



7

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**



**Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en génie  
mécanique**

**Option : génie des matériaux.**

**Thème : effet du Zn sur la microstructure et la  
résistance à l'usure d'un alliage (Al-Si-Cu)**

**Présenté par :**

**Bakouche Abdellah**

**Proposé et dirigé par :**

**Mr. YASSINE NEMRI.**

**Année universitaire : 2020/2021**

# Dédicace

**Je dédie ce travail a :**

**Ma chère maman**

**Mon cher père**

**Ma chère arya**

**A ma chère belle famille**

**A tous mes amis de l'Université et en dehors de l'Université**

## ***Remerciements :***

**Je tenais à remercier Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté et du courage pour réaliser ce modeste travail.**

**Mes sincères gratitudee à M. NEMRI YACINE pour la qualité de son enseignement, et surtout pour ses conseils et son intérêt incontestable qu'il porte à tous les étudiants.**

**Nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe de laboratoire (UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA) pour leur patience, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portés à nos travaux, spécialement Mr HADDAD ADEL et Mr Saber je remercie tous les professeurs, du département mécanique et monsieur Tamar Mustapha**

## **Liste des tableaux :**

Tableau (1) Carte d'identité de l'aluminium

Tableau (2) d'alliages d'aluminium pour le corroyage

Tableau (3) alliages d'aluminium pour la fonderie

Tableau (4) Différente famille d'alliage de l'aluminium de fonderie

Tableau (5) Composition chimique des échantillons.

Tableau (6) l'essai des échantillons avant le traitement thermique,

Tableau (7) l'essai des échantillons après le traitement thermique

## Liste des figures :

- Figure (1) : Un schéma représente les étapes de l'élaboration comment on obtient l'aluminium.
- Figure (2) : désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie.
- Figure (3): Variations des degrés et types de modification eutectique aluminium-silicium .
- Figure (4): La morphologie de la phase intermétallique  $\alpha$ -AlFeSi visualisée en a) 2D ( $\alpha$  en blanc brillant, ) ; et b) 3D (reconstruction basée sur la tomographie FIB ;  $\alpha$  en magenta
- Figure (5) : (a) Phase Q se développant à partir de la phase Al<sub>2</sub>Cu ; (b) Spectroscopie à dispersion d'énergie correspondant à la phase Q de (a).
- Figure (6) : (a) Phase intermétallique  $\beta$ -AlFeSi visualisée en 2D et (b) visualisation tridimensionnelle des plaques  $\beta$  à l'aide de la tomographie à rayons X synchrotron
- Figure (7) : diagramme de phases de l'alliage Al-Si
- Figure (8): Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C0 .
- Figure (9) : les alliages d'aluminium avant la fusion.
- Figure (10) : Le four utilisé pour le traitement thermique NABERTHERM.
- Figure (11) : le creuset en graphite utilisé et les moules a cylindre ouvert en acier.
- Figure (12) : les différents échantillons préparés.
- Figure (13) : Polisseuse d'abrasion.
- Figure (14) : polisseuse de finition.
- Figure (15) : le gel diamant.
- Figure (16) : L'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) .
- Figure (17) : Microscope optique (EUROMEX).
- Figure (18) : le d'uromètre utilisé INNOVATEST.
- Figure (19) : Le four (NABERTHERM) en mise en solution.
- Figure (20) : Le cycle de différents traitements thermiques d'échantillons.
- Figure (21) : Le tribomètre (ANTON PAAR).
- Figure (22) : microstructure d'échantillon Z1 grossissement X50 avant traitement thermique.
- Figure (23): Microstructure d'échantillon Z1 grossissement x50 après TT
- Figure (24) : Echantillon Z3 avant le traitement thermique.
- Figure (25) : Echantillon Z3 avant le traitement thermique.
- Figure (26) le graphe de la dureté Avant traitement thermique.
- Figure (27) le graphe de la dureté Après traitement thermique .
- Figure (22) : Echantillon Z3 avant le traitement thermique.
- Figure (23) : Echantillon Z3 avant le traitement thermique.
- Figure (24) le graphe de la dureté Avant traitement thermique.
- Figure (25) le graphe de la dureté Après traitement thermique.

## **Chapitre 1 : Généralité sur les alliages d'aluminium**

- 1 l'aluminium
- 1.2 Propriété principales
- 1.3 Les étapes de l'élaboration comment on obtient l'aluminium
- 1.4. Les alliages d'aluminium
  - 1.4.1 Les alliages d'aluminium pour corroyage
  - 1.4.2 Les alliages d'aluminium pour fonderie
- 1.5. Désignation
- 1.6 élément d'adition
  - 1.6.1 Aluminium-Cuivre
  - 1.6.2 Aluminium-Silicium
  - 1.6.3 Aluminium-étain
  - 1.6.4 Aluminium-Zinc
  - 1.6.5 Aluminium-magnésium
  - 1.6.6. Aluminium-Manganèse
- 1.7. Microstructure des alliages d'aluminium de fonderie
- 1.8. Silicium eutectique
- 1.9 Phases intermétalliques
  - a) la phase  $\alpha$  -Fe :
  - b) La phase  $\beta$ -Fe
- 2 Diagrammes de phases de l'alliage de Al-Si
  - 2.1 Le liquidus
  - 2.2 Le solidus

## **Chapitre 2 : Traitement thermique**

- 1 Désignation
- 2 Traitement thermiques des alliages d'aluminium de fonderie
- 3. Le durcissement structural
  - 3.1. Mise en solution
  - 3.2. La trempe
  - 3.3 Le vieillissement
    - 3.3.1 Vieillissement naturel
    - 3.3.2 Vieillissement artificiel
- 4 Durcissement par adition
- 5 L'état de l'art sur l'effet de la teneur en Zn sur les propriétés mécaniques des alliages (Al-Si-Cu)

## **Chapitre 3 : PROCEDURES EXPERIMENTALES**

- 1.Introduction
- 2.La préparation des échantillons étudiés
- 3.la composition chimique
4. Le polissage
  - 4.1. Polissage abrasion
  - 4.2. Polissage de finition
- 5.microscope optique
- 6.l'essai de dureté
7. Les traitements thermiques
  - 7.1. Mise en solution
  - 7.2. La trempe
  - 7.3. Le vieillissement artificiel
8. Tribologie
  - 8.1. L'usure
  - 8.2. le frottement
9. PROCEDURE EXPERIMENTALE

## **CHAPITRE4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

- 1.Dureté
- 2.Tribologie

## Introduction

Les alliages d'aluminium de fonderie sont largement employés dans l'industrie pour diverses applications.

Dans notre travail nous nous intéressons aux alliages Al-Si.

Les caractéristiques microstructurales et les propriétés mécaniques des alliages de fonderie dépendent de plusieurs facteurs tels que la composition chimique des alliages, la vitesse de solidification, le procédé de moulage et les traitements thermiques.

Ce travail a pour but d'étudier les modifications de la microstructure et la variation de propriétés mécaniques tel que la dureté en fonction de la composition des alliages traités et de traitement thermique appliqué, pour cela quatre alliages avec différentes compositions ont été étudié (Z1(0.03), Z2(0.4), Z3(1.46), Z4(3.14) en fonction de masse).

Pour étudier l'effet Zn sur la microstructure et la résistance à la l'usure d'un alliage (Al-Si-Cu).

# Chapitre 1

- **Généralité sur les alliages d'aluminium**

## 1 l'aluminium

L'**aluminium** est l'élément chimique de numéro **atomique 13**, de symbole Al. Il appartient au groupe **13 du tableau périodique** ainsi qu'à la famille des métaux pauvres.

**Masse atomique (26.9811539u), Configuration électronique : [Ne] 3s<sup>2</sup>3p** l'aluminium est un métal **malléable, argenté**, peu altérable à l'air et peu dense. **Légèreté L'aluminium est un métal très léger** dont la densité spécifique **est de 2,7 g/cm<sup>3</sup>**, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm<sup>3</sup>) ou du cuivre (**8,96 g/cm<sup>3</sup>**) **Point de fusion 658°C en 1821 découverte** du minerai (**France – Baux-de-Provence**) Le minéralogiste et ingénieur français **Pierre Berthier (1782 – 1861) [1]**. analyse un minerai des environs des Baux-de-Provence et identifie une forte teneur en alumine En **1825**, le chimiste et physicien danois Hans Christian Ørsted réussit à produire une forme impure du métal **[2]**.

Pourtant, à l'état naturel, on ne le retrouve jamais tel quel, ce qui explique sa découverte tardive. Il est en effet systématiquement combiné à d'autres éléments sous la forme de minerais divers. Le plus courant est **la bauxite**, dont on extrait l'alumine.

**L'aluminium est** le métal le plus abondant de l'écorce terrestre. ... La plus haute concentration d'oxyde d'aluminium se trouve dans la bauxite. L'alumine est extraite de la bauxite. Au moyen d'un bain **électrolytique, 1 kg d'aluminium** pur est obtenu avec **1,9 kg d'alumine**.

L'aluminium est très résistant à la corrosion et permet ainsi de réaliser des ouvrages dont l'entretien sera minimal. Il importe toutefois de sélectionner correctement les alliages ainsi que les méthodes d'assemblage pour assurer le maximum de sa durabilité.

Bien que léger et malléable, l'aluminium est particulièrement résistant. Il est souvent très surprenant de voir à quel point une structure très légère peut être capable de soulever plusieurs fois son propre poids, et résister à des **contraintes mécaniques et environnementales très sévères**.

L'aluminium et ses alliages **s'usinent avec facilité** à condition de prendre quelques précautions aux Grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés.

L'aluminium est **protégé naturellement contre la corrosion** et imperméable ce qui permet de l'utiliser à l'extérieur sans problème. C'est un métal qui a une bonne conductivité thermique et électrique, utile pour transmettre de la chaleur ou de l'électricité. Selon son épaisseur en l'utilise dans plusieurs domaines **[3]**.

- 1) Les lignes électriques .
- 2) Immeubles de grande hauteur.
- 3) Cadres et fenêtre.
- 4) Electronique grand public.
- 5) Appareils ménagers et industriels.
- 6) Automobile.
- 7) Composants de l'engin spatial.
- 8) Navires.
- 9) L'emballage.

Symbole	<b>AL</b>
Numéro Atomique	13
Masse molaire atomique	27g.mol <sup>-1</sup>
Température de fusion	660°C
Point d'ébullition	2056°C
Densité	2,7
Résistivité électrique	2,7.10 <sup>-8</sup> ohm.m
Conductivité thermique	22 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Capacité thermique massique	9.10 <sup>2</sup> J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup>
Système cristallin	Cubique a face centrée
Coefficient de dilatation	24.10 <sup>-6</sup> .°K <sup>-1</sup>
Module d'élasticité	69 000 MPa

**Tableau (1) : Carte d'identité de l'aluminium [4].**

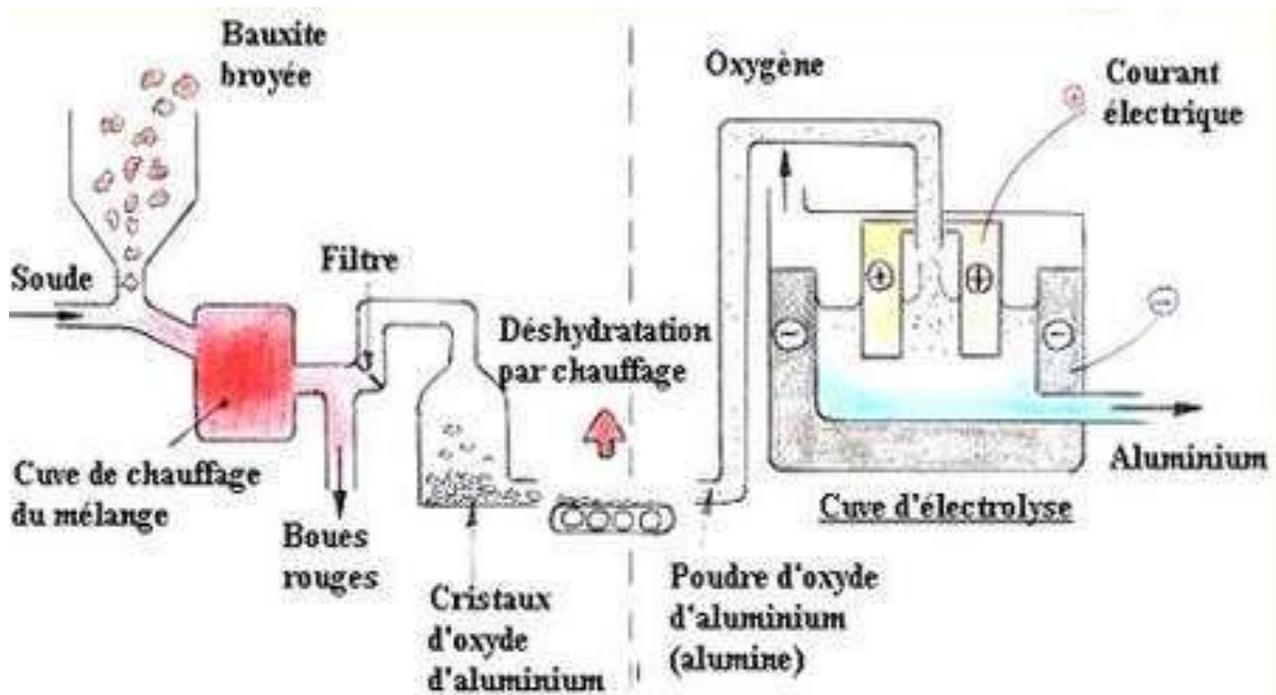
## 1.2 Propriété principales

- 1) Légèreté
- 2) résistance a la corrosion
- 3) conductivité thermique et électrique
- 4) malléabilité
- 5) recyclable

## 1.3 Les étapes de l'élaboration comment on obtient l'aluminium

La bauxite est attaquée par de **la soude**, à haute température et sous forte pression. L'aluminate de sodium, est débarrassé de ses impuretés, puis diluée et refroidie, ce qui provoque la précipitation **d'oxyde d'aluminium hydraté**.

Une poudre blanche, (**l'alumine**), est ensuite récupérée ensuite l'étape final l'électrolyse, (**l'alumine**), soumise à un courant continue réduite à **l'aluminium fondue** pure à **99.99%** le bain **électrolytique** empêche sans oxydation Figure (1).



**Figure (1) :** Un schéma représente les étapes de l'élaboration comment on obtient l'aluminium

## 1.4 Les alliages d'aluminium

Un alliage d'aluminium est une composition chimique où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur afin d'améliorer ses propriétés.

