

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

UNIVERSITÉ CHADLI BENDJEDID EL TARF



جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

# MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIÈRE

FILIÈRE : Physique

OPTION : Physique des Matériaux

## Thème

*Contribution à l'étude microstructurale des Alliages Al-Zn-Mg  
élaborés par fusion HF*

Présenté par :  
Haouili Manar

Dirigé par :  
Dr. Lamrous Douniazed

### Jury de soutenance :

Bensebaa Zohra	Président	MCB	Université -El Tarf
Lamrous Douniazed	Rapporteur	MCB	Université -El Tarf
Arroussi soumia	Examineur	MCB	Université -El Tarf

Année Universitaire : 2021/2022

*« Nous souhaitons la vérité, et ne  
trouvons en nous qu'incertitude »*

*Blaise Pascal*

# Dédicace

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect :  
mon cher père **Mohamed**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et  
qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse:  
mon adorable mère **Cheloufi Hayatte**.*

*A vous mes chers frères (**chamsseeddine , fateh , abderrahmane**) et ma chère sœur (**douha**).  
Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes tantes (**Zahia , Souad , Salima**) et particulièrement ma tante **Anisa** qui m'a toujours  
soutenue de près et de loin par ses conseils et ses encouragements . Que Dieu leur donne une  
longue et joyeuse vie.*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.*

*Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*

*A tous les membres de ma promotion 2021/2022 et Tous mes enseignants du département de  
physique*

*Je dédie ce modeste travail*

# Remerciement

*Avant tout, je remercie **DIEU** le tout puissant, de m'avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaire pour la réalisation de ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur **Dr. Lamrous Douniazed**, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de ses connaissances. Grâce aussi à sa confiance, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions, et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Il fut d'une aide très précieuse dans les moments les plus délicats.*

*La partie expérimentale de ce mémoire a été réalisée au sein de Laboratoire de Magnétisme et spectroscopie des solides (LM2S), équipe : Caractérisation des Matériaux Métalliques Métastables (ECA3M) de l'université Badji Mokhtar Annaba. Je tiens à remercier **Professeur M.Y. DEBILI** de m'avoir assuré l'élaboration de mon alliage.*

*Les caractérisations microscopiques ainsi que les mesures de microdureté ont été réalisées à l'école Nationale Supérieure des mines et de la métallurgie (ENSSM) Annaba. Je tiens à remercier les membres de l'administration et du laboratoire de cette école.*

*Je remercie également monsieur **Khammaci Foaed**, Ingénieur au laboratoire LM2S de l'Université Badji Mokhtar Annaba, pour la caractérisation par diffraction des rayons X.*

*Il m'est tout à fait agréable d'exprimer ma profonde gratitude à **Madame Bensbaa Zohra**, Docteur à l'université Chadli **Bendjeddid El Tarf**, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire de Master.*

*Mes sincères remerciements vont à **Madame Arrouci soumia**, Docteur en physique à l'université Chadli Bendjeddid El Tarf, d'avoir accepté examiner mon travail.*

*Je désire aussi remercier les enseignants et le cadre administratif de département de physique à l'université Chadli Bendjeddid, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.*

*Sincères remerciements*

# Résumé

Le présent travail a pour objectif d'étudier la microstructure de l'alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg brut élaboré par fusion haute fréquence (HF) sous induction électromagnétique. Pour cela, plusieurs méthodes d'analyses ont été employées dans cette investigation: Microscopie optique (M.O), Microscopie électronique à balayage (MEB), Diffraction des rayons X (DRX) et mesure de microdureté Vickers.

La microstructure observée par microscopie optique a montré une structure dendritique ramifiée en branches secondaires. L'espace interdendritique est occupé par la ségrégation d'une précipitation révélée par microscopie électronique à balayage. Quatre phases ont été également observées : matrice  $\alpha$ -Al, eutectique en contraste blanc et précipités de forme sphérique en contraste clair et sombre. La diffraction des rayons-X, nous a permis de confirmer et révéler les phases présentes dans l'alliage étudié :  $\alpha$ -Al,  $Mg_{51}Zn_{19,84}$ ,  $Mg_2Zn_{11}$  et la phase  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ . La microdureté Vickers a été également mesurée et comparée avec d'autres alliages binaires et ternaires. La valeur la plus élevée a été obtenue dans notre alliage.

**Mots clés :** Microstructure, Alliages Al-Zn-Mg, Fusion HF, Microscopies, DRX, .Microdurté.

# *Abstract*

The present work aims to study the microstructure of the as-cast Al-50%Zn-5%Mg ternary alloy produced by high frequency (HF) melting under electromagnetic induction. For this, several analytical methods were used in this investigation: Optical Microscopy (M.O), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD) and Vickers microhardness measurement .

The microstructure observed by optical microscopy showed a branched dendritic structure with secondary branches. The interdendritic spacing is occupied by the segregation of a precipitation revealed by scanning electron microscopy. Four phases were also observed:  $\alpha$ -Al matrix, eutectic in white contrast and spherical shaped precipitates in light and dark contrast. X-ray diffraction allowed us to confirm and reveal the present phases in the studied alloy:  $\alpha$ -Al,  $Mg_{51}Zn_{19,84}$ ,  $Mg_2Zn_{11}$  and the  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  phase . Microhardness was also measured and compared with other binary and ternary alloys. The highest value was obtained in our alloy.

**Keywords:** Microstructure, Al-Zn-Mg alloys, HF Fusion, Microscopies, XRD, Microhardness.

# ملخص

يهدف العمل الحالي إلى دراسة البنية المجهرية للسبيكة الثلاثية Al-50%Zn-5%Mg الناتجة عن الذوبان عالي التردد (HF) تحت الحث الكهرومغناطيسي. لهذا الغرض ، تم استخدام عدة طرق تحليلية في هذا البحث: الفحص المجهرى البصري (M.O)، الفحص المجهرى الإلكتروني عن طريق المسح (MEB)، حيود الأشعة السينية (DRX) و اختبار صلادة Vickers.

أظهرت البنية المجهرية التي تمت ملاحظتها بواسطة الفحص المجهرى البصري، بنية متفرعة لغصون ثانوية. التباعد بين شقوق التفرعات مشغول بمركبات و تم الكشف عنها عن طريق المسح المجهرى الإلكتروني. كما تمت ملاحظة أربعة أطوار: مصفوفة  $\alpha$ -Al ، طور سهل الانصهار بالتباين الأبيض ورواسب كروية الشكل بالتباين الفاتح والداكن. سمح لنا حيود الأشعة السينية بتأكيد وكشف المكونات الموجودة في السبيكة المدروسة:  $\alpha$ -Al ،  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  ،  $Mg_2Zn_{11}$  والمركب  $Mg_{51}Zn_{19,84}$ . تم قياس الصلادة الدقيقة ومقارنتها مع سبائك أخرى ثنائية وثلاثية. تم الحصول على أعلى قيمة في سبيكتنا.

**الكلمات المفتاحية:** البنية المجهرية ، سبائك الألمنيوم-الزنك-المغنيسيوم، الانصهار عالي التردد، المجاهر، حيود الأشعة السينية، الصلادة الدقيقة.

# Sommaire

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Introduction générale**..... 1

## **Chapitre I : Étude bibliographique**

**I-1-Aluminium et ses propriétés**..... 3

I-1-1 Généralités sur l'Aluminium..... 3

I-1-2- Propriétés de l'aluminium..... 3

I-1-2- Grade de pureté de l'Aluminium ..... 4

I-1-4- Particules intermétalliques .....4

**I-2- Alliages d'Aluminium** ..... 5

I-2-1- Classification des alliages d'Aluminium ..... 5

I-2-2- Influence des éléments d'alliages sur les propriétés d'aluminium ..... 5

I-2-3--Principales applications des alliages d'aluminium..... 6

**I-3- Alliages Al-Zn-Mg**..... 6

I-3-1-Propriétés de Zinc pur ..... 6

I-3-2-Propriétés de Magnésium pur ..... 7

I-3-3-Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Al-Zn ..... 7

I-3-4- Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Zn-Mg..... 8

I-3-5- Diagramme d'équilibre d'alliage ternaire Al-Zn-Mg ..... 9

**I-4- Solidification des métaux**..... 12

# || Sommaire ||

I-4-1- Germination .....	12
I-4-2- Croissance des grains .....	13
I-4-3- Solidification sous forme dendritique .....	13
<b>Références bibliographique du chapitre I.....</b>	<b>15</b>

## **Chapitre II : Élaboration, Matériaux et techniques de caractérisation**

<b>II-1-Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>II-2- Élaboration.....</b>	<b>19</b>
II-2-1- Principe de la fusion haute fréquence sous induction magnétique.....	19
II-2-2- Méthode d'élaboration.....	20
<b>II-3- Matériaux et techniques de caractérisation .....</b>	<b>23</b>
II-3-1- Matériaux.....	23
II-3-2- Techniques de caractérisation.....	23
II-3-2-1- Préparation métallographique .....	23
II-3-2-2- Microscopie optique (MO).....	25
II-3-2-3-Microscopie électronique à balayage (MEB).....	26
II-3-2-4-Diffraction des rayons X (DRX) .....	27
II-3-2-5- Micodureté Vickers .....	29
<b>Références bibliographique du chapitre II.....</b>	<b>31</b>

## Chapitre III : Résultats et discussions

<b>III-1- Microscopie optique (M.O)</b> .....	33
III-1-1- Observation par microscopie optique.....	33
<b>III-2- Microscopie électronique à balayage (MEB)</b> .....	36
III-2-1- Observation par microscopie électronique à balayage .....	36
<b>III-3- Diffraction des rayons X</b> .....	37
III-3-1- Identification structurale .....	37
III-3-2- Détermination du paramètre cristallin.....	42
III-3-3- Effet de l’addition du zinc sur le paramètre cristallin .....	43
<b>III-4- Microdureté Vickers</b> .....	44
III-4-1- Microdureté et effet d’éléments d’addition.....	44
<b>Références bibliographiques du chapitre III</b> .....	46
<b>Conclusion générale</b> .....	48

## Liste des tableaux

<b>Tableaux</b>	<b>page</b>
Tableau I-1 : Classification en séries des alliages l'aluminium	5
Tableau I-2 : Températures de fusion de l'aluminium, zinc et magnésium	10
Tableau I-3: Nomenclature des phases présentes dans le système Al-Zn-Mg	11
Tableau II-1 : Composition chimique de l'alliage étudié (en poids et en atomes)	23
Tableau III-1 : Mesures de l'espacement entre bras primaires et secondaires des dendrites	34
Tableau III-2 : Tableau d'indexation des raies de diffraction des rayons X correspondant à l'alliage Al-50%Zn-5%Mg	40
Tableau III-3 : Tableau d'indexation des raies de diffraction des rayons X correspondant à la matrice (phase $\alpha$ -Al)	43
Tableau III-4 : Tableau de mesure du paramètre cristallin	43
Tableau III-5 : Tableau de mesure de microdureté de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg	45
Tableau III-6 : Tableau de mesure de microdureté Vickers des alliages de références	45

## Liste des figures

<b>Figures</b>	<b>page</b>
Figure I-1 : Diagramme de phase Al-Zn	8
Figure I-2 : Diagramme d'équilibre d'alliage ternaire Zn-Mg	9
Figure I-3 : Diagramme ternaire Al-Mg-Zn à 25°C	10
Figure I-4- Diagramme ternaire Al-Mg-Zn à 335°C .	11
Figure I-5 : Formation et grossissement des dendrites	13
Figure I-6 : Représentation des caractéristiques principales définissant les dendrites .	14
Figure I-7 : Mesure de DAS et du SDAS de dendrite	14
Figure II-1 : Induction électromagnétique	19
Figure II-2 : Principaux constituants du générateur haute fréquence (HF)	21
Figure II-3 : Différentes étapes de l'élaboration de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg	22
Figure II-4 : Tronçonneuse	24
Figure II-5. : Alliage ternaire Al-Zn-Mg découpé.	24
Figure II-6 : Alliage enrobé	24
Figure II-7 : Polisseuse.	24
Figure II-8 : Microscope optique de type NIKON ECLYPSE LV 100 WD	25
Figure II-9 : Microscope électronique à balayage (MEB) FEI Quanta 250	26
Figure II-10 : Diffractomètre de type PANALYTICAL Empyrean	28
Figure II-11: Exemple d'une empreinte Vickers montrant la surface carrée projetée à la surface d'un matériau	30
Figure II-12: Microduromètre de type INNOVATEST	30

## Liste des figures

Figure III-1 : Micrographie optique de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg brut de fusion montrant une structure dendritique (X50)	33
Figure III-2 : Micrographie optique de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg brut de fusion montrant les bras primaires et secondaires (X100)	35
Figure III-3 : Micrographie optique de l'alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg montrant clairement les différents précipités (grossissement x600)	35
Figure III-4 : Micrographie MEB en mode électrons rétrodiffusés (BSE) montrant le contraste des phases existantes (grossissement x800)	36
Figure III-5 : Micrographie MEB en mode électrons secondaires (SE) montrant l'eutectique (grossissement x6000)	37
Figure III-6 : Diffractogramme expérimental de l'alliage Al-10%Zn-5%Mg	38
Figure III-7 : Spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg indexé	39
Figure III-8 : Diagramme de diffraction des rayons X de l'alliage étudié représentant clairement les raies de faibles intensités	39
Figure III-9 : Coupe isotherme du diagramme ternaire Al-Zn-Mg à 25°C montrant la composition de l'alliage étudié	42

# **Introduction générale**

# *Introduction générale*

L'aluminium pur nous rend quotidiennement des services inimaginables, il participe pleinement à notre mode de vie moderne. Ce métal est exceptionnel, néanmoins à l'état non allié, il présente de faibles caractéristiques mécaniques rendant impossible son utilisation dans la construction de structures mécaniques, d'où la nécessité de lui additionner d'autres éléments pour améliorer ses performances et répondre aux exigences industriels. Au fil des années, l'industrie a su créer des alliages d'aluminium qui permettent d'exploiter au mieux les caractéristiques uniques de l'aluminium. De tous les alliages d'aluminium, ceux contenant du Zinc et du Magnésium présentent les propriétés mécaniques les plus élevées.

