

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE CHIMIE INDUSTRIELLE



Mémoire de Fin d'Étude en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master en  
Génie des Procédés  
Option : Génie chimique

**THEME**

*Étude morphologique et structurale d'un alliage  
d'aluminium AlSi12*

**Présenté par :**

**HEBIRET Nour el houda**

**Président : M<sup>eur</sup> A. SAKRI**

**Examineur : M<sup>me</sup> K. DIGHECHE**

**Encadreur : M<sup>me</sup> C. BOUREMEL**

**Promotion Juin 2012**

# **Dédicace**

*À mes très chers parents*

*À mes frères et sœurs*

*À mon mari et à toute sa famille*

*Et à ma famille*

.....

*Je dédie ce mémoire*

*Nour el houda.*

  
NOUR EL HOUDA

# Remerciements

*En premier, je remercie Dieu pour m'avoir donné la patience et le courage durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer tout particulièrement mes remerciements à, M<sup>me</sup> Cherifa Bouremel pour son encadrement scientifique, sa grande disponibilité, son soutien et à la confiance qu'elle m'a manifestée tout au long de ce travail. À vrais dire je ne saurais jamais la remercier assez...*

*J'adresse un grand merci à M<sup>eur</sup> Z. Boumerzoug professeur à l'université mohamed Kfider-Biskra pour son énorme aide scientifique.*

*J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à M<sup>eur</sup> N. Moumi, chef de département de génie mécanique de l'université mohamed Kfider-Biskra.*

*Ainsi, j'exprime mes plus sincères remerciements au M<sup>eur</sup> A. Sakri, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance et au M<sup>me</sup> K. Digheche pour m'avoir fait l'honneur d'être examinatrice.*

*J'adresse également ma gratitude à tous les enseignants de département de chimie industrielle.*

*J'adresse aussi mes remerciements aux responsables de laboratoire de métallurgie de département de génie mécanique de l'université mohamed Kfider-Biskra.*

*Je tiens à remercier :*

*\*M<sup>eur</sup> Rahmani et M<sup>eur</sup> Gasmi, responsables de laboratoire de diffraction des rayons X de l'université mohamed Kfider Biskra*

*\* M<sup>eur</sup> Said et M<sup>elle</sup> Fatima ; doctorant en métallurgie, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont m'aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*

# Listes des figures

**Figure I.1.**Répartition de la consommation de l'aluminium

**Figure II.1.**Schéma d'une dendrite

**Figure II.2.** (a) Principe de la croissance compétitive, menant à un eutectique lamellaire  
(b) Schéma d'un eutectique lamellaire

**Figure II.3.**Diagramme de phase Al Si

**Figure II.4.**Microstructure de l'alliage AlSi12%

**Figure II.5.**Microstructure de l'alliage AlSi12 : a) eutectique aciculaire non modifié;  
b) eutectique modifié au Sr ; c) eutectique globulaire modifié au Na.

**Figure III.1:** Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion.

**Figure IV.1.** Polisseuse.

**Figure IV.2.** Microscope optique.

**Figure IV.3.** Diffractomètre de type D8 Advance.

**Figure V.1.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 non traité thermiquement (x400).

**Figure V.2.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 100°C pendant 30minutes (x400).

**Figure V.3.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 200°C pendant 30minutes (x400).

**Figure V.4.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 300°C pendant 30minutes (x400).

**Figure V.5.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 400°C pendant 30minutes (x400).

**Figure V.6.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 100°C pendant 45minutes (x400).

**Figure V.7.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 200°C pendant 45minutes (x400).

**Figure V.8.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 300°C pendant 45minutes (x400).

**Figure V.9.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 400°C pendant 45minutes (x400).

**Figure V.10 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon non traité thermiquement.

**Figure V.11** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 100 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.12** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 200 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.13** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 300 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.14** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 400 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.15** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 100 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.16** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 200 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF

**Figure V.17** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 300 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

**Figure V.18** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 400 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

# Liste des tableaux

**Tableau I.1.** Les propriétés de quelques alliages de coulés.

**Tableau II.1.** Désignation des alliages d'aluminium de fonderie (Aluminium association).

**Tableau II.2.** Qualités des alliages de fonderie.

**Tableau II.3.** Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12.

**Tableau II.4.** Propriétés mécaniques de l'alliage AlSi12.

**Tableau II.5.** Propriétés physique de l'alliage AlSi12.

**Tableau IV.1 :** composition chimique de l'alliage AlSi12.

**Tableau IV.2.** Composition chimique du métal d'apport.

**Tableau VI. 3.** Les paramètres de la diffraction des rayons X utilisés pour des applications métallurgiques.

**Tableau V.1.** Les plans (hkl) et la position  $2\theta$  des pics les plus intenses des échantillons étudiés de l'alliage AlSi12.

**Tableau V.2.** Les paramètres cristallins des échantillons étudiés de l'alliage AlSi12.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I Aluminium et ses alliages</b>	
I.1.Généralité sur l'aluminium	2
I.1.1.Définition	2
I.1.2. Fabrication d'aluminium	3
I.1.3.Propriétés de l'aluminium	3
I.1.4.Application de l'aluminium	4
I.2.Alliages d'aluminium	6
I.2.1.Définition	6
I.2.2.Alliage	7
I.2.2.1.Définition	7
I.2.2.2.Influence des éléments d'addition sur les propriétés de l'aluminium	7
I.2.3.Classification des alliages d'aluminium	8
<b>Chapitre II Alliages d'aluminium de fonderie</b>	
II.1.Définition	9
II.2.Désignation des alliages d'aluminium de fonderie	9
II.3.Structure des alliages de fonderie	10
II.4. Propriétés physiques des alliages de fonderie	12
II.5.Défauts de fonderie	13
II.5.1. Défauts de retrait à la solidification et retassures	13
II.5.2. Soufflures	13
II.5.3. Ségrégations	14
II.5.4. Inclusions	14
II.5.5. Criques à chaud	15
II.6.Qualités recherchées des alliages d'aluminium de fonderie	15
II.7.Classification des alliages d'aluminium de fonderie	15
II.8. Alliages d'aluminium-silicium	16
II.8.1.Définition	16
II.8.2. Principaux effets de silicium dans les alliages Al-Si	17
II.8.3.Diagramme de phase binaire Al/Si	17

II.9.Alliage d'AlSi12	18
II.9.1.Description	18
II.9.2.Microstructure de l'AlSi12	20
II.9.3.Propriétés physiques de l'AlSi12	21
II.9.4.Quelques applications de l'alliages AlSi12	21

### **Chapitre III Procédés de soudage**

III.2. Définition	22
III.1.Introduction	22
III.3 Conditions de réalisation de l'opération de soudage	23
III.4.Définition de quelques techniques de soudage	23
III.4.1.Soudage TIG	23
III.4.3.Procédés particuliers	24
III.4.2.Soudage MIG	24
III.5.Difficultés de soudage d'aluminium et ses alliages	25
III.5.1.Couche d'oxyde avec un point de fusion élevé	25
III.5.2.Chaleur de fusion très élevée	25
III.5.3.Coefficient de dilatation thermique élevé	25
III.6.Particularités survenant lors de soudage	25
III.7.Analyse des défauts ; recherche et développement.	27
III.8.Quelques application de procédés de soudage	27

### **Chapitre IV Matériaux et techniques expérimentales**

IV.1.Introduction	28
IV.2. Matériau utilisé	28
IV.3 Préparation des échantillons	29
IV.3.1 traitement thermique	29
IV.3.2. Polissage des échantillons	29
IV.3.3. Attaque chimique	29
IV.4. Caractérisation des échantillons	30
IV.4.1. Microscope optique	30
IV.4.2 Diffraction des rayons X	30

### **Chapitre V Résultats et discussions**

V.1.Introduction	33
V.2.Étude métallographique	33

V.2.1. Pour l'échantillon non traité thermiquement	33
V.2.2. Pour les échantillons traités thermiquement	33
V.2.2.1. Effet du temps de traitement thermique sur la microstructure des joints soudés de l'AlSi12	33
V.2.2.2. Effet de la température de traitement thermique choisis sur la microstructure de joint soudé de l'AlSi12	34
V.3. Diffraction des rayons X	37
V.3.1. Pour l'échantillon non traité thermiquement	37
V.3.2. Pour les échantillons traités thermiquement	38
V.3.2.1. Traitement thermique pendant 30 minutes	38
V.3.2.2. Traitement thermique pendant 45 minutes	41
<b>Conclusion générale</b>	47
<b>Références bibliographiques</b>	

## Abstract

Objective of this work is to homogenize the morphological proprieties between MB, ZAT and ZF zones of welding joint of AlSi12 alloy by a heat treatments at different temperatures. The studied alloy is elaborated in IMO factory of Constantine.

In order to achieve our goal, different techniques of analysis have been used by optical microscope and XRD.

The obtain results allow to show the importance of the applying of heat treatment in order to reduce the welding effects on aluminum alloys.

**Keywords :** Aluminum, alloy, AlSi12, Welding, heat treatment, XRD.

## Résumé

Le but de ce travail est d'homogénéiser les propriétés morphologiques entre les zones MB, ZAT et ZF des joints soudés d'un alliage AlSi12 par un traitement thermique à des différentes températures. L'alliage étudié est élaboré au niveau de l'usine IMO de Constantine

Pour réaliser ce but, différentes techniques d'analyse ont été utilisés par microscope optique et DRX.

Les résultats obtenus permettent de montrer l'importance de l'application de traitement thermique pour diminuer l'effet de soudage sur les alliages d'aluminium.

**Mots clés :** Aluminium, alliage, AlSi12, soudage, traitement thermique, DRX.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو مجانسة الخصائص البنيوية بين المناطق : المعدن الأصلي, المنطقة المتأثرة حراريا و المنطقة المذابة من حد تلحيم من خليط AlSi12 بمعالجة حرارية وفق درجات حرارة مختلفة. الخليط المدروس حضر على مستوى مصنع IMO بقسنطينة.

من اجل تحقيق هذا الهدف, تقنيات مختلفة للتحليل استعملت بالمجهر الضوئي و انعراج الأشعة السينية. النتائج المتحصل عليها سمحت بإثبات أهمية تطبيق المعالجة الحرارية من اجل إنقاص اثر التلحيم على خلائط

الالمنيوم.

**الكلمات المفتاحية :** ألمنيوم, خليط, AlSi12, تلحيم, معالجة حرارية, انعراج الأشعة السينية.

## **Introduction générale**

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique. Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherches sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères...etc., mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches [1]. Les alliages d'aluminium sont parmi les alliages métalliques les plus utilisées surtout dans le domaine de transport grâce aux ses très bonnes propriétés mécaniques spécifiques, aussi ils résistent assez bien à la corrosion [2].