On distingue deux types d'alliages d'aluminium pour le **corroyage** et la **fonderie** en fonction du procédé de mise en œuvre utilisé.

**1.4.1 Les alliages d'aluminium pour corroyage :** sont des alliages à base d'aluminium destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de **forge** (**laminage, filage, matriçage, forge, etc.**).

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

Tableau (2) :

d'alliages d'aluminium pour le **corroyage**

**1.4.2 Les alliages d'aluminium pour fonderie** :sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, destinés à être transformés par des techniques de **fonderie**. Ils sont souvent nommés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 10000	1XXXX	<b>99 % d'aluminium au minimum</b>	-
Série 20000	2XXXX	Cuivre (Cu)	Al <sub>2</sub> Cu - Al <sub>2</sub> CuMg
Série 30000	3XXXX	Manganèse (Mn)	Al <sub>6</sub> Mn
Série 40000	4XXXX	Silicium (Si)	-
Série 50000	5XXXX	Magnésium (Mg)	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>
Série 60000	6XXXX	<b>Magnésium (Mg) et Silicium (Si)</b>	
Série 70000	7XXXX	Zinc (Zn)	MgZn <sub>2</sub>
Serie 80000	8XXXX	Etain (sn)	

Tableau (3) alliages d'aluminium pour la **fonderie**

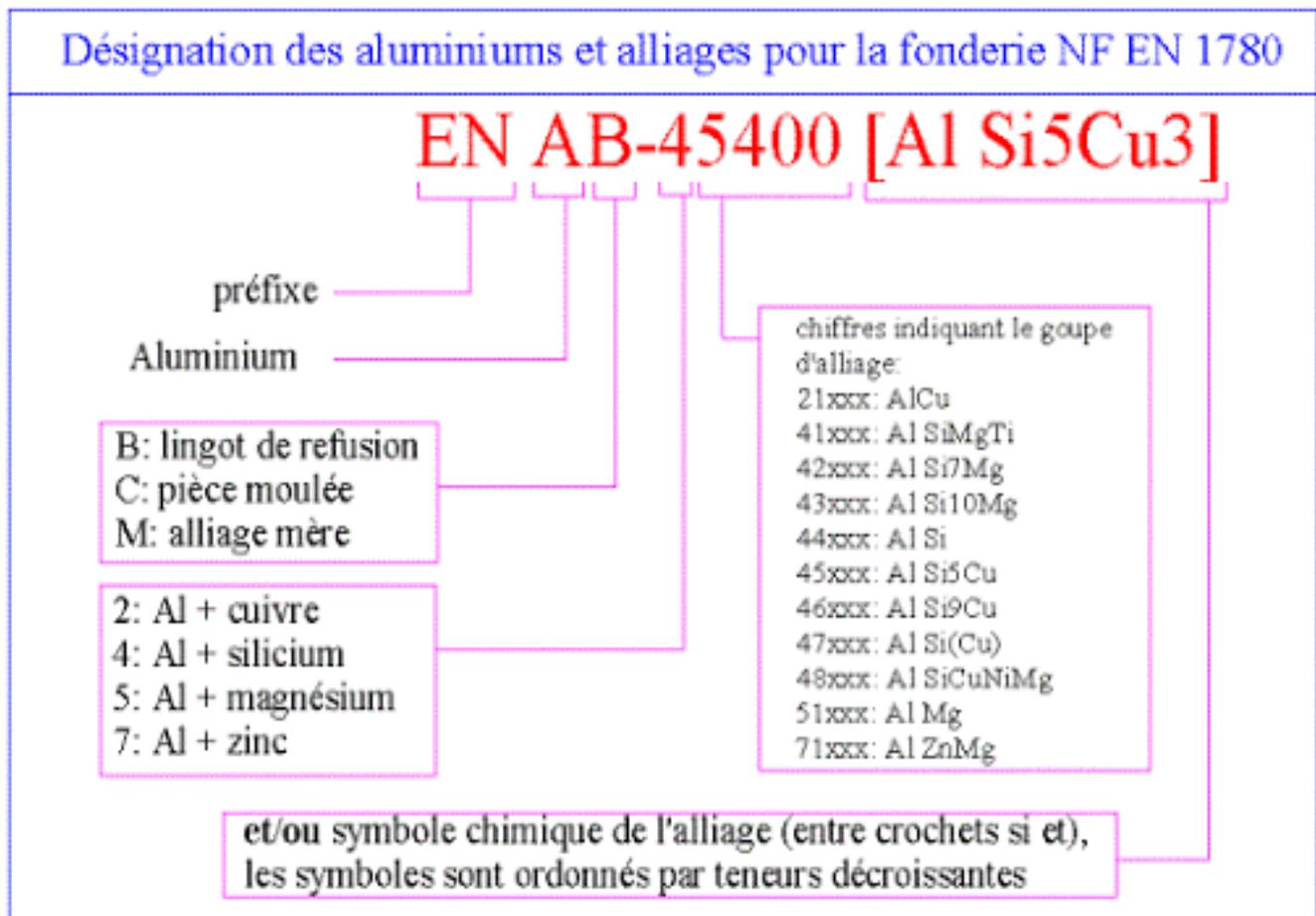
**La série 10000 et 60000 ne s'applique pas on moulage**

◆ D  f  rente famille d'alliage de l'aluminium de fonderie

Groups d'alliages		
Designation	Famille	Example
21xxx	AlCu	21100
41xxx	AlSiMgTi	41000
42xxx	AlSi7Mg	42200
43xxx	AlSi10Mg	43200
44xxx	AlSi	44100
45xxx	AlSi5Cu	45400
46xxx	AlSi9Cu	46500
47xxx	AlSi(Cu)	47000
48xxx	AlSiCuNiMg	48000
51xxx	AlMg	51200
71xxx	AlZnMg	71000

**Tableau (4) :** D  f  rente famille d'alliage de l'aluminium de fonderie

## 1.5. Désignation



**Figure (2) :** désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie

### Désignation complète

Les normes prévoient que la désignation numérique ou symbolique soit précédée par :

- EN qui signifie que l'appellation est conforme aux normes européennes
- la lettre A (aluminium)
- une lettre représentant la forme du produit :
  - B : lingot
  - C : pièce moulée
  - M : alliage mère (alliage qui sera réutilisé pour l'élaboration d'autres alliages pour fonderie ou **écrouissage**)

Exemple:

- EN AC-21000
- EN AC-Al Cu4MgTi

Représentent un alliage de fonderie base aluminium conforme aux normes CEN comportant entre autres 4,20 à 5,0 % de cuivre, 0,15 à 0,35 % de magnésium et 0,15 à 0,30 % de titane (voir [composition complète](#)).

La désignation complète est assez peu utilisée.

## **1.6 élément d'addition [5].**

### **1.6.1 Aluminium-Cuivre**

Les alliages aluminium-cuivre ont été largement utilisés dans les coulées et forme forgée où la force et la ténacité sont requises.

Celles-ci les alliages présentent une résistance et une dureté élevées à la pièce et élevées les températures.

Les premiers alliages de coulée d'aluminium significatifs contenaient du cuivre à concentrations jusqu'à 10% .

Sans aucune compréhension du traitement thermique, ces alliages présentaient des résistances nettement améliorées et des nécessités à l'état tel que coulé Le cuivre réduit généralement la résistance à la corrosion générale et dans des compositions et des matériaux spécifiques les conditions augmentent la sensibilité à la corrosion sous contrainte.

Inversement, faible les concentrations de cuivre dans les alliages aluminium-zinc inhibent les contraintes corrosion.

L'argent accélère le vieillissement rapide et réduit le risque de corrosion sous contrainte. Le cuivre réduit la résistance à la déchirure à chaud et augmente le potentiel de rétrécissement inter dendritique.

Les alliages aluminium-cuivre se moule male mais se usine bien par contre le silicium améliore la coulabilité et réduit la brièveté à chaud.

**Mauvaise coulabilité. ■**

**Usinage facile ■**

**Mauvaise tenue a la corrosion ■      Re = 180 a 200 Mpa ■**

### 1.6.2 Aluminium-Silicium

Aluminium-Silicium Les alliages binaires aluminium-silicium présentent une excellente fluidité, capacité et résistance à la corrosion.

Ces alliages présentent une faible résistance et une mauvaise usinabilité.

La ductilité, qui peut être exceptionnelle, est une fonction des faibles concentrations d'impuretés et des caractéristiques microstructurales.

La résistance, la ductilité et la coulabilité de l'aluminium hypo eutectique les alliages aluminium-silicium peuvent être encore améliorés par la modification de l'eutectique aluminium-silicium.

Des taux de solidification plus élevés favorisent également une microstructure eutectique non modifiée.

Les alliages aluminium-silicium présentent une faible densité et un coefficient d'effluent de dilatation thermique.

La présence de silicium rend l'aluminium très fluide et démunie sa température de fusion ( $T_f$  peut passer de  $660^{\circ}\text{C}$  à  $577^{\circ}\text{C}$ ) très apprécié au secteur de l'automobile.

**Coulabilité exceptionnelle.  $R_e = 70$  a  $210$  Mpa ■**

### 1.6.3 Aluminium-étain

Aluminium-étain L'étain est le principal élément d'alliage dans les compositions développées pour applications de roulement.

Il a également été utilisé avec du bismuth, du plomb, et cadmium à des concentrations plus faibles pour fournir un usinage libre Propriétés.

Les alliages de la série 850 peuvent souvent être remplacés par 660 ou bronzes similaires.

Leur poids léger minimise les charges et la dissipation thermique améliorent la durée de vie des roulements.

Les alliages contenant 5,0 à 7,0% Sn sont largement utilisés dans les roulements et coussinets dans les quels faible frottement, résistance à la compression, fatigue la résistance et la résistance à la corrosion sont des critères importants.

Le silicium est ajouté pour améliorer la coulabilité, réduire la chaleur la brièveté et augmenter la limite d'élasticité en compression.

Les alliages aluminium-étain sont uniques parmi les compositions l'aluminium et l'étain sont essentiellement non miscibles.

Les alliages aluminium-étain contenant du cuivre sont capitation durci et peut être entièrement traité thermiquement.

Parce que la plupart des roulements sont moulés dans des formes cylindriques simples pleines ou creuses, des pièces peut-être plastiquement travaillé à froid pour améliorer le rendement en compression force.

La solidification et les contraintes thermiques sont également soulagées par compression axiale entraînant une déformation permanente de 4%.

Étain L'étain est efficace pour améliorer les caractéristiques antifriction et est donc utile dans les applications de roulements.

Les alliages de coulée peuvent contenir jusqu'à 25% Sn les ajouts d'étain améliorent également l'usinabilité.

### **Bonnes propriétés au frottement.**

#### **1.6.4 Aluminium-Zinc**

Le zinc n'offre aucun avantage significatif dans le moulage d'aluminium.

Accompagne par l'addition de cuivre et / ou de magnésium, cependant, le zinc donne des compositions attrayantes traitables thermiquement ou vieillissant naturellement.

Un certain nombre de telles compositions sont couramment utilisées. Le zinc est aussi que l'on trouve couramment dans les compositions.

Dans ces alliages, une tolérance jusqu'à 3% de Zn permet l'utilisation de Débris d'alliage de qualité inférieure Alliages à usage général.

Aluminium-Zinc-Magnésium de nombreux alliages de ce type vieillissent naturellement, atteignant leur pleine résistance dans les 20 à 30 jours à température ambiante après la coulée.

Généralement pas nécessaire pour le développement immobilier. La solidification rapide de ces alliages peut entraîner une micro ségrégation de phases magnésium-zinc qui réduit le potentiel de durcissement.

Ces alliages présentent généralement une résistance à la traction modérée à bonne cravates à l'état tel que moulé.

Les températures de fusion des alliages de ce groupe sont élevées, un avantage dans les pièces moulées à braser.

L'usinabilité et la résistance à la corrosion générale sont généralement bonnes. La chimie de la plupart des alliages est contrôlée pour minimiser les contraintes. susceptibilité à la corrosion. La



### **1.6.6. Aluminium-Manganèse**

Manganèse Normalement considéré comme une impureté dans les compositions de moulage, l'homme le manganèse est contrôlé à de faibles niveaux dans la plupart des compositions.

Le manganèse est un élément important de l'érouissage. alliages corroyés à travers lesquels les compositions de fonderie secondaires peut contenir des niveaux de manganèse plus élevés. En l'absence de travail durcissant, le manganèse n'offre aucun avantage significatif dans l'aluminium coulé. les alliages contenant plus de 0,5% de Mn peut influencer de manière bénéfique la solidité interne

Le manganèse peut également être utilisé pour modifier la réponse dans la finition chimique.

Le fer et le manganèse peuvent être considérés comme isomorphes, et la chimie de l'alliage peut refléter des stœchiométries favorisant le moins de phases Al-Fe-Mn insolubles expérimentales.

**Tre peu utilise. Résiste à la corrosion.**

**Mauvais coulabilité.**

**Très bonne tenue on chaud.**

### **1.7. Microstructure des alliages d'aluminium de fonderie [6].**

Les caractéristiques microstructurales sont des produits de la chimie des métaux et conditions de solidification.les caractéristiques microstructurales, à l'exclusion les défauts, qui affectent le plus fortement les propriétés mécaniques sont :

- Taille, forme et distribution des phases intermétalliques.
- Espacement des bras de dendrite.
- Taille et forme du grain.
- Modification eutectique et raffinement de la phase primaire Phases intermétalliques.

## **Espacement des bras de dendrite (EDBDD)**

L'espacement des bras dendritiques secondaires est la distance linéaire entre deux des dendrites secondaire (ou bras)  $\alpha$ -Al.

Comme ce (EDBDD) est régie par les conditions de solidification.

Il fournit donc une mesure directe de la vitesse de solidification.

Plus les vitesses de solidification sont grandes plus l'espacement est fin ce qui fournit de meilleures propriétés mécaniques [ 7].

En général les propriétés mécaniques des pièces moulées en aluminium ont tendance à corrélérer mieux avec l'espacement des bras dendritiques que la taille de grain. [8].

