

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

ⵍⵓⵏⵓⵔ ⵎⵎⵎⵉⵔⵉ ⵉⵏ ⵜⵉⵣⵉⵓⵣⵓ



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire

de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master académique Sciences et Techniques
en Génie Mécanique, spécialité : Sciences des Matériaux

THEME

Détermination des caractéristiques élastiques de l'alliage
de fonderie $AlSi7Zn3Cu2$ par la méthode ultrasonique.

Proposé et dirigé par :
HAKEM Ahmed

Présenté par:
HARRAR Omar

ANNEE: 2012 - 2013

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

ⵝⵓⵏⵉⵏⵉ ⵏ ⵓⵏⵉⵎⵉⵔ ⵏ ⵓⵏⵉⵎⵉⵔ

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master académique Sciences et Techniques
en Génie Mécanique, spécialité : Sciences des Matériaux

Présenté par:

HARRAR Omar

THEME

Détermination des caractéristiques élastiques de l'alliage
de fonderie $AlSi7Zn3Cu2$ par la méthode ultrasonique.

Devant le jury composé de:

M ^r .	ZAZI	Nacer	M.C.A en Génie Mécanique	UMMTO	Président
M ^r .	HAKEM	Ahmed	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Rapporteur
M ^{me}	MOHELLEBI	Fadila	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Examinatrice
M ^r .	MOHELLEBI	Mouloud	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Examinateur

Date de la soutenance : 02/10/2013

Année Universitaire: 2012/2013

Introduction générale

L'aluminium est un élément chimique de symbole Al et de numéro atomique 13, c'est un élément important sur la planète Terre avec environ 8% de l'écorce terrestre, sous forme de silicate plus au moins complexe à faible teneur en aluminium.

Il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il pourrait également extraire d'autres minéraux tels que :

Néphéline, leucite, andalousite, muscovite. Sa découverte fut en 1827 par Friedrich Wöhler qui est le premier à définir ses propriétés chimiques et physiques.

Il possède des propriétés mécaniques prodigieuses qui font de lui le matériau le plus utilisé dans le monde derrière l'acier tel que : la résistance à la corrosion dans différents milieux, ductilité, résistance mécanique, bonnes conductibilités électriques et thermiques et une légèreté qui réduit d'avantage la consommation du carburant.

L'alliage qui régit notre étude vu ses qualités requises est utilisé dans divers domaines comme l'aéronautique, les pièces mécaniques, l'automobile et aussi dans la construction, qui réponds bien aux exigences particuliers grâce à leur faible température de fusion connus et bonnes aptitude au moulage et aussi on peut effectuer des traitements thermiques qui engendrent des modifications microstructurales importantes, habituellement durcissantes.

Dans ce travail on s'intéresse aux différentes transformations de phases et d'évolution microstructurale produite par les différents traitements thermiques (trempe, vieillissement et revenu) de l'alliage d'aluminium AlSi7Zn3Cu2Mg ainsi que leur influence sur ses caractéristiques mécaniques en particulier.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés aussi bien aux caractéristiques mécaniques que microstructurales de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg en lui imposant des traitements thermiques spécifiques suivants :

Traitement de mise en solution suivi d'une homogénéisation qui engendre une diffusion des atomes en solution solide de substitution et qui se fait dans un four de trempe à des températures avoisinantes les (500) °C et d'un maintien de 8h, suivi immédiatement d'une trempe à l'eau à température ambiante de (20 – 25)°C, d'une maturation de 16h à l'air ambiant et de différents revenus respectifs

de (150, 160, 170, 180, 190, 200, 220 et 240) °C pendant 20h dans une étuve de revenu et on le laisse refroidir dans l'enceinte du foyer de l'étuve .

Notre étude se scinde en une introduction générale, de trois parties et finalement on termine par une conclusion générale.

La première partie est réservée à la recherche bibliographique et elle contient six chapitres :

Chapitre I.1 : traite l'aluminium et ses alliages.

Chapitre I.2 : est consacré à la théorie d'élaboration de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

Chapitre I.3 : il décrit les traitements thermiques et la microstructure.

Chapitre I.4 : comprend les essais mécaniques.

Chapitre I.5 : commente sur les défauts cristallins et diffusion.

Chapitre I.6 :Essais non destructifs par ultrasons.

- La seconde partie : est réservée à la présentation de la partie expérimentale et comprend deux chapitres :

Chapitre II.1 : Appareillages utilisés.

Chapitre II.2 : Méthode expérimentale et élaboration.

- La troisième partie : est consacrée à l'analyse des résultats obtenus, suivie de leur interprétation et discussion.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Liste des tableaux

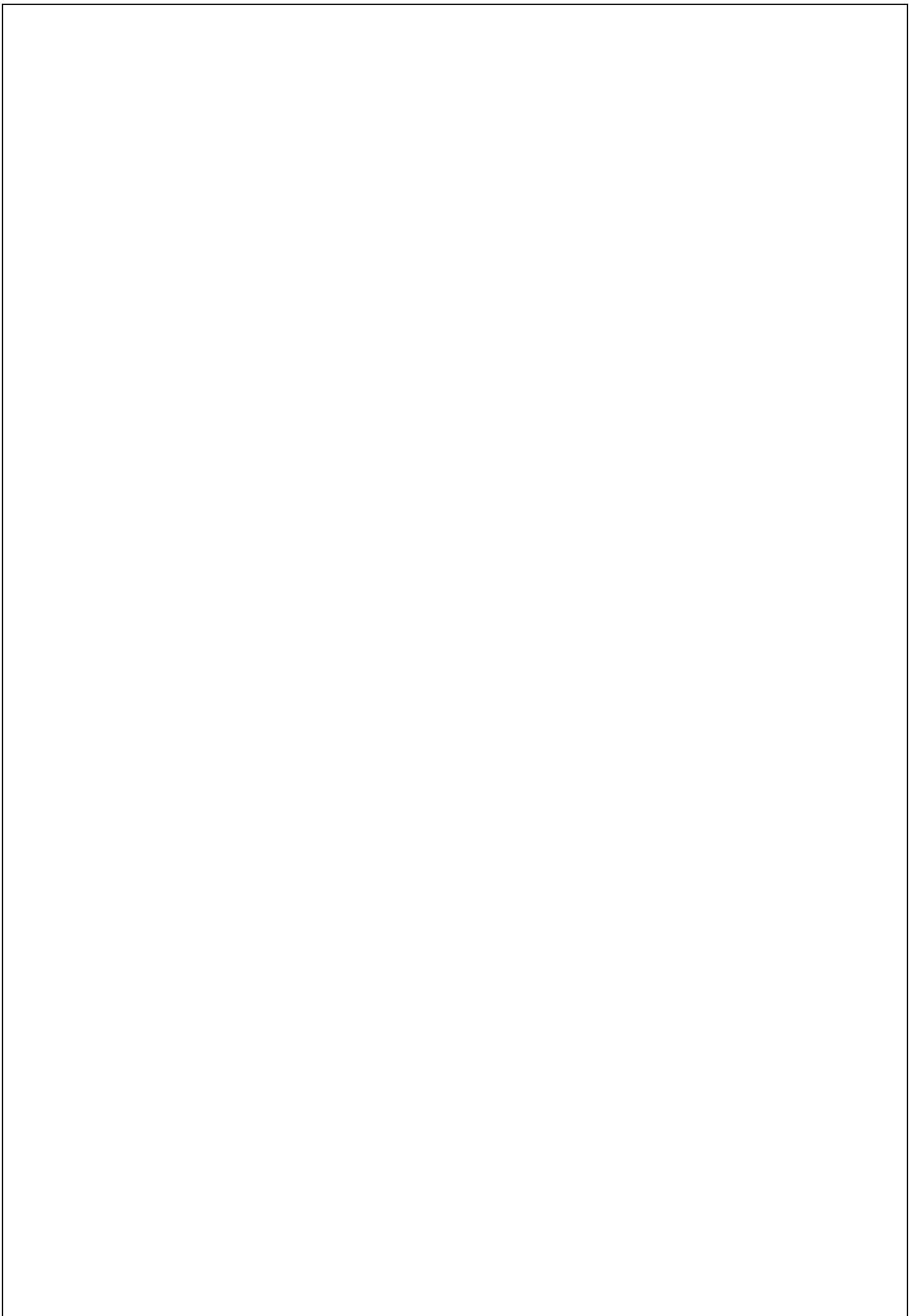
Tableau I.1 : Carte d'identité de l'aluminium.....	1
Tableau I.2 : Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages.....	4
Tableau I.3 : Désignation des états de livraisons.....	5
Tableau I.4 : Désignation des états métallurgiques.....	5
Tableau I.5 : Famille d'alliages d'aluminium moulés.....	6
Tableau 1.6 : Quelques groupes d'alliages d'aluminium.....	7
Tableau 1.7 : Désignation des états métallurgiques de base.....	8
Tableau 1.8 : Famille d'alliages d'aluminium corroyés.....	8
Tableau I.9 : Principaux alliages de fonderie.....	10
Tableau 1.10 : Désignation conventionnelle.....	13
Tableau 1.11 : Caractéristiques mécanique sur éprouvettes normalisées NF-576702 coulées à part.....	15
Tableau 1.12 : Composition chimique de l'alliage EN-4200.....	16
Tableau 1.13 : Composition des lingots d'AlSi7Mg livrés par l'aluminium français.....	16
Tableau I.14 : La vitesse longitudinale et transversale de différents milieux.....	51
Tableau. I.15 : Le champ de rayonnement d'un palpeur.....	55
Tableau II.1. Composition chimique de l'alliage AlSi7Mg.....	63
Tableau.III.1 : valeurs moyennes de la microdureté $\langle HB \rangle$ des dix états.....	68
Tableau.III.2 : valeurs moyennes de la microdureté $Hv_{0,1}$ des dix états.....	69
Tableau.III.3 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la direction $X=200\text{mm}$ des dix états (E, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240).....	72
Tableau.III.4 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la direction $Y=150\text{mm}$ des dix états (E, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240).....	79
Tableau.III.5 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la direction $Z=20\text{mm}$ des dix états (E, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240).....	85

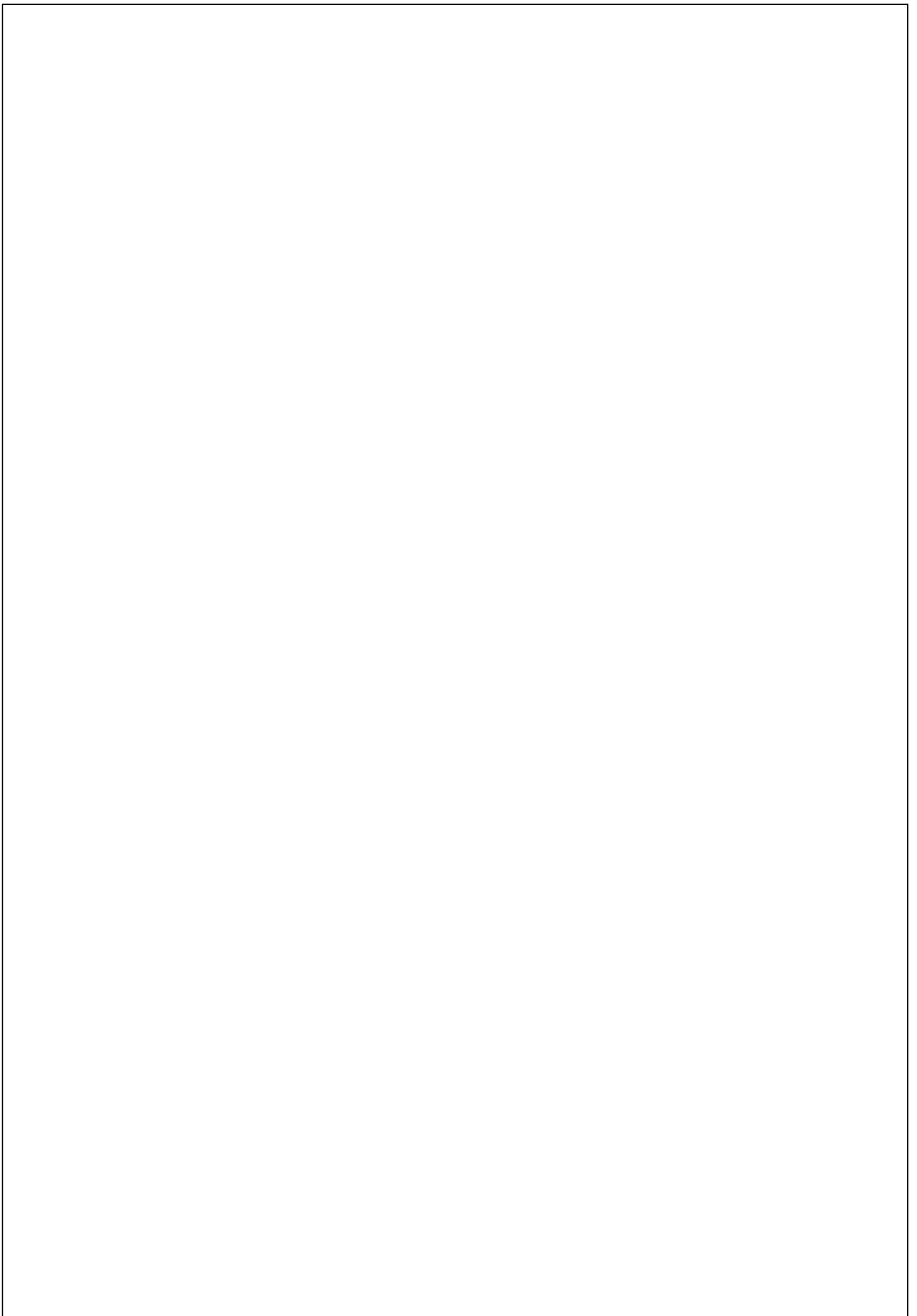
Liste des figures

Fig. I.1 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	11
Fig. I.2 : Principe de laminage.....	14
Fig. I.6 : Cycle thermique.....	24
Fig. I.7 : Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium.....	28
Fig. I.8 : Cycle thermique du durcissement structura	29
Figure I.9 : Diagramme d'équilibre partiel Al-Cu.....	30
Fig.4.1 Essai de dureté brinell.....	33
Fig.4.2 : principe de l'essai de brinell.....	35
Fig.4.3 : Principe de l'essai de Vickers.....	36
Fig.4.4 : Principe de l'essai Rockwell à bille.....	38
Fig.5.1 : types des défauts ponctuels.....	41
Fig.5.2 : (a) modèle parfait d'un cristal. (b) dislocation. (c) dislocation vis.....	42
Fig.5.3 : dislocation mixte.....	43
Fig.5.4 : Joints de grains.....	44
Fig.5.5 : Représentation schématique d'un pore.....	45
Fig.5.6 : Différents précipités.....	46
Fig.6.1 Échelle des ondes élastiques. Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant Une vitesse du son de 5000 m/s.....	51
Fig. II.6.2 Réfraction et réflexion des ondes ultrasoniques.....	52
Fig.6.3 Émission d'une onde élastique longitudinale.....	53
Fig.5 Palpeur pour ondes transversales.....	54
Fig.6.Ondes transversales.....	55
Fig.7.Ondes transversales.....	55
Fig. II.1 : Scie mécanique.....	56
Fig. II.2. Fraiseuse.....	57
Fig. II.3. Four de trempe	57

Fig. II.4. four de revenu.....	58
Fig. II.5 : Polisseuse à deux disques.....	59
Fig. II.6 : Polisseuse à un disque.....	59
Fig. II.7 : Duromètre.....	60
Fig. II.8 : Microduromètre.....	60
Fig. II.9 : microscope optique.....	61
Fig. II.10. Microscope électronique à balayage.....	61
Fig. II.11. Les éléments de l'essai ultrasonique.....	62
Fig. II.13 L'échoscop GAMPT-Scan.....	63
Fig. II.14. Les Transducteurs ultrasonique.....	64
Fig II.15. Transducteur en mode reflexion.....	64
Fig II.16. Transducteur en mode transmission.....	64
Fig. II.17. Cycle thermique.....	65
Figure. II.18 : échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté.....	66
Fig II.19. Pièce usiné pour l'essai ultrason	68
Figure. III.1 : Graphe, histogramme ($\langle HB \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des duretés moyennes des dix états.....	68
Figure. III.2 : Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche.....	69
Figure. III.3 : Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire.....	70
Figure. III.4 : Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire et la Zone Blanche de l'alliage AlSi7Mg coulé en coquille.....	71
Figure. III.5 : l'écho de l'essai sur la direction X=200mm.....	72
Figure. III.6 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu).....	73
Figure. III.7 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle VT \rangle$ - Températures de revenu).....	74
Figure. III.8 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu.....	75
Figure. III.9 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu.....	76
Figure. III.10 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu).....	77

Figure. III.11 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V \rangle$ - Températures de revenu).....	78
Figure. III.12 : l'écho de l'essai sur la direction $Y=150\text{mm}$.....	79
Figure. III.13 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu).....	80
Figure. III.14 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu).....	81
Figure. III.15 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu).....	82
Figure. III.16 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu).....	83
Figure. III.17 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V \rangle$ - Températures de revenu).....	84
Figure. III.18 : l'écho de l'essai sur la direction $Z=20\text{m}$.....	85
Figure. III.19 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu).....	86
Figure. III.20 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu).....	87
Figure. III.21 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu).....	88
Figure. III.22 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu).....	89
Figure. III.23 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu).....	90
Figure. III.24 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V \rangle$ - Températures de revenu).....	91
Figure. III.25 : Graphe, histogramme, ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	92
Figure. III.26 : Graphe, histogramme, ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	92
Figure. III.27 : Graphe, histogramme, ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	93
Figure. III.28 : Graphe, histogramme, ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	93
Figure. III.29 : Graphe, histogramme, ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	94
Figure. III.30 : Graphe, histogramme, ($\langle V \rangle$ - Températures de revenu). De (X, Y, Z).....	94
Figure. III.31 : Micrographie de l'alliage AlSi7Mg à l'état brut de coulée et à la température de revenu 170°C avec un grandissement de 200 par microscope optique.....	95
Figure. III.32 : Micrographie de l'alliage AlSi7Mg à l'état brut de coulée et à la température de revenu 170° avec un grandissement 20 μm par MEB.....	95





Remerciements

Nos sincères remerciements vont à monsieur HAKEM Ahmed qui a bien voulu nous faire l'honneur de nous confier ce sujet et l'aide essentiel qu'il a apporté à ce travail.

Nous remercions aussi tous les travailleurs du hall de technologie d'OUED AISSI et du laboratoire SDM, sans oublier les travailleurs de la bibliothèque du Département de Génie Mécanique.

Je tiens vivement à remercier le professeur Fouad BOUBENIDER chef d'équipe du laboratoire de recherche ondes et acoustique de m'avoir reçu et autorisé au laboratoire de l'université de BAB EZZOUAR, faculté de physique pour effectuer une partie pratique de mon mémoire

Mes sincères remerciement vont également à son équipe de recherche pour leurs aides précieuses qu'ils m'ont apportée, je pense plus particulièrement à M'SAIT Smail, AIT OUARABI Mohend.

Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont apporté leurs conseils ou leur contribution.

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I :	
I.1 ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	3
I.1. PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM.....	3
I.1.1. Propriétés physiques.....	3
I.1.2. Propriétés mécaniques.....	4
I.1.3 Propriétés chimiques.....	4
I.1.4 Domaines d'utilisation.....	4
I.1.5 Alliages à base d'aluminium.....	5
I.1.6 Désignation des alliages d'aluminium.....	5
I.1.7 Différents types d'alliages d'aluminium.....	9
I.1.8 Moulage.....	14
I.1.9 Le laminage.....	14
I.2 ÉLABORATION DE L'ALLIAGE D'AlSi7Mg :.....	16
I.2.1 Caractéristiques.....	17
I.2.1.2 Caractéristiques physiques.....	17
I.2.2. Élaboration d'AlSi7Mg (42000).....	17
I.2.3. Composition chimique de l'alliage EN-4200.....	18
I.2.4 Influence des éléments d'alliage sur les propriétés de l'aluminium.....	18
I.2.5 Fusion.....	19
I.2.6 Condition de la fusion.....	19
I.2.7 Moulage.....	22
I.2.8 Traitement thermique.....	22
La température de chauffage avant trempe est de $540 \pm 5^{\circ}\text{C}$. La durée normale du maintien varie de 8 à 10 heures, en fonction de la masse et de l'épaisseur des pièces.....	22
I.2.9 Précautions pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle :.....	22
I.2.10 Contrôle des résultats.....	24
I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES	25

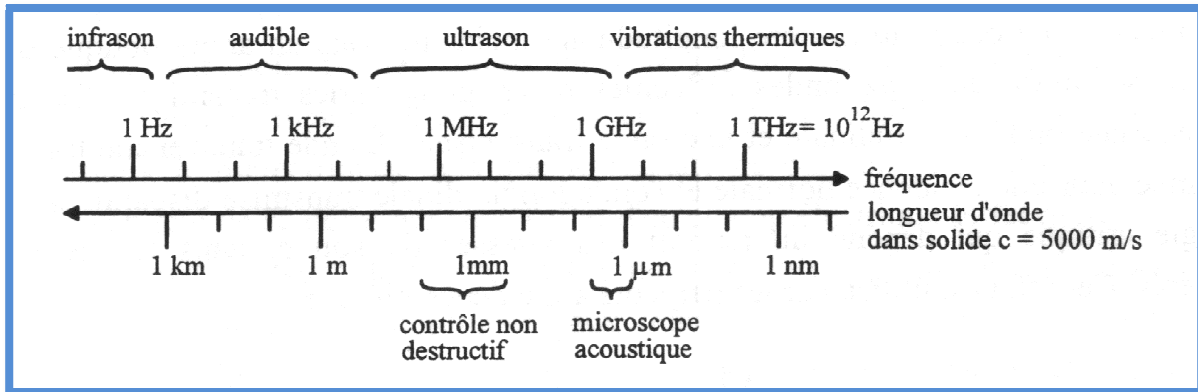
I.3.1 Introduction :	25
I.3.2 Cycle thermique :	25
I.3.4 Principe de durcissement structural :	30
I.3.5 Microstructure :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5.1 La macrographie :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5.2 La micrographie :	Erreur ! Signet non défini.
1) observation par microscopie :	Erreur ! Signet non défini.
2) Importance de la métallographie :	Erreur ! Signet non défini.
I.4 ESSAIS MÉCANIQUES :	Erreur ! Signet non défini.
I. 4.1 Essai de dureté :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.4.2. Essais Micro-dureté :	41
I.5 DÉFAUTS CRISTALLINS ET MICROSTRUCTURE :	Erreur ! Signet non défini.
I.5.1 Les défauts ponctuels (fig.5.1) :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.5.2 Défauts à une dimension (défauts linéaires) :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.3 Dislocation mixte (fig.5.3) :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.5.4 Défauts à trois dimensions (défauts volumiques) :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.5.5. La microstructure et diffusion :	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.6 ESSAIS NON DESTRUCTIFS PAR ULTRASONS :	Erreur ! Signet non défini.
I.6.1 Définition :	52
I.1.6.2 Propagation, absorption, réflexion et réfraction des ultrasons :	53
I.1.6.3 Émission et détection d'ultrasons :	54
I.1.6.4 Les palpeurs pour le contrôle aux ultrasons :	55
$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$:	58
$V_L = \sqrt{\frac{2G+\lambda}{\rho}}$:	58
$E = \frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$:	58
$V = \frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$ et $G = \frac{E}{2(\lambda+V)} \cdot Kc = \frac{3\lambda+2G}{3}$. $\alpha = \frac{Kc}{(3\lambda+2G)}$:	58
CHAPITRE II	
II. APPAREILLAGE :	59
II.1 Appareillages :	59
II.1.1 Le découpage :	59
II.1.2 Le fraisage :	60
II.1.3 Four de trempe :	60
II.1.4 Four de revenu :	61

II.1.5 Les polisseuses.....	62
II.1.6 Duromètre.....	63
II.1.7 Microduromètre.....	63
II.1.8 Microscope optique :	Erreur ! Signet non défini.
II.1.9 Microscope électronique à balayage.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1.10 L'échographe ultrason.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2. ÉLABORATION DE L'ALLIAGE AlSi7.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.1 La composition chimique.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2. Élaboration de l'alliage à étudier.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2.3 Écrémage.....	70
II.2.2.4 L'affinage.....	70
II.2.2.5 Moulage en coquille.....	70
II.2.2.6 Usinage.....	70
II.2.2.7 les traitements thermiques.....	70
II.2.2.8 Essais mécaniques.....	72
CHAPITRE III.	
CHAPITRE III. INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Dureté.....	76
III.3. Microdureté.....	77
III.3.1. Comparaisons entre les zones (blanche, et noire).....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Ultrason :	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1 valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la direction X=200mm	81
III.4.2 valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la direction Y=150mm	88
III.4.3 Valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la redirection Z=20mm	94
III.4.4 Comparaison des trois directions selon (X, Y, Z).....	101
III.5 Effets des traitements thermiques sur la microstructure de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg :	104
III.5.1 Interprétation des microstructures :	105
III.5.2 Influence et des traitements thermiques :	105
CONCLUSION GENERALE	106,107

CHAPITRE 1.6 ESSAIS NON DESTRUCTIFS PAR ULTRASONS.

I.6.1 Définition [17] :

Les ultrasons sont des ondes acoustiques ou élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine et inférieure aux vibrations thermiques des atomes. Les sons audibles sont compris entre 10 et 20000 Hz et la gamme de vibrations thermiques s'étend de 10⁹ à 10¹³ Hz (1 GHz - 10 THz). Les fréquences utilisées lors d'examens aux ultrasons ne comprennent pas toute la gamme des ultrasons, mais varient entre 0,5 à 12 MHz. Pour un solide ayant une vitesse de son c de 5000 m/s ceci correspond à l'intervalle des longueurs d'ondes ($\lambda = c/v$) de 1 cm à 0.4 mm. La limite inférieure de 0.5 MHz est déterminée par la perte totale en résolution des défauts qui ont une taille inférieure à la longueur d'onde. Dans les solides (vitesse du son $c \approx 5000$ m/s), une onde d'une fréquence de 0,5 MHz ne permet que de percevoir les défauts qui sont plus grands qu'un centimètre. En général on s'intéresse aussi à des défauts beaucoup plus petits. L'augmentation de fréquence qui s'impose alors, à comme effet d'augmenter l'absorption et donc de limiter la profondeur accessible aux ultrasons.



FigI.6.1 Échelle des ondes élastiques. Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant une vitesse du son de 5000 m/s.

I.1.6.2 Propagation, absorption, réflexion et réfraction des ultrasons. [18]

Dans un milieu homogène, les ultrasons se propagent de manière rectiligne. La vitesse de propagation c (vitesse du son) dépend du milieu traversé (densité, modules élastiques) et des dimensions géométriques si celles-ci sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. De plus, elle n'est pas la même pour les ondes longitudinales que pour les ondes transversales (=ondes de cisaillement). Dans les solides la vitesse des ondes transversales est approximativement la moitié de celle des ondes longitudinales.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs. Notez les grandes différences entre les gaz, les liquides et les solides.

	VL [m/s] (ondes longitudinales)	VT [m/s] (ondes transversales)
Air	340	Non transmise en raison de l'absorption excessive
Eau	1480	
Aluminium	6300	3080
Fe et aciers	5900	3220
Laiton	4400	2120

Tableau I.14 : La vitesse longitudinale et transversale de différents milieux.

➤ **L'atténuation [18].**

Des ondes ultrasonores suit la même loi que celle de l'absorption des rayons X. lorsqu'on substitue l'intensité par l'amplitude de l'onde. Le coefficient d'absorption μ dépend des propriétés anélastiques et viscoélastiques du matériau et augmente généralement avec la fréquence. L'atténuation des ultrasons, dans la gamme de fréquence utilisée pour le contrôle non destructif, est nettement moins forte que celles des rayons X ou γ . Dans le fer, p. ex, l'atténuation des ultrasons devient importante après quelques mètres, alors que les rayons X se trouvent pratiquement absorbés après quelques centimètres. La réflexion et la réfraction des ultrasons, lors d'un changement de milieu (interface ou surface), sont plus complexes que celles des rayons lumineux (= ondes transversales uniquement). Une onde ultrasonore longitudinale incidente sous un angle oblique α sur une interface se divise en deux ondes réfléchies et en deux ondes transmises. Chaque paire comprend une onde longitudinale et une onde transversale. L'onde transversale transmise est supprimée pour une incidence normale et l'onde longitudinale transmise disparaît si α dépasse un angle critique qui dépend du rapport des vitesses du son c_L dans les deux milieux considérés. Cet effet est utilisé par les palpeurs à incidence oblique.

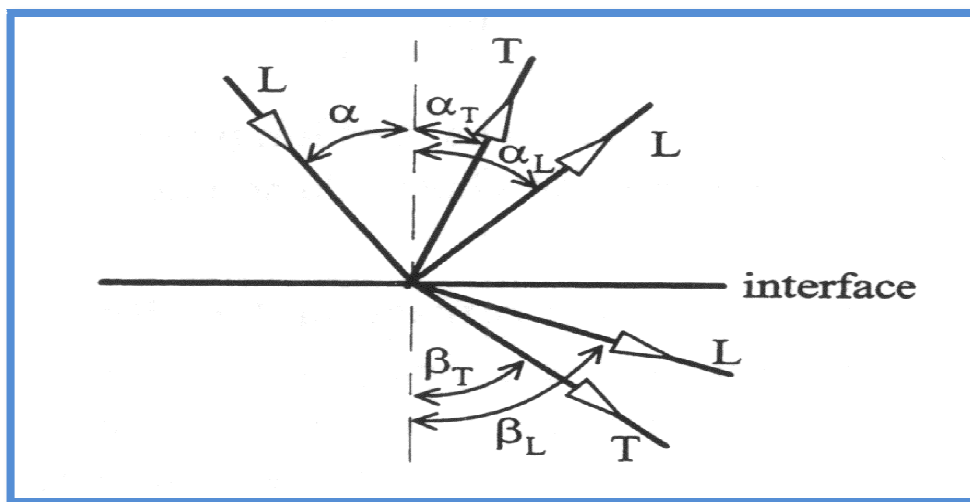


Fig. II.6.2 Réfraction et réflexion des ondes ultrasoniques.

Pour le contrôle par ultrasons, on utilise normalement les ondes longitudinales en incidence normale et les ondes transversales en incidence oblique (au-delà de l'angle critique). Pour une incidence normale, le coefficient de réflexion R , défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchie AR et l'amplitude de l'onde incidente AI est donné par

$$R = \frac{AR}{AI} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}$$

ρ_1 et ρ_2 sont les masses volumiques et c_1 et c_2 les vitesses du son (longitudinales ou transversales selon le type de l'onde). Le produit $\rho \cdot c$ est appelé impédance acoustique. On en déduit facilement que la réflexion est quasiment totale, c.-à-d. que $R \approx 1$, pour une fissure (= interface solide-air ou solide-vide), et que, en raison de la conservation de l'énergie transportée par les ondes, l'amplitude de l'onde transmise devient très petite. Pour les rayons X et γ , par contre, on aura selon une loi semblable, utilisant l'indice de réfraction au lieu de l'impédance acoustique, une réflexion négligeable.

Le pouvoir réflecteur élevé d'une fissure est à l'origine de la grande sensibilité des ultrasons pour la détection des défauts des matériaux. Malheureusement, le coefficient de réflexion élevé pose aussi des problèmes dans la pratique. En général, les ultrasons sont excités par des sondes placées à la surface de la pièce à contrôler. En raison de la rugosité de surface, le contact n'est pas parfait. La couche d'air présent à l'interface, entre la sonde et la pièce, réfléchit fortement l'onde et ne la laisse pas passer. Pour améliorer le couplage entre sonde et pièce, on doit appliquer un agent de contact (graisse, eau, huile) sur la surface et veiller à ce qu'ils ne se forment pas de bulles sous la sonde. La valeur plus élevée de

l'impédance acoustique $\rho \cdot c$ des liquides fait diminuer le coefficient de réflexion à des valeurs acceptables.

I.1.6.3 Émission et détection d'ultrasons [17].

