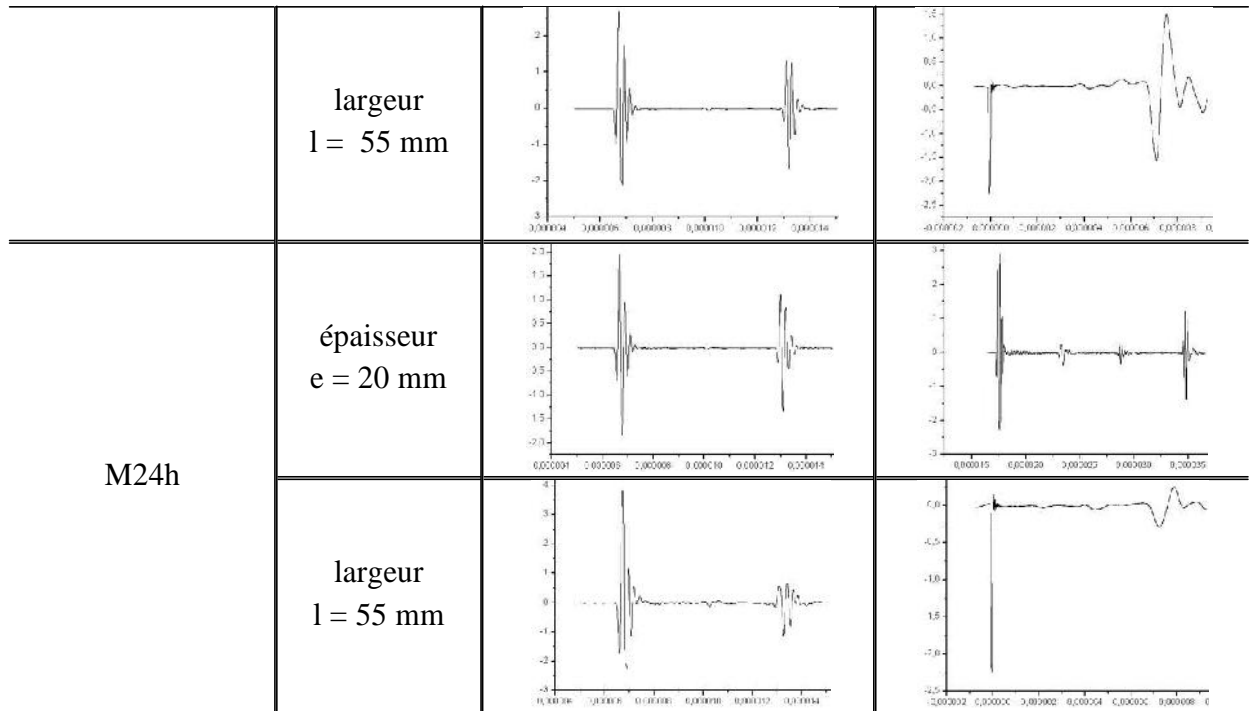


Fig.III.16 - Signaux enregistrés sur les éprouvettes prismatiques d’ultrason d’épaisseur (e = 20 mm) et de largeur (l = 55 mm) de l’alliage de fonderie AlSi13Mg aux états brut de coulée: F et maturés notés: < M12h > et < M24h >.