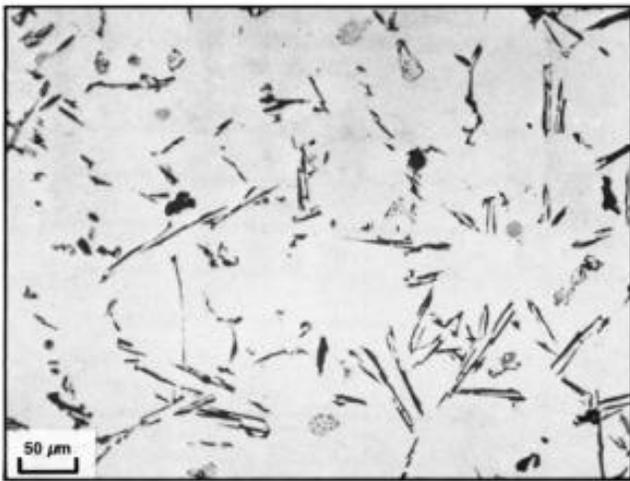
### **1.8. Silicium eutectique**

Silicium eutectique présente une structure a gros grains semblable une plaque dans laquelle les plaques secondaires servent de concentrateurs de contraintes et de fournissent des plans de faiblesses. les deux peuvent être combines pour améliorer la résistance a l'initiation des fissures et leur propagation. la morphologie du silicium eutectique peut être modifiée par l'ajout de petites quantités de Na ou Sr à l'état fondu alors que la modification peut être obtenu par l'augmentation de la vitesse de solidification [8].

Le calcium, le sodium, le strontium et l'antimoine sont connus pour influencer le degré d'eutectique modification qui peut être réalisée lors de la solidification.

Le sodium est sans doute le modificateur le plus puissant, mais ses effets sont Transitoires en raison de l'oxydation et des pertes de pression de vapeur. [9].

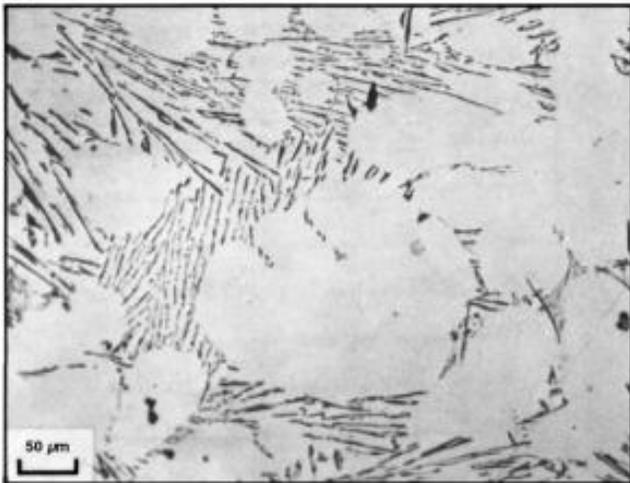
Graphique (fig 4) illustre les variations du degré de modification obtenues par des ajouts modificateurs



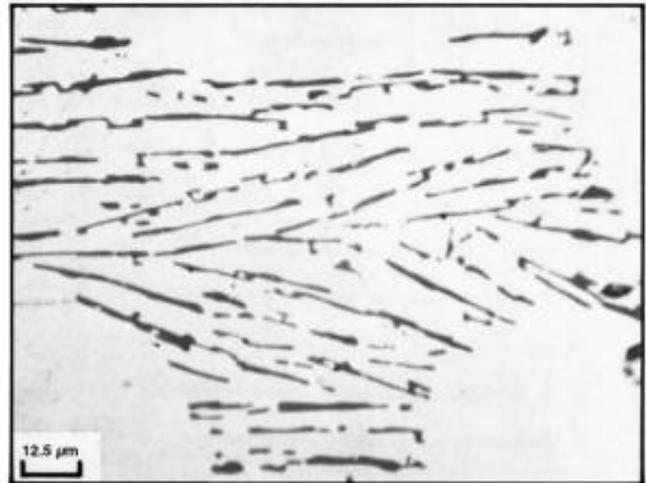
(a)



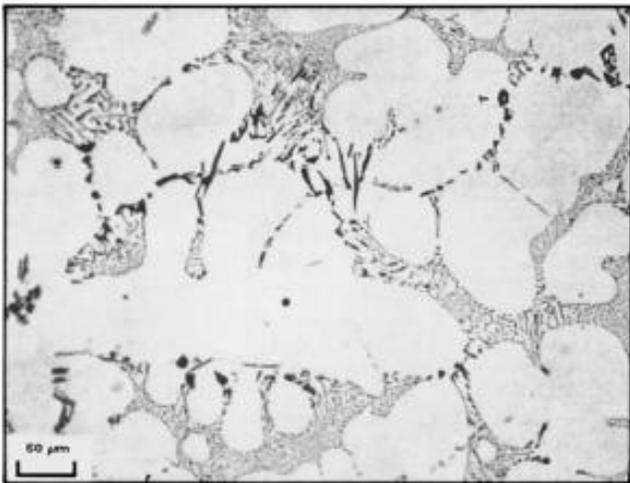
(b)



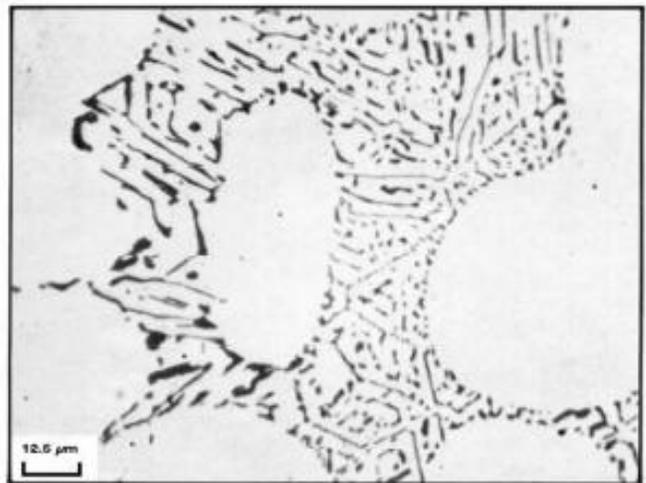
(c)



(d)

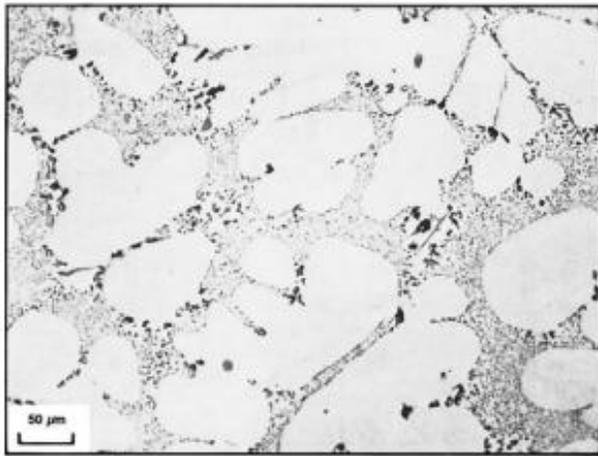


(e)

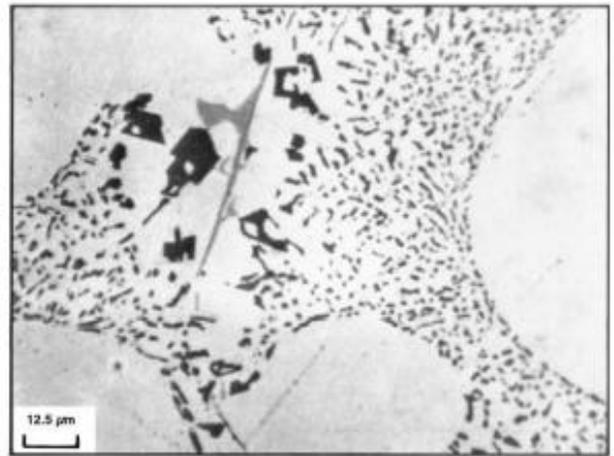


(f)

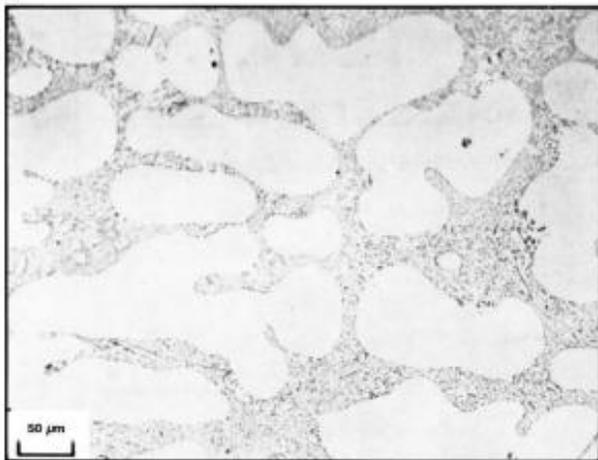
**Fig. (3.)** : Variations des degrés et types de modification eutectique aluminium-silicium. (a) Classe 1, structure entièrement non modifiée. 200. (b) Identique à (a) mais à 800. (c) Classe 2, structure lamellaire. 200. (d) Identique à (c) mais à 800. (e) Classe 3, modification partielle. 200. (f) Identique à (e) mais à 800. (g) Classe 4, absence de structure lamellaire. 200. (h) Identique à (g) mais à 800. (i) Classe 5, eutectique en silicium fibreux. 200. (j) Identique à (i) mais à 800. (k) Classe 6, très bien structure. 200. (l) Identique à (k) mais à 800. [9].



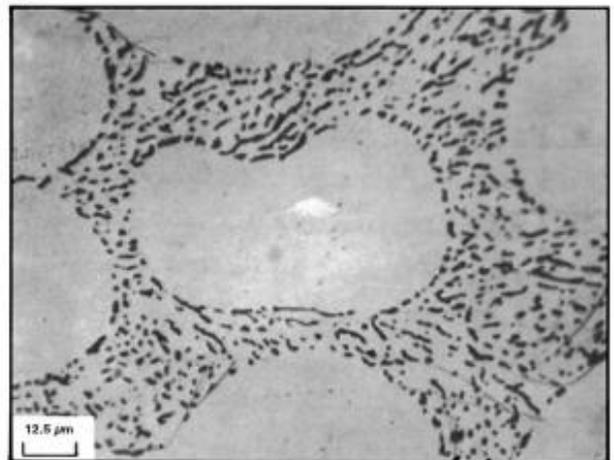
(g)



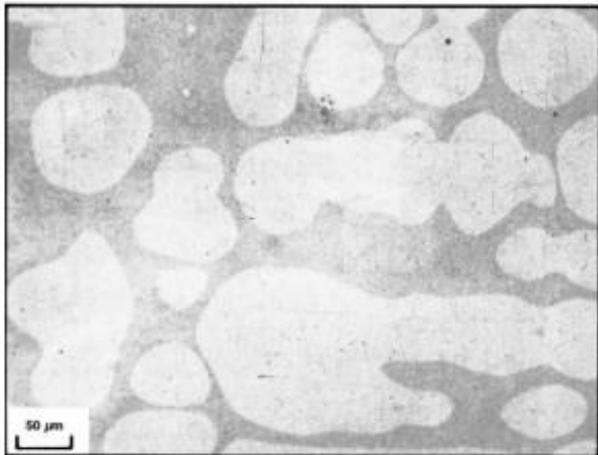
(h)



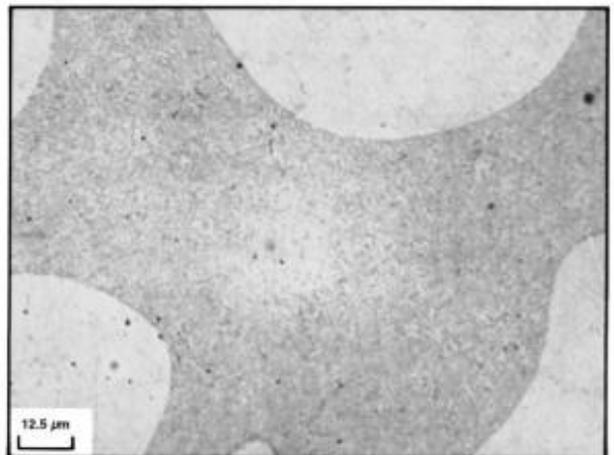
(i)



(j)



(k)



(l)

**Fig. (3) :** (Suite) (g) Classe 4, absence de structure lamellaire. 200. (h) Identique à (g) mais à 800. (i) Classe 5, eutectique en silicium fibreux. 200. (j) Identique à (i) mais à 800. (k) Classe 6, structure très fine. 200. (l) Identique à (k) mais à 800. [9].

## 1.9 Phases intermétalliques

Deux des principales phases intermétalliques dans les alliages dans les alliages AL-SI sont des composés intermétalliques à base de fer et de cuivre. Les intermétalliques à base de fer ont tendance à former des  $\beta$ -Fe et / ou  $\alpha$ -Fe. Les particules  $\beta$ -Fe sont des plaquettes aciculaires qui ont un effet nocif sur les propriétés mécaniques alors que les particules de la phase  $\alpha$ -Fe apparaissent de façon plus compacte sous forme de symboles chinois et sont moins nocives pour les propriétés de l'alliage. Les intermétalliques à base de Cu est principalement  $Al_2Cu$  qui se trouve soit sous forme de particules en forme de blocs ou d'une fine eutectique AL- $Al_2Cu$  [10].

### a) la phase $\alpha$ -Fe :

Il a été rapporté que la phase  $\alpha$  présente de nombreuses compositions et structures différentes dans les systèmes ternaires et quaternaires stables.

La phase  $\alpha$ -intermétallique a été désignée comme  $\alpha(FeSi)$  ou  $c-AlFeSi$  et on lui a attribué une cellule unitaire cubique avec  $a=1,2578$  nm par les chercheurs précédents [11].

La phase  $\alpha$ -intermétallique la plus courante est l' $\alpha-Al_8Fe_2Si$ , qui a été identifiée comme étant cubique centrée avec le groupe spatial  $Im$  et un paramètre de réseau autour de  $a = 1,25$  nm ou comme une structure hexagonale [9].

Les phases  $\alpha$  présentent toutes la morphologie dite " écriture chinoise " en deux dimensions.

En outre, certains chercheurs ont signalé une phase  $\alpha Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$  présentant une forme compacte en bloc et ressemblant à des cristaux polyédriques [12].

Récemment, les méthodes tomographiques comme la tomographie FIB ou la tomographie à rayons X synchrotron sont de plus en plus utilisées pour visualiser la morphologie des phases Intermétalliques.

Un exemple de la morphologie de la phase intermétallique  $\alpha-AlFeSi$  est illustré à la figure (7) : en deux dimensions (MEB), elle présente une " écriture chinoise " et en trois dimensions (tomographie FIB), de fines feuilles.

(MEB), elle présente une " écriture chinoise " et en trois dimensions (tomographie FIB), de " fines feuilles ".