L'émission et la détection d'ondes ultrasonores se réalise très facilement grâce à l'effet piézoélectrique. Certains matériaux anisotropes, comme p. ex. le quartz monocristallin, ainsi que les matériaux ferroélectriques, tels que le titanate de baryum et le titanate de plomb, possèdent la propriété de se déformer sous l'effet d'un champ électrique (effet piézo-électrique direct). Les déformations sont de l'ordre de 0,1 nm par Volt appliqué aux électrodes. Une tension électrique alternative, appliquée aux électrodes, fait vibrer le transducteur piézoélectrique. Les vibrations, ainsi créées, se transmettent à tout solide en contact avec le transducteur et vont se propager dans celui-ci avec la vitesse du son caractéristique de ce milieu. Réciproquement, une compression ou une dilatation d'un matériau piézoélectrique, provoquée par une onde incidente, fait apparaître des charges électriques sur les électrodes qui se mesurent facilement par la tension créée entre les électrodes (effet piézoélectrique inverse). L'effet inverse peut alors servir pour la détection d'ondes. Il suffit pour cela de remplacer dans la fig. 3 la tension d'alimentation par un oscilloscope.

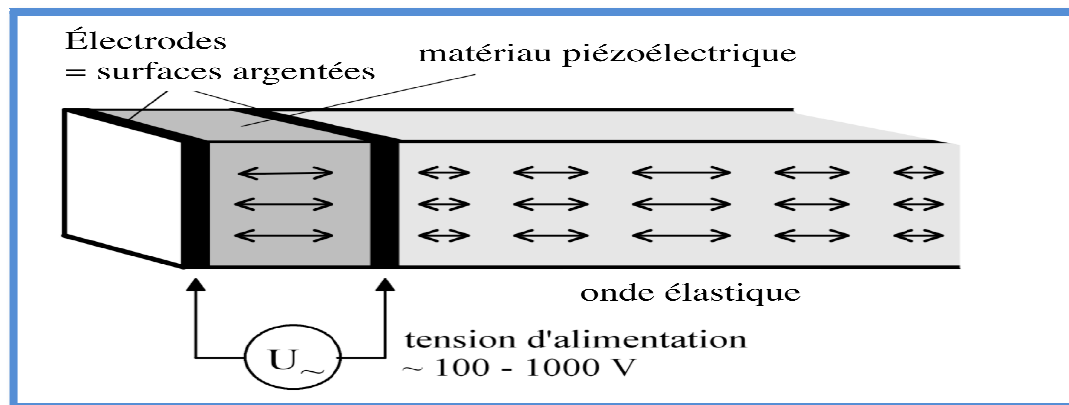


Fig.3 Émission d'une onde élastique longitudinale

I.1.6.4 Les palpeurs pour le contrôle aux ultrasons [19].

Le contrôle aux ultrasons s'effectue le plus souvent avec un palpeur à incidence normale ou un palpeur à incidence oblique.

- Les palpeurs à incidence normale émettent des ondes longitudinales avec comme direction de propagation la normale à la surface.

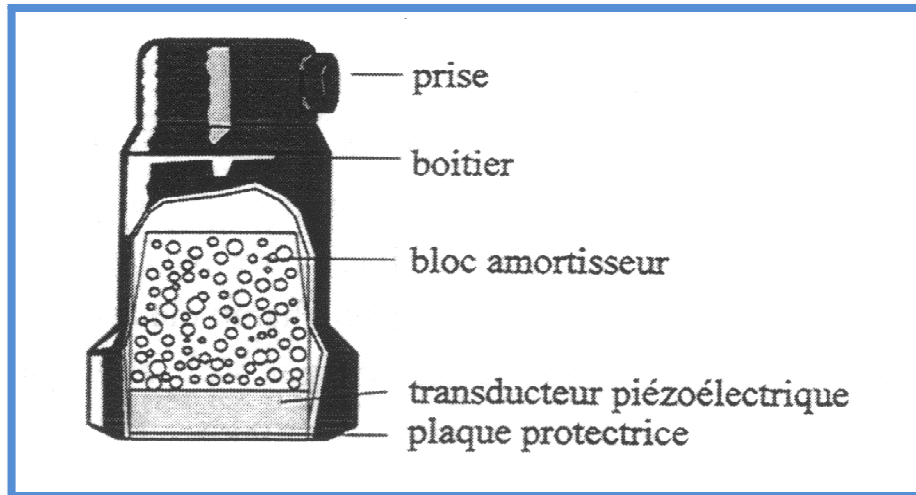


Fig.4 Palpeur pour ondes longitudinales

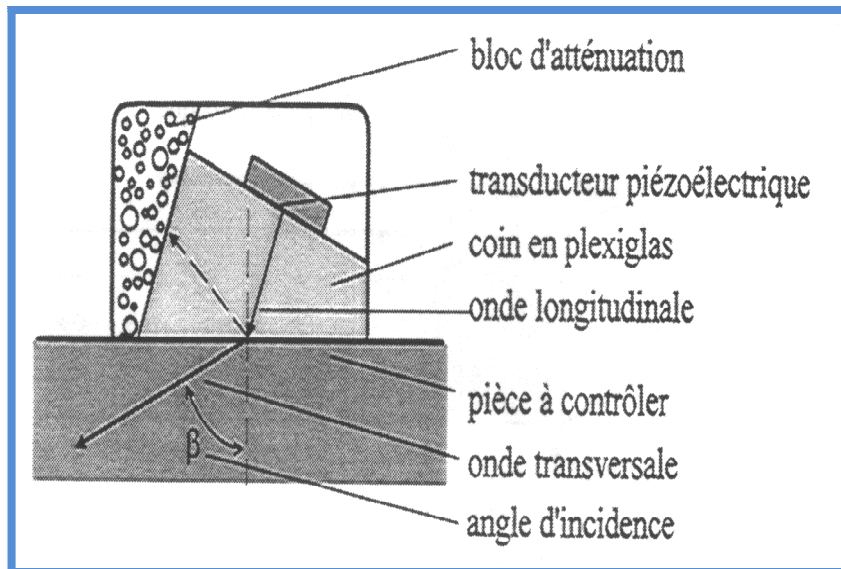


Fig.5 Palpeur pour ondes transversales

- Les palpeurs d'angle émettent des ondes transversales dont la direction de propagation est inclinée par rapport à la normale de la surface. Pour l'excitation de ce type d'onde, on utilise le fait qu'une onde longitudinale, créée dans le palpeur, se divise en une onde transversale et une onde longitudinale lors de la réfraction à l'interface entre le palpeur et la pièce.

. Pour faciliter l'interprétation des échos, on choisit l'angle d'incidence de manière à ce que seule l'onde transversale puisse exister. L'onde qui est réfléchiée à l'interface et reste dans la sonde doit être amortie dans le bloc d'atténuation pour éviter d'éventuels échos fantômes.

Les palpeurs d'angle s'emploient surtout pour sonder les cordons de soudures. La surface irrégulière du cordon lui-même empêche normalement un contact satisfaisant avec un palpeur normal. L'angle d'incidence β dépend de la construction et du matériau du palpeur ainsi que du matériau de la pièce à sonder. La valeur indiquée sur le boîtier (angles standards 35°, 45°, 60°, 70°, 80°) est valable uniquement pour les aciers. En contact avec un autre matériau, le même palpeur donne un angle différent (voir tableau).

Conversion des angles d'incidence β pour les ondes transversales.

Angles indiqués sur les palpeurs et valables pour les aciers p. ex : 45° à 70° donnent dans :

Al	42.5°	64°
Cu	30°	41°
Fonte grise	28.5°	39°

Tableau. I.15 : Le champ de rayonnement d'un palpeur.

I.1.6.5 types d'ondes.

Les deux modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou ondes de dilation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement. La longueur d'onde λ est liée à la vitesse de propagation v par la relation :

$$\lambda = \frac{v}{F}$$

F : fréquence de vibration en MHz.

Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration (direction du déplacement des particules ou encore polarisation de l'onde) est la même que celle de la propagation (Figure 1).

Les ondes transversales se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration (Figure 2). Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.

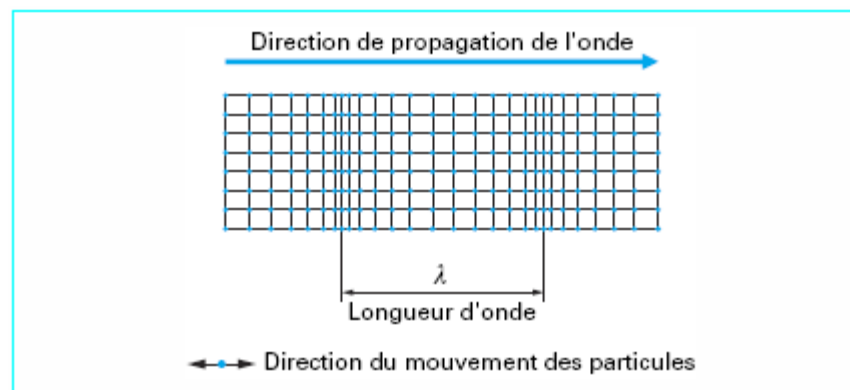


Fig.6. Ondes longitudinale

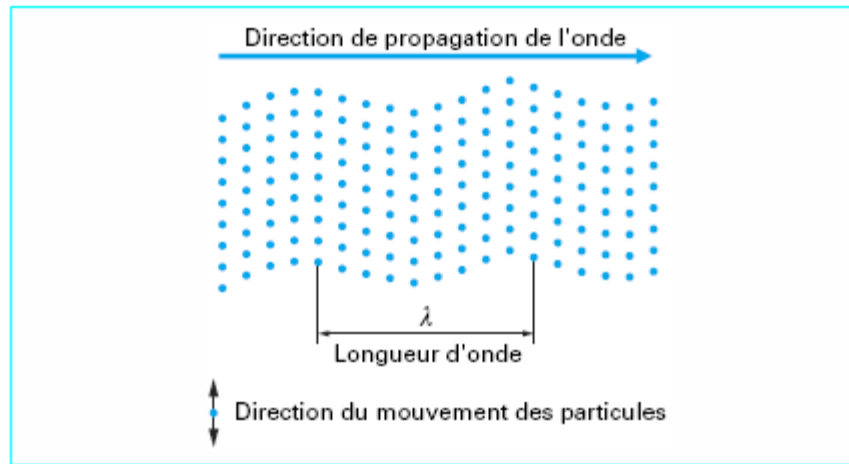


Fig.7.Ondes transversales

On démontre en théorie dans les milieux élastiques que les vitesses des ondes transversales et longitudinales sont liées aux caractéristiques mécaniques du matériau, par exemple le module d'Young (E) et coefficient de poisson (ν),

$$Vl = \sqrt{\frac{E(1 - \sigma p)}{\rho(1 - 2\sigma p)(1 + \sigma p)}}$$

$$Vl = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma p)}}$$

I.1.6.6 les lois appliquées.

- Vitesse Transversale et longitudinale : déterminées expérimentalement

$$VT = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots 1$$

$$VL = \sqrt{\frac{2G + \lambda}{\rho}} \dots\dots\dots 2$$

De la en peut extraire les autre caractéristiques mécaniques élastiques.

$$E = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \dots\dots\dots 3$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \dots\dots\dots 4$$

$$G = \frac{G}{2(\lambda + \nu)} \dots\dots\dots 5$$

$$Kc = \frac{3\lambda + 2G}{3} \dots\dots\dots 6$$

$$\alpha = \frac{Kc}{(3\lambda + 2G)} \dots\dots\dots 7$$

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots 8$$

VT : Vitesse longitudinale en (m/s).

VL : Vitesse transversale en (m/s).

E : Module de Young en (GPa).

V : coefficient de poisson.

G = μ : Module de cisaillement en (GPa).

λ : coefficient de lamé en (GPa).

Kc : Module de compression hydrostatique en (GPa).

α : coefficient de dilation thermique linéique.

ρ : masse volumique.

Remarque.

La méthode classique de traction elle nous enseigne seulement sur le module de Young **E**, et le coefficient de poisson **V**. par calcul dans la méthode ultrasonore on peut extraire à partir des relations (1, 2, 3, 3, 4, 5,6 ,7), les caractéristiques élastique **G =μ, λ, Kc et α**.

CHAPITRE I.2 : ÉLABORATION DE L'ALLIAGE AlSi7Zn3Cu2Mg.

I.2 Propriétés générales de l'alliage d'aluminium de fonderie AlSi7Zn3Cu2Mg [7].

Ce sont des alliages à hautes propriétés mécaniques. La teneur en silicium, moyenne, permet l'obtention d'excellentes propriétés de fonderie, et la teneur en magnésium rend possibles les traitements thermiques T6 ou T64. On peut obtenir ainsi des degrés de durcissement variables et donc des compromis intéressants entre charge de rupture et limite d'élasticité d'une part, et allongement d'autre part. Les alliages Al Si7Mg03, et Al Si7Mg06, à cause de leur faible teneur en impuretés, sont les deux alliages les plus utilisés pour des applications où l'on recherche d'excellentes propriétés mécaniques associées à des pièces de forme complexe. Citons par exemple les pièces pour l'industrie aéronautique, les roues de voitures, les pièces de suspension, les culasses de moteurs turbo Diesel fortement sollicitées, etc.

I.2.1 Caractéristiques [7].

I.2.1.1 Caractéristiques mécanique sur éprouvettes normalisées NF-576702 coulées à part.

Mode de coulée	États		σ_r (Mpa)	σ_e (Mpa)	A%	Dureté(HB)
	Nouveaux	Anciens				
Sable	SF	Y20	140	80	1,5	55
	ST ₆	Y23	230	160	1,5	75
	KF	Y30	170	90	4	60
Coquille	KT ₆	Y33	260	180	4	80

Tableau I .11. Éprouvettes normalisées NF-576702 coulées à part.

I.2.1.2 Caractéristiques physiques.

Conductibilité thermique à 20°C	0,38 $\mu\text{th cm} / \text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$
Résistivité à 20°C	4 $\mu\Omega \text{ cm}^2 / \text{cm}$
Coefficient de dilatation entre 20 et 100°C	21,5x10 ⁻⁶
Intervalle de solidification	610 - 570 °C
Retrait moyen	

I.2.2. Élaboration d'AlSi7Zn3Cu2Mg (42000) [9].

Le principe de base commun à tous les essais consiste à mettre en fusion un échantillon de l'alliage métallique étudié grâce à un procédé de chauffage par induction. L'éprouvette ainsi obtenue possède une géométrie spécifique au type d'essai mis en œuvre et les structures de solidification sont reproduites de façon à simuler les conditions réelles d'utilisation de l'alliage testé.

Pilotage et spécificité de l'essai de rétreint :

- La cinétique thermique a une influence importante sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'alliage, elle doit donc être maîtrisée durant tout l'essai. Le contrôlée via un pyromètre et un thermocouple plongé dans le bain liquide.
- La composition chimique de l'alliage reste dans les tolérances prévues.
- Le traitement thermique éventuel soit effectué correctement.
- 42000 peut s'utiliser également sans traitement thermique.

I.2.3. Composition chimique de l'alliage EN-4200 [9].

La composition ci- dessous correspond aux tolérances de composition dans les pièces coulée en sable et en coquille.

Fe %	Si %	Cu %	Zn %	Mg %	Mn %	Ni %	Pb %	Sn %	Ti %
≤ 0,45	6,5 à 7,5	≤ 0,1	≤ 0,1	0,20 à 0,40	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,10 à 0,20

Tableau I.12 : Composition chimique de l'alliage EN-4200.

Un alliage rentrant dans ces tolérances de composition, convenablement et éventuellement traité thermiquement, donne des éprouvettes ayant les caractéristiques mécaniques de tableau ci-dessus.

Les lingots livrés par l'ALUMINIUM FRANÇAIS permettent d'assurer facilement la composition imposée dans les pièces.

Composition des lingots d'AlSi7Mg livrés par l'aluminium français :

Fe %	Si %	Cu %	Zn %	Mg %	Mn %	Ni %	Pb %	Sn %	Ti %
≤ 0.35	6.5 à 7.5	≤0.1	≤0.1	0.25 à 0.40	≤0.3	≤0.05	≤0.05	≤0.05	0.10 à 0.20

Tableau I.13 Composition des lingots d'AlSi7Mg livrés par l'aluminium français

I.2.4 Influence des éléments d'alliage sur les propriétés de l'aluminium [9.8].

L'aluminium non allié a des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes ; pour son utilisation, on est conduit, pour améliorer ces propriétés, à ajouter des éléments qui modifient, plus ou moins profondément la micro structure de métal.

Les éléments additionnés peuvent être en solution solide de substitution ou peuvent également former des précipités hors solution solide : cohérents, semi cohérents ou incohérents avec la matrice d'aluminium. On réalise ainsi des alliages industriels de composition plus ou moins complexe.

Magnésium

Le magnésium est la base du développement de la résistance et de la dureté lors des traitements thermiques des alliages Al-Si. Il est en général utilisé dans les alliages Al-Si plus complexes qui contiennent du cuivre, du nickel et d'autres éléments dont le but est également de durcir l'alliage. La phase de Mg_2Si qui durcit l'alliage montre une solubilité limite de 0,70 % de magnésium. Au-delà de cette limite, il n'y a pas davantage de durcissement et il peut même survenir un adoucissement de l'alliage. La composition de magnésium habituellement employée pour les alliages de la famille Al-Si varie de 0,070 à 0,40 %.

Silicium

L'effet le plus remarquable du silicium dans les alliages d'aluminium, c'est l'amélioration des caractéristiques de mise en forme (moulage). L'addition du silicium à l'aluminium pur augmente de beaucoup la fluidité, la résistance au craquage à chaud et les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide. La composition la plus utilisée dans les alliages d'aluminium de fonderie est d'ailleurs celle de la famille Al-Si. Les alliages commerciaux hypoeutectiques et hypereutectiques ont une proportion de silicium qui peut varier jusqu'à environ 25 % en poids.

En général, la proportion optimale de silicium est déterminée par la procédure de mise en forme. Pour une procédure nécessitant un taux de refroidissement lent (moule de sable ou de plâtre - réfractaire), une proportion de 5 à 7 % est recommandée; 7 à 9 % pour un moule permanent et 8 à 12 % pour un moulage sous pression. Ces recommandations sont basées sur la relation entre le taux de refroidissement, la fluidité et les effets du pourcentage de la phase de silicium eutectique sur le front de l'écoulement du métal liquide. L'addition de silicium réduit également la densité de l'alliage ainsi qu

Fer

Le fer accroît la résistance au craquage à chaud et réduit la tendance de l'alliage à se coller ou à se souder aux parois du moule. Or, l'augmentation de la proportion de fer est normalement accompagnée d'une réduction de la ductilité. Le fer réagit pour former plusieurs phases insolubles dans les alliages d'aluminium, les plus communes étant le $FeAl_3$, $FeMnAl$ et $a AlFeSi$. Ces phases insolubles ou intermétalliques sont responsables de l'amélioration de la résistance, spécialement à température élevée, même si elles donnent des structures grossières et fragiles. Comme le pourcentage de phases insolubles croît avec l'augmentation de la proportion de fer, les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide sont affectées. On doit alors tenir compte de ce facteur lors de la procédure de mise en forme. Le fer participe également à la formation de plaquettes ségréguées avec le manganèse, le chrome et d'autres éléments.

Manganèse

Il sert à augmenter la résistance mécanique à haute température des alliages de fonderie (suite à la formation d'une structure fibreuse) et à réduire le retrait lors de la solidification. Mais, comme ces alliages ne possèdent pas d'opération de durcissement mécanique, le manganèse n'offre pas d'effets bénéfiques pour ces derniers. Certains le considèrent comme une impureté à cause de sa faible solubilité. Cependant, un pourcentage élevé en volume de MnAl dans les alliages contenant plus de 0,5 % de manganèse peut influencer favorablement l'équilibre interne de la pièce après la mise en forme.

Titane

Le titane est ajouté pour raffiner la structure des alliages d'aluminium, notamment pour les pièces moulées en sable ou en coquille (alliages de fonderie). Surtout employé en compagnie du bore, il est nécessaire que le titane soit en excès dans la stœchiométrie du composé T1B2 pour obtenir un affinage de grain efficace. En moulage sous pression, le taux élevé de refroidissement joue ce rôle. Il contribue aussi à la diminution de la conductivité thermique et de la fluidité, mais il améliore la ductilité, la résistance mécanique et la résistance au craquage à chaud lorsque la quantité utilisée est plus grande que celle qui est requise

I.2.5 Fusion [10].

I.2.5.1 Règle générale de fusion.

Contrôle la température avec un pyromètre régulièrement étalonné. Éviter de dépasser les valeurs prescrites. Éviter toute humidité de quelque origine : Coke, creusets, réfractaire, outils, métal, flux etc.

- Régler convenablement les brûleurs.
- Éviter l'enrichissement en fer par contact avec des outils protégés.

I.2.6 Condition de la fusion

I.2.6.1 Préparation de la charge- Correction du titre en magnésium.

Il est recommandé d'abord de même proportion de jets dans toutes les charges. Les fonderies qui disposent d'un spectrographe à lecture directe effectuent, au cours de chaque fusion, une analyse qui permet de calculer exactement et rapidement la correction on magnésium.

En l'absence de moyens d'analyse rapides, on adopte dans chaque atelier une valeur de correction résultant de statistiques. La perte probable est corrigée d'avance par une adition correspondant au poids total de charge.

La correction dépend beaucoup du procédé de fusion et de la nature des flux utilisés.

Elle voisine de :

0,1% de magnésium, par rapport a la charge totale, dans les procédés d'affinage 1 et 2 et pour le moulage en sable.

0,04% de magnésium dans les procédés poudre Pacz et sans Aluflux X .

0.06% de magnésium dans les procédés sans poudre Pacz mais avec Alufux X.

L'apport est fait de façon plus précise en utilisant l'AlMg10 en plaquettes.

I.2.6.2 Affinage

L'AlSi7Mg est, selon le cas, fondu suivant un procédé avec ou sans sodium. Dans le cas du moulage en sable, pour améliorer l'allongement et l'étanchéité, on adopte le plus souvent un traitement à poudre Pacz BTK au sodium. Ce traitement est, par contre, généralement inutile pour le moulage en coquille.

Dans tous les cas, l'action d'un flux au titane affine le grain, favorise la santé des pièces et améliore les caractéristiques mécaniques.

- Processus de l'affinage.

➤ Cas du moulage en sable.

Trois procédés sont utilisés

1^{er} Procédé : Affinage à l'Aluflux B et à la poudre Pacz BTK. Vers 730°C, introduire 0,30% d'Aluflux B en pastilles, enfoncées au moyen d'une cloche à trous poteyée et chaude. Le flux est enfoncé plusieurs fois : attendre 10 minutes.

Écrémer, puis répandre 1% de poudre Pacz BTK qu'on laisse agir 12 minutes. Au cours de cette attente, on favorise le contact métal - poudre Pacz en enfonçant légèrement la couche de flux.

Écrémer et couler.

Ce procédé donne de bons résultats mécaniques et convient aux pièces peu épaisses ou moulées avec des refroidisseurs. Lorsque les conditions de moulage exigent un métal assez dégazé, il est préférable d'adopter le procédé suivant :

2^e procédé : Affinage à l'Aluflux B, à l'azote et à la poudre Pacz BTK.

Vers 730°C, introduire l'Aluflux B comme dans le premier procédé.

Vers 740°C, écrémer, répandre 1,5% de poudre Pacz BTK, et introduire l'azote au moyen d'une canne à tête poreuse, préalablement chauffée. Le barbotage dure 10 à 15 minutes. Le volume débité est de l'ordre de 1 litre d'azote par kilogramme de métal.

A la fin du barbotage, écrémer et couler.

Ce procédé donne un métal dégazé et de bonnes caractéristiques mécaniques.

• **3^e procédé :** affinage sans poudre Pacz.

Éviter d'introduire dans la charge des jets provenant de fusions exécutées avec la poudre Pacz.

Vers 730°C, introduire 0,25% d'Aluflux TH ou d'Aluflux B au moyen d'une cloche. Puis, à la même température, introduire, de préférence en plusieurs fois, 0,25% d'Aluflux X au moyen de la même cloche.

Attendre 10 minutes au moins.

Écrémer et couler.

Ce procédé est utilisé si l'on ne recherche pas le meilleur allongement. Il facilite l'absence de piqures.

Remarque : les opérations décrites se font dans le four. Un creuset amovible donne une meilleure qualité en évitant le transvasement final.

Pour les procédés 1 et 2, il est avantageux de fondre dans un four basculant où l'on peut faire le traitement à l'Aluflux B, puis de transvaser le métal dans une poche chaude qu'on met dans un four électrique pour le traitement à la poudre Pacz.

➤ Cas du moulage en coquille.

1^{er} Procédé : Affinage sans poudre Pacz.

C'est le plus utilisé.

Vers 730°C, dans le four de fusion, laver le métal avec 0,20% d'Aluflux 2 T2, répandu à la surface ; lorsque le flux est fondu, l'enfoncer dans le bain.

Introduire 0,25% d'Aluflux B en pastilles au moyen d'une cloche à trous poteyée et chaude. Le flux qui remonte est enfoncé plusieurs fois.

Dans le cas de pièces épaisses, il peut être utile de dégazer ensuite avec 0,25% d'Aluflux X.

Terminer par une attente de 10 minutes au moins.

Les traitements à l'Aluflux B et à l'Aluflux X sont faits, de préférence, dans le four de maintien.

2^e Procédé : Affinage avec poudre Pacz BTK.

Dans le cas des pièces épaisses, si l'on désire augmenter un peu l'allongement et éviter plus facilement des retassures, il est intéressant d'utiliser l'un des deux procédés à la poudre Pacz BTK conseillés pour le moulage en sable. Toutefois, la quantité de poudre Pacz sera réduite.

Le traitement à l'Aluflux B peut avoir lieu dans le four de fusion. Le traitement à la poudre Pacz se fait dans le four de maintien ; il est renouvelé toutes les 40 minutes

I.2.6.3 Contrôle du dégazage

Le dégazage est un facteur important de la qualité des pièces en AlSi7Mg. Pour le contrôler, on observe la solidification d'une petite quantité de métal sous un vide partiel de 60 mm de mercure. Cette méthode, parfaitement adaptée à l'atelier, permet de vérifier l'efficacité du processus de fusion.

I.2.6.4 Température de coulée

La température de coulée varie en fonction de l'épaisseur de la pièce, elle est généralement comprise entre 680 et 750°C.

I.2.7 Moulage [4].

I.2.7.1 Moulage en sable

L'AlSi7Mg se moule très bien en sable. Il ne crique pas et n'a qu'une tendance très réduite aux retassures externes. Dans le cas des pièces épaisses, l'emploi de refroidisseurs est nécessaire pour éviter les piqures et les micro retassures. Le métal doit être peu gazeux.

La peau d'oxyde peut occasionner des inclusions si l'on n'emploie pas un dispositif de coulée tranquille : coulée en source, choix correct des sections de canaux, emploi éventuel de filtres.

I.2.7.2 Moulage en coquille

L'AlSi7Mg se moule également très bien en coquille, sans risques de criques.

Veiller à masselotter suffisamment pour assurer une bonne santé interne des parties épaisses, notamment pour les pièces étanches.

I.2.8 traitement thermique [7.5].

L'AlSi7Mg peut subir un traitement thermique qui lui confère les meilleures caractéristiques mécaniques. Ce traitement consiste en une trempe à l'eau après chauffage de mise en solution et un revenu (État ST6 et KT6).

I.2.8.1 Chauffage de mise en solution

La température de chauffage avant trempe est de $540 \pm 5^\circ\text{C}$. La durée normale du maintien varie de 8 à 10 heures, en fonction de la masse et de l'épaisseur des pièces.

La température doit être précise, ce qui exige un four à ventilation forcée, une bonne régulation, des pyromètres surs. Utiliser, autant que possible, un dispositif d'enregistrement. La manutention des pièces entre le four et le bac de trempe doit être rapide.

I.2.8.2 Trempe

L'AlSi7Mg n'est pas sensible aux tapures de trempe et peut être trempé à l'eau froide.

Cependant, la trempe à l'eau chaude, particulièrement pour les grandes pièces, réduit les contraintes dues à la trempe.

I.2.8.3 Intervalle entre la trempe et le revenu

On conseille un intervalle d'au moins 12 heures entre la trempe et le revenu. Un intervalle trop court augmente la charge de rupture et la limite élastique aux dépens de l'allongement.

I.2.8.4 Revenu

On adopte le plus souvent 4 heures à $160 \pm 5^\circ\text{C}$ ou à $155 \pm 5^\circ\text{C}$. La température et la durée de revenu influent beaucoup sur les caractéristiques mécaniques. Un décalage de 5°C suffit à modifier celles-ci. Lorsque la température du revenu monte, la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, mais l'allongement diminue. Utiliser un four très sûr, bien adapté à cette température, équipé d'une bonne pyrométrie.

Le fondeur peut d'ailleurs adapter les températures et les temps de revenu comme la teneur en magnésium, s'il doit rechercher soit un allongement élevé, soit, au contraire, une charge de rupture et une limite élastique plus élevées.

I.2.8.5 Principaux défauts des pièces traitées

I.2.8.5.1 Durcissement insuffisant

Cause :

- Teneur en magnésium trop faible.
- Température de mise en solution trop basse.
- Temps de manœuvre trop long entre la sortie du four et la trempe.
- Durée de revenu trop courte et, plus souvent, température de revenu trop basse.

I.2.8.5.2 Allongement trop faible.

Cause :

- Teneur en magnésium trop forte.
- Durée de revenu trop longue et, plus souvent, température de revenu trop élevée.

Pour remédier aux deux défauts ci-dessus, on peut refaire le traitement complet, sauf si la teneur en magnésium est en cause.

I.2.8.5.3 Brulures de trempe.

Une pièce est brulée lorsqu'elle a été portée à une température supérieure à la température de début de fusion.

Cause :

- Composition incorrecte, par exemple excès de magnésium ou présence anormale de cuivre.
- Surchauffe en certains points de la chambre de chauffe ou dérèglement de la pyrométrie.

Caractères et aspect d'une pièce brûlée :

Une pièce brûlée n'est pas forcément craquée, mais elle présente des sudations. La qualité mécanique est compromise. Une pièce brûlée ne peut être régénérée par aucun traitement et doit être rebutée.

I.2.9 Précautions pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle [8.12].

I.2.9.1 Déformations

Au cours du maintien en température, il convient de prendre quelques précautions pour éviter les déformations des parties en porte-à-faux, ou lorsque les pièces ont des formes complexes. Prévoir dans ce cas des montages ou des appuis. Éviter les empilages excessifs.

Si, malgré ces précautions, on constate des déformations après contrôle, sur montages ou gabarits à touches, on redressera les pièces dans les quelques heures qui suivent la trempe et avant le revenu.

I.2.9.2 Stabilité dimensionnelle des pièces traitées.

La trempe crée dans les pièces des contraintes qui, dans certains cas, peuvent provoquer des déformations au cours d'usinage.

On réduit ces inconvénients par une trempe à l'huile ou à l'eau très chaude, proche de l'ébullition.

Les pièces non trempées sont plus stables. Cette stabilité dimensionnelle est encore augmentée par un chauffage de 8 heures à 240°C. (États Y 25 et Y 35).

I.2.10 Contrôle des résultats [12].

I.2.10.1 Contrôle de la fusion

Se reporter au chapitre Fusion pour les exigences particulières à l'alliage.
Contrôler la teneur en magnésium et l'absence de gaz.

I.2.10.2 Défauts types des pièces en AlSi7.

Piqures et micro retassures dans les parties massives. Veiller à l'absence de gaz et utiliser des refroidisseurs.

Allongement trop faible associé à une limite élastique et à une dureté élevées, ou inversement. Surveiller la teneur en magnésium, la température et la durée du revenu.

I.2.10.3 Contrôle des pièces

On effectuera un contrôle radiographique des parties massives, surtout pour les grandes pièces lors de la mise au point du moulage.