Parmi les alliages d'aluminium il ya l'alliage AlSi12 qui occupe la plus grande partie d'importance grâce à ses vastes applications tels que ornementales, architecturales, alimentaires, marines, pour les équipements dentaires ainsi que pour des pistons de moteur...Mais son utilisation oblige l'opération de soudage qui présente le problème de l'hétérogénéité dans la structure et dans quelques propriétés mécaniques entre les zones (métal de base, zone affectée thermiquement, et la zone fondue) de la pièce soudée. Pour éliminer ce défaut il faut faire un traitement thermique sur les pièces soudées. Le but de ce travail est de préparer des échantillons d'un alliage d'aluminium AlSi12 qui est élaboré au niveau de l'usine IMO de Constantine. Des études microstructurales et spectroscopiques ont été fait à l'aide d'un microscope optique et un diffractomètre (RX). Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre est des généralités sur l'aluminium et ses alliages ;
- Le deuxième chapitre est une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium de fonderie ;
- Le troisième chapitre représente les procédés de soudage utilisés dans l'industrie.
- Le quatrième chapitre est la partie expérimentale;
- Le cinquième chapitre montre les résultats obtenus.
- Enfin, on termine notre mémoire par conclusion général.

**Chapitre 1**

**Aluminium et ses**

**alliages**

## Chapitre I. Aluminium et ses alliages

### I.1. Généralité sur l'aluminium

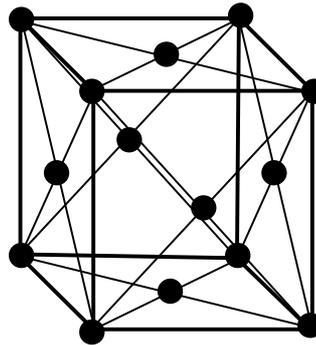
#### I.1.1. Définition

L'aluminium est un élément du III<sup>ème</sup> groupe de la classification de Mendeleïev [3] qui est l'un des métaux les plus fréquents sous la croûte terrestre. Il n'est pas trouvé à l'état pur, mais combiné sous forme de composés chimiques [4].

L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville, qui a présenté les premiers lingots d'aluminium pur à l'Exposition universelle de Paris, en 1855, le décrit comme «un métal blanc, inaltérable comme l'argent... et qui présente la singulière propriété d'être plus léger que le verre» [5].

#### ➤ Carte d'identité de l'aluminium

- Forme cristalline



L'aluminium a un réseau cubique à faces centrées (CFC)

-Symbole	Al
-Numéro Atomique	13
-Masse molaire atomique	27 g. 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-1. °K <sup>-1</sup>
-Système cristallin	Cubique à faces centrées

-Coefficient de dilatation	24.10-6. °K <sup>-1</sup>
-Module d'élasticité	69 000 MPa [3].

### **I.1.2. Fabrication d'aluminium**

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (la composition moyenne est de 55% d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 25% de perte au feu), constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal. L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99.7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite [6].

### **I.1.3. Propriétés de l'aluminium**

Le rapide développement de l'aluminium et sa contribution aux grandes évolutions techniques de notre époque sont dû à ses propriétés exceptionnelles :

➤ ***Léger, résistant et durable***

Sa densité spécifique est de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, environ un tiers de celle de l'acier, ce qui permet des économies d'énergie dans ses utilisations dans les transports. On peut adapter ses caractéristiques mécaniques à l'application requise en modifiant la composition de l'alliage [7].

➤ ***Résistant à la corrosion***

Il génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion de l'air et de l'eau. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance. C'est particulièrement utile pour des produits qui nécessitent d'être protégés et préservés [7].

➤ ***Excellent conducteur thermique et électrique***

Il est utilisé dans les câbles électriques, radiateurs, ustensiles de cuisine [7].

➤ ***Très ductile***

C'est l'un des métaux les plus faciles à façonner par laminage, moulage, matriçage, étirage, emboutissage... [7].

➤ ***Doté de bonnes propriétés de surface***

Il permet de réaliser des surfaces réfléchissant bien la lumière, ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les éclairages ou les couvertures de survie. Il se prête facilement aux traitements de surface (mécaniques ou chimiques), ce qui lui confère des propriétés décoratives [7].

➤ ***Imperméable et sans odeur***

Même lorsque la feuille est très mince (0,006 mm), et d'une grande stabilité chimique, il est particulièrement adapté à la protection et la conservation des produits alimentaires [7].

#### **I.1.4. Application de l'aluminium**

Jusqu'à l'invention de Héroult-Hall en 1886, l'aluminium coûte cher à produire. Son prix est comparable à celui de l'argent, et ses utilisations se limitent à des objets de luxe, telles perdes pièces d'orfèvrerie réalisées pour Napoléon III. Aujourd'hui, les secteurs d'applications sont variés.

➤ ***Utilisation de l'aluminium dans les transports***

***-L'automobile et le ferroviaire***

Les applications en forte croissance sont les systèmes d'absorption d'énergie (poutres, pare-chocs, renforts de porte, capots, portes...), les équipements (sièges, poutres de planche de bord, réservoirs...), les liaisons au sol (bras, porte-moyeux, berceaux, traverses...)

Les véhicules industriels et les transports publics (routiers et ferroviaires) font eux aussi largement appel à l'aluminium.

L'aluminium est non seulement léger, mais résistant. Son utilisation améliore la tenue de route du véhicule, grâce à l'abaissement du centre de gravité, favorise l'absorption de l'énergie cinétique en cas de choc et réduit la distance de freinage. D'autre part, l'aluminium est recyclable indéfiniment sans perte de ses qualités intrinsèques. Actuellement, 95 % de l'aluminium contenu dans les automobiles est collecté et recyclé ; sa valeur représente plus de 50 % de la valeur totale du véhicule en fin de vie [7].

***-L'aéronautique et l'espace***

Elle doit beaucoup à l'aluminium. Depuis la Première Guerre mondiale, l'industrie aéronautique et spatiale utilise l'aluminium, sans lequel avions et engins spatiaux ne voleraient pas. En trente-cinq ans, grâce à l'aluminium et à ses alliages, le poids de la structure

d'un avion a été divisé par deux. Aujourd'hui, le taux d'alliages d'aluminium utilisés dans la construction des cellules d'avion avoisine 70 % [7].

#### ***-La construction navale***

L'aluminium, très résistant à la corrosion, même en milieu marin, entre dans la fabrication des coques, mâts et superstructures des bateaux de plaisance, des ponts et superstructures des paquebots et navires de commerce. Du fait de sa légèreté, il a permis le développement des NGV (Navires à Grande Vitesse) [7].

#### **➤ *Utilisation de l'aluminium dans le bâtiment***

Sous forme de profilés, de produits plats ou moulés, l'aluminium est couramment utilisé pour les cadres de fenêtre et autres structures vitrées, la couverture, les cloisons, les murs et façades.

Les profilés de formes harmonieuses sont un atout supplémentaire de décoration : agencement de magasins, garde-corps... L'aluminium permet de réaliser des formes complexes dans une gamme étendue de coloris. Il résiste au temps et ne nécessite que très peu d'entretien. Ces atouts en font un matériau particulièrement apprécié des architectes et des constructeurs, qui l'utilisent aussi bien dans les édifices publics (hôpitaux, universités, immeubles de bureaux) que dans les bâtiments industriels ou les maisons individuelles [7].

#### **➤ *Utilisation de l'aluminium dans les emballages***

L'aluminium présente des qualités qui confèrent aux emballages, particulièrement ceux des produits alimentaires et pharmaceutiques, un haut niveau de protection et de sécurité : résistance à la corrosion, imperméabilité à la lumière, aux rayons ultraviolets, à la vapeur d'eau, aux huiles et graisses, à l'oxygène et aux microorganismes. Sa légèreté et sa résistance permettent de réduire le poids de l'emballage et donc d'économiser à la fois le matériau et l'énergie nécessaire pour le produire. Autre atout, sa grande recyclabilité permet sa récupération dans le circuit économique. Il connaît un développement régulier dans les emballages rigides : boîtes boissons, certaines boîtes de conserves, boîtiers pour aérosols, barquettes et portions d'aliments pour animaux, capsules et couvercles, etc [7].

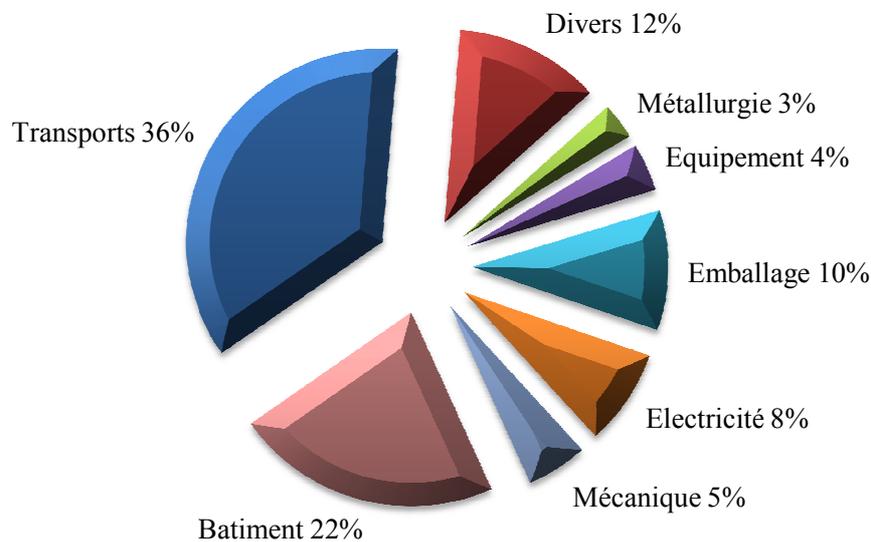
#### **➤ *Utilisation de l'aluminium dans la vie quotidienne***

L'aluminium, toujours grâce à son rapport légèreté-solidité, entre dans la fabrication de nombreux équipements de loisirs : matériel de camping, de plongée et d'alpinisme, bâtons

de ski, clubs de golf, VTT, trottinettes... Il se retrouve aussi dans de multiples objets de l'environnement quotidien : ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs, le revêtement des disques compacts, le mobilier urbain, la signalisation routière...etc.

Enfin, il a investi l'électricité et l'électronique : lignes haute tension, câbles souterrains, fils de bobinage pour transformateurs... L'excellente conductibilité de l'aluminium ainsi que sa légèreté et sa solidité expliquent son développement dans ce domaine [7].

➤ **Répartition de la consommation d'aluminium**



**Figure I.1.** Répartition de la consommation de l'aluminium [5].

## **I.2. Alliages d'aluminium**

### **I.2.1. Définition**

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d'améliorer ces propriétés, on est conduit à ajouter les éléments d'addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, etc. Ces éléments entrent en solution solide ou forment des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels. L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique [8].

**I.2.2. Alliage****I.2.2.1. Définition**

Un alliage d'un métal est fait en le combinant avec un ou plusieurs autres métaux ou les non-métaux qui améliorent ses propriétés souvent. Les alliages ont des propriétés différentes de celles des éléments constitutifs, généralement ; les propriétés physiques, telles que la densité et la conductivité, d'un alliage ne peut différer grandement de ceux de ses éléments constitutifs, mais les propriétés mécaniques telles que résistance à la traction et la résistance au cisaillement peut être considérablement différents de ceux des matériaux constitutifs. Exemple l'acier est plus fort que son élément en fer [9].

**I.2.2.2. Influence des éléments d'addition sur les propriétés de l'aluminium**

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants),
- les alliages à durcissement structural (alliages trempants).

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage. Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable.