D'autres part, le chauffage par induction électromagnétique fait partie des techniques électrothermiques qui permettent de chauffer un matériau sans contact direct avec une source d'énergie électrique. Il est fréquemment utilisé pour les techniques de trempe, de soudure et de fusion des métaux.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique des alliages d'aluminium et des définitions de certains concepts liés au contenu. Nous avons également présenté les alliages d'aluminium, plus particulièrement les alliages ternaires Al-Zn-Mg ainsi que leurs diagrammes de phase.

Le deuxième chapitre porte sur le procédé ainsi que la méthode d'élaboration de l'alliage étudié et présente les techniques de caractérisation utilisées dans l'étude microstructurale de ce dernier.

Le troisième chapitre est une présentation et une discussion des données recueillies à partir des techniques présentées dans le chapitre 2.

Une conclusion générale résume les points principaux aspects abordés dans notre étude expérimentale.

**Chapitre I :**  
**Étude bibliographique**

## **Chapitre I : Étude bibliographique**

### **I-1- Aluminium et ses propriétés**

I-1-1- Généralités sur l'Aluminium

I-1-2- Propriétés de l'Aluminium

I-1-3- Grades de pureté de l'Aluminium

I-1-4- Particules intermétalliques

### **I-2-Alliages d'Aluminium**

I-2-1- Influence des éléments d'alliages sur les propriétés d'Aluminium

I-2-2- Classification des alliages d'Aluminium

I-2-3- Principales applications des alliages d'Aluminium

### **I-3- Alliages Al-Zn-Mg**

I-3-1-Propriétés de Zinc pur

I-3-2-Propriétés de Magnésium pur

I-3-3-Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Al-Zn

I-3-4- Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Zn-Mg

I-3-5- Diagramme d'équilibre d'alliage ternaire Al-Zn-Mg

### **I-4- Solidification des métaux**

I-4-1-Germination

I-4-2-Croissance des grains

I-4-3- Solidification sous forme dendritique

## I-1-Aluminium et ses propriétés

### I-1-1 Généralités sur l'Aluminium

L'aluminium est le métal le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé industriellement que depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, représentant environ 7.5% de la masse de l'écorce terrestre [1]. L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al, de numéro atomique 13 et de masse atomique environ 27. Il appartient au groupe 13 du tableau périodique ainsi qu'à la famille des métaux pauvres. Il possède un réseau cubique à faces centrées avec un paramètre de maille  $a=4.0412\text{Å}$  [2]. C'est un métal argenté et malléable, léger, mou et ductile. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité.

Il est extrait principalement de la bauxite, un minéral dans lequel il est présent sous forme d'oxyde hydraté (électrolyse de la bauxite) dont on extrait l'alumine de formule  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Il peut également être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite [2].

### I-1-2- Propriétés de l'aluminium

Les avantages de l'aluminium sont associés à ses propriétés remarquables :

- **Résistance à la corrosion**

Le contact de l'aluminium avec l'oxygène de l'air forme une couche très fine d'environ  $0,7\mu\text{m}$  [3], appelée alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cette dernière qui est non soluble dans l'eau, protège le métal contre les attaques chimiques. Par conséquent, l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et très utilisé dans l'industrie chimique et alimentaire.

- **Conductivité thermique et électrique**

L'aluminium non allié possède un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est d'environ 50 à 60 pour cent de celle du cuivre, et en fait un bon conducteur électrique à un tiers du poids spécifique du cuivre.

- **Réfectivité**

Lorsqu'il est poli, c'est un métal blanc et brillant et possède un grand pouvoir de réflexion. L'aluminium est utilisé comme réflecteur pour chauffage et éclairage ou surface réfléchissante des miroirs de télescopes. La capacité de réflexion peut atteindre 90 % [4].

- **Non-toxicité**

La nature non toxique de l'aluminium a été découverte des siècles lors de sa première utilisation industrielle.

- **La facilité de fabrication de l'aluminium**

Est l'une de ses caractéristiques les plus importantes ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.

- **Ductilité et malléabilité**

L'aluminium est malléable, ce qui signifie qu'il peut être usiné en fil fin sans se casser. Cependant, il est moins ductile que le cuivre. L'aluminium a également une faible densité et un point de fusion bas. Il peut être fondu de différentes manières grâce à sa flexibilité pour produire les produits souhaités tels que des feuilles, des tubes et des barres.

### **I-1-3- Grades de pureté de l'aluminium**

Les impuretés sont des éléments métalliques de base, obtenues à partir du minerai, ou du mode d'élaboration. Les principales impuretés rencontrées dans l'aluminium sont le Si, Fe, Ga, Zn, Ti, V, Mn et Cu comme contaminations minoritaires [2,5]. L'Aluminium est classé entre la pureté extrême (99.9999%Al) et la pureté primaire ou commerciale (99%Al) [2,6].

### **I-1-4- Particules intermétalliques**

Les particules intermétalliques apparaissent dans la microstructure des alliages 7000 suite aux interactions entre les éléments d'alliages et les impuretés présentes. Les particules intermétalliques se forment souvent lors de la solidification des alliages métalliques [7,8].

Ces particules ne seront pas affectées par les différents traitements thermiques car la solubilité notamment des impuretés dans le métal comme l'Aluminium est faible [7,9]. Elles peuvent atteindre des tailles importantes généralement comprises entre 1 et 20  $\mu\text{m}$ . La répartition des intermétalliques dans l'alliage n'est pas homogène car elle dépend de la présence d'impuretés [7,10].

**I-2- Alliages d’Aluminium**

**I-2-1- Classification des alliages d’Aluminium**

Les alliages d’aluminium sont les plus utilisés juste après les fontes et les aciers. Ils sont classés en huit familles selon l’élément d’addition principal, désignés par un numéro à 4 chiffres dont le premier désigne la famille (tableau I-1).

Tableau I-1 : Classification en séries des alliages l’aluminium [11]

Série	Alliages d’aluminium
1000	Al non allié
2000	Alliages avec Cu
3000	alliages avec Mn
4000	alliages avec Si
5000	alliages avec Mg
6000	alliages avec Zn
7000	Aluminium + zinc + magnésium
8000	Alliage avec d’autres éléments principaux

**I-2-2- Influence des éléments d’alliages sur les propriétés d’aluminium**

Au sein des huit classes citées dans le paragraphe §-1-2-1, il existe une autre distinction entre les alliages à base d’aluminium [12, 13] :

- alliages sans durcissement structural
- alliages à durcissement structural.

La différence entre ces alliages est due à l’élément d’addition principal, quelle que soit sa teneur ainsi qu’à la façon d’obtenir des valeurs élevées de résistance mécanique et de dureté.

**❖ Les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant)**

Ce groupe est constitué des alliages à durcissement par écrouissage. Ce sont les familles 1XXX, 3XXX, 5XXX, 8XXX. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le durcissement plastique qui correspond à une modification structurale du métal (déformation plastique).

**❖ Les alliages à durcissement structural (alliages trempant)**

Ce groupe est constitué des alliages à durcissement structural. Ce sont les Familles 2XXX, 4XXX, 6XXX et 7XXX [2]. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le traitement thermique, généralement effectué à la fin de la gamme de transformation, en trois étapes : mise en solution, trempe et revenu (ou maturation).

Le phénomène de durcissement résulte de la précipitation provoquée et contrôlée de certaines phases à l'intérieur de la matrice d'aluminium qui vont produire une augmentation des propriétés mécaniques.

**I-2-3--Principales applications des alliages d'aluminium**

Les propriétés de l'aluminium à l'état pur ou allié en font un matériau indispensable pour une large gamme d'applications. Il les reçoit dans l'agroalimentaire, le bâtiment, l'électricité, l'automobile... [14]. L'utilisation d'alliages d'aluminium est essentielle, notamment dans le domaine des transports, dans le but de réduire au maximum la tare du système pour augmenter la charge utile [15,16].

**I-3- Alliages Al-Zn-Mg****I-3-1-Propriétés de Zinc pur**

Le zinc est présent à l'état naturel sous forme de sulfure de ZnS. Le principal minéral contenant du zinc est la sphalérite. C'est un métal blanc bleuté avec une densité de  $\approx 7,14$  g/cm<sup>3</sup> [17]. Il cristallise en une structure hexagonale compacte avec des paramètres cristallins  $a \approx 0,266$  nm,  $c \approx 0,494$  nm et un rapport  $c/a \approx 1,86$  [3,18]. Ses points de fusion et d'ébullition sont respectivement : 419,5 °C et 908 °C [19]. Le zinc est facilement soluble dans les acides et peut facilement remplacer l'or, l'argent, le cuivre, etc...

### **I-3-2-Propriétés de Magnésium pur**

C'est un élément métallique de symbole Mg, de nombre atomique 12 et de masse atomique 24.305 g/mol. Il est situé dans le groupe II a dans la table périodique. Le magnésium est de couleur blanc-gris métallique, de densité 1740 kg/m<sup>3</sup> et de masse volumique 1,738 g/cm<sup>3</sup> à 20°C [20]. Le magnésium est un métal structural léger et moins dense que l'aluminium.

### **I-3-3-Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Al-Zn**

Les alliages aluminium-zinc sont des alliages façonnés qui sont utilisés comme couche anti corrosion sur les plaques d'acier. Le zinc, un élément de structure hexagonale compacte (HCP), peut être ajouté à l'aluminium de structure cubique à faces centrées (CFC) et atteint un taux élevé de solubilité (94 % en poids) tout en conservant la structure cubique à face centrée. Le diagramme d'équilibre d'alliages du système binaire Al-Zn est représenté sur la figure I-1. Ce dernier est caractérisé par deux particularités :

- solution solide à large bande appelée  $\alpha$  ou  $\alpha$ -Al , de structure (cfc), s'étendant jusqu'à 84% en poids de zinc à 382°C.
- un domaine d'immiscibilité entre deux phases  $\alpha$  contenant des pourcentages différents en zinc. La solubilité du zinc dans la phase  $\alpha$ -Al est très élevée à haute température, elle diminue rapidement avec la baisse de température. Le refroidissement est possible à température ambiante sans aucun traitement thermique [21].

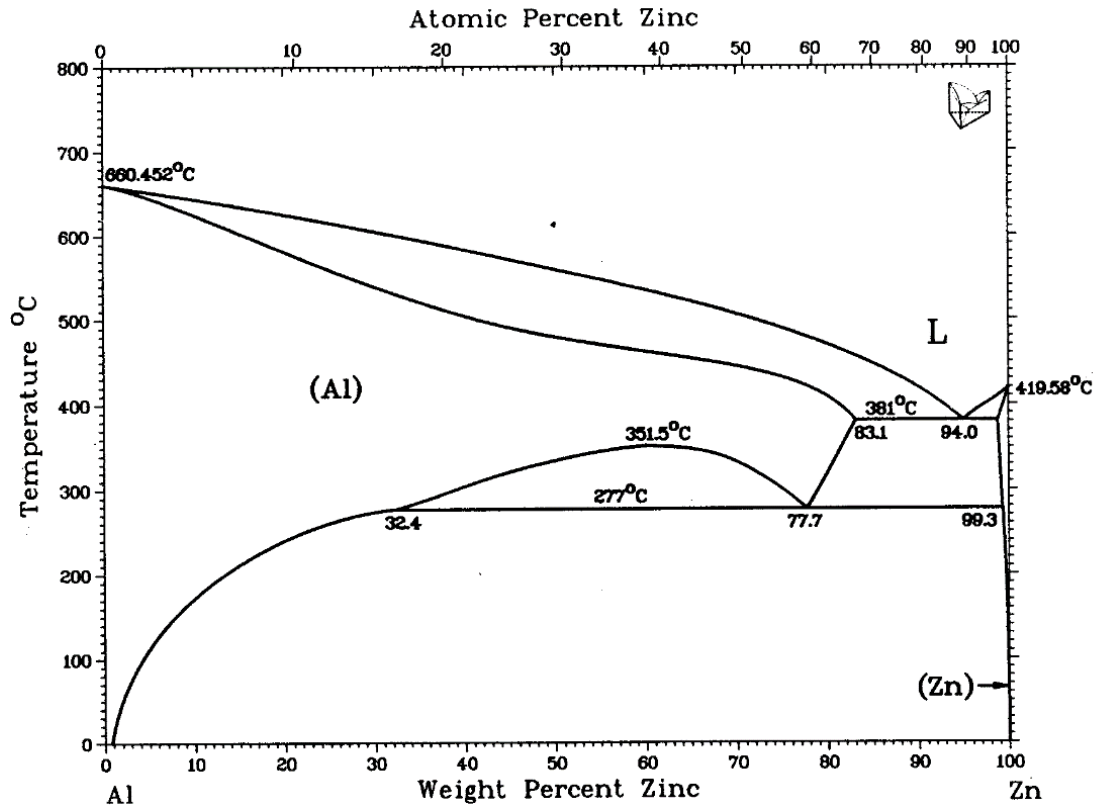


Figure I-1 : Diagramme de phase Al-Zn [22].

### I-3-4- Diagramme d'équilibre d'alliage binaire Zn-Mg

Le diagramme d'équilibre du système binaire Mg-Zn (figure I-2) est constitué par la juxtaposition de deux diagrammes solide-liquide simples : (Mg-MgZn<sub>2</sub>) et (MgZn<sub>2</sub>-Zn). Le solide MgZn<sub>2</sub> est appelé composé défini à fusion congruente. Ce dernier fond à une température constante (587°C) [23,24] et le liquide a la même composition que le solide mais il n'est pas constitué de particules de MgZn<sub>2</sub> mais de particules de zinc et de magnésium.

Deux points eutectiques E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub> sont observés dans ce système et chaque diagramme simple en possède un. D'autres composés définis sont présents dans ce diagramme mais ils sont à fusion incongruente car ils se décomposent avant d'atteindre leur point de fusion théorique.