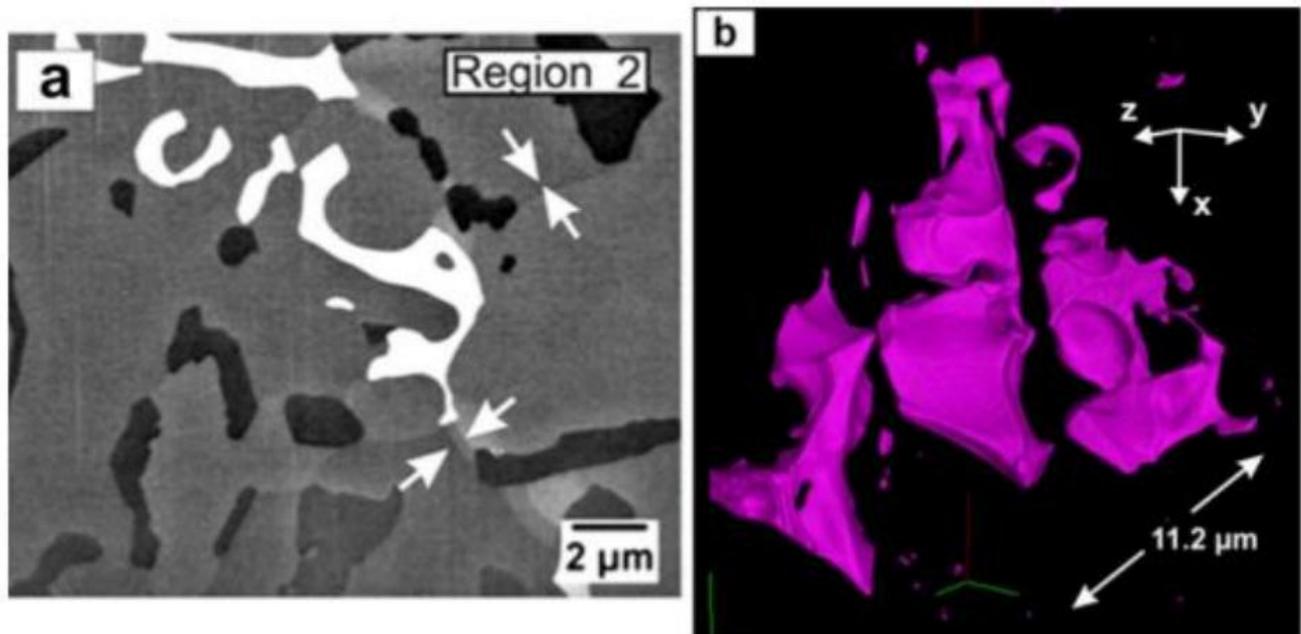
La taille des phases  $\alpha$  a été rapportée de plusieurs centaines de nm à plusieurs millimètres en fonction des vitesses de refroidissement et de la teneur en Fe ainsi que des impuretés contenues dans l'alliage [13].

La phase  $\alpha$  peut présenter une structure en blocs et une structure ramifiée convolutive en 3D.

Cette structure en bloc de la phase  $\alpha$  se forme avant que les dendrites d'Al ne commencent à se solidifier, tandis que la structure ramifiée convolutive de la phase  $\alpha$  se forme après que les dendrites d'Al ont commencé à se solidifier. De plus, deux morphologies distinctes de la phase  $\alpha$ , à savoir de grandes phases avec une morphologie volumineuse et une plus fine avec une morphologie en "écriture chinoise" [14].

Les explications étaient que la grande morphologie volumineuse se forme avant la réaction eutectique et que la plus fine avec la morphologie "écriture chinoise" se forme pendant la réaction eutectique. En se basant sur l'observation que la phase  $\alpha$  présente des feuilles minces alignées le long des surfaces des plaques de Si et des grains d'Al eutectique, En outre, la formation de la phase  $\alpha$  est également influencée par les impuretés.

Certains oxydes tels que MgO, MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pourraient être de bons substrats pour la nucléation de la phase  $\alpha$  [13]



**Figure (4)** : La morphologie de la phase intermétallique  $\alpha$ -AlFeSi visualisée en a) 2D ( $\alpha$  en blanc brillant) ; et b) 3D (reconstruction basée sur la tomographie FIB ;  $\alpha$  en magenta [15].

**b) La phase  $\beta$ -Fe :** Les phases  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi se cristallisent durant la solidification même à de faibles teneurs en fer, à cause de la faible solubilité solide du fer dans la matrice  $\alpha$ -Al. La phase  $\beta$ -Fe est associée à des niveaux de fer proches de 1%, si on se fie au diagramme de phase Al-Si-Fe, mais la ségrégation du fer durant la solidification permet à la phase  $\beta$  de se former même lorsque le taux de Fe est largement inférieur à 1%.

Cette phase primaire sous forme de plaquettes, même si elle apparaît comme des aiguilles dans les micrographies optiques, ces aiguilles peuvent atteindre plusieurs millimètres de longueur, et c'est de loin la phase la plus préjudiciable pour la résistance et la ductilité des moulages [16].

L'augmentation de la teneur en fer change la séquence de précipitation de la phase  $\beta$ .

À des faibles teneurs en Fe, la phase  $\beta$ -Fe est sensée se former à une température plus faible à travers une réaction eutectique ternaire. Avec des niveaux élevés de fer, la majorité de la phase  $\beta$  se précipite avant le Si eutectique conduisant à la formation de grosses plaquettes  $\beta$ -Fe binaires.

Les phases  $\beta$ -Fe sont connues pour être préjudiciables pour les propriétés mécaniques, cela est dû notamment à leur morphologie, en plus d'être des sites d'initiation et de propagation des fissures, elles augmentent la tendance à la retassure des alliages d'aluminium de fonderie. La précipitation de la phase  $\beta$ -Fe bloque les canaux d'alimentation du réseau inter dendritique plus tôt. Différentes mesures sont prises pour neutraliser l'effet nuisible de la phase  $\beta$ -Fe, parmi elles:

- 1) La solidification rapide.
- 2) L'addition d'éléments neutralisants comme le Mn, Co, Cr.
- 3) Surchauffe du métal liquide.
- 4) La modification au strontium
- 5) Traitement thermique hors équilibre

## **2. Les phases de Cu :**

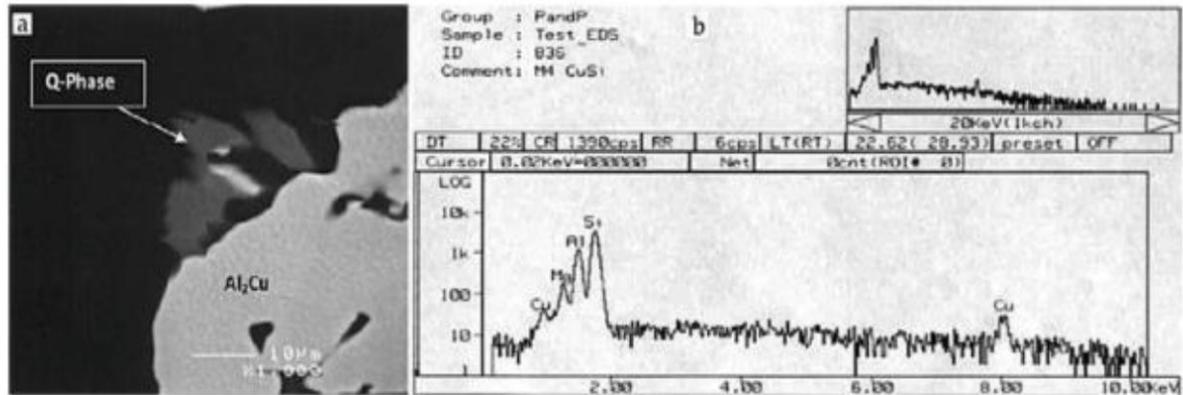
a) La phase Al<sub>2</sub>Cu :

La concentration de cuivre augmente avec la fraction solide et se sépare vers le liquide pendant la solidification.

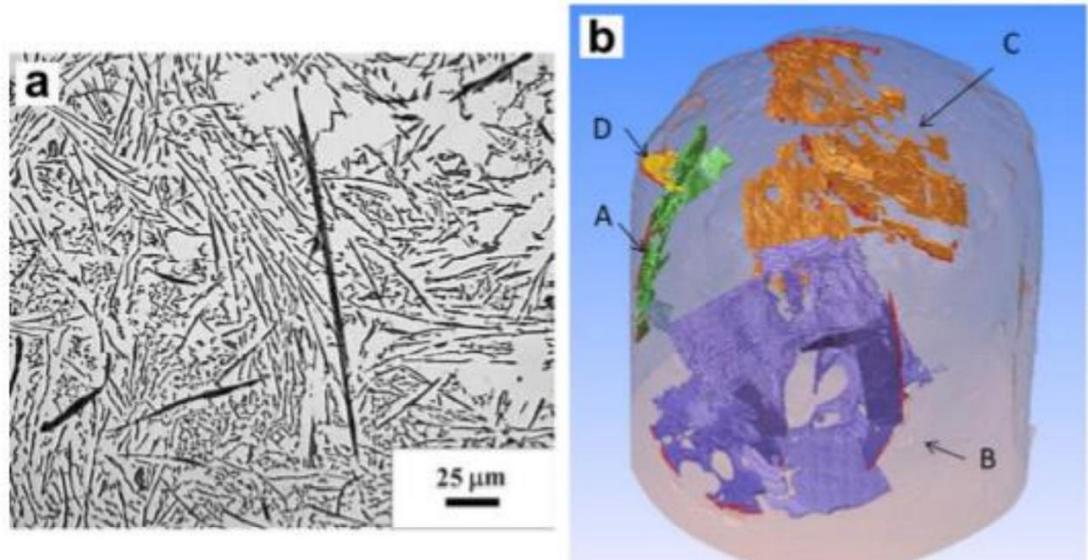
L'Al-Al<sub>2</sub>Cu se forme à la fin de la solidification.

Une étude a suggéré que l'ajout d'éléments d'alliage, tels que les phases Mg et Sr, ne modifie pas la stabilité de l' $\text{Al}_2\text{Cu}$  [33]. [16].

Pendant la solidification finale, la phase Q,  $\text{Q-Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$ , se développe à partir des particules d' $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Le spectre EDX de la figure (5) montre que la phase Q reflète des éléments tels qu'Al, Cu, Si et Mg dans l'alliage



**Figure (5) :** (a) Phase Q se développant à partir de la phase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ; (b) Spectroscopie à dispersion d'énergie correspondant à la phase Q de (a) [26]. [17].



**Figure (6) :** (a) Phase intermétallique  $\beta\text{-AlFeSi}$  visualisée en 2D (obscurité profonde : lames) par MEB et (b) visualisation tridimensionnelle des plaques  $\beta$  à l'aide de la tomographie à rayons X synchrotron in- situ (les marques A, B, C et D indiquent les différentes plaques séparées) [18].

## 2 Diagrammes de phases de l'alliage de Al-Si

Examinons les diagramme d'équilibre du système Al-Si présente dans la figure 6. Il est à noter que l'eutectique E est caractérisé par la température de fusion la plus basse sur l'ensemble des Al-Si de différentes concentrations qui peuvent exister.

Nous remarquerons que le pourcentage TE=578C.

Cette solubilité maximale est représentée par les point.

A lisse de leur solidification ces alliages se présentée comme des matériaux monophasés dans lesquels tout le Silicium Est entièrement dissout dans la matrice d'aluminium : il s'agit de la phase  $\alpha$  riche en aluminium.

Il faut remarquer que la solubilité de Si dans Al a l'état solide diminue avec la température.

Aussi elle passe de 1.65% a 0% a basse température.

Cette solubilité en fonction de la température est décrite par la courbe AB le solvus [19].

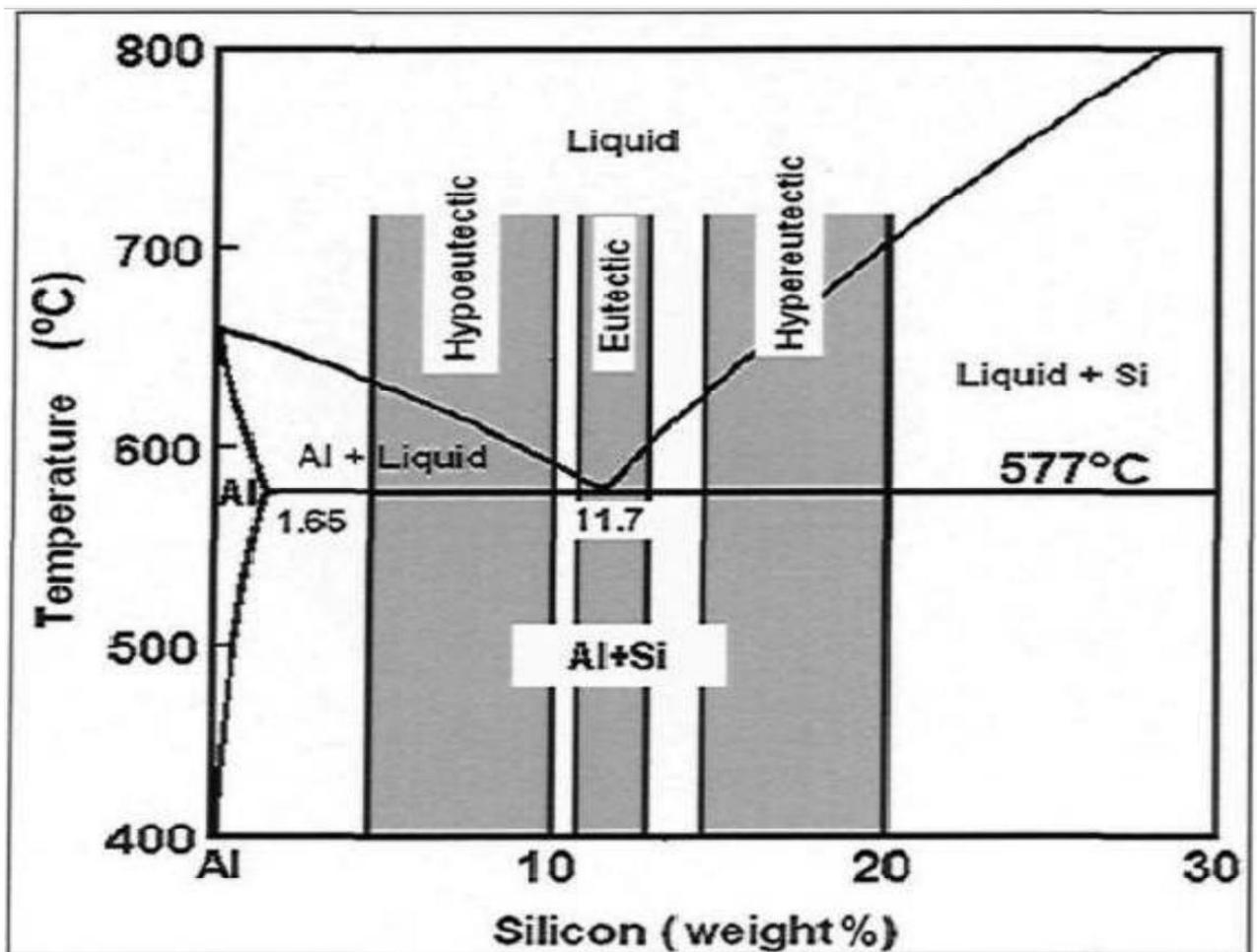


Figure (7) : diagramme de phases de l'alliage Al-Si [18].