Chapitre I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES.**I.3.1 Introduction. [4]**

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

Ces traitements thermiques peuvent agir dans deux sens à savoir :

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

I.3.2 Cycle thermique [4] :

La variation de la température du métal en fonction du temps est appelée cycle thermique. Le cycle thermique comporte généralement trois étapes (**figure I .6**)

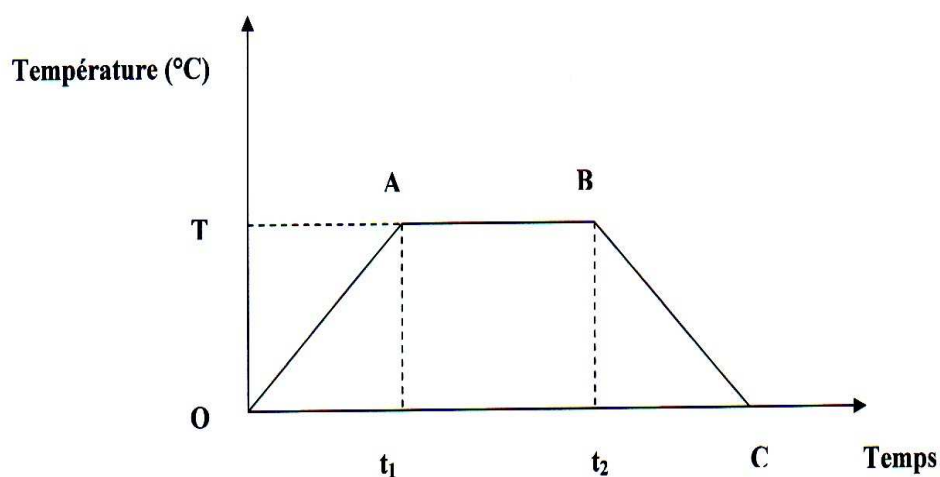


Fig (I.6): Cycle thermique

➤ **Chauffage (Courbe OA) :**

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

➤ **Le maintien (droite AB) :**

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

➤ **Refroidissement (courbe BC) :**

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

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

Remarque :

-Durant le chauffage :

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

-Au Refroidissement :

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

Milieus de refroidissement :

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

I.3.3) Principaux types de traitements thermiques : [3]

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

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

a) Les traitements d'homogénéisation :

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

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

b) Les traitements d'adoucissement :

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

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

c) Les traitements de trempe structurale :

Traitement thermique complet assurant un durcissement structural.

Ce traitement comprend généralement :

Une mise en solution suivie immédiatement :

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

I.3.3.1 Mise en solution :

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

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

I.3.3.2 Trempe :

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

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

I.3.3.3 Maturation (vieillessement naturel) : [13]

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

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

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

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

I.3.3.4 Revenu (vieillessement artificiel) :

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

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

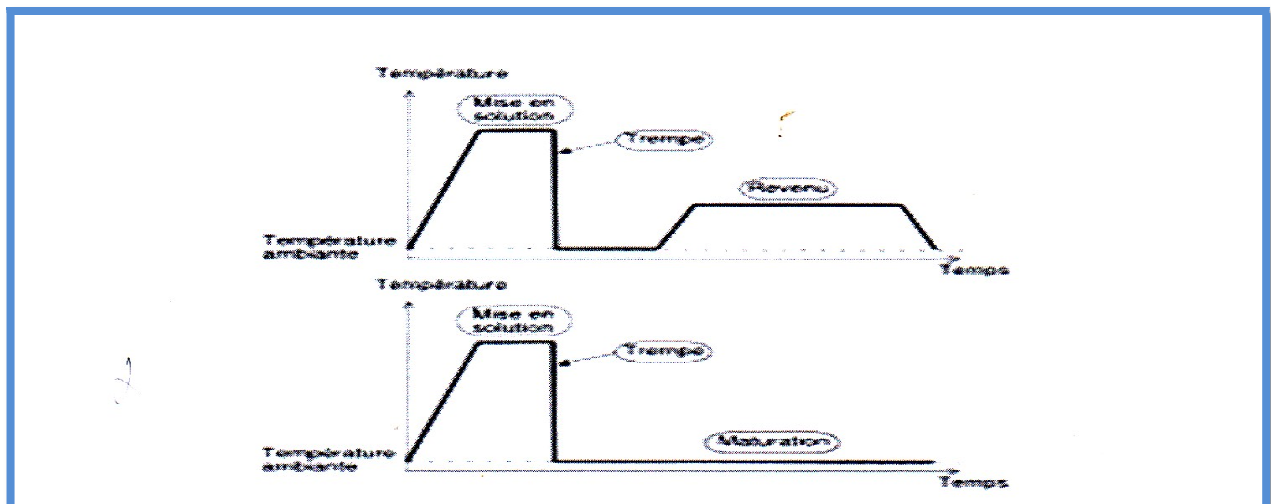


Fig. (I.7) : Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium.

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

I.3.3.5 Le recuit : [14]

Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. A l'occasion d'un recuit, les grains (monocristaux) du métal se reforment. Ce procédé est utilisé pour éliminer les effets de phénomènes mécaniques ou thermiques considérés comme néfastes. Le recuit est également utilisé pour changer les

propriétés magnétiques d'une pièce. Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage).

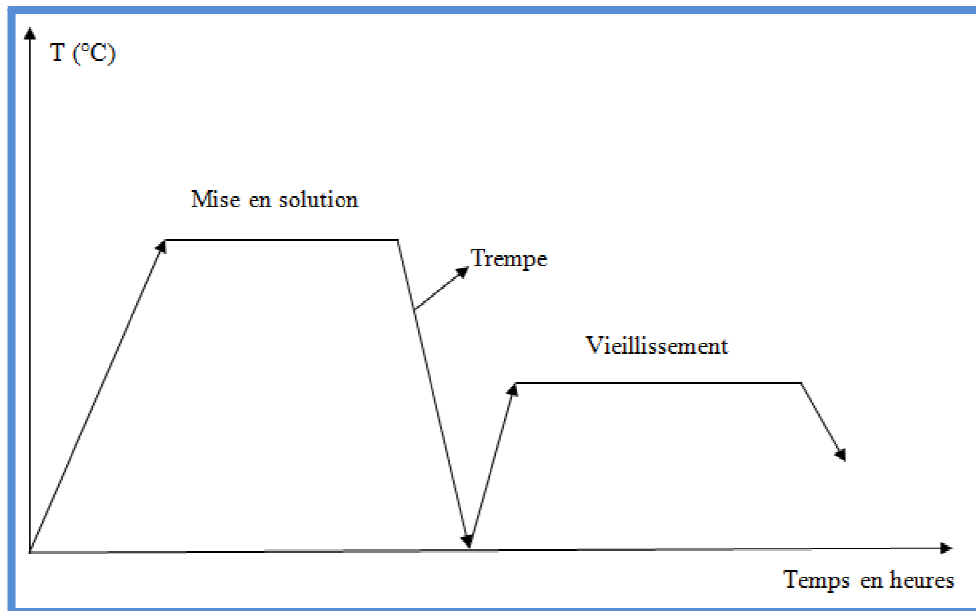


Figure (I.8) : Cycle thermique du durcissement structural

I.3.4 Principe de durcissement structural :

Au cours du durcissement structural et pendant le vieillissement, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et la durée de vieillissement. Ce phénomène est très complexe, pour mieux comprendre le processus de durcissement structural on prend l'exemple de l'alliage AlSi7 , qui serve de base pour l'étude des phénomènes de précipitation.

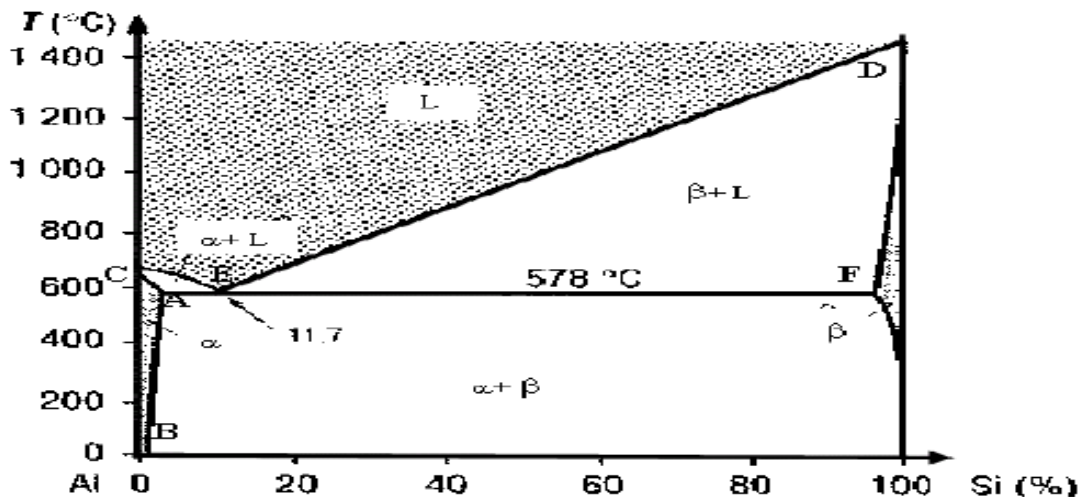


Fig. II.2. Diagramme d'équilibre AlSi.

D'après le diagramme AlSi7 (Fig. II.2), la solution solide α possède une grande étendue qui croît avec la température. Pour des températures inférieures à 548°C ou plus exactement entre la température T_L et T_s (mise en solution), l'alliage AlSi7 est constitué d'une solution solide homogène α ou les atomes de cuivre sont répartis au hasard dans le réseau cristallin.

I.3.2 Microstructure :

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

On peut caractériser la microstructure des matériaux à différentes échelles selon ce que l'on cherche à observer. Pour chaque échelle il faut faire appel à un outil de taille appropriée, de l'échelle macroscopique à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au μm), le microscope électronique (observation 100 au nm) et la diffraction des rayons X dont la longueur d'onde est de l'ordre du dixième de nm, on étudie les structures cristallines [3.14].

I.3.5.1 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 écaillage au cours de travail. Puis cette surface soumise à une attaque par des réactifs appropriés. Ce réactif agit par une dissolution à vitesse inégale de la surface métallique et crée ainsi des différences de niveau permettant l'observation. La micrographie met en évidence :

- la grosseur et la forme des grains : de petits grains traduisent en général un refroidissement rapide alors que les gros grains supposent un refroidissement lent.

- les traitements mécaniques en observant la déformation des grains (déformation à froid, la différence de taille de grain (déformation à chaud)
- La répartition d'inclusion ou de cavités.

1) observation par microscopie :

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

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

a- Observation par microscope optique :

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

b- Microscopie électronique à balayage :

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

2) Importance de la métallographie :

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 etc.

Grâce à de nombreux microscopes optiques et caméras vidéo, il est possible de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1000 fois. De ces nombreuses observations, et grâce à une bonne connaissance de la physique des solides et des diagrammes de phases des matériaux, une analyse précise peut être menée, et de nombreux paramètres tels que la vitesse de refroidissement ; la grosseur des grains ; l'homogénéité ; la présence d'impuretés peuvent être visualisés, et on peut très rapidement avancer dans la compréhension des diagrammes d'équilibre. [4.6]

CHAPITRE I.4 ESSAIS MÉCANIQUES.

Introduction.

Les essais mécaniques sont des expériences pour caractériser les lois de comportement des matériaux (mécanique des milieux continue). Les lois de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) est les déformations (allongement unitaire adimensionnel).

La thermodynamique et la mécanique des milieux continue constituant les outils théoriques de base de la formulation des phénomènes physique de déformation et de rupture. Pour des raisons fondamentales et pratiques, on modélise séparément chaque grande classe de phénomènes. Discerner d'un point de vue qualitatif les grands types de comportement, tel est l'objet de ce chapitre. La méthode phénoménologique utilisée repose sur l'observation des résultats obtenue expérimentalement [17].

I. 4.1 Essai de dureté :

I.4.1.1 Définition :

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre plus dur que lui. Plusieurs types d'essais de la dureté sont couramment utilisés, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme du pénétrateur et la valeur de la charge appliquée.

I.4.1.2 Essai brinell :

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier trempé de diamètre D sous la une charge f et a mesure le diamètre d de l'empreinte laissé sur la surface après suppression de la charge.

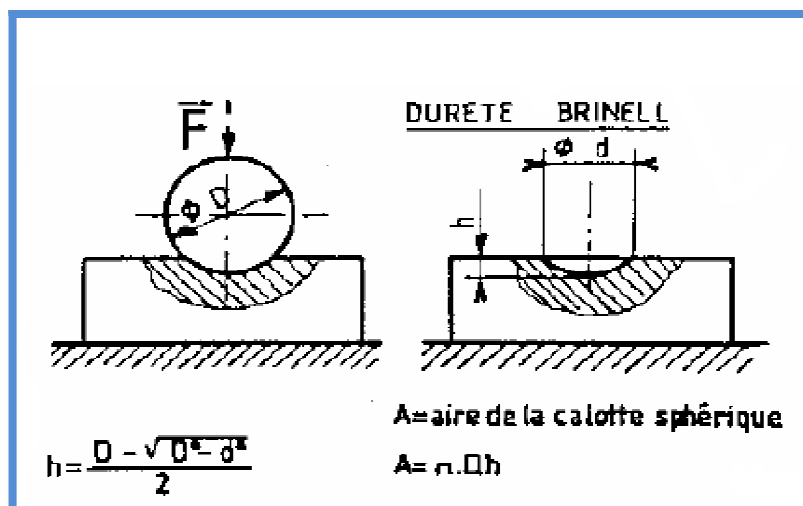


Fig.4.1 Essai de dureté brinell

Le rapport entre la charge appliquée et la surface de l'empreinte déterminer la valeur de la dureté brinell.

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

Avec :

H : symbole de la dureté, en (MPa) ;

F : charge d'essai, en (N) ;

S : surface de l'empreinte, en (mm²).

➤ **Mesure du diamètre « d » de l'empreinte :**

L'empreinte est projetée au moyen d'un microscope, sur un écran pli ou son diamètre sera mesuré directement en vraie grandeur à l'aide d'une règle qui correspond l'agrandissement du microscope L'aire de cette empreinte (dite calotte sphérique) est calculée par l'équation suivante :

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \text{ en (mm}^2\text{)} .$$

➤ **Choix de la force :**

Il existe un rapport de la proportionnalité entre la charge et le diamètre de la bille :

$$F = K \cdot D^2$$

La norme fixe les valeurs de K en fonction du matériau à essayer.

K = 30 pour les aciers.

K = 2,5 ; 5 ou 10 pour l'aluminium et pour les alliages.

K = 5, 10, 30 pour le cuivre et ses alliages.

Ce pendant on adopte en générale pour l'essai de brinell, une charge de Kgf et une bille de 10 mm de diamètre. Dans certains cas, lorsque la pièce ne peut supporter la charge, on utilise la charge de 5 mm de diamètre et une pression de 750Kgf ou de 1000Kgf

(Norme NFA03-201).

➤ **Conditions d'essai :**

- L'essai est normalement conduit à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibration et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 s
- On prépare la surface pour éviter toute altération (oxydation...etc.)
- L'épaisseur de la pièce est ≥ 8 x hauteurs d'empreinte (acier).
- Épaisseur de la pièce ≥ 10 x hauteurs de l'empreinte (Al, Cu et alliages).
- Pour des essais successifs on choisira :

$$a \geq 2.5d ; b \geq 4d$$

$a \geq 3d$; $b \geq 6d$ (Al, Cu et alliages).

- La pièce doit reposer sur un support rigide.

$$\begin{aligned}
 H_V &= \text{Constante} \cdot \frac{(\text{Charge de l'essai})}{(\text{Aire de l'empreinte})} \\
 &= 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \\
 &= 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}
 \end{aligned}$$

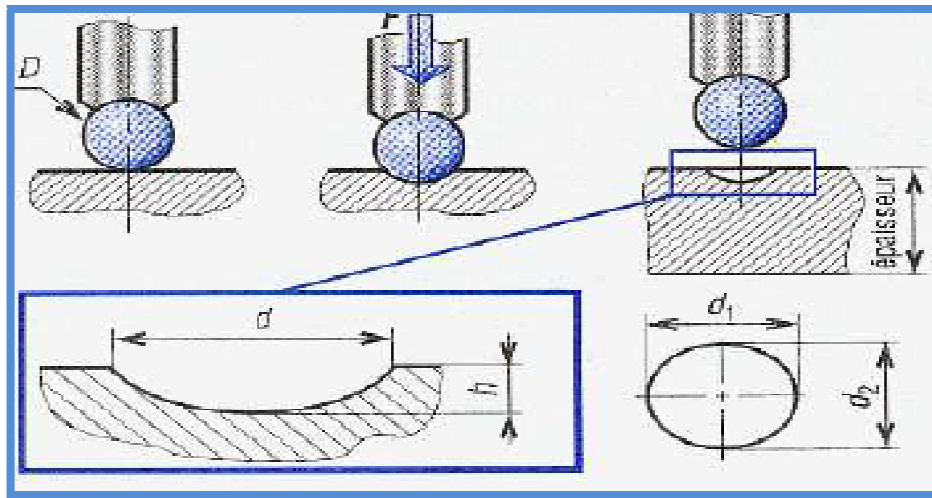


Fig.2.2 : principe de l'essai de brinell.

I.4.1.3. Essais de dureté Vickers (HV) :

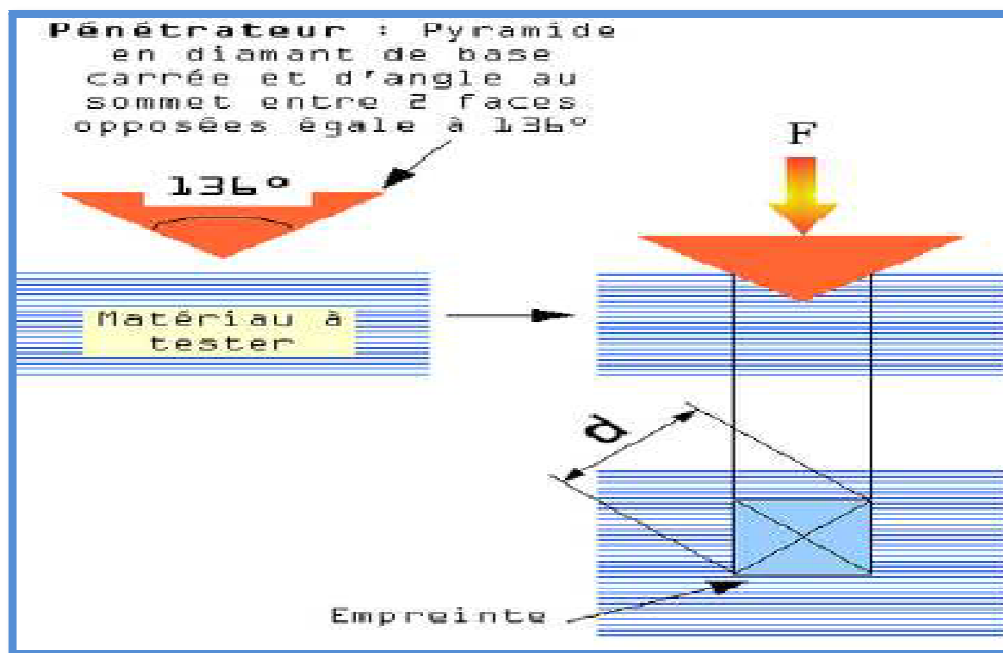
L'essai Vickers utilise un pénétrateur en diamant de forme pyramidale. La pyramide est droite à carré dont l'angle au sommet est de 136° .

La valeur de la dureté Vickers se définit comme étant le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte S soit :

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

La surface est calculée en fonction de l'empreinte grâce au microscope optique. On mesure la première diagonale d_1 puis la seconde d_2 et on calcule la valeur moyenne d soit :

- **HV** : dureté de Vickers.
- **d** : diamètre de l'empreinte en millimètre (deux diagonale du carré de l'empreinte).
- **F** : charge d'essai (N).



➤ **Condition d'essai :**

- L'essai est normalement conduit à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibration et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 s.
- En prépare la surface pour éviter toute altération (oxydation...).
- Épaisseur de la pièce $\geq 8x$ hauteur d'empilement (acier).
- Pour les essais successifs on choisira :

$$a \geq 2.5d ; b \geq 4d$$

$$a \geq 3d ; b \geq 6d \text{ (Al, Cu et alliages).}$$

- La pièce doit reposer sur un support rigide.

➤ **La charge de l'essai :**

La charge de l'essai Vickers s'étant dans la gamme de 10 à 120 Kg. Celle-ci sera choisie en fonction du niveau de la dureté du matériau à essayer. Plus le matériau est dur et plus la charge sera élevée pour que l'empreinte soit visible et facilement mesurable.

La charge est couramment utilisée est 294 N (pour Al, Cu et alliages ainsi que les aciers).

I.4.1.4. Essai Rockwell :

L'essai consiste à imprimer, en deux temps dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur normalisé et à mesurer l'accroissement rémanent « e » de la profondeur de pénétration au moyen d'un comparateur. Deux pénétrateurs sont utilisés :

- ✓ Cône en diamant dont l'angle au sommet est de 120°.
- ✓ Bille d'acier trempé de diamètre 1/8 ou 1/16 de pouce.
- **Principe de l'essai :**
 - Le pénétrateur étant perpendiculaire à la surface à essayer, il est soumis sans chocs à charge initiale de pénétration F_0 . Cette charge entraîne une pénétration a du pénétrateur, qui sert d'origine de mesure de la dureté.
 - On applique au pénétrateur, progressivement et sans chocs (en 2 à 8 secondes), une surcharge F_1 qui entraîne un accroissement de pénétration b de pénétrateur.
 - On enlève de la surcharge F_1 pour revenir à la charge initiale F_0 . La pénétration du pénétrateur est alors égale à c
 - On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration h , c'est-à-dire la différence entre la pénétration c sous charge F_0 à la fin de l'essai et la pénétration a sous charge F_0 au début de l'essai.

I.4.1.5. Essai de Rockwell « C » (HRC) :

Le pénétrateur est un cône en diamant d'angle au sommet 120°. L'accroissement se mesure en unités égales à 0.002mm. La charge utilisée est 150Kg dont 10Kg de pré-charge. Cet essai est utilisé pour qualifier la dureté des aciers durs, aciers trempés.

$$HRB = 130 - r$$

$$F_0 = 10\text{Kg};$$

$$F_0 + F_1 = 150\text{Kg};$$

$$\text{HRC} = 100 - e;$$

$$e = 0,12 / 0,002.$$

I.4.1.6. Essais Rockwell "B" (HRB) :

Le pénétrateur est une bille d'acier de diamètre 1.59mm l'accroissement se mesure également en unités égales à 0.002mm. La charge utilisée est 100Kg dont 10Kg de pré-charge. Cet essai est utilisé pour les aciers doux, non trempés et les métaux et alliages non ferreux.

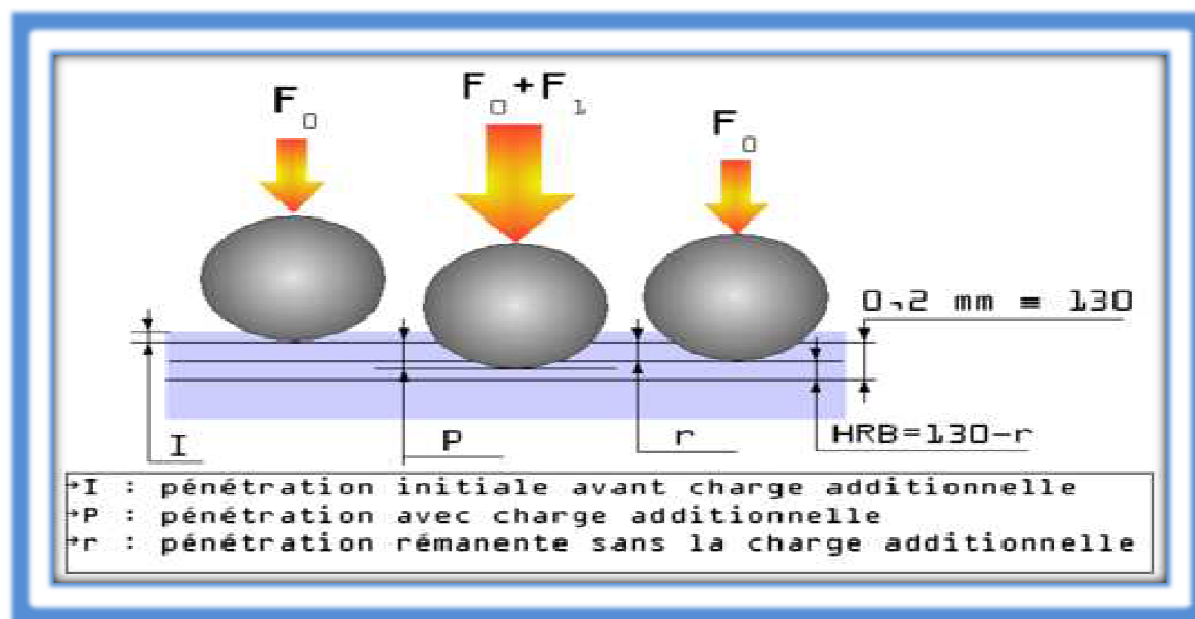


Fig.4.4. Principe de l'essai Rockwell à bille

➤ **Conditions d'essai :**

- L'essai est appliqué à température ambiante.
- Les charges sont appliquées progressivement et sans chocs.
- La surface est polie pour éviter toute influence des impuretés (oxydation ou autre...).
- La pièce repose sur un support rigide.
- L'épaisseur de la pièce doit être :
 1. $> 8e$ (profondeur de pénétration) pour les aciers.
 2. $> 10e$ pour les alliages d'aluminium et de cuivre.
- Pour les essais successifs, la distance entre centres de deux empreintes voisines sera de :
 - $g \geq 3\text{mm}$ pour les aciers.
 - $g \geq 6.d$ (diamètre de l'empreinte) pour les alliages d'aluminium et de cuivre.
- La distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce sera :
 - 1) $f \geq 3\text{mm}$ pour les aciers.
 - 2) $f \geq 3.d$ (diamètre de l'empreinte) pour les alliages d'aluminium et de cuivre.

I.4.2. Essais Micro-dureté :

I.4.2.1 Définition :

L'essai de la micro-dureté est analogue à celui de Vickers, qui se fait à l'aide de micro-duromètre sous une charge de quelques grammes, qui comporte une colonne de microscope optique qui permet de viser la zone souhaitée avec précision sur l'échantillon poli.

Le pénétrateur Vickers de forme pyramidale avec un angle de 136° qui sera placé directement dans l'axe optique pour effectuer l'essai est la que le pénétrateur va mesurer les deux zones (blanche et noir), en forme de diagonales.

La surface latérale S de l'empreinte peut s'exprimer en fonction de la diagonale d de la base carrée de la pyramidale de l'empreinte après suppression de la charge :

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin(68^\circ)}$$

D'où : $H_v = 1.854 \times P / d^2$

- **Les précautions de l'essai.**

- La pièce doit reposer sur le support de manière uniforme.
- L'état du diamant doit être fréquemment vérifié.
- La distance du centre de l'empreinte et le bord de la pièce à mesurer soit supérieur à $2.5 \times d$.
- L'épaisseur de la pièce $e > 1.5 \times d$.
- Un bon polissage.

I.4.3. Essai ultrasonique.

L'essai ultrasonique consiste à calculer les vitesses longitudinale et transversale (V_L et V_T) de notre alliage d'aluminium AlSi7% sur les trois directions (X, Y, Z) afin d'aboutir à des résultats qui nous mènent à dire si le matériau est isotrope ou anisotrope et déterminer le module de Young E et le coefficient de Poisson ν et aussi le coefficient de Lamé λ et même le module de cisaillement G .

I.1 ALUMINIUM ET SES ALLIAGES.

Introduction [1].

L'aluminium est un élément chimique de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un élément important sur la planète Terre avec 1,5% de sa masse totale.

Il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il pourrait également être extrait d'autres minéraux tels que : néphéline, leucite, andalousite, muscovite. Sa découverte fut en 1827 par Friedrich Wöhler qui est le premier à mettre en évidence ses propriétés chimiques et physiques.

L'aluminium est utilisé dans de nombreuses industries pour faire de nombreux produits différents et il est très important pour l'économie mondiale.

I.1. Principales propriétés de l'aluminium [2].

I.1.1. Propriétés physiques.

Carte d'identité de l'élément Aluminium

Propriétés physiques	Valeurs
Numéro atomique	13
Masse atomique	26,98154 g/mole
Electronégativité de Pauling	1,5
Masse volumique	2,7g/cm ³ à 20°C
Structure cristalline	Cubique à faces centrées
Température de fusion	660,4°C
Température d'ébullition	2467°C
Rayon atomique (Van Der Waals)	0,143 nm
Rayon ionique	0,05 nm
Isotopes naturels	1
Isotopes artificiels	16
Configuration électronique	1S ² 2S ² 2P ⁶ 3S ² 3P ¹
Energie de première ionisation	577,4 KJ/mole
Energie de deuxième ionisation	1816,1 KJ/mole
Energie de troisième ionisation	2744,1 KJ/mole
Potentiel standard	- 1,67 v

Tableau I.1 : Carte d'identité de l'aluminium.

I.1.2. Propriétés mécaniques

A cause de sa structure CFC, l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile. Cette plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage étant mal aisé.

L'aluminium se prête bien à toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tels que l'argon ou l'hélium, sinon l'aluminium dépend :

- Des traitements mécaniques (forgeage, laminage...).
- Des traitements thermiques (trempe, recuit...).
- Des éléments d'additions (fer, Cu, Mn, Si, Mg...).

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium sont les suivantes :

Pour l'aluminium pur, le module d'élasticité est de 66,6 GPa ;

- Valeur qui augmente en présence des impuretés et les éléments d'addition.
- Le module de torsion est égale à 25 GPa pour l'aluminium pur tiré à 99.9%, et de 26 GPa pour l'aluminium commercial
- Le coefficient de poisson varie de 0,33 à 0,35.

I.1.3 Propriétés chimiques [2].

L'aluminium est un métal éminemment oxydable, il se distingue par sa résistance à la corrosion élevée du fait de la formation à la surface d'une couche protectrice d'aluminium (Al_2O_3).

La résistance à la corrosion aux solutions salines et à l'eau de mer ainsi qu'au brouillard est améliorée à cause de la pureté du métal, dans les industries chimiques et alimentaires, on emploie aussi l'aluminium titrant au moins 99,5 %. La plupart 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.

I.1.4 Domaines d'utilisation

En tonnage et en valeur, l'aluminium est le métal le plus utilisé après le fer, grâce à sa légèreté et sa bonne conductivité électrique et thermique. L'aluminium pur est mou et fragile, mais avec des petites quantités de cuivre, magnésium, manganèse, silicium et d'autres éléments, il peut former des alliages aux propriétés variées.

Parmi les secteurs utilisant l'aluminium, on peut citer :

les transports (automobiles, avions, camions, trains, bateaux, vélos etc.).

L'emballage (boîtes de conserve, papier aluminium, canettes, barquettes, aérosols, etc.) et notamment les emballages alimentaires.

La construction (fenêtres, portes, gouttières, etc.).

La construction (fenêtres, portes, gouttières, etc.).

Les biens de consommation (appareils, ustensiles de cuisine etc.).

Les fils électriques (la conductivité de l'aluminium ne représente que 60 % de celle du cuivre, mais l'aluminium est plus léger et moins cher).

De l'aluminium très pur (99,980 à 99,999 %) est employé en électronique et pour les CD

I.1.5 Alliages à base d'aluminium [3].

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium non allié à caractéristiques très réduites, 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 :

➤ **Alliages corroyés**

Destinés à la forge et le laminage, ils sont 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, pressage, forgeage et estampage.

➤ **Alliages de moulage**

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

➤ **Alliages de frittage**

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

I.1.6 Désignation des alliages d'aluminium [5].

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

I.1.6.1. Alliages moulés

La désignation de ces alliages d'aluminium est décrite de façon symbolique et numérique dans la norme NF EN 1780- 1, -2 et - 3. La correspondance des éléments avec l'ancienne désignation AFNOR apparaît dans le (tableau I.2).