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- Les caractéristiques mécaniques (charge de rupture  $R_m$ , limite élastique  $R_{p0.2}$ , l'allongement à la rupture  $\epsilon_r\%$ , la dureté HB),
- La masse volumique,
- Les conductivités électrique et thermique,
- La résistance à la corrosion,
- L'aptitude au soudage,
- L'usinabilité,

- L'aptitude à la déformation,
- L'aptitude à l'anodisation [4].

### I.2.3. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Al}_6\text{CuMg}_4$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ . Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en deux grandes classes selon leur utilisation : les alliages corroyés et les alliages de fonderie :

- **Alliages corroyés** : destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.
- **Alliages de fonderies** : prévus pour le moulage des formes [3].

Certains des alliages coulés les plus importants ainsi que leurs propriétés sont indiqués ci-dessous:

**Tableau I.1.** Les propriétés de quelques alliages de coulés. [4]

Alliage	propriétés
$\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$	Durcit par vieillissement, résistant aux vibrations et à la corrosion
$\text{AlSi}_5\text{Cu}_1$	Durcit par vieillissement, bonne coulabilité, pour les soudures, pour coulée de lames minces
$\text{AlMg}_3$	Résistant à l'eau de mer
$\text{AlSi}_{25}+\text{Cu Ni}$	Durcit par vieillissement, alliage spécial, pour les pistons, résistance à l'usure grâce à son contenu élevé en Si
$\text{AlMgSiPb}$	Adéquat pour l'usinage
$\text{AlSi}_9\text{Cu}_3$	Alliage universel adéquat pour le coulage, l'alliage le plus important pour la coulée sous pression

**Chapitre 2**

**Alliages**

**d'aluminium de**

**fonderie**

## **Chapitre II. Alliages d'aluminium de fonderie**

### **II.1.Définition**

Une grande partie des besoins en aluminium est utilisée comme pièce de fonderie. Dans certains pays, elle est basée sur 70 % de la production.

Ils sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, et la matière première utilisée pour les obtenir est, le plus souvent, la matière secondaire telle que déchets, rebuts d'aluminium, etc, [3] destinés à être transformés par des techniques de fonderie. Ils sont souvent appelés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie [10].

Les alliages de fonderie contiennent généralement une plus grande proportion d'éléments d'alliage que les alliages de corroyage. L'ajout des éléments d'alliages, tels le silicium, le magnésium ou le cuivre se fait en fonction de nombreux facteurs propres à la fonderie : la coulabilité, la fluidité, la résistance à la déchirure à chaud, l'étanchéité à la pression, le retrait de refroidissement. S'y ajoutent les caractéristiques communes à tous les procédés de transformation : l'usinabilité, la résistance à la corrosion, l'aptitude aux traitements de surface ou au soudage [11]. Généralement, les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques avec une résistance élevée à la corrosion. [3]

De plus, ces alliages sont élaborés en prenant en considération les procédés de fonderie. Un même alliage ne convient pas nécessairement au moulage au sable, au moulage en coquille ou au moulage sous pression [11].

### **II.2.Désignation des alliages d'aluminium de fonderie**

Les alliages de fonderie peuvent être classés par la désignation numérique standard (Aluminium Association) : trois chiffres et une décimale [12].

**Tableau II.1.** Désignation des alliages d'aluminium de fonderie (Aluminium association).

Série	Alliage
100.0	Al commercial pur
200.0	Al-Cu
300.0	Al-Si-Mg et Al-Si-Cu
400.0	Al-Si
500.0	Al-Mg
700.0	Al-Zn
800.0	Al-Sn
900.0	Al et autres éléments

Le premier chiffre de la série désigne la famille et indique le ou les principaux éléments alliés (tableau II.1). Les deux chiffres suivants de la série indiquent les éléments spécifiques dans l'alliage et le dernier chiffre après le point indique la forme du produit, soit coulé ou en lingot. Dans la série lxx.x, les autres chiffres représentent la pureté de l'alliage [12].

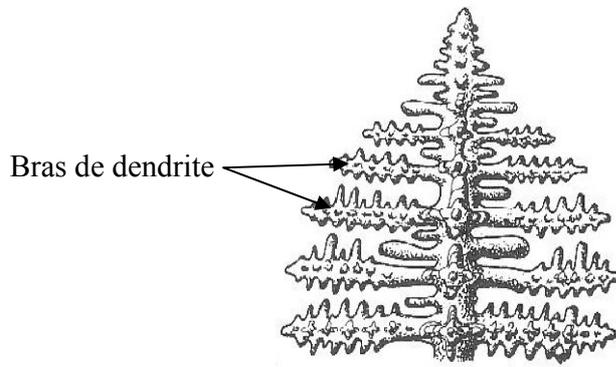
### II.3. Structure des alliages de fonderie

Cette structure comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypoeutectiques), des eutectiques plus ou moins complexes (binaires, ternaires) et des constituants intermétalliques.

Dans le système Al/Si, les cristaux solides d'aluminium se forment sur les parois du moule (plus froides que le cœur) et croissent vers l'intérieur. Leur composition en silicium est inférieure à celle du liquide qui les entoure car la solubilité de silicium dans l'aluminium décroît avec la température. Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température de solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion). Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche.

Mais si un germe du cristal en croissance parvient à traverser cette couche de liquide en surfusion, il se retrouve dans un milieu non enrichi en silicium et peut se solidifier, ce qui est thermodynamiquement favorable. Cette protubérance est instable et croît rapidement, ce qui explique que les cristaux d'aluminium se développent non sous forme de sphères ou d'aiguilles mais sous forme d'arborescences appelées dendrites (figure II.1), dont les bras

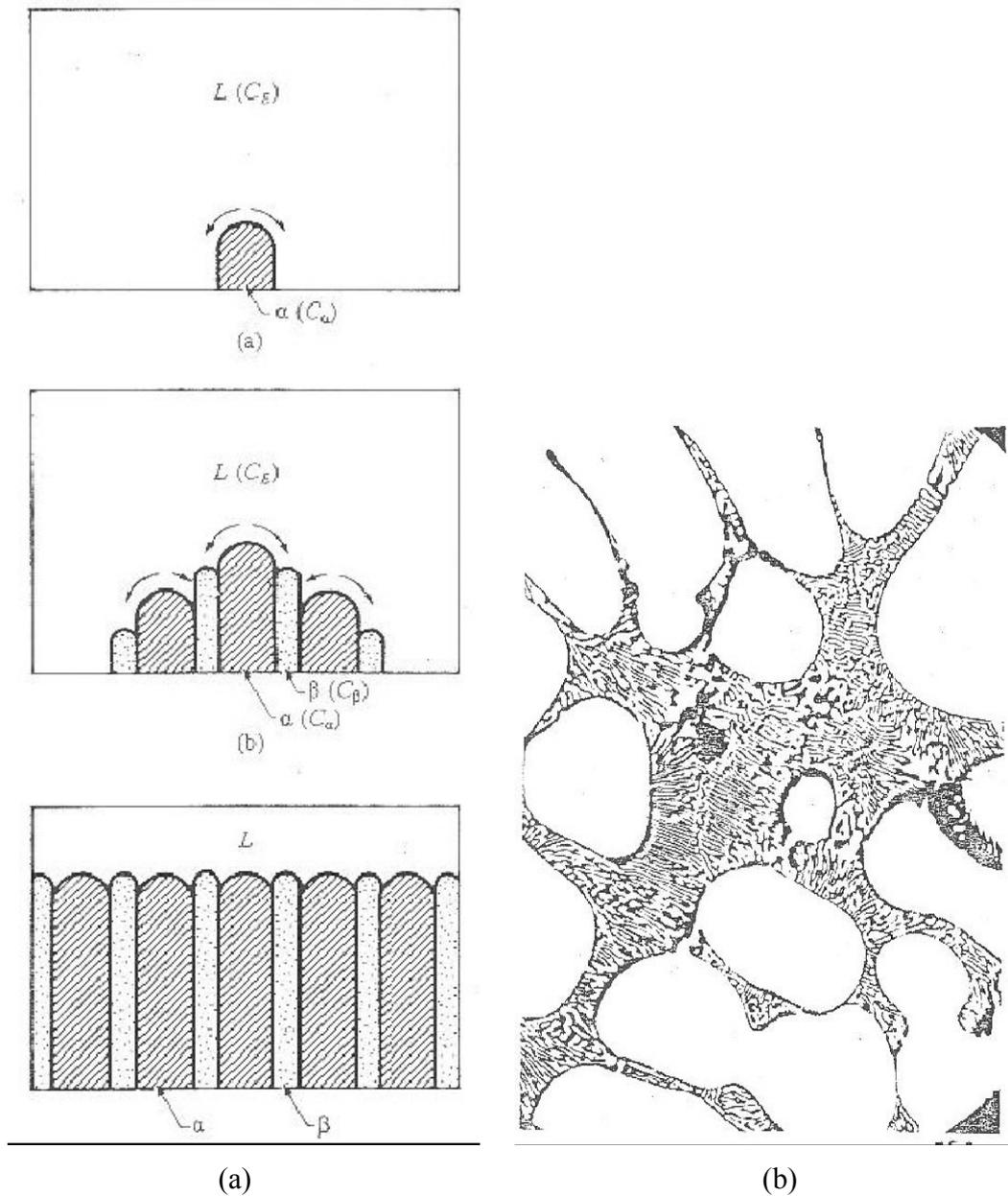
secondaires sont espacés de quelques dizaines de micromètres, cette distance est appelée espacement des bras de dendrite.



**Figure II.1.** Schéma d'une dendrite

La taille de grain dans les alliages d'aluminium de fonderie est généralement millimétrique et donc bien supérieure à la taille d'une dendrite.

L'eutectique se solidifie alors entre les bras de dendrite, dans une zone riche en silicium rejeté à l'avant du front de solidification (silicium en large excès dans cette zone). Ceci a enrichi le métal liquide environnant en silicium, qui va précipiter sous forme d'une plaquette, ce qui draine le silicium en solution à proximité et crée juste à côté une zone d'aluminium presque pur. On va donc former une lamelle d'aluminium. De proche en proche, on forme donc un eutectique lamellaire par croissance compétitive (figure II.2) [13].



**Figure II.2.** (a) Principe de la croissance compétitive, menant à un eutectique lamellaire  
(b) Schéma d'un eutectique lamellaire [13].

#### II.4. Propriétés physiques des alliages de fonderie

Ils ont toutes les caractéristiques nécessaires pour être utilisés de façon efficace dans la production de pièces coulées :

- un point de fusion relativement bas ;
- une fluidité élevée qui permet de remplir complètement les moules ;

- une bonne stabilité chimique ;
- un transfert de chaleur rapide entre l'aluminium et le moule, que l'aluminium soit liquide ou solide ;
- un bon fini de surface avec peu ou pas de défauts ;
- le seul gaz soluble dans l'aluminium, l'hydrogène, peut être contrôlé efficacement ;
- plusieurs alliages ont une bonne résistance au craquage à chaud.
- Alliages non traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.
- Résistance à la rupture typique comprise entre 117 et 172 MPa [11].
- L'inconvénient majeur de ces alliages, est qu'ils ont un retrait important qui se situe entre 3,5% et 8,5% en volume [12].