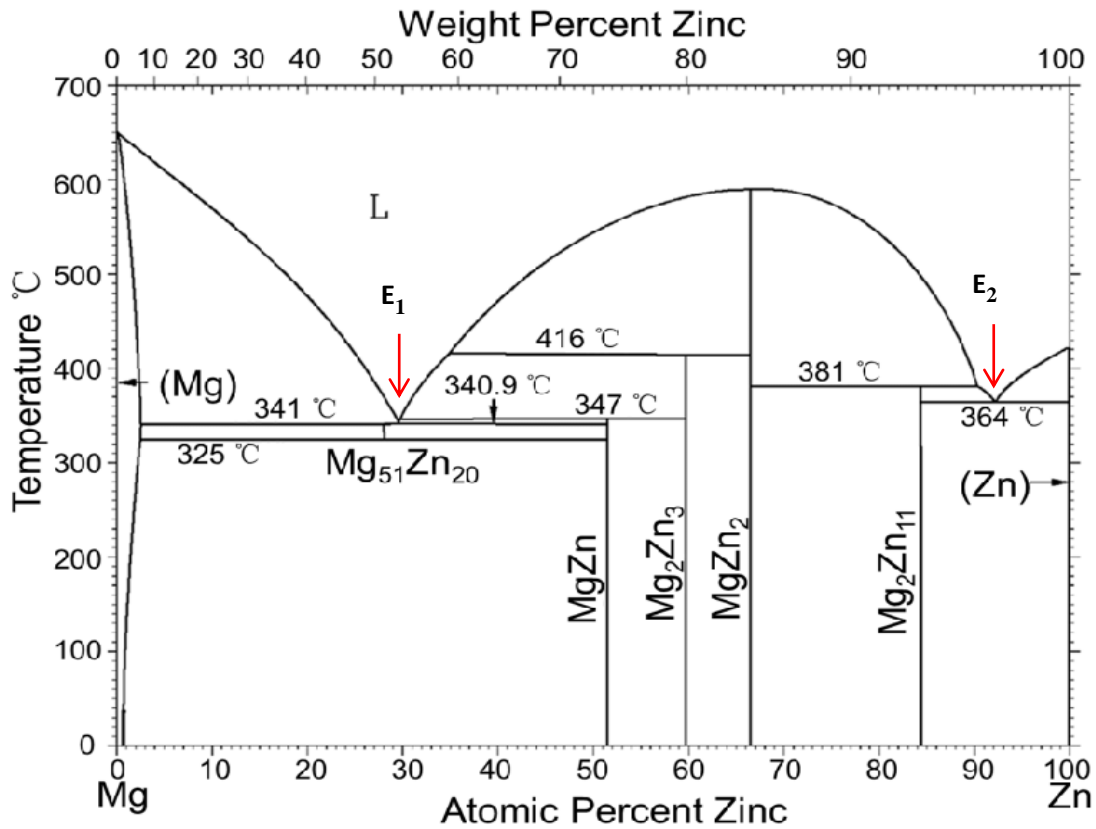


Figure I-2 : Diagramme d'équilibre d'alliage ternaire Zn-Mg [25].

### I-3-5- Diagramme d'équilibre d'alliage ternaire Al-Zn-Mg

Les différentes températures de fusion et d'ébullition des éléments Al, Zn et Mg sont résumées dans le tableau I-2 [26,27]. La coupe isotherme à 25°C du diagramme ternaire Al-Zn-Mg est représentée sur la figure (I-3) [28,29]. On remarque que la solubilité du zinc (~2 % at) ainsi que celle du magnésium (~1,5 % at) n'est pas négligeable. D'autre part, l'isotherme du diagramme ternaire Al-Zn-Mg à 335°C proposé par Willey [30], est représentée sur la figure (I-4). Généralement, les phases d'équilibre du système Al-Zn-Mg ne sont pas bien établies pour toute les compositions.

A fin de faciliter la lecture des différentes phases dans le diagramme, les symboles représentant chaque phase sont résumés dans le tableau I-3 [28]. Toutes les phases

intermétalliques secondaires sont supposées avoir une solubilité ternaire à l'exception de la phase  $MgZn_2$ .

Tableau I-2 : Températures de fusion de l'aluminium, zinc et magnésium [26,27].

Elément	Aluminium	Zinc	Magnésium
Température de fusion (°C)	660.32	419.527	650

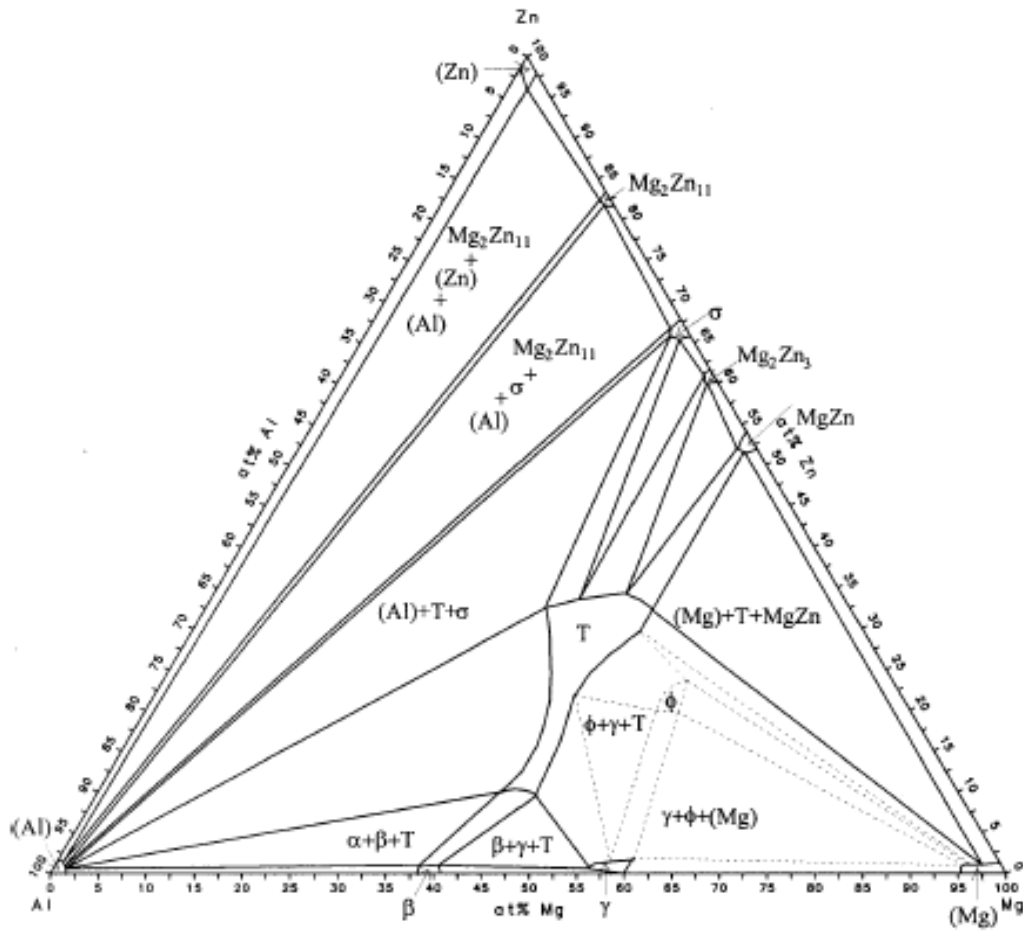


Figure I-3 : Diagramme ternaire Al-Mg-Zn à 25°C [28,29].

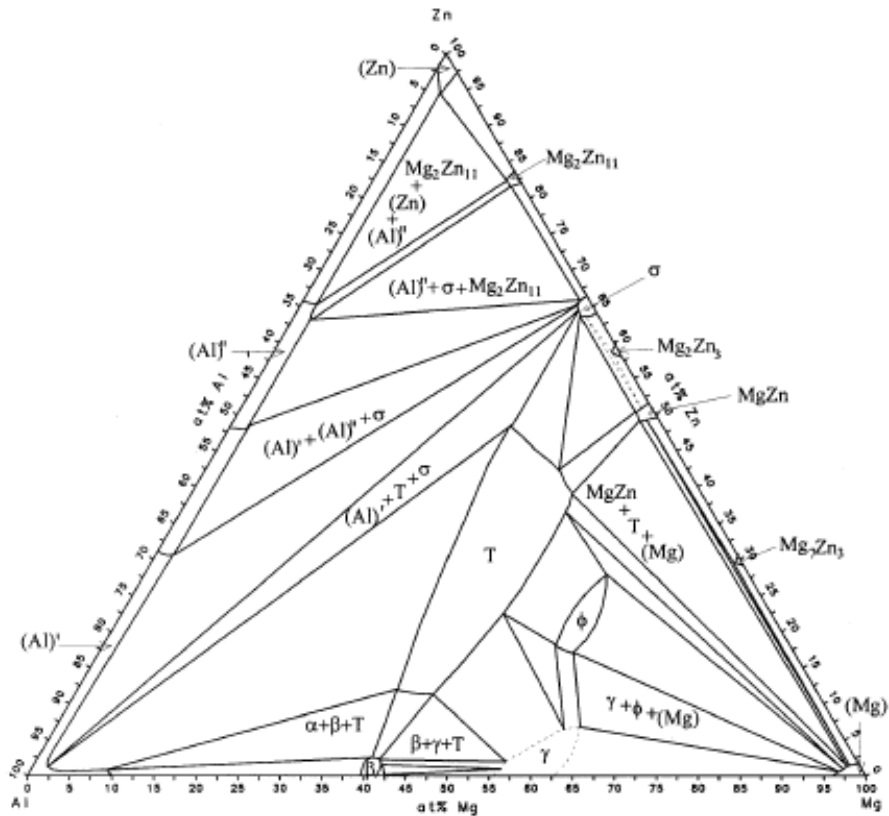


Figure I-4- Diagramme ternaire Al-Mg-Zn à 335°C [30].

Tableau I-3: Nomenclature des phases présentes dans le système Al-Zn-Mg [28]

Symboles	Phase
L	Liquide
Fcc	(Al)
Hcp	(Mg), (Zn)
$\beta$	$Al_8Mg_5$
$\gamma$	$Al_{12}Mg_{17}$
$\rho$	$Al_{56}Mg_{44}$
$\nu$	$Al_{105}Mg_{95}$

$\sigma$	$(Al, Zn)_2Mg$
$T$	$(Al,Zn)_{49}Mg_{32}$
$\phi$	$Al_2Mg_5Zn_2$
$Mg_7Zn_3$	$Mg_7Zn_3$
$Mg_2Zn_3$	$Mg_2Zn_3$
$MgZn$	$MgZn$
$Mg_2Zn_{11}$	$Mg_2Zn_{11}$

**I-4- Solidification des métaux**

La solidification est le processus par lequel un liquide se transforme en solide par refroidissement. Elle est généralement réalisée par précipitation : des particules solides se forment dans un liquide. C'est la germination puis la croissance qui correspond au développement de ces germes jusqu'à l'épuisement de la phase parentale [31, 32, 33]. Le passage d'un état liquide à un état solide d'un métal pur est particulier car il se produit toujours à la même température et c'est unique à une pression atmosphérique.

**I-4-1- Germination**

Lors du refroidissement, lorsque la température du système devient inférieure à la température de fusion, il y a apparition d'un certain nombre d'embryons solides dans le liquide surfondu. Dans un liquide, les atomes sont en mouvement constant et il est toujours possible qu'un certain nombre d'atomes s'unissent temporairement sous forme d'amas, de rayon r, ayant la structure d'un solide [15,34].

Ainsi, le germe formé doit franchir une barrière énergétique correspondant à la taille critique,  $r^*$ , des groupements formés. Le germe de rayon  $r < r^*$  a tendance à se dissoudre dans le liquide, tandis que le germe de rayon  $r^*$  entre en phase de croissance [15,35]. En pratique, la germination se produit généralement sur des particules d'impureté ou sur les parois du moule car ces derniers réduisent la barrière énergétique requise, dans ce cas, la germination est dite hétérogène [34,36].

### I-4-2- Croissance des grains

Une fois que les germes stables sont nés, ils se développent par diffusion et leur rayon augmente. La solidification se termine lorsque la dernière trace de liquide disparaît, ce qui correspond à la température du solide, et les germes formés conduisent à l'apparition de grains. En effet, la solidification d'un alliage avec une phase complètement homogène n'est pas possible car elle nécessite une redistribution continue du soluté entre le solide et le liquide, ce qui prend plus de temps du fait de la faible diffusion du soluté dans le solide. La différence de concentration apparaît donc dans la partie où se termine solidification [15].

### I-4-3- Solidification sous forme dendritique

A l'état liquide, l'alliage est homogène chimiquement. Pendant la solidification, il y a en général une redistribution des éléments chimiques qui ségrégent et forment des phases de composition et de morphologie différenciées à l'état solide. Par exemple, formation de dendrites dans une matrice (figure I-5). De nombreux alliages en particulier présentent une solidification dendritique. Les grandeurs caractéristiques définissant la microstructure dendritique sont illustrées sur la figure I-6.  $R$ ,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  représentent respectivement rayon de courbure de la pointe, espacements entre les troncs primaires ainsi que les branches secondaires de la dendrite en fin de solidification.

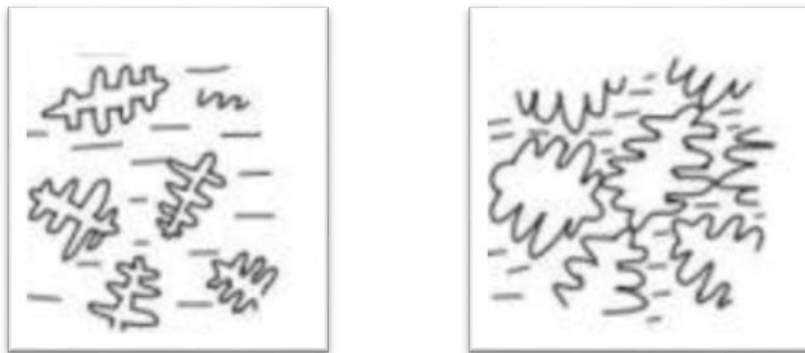


Figure I-5 : Formation et grossissement des dendrites.