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

Tableau I.2 : Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages.

a. Désignation de la composition

Partie commune aux désignations numériques et symboliques, la désignation est composée successivement des éléments suivants :

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

❖ Désignation numérique

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

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

❖ Désignation symbolique

La première partie de la désignation (EN AC -) est suivie des symboles chimiques

des éléments d'addition (tableau I-2), successivement suivi de leurs teneurs massiques pris dans l'ordre décroissant.

b. États de livraison – États métallurgiques

➤ États de livraison :

Selon la norme NF EN 1706, les états de livraison sont maintenant désignés de façon indiquée au (tableau I.3).

Procède de moulage	Désignation nouvelle norme NF EN 1706	Désignation ancienne norme NF A03-002
Sable	S	Y2
Coquille	K	Y3
Sous pression	D	Y4
De précision	L	

Tableau I.3 : Désignation des états de livraisons.

➤ États métallurgiques

Selon la norme NF EN 1706 les états métallurgiques sont maintenant désignés de la façon indiquée au (tableau I.4).

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

Tableau I.4 : Désignation des états métallurgiques.

Le tableau 1-5 ci-dessous donne des exemples de familles d'alliages selon la norme citée ci- dessous.

Eléments d'alliages	Famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
Silicium	40000
Magnésium	50000
Zinc et le cuivre	70000

Tableau I.5 : Famille d'alliages d'aluminium moulés.

I.1.6.2 Alliages corroyés [4].**a). Désignation de la composition****a.1. Partie commune aux désignations numériques et symboliques**

La désignation est composée successivement des éléments suivants

Le préfixe EN suivi d'un espace ;

La lettre A qui représente l'aluminium

La lettre W qui représente les produits corroyés (Wrought) ;

Un tiré.

a.2. Désignation numérique (NF EN 573-1)

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

La signification des quatre chiffres est la suivante :

Le premier chiffre indique le groupe d'alliages selon le tableau I.6 (les chiffres de 0 et 9 sont réservés à l'usinage privé des réducteurs).

Pour le groupe 1: les deux derniers chiffres indiquent le pourcentage minimal d'aluminium au-delà de 99.00%, et le deuxième chiffre indique des modifications dans les limites d'impuretés ou dans les éléments (zéro correspond à des limites d'impuretés naturelles).

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

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium (teneur $\geq 99.00\%$)
2	Aluminium-cuivre
3	Aluminium-manganèse
4	Aluminium-silicium
5	Aluminium-magnésium
6	Aluminium-magnésium silicium
7	Aluminium-zinc
8	Autre alliages d'aluminium

Figure I.6 : Quelques groupes d'alliages d'aluminium.

Exemple : EN AW -2024 est un alliage d'aluminium à 4% de cuivre et 1.5%de magnésium.

a.3.Désignation symbolique (NF EN 57362)

Elle est destinée à compléter la désignation numérique définie avant

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

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

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

Exemple : EN AW-1100[Al 99.00 Cu].

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

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

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

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

b. États de livraison- États métallurgiques [2].

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

L'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T voir (Tableau 1-7).

Le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres complémentaires voir (tableau 1-8).

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

Tableau 1.7 : Désignation des états métallurgiques de base.

Eléments d'alliages	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et silicium	6000
Zinc et cuivre	7000

Tableau 1.8 : Famille d'alliages d'aluminium corroyés.

I.1.7 Différents types d'alliages d'aluminium [6].

I.1.7.1. Alliages de corroyage

Ils sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits (tôles, profilés...) par laminage ou par filage. Les demi-produits ainsi obtenus sont assemblés par soudage, rivetage, visage,..... dans les diverses industries de bâtiments, de l'électricité, etc.

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus, on distingue pour les alliages de corroyage :

a)-Alliages à durcissement structural ou (trempant)

Dans lesquels le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante.

b)-Alliages non susceptibles au durcissement structural (ou non trempant)

Dans lesquels le niveau de caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, filage...) ou par des recuits.

I.1.7.2 Alliages de frittage

Ce sont les alliages élaborés par compression et frittage, les plus utilisés présentent généralement une matrice Al-Al₂O₃. Leur élaboration se fait suivant la méthode de la métallurgie des poudres.

Dans ce travail, nous nous intéresserons essentiellement aux alliages de fonderie.

I.1.7.3 Alliages de fonde Les alliages prévus pour les moulages de forme doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques, une résistance à la corrosion élevée, etc.

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

Un eutectique se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limitée dans l'aluminium. C'est ce qui détermine la teneur en éléments plus élevée dans les alliages de fonderie que dans les alliages corrodables.

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

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

I.1.7.3 Les principaux alliages de fonderie d'aluminium [5].

Alliage	Élément d'alliage	Dureté (HB)	Intervalle de solidification (°C)	Mise en œuvre
EN AC-Al Si7Mg0.3	7% Si, 0.30 Mg	50-80	615-555	Pièces mécaniques, coquille
EN AC- Al Si13	13%Si	50-55	580-575	Pièces minces (3mm).
EN AC-Al Mg 10	10% Mg	50-80	600-55	Intermédiaire entre EN-AC
ENAC- Al Cu 8 Si	8% Cu, Si	75-80	615-515	Usinabilité excellente
EN AC-Al Cu 5 MgTi	5 % Cu,Mg,Ti	85-90	650-535	Meilleures propriétés mécaniques
EN AC-Al Si 9Cu3	9%Si, 3%Cu	80-110	590-507	Alliage de sous pression

Tableau I.9 : Principaux alliages de fonderie.

a) Alliage aluminium cuivre (Al-Cu) série 20000

La fonderie utilise rarement les alliages qui contiennent uniquement du cuivre à cause de leurs mauvaises coulabilités, cette propriété peut être toutefois améliorée par l'addition de silicium, on peut néanmoins avoir de bonnes propriétés à chaud en effectuant des additions de nickel et de magnésium.

Les alliages de la série 20000 à durcissement structural forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- Une aptitude au moulage variable mais assez médiocre ;
- Une résistance à la corrosion insuffisante en milieu agressif ;
- Une bonne usinabilité.

b) Alliages aluminium silicium (Al -Si) série 40000

Les alliages Al-Si sont les plus utilisés, leur teneur en Si varie de 5 à 20%, bien que la très grande majorité de ces alliages présentent une composition eutectique ou hypo eutectique.

- Les alliages de ces séries font preuve d'une très bonne coulabilité et résistent bien à la corrosion.
- Ces alliages ont de bonnes propriétés de fonderie, l'augmentation de la teneur en silicium améliore la coulabilité et par conséquent l'aptitude à obtenir de bonnes pièces.

- Propriétés

Le silicium a pour effet :

- D'améliorer la coulabilité
- De réduire l'aptitude à la retassure de diminuer le coefficient de dilatation d'une manière générale, les Al-Si sont les alliages d'aluminium qui présentent les meilleures propriétés de fonderie.

- Applications

Automobile, aviation, mécanique, appareillages électriques, chimie.

C) Diagramme d'équilibre d'alliages Al-Si (40000) [6]

Le diagramme d'aluminium montre l'existence de deux solutions solides α et β . La première contient jusqu'à 1,65 % de Si, la seconde contient jusqu'à 3 % d'aluminium.

Un eutectique existe à 12,7 % de Si.

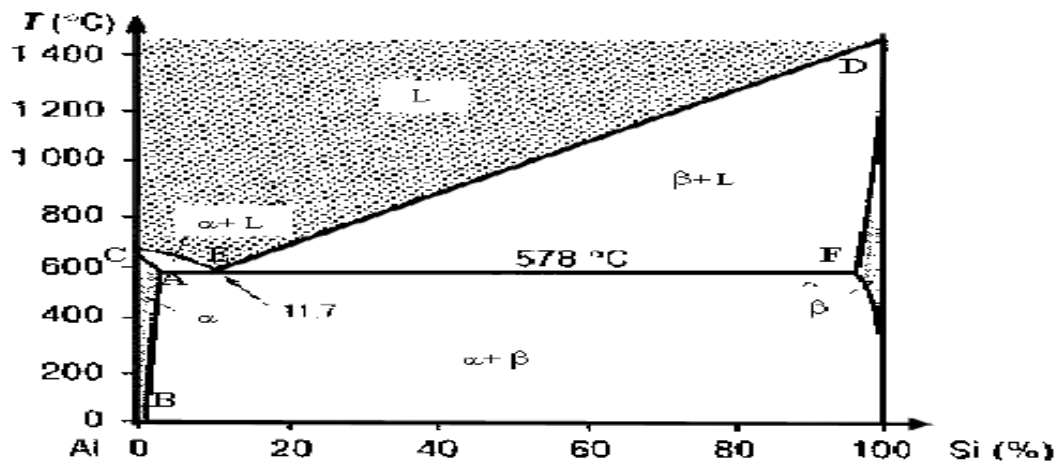


Fig. I.1 : Diagramme d'équilibre Al-Si.

La faible solubilité du Si dans l'aluminium et le phénomène de surfusion ne font que le Si de l'eutectique forme des cristaux polyédriques importants qui rendent l'alliage fragile et difficilement usinable. Pour cette raison, tous les alliages Al-Si hypo eutectiques doivent subir un traitement de modification. Le traitement de modification a pour but d'obtenir un eutectique Al-Si plus fin avec une meilleure répartition entre les deux phases eutectiques. Pour cela, on traite le bain de fusion avec du sodium (Na), du strontium (Sr) ou encore de l'antimoine (Sb) avant la coulée. Le traitement d'affinage a pour but d'augmenter le nombre de sites de cristallisation de la phase pro eutectique. Il consiste à ajouter des éléments affinant au bain de fusion comme le titane ou le bore pour les hypo eutectiques ou du phosphore pour les hyper eutectiques. Ces deux traitements ont pour effet d'augmenter la résistance mécanique et A% de l'alliage solide.

d) Les types d'alliages Al-Si (40000)

Les différents types d'alliages (40000) sont :

d.1) Alliage 41000 (EN AC-Al Si 2 Mg Ti) ou (A-S2GT) : Apte à l'oxydation anodique et à la décoration convient particulièrement à la coulée des pièces de quincaillerie et de bâtiments.

d.2) Alliages 44100 (A-S13 Alpax) : Il est le plus ancien et est encore très utilisé du fait de son excellente aptitude au moulage et de sa bonne résistance à la corrosion (appareils ménagers, bâtiment, mécanique).

d.3) Alliage 46000 (EN AC-Al Si 9 Cu 3) ou (A-S9U3) : Ces alliages conviennent parfaitement au moulage sous pression qui autorise des cadences élevées et donne des produits onéreux. En revanche ce procédé donne des pièces qui ne peuvent pas être traitées thermiquement, ont un faible allongement à la rupture et ne sont pas soudables.

d.4) Alliage 43300(A-S-10G) : Les alliages 43300 peuvent également être coulés sous pression, ils sont utilisés pour la fabrication des pièces mécaniques variées.

d.5) Alliage 47000(A-S12U4) : Il peut être moulé sous pression et il est destiné aux pièces mécaniques peu épaisses.

Alliages Al-Si-Cu-Mg : Ils présentent une bonne tenue à chaud et des caractéristiques élevées après traitements thermiques. Ils sont moulés en coquille et utilisés pour les pistons et les culasses.

d.6) Alliages Al-Si-Mg : Ces alliages présentent de bonnes caractéristiques mécaniques après traitement thermique, une bonne tenue à la corrosion. Ils sont soudables, ils peuvent être moulés en coquille ou en sable et sont très utilisés dans les industries mécaniques, dans l'automobile (roues, pièces de liaison au sol) et l'aéronautique.

Numérique	Symbolique	Suivant l'ancienne norme
EN AC- 41000	EN AC-Al Si 2 Mg Ti	A-S2 GT
EN AC- 42000	EN AC-Al Si 7 Mg	A-S7 G
EN AC- 42100	EN AC-Al Si 7 Mg 0,3	A-S7 G 0,3
EN AC- 42200	EN AC-Al Si 7 Mg 0,6	A-S7 G 0,6
EN AC- 44000	EN AC-Al Si 11	A-S11
EN AC- 45200	EN AC-Al Si 5Cu 3 Mn	A-S5U3M
EN AC- 51000	EN AC-Al Mg 3(b)	A-G3
EN AC- 71000	EN AC-Al Zn 5 Mg	A-Z5G

Tableau 1.10 : Désignation conventionnelle.

I.1.8 Moulage [4].

Le moulage a pour but de produire des pièces ayant leurs formes définitives et leurs cotes presque exactes après démoulage, il est employé pour des pièces ayant des formes compliquées (qu'on ne peut pas réaliser par usinage).

Parmi les nombreux procédés de moulage on trouve :

I.1.8.1 Moulage en sable

Le moulage en sable est une technique qui utilise des moules en sable, ce dernier est constitué d'argile liée avec de l'eau. La précision des pièces obtenues varie de moyenne à bonne. Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable.

I.1.8.2 Moulage en coquille

Cette technique consiste à couler par gravité, du métal liquide dans un moule métallique. Les avantages de cette méthode sont la rapidité, bonne précision dimensionnelle et un très bon état de surface.

I.1.8.3 Moulage sous pression

Le moulage sous pression est un procédé de coulée mécanique, qui permet la production rationnelle de pièces en grande série. Il a l'avantage d'être très précis et convient aux pièces de faibles tolérances et de surface lisse. Les moules sont fabriqués à base d'acier de construction à haute résistance et les alliages utilisés sont généralement de 2^{ème} fusion donc à bas prix, ce sont des groupe d'alliages de types Al-Si ou plus largement Al-Si-Cu.

I.1.9 Le laminage [8].

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelé laminoir.

➤ Principe du laminage

Le métal subit une réduction d'épaisseur par écrasement entre les deux cylindres.

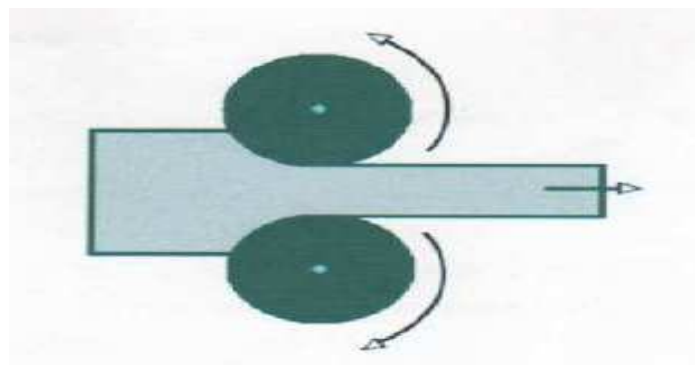


Fig. I.2 : Principe de laminage.

CHAPITRE I.5 DÉFAUTS CRISTALLINS ET DIFFUSION.**Introduction. [16]**

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

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

On distingue quatre types de défauts :

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

I.5.1 Les défauts ponctuels (fig.5.1). [14]

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

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

Ces défauts correspondent à 4 situations :

I.5.1.1 Lacune

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

I.5.1.2 Atome auto interstitiel

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

I.5.1.3 Atome étranger interstitiel

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

I.5.1.4 Atome étranger en insertion

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

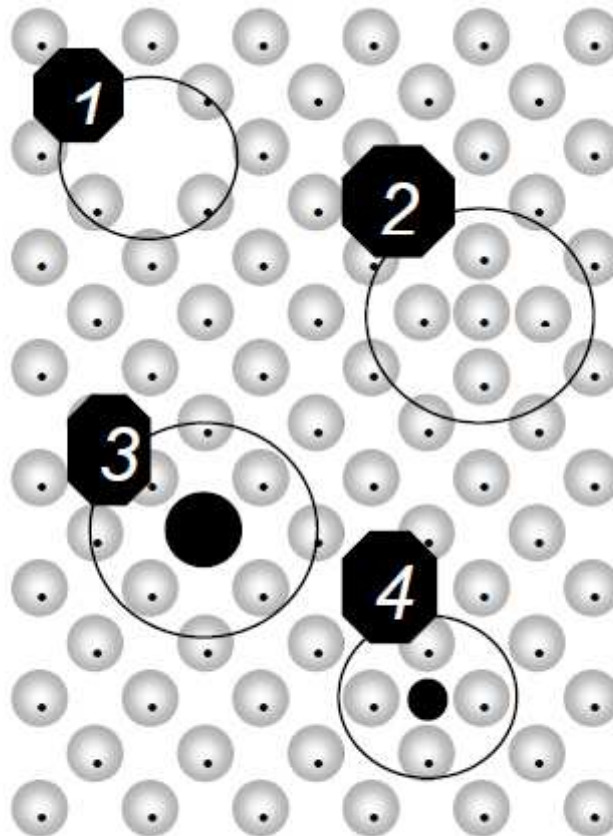


Fig. 5.1 : Types de défauts ponctuels

I.5.2 Défauts à une dimension (défauts linéaires). [13]

Une façon d'expliquer le glissement, consiste à imaginer que les mouvements atomiques plans sur plans se font de manière rigide, c'est-à-dire que tous les atomes se déplacent en même temps. Une autre façon plus économique en énergie de produire un glissement est de faire glisser certaines parties du cristal avant d'autres. C'est le concept de glissement localisé. A un instant donné, on peut définir une frontière entre la partie du plan qui a déjà glissé et la partie du plan qui est encore intacte. On distingue essentiellement deux types de dislocation :

Dislocation **vis** et dislocation **coin** (fig.5.2).

Pour caractériser une dislocation on utilise le concept de valeur et de circuit de burgers

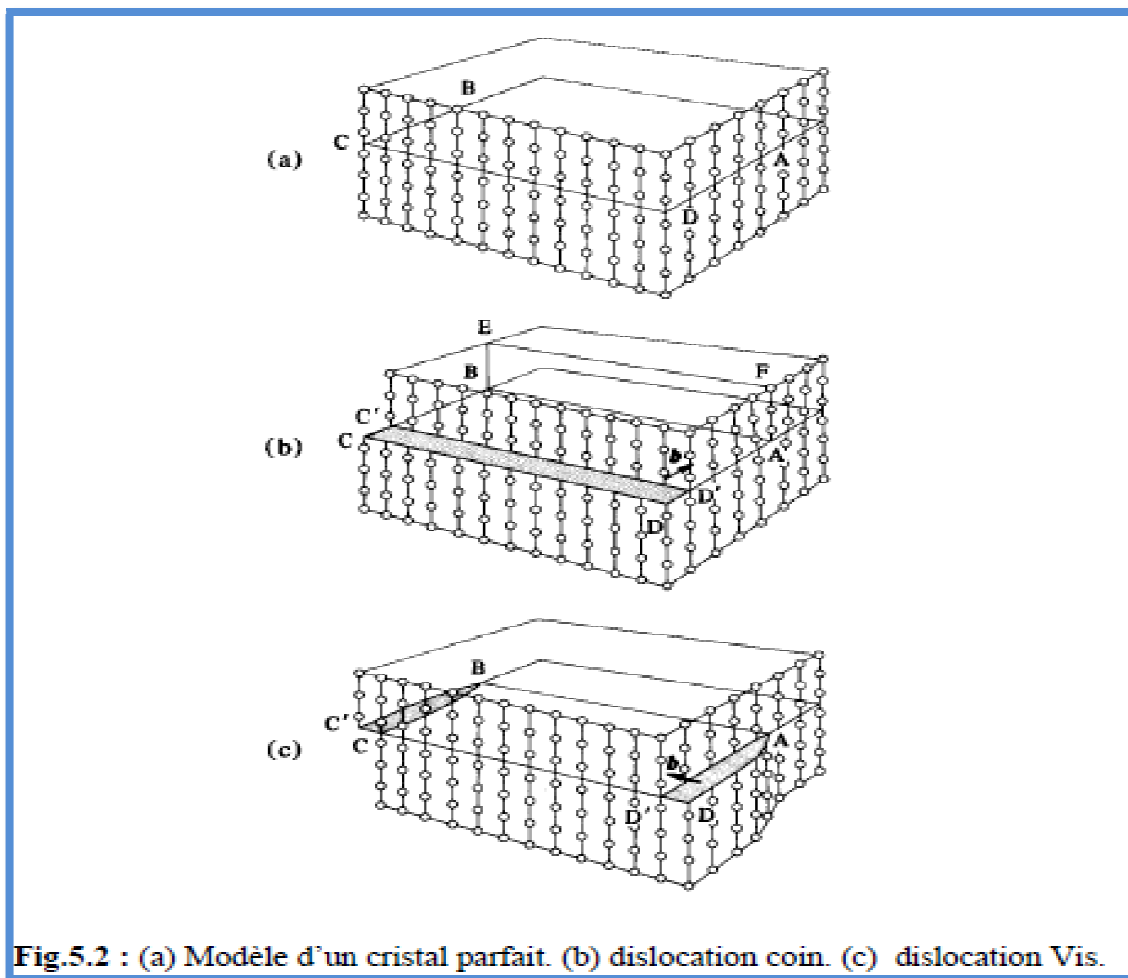


Fig.5.2 : (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis.

I.5.2.2 Dislocation coin.

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

I.5.2.2 Dislocation vis.

La dislocation vis peut être comprise comme la ligne de séparation entre le réseau cristallin non perturbé et une zone de décalage partiel du réseau cristallin par rapport à la région avoisinante du réseau, ce genre de dislocation peut changer facilement de plan de glissement car le champ de contrainte a une symétrie radiale.

Et on désigne par une dislocation mixte la combinaison des deux types suscités :

5.2.3 Dislocation mixte (fig.5.3). [13]

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

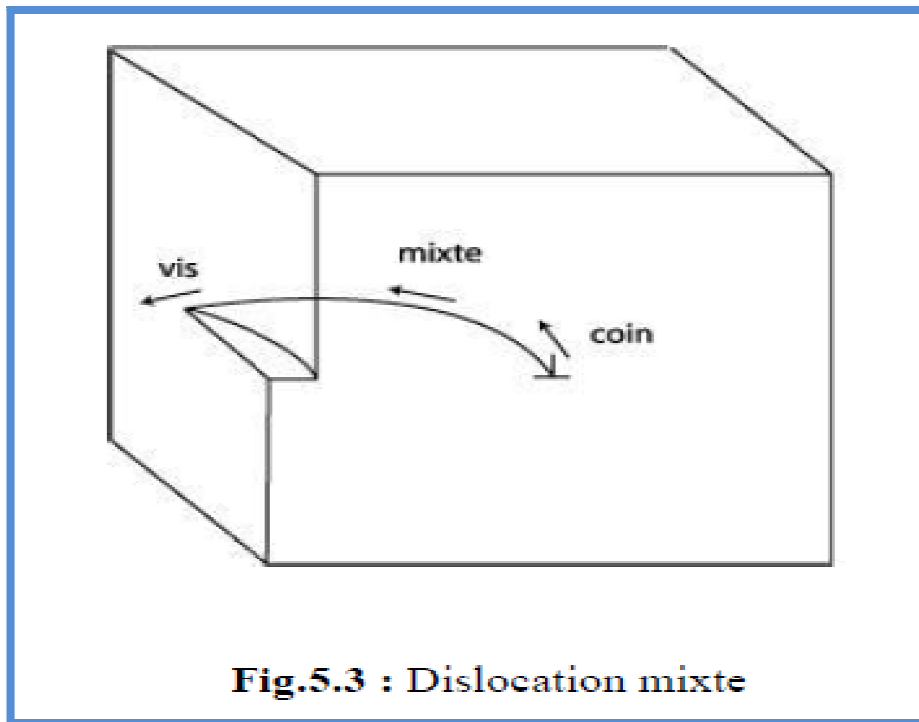


Fig.5.3 : Dislocation mixte

I.5.2.4. Le vecteur de burgers

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

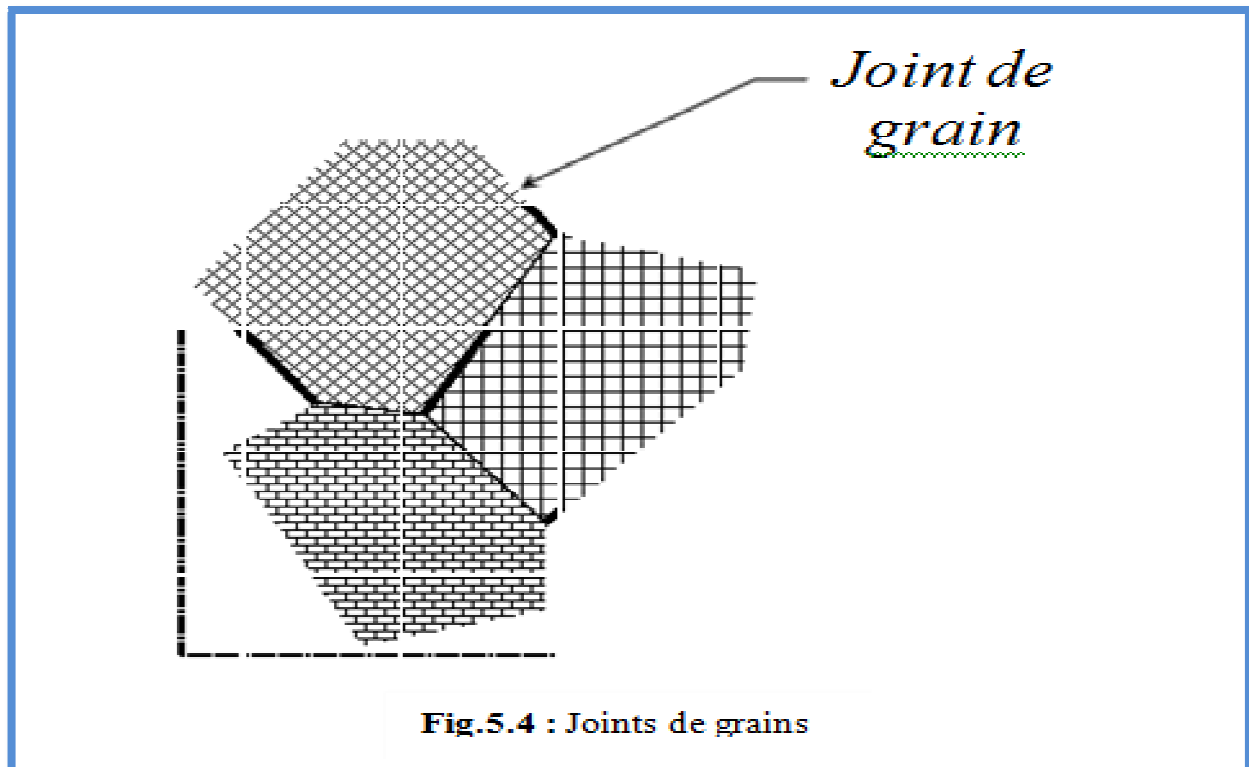
I.5.3. Défauts à deux dimensions (défauts plans)

Ce sont par exemple

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

I.5.3.1 Les joints de grains

Les matériaux cristallins utilisés couramment sont rarement constitués d'un seul cristal (à l'exception de certains cas : les semi-conducteurs, diodes et transistors) : ils sont formés d'un ensemble de petits cristaux ; des **grains** qui forment un milieu continu. Les surfaces d'écoulements 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 à trois distances inter atomique



I.5.3.2. Joints de macles

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

I.5.4 Défauts à trois dimensions (défauts volumiques) [14]

Les défauts volumiques sont essentiellement des cavités, des phases non désirées, des frittages des inclusions (morceaux de matières étrangères, provenant de l'élaboration, par exemple particules d'un creuset). Ils proviennent notamment de l'élaboration des matériaux (frittage des céramiques,

métallurgie des poudres ou capillaires des fluides pour les cavités) ou de l'endommagement de celui-ci lors de son utilisation.

I.5.4.1 Les pores (fig.5.5)

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

La taille.

La morphologie.

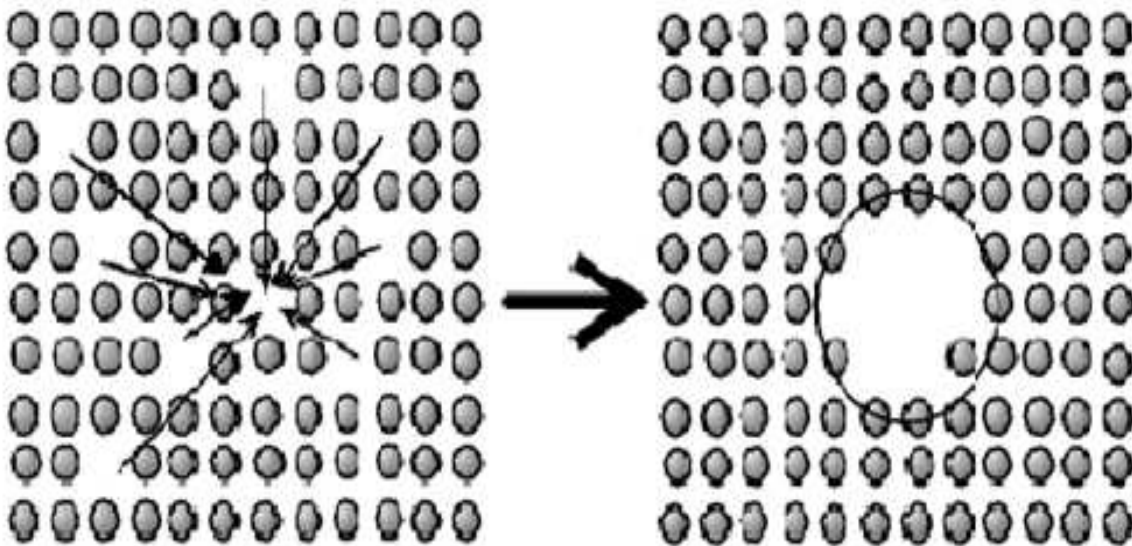


Fig.5.5 : Représentation schématique d'un pore.

I.5.4.2 Création des pores :

-Sous l'effet de la température élevée, les atomes vont pouvoir bouger et laisser des espaces vides.

-par la diffusion lacunaire : si la matière diffuse d'un côté, les lacunes diffusent en sens inverse et viennent s'accumuler.

-l'irradiation : l'irradiation par des photons de haute énergie (rayon X ou σ) ou par des particules accélérées (électrons, neutrons ...etc.) peut déloger des atomes de leur position et créer des lacunes.

I.5.4.3 Les inclusions :

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

I.5.4.4 Les précipités :

Les précipités sont connus comme petites particules de seconde phase qui dépasse cinq à six paramètre de réseau

-types de précipités :

- **Les précipités cohérents :**
- **Les précipités semi- cohérents :**
- **Les précipités incohérents :**
- **Les précipités cohérents :** sont ceux qui présentent une contrainte cristallographie avec la matrice. Les réseaux cristallins de la matrice et les précipités sont identique, mais leurs paramètres cristallins peuvent être légèrement différents. Cela entraine des dislocations élastiques à l'interface matrice-précipité.
- **Les précipités semi- cohérents :** présentent une continuité cristallographique avec la matrice seulement selon certains plans, et il n'y a aucune continuité selon les autres plans ; la semi-cohérence est parfois obtenue grâce a la présence de dislocations coin le long de l'interface.
- **Les précipités incohérents :** ils n'ont aucune relation cristallographique

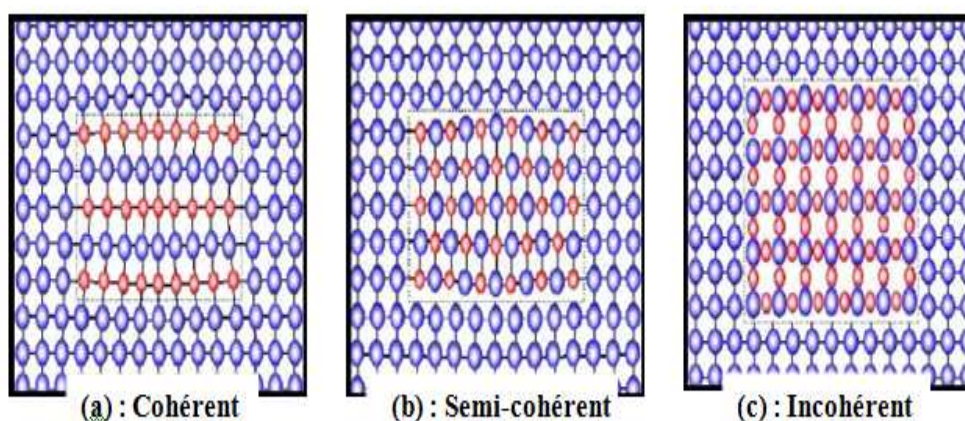


Fig.5.6 : Différents précipités

Suivant l'interaction physicochimique des composants de phases qui se forment dans l'alliage métalliques peuvent être des solutions liquides, des solutions solides ou des combinaisons chimiques.