## **II.5. Défauts de fonderie**

### **II.5.1. Défauts de retrait à la solidification et retassures**

Les retassures sont les défauts de retrait à la solidification. L'origine physique est la contraction de la plupart des métaux à la solidification. Il est possible d'annuler (ou du moins de réduire fortement) ce retrait à la solidification en jonglant avec les compositions. En effet, quelques matériaux (non métalliques) comme le silicium ou le graphite se dilatent à la solidification. Un alliage Al-Si ou les fontes présentent ainsi des retraits très réduits, voir des gonflements. En dehors de ces deux cas particuliers, le retrait est inévitable.

Il ya deux types de retassures, les retassures majeurs et mineurs (ou microretassures ou encore la porosité). Les premières sont macroscopiques et ne se trouve que dans certaines parties dans la pièce. Elles résultent de l'emprisonnement du liquide dans la pièce en cours de refroidissement de la pièce et du masselottage. Les retassures mineures, par contre se retrouve partout dans la pièce. Elles sont microscopiques, elles résultent de l'emprisonnement de liquide en aval de la zone semi-solide de la solidification dendritique [14]

### **II.5.2. Soufflures**

Comme les retassures mineures, les soufflures sont comptées, comme de la porosité. La seule différence morphologique est qu'elles sont sphériques et lisses à l'intérieur, alors que les retassures peuvent avoir une forme complexe.

Les soufflures ont une origine apparemment différente de celles des retassures. Elles proviennent de :

-gaz dissous dans le liquide, à cause de la chute de sa solubilité avec la température et/ ou la pression.

-gaz emprisonné pendant le remplissage en régime turbulent ou pulvérisé (fonderie sous pression) et incorporé dans le solide par le front de solidification.

-réaction métal liquide-surface de moule (comme les moule en sable vert) produisant un gaz qui est ensuite incorporé dans le liquide et enfin dans le solide.

➤ Pour éviter les soufflures, il faut lutter contre les sources de gaz :

-éviter l'entraînement de gaz pendant le remplissage.

-utiliser des produits en surface du moule non réactifs.

-dégazer proprement le liquide, en particulier, le dégazage de l'aluminium se fait par bullage d'un gaz neutre (argon, azote) ou réactif (contenant du chlore) qui attirent l'hydrogène en solution vers les bulles [14].

### II.5.3. Ségrégations

La ségrégation des caractérise par l'hétérogénéité de la concentration en élément d'alliage dans une pièce. On parle généralement de macro- et microségrégations. Les premières sont des hétérogénéités à l'échelle de la pièce. Il est impossible de les gommer que ce, soit par un traitement thermique ou des opérations de carroyage. Les secondes sont des hétérogénéités à l'échelle de la microstructure ou des grains. Un traitement thermique d'homogénéisation permet de les faire disparaître [14].

### II.5.4. Inclusions

Les inclusions sont des particules piégées dans le métal solide. Elles sont non métalliques c'est-à-dire qu'elles ne sont pas une phase nouvelle apparue en fin de solidification à cause de la ségrégation en milieu fermé.

Elles peuvent avoir deux origines :

- **Exogène** : elles proviennent de l'extérieur. Cela peut être des morceaux de réfractaire emporté par érosion, de fragments de laitier mélangé au liquide (fonte, acier) ou encore la couche d'oxyde en surface du liquide qui est entraînée dans le moule (aluminium)
- **Endogène** : elles se forment dans le solide ou le liquide une fois dans le moule. C'est en gros une réaction qui conduit à la précipitation d'un intermétallique, ou d'un oxyde.

Les inclusions ont des tailles entre 1 et 100 $\mu$ m et sont, heureusement, relativement peu nombreuses. [14].

### II.5.5. Criques à chaud

Criques à chaud est une mauvaise traduction de hot tearing qui devrait se traduire par déchirure à chaud. Le terme anglais explicite l'aspect de défauts, qui ressemble à la déchirure pelucheuse du papier, et les conditions de formation à chaud. C'est un défaut d'origine thermomécanique à chaud. Les forces qui engèrent ce déchirement proviennent de la contraction du métal à la solidification et au refroidissement. Le criquage à chaud est associé aux soufflures car l'apparition d'une fissure dans la zone interdendritique étirée passe par la formation d'une soufflure qui croît linéairement le long des dendrites [14].

## II.6. Qualités recherchées des alliages d'aluminium de fonderie

Les qualités recherchées pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leurs formes définitives après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie (tableau II.2)

**Tableau II.2.**Qualités des alliages de fonderie [6].

Qualités	Observation
-Coulabilité	-Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte
-Absence de formation de criques	-Fissuration à chaud causée par le retrait du métal
-Bonne répartition de la porosité	-Due au retrait qui accompagne la solidification
-Température de fusion relativement basse	-Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression

## II.7. Classification des alliages d'aluminium de fonderie

Il existe, en plus de l'aluminium non allié, quatre grandes familles d'alliages d'aluminium de fonderie, qui sont fonction des éléments d'alliages ajoutés. Ceux-ci se retrouvent soit en solution solide soit sous forme de précipités. Ces familles sont les alliages au silicium, au cuivre, au magnésium et au zinc. On distinguera les additions principales

déterminantes pour les propriétés du matériau et les additions secondaires, en plus faible quantité, qui ont une action spécifique:

➤ **Le silicium**

(Confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, une diminution de la criquabilité et de l'aptitude à la retassure (il se dilate à la solidification). On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure (le silicium est très dur), de l'étanchéité des pièces, mais une diminution de l'allongement à rupture [13].

➤ **Le cuivre**

Augmente les propriétés mécaniques par durcissement structural, principalement la dureté (donc l'usinabilité) et la tenue à chaud sans perte au niveau de la coulabilité mais diminue la résistance à la corrosion et augmente l'aptitude à la crique [13].

➤ **Le magnésium**

Augmente la résistance à la corrosion, aux dommages, l'allongement à rupture et engendre un nouveau système durcissant après traitement thermique ( $Mg_2Si$ ) mais diminue les propriétés de fonderie et d'usinabilité (les copeaux ont tendance à coller aux outils, ce qui augmente leur usure) [13].

➤ **Le zinc**

Très peu utilisé à cause de ses médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques, il se trouve sous forme de ternaire Al-Zn-Mg, ce qui donne un alliage à durcissement structural avec des précipités  $MgZn_2$ , atténue le gazage de l'alliage, améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la microretassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu [13].

## **II.8. Alliages d'aluminium-silicium**

### **II.8.1. Définition**

Les alliages aluminium-silicium sont les plus appropriés à la réalisation des pièces de fonderie. De nombreuses nuances existent, souvent avec adjonction de magnésium et de titane [10].

Les alliages d'aluminium silicium sont de plus grande importance pour les industries d'ingénierie car ils présentent une résistance élevée au rapport de poids, résistance à l'usure, faible densité, faible coefficient de dilatation thermique, etc. Le silicium confère une grande fluidité et un faible retrait, qui se traduisent par une bonne coulabilité et la soudabilité. Les

alliages Al-Si sont désignés par la série 4xxx selon Aluminium Association Wrought Alloy Designation System [9].

Certains alliages de cette série contiennent aussi du cuivre, ce qui permet d'associer les propriétés du silicium et du cuivre, et d'obtenir ainsi des alliages ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et une très bonne aptitude à l'usinage tout en évitant le principal défaut des AU (série 20000), à savoir le risque de criques [10].

Les principales caractéristiques de la série 4xxx sont les suivants:

- Traitement thermique
- Bonnes caractéristiques d'écoulement, la résistance moyenne
- Facilement rejoint, en particulier par brasage et le soudage

Il existe deux utilisations principales de la série 4xxx - pour la construction et alliage d'apport de soudage. Ces deux applications sont dues à des excellentes caractéristiques d'écoulement fournis par la teneur en silicium relativement élevée [9].

### **II.8.2. Principaux effets de silicium dans les alliages Al-Si**

Sont les suivants :

- Réduction sensible de dilatation thermique par le silicium
- Diminution légère de susceptibilité magnétique et de paramètre de maille par le silicium
- Amélioration de la coulabilité et réduction de la criquabilité et l'aptitude à la retassure par le silicium [15].
- Pauvre usinabilité en raison de la dureté du silicium [9].

### **II.8.3. Diagramme de phase binaire Al/Si**

Le diagramme d'aluminium montre l'existence de deux solutions solides  $\alpha$  et  $\beta$ . La première est essentiellement en aluminium, elle contient jusqu'à 1,65 % de Si, la seconde est essentiellement en silicium, elle contient jusqu'à 3 % d'aluminium. Un eutectique existe à 12,7 % de Si (a lieu à 577 ° C) [15].

#### **➤ Un eutectique**

Est un mélange de deux corps purs qui fond et se solidifie à température constante [16]. Un liquide eutectique se solidifie non pas sur un intervalle de solidification mais en un point de fusion, tout comme un corps pur. Il ne présente pas de ségrégation à l'échelle macroscopique, la composition du solide et celle du liquide étant globalement les mêmes [14].

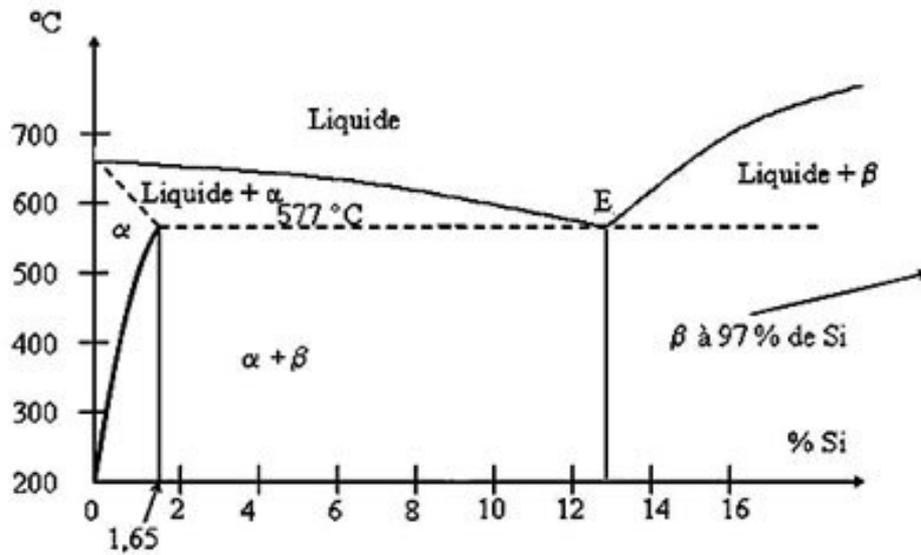


Figure II.3. Diagramme de phase Al Si [15].

Al Si est un système binaire eutectique simple avec une solubilité limitée de l'aluminium dans le silicium et une solubilité limitée de silicium dans l'aluminium. Il n'y a qu'une seule réaction invariant dans ce schéma, à savoir  $L \rightarrow \alpha + \beta$  (eutectique) avec L est la phase liquide. Selon la concentration en Si en pourcentage en poids, les systèmes d'alliages Al-Si sont divisés en trois grandes catégories:

1. Hypoeutectique (<12% en poids de Si)
2. Eutectique (12-13% en poids de Si)
3. Hypereutectique (14-25% en poids de Si) [9].