Selon les fondateurs, la finesse de la structure dendritique est mesurée par deux indicateurs :

- le DAS (Dendrite Arm Spacing) : représente la distance moyenne entre deux bras primaires de dendrites ;
- le SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing) : représente la distance moyenne entre deux bras secondaires de dendrite (figure I-7) [37].

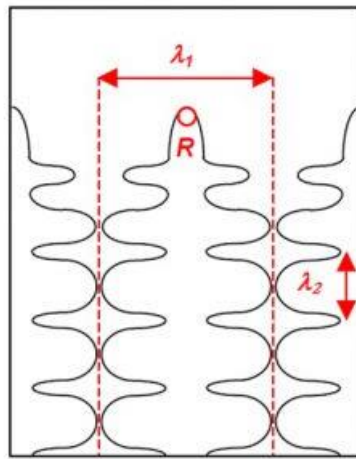


Figure I-6 : Représentation des caractéristiques principales définissant les dendrites.

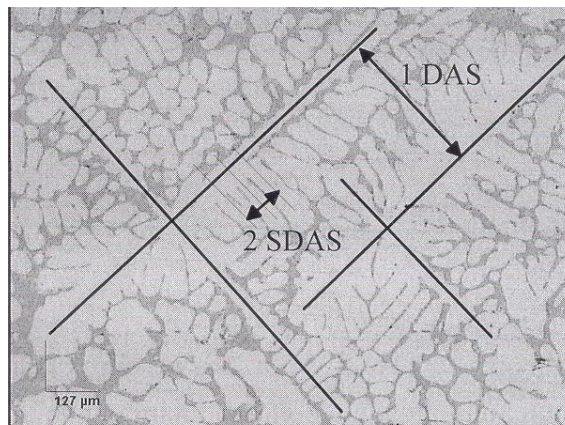


Figure I-7 : Mesure de DAS et du SDAS de dendrite [37].

**Références bibliographiques du chapitre I**

- [1]-E. L. Sturbu, Thèse doctorat, Institut national des sciences appliqués; Lyon France (2005).
- [2]-G.E.Totten and D. S. MacKenzie, Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press, (2003).
- [3]-W.B. Pearson and G. V Raynor, A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys: International Series of Monographs on Metal Physics and Physical Metallurgy, 4, Elsevier Science, (1958).
- [4]-S.Bensaada, Métaux et alliages non Ferreux, Editeur Omniscritum, 59 -77, (2010).
- [5]-J.R.Davis, J.R.D. Associates, and A.S.M.I.H. Committee, Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, (1993).
- [6]-N. CHÉRIFI, Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A, (2015).
- [7]-R.G. Hamerton, H. Cama, M.W. Meredith, Development of the coarse intermetallic particle population in wrought aluminium alloys during ingot casting and thermo-mechanical processing, Materials Science Forum, 331-337, (2000)
- [8]-N.A. Beloy, A.A. Aksenov, D.G. Eskin, Iron in Aluminium alloys: impurity and alloying element, Ed. Taylor and Francis 15, (2002).
- [9]-N.A. Beloy, A.A. Aksenov, D.G. Eskin, Iron in Aluminium alloys: impurity and alloying element, Ed. Taylor and Francis, 138, (2002).
- [10]-A.K. Mukhopadhyay, V.V. Rama Rao, C.R. Chakrorty, The influence of constituent particles on the quality of hard anodic coating on fully heat treated AA7075 extrusion products, Materials Science Forum, 217-222, (1996).
- [11]-M. Beldjehem, Couches minces obtenues par co-pulvérisation cathodique magnétron caractérisations microstructurale et électrochimique (corrosion), (2014).
- [12]-K. Sampa, W. Baeslack, Selection and Weldability of Dispersion- Strengthened Aluminium alloys ASM-Handbook, Vol.6-ASM Pub., New York, (1993), P.541.
- [13]-R. Martukanitz, Selection and Weldability of Heat Treatable Aluminium alloys ASM-Handbook, Vol.6-ASM Pub., New York, (1993), P.529.

- [14]-M. SELLAM, Etude des transformations structurales et des propriétés mécaniques dans les soudures d'alliage d'aluminium 7075 traités thermiquement réalisées par le procédé de soudage tig, (2012).
- [15]-J. P. Bailon and J. M. Dorlot, Des matériaux. Presses Internationales Polytechnique, (2000).
- [16]-A. BRAHAMI, Etude de l'influence du couplage entre les caractéristiques mécaniques et les sollicitations appliquées sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium., (2018).
- [17]-A. Cros and G. Arribet, Initiation à la chimie moderne: première, sections C et E. E. Belin, (1969).
- [18]-B. S. Mitchell, An Introduction to Materials Engineering and Science for Chemical and Materials Engineers. Wiley, (2004).
- [19]-X.G. Zhang, « Corrosion and Electrochemistry of Zinc », Plenum (Ed.), New York, (1996).
- [20]-D. Abd elkebir, Contribution à la détermination expérimentale des contributions au durcissement de l'alliage Al-Zn, mémoire de Magister, (2012).
- [21]-H. Löffler, R. Ramlau. Cryst. Res. Technol., 26, 81, (1991).
- [22]-T.B. Massalski, editor. Binary Alloy Phase Diagram. ASM, (1986).
- [23]-ASM, ASM Handbook Volume 3 - Alloy Phase Diagrams, (1992).
- [24]-H. Okamoto, Supplemental literature review of binary phase diagrams, J. Phase Equilibria Diff., 34, 251-263, (2013).
- [25]-Okamoto, H. Comment on Mg-Zn (magnesium-zinc). J. Phase Equilib. 1994, 15, 129–130.
- [26]-David R. Lide, CRC, Handbook of chemistry and physics CRC press inc, 2009, 90 ed P. 2804.
- [27]- Procés-verbaux du comité international des poids et mesures, 78<sup>e</sup> session, 1989, P. T1-T2.
- [28]-Yucel Birol, Scripta Materialia, vol. 52, p. 169-173, (2005).

[29]-S. C. Wang, M. J. Starink, Mater Sci Eng A, vol. 386, p. 156-163, (2004).

[30]- B. Dubost, p. Sain fort, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, Paris, vol. 240, p. 2-37, (1994).

[31]-Lacmann, Herden, Mayer, Kinetics of nucleation and cristal growth, chem. Eng. Technology, 22, 279-289, (1999).

[32]-J.C Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Dover publication, 493, (1954).

[33]-Winegord, Introduction à la solidification des métaux,Editeur Dunod, 103, (1971).

[34]-J. Campbell, Solidification Structure, (2015).

[35]-J. Bénard, Métallurgie générale. Masson, (1984).

[36]-B.Chalmer, Metallurgie physique, Editeur Dunod, 430, (1963).

[37]-J.M. Rozot, Modèle prédictif de l'apparition de la microporosité de retrait durant la solidification d'un alliage Aluminium-Silicium. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux1, (2005).

**Chapitre II :**  
**Élaboration, Matériaux**  
**et techniques de**  
**caractérisation**

## **Chapitre II : Élaboration, Matériaux et techniques de caractérisation**

### **II-1- Introduction**

### **II-2- Élaboration**

II-2-1- Principe de la fusion haute fréquence sous induction magnétique.

II-2-2- Méthode d'élaboration

### **II-3- Matériaux et techniques de caractérisation**

II-3-1- Matériaux

II-3-2- Techniques de caractérisation

II-3-2-1- Préparation métallographique

II-3-2-2- Microscopie optique (MO)

II-3-2-3- Microscopie électronique à balayage (MEB)

II-3-2-4- Diffraction des rayons X (DRX)

II-3-2-5- Micodureté Vickers

## II-1-Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter le principe de la fusion haute fréquence (HF) sous induction magnétique ainsi que la méthode d'élaboration de l'alliage étudiée. Ce dernier a été caractérisé par plusieurs techniques de caractérisations : microscopie optique (MO), microscopie électronique à balayage (MEB), diffraction des rayons X (DRX) et microdurte Vickers. Ces techniques sont également présentées dans ce chapitre.

## II-2- Élaboration

### II-2-1- Principe de la fusion haute fréquence sous induction magnétique

L'induction électromagnétique, aussi appelé induction magnétique, est un phénomène physique qui se manifeste par la production d'une différence de potentiel électrique aux bornes d'un conducteur électrique. Ce phénomène est notamment utilisé dans les transformateurs électriques, les bobines, ou encore les plaques à induction grâce aux courants de Foucault [1].

Lorsqu'un matériau métallique est entouré d'une bobine d'induction, le passage d'un courant électrique  $j$  alternatif, à travers l'inducteur, engendre un champ magnétique alternatif proportionnel à l'intensité du courant et au nombre de spires de la bobine [2]. Ce champ pénètre dans le matériau et va à son tour, d'après la loi de Lenz, induire une force électromotrice  $F$  qui donnera naissance à des courants induits  $j_{ind}$  circulant dans le conducteur (figure II-1). Ces courants induits sont les courants de Foucault qui par effet Joule chauffe le matériau [1].

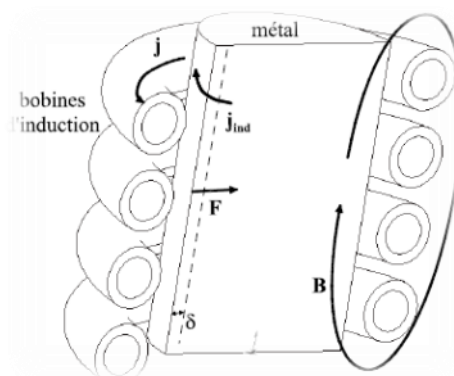
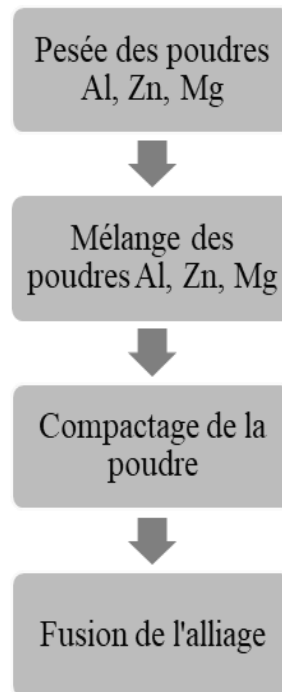


Figure II-1 : Induction électromagnétique.

### II-2-2- Méthode d'élaboration

Le four utilisé dans l'élaboration du matériau étudié est un four à induction haute fréquence de type Lin therm 600. Il est alimenté par un générateur haute fréquence de 300 KHz et de puissance 6 KW. Les principaux constituants du générateur haute fréquence sont rassemblés dans la figure II-2. Les différentes étapes de l'élaboration du matériau sont schématisées de la manière suivante :

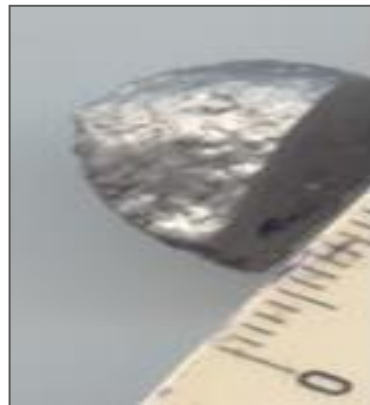
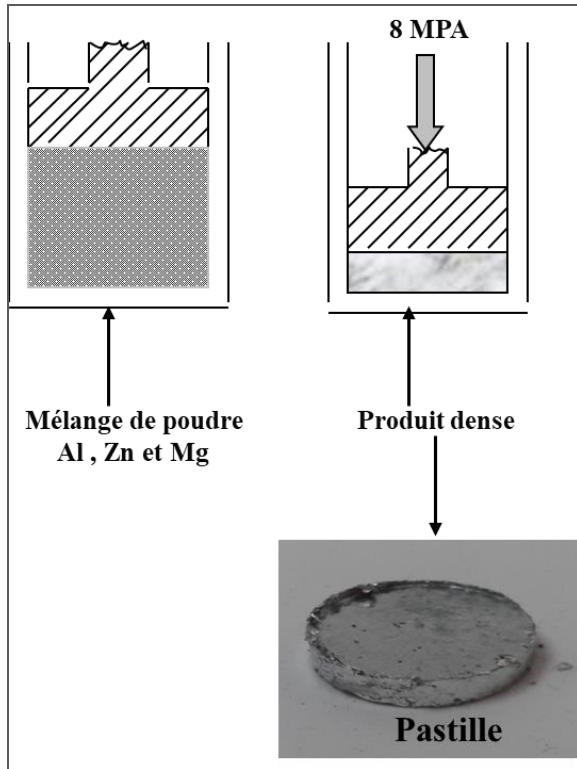


La première étape consiste à mélanger la poudre des éléments constituant l'alliage à élaborer, puis le compacter pour obtenir une pastille (figure II-3). Cette dernière est placée dans un creuset cylindrique d'alumine puis mise dans un tube en quartz qui est à son tour placé dans l'inducteur du générateur et relié à une pompe à palettes, de pression  $10^{-3}$  Torr, à travers un tube en caoutchouc fermé qui permet un dégazage continu.

Le générateur alimente la bobine en courant électrique. Le courant qui passe dans les spires induit un champ magnétique. Des courants induits apparaissent, appelés courants de Foucault, viennent chauffer l'objet conformément à la loi de joule. Puis, on coupe le courant, l'alliage est rapidement solidifié. L'échantillon obtenu est de forme quasi- cylindrique.



Figure II-2 : Principaux constituants du générateur haute fréquence (HF).



Alliage solidifié

Figure II-3 : Différentes étapes de l'élaboration de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg

### II-3- Matériaux et techniques de caractérisation

#### II-3-1- Matériaux

Le tableau II-1 représente la composition chimique en pourcentages massique et atomique du matériau étudié. La pureté de zinc et de magnésium utilisée dans l'élaboration de l'alliage est de 99.99%, celle de l'aluminium est de 99.0%. La masse de l'échantillon à élaborer est de 5 grammes.