- **Pores :**

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

a. les retassures : Ils sont provoqués par la forte diminution de volume du métal en passant de l'état liquide à l'état solide.

b. les inclusions : Ce sont généralement des gaz ou de l'air qui a pénétré lors de la coulée et qui n'a pas pu s'échapper avant la solidification.

c. les pores d'hydrogène : Si dans le cas où il y a un rassemblement d'hydrogène lors de la solidification.

- **Remarque :**

Les ségrégats 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.

- **Précipités :**

De nombreux métaux ne sont que très peu ou pas du tout solubles dans l'aluminium solide par exemple le fer ou le titane (solubilité maximale de 0,03%). Au-dessus de 700°C, dans le métal liquide, ces atomes étrangers sont encore intimement mélangés aux atomes d'aluminium, mais au moment de solidification ils sont expulsés du réseau qui constitue les atomes d'aluminium.

Les atomes étrangers, en prenant l'exemple d'atomes de fer alors combinant avec les 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 (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 les 200°C environ.

Les précipités cristallins 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 dépasse les 1.56% en silicium.

I.5.5.3 Importance de la métallographie.

La métallographie est un moyen de contrôle important de la structure métallographique des matériaux métalliques.

A fin d'étudier les matériaux métalliques elle est nécessaire de passer par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux les différentes caractéristiques mécaniques (mise au point, utilisation, détérioration par la corrosion,...etc.)

Grâce à de nombreuses observations au microscope, quelque que soit optique ou électronique, il est possible de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement qui peut 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'impureté ; température de revenu ; ...etc. Peuvent être eux aussi visualisés comme ça en va comprendre plus et rapidement les diagrammes d'équilibre est même avec précision.

I.5.2 La diffusion.**I.5.1. Définition**

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

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

I.5.2. Mécanismes de la diffusion :**a- Autodiffusion :**

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

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

Les quatre types de mécanismes de diffusion des atomes.

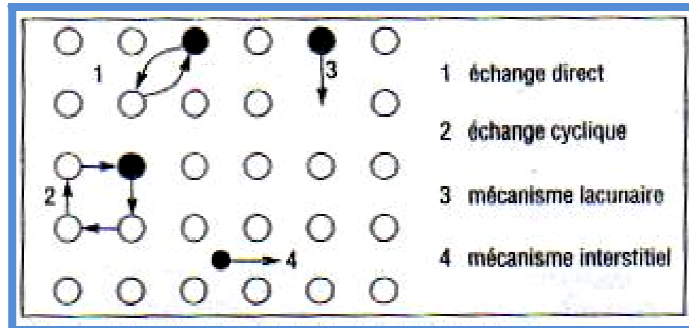


Figure.32 : mécanismes de diffusion à l'échelle atomique.

b- Diffusion d'atomes de soluté en insertion :

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

I.5.3. Lois de la diffusion.

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

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

I.5.4.État stationnaire (première loi de Fick)

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

Le flux est donné par la loi suivante :

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

C est la concentration de l'espèce diffusante.

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

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

I.5.5. État non stationnaire (deuxième loi de Fick)

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

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

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

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

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

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

CHAPITRE II.2 Élaboration de L'alliage AlSi7Mg

II.1. Le matériau à étudier

Le matériau à étudier est un alliage à base de l'aluminium récupéré par des pièces défectueuses en suite recycler, fourni par un priver au niveau du hall de technologie de oued-aissi. En va présenter les différent techniques expérimentales pour caractériser le matériau qui est soumis à des traitements thermique en variant la température de revenu à chaque état [Brut de coulée, trempé, température de revenu (150, 160, 170, 180, 190, 200,220 et240) °C].

II.1.2 La composition chimique :

L'identification de notre matériau a été faite à la S.N.V.I .dans le laboratoire de la métallurgie.

Composition chimique et comme suit :

Éléments chimique	AL	Si	Zn	Fe	Cu	Mg	Mn
%	86.6	6.83	3	1.09	1.23	0.62	0.33

Tableau II.1. Composition chimique de l'alliage AlSi7Mg

II.2. Élaboration de l'alliage à étudier

Cet alliage de l'aluminium à été récupéré par un recyclage fait par une société privée sons élaboration ce fait de la manière suivante

II.2.1 Brut de coulée

Le métal subit une fusion dans un four à creuset basculant chauffé à gaz. Le liquide endura un traitement de dégazage dans le four. En suite on verse le liquide dans des poches de coulé qui sont préchauffées à des températures bien proches à celle de la fusion de l'aluminium, à qui on ajoute 0.5% de sel de sodium sous forme de poudre pour avoir de l'affinage dans le métal.les éprouvettes sont coulées dans des moules en coquille, ainsi le métal solidifié est dit brut de coulée.

II.2.2 Le dégazage

La solidification sous vide partiel permet au gaz de se dégager, refoulant la partie du métal encore liquide vers la surface, produisent le gonflement

En introduit un dégazer N°190 qui se présente sous forme de pastille bleue de 50grammes à la température 710°C environ ; la dose de l'emploi est de 0.25% de la charge totale du liquide.

II.2.3 Écrémage

Cette opération ce fait à plusieurs fois. Il consiste a passé un passoir sur le liquide pour enlevé toutes la crasse et les impuretés qui existe dans le liquide.

II.2.4 L'affinage

Pour avoir de l'affinage on doit ajouter du sel de sodium dans le l'alliage de AlSi7Mg à l'état liquide pour (modifier la texture et l'orientation des cristaux de silicium, affiner la structure)

L'opération du grain est indispensable pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques et se fait dans la poche à une température de 740°C à 750°C.

II.2.5 Moulage en coquille

Ce mode de moulage est composé de deux chapes séparées par le plan de joint, on chauffe ces deux chapes a une température $\geq 250^\circ\text{C}$, pour éviter les criques et avoir un bon remplissage de l'empreinte, en fin on protège les deux chapes par une couche poteyée. On fait le poteyage par une poudre le **DYCOTE 39** étant plus fin ce qui donne un meilleur plan de pièce et après on remplit avec du métal en fusion pour obtenir l'éprouvette.

II.3. Usinage

- **Le découpage** : Pour avoir les dimensions souhaitées des 20 échantillons et les 10 pièces à utiliser dans les différents essais on a besoin d'une scie mécanique.
- **Fraisage** : on utilise une fraiseuse pour obtenir les dimensions de des 10 éprouvettes à étudier en ultrason avec des dimensions suivantes :

L= 200mm ; b= 150mm ; h=20mm

II.4. les traitements thermiques

Après l'usinage des pièces et les échantillons on passe aux traitements thermiques, sauf une éprouvette quand on a le brut de coulée (BC ou F) et l'état trempé (T) va subir que l'homogénéisation et la trempe.

Traitement d'homogénéisation : les éprouvettes sont mises dans un four de trempe à température de 500°C pendant 8h de maintien, une fois ce temps est t'écoulé, on passe à la trempe à l'eau de température ambiante de 25°C, on les retire du bassin de trempe pour qu'elles subissent un traitement de maturation (vieillessement naturel) à l'air libre pendant 16h, en fin ces éprouvettes vont subir un dernier traitement appelé revenu pendant 20h à 160°C dans un four de revenu. Avec refroidissement au four libre

Ces traitements sont pour les états de (150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, et 240) °C

Après traitement on a :

Brut de coulée : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et ou trempé : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 150°C : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 160°C : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 170°C : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 180°C : 1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 190°C :1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 200°C :1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 220°C :1 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500°C et de revenu à 240°C :1 éprouvette ;

II.4.1. Cycle thermique :

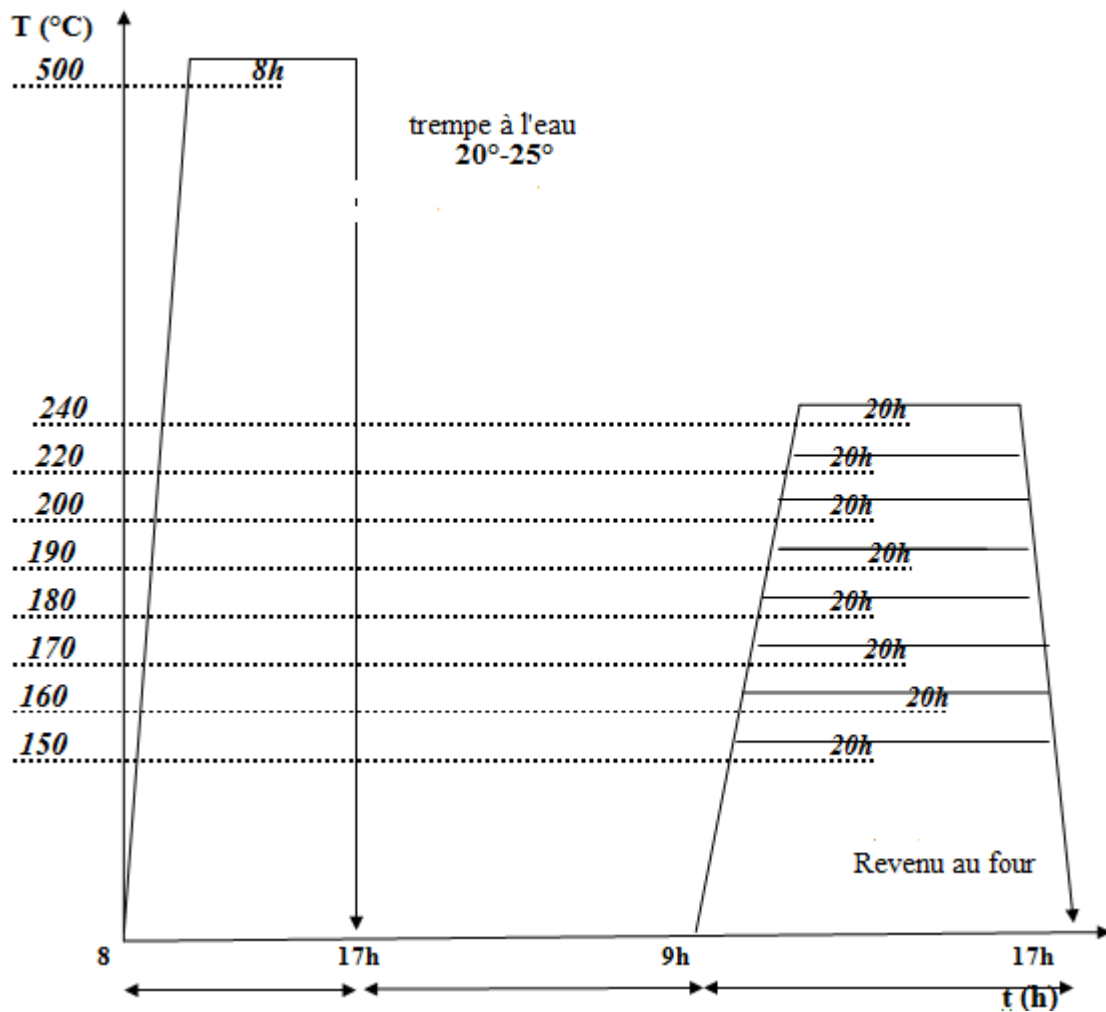


Fig. II.13.Cycle thermique

II. 5. Essais mécaniques :

Nous avons effectués des essais non destructifs (dureté, microdureté, ultrason)

II.5.1 Essai de dureté :

Dans ce travail on opté on pour un essai de Brinell HB. Le diamètre de la bille égal à 2,5mm, sous une charge de 15 kgf pour l'essai Brinell. Après quelques secondes en décharge puis on mesure le diamètre de l'empreinte grâce à une règle graduée, puis on mesure la valeur de la dureté sur deux diametre perpendiculaires sur l'empreinte.

La forme des échantillons utilisés lors des essais est présentée par la **figure. II.14**.

- **Forme est dimension de l'échantillon pour l'essai (dureté, microdureté).**

Face pour l'essai de dureté

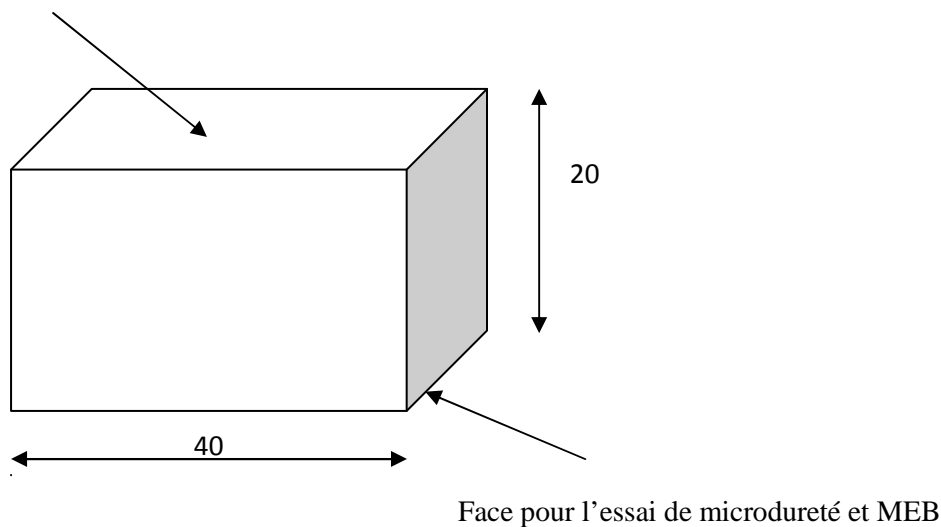


Figure. II.14 : échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté.

II.5.2 Micrographie.

II.5.2.1 Préparation de la surface à traiter

Après avoir découpé en scie a l'aide d'un lubrifiant les échantillons de forme carré (40x40) mm et d'une épaisseur de $e=20$ mm, en suite en passe à l'étape de polissage a fin d'avoir des surface praticable pour les essai, alors il faut que il soit en premier lieu des surfaces planes et brillantes jusqu'à atteindre la surface miroir. Le polissage possède trois étapes.

- **Dressage.**

Le dressage se fait sur des polisseuses doter d'un arrosage abondant pour éviter l'échauffement dans ce cas en utilise des papiers EMERI de granulométries P120, P240, et P400.

- **Dégrossissage.**

Cette étape nous 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.**

Dans cette étapes de polissage a pour but d'atteindre la surface miroir, qui peut réfléchir de la lumière.les échantillons sont passé à un drap imbibé d'une suspension d'abrasif qui est de la alumine, ou cour du travail en verse de l'alumine mélanger avec de l'eau distillé.

II.5.2.2 Attaque chimique.

Le but de l'attaque chimique est de faire apparaître les joints de grains, on utilise une solution d'attaque au chlorure de zinc préparé comme suit :

On pèse 5 grammes de Na-OH 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.5.2.3 Microscope Optique.

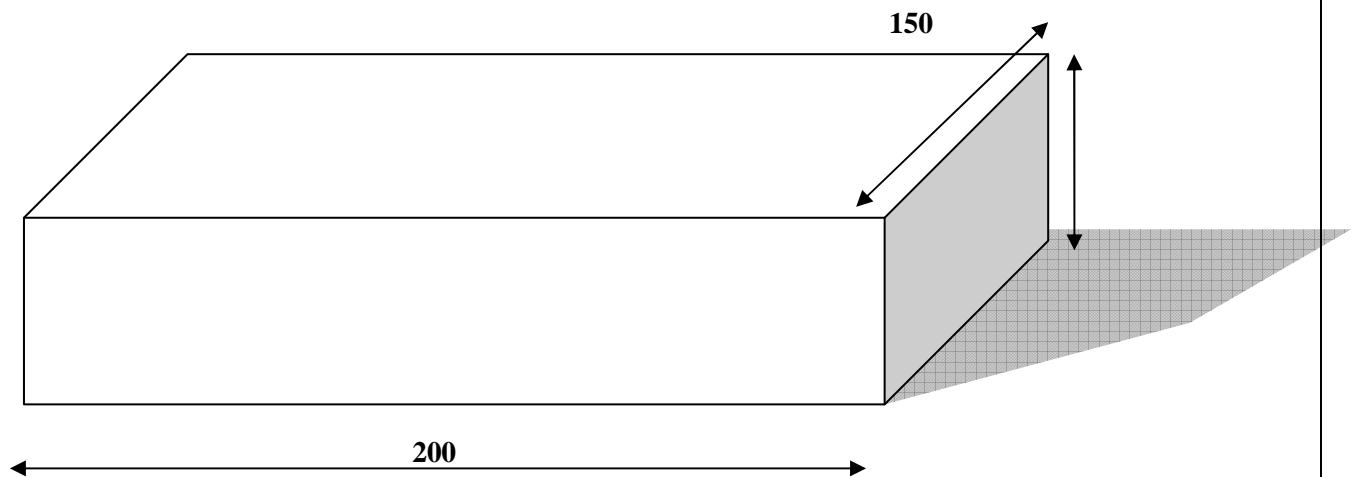
Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différentes échelles (40, 100, 200, 400, 600)

II.5.2.4 Microscope électronique à balayage (MEB).

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

II.6. l'essai ultrasonique.

Cette méthode nous a permis de mesurer les caractéristiques élastiques comme (V_l , V_t , E , ρ , ν , α , λ , μ), en utilisant les pièces frittées de dimension ($L=20$, $b=15$, $e=2$) cm



Il s'agit d'une imagerie à une dimension. L'aide est d'envoyer des ondes US dans l'échantillon et de détecter le signal « réfléchi ou transmis ». L'analyse de ces signaux basés sur une comparaison entre le signal envoyé par la source « dans notre cas c'est deux transducteurs d'ondes US, 2.5 Mhz » et le signal détecté.

L'objectif est de l'extraction des informations sur les caractéristiques élastiques de notre matériau AlSi7Mg comme « E , ρ , ν , α , λ , μ » qui est possible par la mesure de (vitesse longitudinale, et transversale). Grâce à un signal A-scan qui est la 1^{ère} étape de l'imagerie unidimensionnelle.

Pour effectuer cet essai en Utiliser le dispositif qui comporte :

- Echoscop GAMPT-scan
- Deux Transducteurs (1MHz).
- Micro-ordinateur
- Une plaque d'alliage d'aluminium.
- Une boîte de gel

Chapitre II.

Procédure expérimentale

CHAPITRE II.1.APPAREILLAGE

1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à présenter les différents types d'appareils utilisés au cours de notre étude expérimentale en premier lieu, et pour ce qui concerne la deuxième étape explique les différents modes opératoires après avoir réalisé les essais mécaniques.

Les traitements thermiques pour l'alliage Al-Si7Zn3Cu2Mg, et les essais mécaniques de la dureté brinell **HB** et de microdureté **HV0.1** ainsi que l'examen micrographique ont été réalisés au niveau de laboratoire des Sciences Des Matériaux (SDM) de Génie Mécanique, et l'analyse du microscope électronique à balayage (**MEB**) à été faite au sien du laboratoire de Hasnoua. et ce qui concerne l'essai non destructif (ultrason) a été fait au laboratoire de physique a l'université de USTHB.

2. Appareillages

Dans notre partie expérimentale on a utilisé plusieurs appareils afin de caractériser le matériau étudié.

2.1. Le découpage :

A fin d'aboutir a des dimensions souhait en utiliser en premier lieu une scie mécanique pour les échenillons est les pièces, qui possède les propriétés suivantes :

Tension $T=380V$,

Puissance $P=1,5Kw$,

Poids = 600Kg.



Fig. II.1 : Scie mécanique

2.2. Le fraisage.

En a utiliser une fraiseuse pour dimensionner les éprouvettes et les échantillons avec une précision voulus.



Fig. II.2. Fraiseuse

2.1. Four de trempe :

Le four à moufle est doté d'une chambre isolée thermiquement par brique et fibres en céramiques, et protégé par une carcasse métallique à l'extérieur. Le four a les caractéristiques suivantes :

- Température maximale : $T_{\max}=1200^{\circ}\text{C}$.
- Largeur utile : 250mm.
- Profondeur utile : $P=400\text{mm}$.
- Puissance : $P=11\text{Kwa}$.
- Tension : $T=380\text{V}$.
- Régulateur de température type **OMRAN** ($T=220\text{V}$, $T_{\max}=1200^{\circ}\text{C}$).



Fig. II.3. Four de trempe

2.3. Four de revenu :

Le four de revenu est un four a chambre isolée thermiquement pour traitement de vieillissement, doté de (temps de maintien, indicateur du mode de fonctionnement, indicateur de la température recommandée, indicateur de régime de la ventilation, indicateur de la température du dispositif de sécurité). Ce four a les caractéristiques suivantes :

- Tension : $T=380V$
- Température maximale : $T_{max}=700^{\circ}C$
- Puissance : $P=7Kw$
- Largeur : $L=400mm$
- Hauteur : $H=300mm$
- Profondeur : $P=400mm$
- Régulateur de température OMRAN ($T=220V$, $T_{max}=1200^{\circ}C$).



Fig.II.4.four de revenu

2.4. Les polisseuses :

- La polisseuse est composée de deux disques tourons à une vitesse de 150 tr/min et 300 tr/min de type Stuers **KNUTH-ROTOR** alimenté sous tension de 220Vet puissance de 150W, avec dispositif d'arrosage mobile.



FigII.5 : Polisseuse à deux disques

- La polisseuse à un disque de type **Struers DAP-6** alimentée sous une tension de 220V et de puissance de 430W.



Fig. II.6 : Polisseuse à un disque

2.5. Duromètre :

Duromètre de type **KARL FRANK GMBH**, constitué de deux parties, la première est la partie d'essai,

elle nous permet d'effectuer trois d'essais : Rockwell, Vickers et Brinell. Il est doté d'un sélecteur de charge et d'un plateau, sur la quelle on pose les échantillons. Quand a la deuxième partie, elle nous permet de mesurer l'empreinte laissée par des billes ou des pyramides à un grossissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Tension : $T=220V$.
- Fréquence : $F=50Hz$.



Fig.II.7 : Duromètre

2.6. Microduromètre.

Le microduromètre utilisé comporte une colonne de microscope optique en réflexion fin de viser avec précision les deux zones (blanche, noir) souhaitée sur les échantillons ; le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer la surface latérale S de l'empreinte peut exprimer en fonction de la diagonale d de la base carrée de la pyramidale de l'empreinte après suppression de la charge. Les mesures de la microdureté sont

effectuées à l'aide d'un microduromètre semi-automatique de type **ZWICK** à pénétration Vickers, avec une charge de 0.05Kg. En à réaliser 3 mesure sur chaque échantillons de notre matériaux.



Fig. II.8 : Microduromètre

2.7. Microscope optique :

Le microscope utilisé est de type ZEISS alimenté sous une tension de 220V et une fréquence de 50Hz avec une puissance de 100W, qui possède un appareil photo automatique, ayant un pouvoir d'agrandissement de 50 à 1000 fois.



Fig.II.9 : microscope optique

2.7. Microscope électronique à balayage :

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



Fig. II.10. Microscope électronique à balayage.

2.7. L'échographe ultrason.

L'échographie ultrason est développée comme l'une des méthodes de recherche les plus importantes notamment dans la médecine et le NDT (essai non destructif). Il y a des multitudes de dispositifs ultrasoniques pour différentes applications. Qui fonctionnent selon les mêmes principes de base. Un transducteur « c'est un émetteur ou récepteur des ondes acoustiques », Un milieu « les ondes transmettent et réfléchissent dedans » les ondes réfléchies sera enregistré dans un écho gram.



FigII.11. Les éléments de l'essai ultrasonique.

GAMPT-scan est un système de mesure ultrasonique très sensible, qui peut être relié à un PC ou simplement à un oscilloscope. Une analyse de signal peut être faite Avec le logiciel « software » fourni (HF-signaux, amplitude signale, B-mode, M-mode et analyse spectrale).

Les sondes ultrasoniques seront reliées aux connecteurs. La fréquence de sonde est automatiquement identifiée du dispositif. Avec l'aide d'une puissance d'émission et de réception réglable, il est possible d'adapter le signal ultrason à presque chaque objet arbitraire de recherche. Les signaux ultrasoniques faibles peuvent être corrigés par une commande de gain de temps (TGC). Le point de commencement et final de TGC sont librement réglables. Les signaux les plus importants (signal de déclenchement, de TGC, d'à haute fréquence et d'amplitude) sont disponibles sur des BNC-joints.

Pour les expériences de laboratoire il y a un choix étendu des sondes ultrasoniques (1, 2 et 4 mégahertz). En liaison avec le système de module de balayage beaucoup d'installations aux méthodes de formation image peuvent être construction.

➤ Composant

1. les éléments de control de GAMPT-SCAN.

L'échoscop GAMPT-Scan est un dispositif A-scan « unidimensionnel » ultrasonique avec une sortie pour l'opération d'écho d'impulsion (en mode de réflexion ou Transmission ». Le dispositif est disponible avec une interface parallèle et un software pour le transfert de données au PC. Facultatif il y a également des USB-adaptateur.

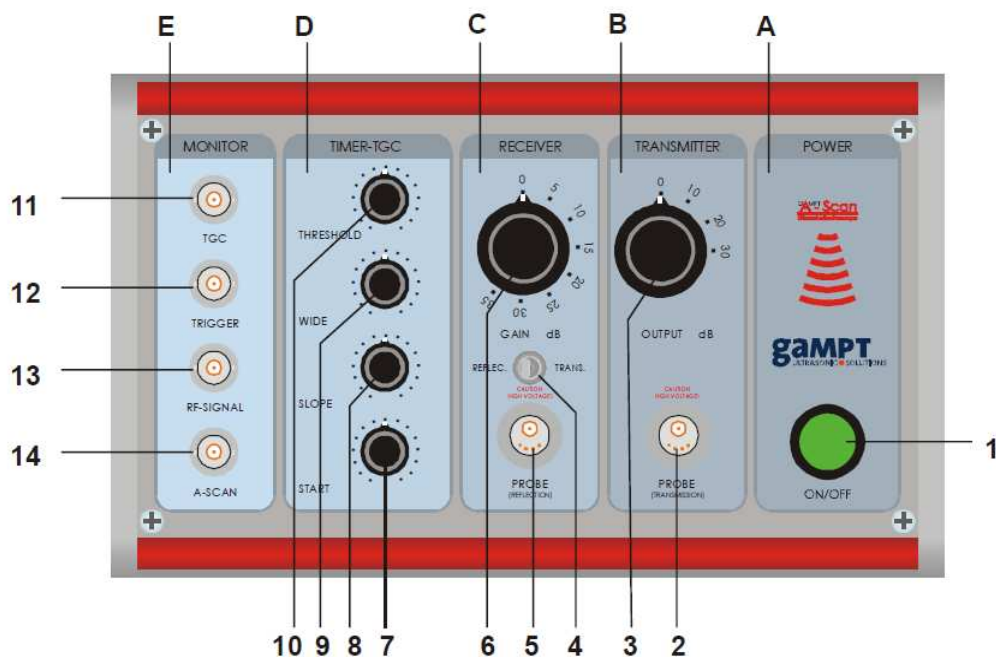


Fig.2.11. L'échoscop GAMPT-Scan

A- Une alimentation d'énergie

1. Bouton "Marche/Arrêt"

B- Unité d'émission

2. connecteur de sonde en mode transmission
3. L'énergie d'émission

C- L'unité de Réception

4. Interrupteur « réflexion/transmission »
5. Connecteur de sonde en mode de réflexion
6. Amplificateur de récepteur

D-L'unité de TGC « Commande de gain de temps »

7. Le point initial de TGC
8. La pente de la TGC
9. Largeur de la TGC
10. Seuil de la TGC

E - Sorties Oscilloscope

11. signal TGC
12. signal de déclenchement
13. signal HF d'ASan de
14. signal A-San

2. les transducteurs.

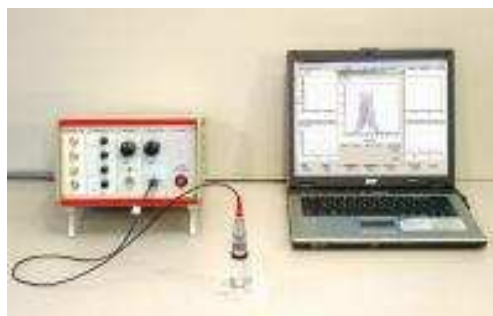
Les transducteurs ou (sondes ultrasonique) ont une boite en métal et sont imperméables a l'eau protégées sur la surface. Il ya deux mode d'utilisation des transducteurs ultrasonique.



Fig. II.12. Les Transducteurs ultrasonique

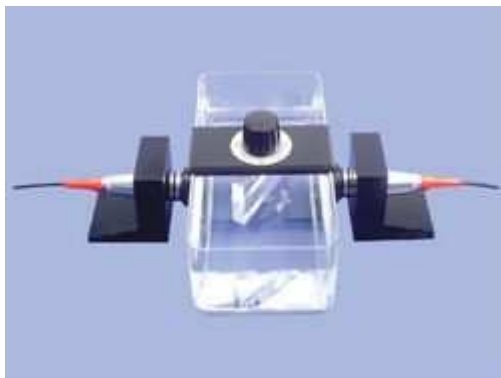
- 1. En mode Réflexion :

Un transducteur est utilisé comme un émetteur et récepteur aux meme temps comme ce contre.



- **2. En mode transmission :**

Dans ce mode, l'utilisation de deux transducteurs est une obligation un émetteur et l'autre comme récepteur.



CHAPITRE III. INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS.

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 générale et mécanique en particulier, parmi ces alliages ceux de la famille Al-Si

Ces de fonderie comme la teneur en silicium jusqu'aux limites des tolérances entre 9 et 10,5% se traduit par une bonne coulabilité et favorise le moulage, la présence du magnésium permet les traitements thermiques et diminue la densité de l'alliage, se sont des caractéristiques importantes pour le moulage des pièces à grande dimension et de géométrie complexe

Dans ce travail on s'intéresse aux différentes transformations de phase et l'évolution microstructurale produite par les différents traitements thermiques (trempe, vieillissement et revenu) de l'alliage d'aluminium AlSi7 ainsi que leur influence sur ses caractéristiques mécaniques en particulier.

III.2.Dureté.

Valeurs de la dureté $\langle HB \rangle$ de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg :

Tableau.III.1 : valeurs moyennes de la dureté $\langle HB \rangle$ des dix états

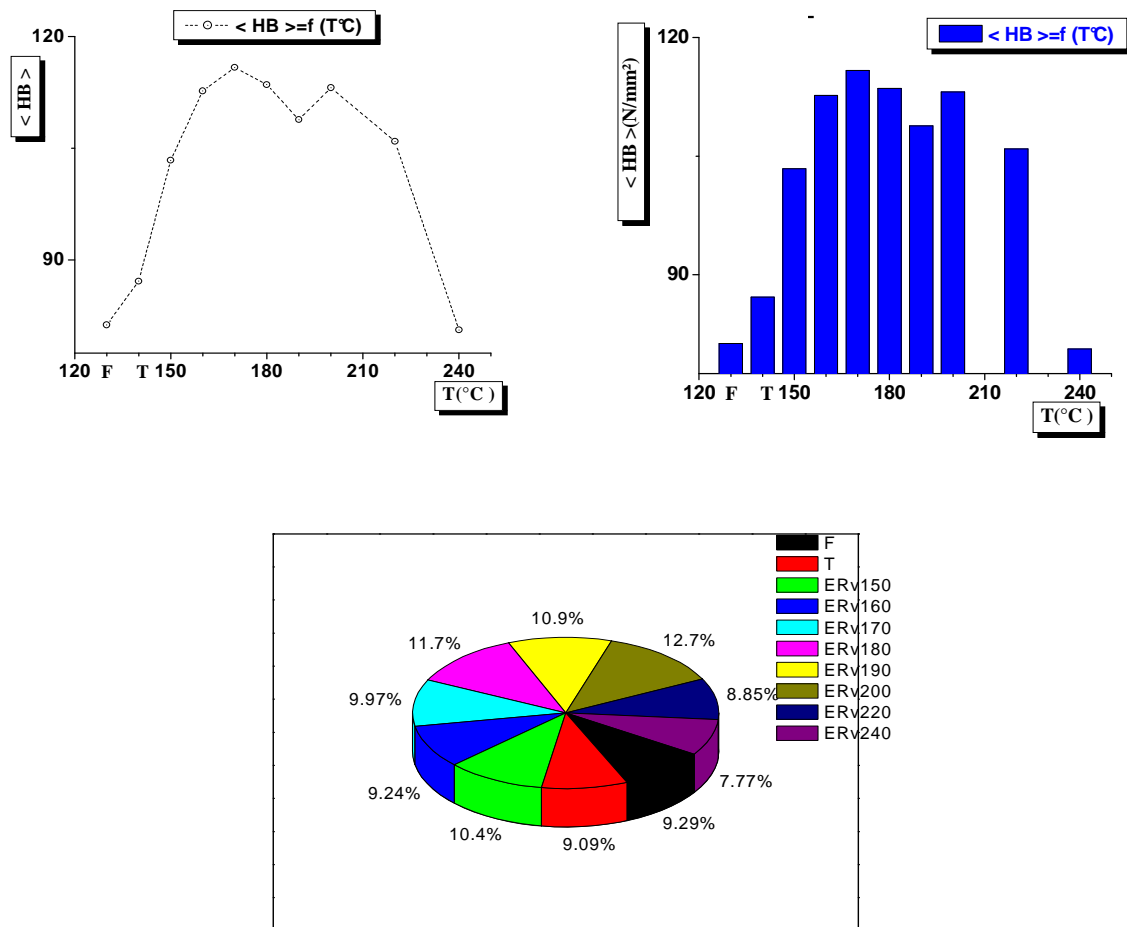


Figure. III.1 : Graphe, histogramme ($\langle HB \rangle$ - Températures de revenu) et secteur de la dureté moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg

III.3. Microdureté.