## II.9. Alliage d'AlSi12

### II.9.1. Description

Alliage d'aluminium dont le pourcentage en poids de silicium est d'environ 12%, c'est un alliage eutectique aux excellents pouvoirs de remplissage du moule, hautes résistances à la fissuration à chaud et aux excellentes propriétés de coulée par grande résistance chimique [17].

➤ **Composition chimique (%)**

Elle est comme suit :

**Tableau II.3.**Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12 [18]

Élément	Pourcentage massique (%)
Si	10,5-13,5
Fe	0,45- 0,9
Cu	<0,08
Mn	0,55
Mg	< 0,05
Cr	< 0,05
Ni	< 0,05
Zn	< 0,15
Pb	< 0,05
Sn	< 0,05
Ti	< 0,15
Autres (chacun)	< 0,05
Autre (total)	< 0,25

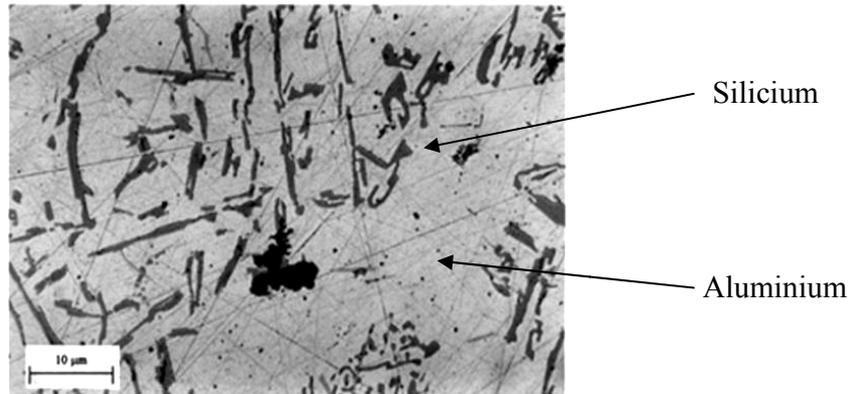
➤ **Propriétés mécaniques**

Les principales propriétés mécaniques de l'alliage AlSi12 sont classées dans le tableau suivant :

**Tableau II.4.**Propriétés mécaniques de l'alliage AlSi12 [17].

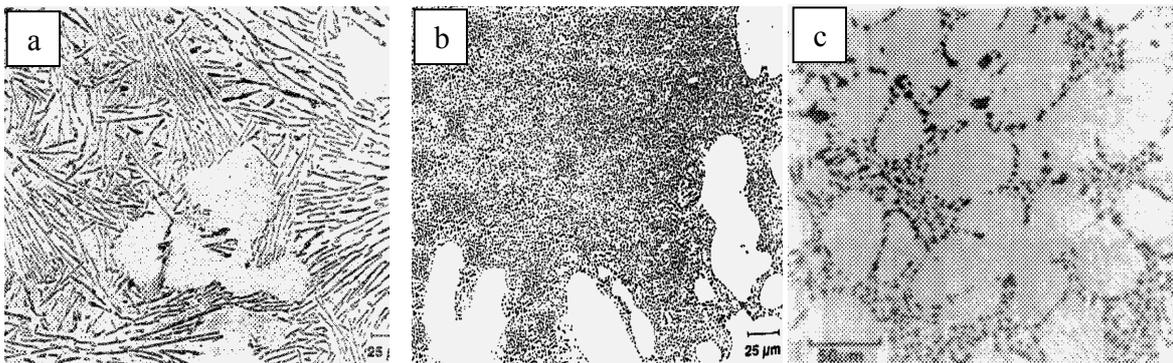
densité	résistance à la fatigue Rm Mpa	Limite élastique Rp0, 2 Mpa	Allongement à la rupture ε <sub>r</sub> %	Dureté BRINELL HB
2.65	125-150	70-85	15-30	55

## II.9.2. Microstructure de l'AlSi12



**Figure II.4.** Microstructure de l'alliage AlSi12% [9].

L'alliage AlSi12 est un alliage eutectique. Lorsqu'il se solidifie, cet alliage se compose en majorité de phases eutectiques et de particules de silicium qui doivent ensuite être modifiées par du strontium ou du sodium pour avoir une résistance et une ductilité adéquates. Avant d'être modifié, l'alliage eutectique présente des particules de silicium lamellaires ou aciculaires dispersées dans la matrice d'aluminium (figure II.5.a). La présence de particules polyédriques de silicium primaire peut aussi être observée. Avec une addition de strontium de 0,02%, l'alliage eutectique est complètement modifié et la structure devient fibreuse (figure II.5.b). De son côté, une addition de sodium transforme la morphologie en faisant précipiter le silicium de façon globulaire (figure II.5.c). Par contre, une addition trop élevée de strontium entraîne la formation de porosités. Ce phénomène est beaucoup plus important lorsque la solidification est très rapide, comme pour les pièces très minces [12].



**Figure II.5.** Microstructure de l'alliage AlSi12 : a) eutectique aciculaire non modifié; b) eutectique modifié au Sr ; c) eutectique globulaire modifié au Na.

### II.9.3. Propriétés physiques de l'AlSi12

Les propriétés physiques de cet alliage sont indiquées dans le tableau suivant :

**Tableau II.5.** Propriétés physique de l'alliage AlSi12.

Propriété	valeur
Densité	2567 kg/m <sup>3</sup>
Coefficient d'expansion thermique	20,4 um/m-K
Chaleur spécifique	963 J/kg-K
Chaleur latente de fusion	389Kj/kg
Conductivité thermique	121 W/m-K
Conductivité électrique	31 %IACS
Résistivité électrique	55,6 nQ -m
Température de fusion	577 - 630 °C
Température de coulée	635 - 704 °C

Autres propriétés :

- Usinabilité : ces alliages peuvent être usinés, mais sont très abrasifs à cause de leur haute teneur en silicium.
- Soudabilité : pour le soudage à l'arc, ces alliages ont des bonnes propriétés.
- Coulabilité : ces alliages ont une excellente fluidité, une bonne résistance à la fissuration à chaud ainsi qu'une excellente résistance à la pression.
- Résistance à la corrosion : la résistance à la corrosion est excellente. La couche d'oxyde qui se forme à la surface protège efficacement l'intérieur [12].

### II.9.4. Quelques applications de l'alliages AlSi12

De fait de ses exceptionnelles propriétés mécaniques et physiques, l'AlSi12 est utilisé dans des vastes domaines industriels tels que l'automobile, aviation, mécanique, appareillages électriques, chimie...etc [15].

# **Chapitre 3**

## **Procédés de soudage**

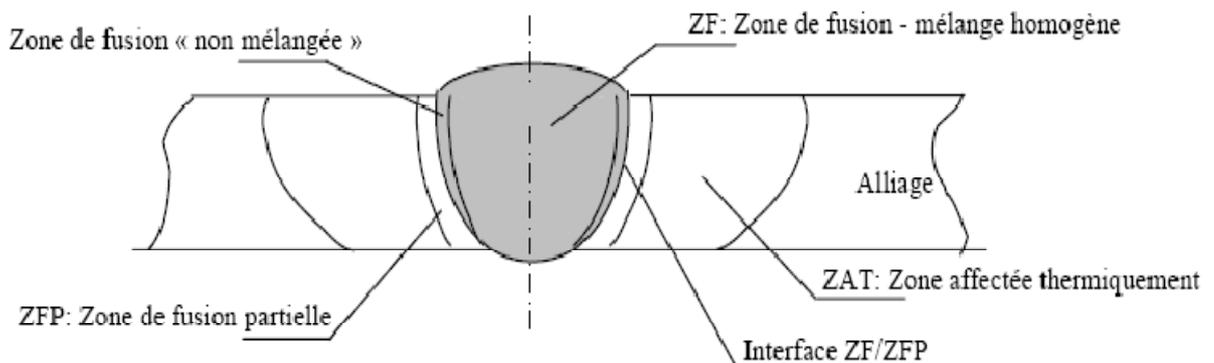
## Chapitre III Procédés de soudage

### III.1.Introduction

Jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, des sections de métal étaient jointes par un processus de chauffage et de martelage appelé le soudage à forge. Aujourd'hui, toute une variété de processus de soudage différents est disponible, de sorte que le soudage est utilisé intensivement comme processus de fabrication servant à joindre des matériaux de nombreuses compositions, formes et tailles [19].

### III.2. Définition

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (figure III.1).



**Figure III.1:** Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion.

La zone de fusion (ZF) est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La zone étroite à l'extrémité du bain de fusion est la zone « non mélangée » : dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base. Le bain de fusion est délimité

par l'interface de soudure qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée.

Directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une zone de fusion partielle (ZFP); le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle. La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base

Finalement la seule partie de la pièce qui ne subit pas de modifications microstructurales est le métal de base non affecté. Bien que métallurgiquement inchangé, le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure [20].

### **III.3 Conditions de réalisation de l'opération de soudage**

La soudure de deux pièces est rendue plus facile si:

- La composition de leurs métaux est identique ou très voisine : la fusion se produit pour chacun d'eux à la même température dans ce cas, la pièce est réalisée sans discontinuité de matière.
- Les métaux présentent le phénomène de fusion pâteuse avec un temps de maintien relativement étendue (caractère de soudabilité).
- Les pièces sont de faibles épaisseurs : l'uniformité des températures est facilement obtenue [21].

### **III.4. Définition de quelques techniques de soudage**

#### **III.4.1. Soudage TIG**

Afin de mieux briser la couche d'oxyde située en surface, l'opération de soudage est réalisée en courant alternatif. En complément de l'utilisation de l'argon ainsi que des mélanges argon-hélium, une autre solution a été développée, à savoir un gaz de protection sous forme de mélanges à deux et trois constituants : Aluline N et Aluline He N. L'ajout d'azote dans l'Aluline N stabilise, concentre l'arc électrique et améliore la pénétration. Il diminue

également le taux de porosité en zone fondue. Le soudage TIG en courant continu avec une polarité inverse n'est pas très répandu. Il nécessite l'utilisation de l'hélium pur ou d'un gaz à haute teneur en hélium.

Le procédé TIG est principalement utilisé pour l'obtention de soudures de qualité, il peut être optimisé en modifiant la balance pour le soudage en courant alternatif

#### **III.4.2.Soudage MIG**

Dans la plupart des cas, il est conseillé d'utiliser la technique pulsée. Celle-ci permet de souder des épaisseurs plus faibles et diminue en même temps le risque de formation de porosités. De plus, la formation de projections est réduite. La gamme de gaz est similaire à celle utilisée pour le soudage TIG. L'ajout d'azote dans les mélanges Aluline N améliore la stabilité et compacité. Plus la tôle est épaisse, plus il est conseillé d'augmenter la teneur en hélium. Le procédé MIG est utilisé pour sa haute productivité.

#### **III.4.3.Procédés particuliers**

Le soudage plasma est une alternative possible au soudage TIG que l'on utilise de préférence pour le soudage automatisé. Il en est de même pour le procédé plasma MIG, combinaison des procédés MIG et plasma. Cette technologie permet de souder des tôles très épaisses en une seule passe avec une qualité très élevée. La technique MIG bi-fils regroupe deux fils-fusibles dans une même buse avec, dans la plupart des cas, deux dévidoirs et sources de courant séparées. Cette technique est de préférence utilisée pour la réalisation de cordons de grande longueur en position à plat ou sur des cordons circulaires [22].