Tableau II-1 : Composition chimique de l'alliage étudié (en poids et en atomes)

Alliage	Composition en pourcentages massiques (wt. %)	Composition en pourcentages atomiques (at. %)
Al-Zn-Mg	Al-50%Zn-5%Mg	Al-29%Zn-8%Mg

#### II-3-2- Techniques de caractérisation

##### II-3-2-1- Préparation métallographique

Pour avoir des informations sur la microstructure, la répartition des phases, la taille et la forme des grains d'un alliage, il faut généralement une préparation métallographique qui comporte les étapes suivantes :

- **Tronçonnage** : La première étape consiste à découper l'échantillon avec une scie à disque électrique utilisant l'eau comme lubrifiant (Figures (II-4, II-5)).
- **Enrobage** : Pour faciliter la manipulation de petits échantillons et assurer une surface plane, l'alliage doit être enrobé dans de la résine. Dans notre cas, nous avons utilisé un enrobage à froid (figure II-6).
- **Polissage** : Cette étape, réalisée manuellement, consiste en un polissage mécanique de la surface dans une polisseuse (figure II-7). Nous avons utilisé des papiers abrasifs de carbure de silicium SiC. Le polissage se fait sous eau. On commence avec un papier à gros grains pour éliminer progressivement les rayures. On croise soigneusement les stries de polissage quand on passe d'un papier à un autre. La finition a été réalisée par polissage sur feutre.

• **Attaque chimique** : Une fois que le polissage est réalisé, on doit effectuer une attaque électrochimique. Le réactif utilisée est le réactif de Keller, constitué de : Eau distillée 74 ml, acide fluorhydrique (HF) 5ml, acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) 22ml, acide chlorhydrique 9ml. Ce dernier permet de révéler les structures de la surface de l'échantillon.



Figure II-4 : Tronçonneuse.



Figure II-5 : Alliage ternaire  
Al-Zn-Mg découpé.

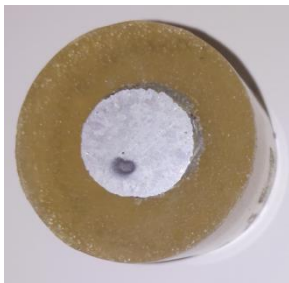


Figure II-6 : Alliage enrobé



Figure II-7 : Polisseuse.

### II-3-2-2-Microscopie optique (MO)

Le microscope optique est utilisé pour observer la microstructure de l'alliage. Il permet d'agrandir l'image d'un petit objet et de séparer ses détails. L'observation se fait par la réflexion de la lumière visible, qui limite la puissance de l'analyse, sur des surfaces préalablement préparées auparavant.

Le microscope utilisé est un microscope de type NIKON ECLYPSE LV 100 W, équipé d'une caméra vidéo Leica (Figure II-8) et est composé de :

- Oculaire : ensemble de lentilles composant l'image ;
- Objectifs : ensemble de lentilles produisant un grossissement. Il existe plusieurs cibles correspondant à de nombreux grossissements pouvant atteindre jusqu'à 1000 ;
- Platine porte-échantillon : sur laquelle l'échantillon est posé. La platine est mobile, ce qui permet de sélectionner la partie observée.

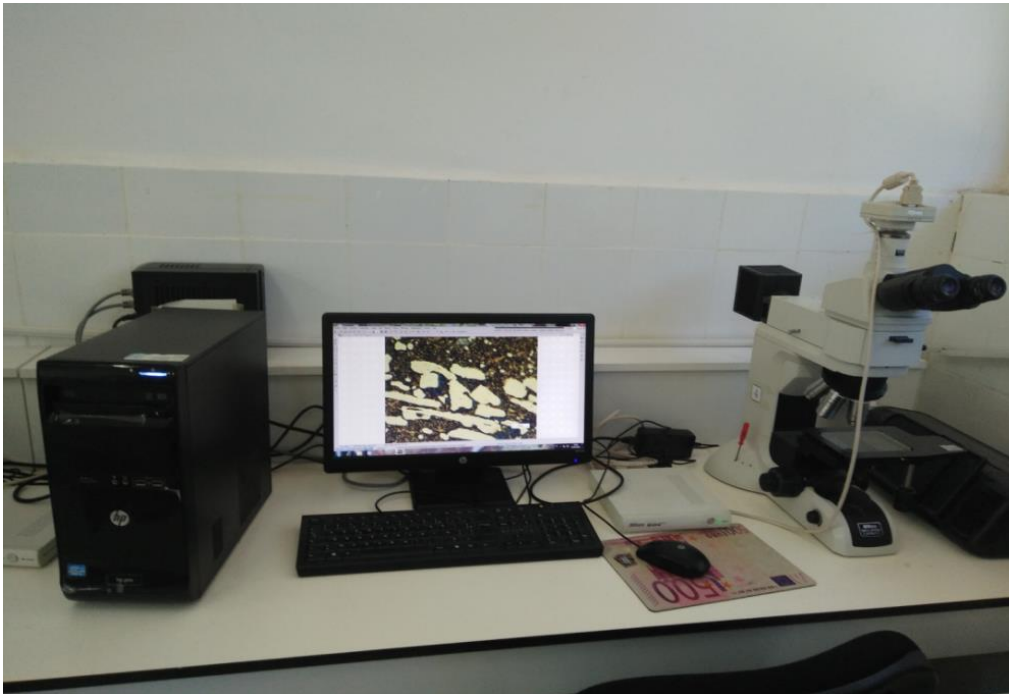


Figure II- 8 : Microscope optique de type NIKON ECLYPSE LV 100 WD.

### II-3-2-3-Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est la technique d'observation utilisant un faisceau d'électrons pour obtenir des informations sur l'échantillon [3] et est basé sur le principe d'interaction électrons-matière. Il est différent du microscope optique car le pouvoir séparateur de ce dernier est limitée à  $0,2 \mu\text{m}$ . Un microscope électronique est constitué :

- d'une source d'électrons ;
- un canon ;
- une colonne électronique composée de plusieurs lentilles électromagnétiques
- un dispositif de balayage et divers détecteurs associés à diverses émissions électroniques et électromagnétiques issues entre les électrons incidents et les atomes de la cible.

Le fonctionnement en mode électrons secondaires permet d'observer la morphologie de la surface, tandis que l'imagerie en mode électrons rétrodiffusés permet d'obtenir un contraste chimique. Les phases riches en éléments lourds (Z élevé) apparaissent claires tandis que celles constituées d'éléments légers (Z faible) apparaissent plus sombres. Dans cette étude, nous avons utilisé le microscope électronique à balayage de type FEI Quanta 250 (Figure II-9).



Figure II-9 : Microscopie électronique à balayage (MEB) FEI Quanta 250.

### II-3-2-4-Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons-X (DRX) est une technique de caractérisation qui permet la détermination de la structure cristalline, la nature des différentes phases d'un matériau et de mesurer précisément leurs paramètres de maille.

#### Principe

Les corps cristallisés sont des assemblages de plans atomiques plus ou moins denses. Ces plans atomiques sont appelés "plans réticulaires" et les distances caractéristiques qui les séparent sont des "distances interréticulaires" indiquées « d », et la technique de diffraction des rayons X dépend de leur présence. La technologie des rayons X utilise couramment des informations sur la structure cristalline des matériaux, et permet ainsi de les caractériser [4].

Lorsqu'une substance cristalline est irradiée par un faisceau parallèle de rayons X monochromatique, les plans atomiques qui la composent agissent comme un réseau tridimensionnel (hkl). Ensuite, le faisceau de rayons X est diffracté à des angles spécifiques liés aux distances interréticulaires. L'intensité (I) diffractée sera non nulle seulement si les contributions des plans successifs sont en phase (interférences constructives).

Le principe de DRX et l'utilisation qu'on en fait aujourd'hui de façon standard, sont résumés dans la loi de Bragg :

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

d : distance interréticulaire entre deux plans atomiques consécutifs ;

$\theta$  : angle de diffraction ;

n : entier positif qui représente l'ordre de la réflexion ;

$\lambda$  : longueur d'onde du rayonnement, monochromatique.

La relation qui relie les distances interréticulaires des plans (hkl) aux paramètres cristallographiques est:

- Dans le cas d'un système cubique:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Cette équation nous permet de calculer le paramètre de maille "a" expérimental et de faire une comparaison avec la valeur théorique répertoriée dans la base de données ASTM.

### Appareillage et mesure

Dans notre travail, le diffractogramme du matériau étudié a été enregistré sur un diffractomètre de rayons X, de type Philips PANALYTICAL Empyrean (Figure II-10), en configuration  $\theta$ - $2\theta$  de Bragg-Brentano, muni de deux anticathodes cuivre et cobalt. Dans notre cas, nous avons utilisé l'anticathode de Co ( $\lambda = 1,78901\text{\AA}$ ) avec les conditions suivantes:

- une tension de 45 kV,
- un courant de 40 mA ;
- un balayage compris entre  $20^\circ$  et  $100^\circ$  en  $2\theta$  par pas de  $0.0130^\circ$ .

Nous avons utilisé le logiciel "High Score Plus" pour indexer les pics de diffraction en lui indiquant les éléments ou les renseignements structuraux déjà connus pour faire une comparaison avec les valeurs théoriques répertoriées dans la base de données informatisée J.C.P.D.S (Joint Committee for Diffraction Standards).



Figure II-10 : Diffractomètre de type PANALYTICAL Empyrean.

### II-3-2-5- Micodureté Vickers

La dureté Vickers consiste à appliquer sur la surface de l'échantillon une force constante pendant un temps fixe à l'aide d'un poinçon très dur appelé pénétrateur. Ce dernier est de forme pyramide en diamant.

A l'aide d'un appareil optique, les deux diagonales du carré de l'empreinte laissée comme trace par le pénétrateur,  $d_1$  et  $d_2$ , sont mesurés (figure II-11). En effectuant la moyenne des deux diagonales, on obtiendra la valeur "d" utilisée pour le calcul de la dureté.

$$H_v = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

**H<sub>v</sub>**: Dureté Vickers [kgf mm<sup>-2</sup>];

**F** : Force appliquée [N];

**d**: Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm].

Pour convertir le kilogramme force (kgf) en Newton, on a l'équivalence suivante :

$$1 \text{ kg f} = 9,806 \text{ 65 N}$$

L'alliage a été préparé à l'avance par polissage mécanique et attaque chimique. Les mesures consistent en 5 tests sur des endroits différents de la surface de l'échantillon. La durée d'application sous une charge fixe de 200 g est de 10 secondes. La valeur moyenne des mesures représentera la microdureté Vickers du matériau testé.

Le microduromètre utilisé dans notre étude est de type INNOVATEST (figure II-12), équipé d'un système permettant une mesure automatique des deux diagonales de l'empreinte. La dureté Vickers est notée H<sub>v</sub>.

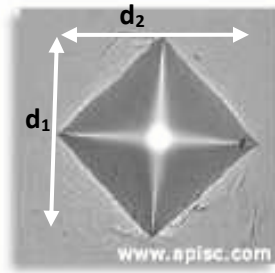


Figure II-11: Exemple d'une empreinte Vickers montrant la surface carrée projetée à la surface d'un matériau.

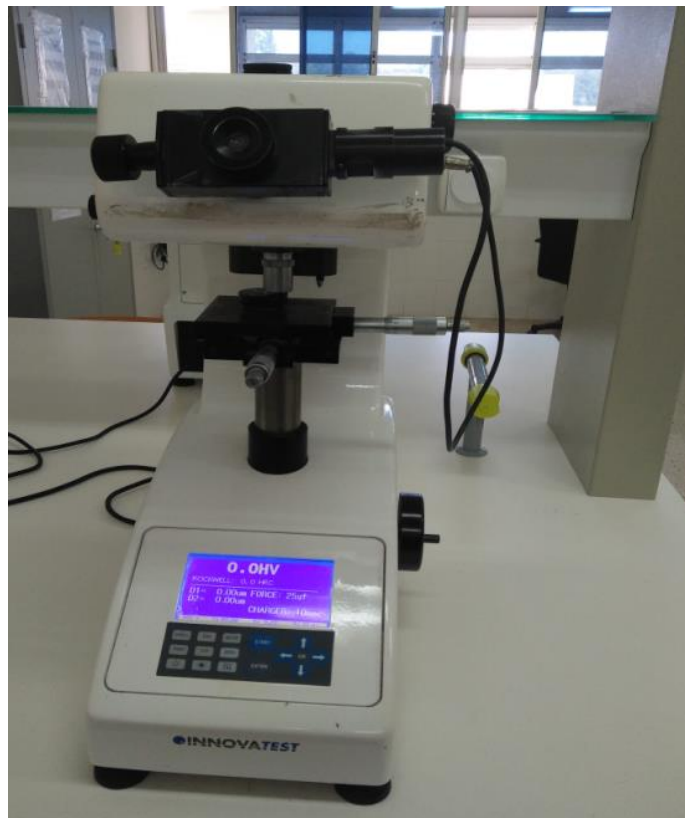


Figure II-12: Microduromètre de type INNOVATEST.

**Références bibliographiques du chapitre II**

[1]-N. P. Cheremisinoff, “Electromagnetic Induction Heating,” in *Electrotechnology*, 1–21, (1996).

[2]-S. Lupi, *Fundamentals of Electroheat*. (2017).

[3]-D. S. MacKenzie and G. E. Totten, *Analytical characterization of aluminum, steel, and superalloys*, (2006).

[4]-K. J. Murata, M. B. Norman, *American Journal of Science*, 276, 112-113, (1976).