Tableau.III.2 : valeurs moyennes de la microdureté $\langle H_v0,1 \rangle$ des dix états.

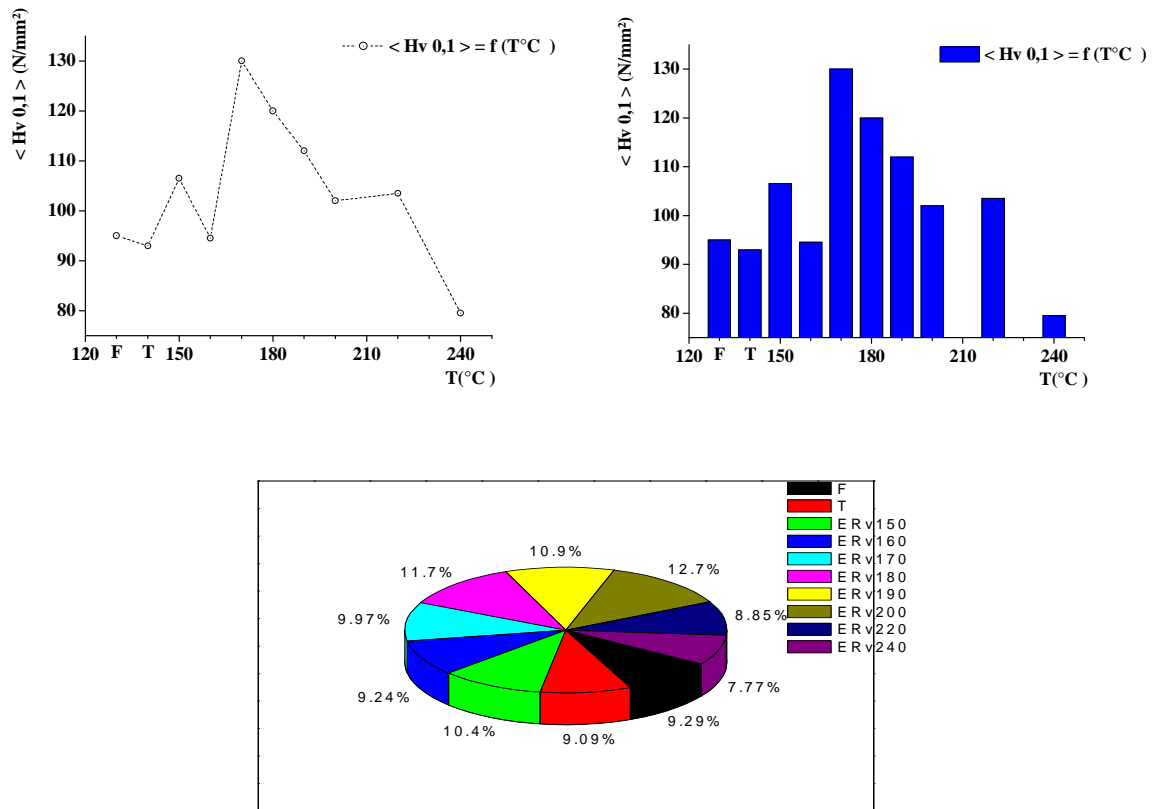


Figure. III.2 : Graphe, histogramme ($\langle H_v0,1 \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la **Zone blanche** de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

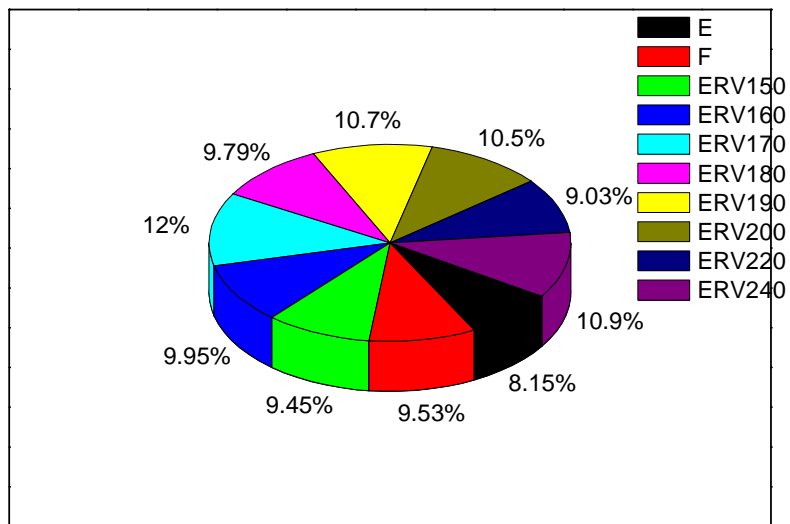
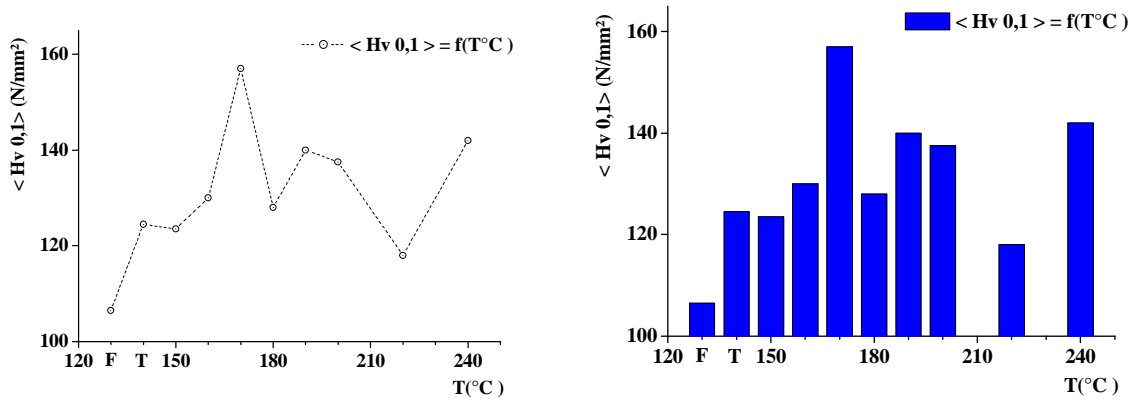


Figure. III.3 : Graphe, histogramme (< Hv0,1 > - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la **Zone noire** de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

III.3.1. Comparaisons entre les zones (blanche, et noire).

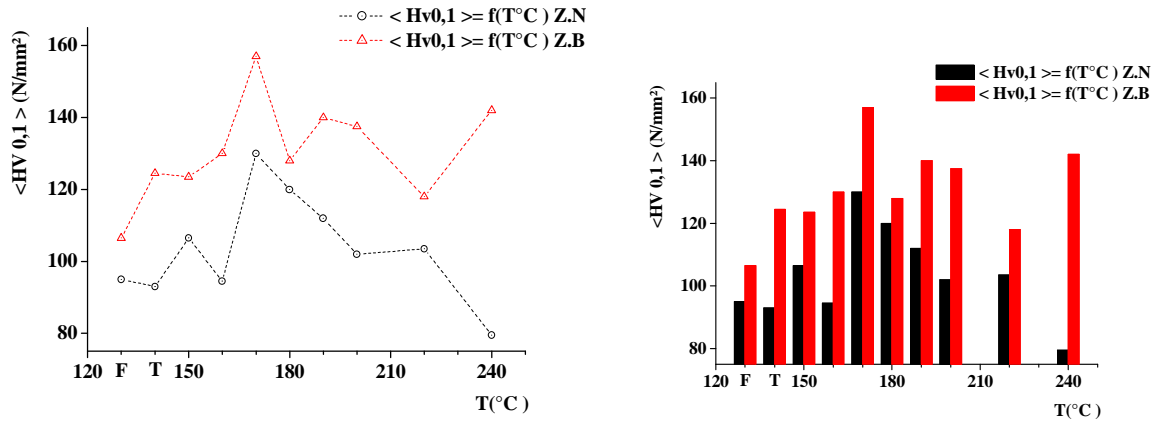


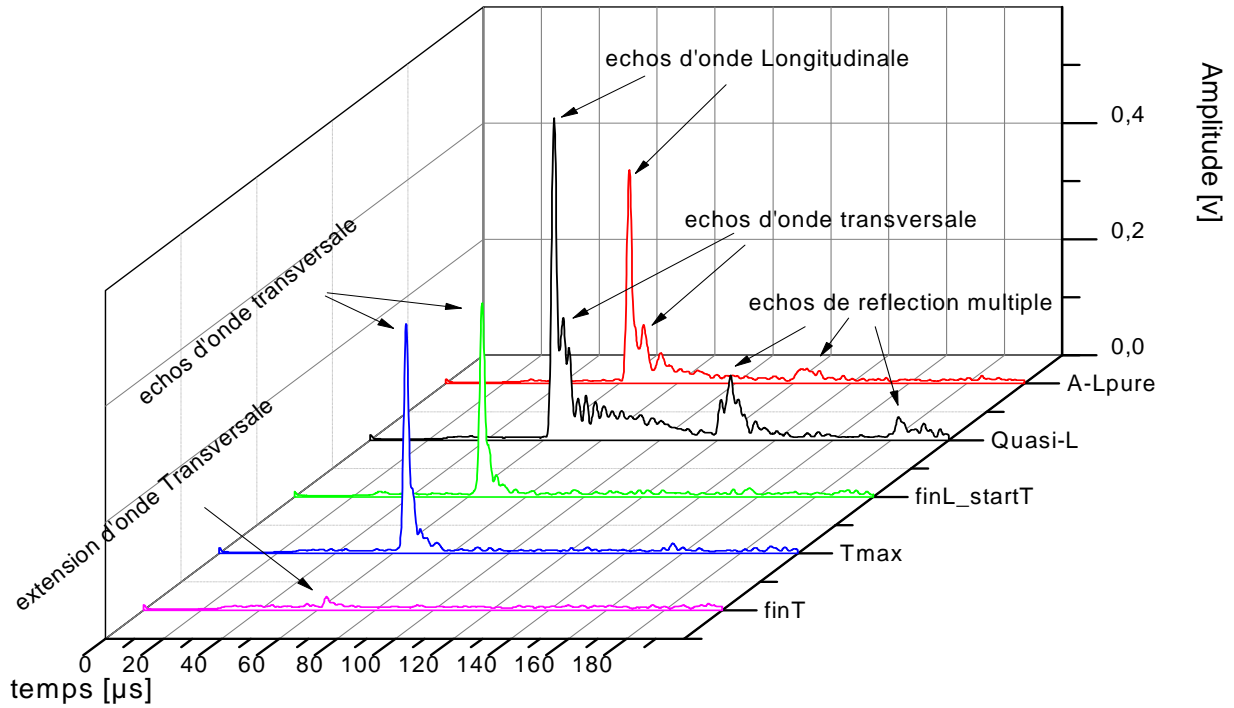
Figure. III.4 : Groupement de Graphes, histogrammes (<Hv0,1> - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la **Zone noire** et la **Zone Blanche** de l'alliage AlSi7Mg coulé en coquille.

Remarque.

Graphe, histogramme et secteur des (Hv0,1) moyennes, pour la zone blanche et zone D'après les résultats, nous concluons que la microdureté Hv0,1 dans le cas la zone noire est meilleure par rapport a la zone blanche se que montre la figures III-4.

III.4. Ultrason :

les mesures des vitesse des ondes ultrasonores donnent des résultats appréciables qualitativement et quantitativement sur le comportement des matériaux, ceci permet la mesure de différentes constantes caractéristique d'un matériau, a l'exemple du module de Young, des constantes de lamé du module de cisaillement, etc., le comportement de la vitesse de ondes peut fournir assez d'informations sur l'état mécanique et physique du matériau. La technique ultrasonore non destructive peut être un bon outil de caractérisation des matériaux.



Le graphe ci-contre représente les signaux d'amplitude conventionnelle pour la plaque d'aluminium.

Après extraction des mesures par Logiciel A-Scan vers un fichier DATA.TXT .Nous avons utilisé l'origine qui nous permis de représenter et analysé nos mesures.

Ici nous allons vous représenter un seul exemple de mesure .et après toutes les résultats vient d'être représentées dans un tableau.

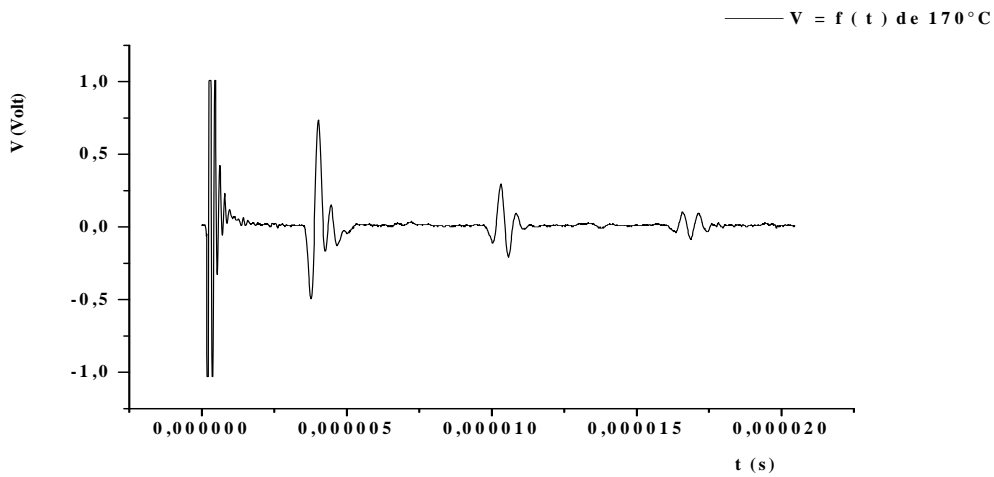


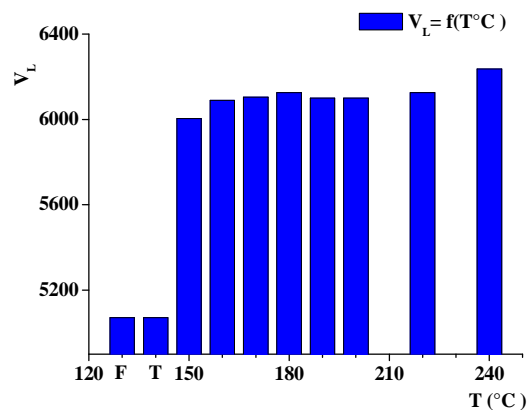
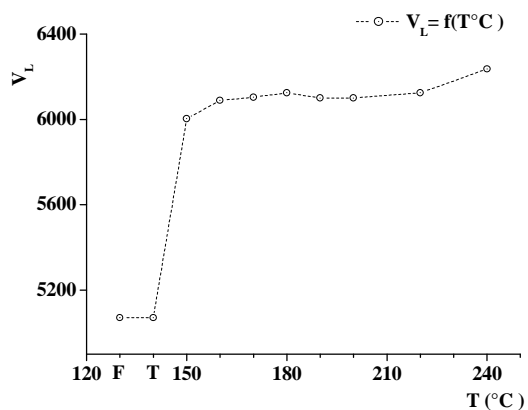
Figure. III.5 : Écho de l'essai sur la direction X=200mm.

Dans cet écho on peut extraire le temps longitudinale (t_L), et temps transversale (t_T), avec les quelles on calculera (V_L) et (V_T) à l'aide de la loi suivant : $V = \frac{d}{t}$.

- t est donnée en (μs) par l'écho.

III.4.1 valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la direction $X=200mm$.

Tableau.III.3 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la direction $X=200mm$ des dix états (F, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240) °C



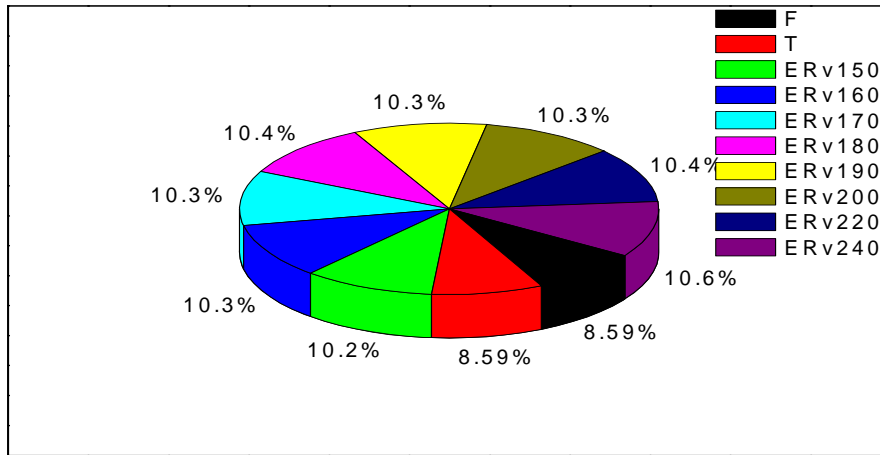
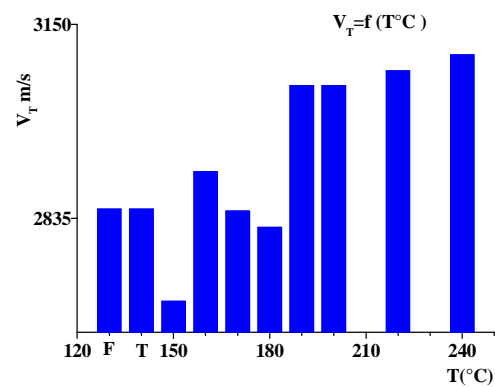
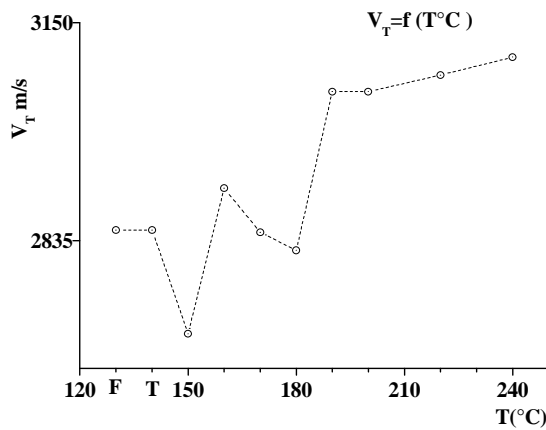


Figure. III.6 : Graphe, histogramme, ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de la vitesse longitudinale moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



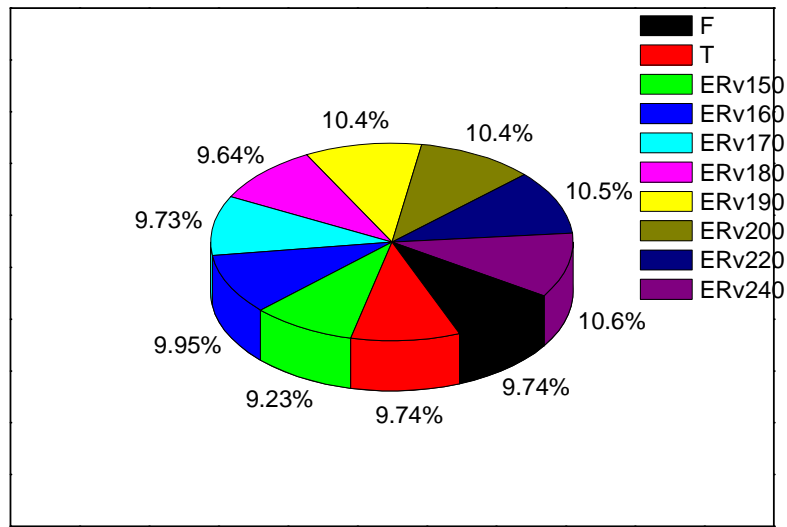
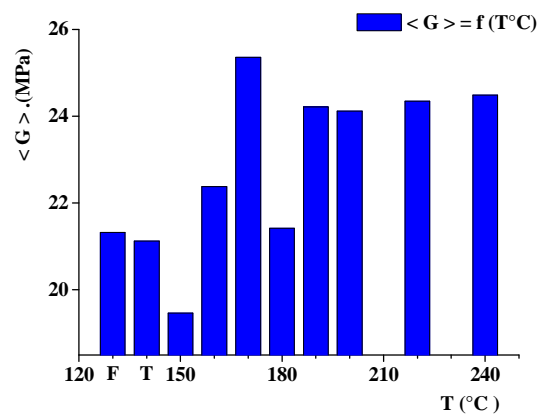
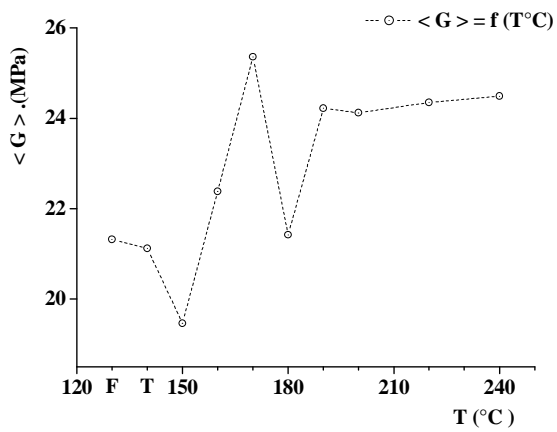


Figure. III.7 : Graphe, histogramme, ($\langle VT \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de la vitesse transversale des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



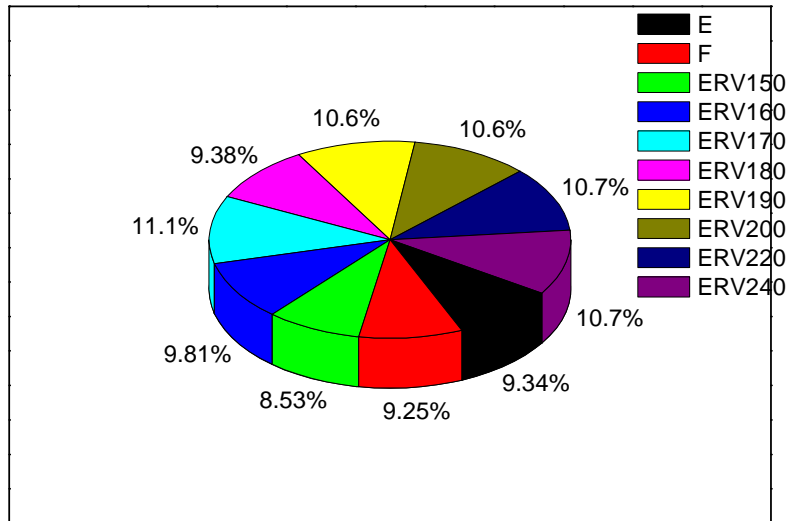
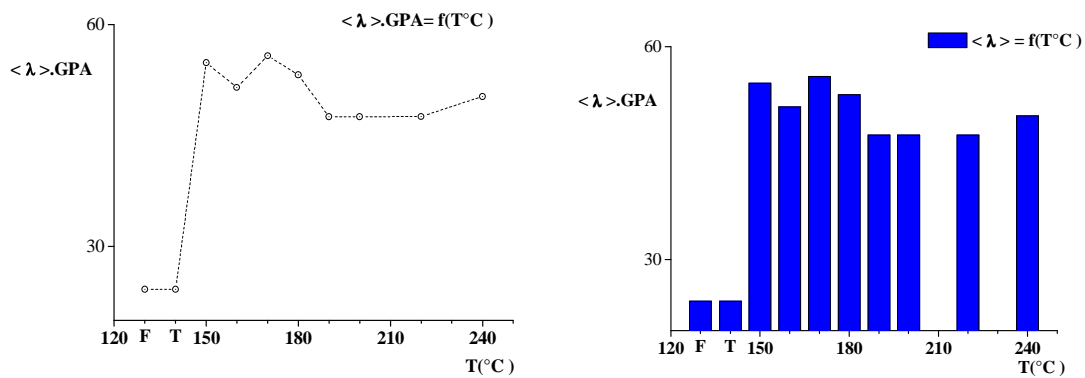


Figure. III.8 : Graphe, histogramme, ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur du module de cisaillement des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



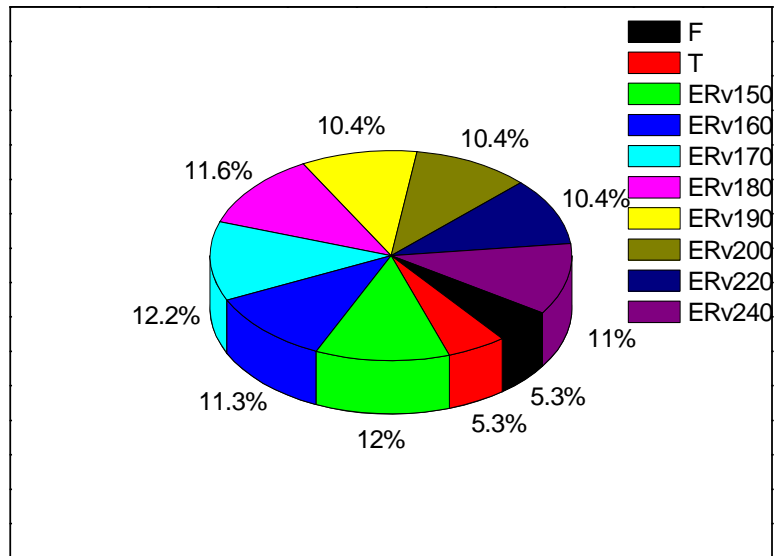
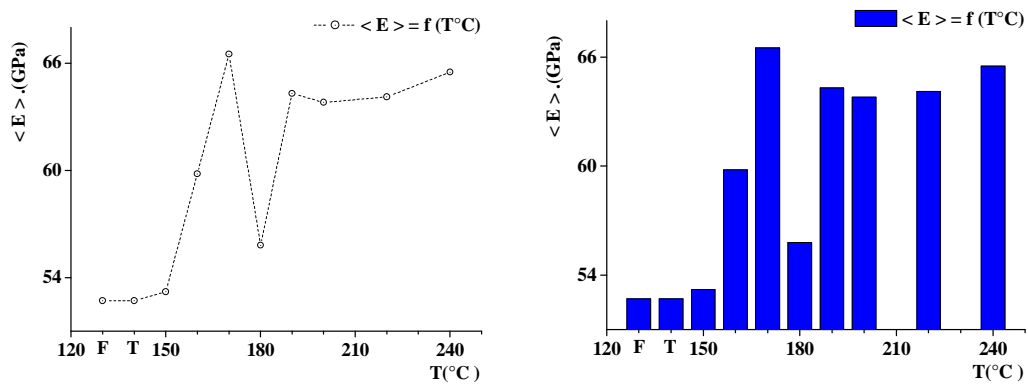


Figure. III.9 : Graphe, histogramme, ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu). Secteur du coefficient de lamé moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



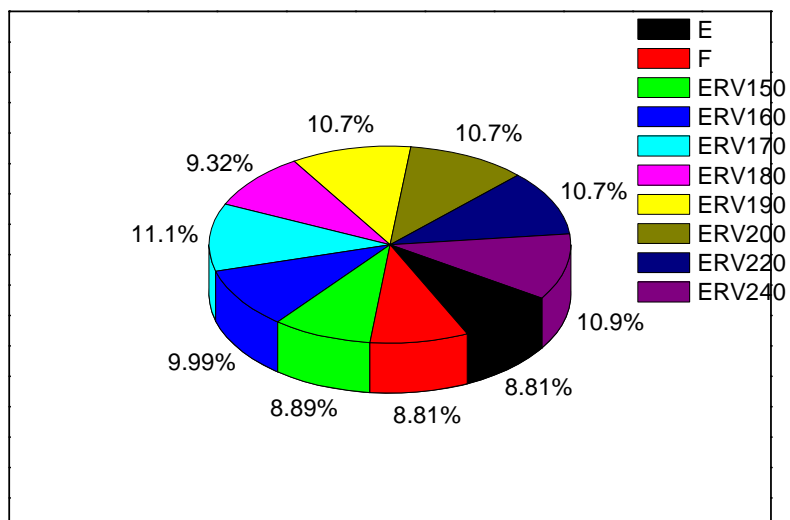


Figure. III.10 : Graphe, histogramme, ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur du module de Young moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

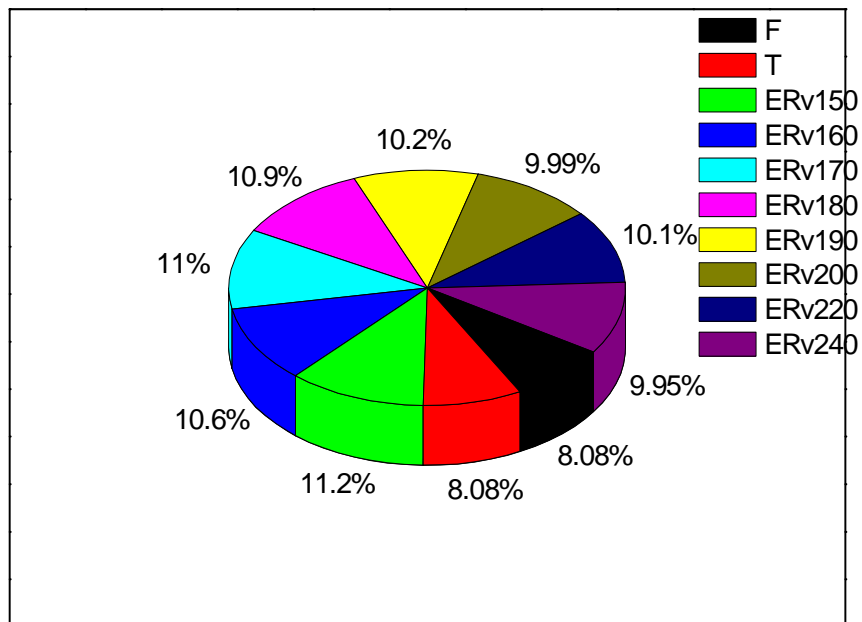
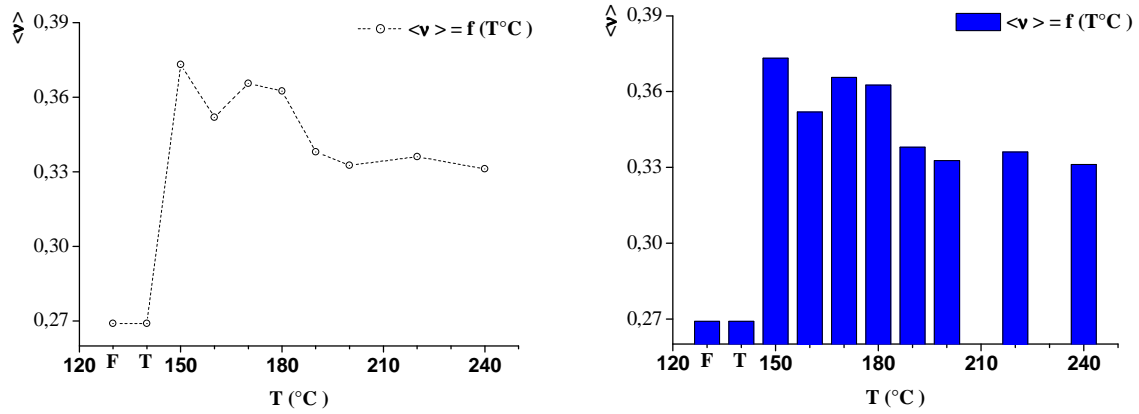


Figure. III.11 : Graphe, histogramme, $\langle v \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de coefficient de poisson des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

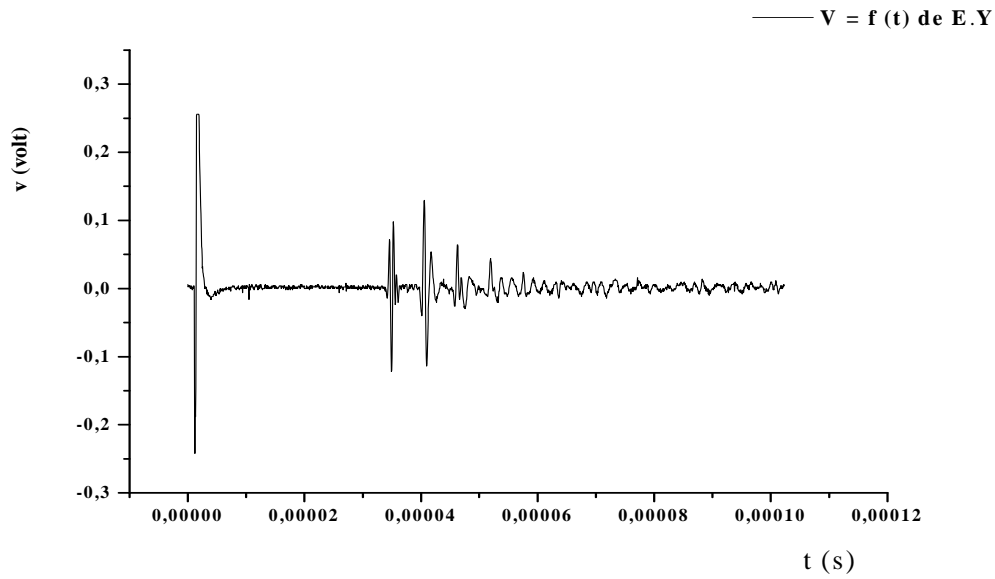


Figure. III.12 : Écho de l'essai sur la direction Y=150mm.