Chacun de ces processus possède ses caractéristiques propres et uniques, par exemple, la pénétration, la vitesse de soudage, la génération de laitier, le débit de chaleur, les propriétés d'une soudure, etc. et ceci peut, en revanche, avoir une influence considérable sur le détail microstructural qui est résulte.

En conséquence, toute étude sur les effets d'un processus de soudage particulier demandera un examen métallurgique minutieux d'échantillons de soudure représentatifs, que l'objectif soit l'examen de l'intégrité d'ensemble de la soudure ou bien la relation microstructure/propriété, ou encore l'identification de la nature et l'origine des défauts. L'exactitude de l'analyse et l'interprétation micro-structurelles vont alors dépendre de la production des échantillons préparés, exempts de tous artefacts pouvant avoir été introduits à n'importe quelle étape du processus de préparation [19].

### III.5. Difficultés de soudage d'aluminium et ses alliages

On considère généralement que le soudage de métaux à base d'aluminium est nettement plus difficile que celui d'alliages d'acier ceci est dû aux propriétés physiques spécifiques de l'aluminium, dont nous décrivons les plus importantes ci-après.

#### III.5.1. Couche d'oxyde avec un point de fusion élevé

L'aluminium forme une très fine couche d'oxyde naturelle de l'ordre de  $0.01\mu\text{m}$  de composition  $\text{Al}_2\text{O}_3$  qui assure sa résistance à la corrosion et qui présente un point de fusion (environ  $2050^\circ\text{C}$ ) très élevé par rapport au métal. Son poids spécifique est plus élevé que celui de métal pur. La couche d'oxyde fonctionne comme un isolant électrique et doit être éliminée avant le soudage [23].

#### III.5.2. Chaleur de fusion très élevée

La conductivité thermique oscille entre  $230\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour l'aluminium pur et entre  $115\text{-}155\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour ses alliages. Cette propriété rend indispensable un apport de chaleur très élevé et concentré durant le soudage. Elle entraîne également une très grande vitesse de refroidissement qui favorise la formation de pores et de soufflures en raison de la vitesse de solidification élevée.

En raison de l'enthalpie de fusion élevée, le procédé de soudage mis en œuvre doit apporter une énergie thermique relativement importante par rapport au point de fusion [23].

#### III.5.3. Coefficient de dilatation thermique élevé

Le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium est presque deux fois plus élevé que celui de l'acier et se situe dans la plage d'environ  $20\cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$  ; il provoque un retrait plus important lors de refroidissement. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre des mesures spéciales pour éviter les déformations et fissures de retrait sur la pièce à souder [23].

### III.6. Particularités survenant lors de soudage

#### ✓ Le problème de l'apparition de fissures

Le risque d'apparition de fissures est plus élevé au moment du refroidissement et du retrait surtout lorsque l'alliage a un grand intervalle de solidification et forme des eutectiques de joints de grains fondant à basse température. La tendance à la fissuration dépend fortement de type d'alliage qui doit toujours être pris en compte dans le choix du métal d'apport. Les fissures à la racine sont souvent dues à des oxydes d'aluminium et peuvent être évitées par un chanfreinage en racine [23].

**✓ Problème de l'apparition de soufflures**

Une des principales causes de l'apparition des soufflures dans le métal d'apport déposé est la chute abrupte de la solubilité des gaz lors de la solidification. Ici, c'est principalement l'hydrogène qui apparaît, vu que l'oxygène éventuellement présent est lié à l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour former de l'azote nitrure d'aluminium. La baisse de la solubilité du gaz conduit au dégagement de petites cloques submicroscopiques qui continuent à se gorger de gaz et se déplacent vers le haut à l'intérieur du métal en fusion. Lorsque la vitesse de soudage est élevée et que le bain de fusion se solidifie rapidement, le dégazage n'a pas le temps de s'effectuer entièrement et des soufflures apparaissent dans le métal d'apport. Le problème des soufflures se pose plus pour le soudage MIG que pour le procédé TIG qui est relativement plus stable où il y a moins d'air ambiant humide qui s'infiltrerait dans l'atmosphère protégée.

Les principales mesures à prendre pour éviter l'apparition de soufflures sont indiquées ci-dessous :

- La surface de la matière de base et de la matière d'apport doivent être propres et sèches
- Traiter les pièces au préalable par ponçage, décapage, dégraissage
- Arc stable et guidage sans à-coups de la torche
- Le flux de gaz de protection doit être exempt de turbulences-dosage et degré de pureté corrects de gaz
- Buse de gaz de protection largement dimensionnée, propreté de la buse
- Le faisceau doit être le plus court possible
- Utiliser une torche avec un système de refroidissement fermé
- Rincer suffisamment longtemps avant le soudage
- Prévoir une protection de la racine
- Souder autant que possible en position PA ou PF
- Éviter les positions de soudure PC et PE [23].

**➤ Coloration anormales au niveau de la soudure**

Des colorations anormales, plus ou moins fortes, peuvent apparaître dans la zone de soudure, indépendamment du procédé de soudage utilisé. Elles augmentent avec le taux de magnésium et de silicium. Si une anodisation est prévue après le soudage, on peut s'attendre à un changement assez important de couleur sur les alliages hétérogènes surtout

lorsque certains composants de la structure sont décapés lors de l'anodisation ou éliminés par la solution électrolytique [23].

### **III.7. Analyse des défauts ; recherche et développement.**

L'examen des sections métallographiques dans les cordons de soudure est habituellement accompli à deux niveaux d'inspection:

- **Macro:** Où des grossissements jusqu'à 50x sont utilisés sur des microscopes stéréoscopiques.
- **Micro:** Où l'examen a lieu à des grossissements plus élevés (jusqu'à 1000x) sur microscope optique.

L'examen macroscopique est généralement réalisé sur des sections transversales de joints soudés, non-enrobées et ne nécessite que des techniques de tronçonnage et prépolissage grossier/ fin. La finition alors obtenue est adéquate pour l'attaque, suivie de l'examen des particularités macrographiques du joint soudé.

Pour les techniques d'examen micrographique et de mesure de dureté sur une coupe transversale à la soudure, l'obtention d'une surface polie et optiquement plane est nécessaire. Ceci implique un tronçonnage, enrobage, suivis d'un prépolissage et polissage. Il faut s'attendre à ce que des artefacts puissent être introduits à tout niveau du processus de préparation. Ceci est particulièrement le cas pour les sections soudées, car non seulement les variations micro-structurelles apparaissent sur des distances relativement courtes, mais certaines soudures peuvent aussi joindre des métaux dissemblables avec des propriétés complètement différentes [19].

### **III.8. Quelques application de procédés de soudage**

De nombreux types d'industries de production emploient une grande variété de processus de soudage:

- Les industries aéronautique et aérospatiale, pour les ailes et les fuselages, par exemple.
- Les industries navale et maritime, pour les panneaux des ponts et les superstructures.
- Les industries de transport terrestre / automobile.
- Les industries du pétrole et pétrochimique pour les plateformes de forage et les pipelines, par exemple.
- Domestique, par exemples les produits électroménagers et les meubles métalliques [19].

**Chapitre 4**

**Matériaux et**

**techniques**

**expérimentales**

## Chapitre IV Matériaux et techniques expérimentales.

### IV.1.Introduction

Les difficultés rencontrés lors de soudage de l'aluminium et de ses alliages sont liés à leurs caractéristiques, notamment leur diffusivité thermique et coefficient de dilatation élevés, la présence d'une couche d'alumine en surface de pièce et une très faible solubilité des gaz dans l'état solide, le risque de fissuration à chaud est élevé pour certains alliages rampants et le manque de liaison, sont de problèmes généralement beaucoup rencontrés lors de l'assemblage de ses matériaux.

Le présent travail consiste à étudier l'évolution microstructurale du joint soudé d'un alliage d'aluminium (AlSi12) par rapport au métal de base et en particulier la zone fondue et la zone affectée thermiquement.

Dans ce chapitre seront d'abord présentés l'alliage que nous avons étudié et son composition chimique, puis les techniques de préparation des échantillons pour son étude morphologique. On a également décrit les techniques d'analyse utilisée pour la caractérisation des échantillons qui sont le microscope optique et la diffraction des rayons X.

### IV.2. Matériau utilisé

Notre matériau est un alliage d'aluminium (AlSi12) qui est élaboré au niveau de l'usine IMO de Constantine. Le tableau suivant présente la composition chimique de l'alliage en pourcentage massique :

**Tableau IV.1** : composition chimique de l'alliage AlSi12.

Élément	Si	Al	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe
% en masse	12	86.48035	0.30407	0.13097	0.32038	0.32038	0.44385

Concernant la technique de soudage des plaques d'alliage on note qu'elles ont été soudées par un métal d'apport de diamètre 3.5 cm selon la norme (DIN 1732). La composition chimique massique de ce métal d'apport est illustrée dans le tableau suivant :

**Tableau IV.2.** Composition chimique du métal d'apport.

Élément	Si	Al	Mg	Mn	Fe
% en masse	0.5	97.5	0.3	1.3	0.7

Le procédé de soudage a été réalisé à l'arc électrique et sous les conditions du travail suivantes : I=70-110A et V=24V.

### IV.3 Préparation des échantillons

Pour l'étude métallographique, l'observation en microscope optique nécessite une bonne préparation de la surface. Les échantillons de différents zones (zone fondue ZF ; zone affectée thermiquement ZAT ; et métal de base MB) ont été prélevés, subit un traitement thermique de recuit, ensuite un polissage mécanique puis une attaque chimique par le réactif Killer.

#### IV.3.1 traitement thermique

Les échantillons d'AlSi12 ont été munis à un traitement thermique de recuit dans le four de laboratoire de mécanique. On a été utilisé pour cela quatre valeurs de températures : 100°C, 200°C, 300°C, et 400°C tel que pour chaque valeur de température on utilise deux échantillons l'un reste dans le four pendant 30 minutes et l'autre 45 minutes.

#### IV.3.2. Polissage des échantillons

Les échantillons subissent un polissage en utilisant des papiers abrasifs de granulométrie décroissante de 120 à 1000, placés sur le disque rotatif d'une polisseuse qui est représenté dans la figure suivante :



Figure IV.1. Polisseuse.

L'utilisation de l'eau pendant cette étape est nécessaire au cours de travail pour éviter n'importe quelle influence de la chaleur produite à partir du frottement entre le papier abrasif et la surface de l'échantillon sur cette dernière. Ensuite, les échantillons sont soumis à un polissage fin en utilisant le tissu feutré avec addition du lubrifiant et de la pâte diamantée. Enfin ils ont été lavés par l'eau distillée et séchés à l'air comprimée.

#### IV.3.3. Attaque chimique

Les échantillons ont été chimiquement attaqués par le réactif Killer de composition chimique suivante :

-Acide fluorhydrique (HF) : 2ml

-Acide chlorhydrique (HCl) :3 ml

-Acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) : 5ml

-Eau distillée (H<sub>2</sub>O) :130 ml.

Le temps de l'attaque chimique est de 20 secondes.