III.2.2 - CARACTERISTIQUES ELASTIQUES PAR ULTRASON

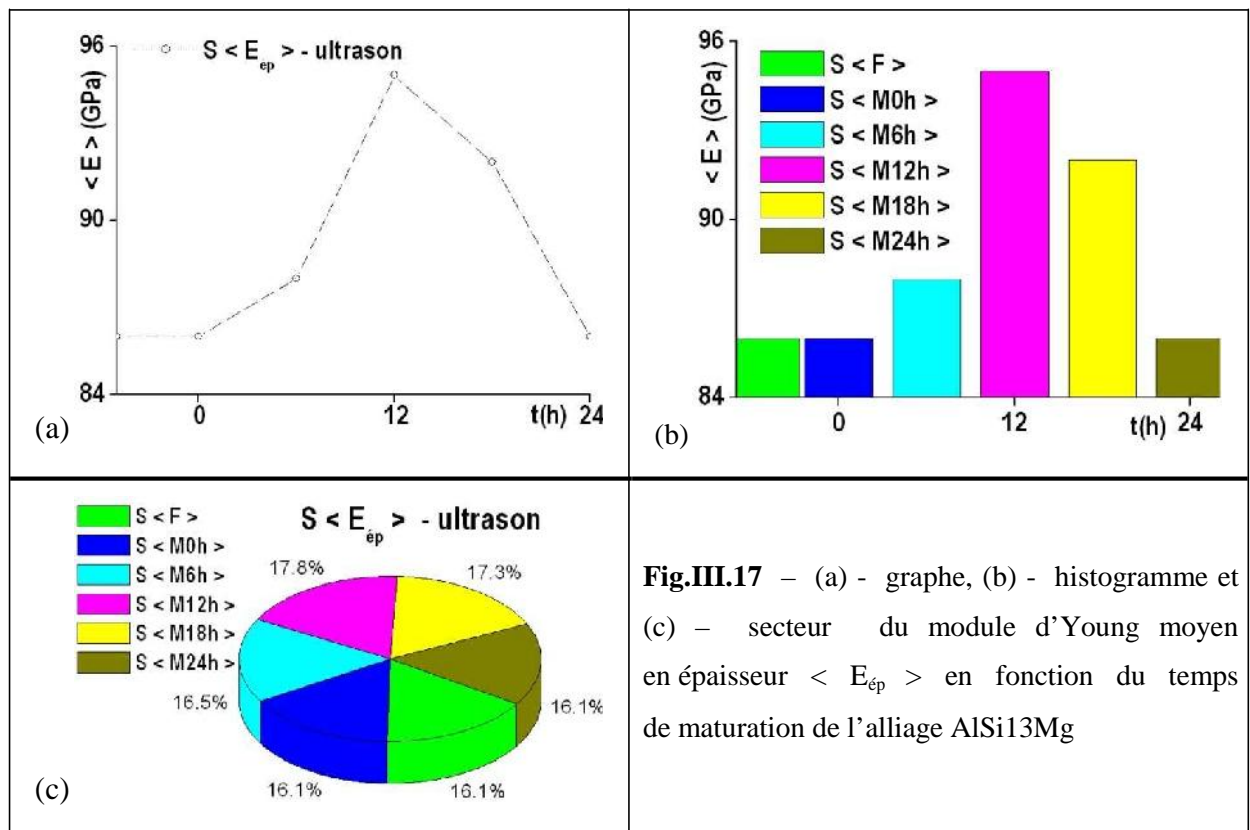


Fig.III.17 – (a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du module d’Young moyen en épaisseur < E_{ép} > en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