III.4.2 valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la direction Y=150mm.

Tableau.III.4 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques selon la direction **Y=150mm** des dix états (F, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240) °C.

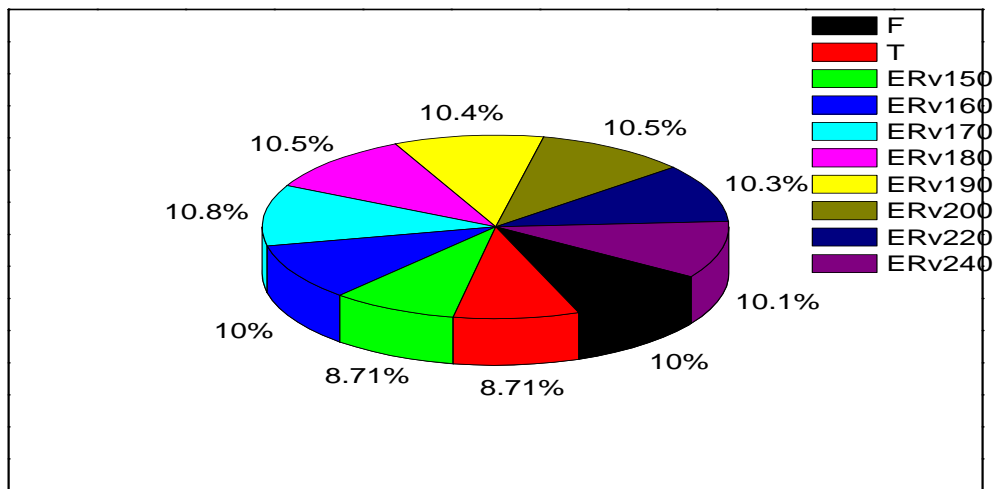
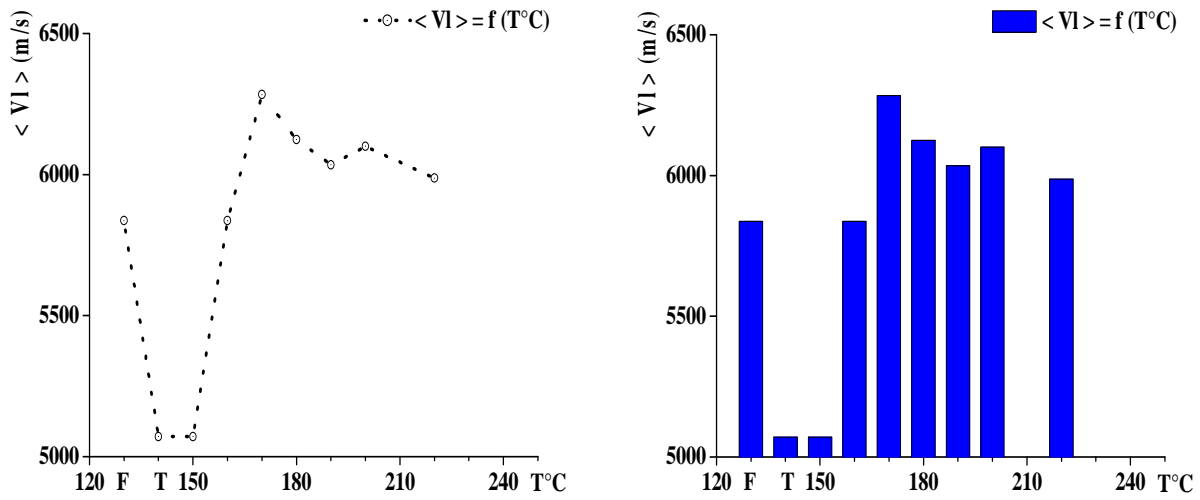


Figure. III.13 : Graphe, histogramme ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de la vitesse longitudinale moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

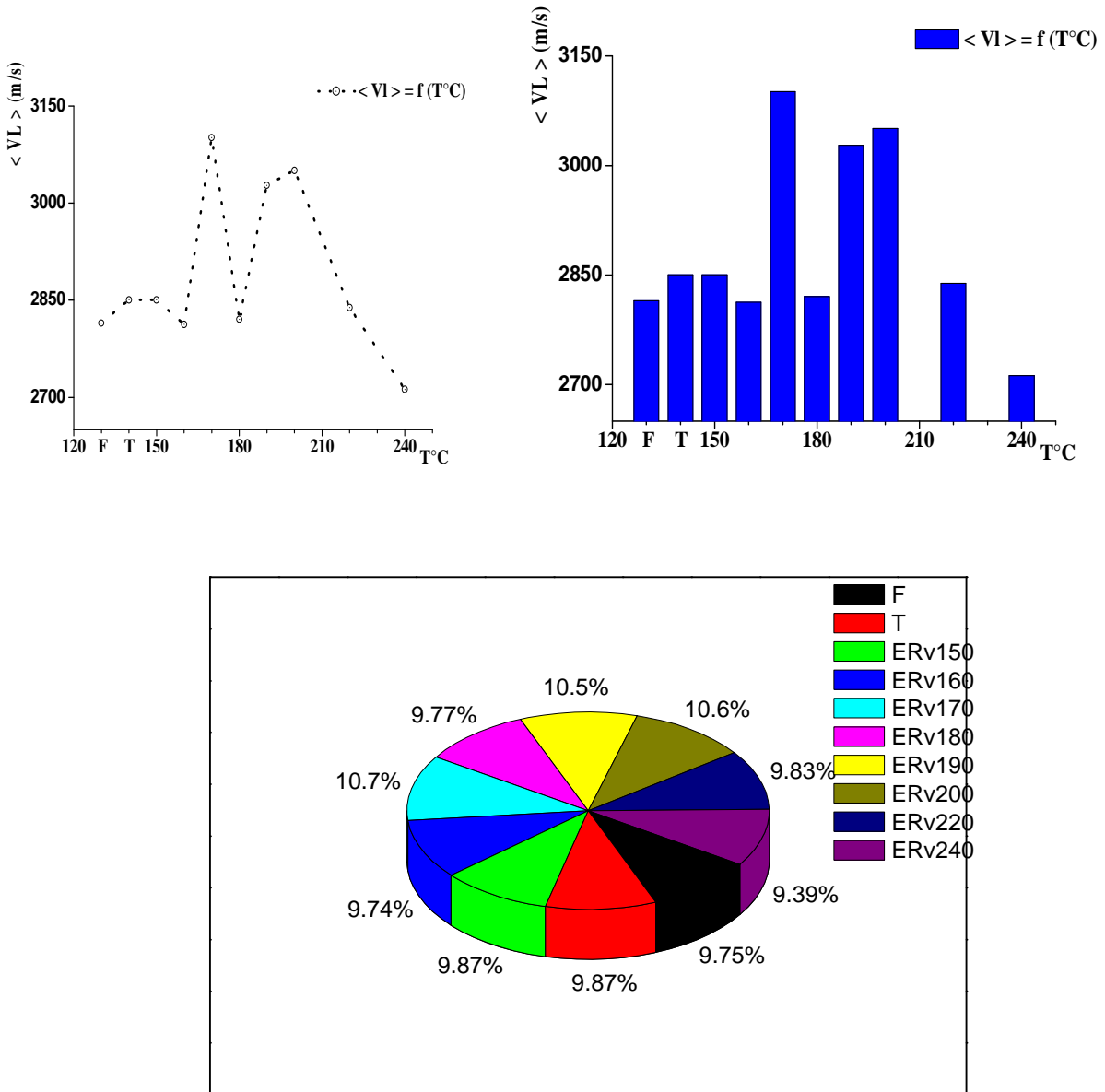


Figure. III.14 : Graphe, histogramme, Secteur ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de la vitesse transversale moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

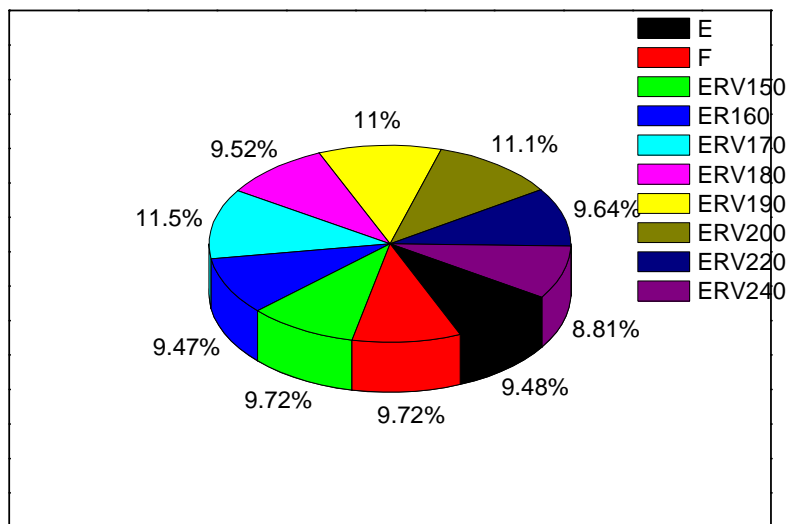
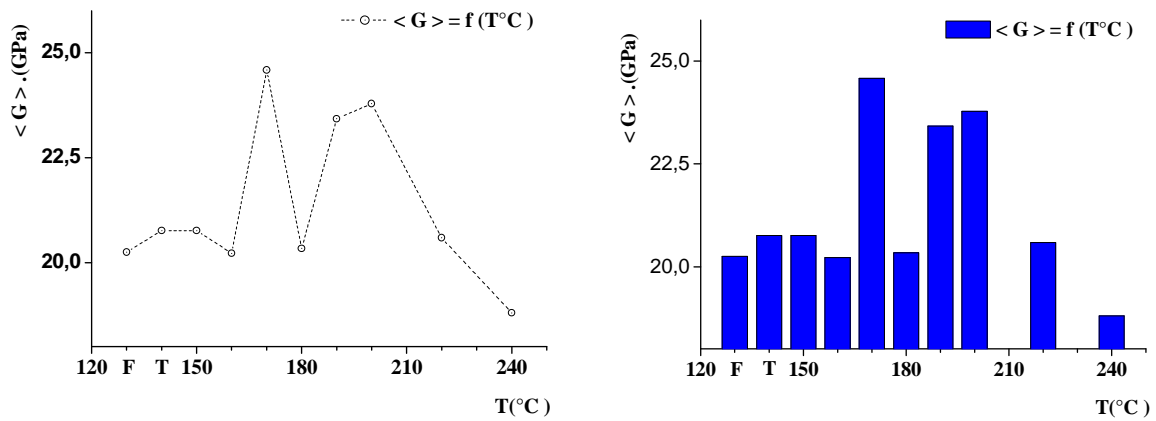


Figure. III.15 : Graphe, histogramme, ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu), et Secteur du module de cisaillement moyen de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

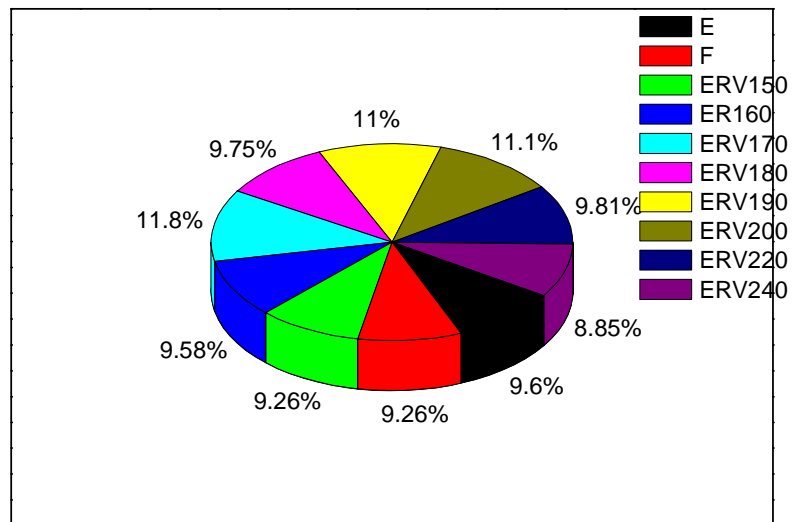
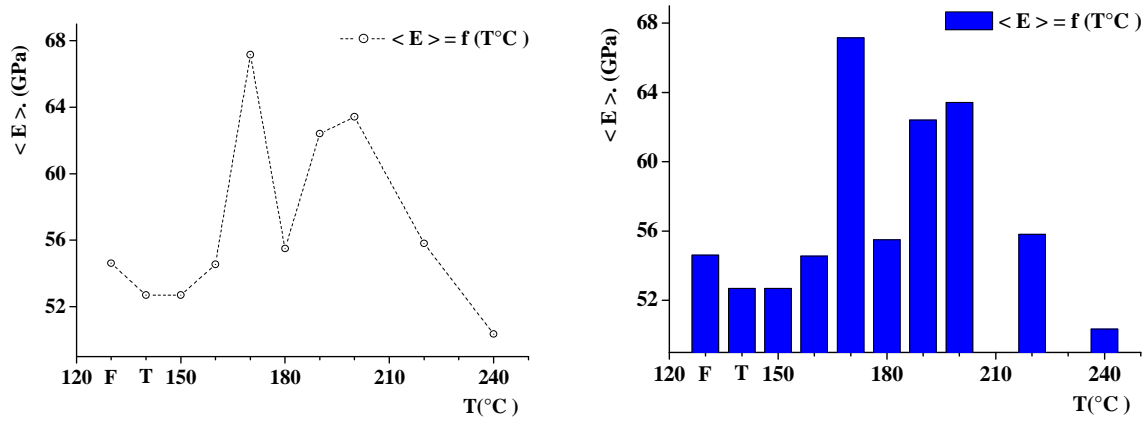


Figure. III.16 : Graphe, histogramme, ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur du module d' Young des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

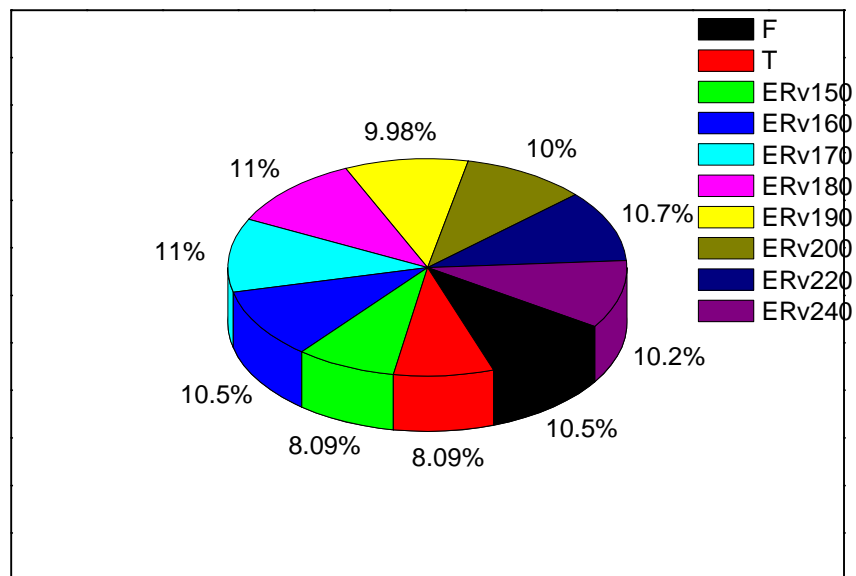
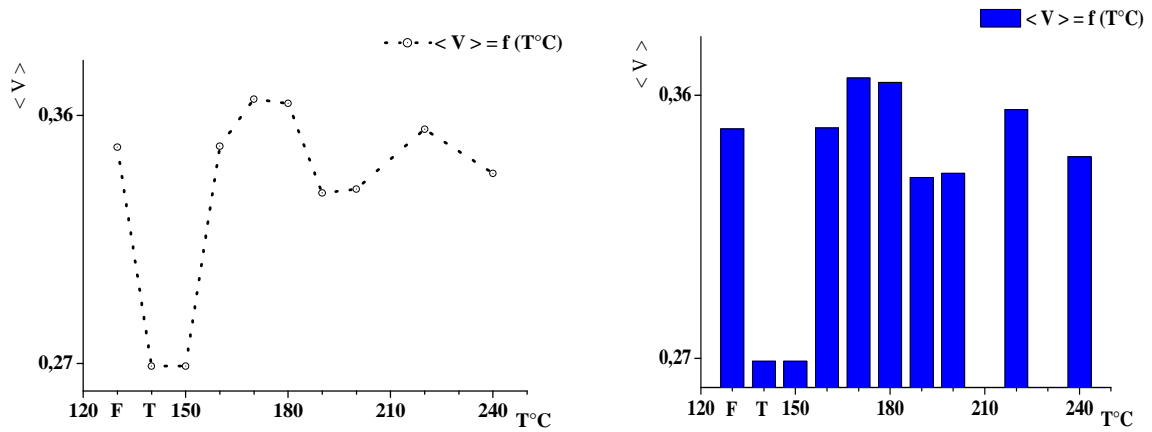


Figure. III.17 : Graphe, histogramme, ($\langle v \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de coefficient de poisson des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

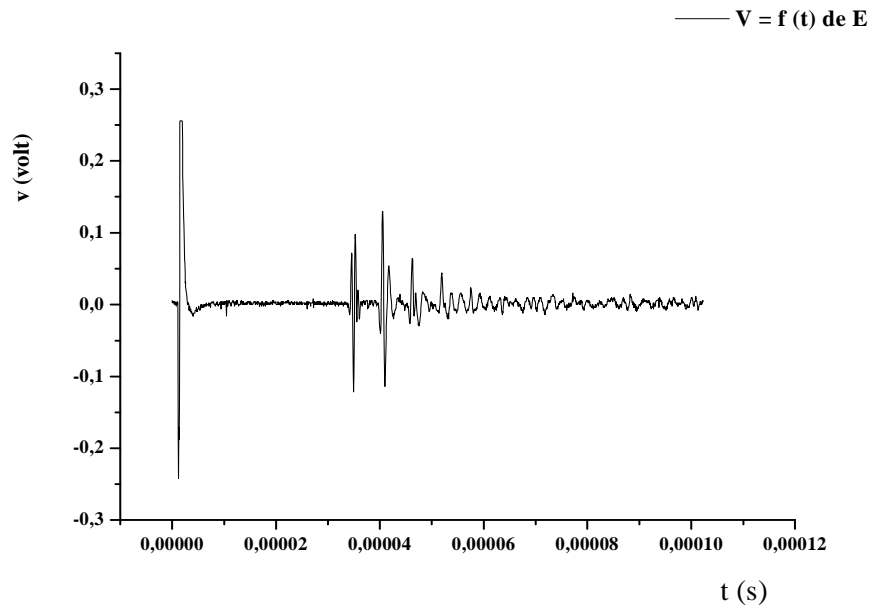
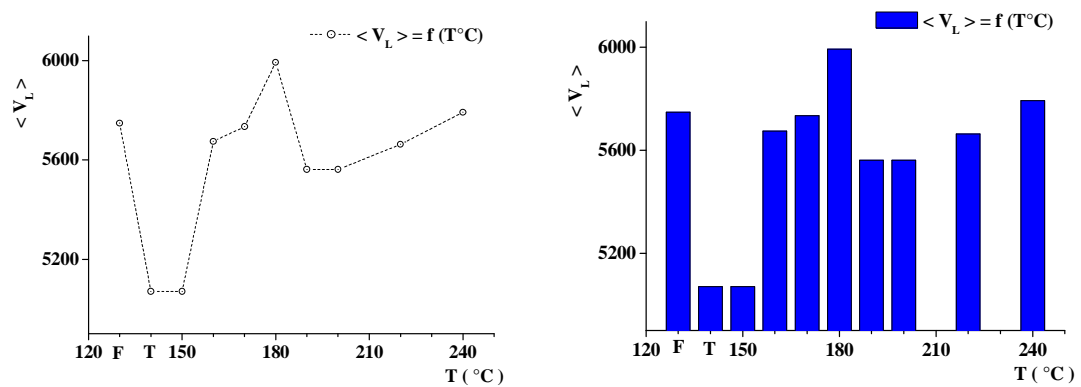


Figure. III.18 : Écho de l'essai sur la direction $Z=20\text{mm}$.

III.4.3 Valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg selon la redirection $Z=20\text{mm}$.

Tableau.III.5 : valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la direction $Z=20\text{mm}$ des dix états (E, T, 150, 160, 170, 180,190, 200, 220, 240).



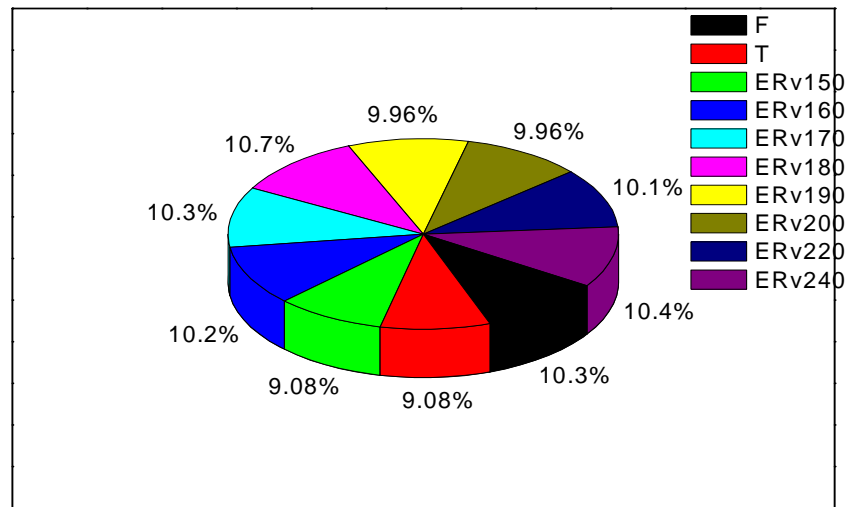
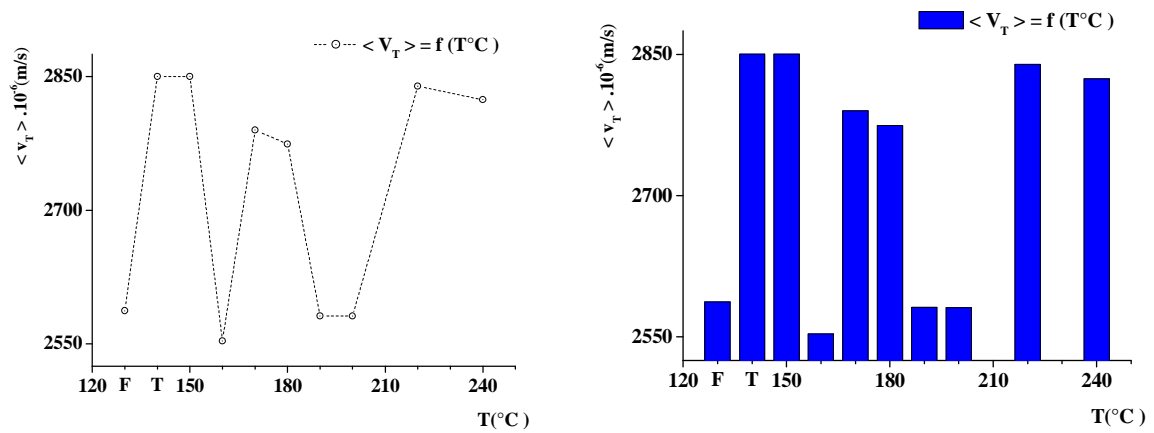


Figure. III.19 : Graphe, histogramme, ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de vitesse longitudinale moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



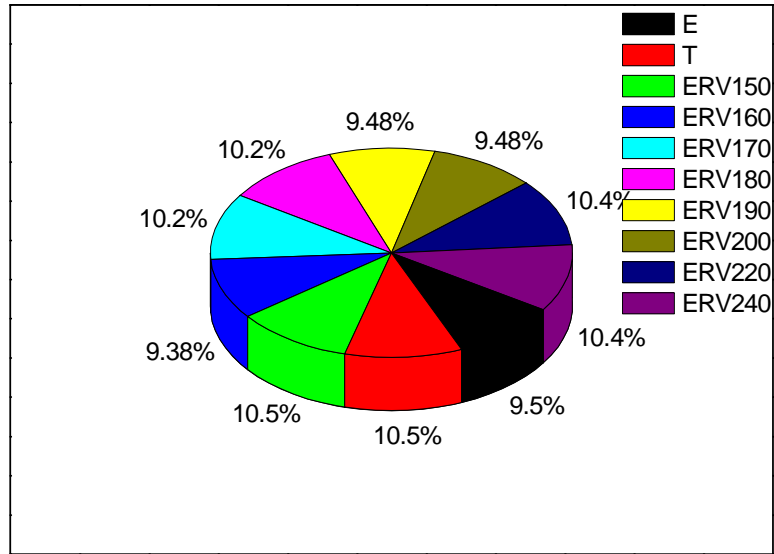
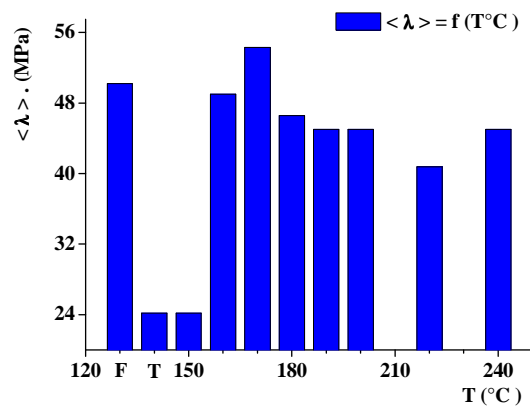
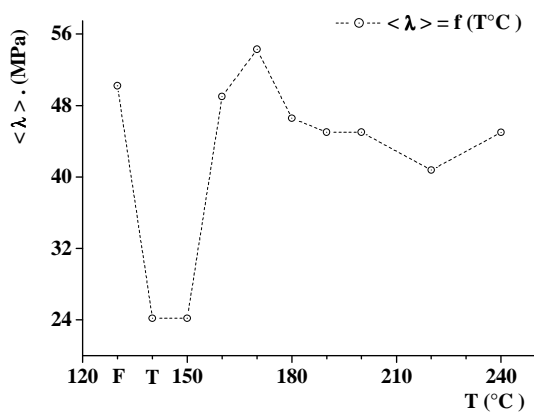


Figure. III.20 : Graphe, histogramme, ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur de la vitesse transversale moyenne des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



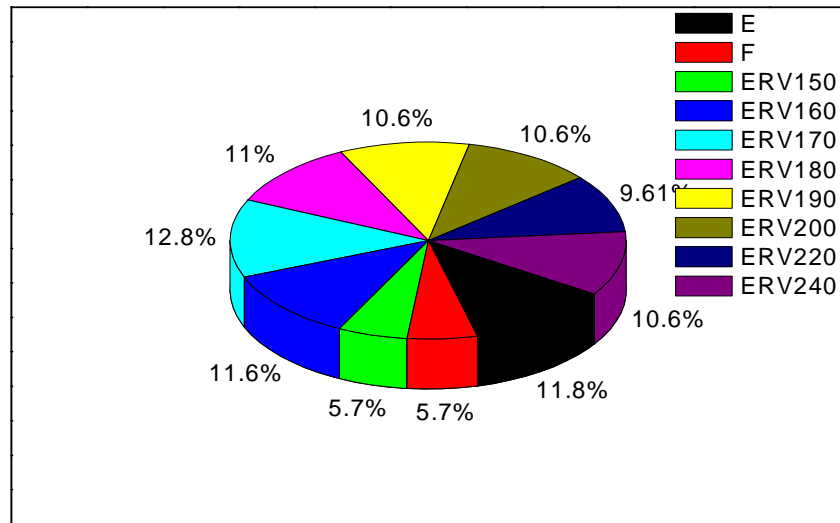
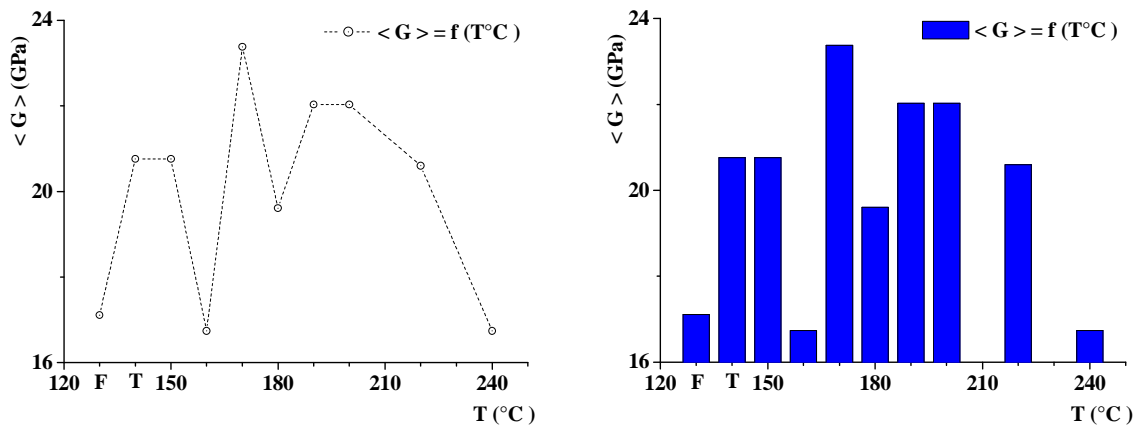


Figure. III.21 : Graphe, histogramme, ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur coefficient de lamé moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