## IV.4. Caractérisation des échantillons

### IV.4.1. Microscope optique

L'étude microstructurale a été fait à l'aide d'un microscope optique de marque Hund (voir figure IV.2) contenant 4 objectifs x4, x16, x40, x100 ; et équipé d'une caméra photographique qui permet d'obtenir un grand nombre de photos des différentes microstructures des trois zones du joint soudé (MB, ZAT, et ZF).



Figure IV.2. Microscope optique.

### IV.4.2 Diffraction des rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de nature ondulatoire. Lorsqu'un faisceau de rayons X tombe sur la matière, une partie de l'énergie est absorbée et l'autre transmise ou diffusée : c'est celle qui nous intéresse.

La matière va émettre un rayonnement de même longueur d'onde que le rayonnement incident mais dans des directions différentes de celle du faisceau initial. Chaque atome va être la source d'un rayonnement diffusé et l'onde observée dans une direction donnée sera la résultante de la superposition des ondes provenant de chaque atome [1].

La diffraction des rayons X (DRX) permet d'analyser qualitativement et quantitativement de la matière à l'état condensé. La forme des pics de diffraction peut être reliée à la microstructure cristalline. La connaissance des positions des pics de diffraction et les intensités des faisceaux diffractés permet d'identifier des phases

présentés, la mesure des contraintes résiduelles, le paramètre de maille, la taille des grains et l'étude des textures [24]. Les analyses de diffraction des rayons x ont été effectuées à l'aide d'un diffractomètre de type « D8 Advance » (voir figure IV.3). Les conditions de travail sur cet appareil sont :

- Haute tension de générateur de rayon X : 35 KV.
- Intensité du courant : 15 mA.
- Anticathode de cuivre et un filtre de Nickel.



**Figure IV.3.** Diffractomètre de type D8 Advance.

-Lorsqu'une espèce cristalline est irradiée par un rayonnement X de longueur d'onde  $\lambda$  incliné d'un angle  $\theta$  le rayonnement est diffracté si la loi de Bragg est vérifiée :

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$$

Avec :

n : Ordre de la diffraction,

$d_{hkl}$  : Distance réticulaire, [1].

Le tableau qui se suit, représente l'influence des paramètres de diffraction dans la traduction de ce qui se passe dans un spectre donné.

**Tableau VI. 3.** Les paramètres de la diffraction des rayons X utilisés pour des applications métallurgiques [24].

<b>Paramètre de diffraction</b>	<b>Signification</b>
Position des pics de diffraction ( $\theta$ )	-Nature et structure d'un métal, d'une phase ou d'un composé intermétallique -Composition d'une solution solide -Transformation ordre-désordre
Variation de position d'un pic de diffraction ( $\Delta 2\theta$ )	-Contraintes résiduelles
Intensités des pics de diffraction (I)	-Dosage de phase
Variation d'intensité d'un pic de diffraction ( $\Delta I$ )	-Texture cristallographique (mesures d'épaisseur)
Forme d'un pic de diffraction	-Taille de grain (cristallite), micro -Déformation

# **Chapitre 5**

## **Résultats et discussions**

## Chapitre V. Résultats et discussions.

### V.1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats de l'étude morphologique de l'alliage AlSi12 selon les différentes valeurs de temps et de température utilisées pour le traitement thermique.

### V.2.Étude métallographique

#### V.2.1. Pour l'échantillon non traité thermiquement

La figure V.1 représente les microstructures de métal de base(MB), la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF) de joint soudé de l'AlSi12 sans traitement thermique. On observe la présence d'un réseau de dendrites dans les deux zones ZF et ZAT, cette observation est peut être expliquée par une solidification rapide qui a été faite directement après le soudage.

**Remarque :** la structure dendritique, n'est pas un défaut structural mais elle considère comme une structure indésirable [25].

#### V.2.2.Pour les échantillons traités thermiquement

##### V.2.2.1.Effet du temps de traitement thermique sur la microstructure des joints soudés de l'AlSi12

###### ➤ *Traitement thermique pendant 30 minutes*

Les figures V.2, V.3, V.4, et V5 montrent respectivement les microstructures des échantillons d'un alliage AlSi12 qui ont été traités à 100°C, 200°C, 300°C et 400°C pendant 30 minutes.

On constate que cette durée de traitement été efficace à des températures élevés où il ya une diminution de la présence de la phase dendritique au niveau de la zone fondue pour chaque échantillon, et on a observé aussi à 200°C et 300°C qu'il ya des sphéroïdisations des dendrites au niveau de la ZF de ces échantillons [26].

Par contre, on a trouvé que pour le traitement thermique à 400°C l'absence totale de la microstructure dendritique dans la ZF.

Pour les autres zones, soient le MB où la ZAT, on constate qu'il n'ya aucun changement en comparaison par la microstructure de l'échantillon non traité.

###### ➤ *Traitement thermique pendant 45 minutes*

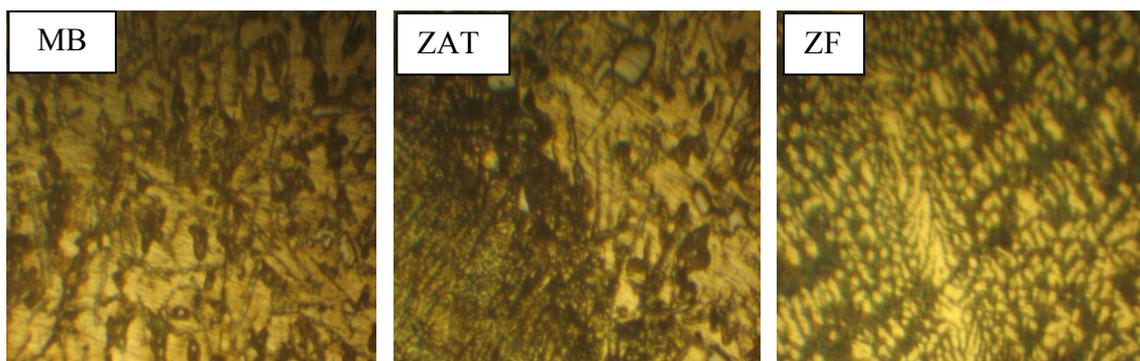
Les figures V.6, V.7, V.8, et V9 montrent respectivement les microstructures des échantillons d'un alliage AlSi12 qui ont été traités à 100°C, 200°C, 300°C et 400°C pendant 45 minutes.

Le phénomène de sphéroïdisation [26] est trouvé au niveau de l'échantillon traité thermiquement à 400°C et la disparition totale de la microstructure dendritique a été observé au niveau de la microstructure des échantillons traités thermiquement à 200°C et 300°C.

Pour le MB et la ZAT il n'y a pas de différence microstructurale en comparaison avec la microstructure de l'échantillon non traité.

#### V.2.2.2. Effet de la température de traitement thermique choisie sur la microstructure de joint soudé de l'AlSi12

À chaque valeur de température de traitement thermique choisie, lorsqu'on compare les microstructures obtenues des échantillons soit entre eux ou par la microstructure de l'échantillon non traité thermiquement, on peut dire qu'il y a eu absence de la phase dendritique de la ZF avec l'augmentation de la température de traitement, et à 400°C, on observe que l'alliage d'aluminium au niveau de MB, ZAT et ZF devient mou.



**Figure V.1.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 non traité thermiquement (x400).



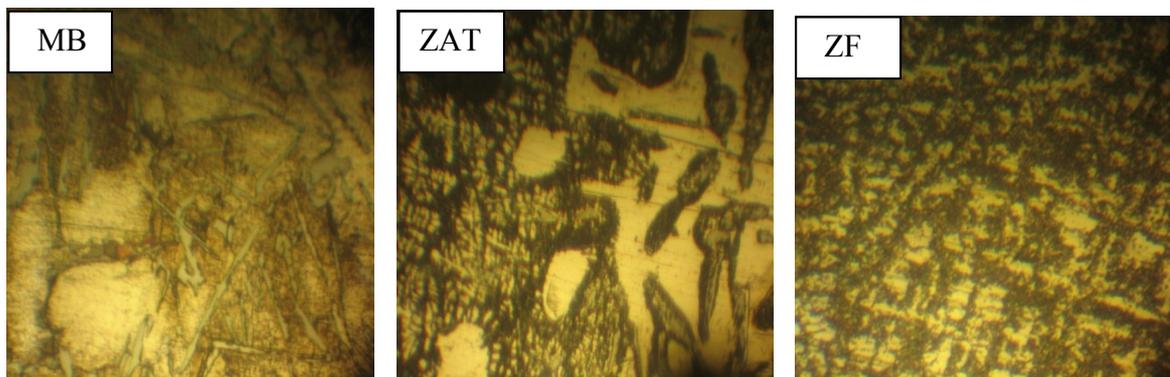
**Figure V.2.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 100°C pendant 30 minutes (x400).



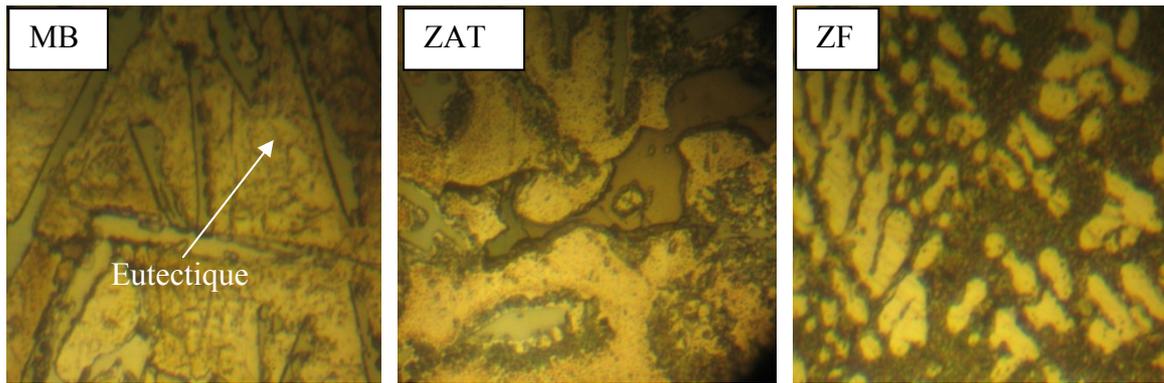
**Figure V.3.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 200°C pendant 30minutes (x400).



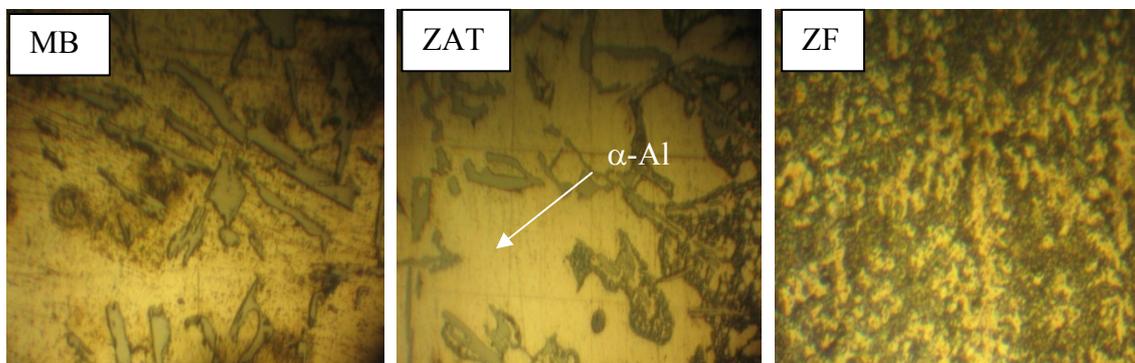
**Figure V.4.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 300°C pendant 30minutes (x400).