Les principales courbes constituant les diagrammes sont :

**2.1 Le liquidus** : il forme par deux branches dont l'intersection forme le point eutectique E défini par une température de 578C.

Le liquidus constitue dans le diagramme les lieux de début de solidification.

Au-dessus de ces branches tous les mélanges Al-Si sont à l'état liquide.

La température du point E est inférieure à la température de fusion de deux constituants et de tous les différents alliages qu'ils peuvent former [20].

**2.2 Le solidus** : il est formé par un palier eutectique à l'exception des deux extrémités en raison de l'Al et la seconde en Si ainsi le solidus constitue les lieux de fin de solidification [20].

# Chapitre 2

## Traitement thermique

La métallurgie de l'aluminium et de ses alliages offre une gamme de possibilités d'employer des pratiques de traitement thermique pour obtenir combinaisons souhaitables de propriétés mécaniques et physiques.

Les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs.

Le terme traitement thermique est utilisé pour décrire toutes les pratiques thermiques destinées à modifier la structure métallurgique des produits dans de tels une manière dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont contrôlées modifiées pour répondre à des critères d'ingénierie spécifiques.

Un ou plusieurs des objectifs suivants forment la base du tempérament sélection :

- Augmenter la dureté.
- Améliorer l'usinabilité.
- Améliorer la résistance à l'usure.
- Stabiliser les propriétés mécaniques et physiques.
- Assurer la stabilité dimensionnelle.
- Modifier les caractéristiques électriques.
- Modifier la résistance à la corrosion.

### 1 Désignation

Il existe plusieurs façons de présenter une pièce faite d'un alliage d'aluminium.

De façon générale, on a les cinq désignations suivantes :

F, O, W, T et H, qui représentent le traitement thermique ou le durcissement subi par la pièce.

Les pièces portant la mention F sont livrées telles que produites.

Ces pièces ont été mises en forme sans qu'il n'y ait un contrôle des conditions thermiques ou des contraintes de mise en forme.

Les pièces de type O ont subi un recuit et une recristallisation.

Cela est utilisé sur les produits coulés, pour avoir une meilleure ductilité ou pour une meilleure

stabilité des dimensions.

Le symbole O peut être suivi d'un chiffre, pour avoir plus de précisions sur le traitement utilisé.  
Les pièces identifiées d'un W ont subi une mise en solution, suivie d'une trempe.

Cela est utilisé seulement pour les pièces qui ont un vieillissement naturel rapide qui se produit immédiatement après la mise en solution.

Le temps requis au vieillissement naturel doit être indiqué pour que la désignation soit acceptable, par exemple : W lh. Pour être dans la catégorie T, il faut subir un traitement thermique qui fournit un produit stable après la trempe et qui est différent des trois autres traitements.

Il y a plusieurs traitements possibles pour les T, c'est pourquoi la lettre est suivie d'un chiffre :

T1 : ce traitement englobe les pièces qui ont été refroidies après une mise en forme à haute température et qui ont eu un vieillissement naturel, jusqu'à l'obtention d'un état de stabilité convenable.

T2 : ce traitement englobe les étapes suivantes : refroidissement après une mise en forme à haute température, écrouissage et vieillissement naturel jusqu'à l'obtention d'un état de stabilité convenable.

T3 : mise en solution suivie d'un travail à froid (écrouissage) et d'un vieillissement naturel jusqu'à l'obtention d'un état de stabilité convenable.

T4 : mise en solution suivie d'un vieillissement naturel jusqu'à l'obtention d'un état de stabilité convenable.

T5 : refroidissement après une mise en forme à haute température suivit d'un vieillissement artificiel.

T6 : mise en solution suivie d'un vieillissement artificiel.

T7 : mise en solution et traitement de stabilisation.

T8 : mise en solution suivie d'un écrouissage et d'un vieillissement artificiel.

T9 : mise en solution suivie d'un vieillissement artificiel et d'un écrouissage.

T10 : refroidissement après une mise en forme à haute température, écrouissage et vieillissement naturel jusqu'à l'obtention d'un état de stabilité convenable.

Pour tous les traitements thermiques pour lesquels il n'y a pas de mention de travail à froid, ces alliage n'en ont pas subit. La désignation H représente un état écroui. H1X représente un écrouissage seulement et le X indique le degré d'écrouissage.

H11 : mou

H12 : 1/4 dur

H14 : 1/2dur

H16 :3/4dur

H18 :4/4dur

H19 : extra dur Les notations commençant par un H2X, X variant de 2 à 9, représentent des pièces qui ont subi un écrouissage suivi d'un recuit de restauration.

## **2 Traitement thermiques des alliages d'aluminium de fonderie**

La résistance et la dureté de certains alliages d'aluminium peuvent être améliorées par une série de traitements thermiques.

Cette série de traitements constitue un processus nommé « durcissement structural ».

Cette série provoque de très fines particules appelées particules, d'une deuxième phase répartie uniformément dans la matrice initiale [21].

### **3.Le durcissement structural :**

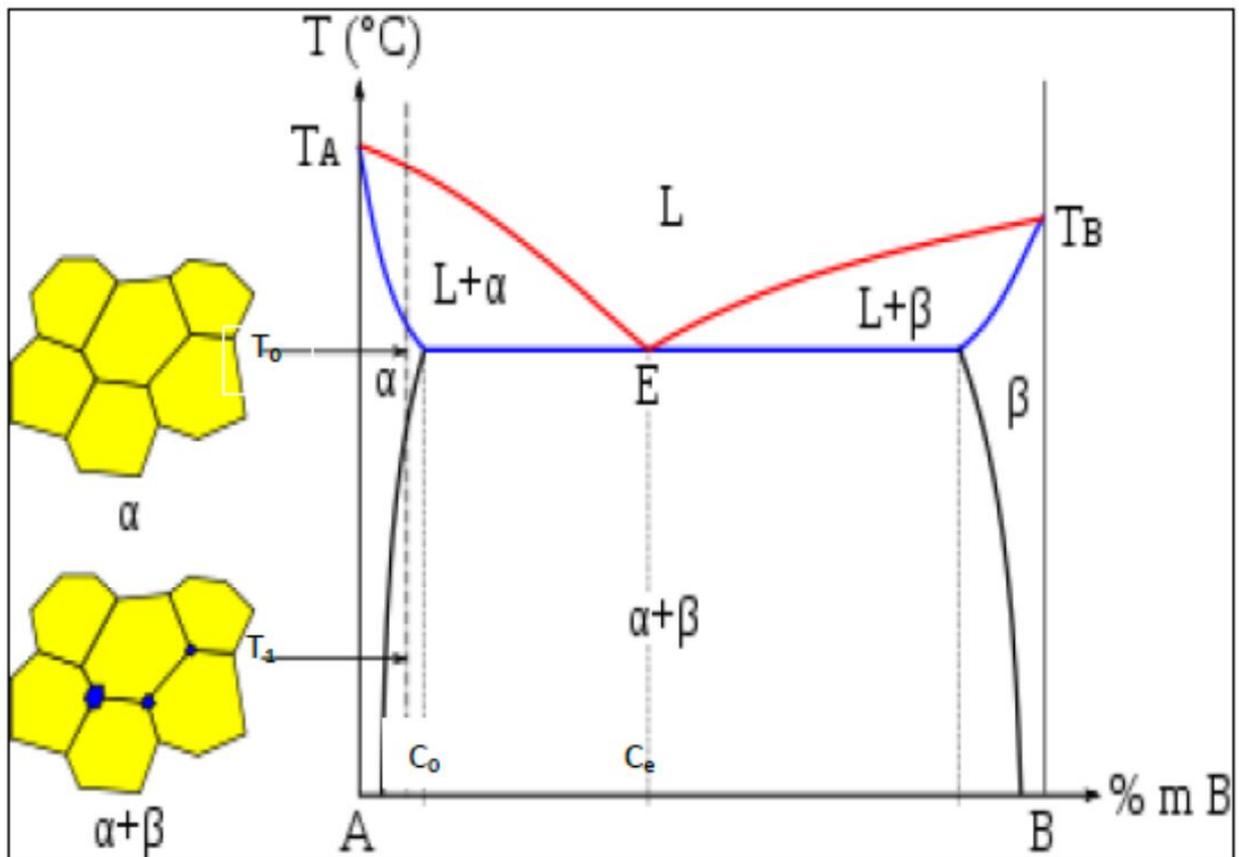
Le durcissement structural se réalise à l'aide de trois traitements thermiques :

- \_ La mise en solution.
- \_ La trempe.
- \_ Le revenu (vieillessement).

#### **3.1. Mise en solution :**

La mise en solution consiste à chauffer l'alliage jusqu'à une température  $T_0$  située dans le domaine monophasé (phase  $\alpha$ ), et maintenir cette température jusqu'à ce que la phase  $\beta$  soit entièrement dissoute, on obtient ainsi un alliage constitué uniquement de la phase  $\alpha$  de composition  $C_0$  (figure 16).

Cette étape permet de dissoudre toutes les phases ayant pu précipiter antérieurement dans l'alliage, ce qui contribue aussi à diminuer la dureté.



**Figure (8) :** Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition  $C_0$  [22].

### 3.2. La trempe :

La trempe est l'étape, d'une façon générale, la plus importante étape dans la séquence des opérations de traitements thermiques.

L'objectif de la trempe est de préserver la solution solide formée à la température de traitement thermique de solution, par refroidissement rapide à des basses températures, généralement à la proximité de la température ambiante.

Cette énonciation ne s'applique pas seulement à maintenir les atomes de soluté dans la solution, mais également pour maintenir un certain nombre de sites vacants dans le réseau.

Les atomes de soluté précipités sur les joints de grains, les dispersoïdes, ou d'autres particules, ainsi que les sites vacants qui migrent aux régions désordonnées, sont irrécupérables.

Dans la plupart des cas, pour éviter ces types de précipitation qui sont préjudiciables aux

propriétés mécaniques ou à la résistance à la corrosion, la solution solide formée durant le traitement thermique de la solution doit être trempée assez rapidement pour produire une solution sursaturée à température ambiante avec les conditions optimales pour les précipitations de durcissement.

Ainsi, pour éviter la précipitation préjudiciable au cours du refroidissement, deux conditions doivent être

Justifiées : Tout d'abord, le temps requis pour le transfert de la charge à partir du four au milieu de trempe doit être assez court pour exclure le pré-refroidissement lent dans l'intervalle de température où la précipitation rapide a lieu. Des erreurs importantes peuvent résulter de l'hypothèse que la précipitation est négligeable en dehors de l'intervalle critique. La deuxième condition est que le volume, la capacité d'absorption de la chaleur et le taux d'écoulement du milieu de la trempe doivent être tel qu'aucune précipitation ne se produise au cours du refroidissement.

### **3.2.1. Influence du temps de transition entre mise en solution et trempe :**

Lorsqu'on trempe des produits de faible épaisseur, il y a lieu de tenir compte du temps de transition qui s'écoule entre la sortie du four de mise en solution et l'immersion dans le fluide de trempe.

Pendant ce temps de transition, les produits refroidissent généralement à faible vitesse.

Si le temps de transition est assez long pour que la température des produits pénètre dans l'intervalle critique, une partie au moins de cet intervalle est parcouru à faible vitesse.

Les effets du temps de transition sont similaires à ceux déjà indiqués concernant la diminution de la vitesse de refroidissement. Certaines spécifications stipulent que le temps de transition doit être inférieur à une durée variant de 5 à 15 s dans le cas de tôles dont l'épaisseur varie de 0,4 à 2,3 mm.

### **3.2.2) l'effet de la vitesse de trempe sur les propriétés mécaniques :**

Les effets relatifs des méthodes de trempe peuvent être comparés en termes de vitesse moyenne de trempe.

Les vitesses moyennes de trempe sont utiles pour comparer les résultats expérimentaux des différentes méthodes de trempe.

Cependant, les vitesses moyennes de trempe comparent seulement les résultats dans un intervalle critique de température « critique ». Cette méthode n'est pas entièrement précise, car une importante précipitation significative peut également se produire en dehors de l'intervalle de la température critique.

D'ailleurs, pour les alliages à haute résistance, la dureté et la résistance à la corrosion peuvent être altérées sans perte significative de résistance à la traction.

La vitesse de trempe, suivant la mise en solution, détermine le point auquel les solutés diffusent aux joints de grains, le degré de précipitation au joint de grains. Il est donc un paramètre critique.

### **3.3Le vieillissement :**

Le terme vieillissement désigne l'évolution des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant.

L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ  $0.5 T$  fusion par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique

#### **3.3.1 Vieillissement naturel :**

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en a maintien selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité.

La précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel.

Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant de  $100^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $240^{\circ}\text{C}$  dans le cas de la série 6000. Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale

#### **3.3.2Vieillissement artificiel :**

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en a maintien selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité. La précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant de  $100^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $240^{\circ}\text{C}$  dans le cas de la série 6000. Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné **[23]**.

#### **4 Durcissement par adition :**

Les atomes étrangers, ou éléments d'addition peuvent être en solution solide de Substitution et prennent la place d'un atome d'aluminium dans le réseau.

Comme cet atome étranger est plus petit (cas de l'atome du cuivre) ou plus gros (magnésium) que l'atome d'aluminium, il perturbe le réseau qui devient ainsi plus difficile à déformer.

Si l'élément étranger n'est pas en solution solide, il forme aussi des perturbations dans le réseau comme les précipites qui ont le même effet de difficulté de déformation.

Cette dernière est plus importante en cas de précipites incohérents.

La résistance mécanique du métal sera d'autant plus grande que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands.

Cependant il faut noter que la teneur en élément d'addition est le plus souvent limitée par d'autres que la résistance mécanique : difficultés de transformations (alliage plus de 5% de magnésium), mauvaise résistance à la corrosion (alliage en teneur élevées de Zinc – Cuivre) [24].