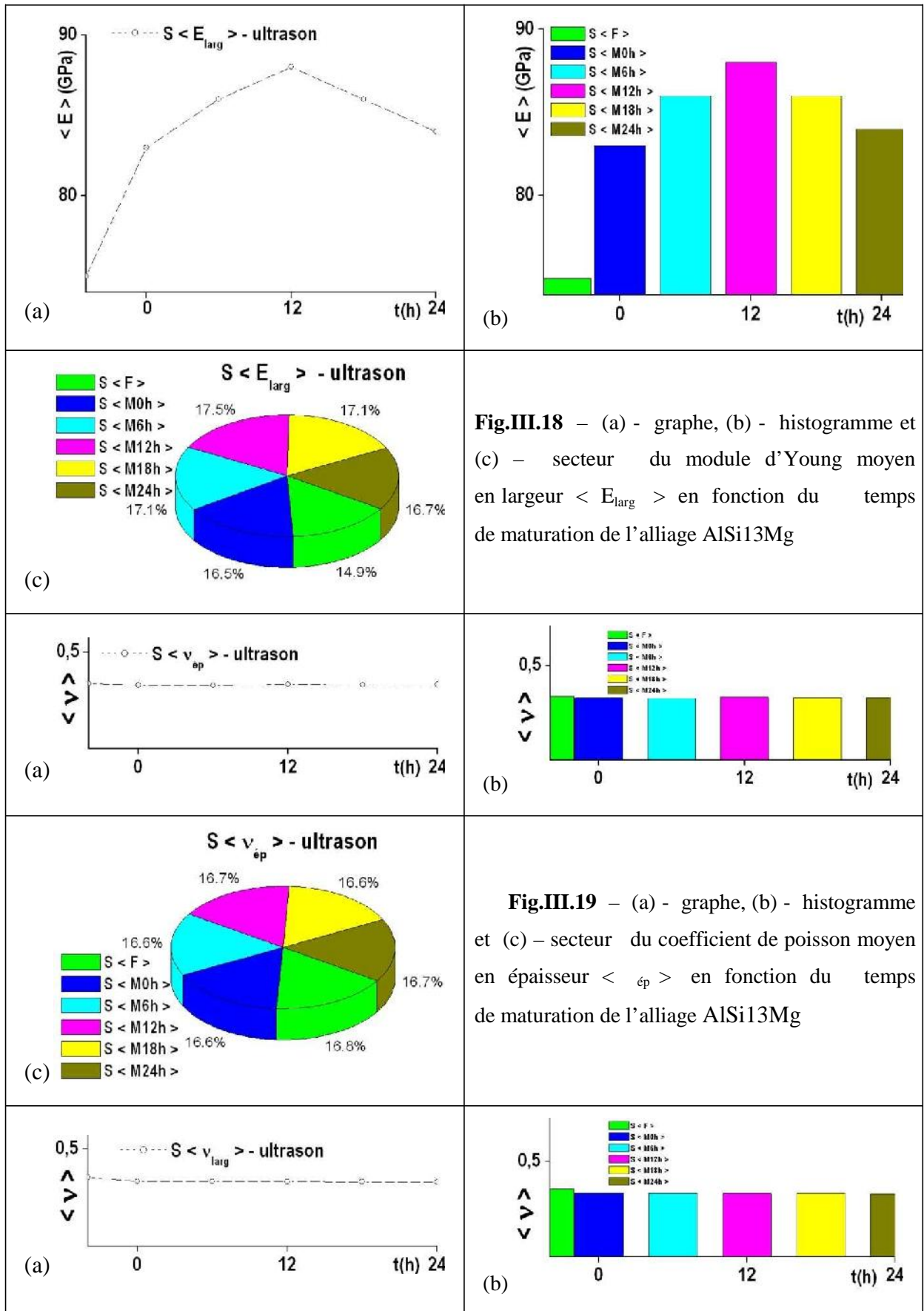


Fig.III.18 – (a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du module d’Young moyen en largeur $\langle E_{larg} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AISi13Mg

Fig.III.19 – (a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen en épaisseur $\langle \nu_{ep} \rangle$ en fonction du temps de maturation de l’alliage AISi13Mg