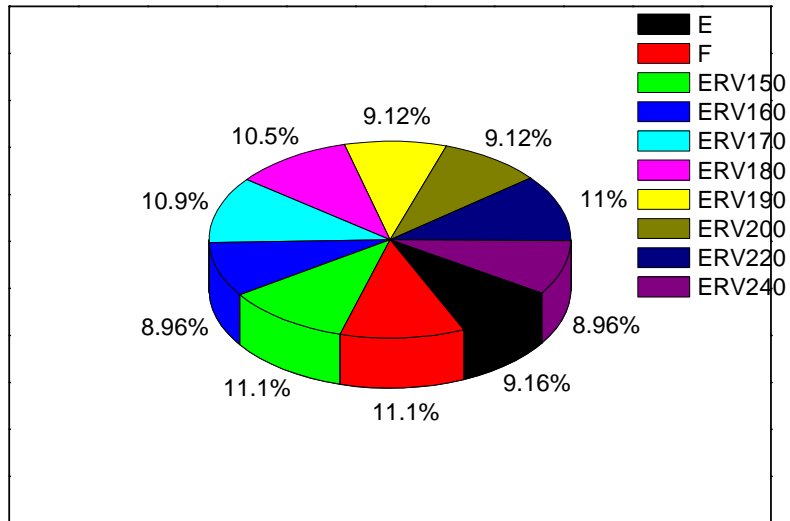
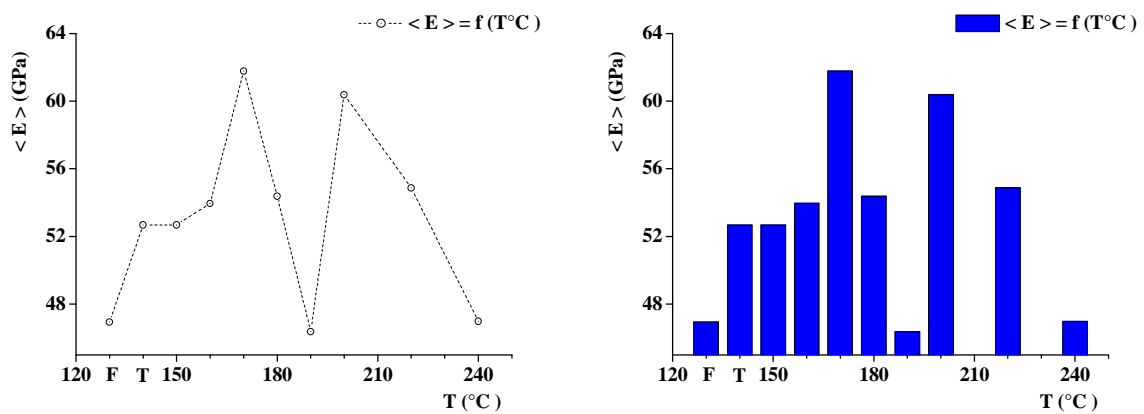


Figure. III.22 : Graphe, histogramme, ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur du module de cisaillement moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



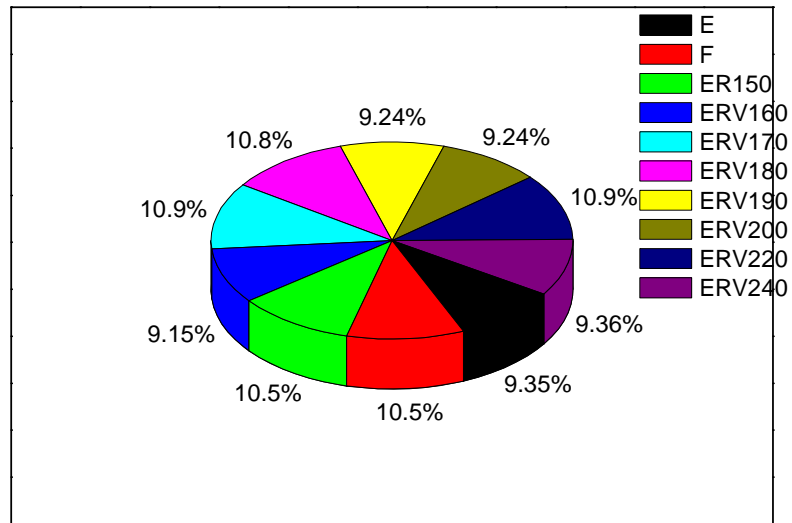
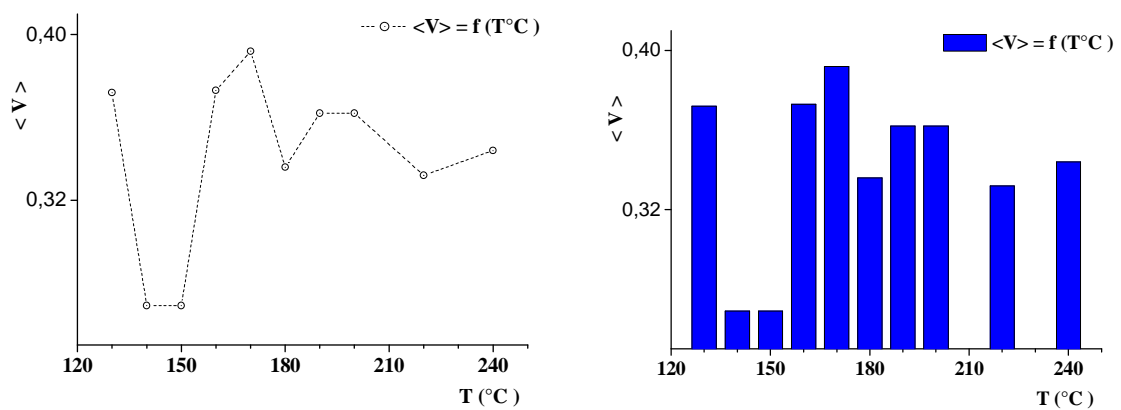


Figure. III.23 : Graphe, histogramme, ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur du module d'Young moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.



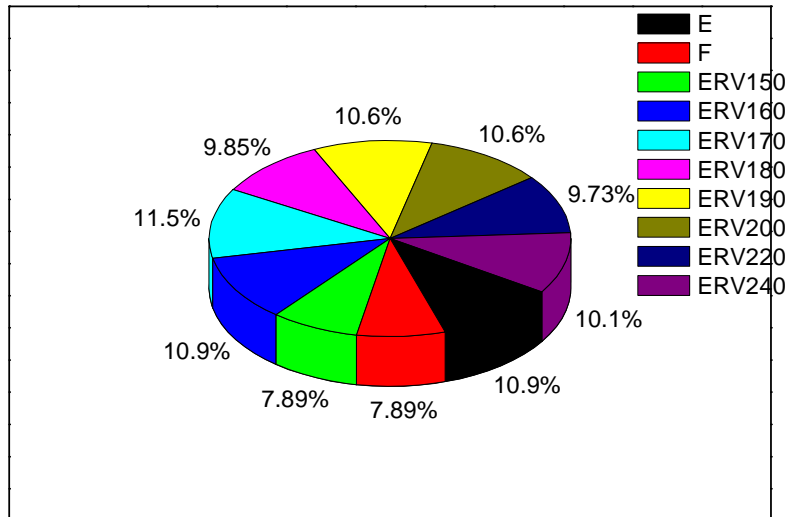


Figure. III.24 : Graphe, histogramme, ($\langle v \rangle$ - Températures de revenu) et Secteur coefficient de poisson moyen des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

III.4.4 Comparaison des trois directions selon (X, Y, Z).

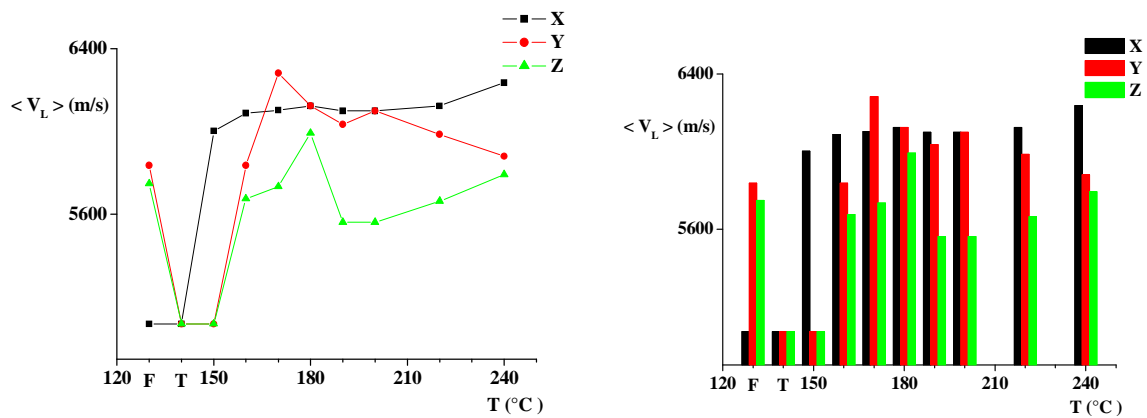


Figure. III.25 : Groupement de Graphes, histogrammes, ($\langle V_L \rangle$ - Températures de revenu) des vitesses longitudinale selon (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

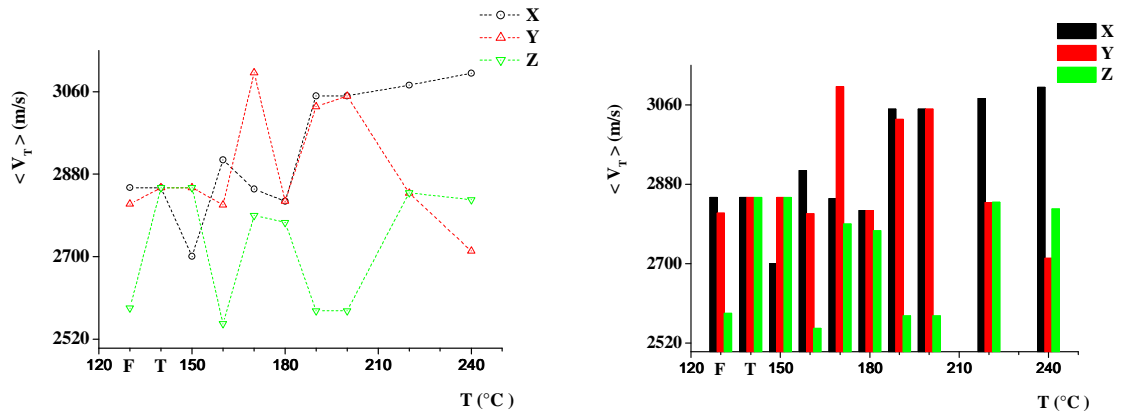


Figure. III.26 : Groupement de Graphes, histogrammes, ($\langle V_T \rangle$ - Températures de revenu) des vitesses transversale selon (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

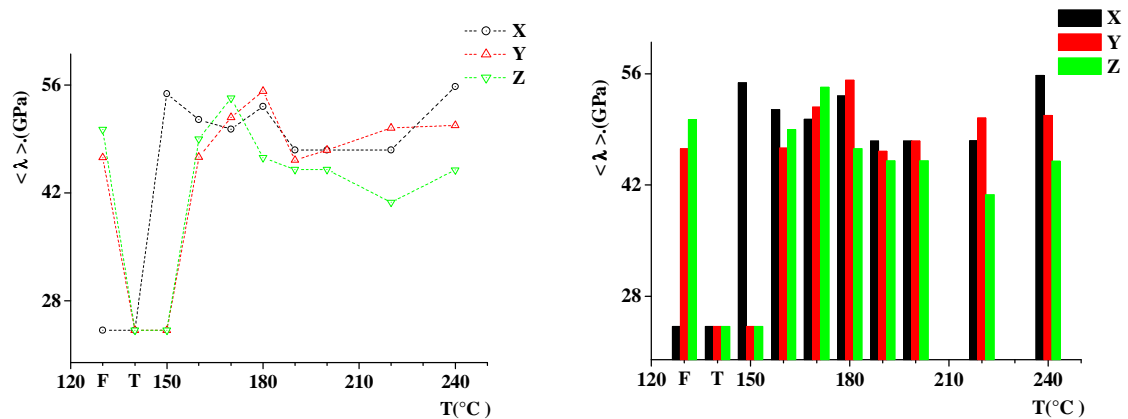


Figure. III.27 : Groupement de Graphes, histogrammes, ($\langle \lambda \rangle$ - Températures de revenu) des coefficients de lamé selon (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

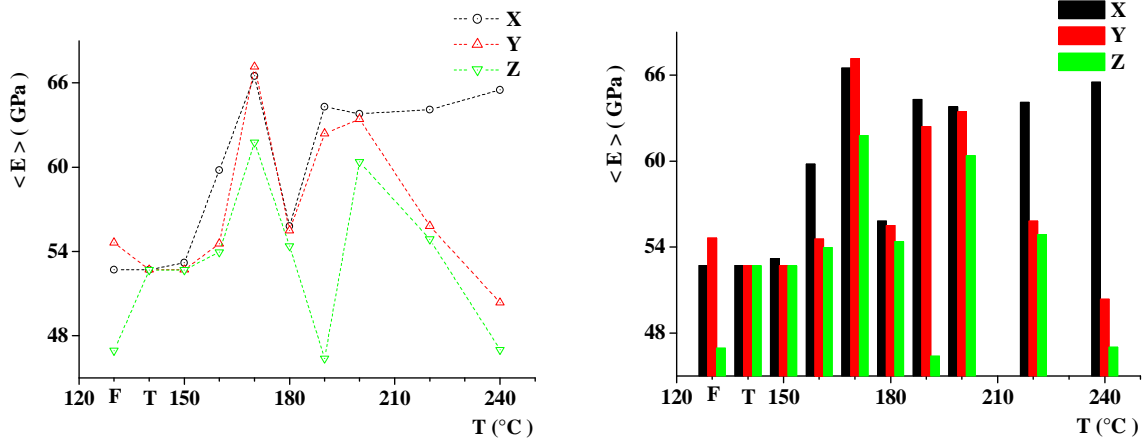


Figure. III.28 : Groupement de Graphes, histogrammes, ($\langle E \rangle$ - Températures de revenu) des modules d'Young moyens selon (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

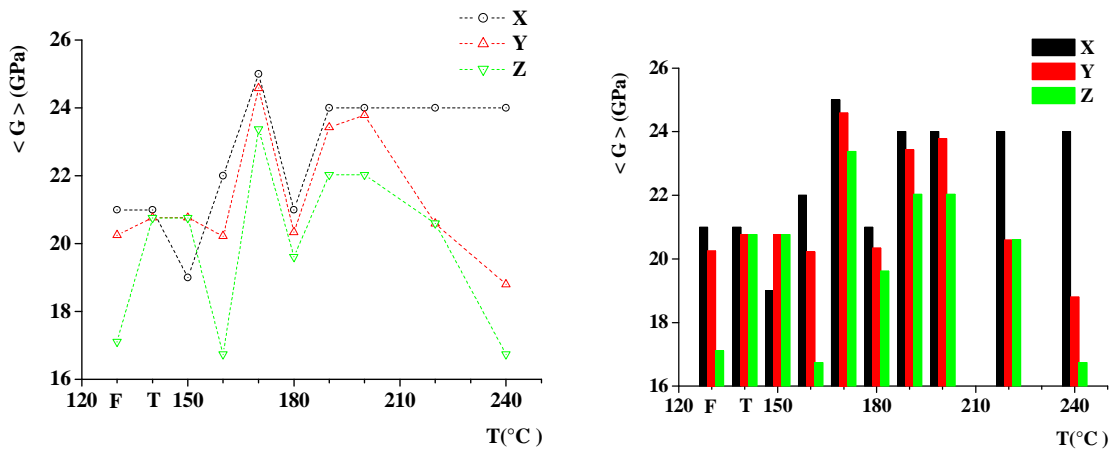


Figure. III.29 : Graphe, histogramme, ($\langle G \rangle$ - Températures de revenu) des modules des cisaillements (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

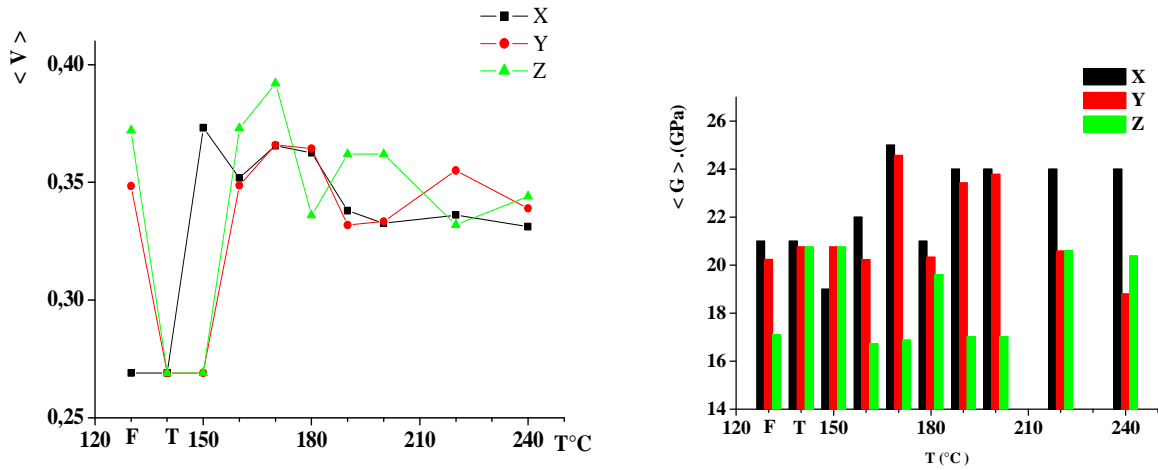


Figure. III.30 : Groupement de Graphe, histogramme, ($\langle \nu \rangle$ - Températures de revenu) des coefficients de poisson selon (X, Y, Z) des dix états de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

Remarque

D'après les résultats récoltés sur notre étude en déduit que il ya une certaines suite de direction des caractéristique mécanique de notre matériau AlSi7Zn3Cu2Mg ce qui nous mènent à dire que il est isotrope.

III.5 Effets des traitements thermiques sur la microstructure de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg.

L'étude métallographique est un moyen essentiel pour connaitre la structure micrographique des matériaux métalliques ; ces constituants micrographiques procurent aux métaux leurs différentes propriétés mécaniques.

Les métallographies obtenues sont prélevées à l'aide d'un microscope optique pour déterminer la structure et la texture granulaire du matériau étudié. On à obtenu les photos suivantes :

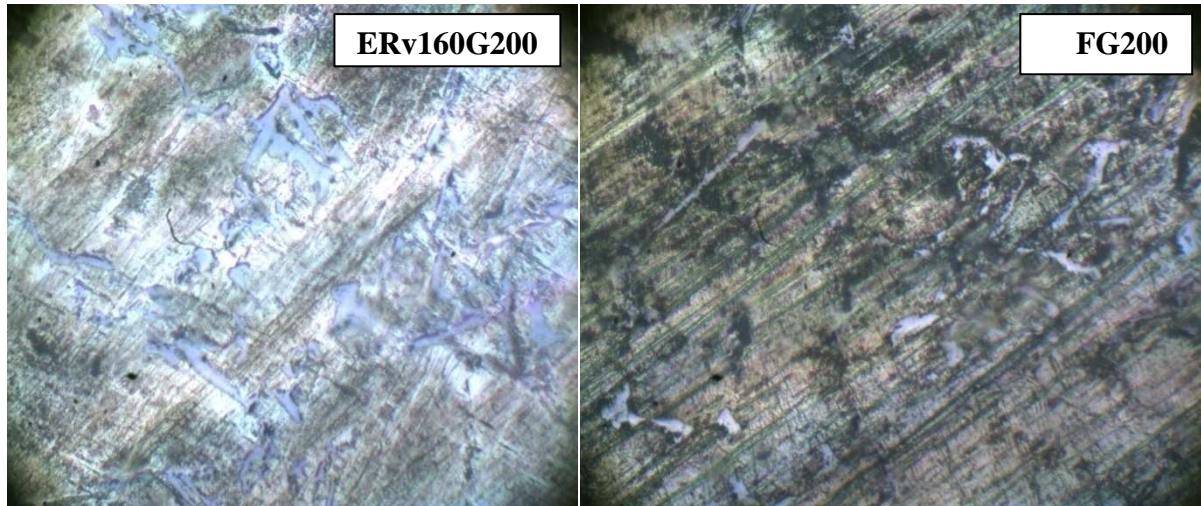


Figure. III.31 : Micrographie de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg à l'état brut de coulée et à la température de revenu 170°C avec un grandissement de 200 par microscope optique.

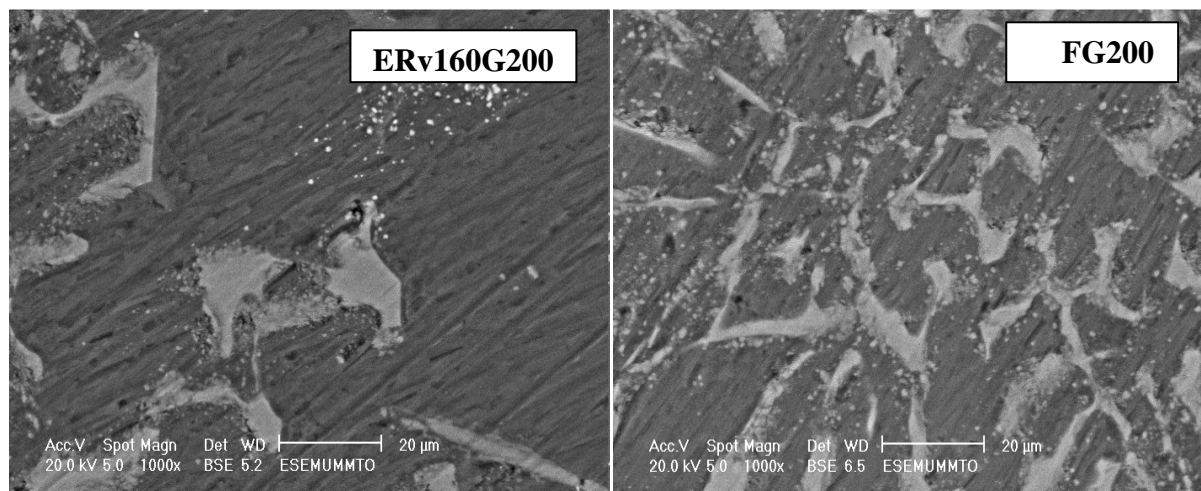


Figure. III.32 : Micrographie de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg. À l'état brut de coulée et à la température de revenu 170° avec un grandissement 20 (µm) par MEB.

III.5.1 Interprétation des microstructures :

La microstructure observé a l'aide du microscope optique a révélé la présence, de grains sombres de la solution solide Al-Si à l'intérieur des quels sont distribués anarchiquement des pores noires de petites tailles. Ces grains forment la matrice de l'alliage AlSi7Zn3Cu2Mg, des précipités clairs de la seconde phase sont disposés le long et sur les joints de grains.

Notre alliage à été coulé en mode coquille, vu les dimensions réduites de nos éprouvettes, le refroidissement est très rapide (trempe à l'eau), ce qui à donner une structure cristalline très fine et une répartition hétérogène des phases, tel qu'on voit sur la microstructure à l'état brut de coulée, on observe une eutectique fine avec des dendrites primaire d'aluminium en couleur clair, entouré par des fil très fin grise qui sont des cristaux de silicium. Ce qui confirme les bonnes propriétés mécaniques élèves.

La trempe à fait augmenté la dureté grâce aux contraintes résiduelles, qui résident dans le gradient thermique entre les différents couche de l'alliage au cours du refroidissement.

Après traitement de revenu on constate que la structure est devenue plus fine avec une répartition uniforme et homogène du matériau avec des dendrites primaires d'aluminium orienté parallèlement entourées par des particules grises qui sont des cristaux de silicium ce qui fait d'augmenter les caractéristiques mécanique de résistance.

III.5.2 Influence des traitements thermiques :

Le gradient thermique ce forme au cours du refroidissement de l'alliage dans le moule, le liquide qui sera en contacte directe avec les parois du moule auras une légère diminution rapide de température par rapport à cœur du volume, ce qui fait que la germination débute au niveau de toutes les parois du moule jusque au cœur, est si par la quand peut tirer le temps de solidification et aussi la taille des grains formés dans l'alliage.

La taille des grains influe considérablement sur les propriétés mécaniques de l'alliage.

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage 42100 A obtenues à l'état brut de coulée, on le soumet d'une part à un traitement thermique spécifique de durcissement structural.

Ce traitement thermique s'effectue en quatre étapes : température d'homogénéisation, trempe, maturation et variation des températures de revenu (150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240) °C

Il est connu que le traitement d'homogénéisation s'effectue à une température constante au-dessous de celle de l'eutectique pendant un temps bien déterminé. Cette température présente une grande influence sur les caractéristiques obtenues, pour accroître la résistance de l'alliage, on pourrait être tenté d'augmenter la température mais il faut éviter d'atteindre la température de brûlure à laquelle l'alliage commence à fondre localement et plus spécialement aux joints des grains. Cette fusion partielle se traduit par une décohésion fragilisant et l'émersion dans le milieu de trempe peut entraîner la naissance de criques aux joints de grains, d'où la nécessité du choix de cette température.

Les résultats obtenus dans ce présent travail peuvent être résumés comme suit :

- Température de chauffage et de mise en solution avec homogénéisation à de TH(500) ° C
Pour maintenir à la température ambiante la structure homogénéisée existante à des températures plus élevées, le traitement de trempe à l'eau est effectué à (20 -25) ° C.
- La trempe provoque à l'intérieur de l'alliage un champ de contraintes résiduelles constituées d'un système équilibré de compression en surfaces et de tension au cœur (augmentation de la dureté).
- Pour une répartition homogène de ce champ et l'uniformisation de la structure du matériau on a procédé aux vieillissements, la température et le temps de ces derniers sont choisis expérimentalement.
- Les vieillissements considérés provoquent d'une part la migration des éléments d'additions Si et Mg vers les dislocations, d'autre part la formation des précipités dans la matrice mère de l'alliage étudié, Ces deux phénomènes conduisent à l'augmentation des caractéristiques mécaniques pour le mode d'élaboration.
- Les propriétés mécaniques de l'alliage élaboré à l'état 170°C sont meilleures par rapport aux autres états. Cela est dû probablement au fait suivant : après refroidissement, lors de la trempe à l'eau et des différents vieillissements, on obtient une précipitation maximale.
- D'après les essais effectués sur notre matériau on constate que les caractéristiques mécaniques suivent presque la même direction ce qui nous mènent à dire que il est isotrope.

Finalement, nous recommandons la coulée avec la température d'homogénéisation notée : **TH500°C** suivie d'une maturation de 16h et d'un revenu à **170°C** pendant 20h pour des pièces de résistances mécaniques élevées.

Bibliographies.

[1] : *Encyclopédie Wikipédia.*

[2] : **J.philibert, A.vignes, Y. Bréchet, P. Combarde.** *Métallurgie du minerai du matériau, Edition MASSON (1998).*

[3] : **HAKEM** *Microstructure et propriété mécaniques de l'alliage hypoeutectique Al Si7 Mg U.M.M.T.O (2005).*

[4] : **B.Jouffery, G. Murry** *Technique de l'ingénieur Aluminium et alliages d'aluminium édition (2000).*

[5] : **Lakhtine** *Métallographique et traitements thermiques des métaux 4 ème édition Moscou (1986).*

[6] : **Jean PHILIBER, Alain VIGNES, Yves BRECHET** : *Métallurgie du mènerei aux matériaux Edition MOSSON, paris (1998).*

[7] : **M^r MAHIOUS Malek.** *Effet du mode d'élaboration et traitement thermique sur les caractéristiques mécanique et la microstructure de l'alliage hypo eutectique AlSi7Mg, U.M.M.T.O (2007-2008).*

[8] : **Pierre Guenin, technique de l'ingénieur** *Métallurgie des alliages de fonderie traité matériaux métallique, Duond-Afnor.paris (2000).*

[9] : **Roger Devaley , technique de l'ingénieur** : *traitement thermique : traitement de mise en solution-trempe-maturation et revenu Duond-Afnor.paris (2000).*

[10] : **Jean BARRALIS et Gérard MEADER**

Pièces – métallurgie élaboration, structure ; propriété, normalisation,

AFNOR NATHAN paris (2001).

[11] : **Jean BARRALIS et Gérard MEADER**

Pièces – métallurgie élaboration, structure ; propriété, normalisation,

AFNOR NATHAN paris (2001).

[12] : **MF.ASHBY and DRH.JONES,** *Matériaux, 2 Microstructure et mise en œuvre, DUNOD, p. 94-96, (1991).*

[13] : **P .Benoist et G .Martin.**

Modèle atomique de diffusion inter granulaire : Généralisation (1975)

[14] : **D. Allepohl .Un regard à l'interieur de l'aluminium**

Feldmeilen, suisse (1976).

[15] : M.Hugues.le durcissement structurale Dunod (1979).

Le contrôle non destructif par ultrasons

[16] : -Jean Perdijon, Hermes (1993).

Teste Ultrasonique pour Matériuax :

[17]: -Josef Krautkraemer, Herbert Krautkraemer, Ed.4, Springer, (1990).

Le contrôle non destructif

[18]: -Jack Blitz et Geoff Simpson, Chapman et Hall (1996).

Conclusion générale

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'étude de l'influence des traitements thermiques par variation de températures de revenu par incrément de (10 et 20)°C sur l'évolution des caractéristiques élastiques, de dureté, microdureté et structurale de l'alliage de fonderie **AlSi7Zn3Cu2Mg** coulé en coquille par gravitation. Ces caractéristiques élastiques sont déterminées par la méthode ultrasoniques par contre les caractéristique de dureté, de microdureté et structurale, sont évaluées par les méthodes non destructif.

Le but de ce travail est d'étudier l'aptitude au durcissement structural de l'alliage **AlSi7Zn3Cu2Mg** en considérant dix états : F : brut de coulée : pris comme état de référence. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques obtenues à l'état brut de coulée on est amené à un traitement thermique de durcissement structural, l'addition de magnésium est nécessaire pour rendre l'alliage sensible à ce traitement thermique qui s'effectue en quatre étapes :

Traitement de mise en solution suivi d'une homogénéisation qui se fait dans un four de trempe à une température(500) °C et d'un maintien de 8h, suivi immédiatement d'une trempe à l'eau avec des températures ambiantes de(20 – 25)°C, d'une maturation de 17h à l'air ambiante et de différent revenus à des températures respectivement de (150,160,170,180,190,200,220 et240)°C pendant 20h dans un four de revenu et d'un refroidissement dans le four .

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus nous montrent :

- Les recuits considérés provoquent la mise en solution et l'homogénéisation permet une diffusion rapide des éléments de soluté Si et Zn dans la matrice mère. Ce phénomène conduit à l'élévation des caractéristiques de résistances de ce mode d'élaboration,
- La trempe provoque à l'intérieur de l'alliage un champ de contraintes résiduelles constituées d'un système équilibré de compression en surfaces et de tension au cœur (augmentation de la dureté) avec une précipitation moyenne de si,
- La maturation et le revenu provoquent respectivement la précipitation optimale des éléments d'addition Si dans la matrice de l'aluminium formant ainsi des précipités grossiers et fins ce qui peut expliquer l'augmentation des caractéristiques mécaniques de ce mode d'élaboration,
- Les propriétés mécaniques de l'alliage par refroidissement rapide sont meilleures par rapport à celles de l'alliage par refroidissement lent ; cela est dû au fait qu'après solidification lors de refroidissement rapide la structure de l'alliage est plus fine à celle obtenue par refroidissement lent,
- Résultats du compromis obtenu : Pour les pièces de résistances mécaniques élevées, nos recommandations sont les suivantes selon :

- Les traitements thermiques effectués, quels que soient les états considérés, on peut recommander l'état **ERv170°C**.

- D'une manière générale les mesures des vitesses des ondes ultrasonores donnent des résultats appréciables qualitativement et quantitativement sur le comportement des matériaux, ceci permet la mesure de différentes constantes caractéristiques d'un matériau, à l'exemple du module de Young, des constantes de Lamé du module de cisaillement, etc., le comportement de la vitesse des ondes peut fournir assez d'informations sur l'état mécanique et physique du matériau. La technique ultrasonore non destructive peut être un bon outil de caractérisation des matériaux.