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

## **Chapitre III- Résultats et discussions**

### **III-1- Microscopie optique (M.O)**

III-1-1- Observation par microscopie optique

### **III-2- Microscopie électronique à balayage (MEB)**

III-2-1- Observation par microscopie électronique à balayage

### **III-3- Diffraction des rayons X**

III-3-1- Identification structurale

III-3-2- Détermination du paramètre cristallin

III-3-3- Effet de l'addition du zinc sur le paramètre cristallin

### **III-4- Microdureté Vickers**

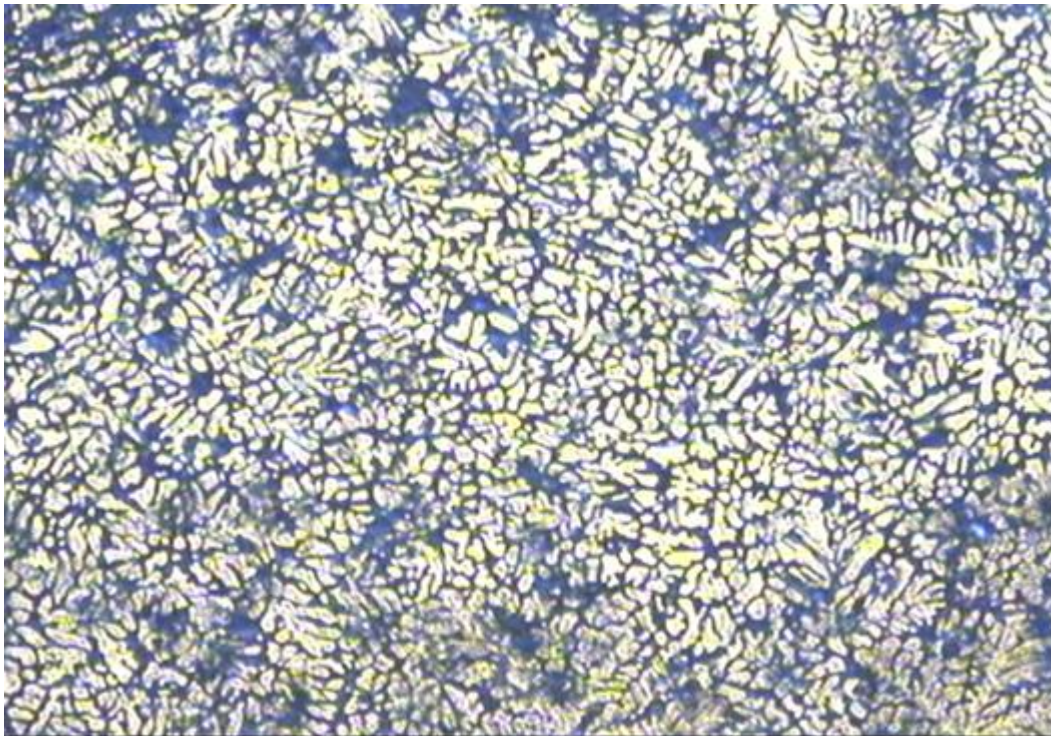
III-4-1- Microdureté et effet d'éléments d'addition

## **Références bibliographiques du chapitre III**

### III-1- Microscopie optique (M.O)

#### III-1-1- Observation par microscopie optique

La micrographie optique de l'alliage ternaire Al-50wt.%Zn-5wt.%Mg brut de fusion, représentée sur la figure III-1, montre clairement une structure dendritique colonnaire ramifiée en branches secondaires. Les espacements des bras primaires et secondaires des dendrites, ont été mesurés, à partir d'une micrographie optique à fort grossissement (X100) (figure III-2). Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau III-1.



III-1 : Micrographie optique de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg brut de fusion montrant une structure dendritique (X50).

Tableau III-1 : Mesures de l’espacement entre bras primaires et secondaires des dendrites.

Alliages	Espacement entre bras primaires $\lambda_P$ (en $\mu\text{m}$ )	Espacement entre bras secondaires $\lambda_s$ (en $\mu\text{m}$ )
Al-50%Zn-5%Mg	32.43	33.62

L’observation à plus forts grossissements (X 600) (figure III-3), permet de distinguer trois types de précipités:

- matrice  $\alpha$ -Al, représentant la dendrite, appelée aussi (Al), est une solution solide de zinc et de magnésium dans l'aluminium ;
- précipités de contraste sombre et clair occupants l’espacement interdendritique ;
- précipités intradendritique de forme sphéroïdale et bâtonnet réparties de manière hétérogène au sein des dendrites.

Généralement, la microstructure des alliages ternaires Al-Zn-Mg brut de fusion, est composée d'une solution solide  $\alpha$ -Al, une précipitation d'une phase T appelée  $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$  ainsi qu’un eutectique constitué de deux phases,  $\alpha$  et T, permettant la ségrégation de ces dernières aux joints de grains [1,2,3] .

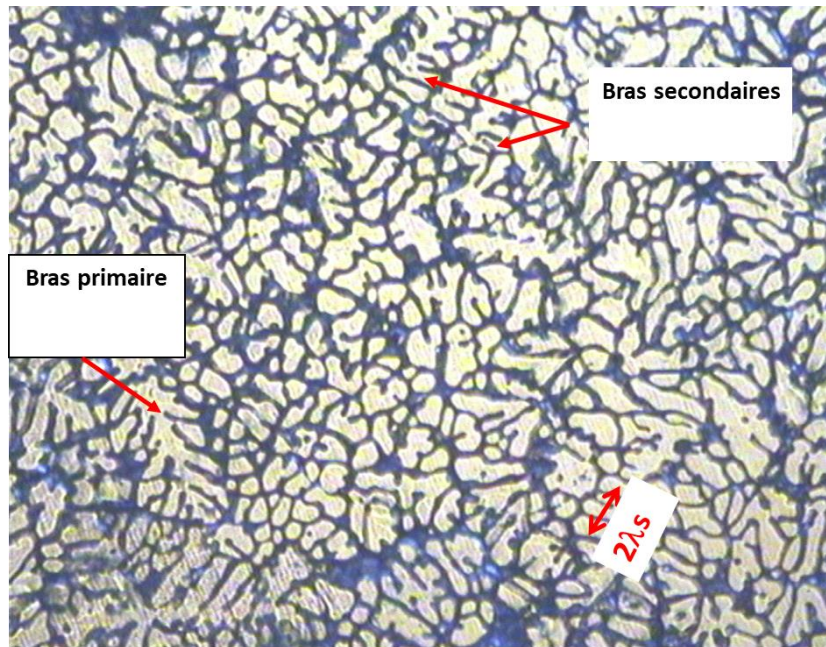


Figure III-2 : Micrographie optique de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg brut de fusion montrant les bras primaires et secondaires (X100)

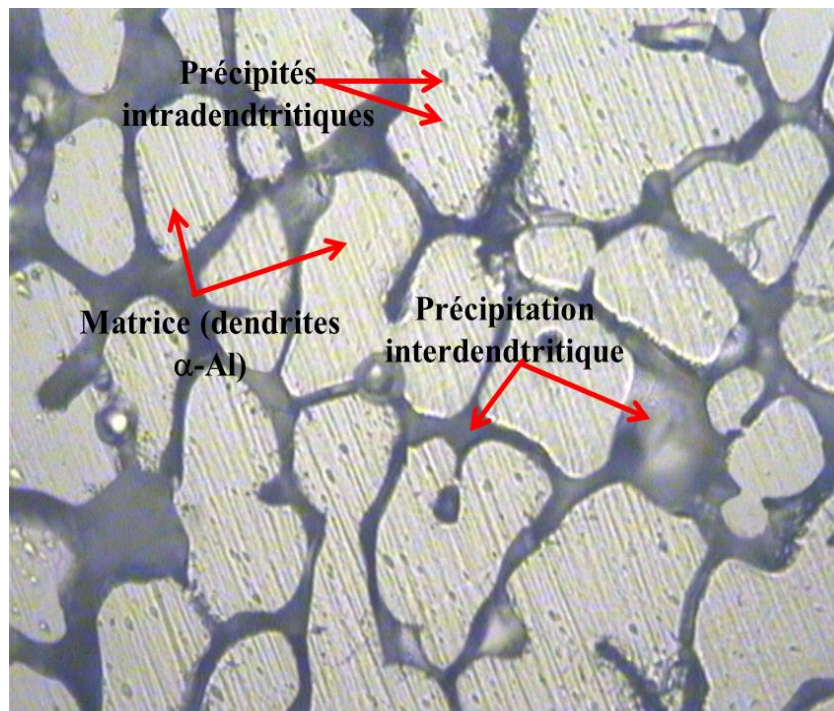


Figure III-3 : Micrographie optique de l'alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg montrant clairement les différents précipités (grossissement x600).

## III-2- Microscopie électronique à balayage (MEB)

### III-2-1- Observation par microscopie électronique à balayage

Afin de caractériser précisément et d'observer plus clairement la microstructure, nous avons utilisé la microscopie électronique à balayage. L'image de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg, réalisée par MEB en mode électrons rétrodiffusés (BSE), illustrée sur la figure III-4, montre la présence de quatre phases : matrice  $\alpha$ -Al en contraste gris clair, précipités de forme sphérique et bâtonnets en contraste sombre, précipités sphéroïdale en contraste clair et une précipitation interdendritique en contraste blanc.

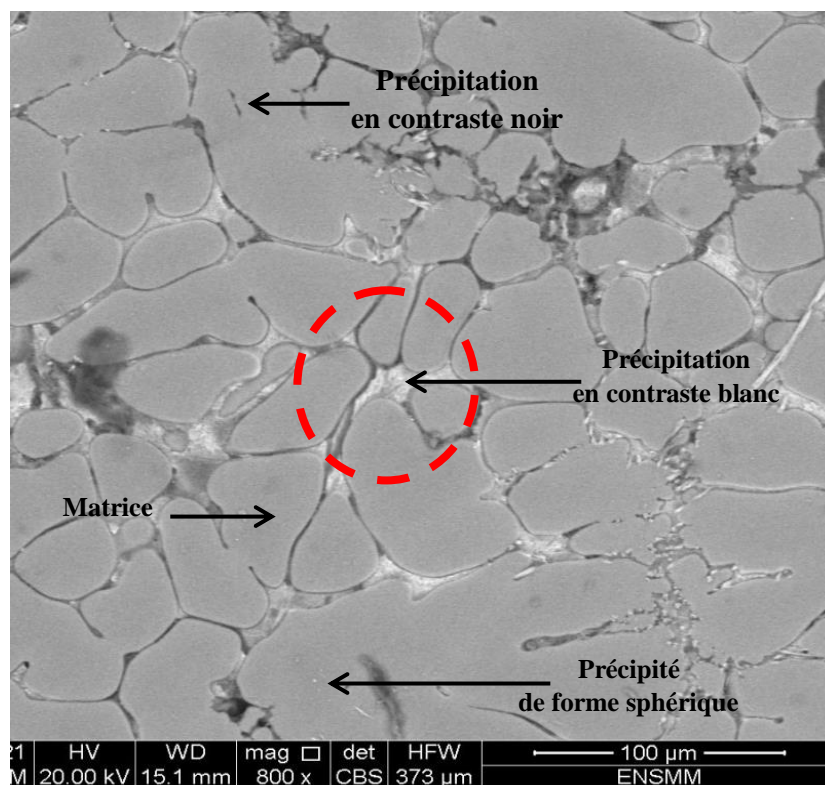


Figure III-4 : Micrographie MEB en mode électrons rétrodiffusés (BSE) montrant le contraste des phases existantes (grossissement x800).

Le grandissement de la zone sélectionnée en cercle rouge pointillé (figure III-4) est illustré sur la figure III-5. Cette dernière qui est une micrographie MEB en mode électrons secondaires, révèle la phase présente dans l'espace interdendritique. C'est un eutectique de morphologie lamellaire.

Des études ont confirmées que la phase dominante dans les alliages de type Al-Zn-Mg est la phase  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  [4]. D'autres part, un eutectique à contraste blanc, formé entre la matrice  $\alpha$  et la phase T, apparaît dans les régions inter-dendritiques [5,6].

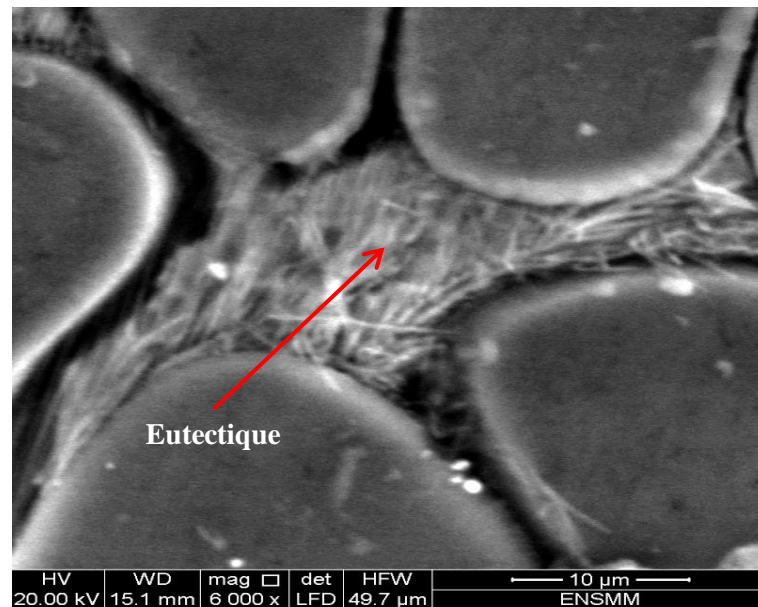


Figure III-5 : Micrographie MEB en mode électrons secondaires (SE) montrant l'eutectique (grossissement x6000).

### III-3- Diffraction des rayons X

#### III-3-1- Identification structurale

Le diffractogramme de diffraction des rayons X de l'alliage étudié (figure III-6) a été traité par le logiciel high score plus [7]. Ce dernier recherche les pics de diffraction, corrige la position des maxima d'intensités, soustrait le fond continu, élimine la contribution de la radiation  $K\alpha_2$  (si elle n'est pas éliminée) et lisse le spectre. Le logiciel high score plus prend en charge l'utilisation simultanée de plusieurs bases de données de référence des actuels aux anciens. En affichant les éléments de l'alliage étudié à ce logiciel, les phases présentes dans ce dernier peuvent être identifiées par comparaison avec une base de données.