#### **5 L'état de l'art sur l'effet de la teneur en Zn sur les propriétés mécaniques des alliages (AL-Si-Cu-Mg) :**

FARAHANY et al (2016) ont étudié l'effet des modificateur de l'eutectique que sont le Sr , Sb , Bi sur la résistance à la traction , l'allongement à la rupture et la résilience sur l'alliage Al-Si eutectique , contenant 0,8 % du Zn , ils ont constaté une augmentation significative de la résistance mécanique à la traction , de l'allongement à la rupture et de la résistance . Cette augmentation est due à la modification du Si eutectique, de la morphologie a circulaire (sans modification) vers la morphologie lamellaire (Bi, Sb) ou fibreuse (Sr) [25].

TSAO et al (2002) ont étudié l'effet d'ajout de Zn ( 0 à 30% en poids ) sur la microstructure et les températures de fusion des alliages Al-Si-Cu par un analyse thermique différentielle (ATD) [26].

Les résultats montrent que l'ajout de 10 à 30% de poids de Zinc dans ces alliages ternaires (AL-Si-Cu) fait baisser leur température de l'ajout de 10 à 30% de poids de Zinc dans ces alliages ternaires (AL-Si-Cu) fait baisser leur température de fusion à une valeur inférieur a 500°C. Les observations métallographiques indiquent que l'ajout de Zn dans les alliages Al-Si-Cu empêche la formation des phases eutectiques (Al-Si) , (Al-Cu) , et (Al-Si-Cu) [27].

NEMRI et al (2017), ont étudié l'effet d'addition de Zn (0.03-3.11% en poids) sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages (Al-Si-Cu-Mg) après un traitement thermique, ils ont observé les notes suivantes :

-l'ajout de Zn de 1.5% à 3.11% en poids n'a pas modifié les propriétés mécaniques des alliages.

-l'ajout de 0.4% en poids de Zn diminue considérablement la résistance à la traction des alliages.

-l'ajout de Zn permet de ralentir le processus de sphéroïdisation complète des particules de Si eutectique.

-l'ajout de Zn augmente l'allongement de l'alliage dans les conditions de coulée et de traitement thermique.

- l'ajout de Zn diminue certainement la quantité de microporosités dans la matrice.

-l'augmentation de la teneur en Zn dans les alliages Al-Si-Cu-Mg tels que coulées n'a aucun effet sur la microstructure de la structure dendritique et du Si eutectique **[28]**.

FARAHANY et al (2014) ont étudié l'effet de modificateur de l'eutectique Bismuth sur le mécanisme de raffinement de Si dans l'alliage Al-Si-Cu-Zn contenant 0.8% de zinc. Les résultats obtenus des études micro et nano relèvent que le Bismuth raffine le silicium dans lequel le silicium a circulaire s'est transformé en structure lamellaire, Le bismuth se sépare vers régions inter dendritiques et diminue l'angle de contact Al-Si, ce qui entraîne la suppression de la croissance du silicium causant l'affinement de la structure eutectique.

L'augmentation de la température et du temps de recalcification ont confirmé que l'effet d'affinement est attribué à l'étape de croissance **[29]**.

GOWRI et al à appliquer des analyses thermiques différentielles sur l'alliage AL 380 en variant les différents éléments d'addition, il a trouvé que l'addition de zinc a pour effet de baisser la température de formation des phases, il a démontré que cette formation de refroidissement se fait selon les étapes suivantes : structure dendritique, puis les phases de Fe (  $\alpha$ -Fe ) et (  $\beta$ -Fe ) ,par la suite les phases (  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si ) et (  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu ) **[30]**.

# Chapitre 3

## PROCEDURES EXPERIMENTALES

### 1. Introduction :

On s'intéressera dans ce chapitre à la partie expérimentale. On présente en premier lieu les principales étapes de l'élaboration de nos alliages, et leurs caractéristiques. Ensuite, on expose les différentes étapes de la préparation des échantillons passant par les traitements thermiques, les essais de dureté effectués, et les observations métallographiques par microscope optique.

### 2. La préparation des échantillons étudiés :

Les alliages d'aluminium ont été fournis par nos promoteurs, nous avons appliqué un traitement thermique (la coulée) à quatre échantillons (Z1, Z2, Z3, Z4) de différent composition chimique. Les échantillons ont été préparés par le four électrique de marque NABERTHERM.

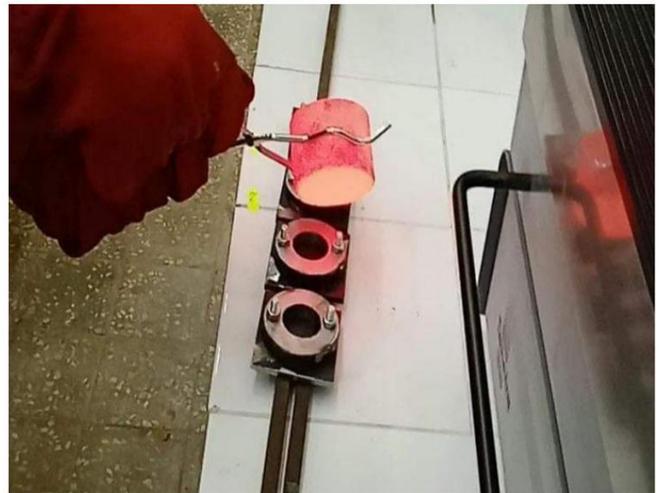


**Figure (9) :** les alliages d'aluminium avant la fusion.



**Figure (10) :** Le four utilisé pour le traitement thermique NABERTHERM.

Le métal liquide a été coulé à 800°C dans des moules à l'acier, et sans préchauffage.



**Figure (11) :** le creuset en graphite utilisé et les moules a cylindre ouvert en acier.



**Figure (12) :** les différents échantillons préparés.

### 3.la composition chimique :

La composition est en fonction de masse

Eléments(%) désignation	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Cr	Zn
Z1	10.9	2	0.655	0.1	0.209	0.008	0.03
Z2	10.8	1.9	0.71	0.1	0.289	0.027	0.4
Z3	10.9	2	0.685	0.1	0.283	0.032	1.46
Z4	10.9	2	0.667	0.1	0.271	0.031	3.14

**Tableau (5) :** Composition chimique des échantillons.

#### 4. Le polissage :

Le polissage est une composante du parachèvement (ou finition) des échantillons coulés, visant à obtenir un bel aspect, un fini ou un état de surface de haute qualité.

En effet, pour pouvoir observer les détails microscopiques, voire nanoscopiques, de la structure, il faut éliminer les rayures.

Cette opération comporte deux étapes :

##### 4.1. Polissage abrasion :

Cette étape a pour but d'enlever la couche durcie de la surface du métal pendant et pour cela nous utilisons un papier abrasif de granulométrie décroissante 80, 220, 280, 400, 600, 800, 1000, 1200, en utilisant l'eau comme lubrifiant.

On obtient une série de lignes fines, et les lignes sont croisées de 90° après chaque opération. La machine à polir utilisée est du type METASINEX.



**Figure (13) :** Polisseuse d'abrasion.

##### 4.2. Polissage de finition :

Cette étape est réalisée sur un disque rotatif de type MONTASUPAL avec un support en feutre et en utilisant une poudre d'alumine ( $Al_2O_3$ ) diluée dans l'eau de granulométrie inférieure à  $1\mu m$ , La surface polie finale est comme un miroir (polissage spéculaire) à l'aide du gel diamant qui est

nécessaire pour ce travail.

A la fin du polissage, les échantillons doivent être lavés à l'eau pour éliminer les particules solides.

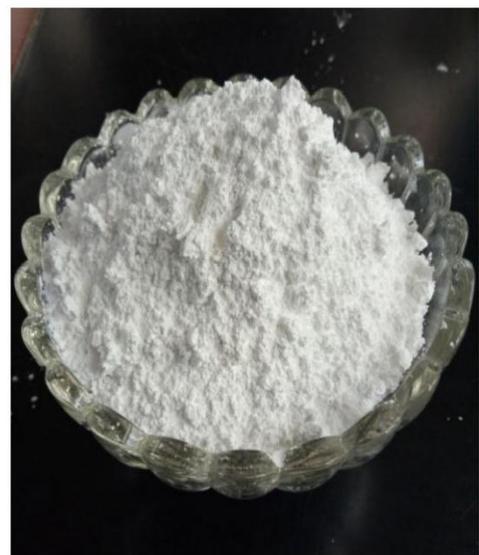
Puis les sécher (à l'aide d'un séchoir).



**Figure (14) :** polisseuse de finition



**Figure (15) :** le gel diamant



**Figure (16) :** L'alumine ( $Al_2O_3$ ).

## 5. microscope optique :

Le microscope optique ou microscope photonique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise sa puissance optique) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain.

Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

Après polissage nous avons fait recours à la microscopie optique afin de procéder à des observations métallographiques.

Le Microscope utilisé est de type (EUROMEX), équipé d'un dispositif permettant la prise des photos de la microstructure observée à l'aide d'un appareil photo connecté à l'ordinateur.

L'avantage de la microscopie optique, autre sa grande facilité d'utilisation, il permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

Les micrographies optiques ont été réalisées dans le sens perpendiculaire au flux de diffusion des éléments afin de montrer l'effet du profil de l'élément diffuser sur la microstructure.



**Figure (17) :** Microscope optique (EUROMEX).

## 6. l'essai de dureté :

L'application d'un essai de dureté permet d'évaluer les propriétés d'un matériau telles que sa résistance, sa ductilité, sa résistance à l'usure et contribue ainsi à déterminer si le matériau ou le traitement de ce matériau convient à l'usage souhaité.

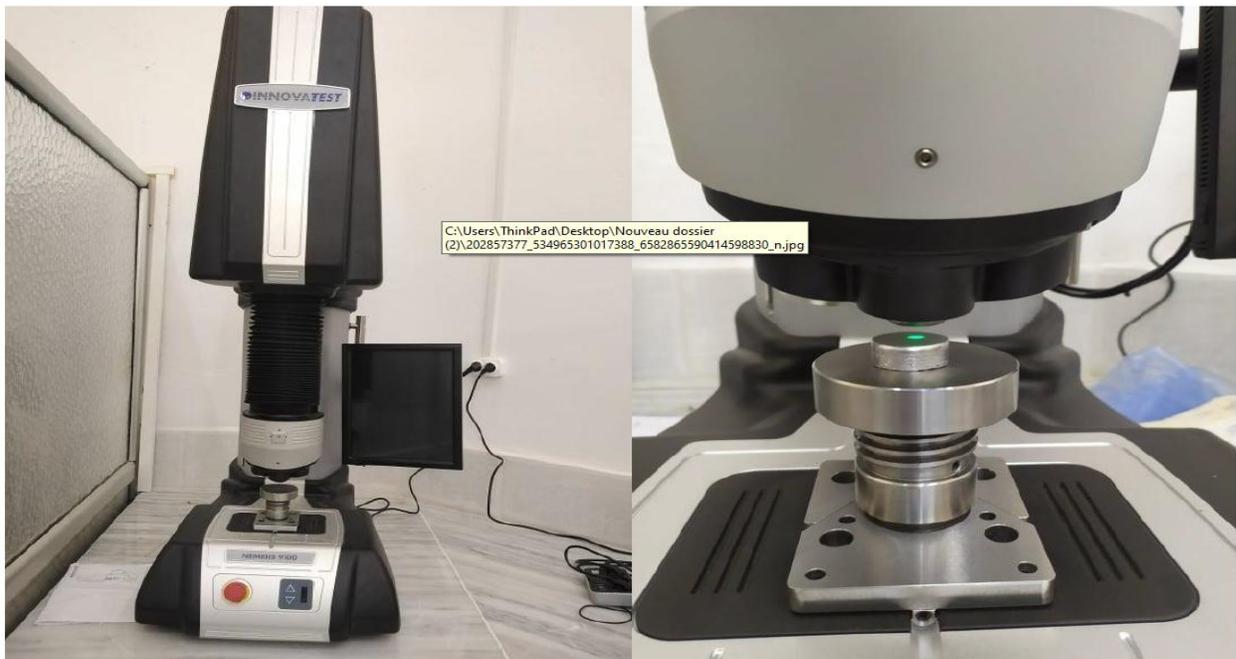
L'essai de dureté Brinell est utilisé pour les grands échantillons à structure granulaire grossière ou non homogène. Il laisse une empreinte relativement grande faite avec une bille de carbure de tungstène. La taille de l'empreinte est lue par mesure optique.

L'essai consiste à déterminer la résistance d'un matériau à une force de pénétration.

Le pénétrateur peut être de géométrie sphérique, conique ou pyramidale selon le type de dureté à mesurer (Brinell).

Boule de diamètre 2.5 mm.

Le centre dispose d'une machine d'essai de dureté INNOVATEST, calibrée avec des forces allant de 15,625 kgf pour un processus de mesure rapide et fiable.



**Figure (18)** : le d'uromètre utilisé INNOVATEST.

## **7. Les traitements thermiques :**

Le traitement thermique de l'échantillon consiste à la modification de sa composition en fonction des procédés suivants : La structure passe par un circuit de chauffage et de refroidissement préalablement déterminé afin de renforcer ses propriétés mécaniques : dureté, ductilité, limite élastique ....

Les principaux traitements thermiques qui nous avons étudiés sont :

- mise en solution
- la trempe
- le vieillissement artificiel

### 7.1. Mise en solution :

Cette opération nécessite un chauffage à haute température (490°C). La solution doit permettre d'homogénéiser la microstructure à l'état brut de coulée, et de minimiser le phénomène d'isolement des éléments alliés. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la dissolution permet d'abord la dissolution du composé intermétallique. Dans notre expérience, pour chaque alliage, nous avons adopté le traitement de mise en forme La solution est maintenue à une température de 490°C pendant 5h.