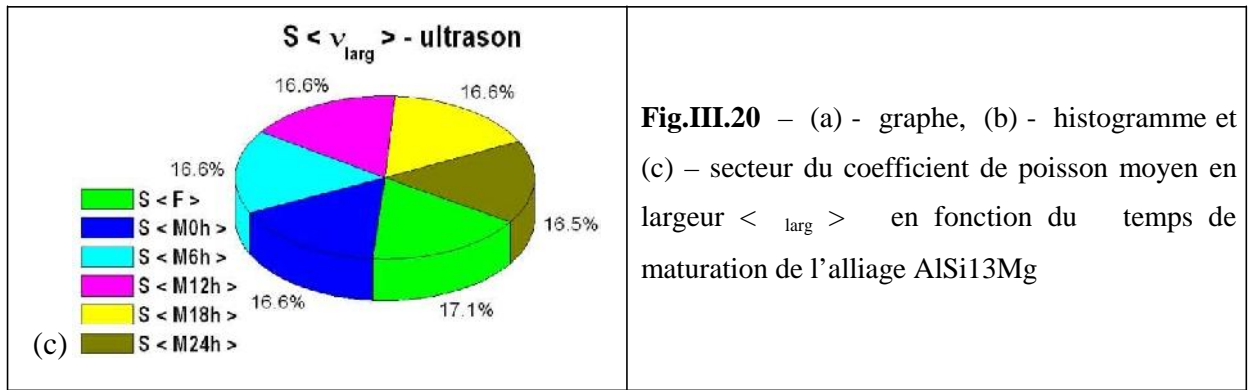


Fig.III.20 – (a) - graphe, (b) - histogramme et (c) – secteur du coefficient de poisson moyen en largeur < larg > en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg

Les fig. [17 - 18] nous montrent quel que soient les états considérés, les propriétés élastiques de résistances croissent de l’état brut de coulée noté : F à l’état M12h, pour décroître ensuite jusqu’à l’état M24h. Donc les propriétés élastiques sont maximales au détriment de la ductilité quels que soient les états considérés pour le mode de coulée en **Sable**: à la maturation **M12h**

III.2.3 – ETUDE COMPARATIVE DES PROPRIETES ELASTIQUES DE TRACTION ET ULTRASON DE L’ALLIAGE DE FONDERIE AlSi13Mg

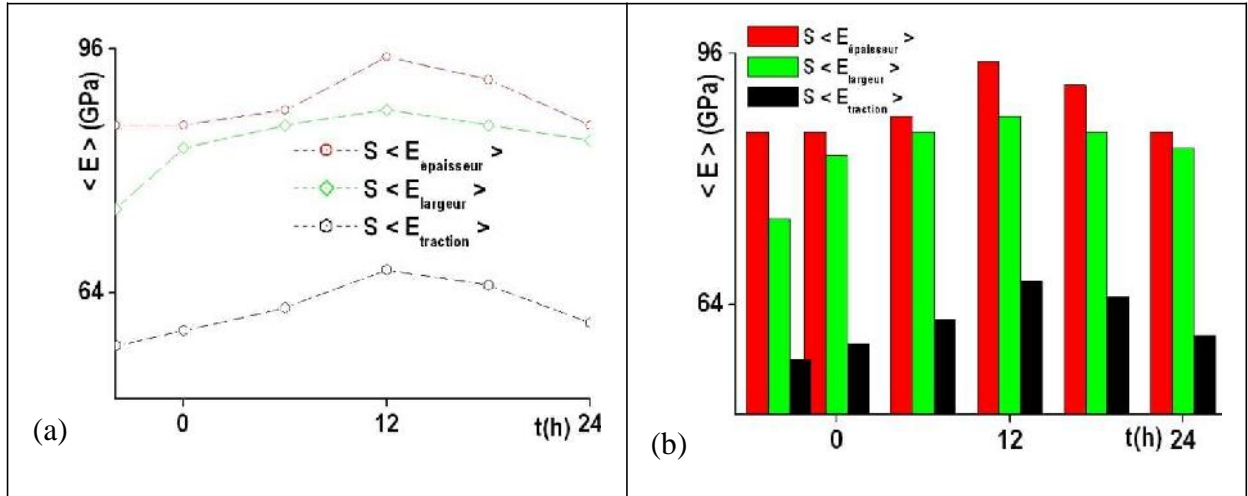
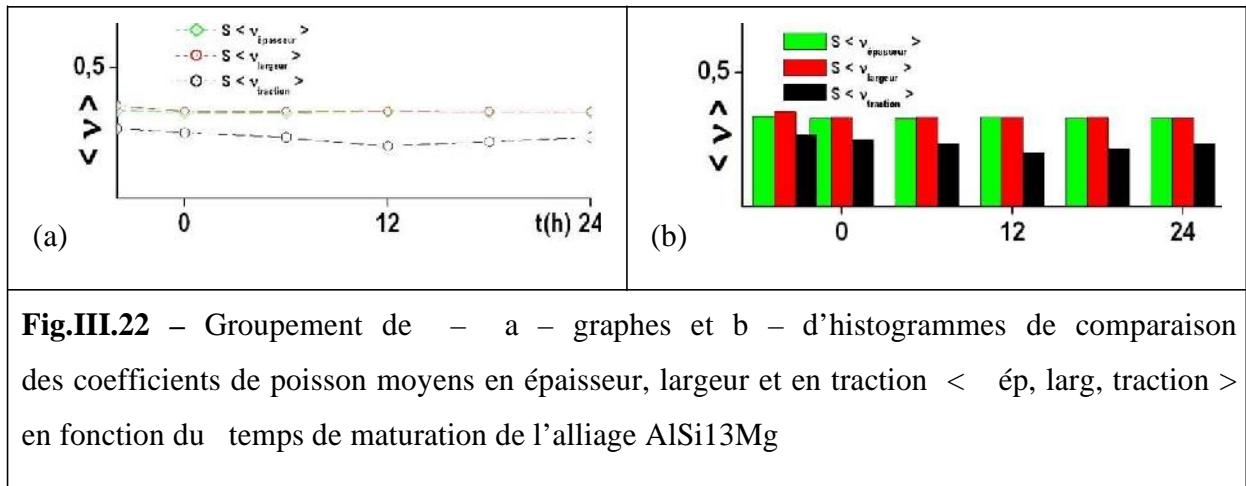