Le diagramme de diffraction de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg indexé est représenté sur la figure III-7. Le zoom sur l'intervalle  $40^{\circ}$ - $55^{\circ}$  montre clairement les pics de faible intensité (figure III-8). L'alliage se compose de quatre phases : (Al) [8],  $Mg_{51}Zn_{19,84}$  [9],  $Mg_2Zn_{11}$  [10] ainsi que le composé  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  [11]. Toutes les distances interréticulaires mesurées par DRX sont rassemblées dans le tableau III-2 et comparées avec celles calculées à partir des données cristallographiques (fichiers JCPDS-ICDD).

La phase (Al) ou ( $\alpha$ -Al) est de structure cubique à faces centrées avec des paramètres cristallins :  $a = b = c = 4,0592 \text{ \AA}$  [8]. Le composé  $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  de structure cubique centré ( $a = b = c = 14,220 \text{ \AA}$  [11]), est appelée aussi phase T ou T- $Al_2Mg_3Zn_3$  [12].

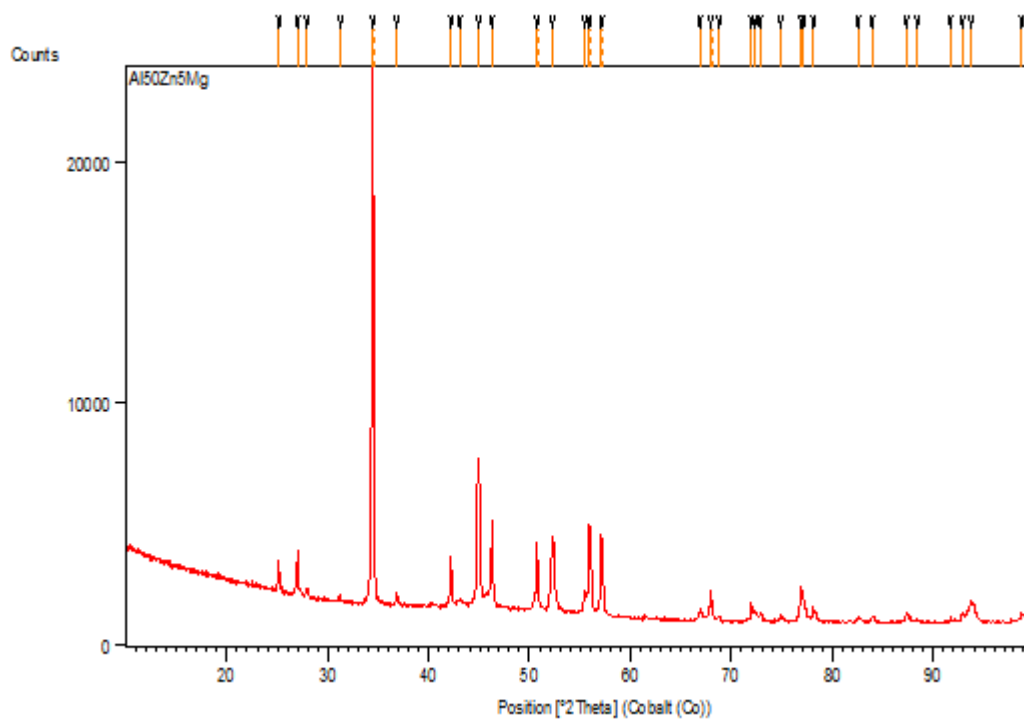


Figure III-6 : Diffractogramme de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg traité par le logiciel High score plus.

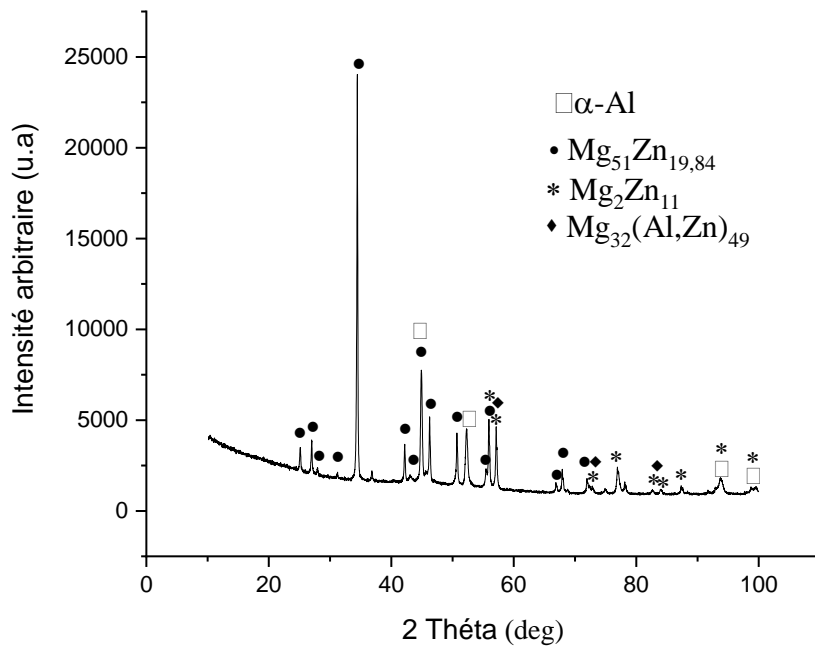


Figure III-7 : Spectre de diffraction des rayons X (DRX) de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg indexé.

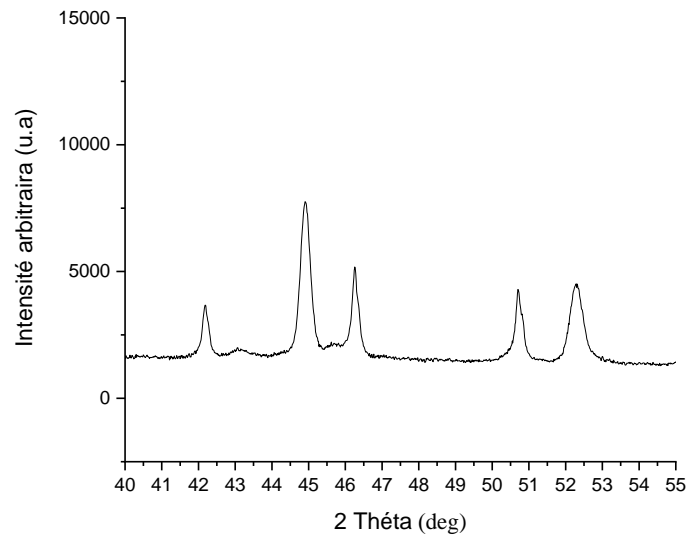


Figure III-8 : Diagramme de diffraction des rayons X de l'alliage étudié Représentant clairement les raies de faibles intensités.

La phase  $Mg_{51}Zn_{19,84}$  dont la stœchiométrie proche de  $Mg_{51}Zn_{20}$ , désignée classiquement par la phase «  $Mg_7Zn_3$  » [13] est de structure orthorhombique, avec des paramètres cristallins :  $a = 14,083 \text{ \AA}$ ,  $b = 14,486 \text{ \AA}$  et  $c = 14,025 \text{ \AA}$  [9]. La structure cristalline du composé  $Mg_2Zn_{11}$  est cubique avec  $a = b = c = 8,5520 \text{ \AA}$  [10]. Des études réalisées sur des alliages Al-Zn-Mg, côté riche en aluminium, ont montré que les phases observées dans ces derniers sont :  $\alpha$ -Al et  $Al_{32} (Mg, Zn)_{49}$  [14, 15].

Tableau III-2 : Tableau d'indexation des raies de diffraction des rayons X correspondant à l'alliage Al-50%Zn-5%Mg.

Phase identifiée	$2\theta^\circ$ mesurés	$2\theta^\circ$ calculés	Plan (hkl)	d [ $\text{\AA}$ ] mesurées	d [ $\text{\AA}$ ] calculées
$Mg_{51}Zn_{19,84}$ $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$	25,14	25,22 25,14	(222) (222)	4,11	4,10 4,11
$Mg_{51}Zn_{19,84}$ $Mg_2Zn_{11}$	27,00	27,01 27,05	(231) (210)	3,83	3,83 3,82
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	27,93	27,48	(312)	3,71	3,76
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	31,23	31,33	(303)	3,32	3,31
$Mg_{51}Zn_{19,84}$ $Mg_2Zn_{11}$	34,44	34,32 34,42	(332) (220)	3,021	3,03 3,023
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	34,53	34,54	(323)	3,020	3,012
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	42,18	42,20	(404)	2,48	2,48
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	43,08	43,14	(530)	2,43	2,43
$Mg_{51}Zn_{19,84}$ Al	44,92	44,99 44,88	(006) (111)	2,34	2,34 2,34
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	46,26	46,12	(260)	2,28	2,28
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	50,70	50,74	(631)	2,089	2,087
$Mg_{51}Zn_{19,84}$	50,84	50,91	(136)	2,088	2,081
Al	52,26	52,30	(200)	2,031	2,03

Mg <sub>51</sub> Zn <sub>19,84</sub>	55,44	55,54	(721)	1,922	1,922
Mg <sub>51</sub> Zn <sub>19,84</sub> Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	55,939	55,75 55,78	(264) (420)	1,907	1,91 1,91
Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub>	56,07	56,10	(642)	1,907	1,902
Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub>	57,12	57,18	(730)	1,870	1,87
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	57,26	57,25	(124)	1,871	1,866
Mg <sub>51</sub> Zn <sub>19,84</sub>	66,88	66,91	(572)	1,62	1,62
Mg <sub>51</sub> Zn <sub>19,84</sub>	68,09	68,03	(190)	1,60	1,60
Mg <sub>51</sub> Zn <sub>19,84</sub>	71,92	71,96	(390)	1,52	1,52
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub> Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub>	72,349	72,55 72,27	(440) (664)	1,515	1,51 1,517
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub> Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub>	76,91	76,46 76,995	(531) (941)	1,438	1,44 1,437
Al	77,11	77,11	(220)	1,435	1,435
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub> Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub>	82,576	82,83 82,55	(620) (10 31)	1,355	1,352 1,356
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	83,939	84,09	(045)	1,337	1,335
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	87,347	87,86	(622)	1,295	1,289
Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	92,896	92,88	(444)	1,23	1,23
Al Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	93,689	93,91 94,13	(311) (700)	1,226	1,223 1,22
Al Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>	98,718	99,52 99,18	(222) (027)	1,178	1,172 1,174

L'emplacement de la composition atomique de l'alliage étudié (Al-29%Zn-8%Mg) sur le diagramme de phase Al-Zn-Mg (figure III-9), correspond seulement à deux phases:  $\alpha$ -Al et Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub>. Bien que le composé MgZn<sub>2</sub> n'a pas été observée, deux autres phases ont été révélées par la diffraction des rayons X, à savoir, Mg<sub>51</sub>Zn<sub>19,84</sub> et Al<sub>32</sub> (Mg, Zn)<sub>49</sub>. Ces dernières peuvent être des phases hors équilibre obtenues lors du refroidissement rapide de l'alliage.

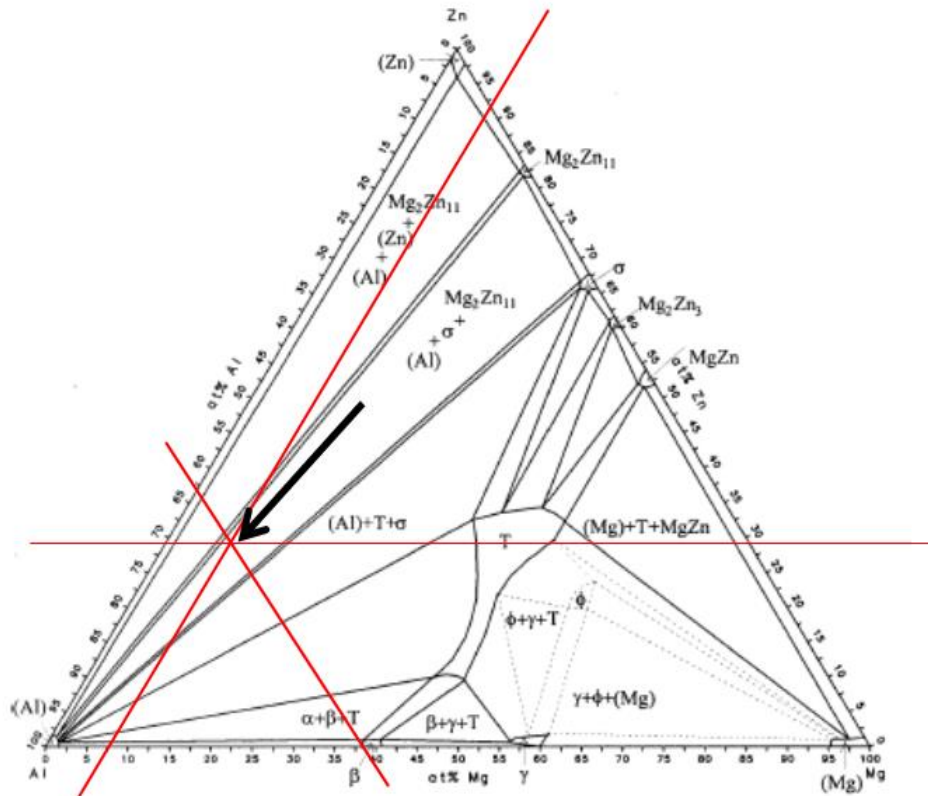


Figure III-9 : Coupe isotherme du diagramme ternaire Al-Zn-Mg à 25°C montrant la composition de l’alliage étudié [16].