**Figure (19)** : Le four (NABERTHERM) en mise en solution.

### 7.2. La trempe :

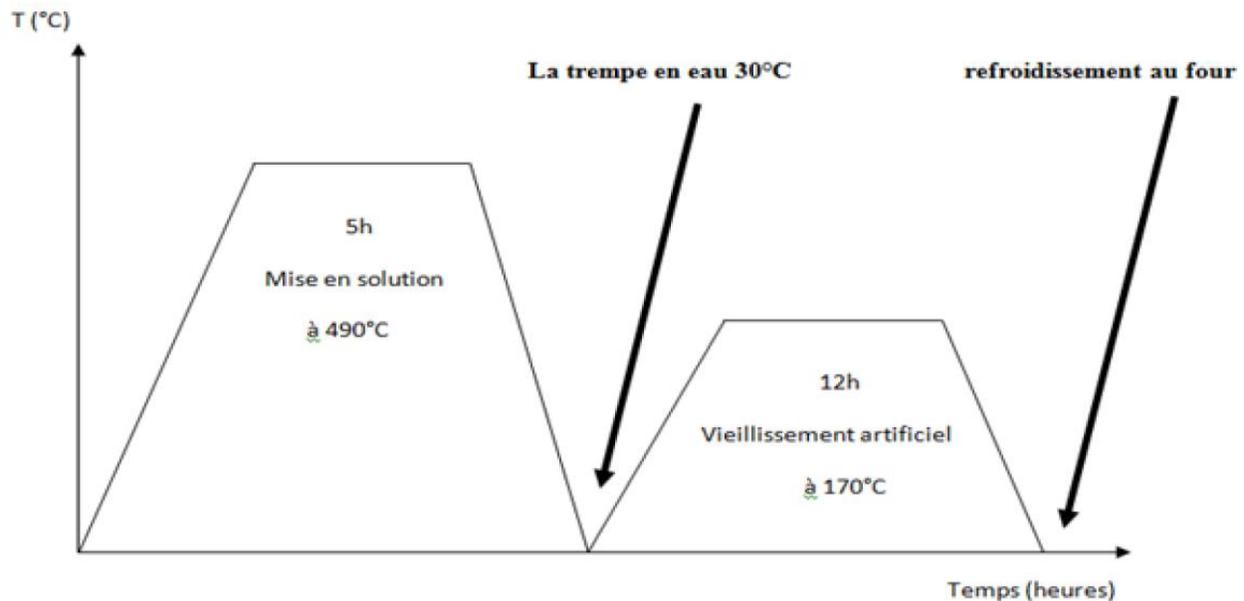
Après la mise en solution, l'alliage doit être refroidi rapidement pour maintenir la solution solide à la température **ambiante** : Il s'agit d'un traitement de trempe. Après cette trempe, on dit que l'alliage est dans un état "fraîchement trempé", il se présente alors Une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité. Dans notre cas, la trempe s'effectue à l'eau de 30°C.

### 7.3. Le vieillissement artificiel :

Le vieillissement artificiel se pratique après une trempe, pour diminuer les contraintes mécaniques internes produites durant celle-ci. Selon les résultats obtenus, nous n'avons pas procédé au traitement de vieillissement. Afin de choisir la température, nous avons choisi 170°C, le temps est de 12 heures.

Le vieillissement artificiel permet d'améliorer la Résistance mécanique des pièces traitées, de rétablir les valeurs de dureté et de réduire les contraintes mécaniques internes. La dureté diminue également d'un peu (dissolution de certains composants fragiles tels que les carbures favorisés). La température déterminée en fonction du type de matériau, et de refroidir cette pièce très lentement.

Dans notre traitement, le vieillissement est fait à 170°C pendant 12h accompagné d'un refroidissement au four.



**Figure (20)** : Le cycle de différents traitements thermiques d'échantillon

## 8. Tribologie

Définition : La tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs.

Ce terme recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure, de l'étude des interfaces et de la lubrification.

**8.1 L'usure** : l'usure est un des domaines de la tribologie dans la science des matériaux, l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur.

**8.2 le frottement** : c'est-à-dire la résistance mécanique à ce mouvement relatif, et l'**usure**, c'est-à-dire une perte de matière des corps antagonistes.

## 9. PROCEDURE EXPERIMENTALE

On a utilisé le tribomètre de type **ANTON PAAR** de Vitesse de 10 cm/s et Distance de 300m de Force de 1N la bille est de diamètre 6 mm



**Figure (21)** : Le tribomètre (ANTON PAAR)

# CHAPITRE 4

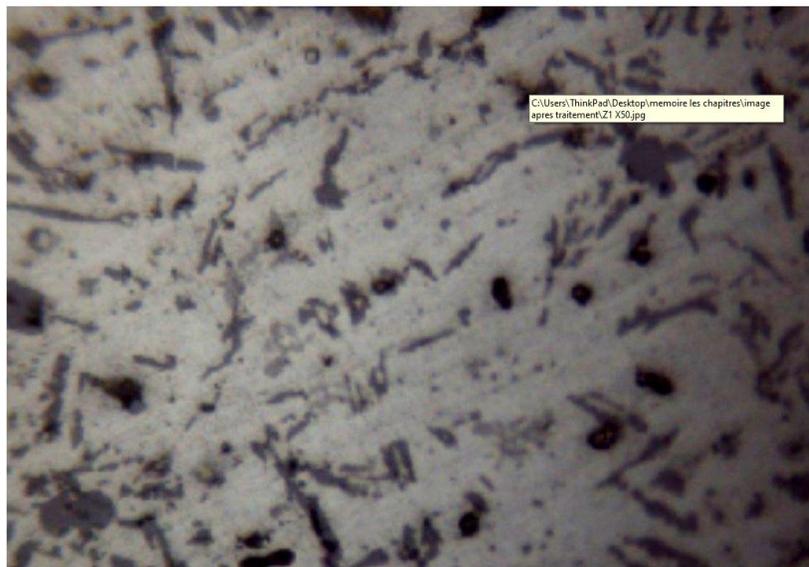
## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans cette partie on se parle essentiellement à la démonstration, l'interprétation et la discussion des résultats expérimentaux obtenus.

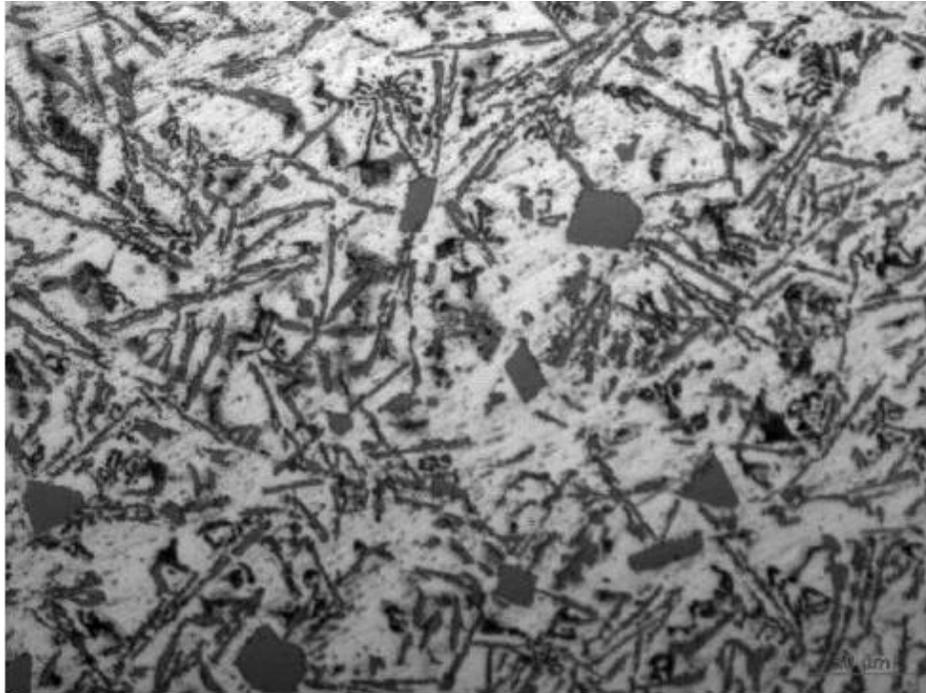
Pour les quatre échantillons (Z1, Z2, Z3, Z4) on a mesuré la dureté et nous avons observé la microstructure de chaque alliage avant et après le traitement thermique réalisé.



**Figure (22)** : microstructure d'échantillon Z1 grossissement X50 avant traitement thermique.

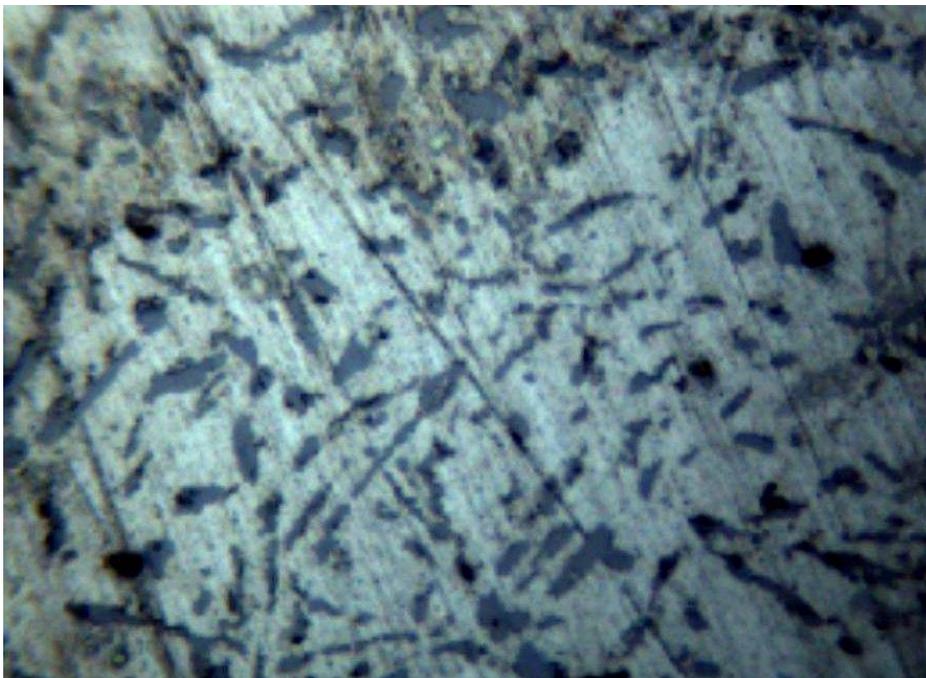


**Figure (23)** : Microstructure d'échantillon Z1 grossissement x50 après TT.



**Figure (24)** : Echantillon Z3 avant le traitement thermique

La figure précédente montre la microstructure optique de l'alliage brut Z3, les particules de silicium secondaires ont une morphologie aciculaire /lamellaire, on note que la structure typique des alliages AL-Si proche de l'eutectique avec une observation des phases ( $\alpha$ -Fe) et ( $\beta$ -Fe) et l'apparence de Silicium primaire.

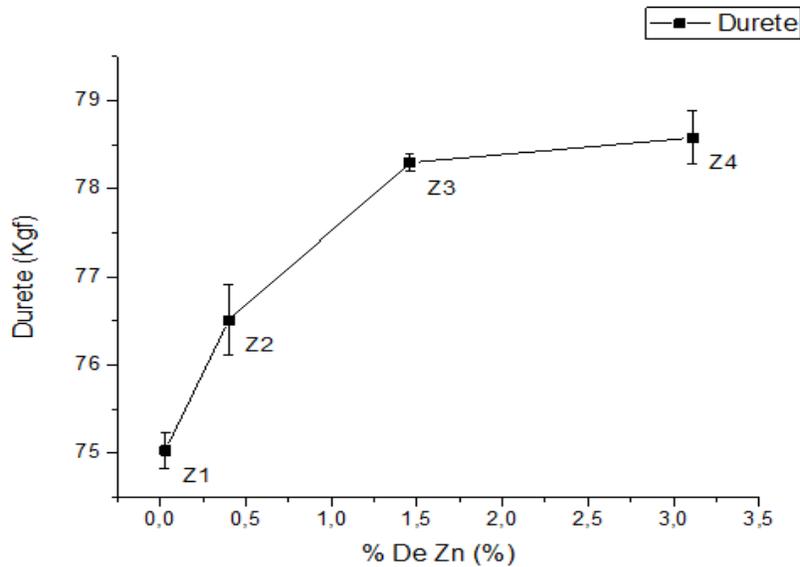


**Figure (25)** : Echantillon Z3 après le traitement thermique

# 1. Dureté

les essais de dureté les échantillons	essai 1	essai 2	essai 3	la moyenne
Z1	74.23	74.51	75.36	74.7
Z2	76.91	77.16	75.48	76.51
Z3	78.87	77.89	78.15	78.30
Z4	78.91	78.69	78.15	78.58

**Tableau (6) :** l'essai des échantillons avant le traitement thermique

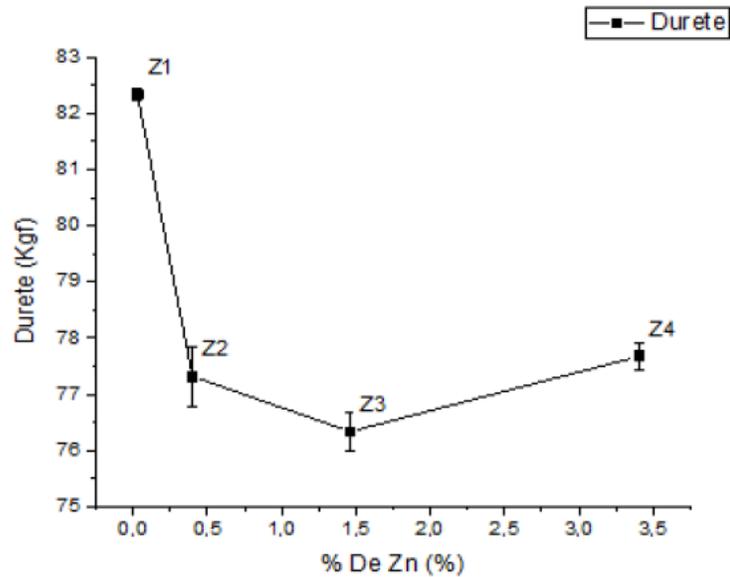


**Figure (26) :** le graphe de la dureté Avant traitement thermique

On a mesuré la dureté des quatre échantillons avant le traitement thermique, on constate une légère augmentation en fonction de la teneur en zinc pour les alliages bruts.

les essais de dureté les échantillons	essai 1	essai 2	essai 3	la moyenne
Z1	82.12	82.76	82.12	82.33
Z2	79.07	75.58	77.29	77.32
Z3	75.03	77.29	76.71	76.34
Z4	78.46	76.14	78.46	77.68

**Tableau (7) :** l'essai des échantillons après le traitement thermique.



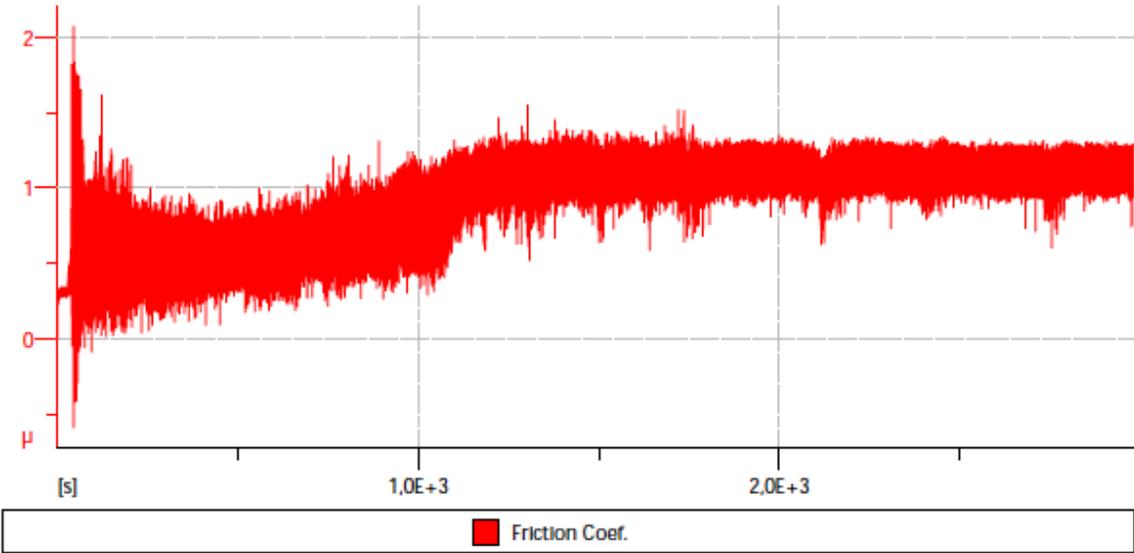
**Figure (27) :** le graphe de la dureté Après traitement thermique

L'augmentation de la dureté pour l'alliage brut de coulage en fonction du pourcentage de Zn est due à un durcissement par solution solide.