Fig.III.21 – Groupement de a – graphes et b – d’histogrammes de comparaison des modules d’Young moyens en épaisseur, largeur et en traction < E ép, larg, traction > en fonction du temps de maturation de l’alliage AlSi13Mg



L’étude comparative des propriétés élastiques communes fig. [21 - 22] ci-dessus:

- modules d’Young moyens,
- coefficients de poisson moyens,

en épaisseur, largeur (ultrason) et en traction en fonction du temps de maturation croissent et décroissent de la même manière. Les graphes des propriétés obtenues par ultrason sont presque confondus, par contre les graphes des propriétés obtenues par traction sont très en dessous de ceux de traction.

Conclusion

Dans cette présente étude, on s'est intéressé à l'étude des effets des traitements thermiques de maturation en faisant varier le temps de maturation par pas de six heures sur une période de 24 heures sur l'évolution des caractéristiques de résistances, de ductilité et microstructurales de l'alliage de fonderie AlSi13Mg non normalisé.

Afin d'atteindre les objectifs, nous avons élaboré l'alliage de fonderie AlSi13Mg et pris comme matériau d'étude au sein de l'entreprise SNVI de Rouïba, unité fonderie aluminium.

Les résultats nous montrent que:

1 - Les propriétés de résistances de l'alliage AlSi13Mg coulé en sable croissent de l'état brut de coulée (F) à l'état M12h pour décroître jusqu'à l'état M24h, donc les contraintes de résistances sont maximales à l'état M12h au détriment de la ductilité quels que soient les états considérés pour le mode de coulée en sable.

2 - De même les propriétés élastiques par ultrason de l'alliage de fonderie AlSi13Mg sont maximales au détriment de la ductilité quels que soient les états considérés pour le mode de coulée en sable à la maturation M12h.

3 - L'étude comparative des propriétés élastique de traction et ultrason de l'alliage de fonderie AlSi13Mg montre que:

Les modules d'Young moyens, les coefficients de poisson moyens en épaisseur et largeur (ultrason) et en traction en fonction du temps de maturation croissent et décroissent de la même manière. Les graphes des propriétés obtenues par ultrason sont confondus, par contre les graphes des propriétés obtenus par traction sont très en dessous de ceux d'ultrasons.