### III-3-2- Détermination du paramètre cristallin

La solution solide de zinc et de magnésium dans l’aluminium est appelée (Al) ou  $\alpha$ -Al. Le paramètre de maille de cette dernière a été déterminé à partir des mesures des distances interréticulaires des raies disponibles (tableau III-3) et de la relation de Bragg :

$$2.d.\sin \theta = n\lambda$$

$$\text{Pour } n = 1, \quad d = \frac{\lambda}{2.\sin \theta}$$

Pour un système cubique :

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad \Leftrightarrow \quad a = d.\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

La valeur du paramètre de maille "a" expérimental calculé et comparé avec la valeur théorique répertoriée dans la base de données ASTM [7] est de  $4,064 \pm 0,005 \text{ \AA}$ .

Tableau III-3 : Tableau d'indexation des raies de diffraction des rayons X correspondant à la matrice (phase  $\alpha$ -Al).

$2\theta_{\text{mesuré}}$	$\theta_{\text{mesuré}}$	$d_{\text{hklmesuré}}$	(hkl)	$a_{\text{mesuré}}$ (en $\text{\AA}$ )	$a_{\text{moyenne}}$ (en $\text{\AA}$ )
44.92	22,46	2.34	(111)	4.0529	4,064
52.26	26,13	2.031	(200)	4.062	
77.11	38,55	1.435	(220)	4.0587	
93.689	46,84	1.226	(311)	4.066	
98.718	49,36	1.178	(222)	4.0807	

### III-3-3- Effet de l'addition du zinc sur le paramètre cristallin

Le paramètre cristallin de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg a été mesuré et comparé avec ceux de l'aluminium pur (pureté 99,0%) [17], l'alliage binaire Al-50%Zn [17] ainsi que l'alliage ternaire Al-10%Zn-5%Mg [18] élaborés par fusion HF. Le tableau III-4 rassemble ces mesures.

Tableau III-4 : Tableau de mesure du paramètre cristallin.

Alliages	Al pur	Al-50%Zn	Al-10%Zn-5%Mg	Al-50%Zn-5%Mg [Travail présent]
Paramètre cristallin mesuré « a » (en $\text{\AA}$ )	4,022	4,063	4,051	4,064

Le paramètre cristallin « a » mesuré de l'aluminium pur (de pureté 99,0%) est de 4,022 Å [17]. On remarque que cette valeur est faible par rapport à celle obtenue dans l'aluminium pur de pureté 99,99% (4,0412 Å [19]). L'addition de 50%Zn à ce dernier, augmente la valeur de « a » à 4,063 Å [17]. Il diminue à 4,051 Å dans l'alliage ternaire Al-10%Zn-5%Mg [18]. L'ajout de 5% Mg à l'alliage binaire Al-50%Zn n'influence pas la valeur de « a » (4,064 Å). On peut conclure que l'élément d'addition Zn a un effet sur le paramètre cristallin de la matrice (Al).

### III-4- Microdureté Vickers

#### III-4-1- Microdureté et effet d'éléments d'addition

L'alliage étudié a été préparé à l'avance par polissage mécanique et attaque chimique (réactif Keller). Quatre mesures de la microdureté sur différents endroits ont été réalisées (tableau III-5). La valeur moyenne obtenue est de l'ordre de 153,45 Hv.

La microdureté mesurée dans notre alliage a été comparée avec d'autres alliages élaborés par la même méthode de fusion "HF" (tableau III-6). La microdureté Vickers de l'aluminium pur est de 20 Hv [20]. Lorsqu'on ajoute 50% en zinc à ce dernier, la microdureté augmente à 49Hv [17]. On peut conclure que l'élément d'addition Zn améliore la dureté. L'ajout de 5%Mg à l'alliage binaire Al-50%Zn augmente brusquement la dureté à 153,45Hv. Les deux éléments Al et Zn forment uniquement une solution solide (Al) dans les alliages binaires Al-Zn, l'ajout du magnésium met en évidence la formation de plusieurs précipités qui sont responsables de ce durcissement.

D'autre part, la microdureté Vickers de l'alliage ternaire Al-5%Zn-5%Mg est de 107.9 Hv [21]. Elle atteint la valeur de 126,9 Hv dans l'alliage Al-30%Zn-5%Mg [22]. Si l'on compare ces deux valeurs avec celle obtenue dans l'alliage Al-50%Zn-5%Mg, on trouve que la valeur la plus élevée est obtenue dans notre alliage. Puisque la teneur en magnésium est constante (5%) dans les trois alliages ternaires, la microdureté est influencée seulement par la teneur en zinc.

Tableau III-5 : Tableau de mesure de microdureté de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg.

Mesures	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Moyenne
Microdureté en Hv	157	168,2	140,3	148,3	153,45

Tableau III-6 : Tableau de mesure de microdureté Vickers des alliages de références.

Alliage	Al pur	Al-50%Zn	Al-5%Zn-5%Mg	Al-30%Zn-5%Mg
Microdureté Vickers (Hv)	20	49	107,9	126,9

**Références bibliographiques du chapitre III**

- [1]-Kuznetsov, G. M., Barsukov, A. D, Krivosheeva, G. B and Dieva, E. G (1986):, Akad,Nayk, SSSR Met., 4, 198. Polmear, I.J. (1995): Light Alloys:Metallurgy of the Light Metals, 3rd Ed., Arnold Pub., London.
- [2]-Kilmer, R. J and Stonere, G. E (1991): ‘Light Weight Alloys for Aerospace Applications II, TMS, p 3.
- [3]-S. Gudic, I. Smoljko, S. Kliskie, Mater. Chem. Phys. 121 (2010) 561Phase Al (ou  $\alpha$ -Al) .
- [4]-A. Hernández, Á. Torres, S. Serna, J. Mayén, and B. Campillo, “Effect of experimental aging on the performance of Al-7.9Mg-13.3Zn and Al-10.5Mg-8.6Zn alloys as sacrificial anodes,” Metals (Basel)., vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2019, doi: 10.3390/met9080863.
- [5]-O. Alvarez, C. Gonzalez, G. Aramburo, R. Herrera, and J. A. Juarez-Islas, “Characterization and prediction of microstructure in Al-Zn-Mg alloys,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 402, no. 1–2, pp. 320–324, 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.05.022.
- [6]-S. Valdez, B. Mena, J. A. Juarez-Islas, and J. Genesca, “Evaluation of an Al-Zn-Mg-Li alloy/potential candidate as Al-sacrificial anode,” J. Mater. Eng. Perform., vol. 10, no. 5, pp. 596–601, 2001, doi: 10.1361/105994901770344755.
- [7]-T. Degen, M. Sadki, E. Bron, U. König, G. Nénert; The HighScore suite, Powder Diffraction, Volume 29, Supplement S2, December 2014, pp S13-S18.
- [8]-ASTM carte n° 01-089-2837.
- [9]-ASTM carte n° 03-065-4290.
- [10]-ASTM carte n° 03-065-1853.
- [11]-ASTM carte n° 00-019-0029.
- [12]-Socorro Valdez, M. Suarez, O.A. Fregoso and J.A. Juarez-Islas, J. Mater. Sci. Technol., 2012, 28(3), 255-260.
- [13]-I. Higashi, N. Shiotani, M. Uda, T. Mizoguchi, and H. Katoh, “The crystal structure of  $Mg_{51}Zn_{20}$  ” J. Solid State Chem., vol. 36, no. 2, pp. 225–233, 1981, doi: 10.1016/0022-4596(81)90161-4.
- [14]-J. Soto, J. Aramburo , C. Gonzalez et al., Distribution and prediction of solute in Al–Zn Mg alloys, Mater. Sci. Eng. A, 2005, p.303–308.

- [15]-A.A. Mazilkin, B. Baretzky, S. Enderset al, Hardness of Nanostructured Al–Zn, Al–Mg and Al–Zn–Mg Alloys Obtained by High-Pressure Torsion, Defect and Diffusion Forum, 249, 2006, p.155-160.
- [16]- H. Liang, S. L. Chen, and Y. A. Chang, “A thermodynamic description of the Al-Mg-Zn system,” Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., vol. 28, no. 9, pp. 1725– 1734, 1997, doi: 10.1007/s11661-997-0104-8.
- [17]-D. Lamrous, M. Y. Debili, and E. Boehm-Courjault, Microstructure and Phase Composition of Al–Zn Alloys, Journal of Advanced Microscopy Research 8, (2013), 266–269.
- [18]- Mohamed Ali Boutabba, Etude microstructurale de l’alliage Al-10%Zn-5%Mg solidifié rapidement, mémoire de Master de l’UBMA, (2020).
- [19]-G. E. Totten and D. S. MacKenzie, Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press, (2003).
- [20]-Imen Kherif, Effet de l’addition du magnésium sur la microstructure de l’alliage Al-5%Zn, mémoire de Master de l’UCBET, (2019).
- [21]-A.Bourbia, H.Bedboudi, M.Draissia, S.Boukhessaim, M.Y.Debili, Journal of X-Ray Science and Technology, 18, 201-219, (2010).
- [22]-Sarrah Harkati, Etude thermique et propriétés structurales des alliages Al-30%Zn et Al-30%Zn-5%Mg, mémoire de Master de l’UCBET, (2019).

# **Conclusion Générale**

# Conclusion générale

Cette investigation est une contribution à l'étude microstructurale des alliages Al-Zn-Mg élaborés par fusion HF. L'étude de l'alliage Al-50%Zn-5%Mg a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La microstructure de l'alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg solidifié rapidement par HF est dendritique ramifiée en branches secondaires. L'espacement mesuré entre les branches primaires et secondaires des dendrites a été également mesuré (32.43 $\mu$ m et 33.62 $\mu$ m successivement).
- La microscopie électronique à balayage (MEB) a révélé la présence de quatre phases de contraste différentes.
- La diffraction des rayons-X, nous a permis de confirmer les résultats obtenus par MEB et révéler les phases présentes dans l'alliage étudié :
  - $\alpha$ -Al de structure cubique à faces centrées ;
  - $Mg_{51}Zn_{19,84}$  de structure orthorhombique ;
  - $Mg_2Zn_{11}$  de structure cubique ;
  - $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  de structure cubique centré.
- Le paramètre cristallin « a » de l'alliage étudié a été mesuré et comparé avec d'autres alliages d'aluminium de compositions différentes. La valeur de « a » la plus élevée est obtenue dans l'alliage Al-50%Zn-5%Mg.
- Le paramètre cristallin augmente avec la composition en zinc.
- La mesure de la microdureté de notre alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg a été comparée avec celle de l'alliage binaire. La microdureté la plus élevée a été atteinte dans l'alliage ternaire. Ceci est dû à la présence de magnésium, qui a pour effet de former des précipités, qui sont à leur tour responsable de cette augmentation.
- la microdureté Vickers (HV) de l'alliage étudié a été comparée avec d'autres alliages ternaires de teneur en zinc différentes. La valeur la plus élevée a été obtenue dans notre matériau. Ceci confirme l'impact important du zinc sur la dureté de ces alliages.

## Annexe-Production Scientifique-

---

1st NATIONAL ONLINE CONFERENCE IN MATERIALS PHYSICS.



CNLPM'22 9 Juin 2022, Eltarf, ALGERIA



### Analyse microstructurale d'un alliage à base d'aluminium solidifié rapidement

Manar Haouili<sup>1\*</sup>, Douniazed Lamrous<sup>2</sup>, M.Yacine Debili<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LPCM Faculté des Sciences et de la Technologie UCBET, ElTarf, Algérie

<sup>2</sup> LM2S Faculté des Sciences UBMA, Annaba, Algérie

First Author e-mail address: manarhaouili@gmail.com

#### résumé:

Le présent travail a pour objectif d'étudier la microstructure de l'alliage ternaire Al-50%Zn-5%Mg solidifié rapidement par fusion haute fréquence (HF). Pour cela, plusieurs méthodes d'analyses ont été employées dans cette investigation: Microscopie optique (M.O), Microscopie électronique à balayage (MEB) et Diffraction des rayons X (DRX). La microstructure observée est dendritique ramifiée en branches secondaires. L'espacement interdendritique est occupé par la ségrégation d'une précipitation observée dans des alliages Al-Zn-Mg [1,2]. L'identification de cette dernière a été confirmée par le MEB et la DRX.

**Mots clés :** Microstructure, Alliages d'Al, Microscopie, DRX, Précipités.

#### References :

[1] O. Alvarez, C. Gonzalez, G. Aramburo, R. Herrera, and J. A. Juarez-Islas, "Characterization and prediction of microstructure in Al-Zn-Mg alloys," *Mater. Sci. Eng.* 402 (2005) 320-324.

[2] S. Valdez, B. Mena, J. A. Juarez-Islas, and J. Genesca, "Evaluation of an Al-Zn-Mg-Li alloy/potential candidate as Al-sacrificial anode," *J. Mater. Eng. Perform.* 10 (2001) 596-601.



CHADLI BENDJEDID UNIVERSITY  
SCIENCES AND TECHNOLOGY FACULTY  
MATERIALS PHYSICOCHEMISTRY LABORATORY



THE FIRST NATIONAL ONLINE CONFERENCE ON MATERIALS PHYSICS

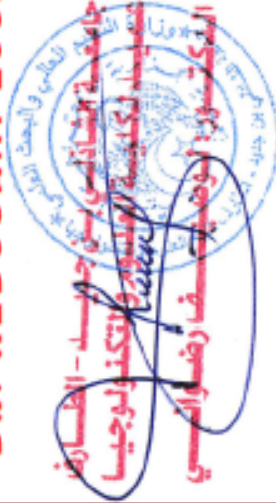
## CERTIFICATE

This certificate is awarded to **HAOUILI Manar** for the participation in "The first National Online Conference on Materials Physics" with an **ORAL** presentation entitled « **Analyse microstructurale d'un alliage à base d'aluminium solidifié rapidement** ».

**Co-authors:** Douniazed LAMROUS et Mohamed Yacine DEBILI

**Topic:** Structure and Magnetism of Materials.

**FACULTY DEAN  
DR. REDOUANI LOCIF**



DONE AT ELTARF ON  
JUNE 9, 2022

**CNLPM'22 PRESIDENT  
PR. TEBIB WASSILA**



**CNLPM 2022**  
9 JUNE, ELTARF-ALGERIA