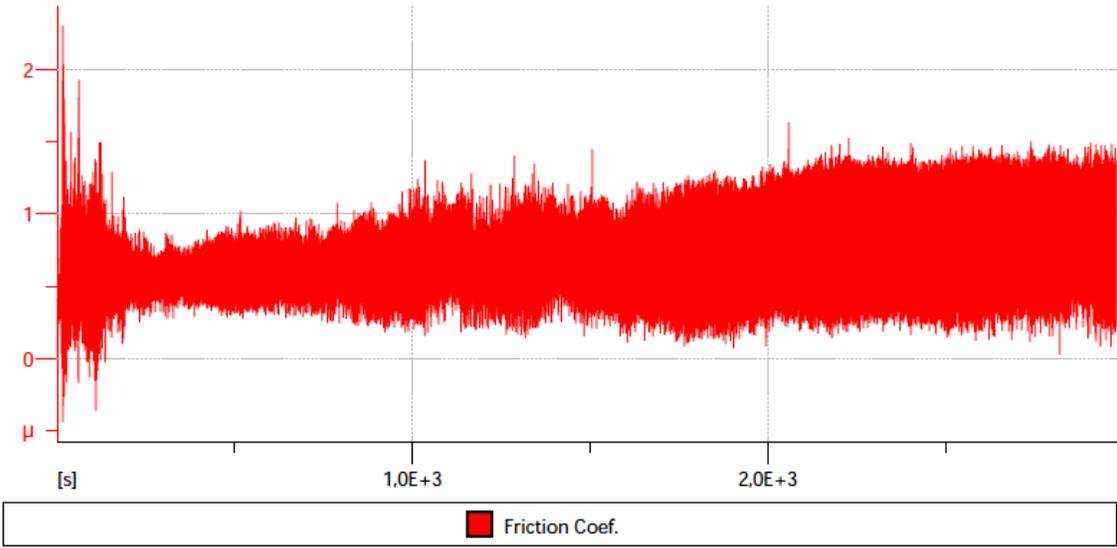
Après traitement thermique, l'augmentation de la dureté pour Z1 et la stabilisation sur les échantillons (Z2, Z3, Z4) est causée par le phénomène de fragmentation et de sphéroïdisation des particules de Si eutectique.

Ce phénomène n'est pas en relation avec l'ajout de Zn, car ce dernier fait augmenter la température de l'eutectique et par conséquent la température à laquelle la fragmentation du Si eutectique se produit.

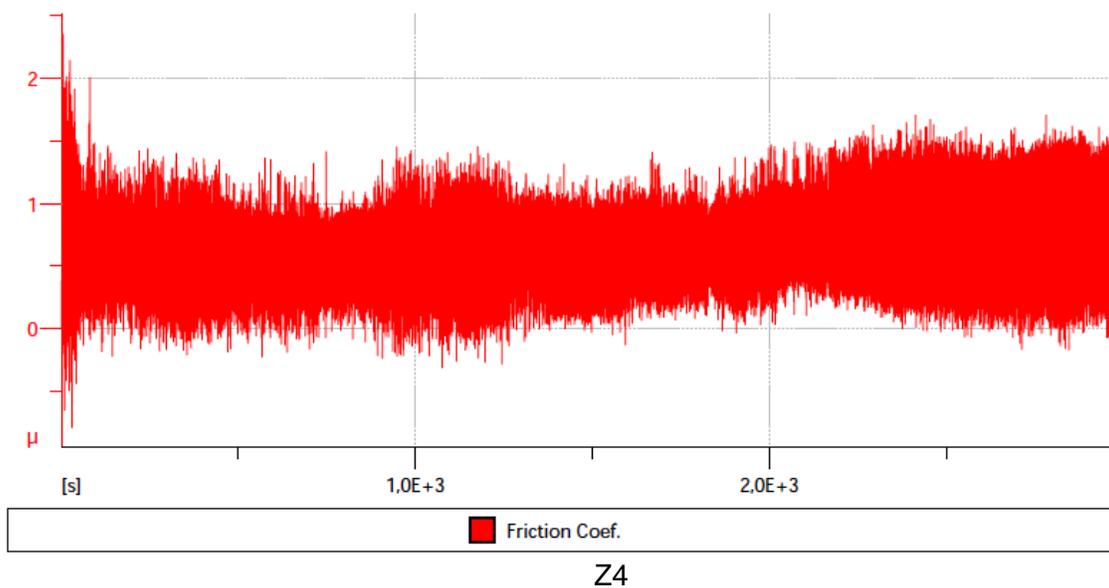
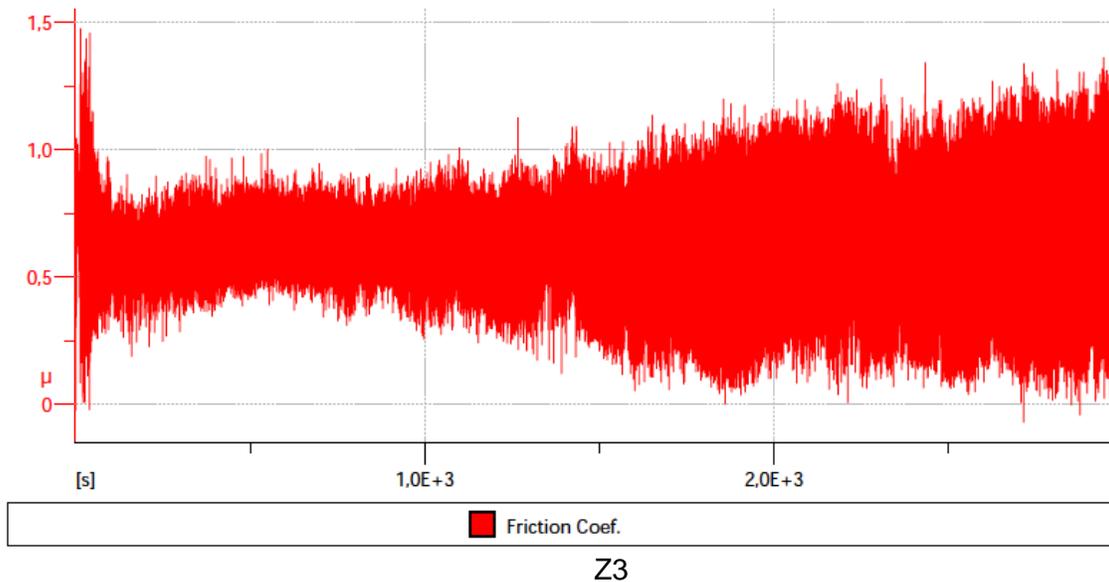
# 2.Tribologie



Z1



Z2



Les figures précédentes montrent l'évolution du coefficient de friction pour les échantillons Z1, Z2, Z3 et Z4, on constate que la valeur la plus importante est atteinte pour l'alliage Z1, avant de baisser de façon importante pour l'échantillon Z2 puis Z3 et Z4. On peut affirmer que l'ajout du Zn a un effet négatif sur le coefficient de friction.

Ce phénomène peut être expliqué par la morphologie des particules de Si secondaire qui sont sphériques et petites pour Z1, mais aciculaire et grossières pour les autres échantillons.

## **Conclussiion generale :**

Notre étude, nous nous intéressons au comportement des alliages d'aluminium de fonderie du groupe al-si. Afin de réaliser les principales étapes de l'élaboration de nos alliages.

Nous avons étudié d'une part, les types d'alliages d'aluminium et d'autre part, l'influence des traitements thermiques sur les propriétés de ces alliages.

Nous avons d'abord procédé au traitement thermique usuel, consistant en une mise en solution, suivie d'une trempe, puis d'un traitement de vieillissement artificiel.

Nos investigations nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

La microstructure des alliages étudiés présente une différence avant et après traitement thermique concernant la forme, les dimensions,

L'ajout de zinc a pour effet d'augmenter la dureté. La microstructure optique de l'alliage brut Z3, les particules de silicium secondaires ont une morphologie aciculaire /lamellaire.

On note que la structure typique des alliages AL-Si proche de l'eutectique avec une observation des phases ( $\alpha$ -Fe) et ( $\beta$ -Fe) et l'apparence de Silicium primaire.

On a mesuré la dureté des quatre échantillons avant le traitement thermique, on constate une légère augmentation en fonction de la teneur en zinc pour les alliages bruts.

Après traitement thermique, l'augmentation de la dureté pour Z1 et la stabilisation sur les échantillons (Z2, Z3, Z4)

Ce phénomène n'est pas en relation avec l'ajout de Zn, car ce dernier fait augmenter la température de l'eutectique et par conséquent la température à laquelle la fragmentation du Si eutectique se produit.

On peut affirmer que l'ajout du Zn a un effet négatif sur le coefficient de friction.

## Références :

- [1] « IHA: L'invention de l'aluminium » [archive], sur [www.histalu.org](http://www.histalu.org) (consulté le 27 avril 2019)
- [2] Posté le 22 mai 2011 par La rédaction dans Matériaux, Bio Tech & chimie
- [3] Aluminium et alliages d'aluminium lycée Raymond Loewy. **PDF**
- [4] [http:// www. lenntech .fr / aluminum – fiche –identity .htm](http://www.lenntech.fr/aluminum-fiche-identity.htm)
- [5] 2004 ASM International. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and applications.....(13)
- [6] 2004 ASM International. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and applications.....(39)
- [7]. Barlas B.(2004) . etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie ECOLE Nationale Supérieure des Mines de paris .
- [8]. Mohamed A.(2008) .effect of additives on the Microstructure and Mechanical property of aluminum-silicon Alloys.
- [9] 2004 ASM International. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and applications. (40.42 .43)
- [10] Dons A.L.G.Heiberg et al.(2005) on the effect of additions of Cu and Mg on the ductility of ALSi alloys Materials Science and Engineering A **413**: 561-566
- [11] H.W.L. Phillips, Annotated equilibrium diagrams of some aluminum alloy systems (monograph No.25), London (Inst. Metals) (1959) 25
- [12]] V. Elser, C.L. Henley, Crystal and quasicrystal structures in Al-Mn-Si alloys, Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 2883
- [13] C.M. Dinnis, J.A. Taylor, A.K Dahle, As-cast morphology of iron-intermetallic in Al– Si foundry alloys, Scripta Mater. 53 (2005) 955-958.
- [14] A. Gorny, J. Manic Karaj, Z. Cai, S. Shankar, Evolution of Fe based intermetallic phases in Al–Si hypoeutectic casting alloys: Influence of the Si and Fe concentrations, and solidification rate, J. Alloys & Comp. 577 (2013) 103–124.
- [15] M. Timpel, N. Wanderka, R. Grothausmann, J. Banhart, Distribution of Fe-rich phases in eutectic grains of Sr-modified Al-10wt%Si-0.1wt% Fe casting alloy, J. Alloy & Comp. 558 (2013) 18-25.
- [16] C. Cayron, L. Sagalowicz, O. Beffort, P. A. Buffat, Phil. Mag., 79 (11) (1999) 2833- 2851.
- [17] Crepeau PN. Effect of iron in Al-Si casting alloys: A critical review. AFS Transactions. 1995

;103 :361-366.

[18] Geoffrey K. Sigworth : Fundamentals of solidification in aluminum castings. International Journal of Metalcasting, 8(1), 2014.

[19] D.N. Miller, L. Lu, A.K. Dahle, The role of oxides in the formation of primary iron intermetallics in an Al- 11.6Si-0.37Mg Alloy. Metall. Mater. Trans. B 37B (2006) 873-878

[20] Gilles Dour (fonderie alliages procédés propriété d'usage défaut) Editeur Dunod 2004 France.

[21] Handbook A.S.M. (1992). Vol 3 Alloy phase diagrams 2:44

[22] R. Guemini. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (1981).

[23] K. Boulemzaoud. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (2012).

[24] Saeed FARAHANY, Ali OURDJINI, Hamid Reza BAKHSHESHI-RAD, Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Al-Si-Cu-Zn-X (X=Bi, Sb, Sr) die cast alloy, 3 February 2015; accepted 12 October 2015.

[25] L.C. Tsao, M.J. Chiang, W.H. Lin, M.D. Cheng, T.H. Chuang , Effects of zinc additions on the microstructure and melting temperatures of Al-Si-Cu filler metals , 2 July 2002.

[26] Y. Nemri and N. Chiker, EFFECT OF Mg AND Zn CONTENTS ON THE MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL. PROPERTIES OF Al-Si-Cu-Mg ALLOYS , 2017.

[27] SAEED FARAHANY, ALI OURDJINI, TUTY ASMA ABU BAKAR, and MOHD HASBULLAH IDRIS, Communication On the Refinement Mechanism of Silicon in Al-Si-Cu-Zn Alloy with Addition of Bismuth , 2013.

[28] S. GOWRI and F.H. SAMUEL, Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy, FEBRUARY 1994.