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I.1 : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

- [1] Jean-Paul BAILON et Jean. Marie DORLOT, Des Matériaux, Troisième édition, école polytechnique de Montréal, 2000.
- [2] G.FONCY et POMPIDOU, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation, AFNOR 2eme édition, 1992.
- [3] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR NATHAN, Paris, 2001
- [4] Michel COLOMDIE et COLL, Matériaux Industriel : Matériaux Métalliques, édition DUNOD, Paris, 2000.
- [5] I.LAKHTINE, Métallographie et traitement thermiques des métaux, 4eme édition, édition MII. MOSCOU, 1986.
- [6] Jean PHILIBERT, Alain VIGNES, Yuves BRECHET, Métallurgie du mènèrai au matériau, édition MOSON, Paris, 1998.
- [7] Burnos DUBOS, Pierre SAIN FORT, Technique de l'ingénieur, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium.
- [8] G.SERRE, Leçon de dessin industriel et technologie, Tome 2.
- [9] William D. Callister, Jr. Science et génie des matériaux, 5eme édition, 2000.
- [10] Pierre Papon, Jaque LEBOND et Paul H.E.MEIJER, Physique des transitions de phase : concepts et applications, 2eme édition, DUNOD, Paris, 2002.
- [11] Fiche techniques d'alliages de fonderie à l'usage du fondeur.

CHAPITRE I.2 : ELABORATION DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM

- [1] Michel COLOMDIE et COLL, Matériaux Industriel : Matériaux Métalliques, édition DUNOD, Paris, 2000.
- [2] Jean PHILIBERT, Alain VIGNES, Yuves BRECHET, Métallurgie du mènèrai au matériau, édition MOSON, Paris, 1998.
- [3] Bernard JOUFFERY, Guy MURRY, Techniques de l'ingénieur : Matériaux métalliques, études et propriétés, édition 2000.
- [4] Jean Paul BAILON, Jean Marie DORLOT, Des matériaux, école polytechnique de Montréal.
- [5] J. Lignon, R.MAILLEBUAU, Etude des matériaux non ferreux.
- [6] J. Lignon, R.MAILLEBUAU, Technique de fabrication mécanique : Etude des matériaux : Matériaux non ferreux, Delagrave, Paris, 1977.
- [7] R. QUATREMER et J. PHOTIGNON, Précis de construction mécaniques, dessin conception et normalisation, 7^{ème} édition, AFNOR NATHAN.
- [8] Burnos DUBOS, Pierre SAIN FORT, Technique de l'ingénieur, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium.

CHAPITRE I. 3 : TRAITEMENT THERMIQUE

- [1] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis Métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR, NATHAN, Paris, 2001.
- [2] g. FANCY et POMPIDOU, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation, AFNOR 2eme édition, 1992.
- [3] Jean PHILIBERT, Alain VIGNES, Yves BRECHET, Métallurgie du mènèrai au matériau, Edition MOSSON, Paris, 1998.
- [4] Pierre GUENIN, Technique de l'ingénieur : Métallurgie des alliages de fonderies – Traité matériaux métalliques, DUNOD, AFNOR, Paris, 2002.
- [5] Sylvain JACOB, Techniques de l'ingénieur : Données numériques sur les alliages d'aluminium de moulage, DUNOD, AFNOR, Paris, 2002.
- [6] LAMOUREUX Jean-Jacques, Précis de corrosion, édition Beauchemin, MASSON, Paris, 1994.
- [7] BARRALIS Jean et MEADER Gérard, Précis Métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR, NATHAN, Paris, 1997.
- [8] D.William, Callister, Jr., Science et génie des matériaux, 5^{ème} édition, Québec, 2001.

CHAPITRE I.4 : ESSAIS MECANIQUES

- [1] Michel COLOMDIE et COLL, Matériaux Industriel : Matériaux Métalliques, édition DUNOD, Paris, 2000.
- [2] Gérard de Smet, la pratique des traitements thermiques des métaux industriels, DUNOD, Paris, 1972.
- [3] Jean Paul Bailon, Jean Marie Dorlot, Des matériaux, école polytechnique, Montréal, 2000.
- [4] J.P.Poirier, Plasticité à haute température des solides cristallins, Paris, 1976.
- [5] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR NATHAN, Paris, 2001.
- [6] I.LAKHTINE, Métallographie et traitement thermiques des métaux, 4eme édition, édition MII. MOSCOU, 1986.
- [7] g. FANCY et POMPIDOU, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation, AFNOR 2eme édition, 1992.
- [8] DUBOS Brunos, Pierre SAIN FORT, Technique de l'ingénieur, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium.
- [9] C. VARGEL, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, DUNOD, 1979.
- [10] Alain Cornet et François Hlawka, Métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique, Science des matériaux, Nouvelle édition technosup Ellips, édition Marketing S.A. 2010.
- [11] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, 1^{er} édition, AFNOR NATHAN, Paris, 1997.
- [12] Jean Perdijon, Le contrôle non destructif par ultrason, Hermès, Paris, 1993.
- [13] FRANCOIS Dominique, Essais mécaniques et lois de comportement, Paris, HERMES Science Publications, 2001.

CHAPITRE I.5 : DEFAUT CRISTALLINS

- [1] Jean-Paul BAILON et J.M.DOROLT, Des matériaux, 3eme édition, école polytechnique de Montréal, 2000.
- [2] g. FANCY et POMPIDOU, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation, AFNOR 2eme édition, 1992.
- [3] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis Métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR NATHAN, Paris, 2001.
- [4] Michel COLOMDIE et COLL, Matériaux Industriel : Matériaux Métalliques, édition DUNOD, Paris, 2000.
- [5] C. VARGEL, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, DUNOD, 1979.
- [6] d. ALTENPOHL. Un regard à l'intérieur de l'aluminium, 1^{er} édition, ed : copyright dy aluminium-verlag Gmbh, 1976.
- [7] Jean PHILIBERT, Alain VIGNES, Yuves BRECHET, Métallurgie du mènerei au matériau, édition MOSON, Paris, 1998.
- [8] Bernard JOUFFERY, Guy MURRY, Technique de l'ingénieur, Matériaux métalliques, étude et propriétés, édition 2000.
- [9] Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Précis Métallurgie : Elaboration, Structure, Propriété, Normalisation, AFNOR NATHAN, Paris, 2001.
- [10] D.William, Callister, Jr., Science et génie des matériaux, 5^{ème} édition, Québec, 2001.

RESUME

L'aluminium de fabrication industriel présente une faible densité ce qui permet d'être utilisée dans la construction de diverses structures mécaniques; mais il possède des caractéristiques mécaniques médiocres. Pour les augmenter notablement, on a agit sur trois principaux facteurs modificateurs de la structure:

- Ajout à l'aluminium de deux éléments de très faible densité dont 13% de silicium qui facilite la coulabilité du métal et quelques traces de magnésium inférieur à 1% (1% Mg) principal agent d'amélioration des propriétés mécaniques.

- Moulage en sable par gravité aussi bien mécanique que manuel,

- Traitements de durcissement structural par précipitation faisant apparaitre d'une part une structure fine avec augmentation considérable de joints de grains, d'autre part des précipités (Mg_2Si) de différents genres, obstacles forts au mouvement de dislocations, ceux qui permettent l'augmentation des caractéristiques de résistances avec un compromis de ductilité.

Tous les résultats des propriétés mécaniques et structurales rassemblées dans la Partie III de notre mémoire nous montrent qu'il faudrait recommander pour le moulage de pièces quelle que soit la série: l'état SM12h.

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

ABSTRACT

Industrial manufacturing aluminum has a low density which allows its use in the construction of various mechanical structures; but it has poor mechanical characteristics. To increase them significantly, we have acted on three main factors modifying the structure:

- Addition to aluminum of two elements of very low density including 13% of silicon which facilitates the flowability of the metal and some traces of magnesium less than 1% (1% Mg) main agent for improving the mechanical properties.

- Gravity sand casting, both mechanical and manual,

- Structural hardening precipitation treatments showing on the one hand a fine structure with considerable increase of grain boundaries, on the other hand precipitates (Mg_2Si) of different kinds, strong obstacles to the movement of dislocations, those which allow the increase resistance characteristics with a compromise of ductility.

All the results of the mechanical and structural properties collected in Part III of our dissertation show us that we should recommend for the molding of parts whatever the series: the state SM12h.

Key words: Al-Si, sand, ripening, mechanical properties.