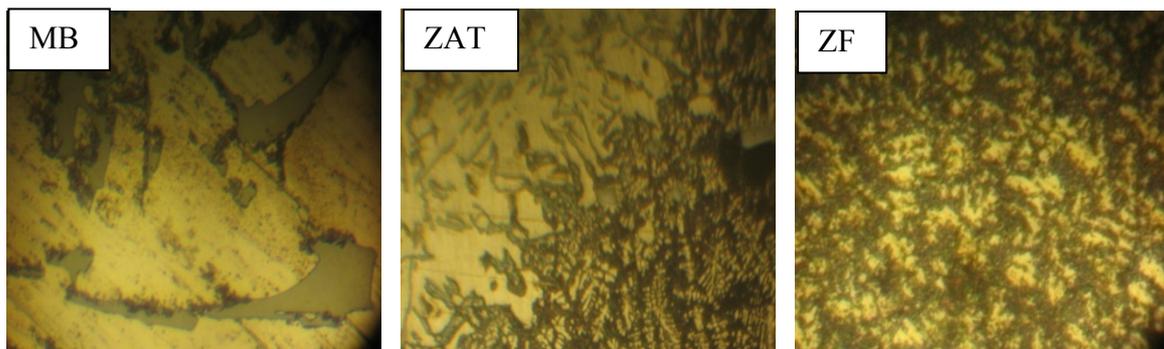
**Figure V.5.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 400°C pendant 30minutes (x400).



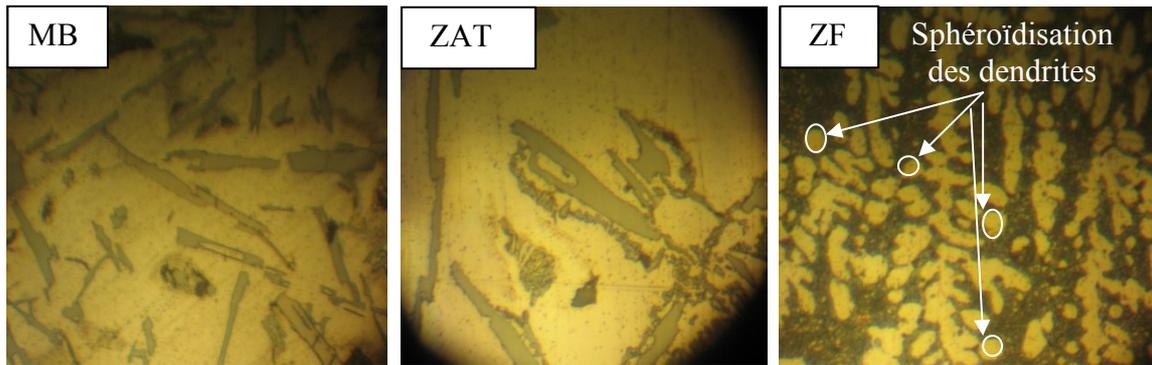
**Figure V.6.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 100°C pendant 45minutes (x400).



**Figure V.7.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 200°C pendant 45minutes (x400).



**Figure V.8.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 300°C pendant 45minutes (x400).



**Figure V.9.** Microstructure des zones (MB, ZAT, ZF) du joint soudé de l'AlSi12 traité à 400°C pendant 45minutes (x400).

### V.3. Diffraction des rayons X

#### V.3.1. Pour l'échantillon non traité thermiquement

Le spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon non traité thermiquement est illustré dans figure V.10. Diverses orientations ont été observées telles que (317), (003) et (220), un décalage de ( $\Delta 2\theta = -0.06^\circ$ ) de pic le plus intense ((220) et  $2\theta = 44.77^\circ$ ) de la ZF par rapport à celle existe dans le MB ((220) et  $2\theta = 44.83^\circ$ ), aussi un grand décalage de ( $\Delta 2\theta = -12.15^\circ$ ) vers les petits angles est marqué par le pic intense ((317) et  $2\theta = 32.62^\circ$ ) de la ZAT par rapport au pic plus intense de MB, ceci indique que le nombre des défauts structuraux (présent au sein de l'alliage est grand[27]. D'autre part, le plan (317) de pic le plus intense de la ZAT montre qu'il y a une orientation des plans selon les trois axes a, b et c de la maille.



**Figure V.10 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon non traité thermiquement.

### V.3.2. Pour les échantillons traités thermiquement

#### V.3.2.1. Traitement thermique pendant 30 minutes

Les spectres de diffraction des rayons X des échantillons traités thermiquement à 100°C, 200°C, 300°C et 400°C pendant 30 minutes sont illustrés dans les figures V.11, V.12, V.13 et V.14 respectivement.

##### ➤ À 100°C

Trois pics correspondants aux trois zones de l'échantillon ont été trouvés presque dans la même position  $2\theta$  avec de très peu de décalage entre eux : MB ((006),  $2\theta=32.78^\circ$ ), ZAT ((006),  $2\theta=30.94^\circ$ ) et ZF ((112),  $2\theta=31.053^\circ$ )

Pour les pics (006) l'orientation se fait selon l'axe c, et pour le plan (112) l'orientation se fait selon les trois axes a, b et c du maille. Ainsi, l'augmentation de l'intensité des pic (006) et (112) des spectres de ZAT et ZF respectivement par rapport à l'intensité du pic (006) de MB implique qu'il ya un grand nombre des grains qui sont orientés selon l'axe c.

##### ➤ À 200°C

On observe l'apparition de nouveaux pics dans le spectre dont leurs plans sont divers tel que le plan (137) dans la ZAT et (313) dans la ZF, aussi il ya élargissement dans les pic les plus intense (115) de la ZAT et (104) de ZF par rapport aux pics (112) de ZAT et (006) de ZF de l'échantillon traité à 100°C (voir tableau V.1), cet élargissement traduit la diminution de la taille des grains de l'alliage traité à 200°C (faible cristallinité), et l'augmentation de désordre dans la distribution des phases qui existe dans ce alliage [27].

Le bruit dans ce spectre montre qu'il ya une déformation (contraintes) au niveau de la structure étudiée. [25].

##### ➤ À 300°C

Dans ce spectre, tous les pics des trois zones MB, ZAT et ZF de l'alliage étudié ont presque les mêmes caractéristiques (voir tableau V.1). Les pics intenses de ces spectres possèdent le plan (104) indique que l'orientation des plans se fait selon les axes a et c de la maille, ces pics prennent une forme très fines veut dire qu'il ya augmentation de la taille des grains alors la disparition des joints de grains de la microstructure de notre échantillon.

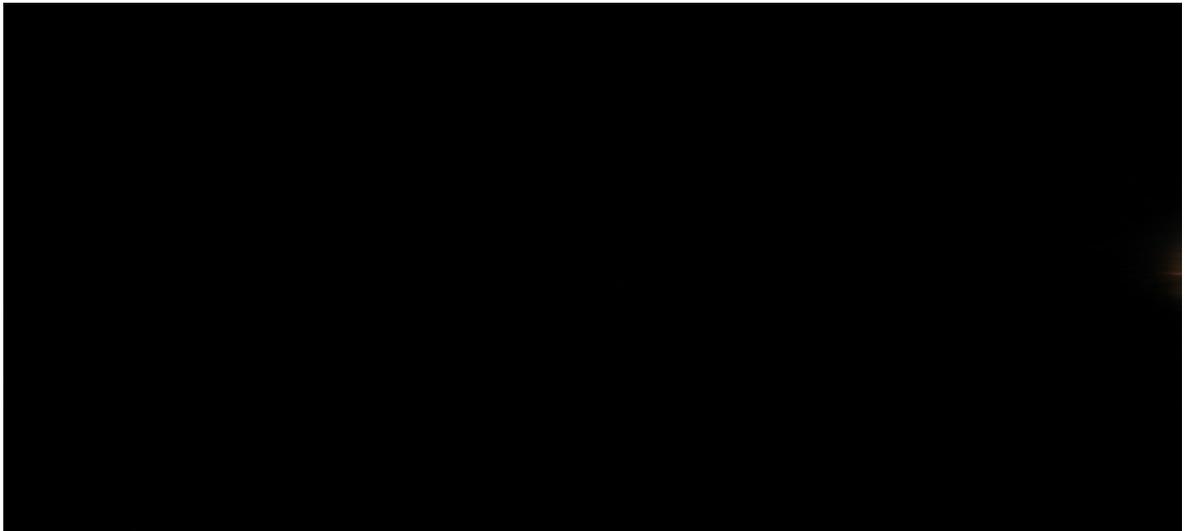
Les autres pics de ce spectre ((102), (202) et (018)) possèdent des faibles intensités et des formes un peu large, ce qui permet de dire qu'il ya dans la microstructure un petit nombre des grains qui n'ont pas possédé un changement dans ses tailles.

➤ **À 400°C**

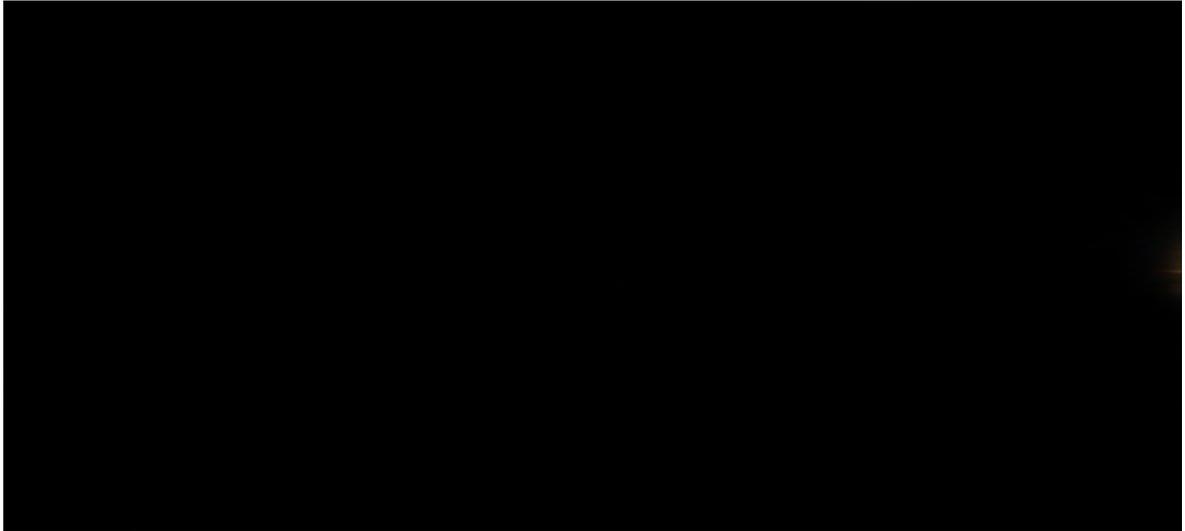
Beaucoup de bruit dans ce spectre qui montre clairement qu'il ya une déformation (contraintes) au niveau de la structure étudiée [25].



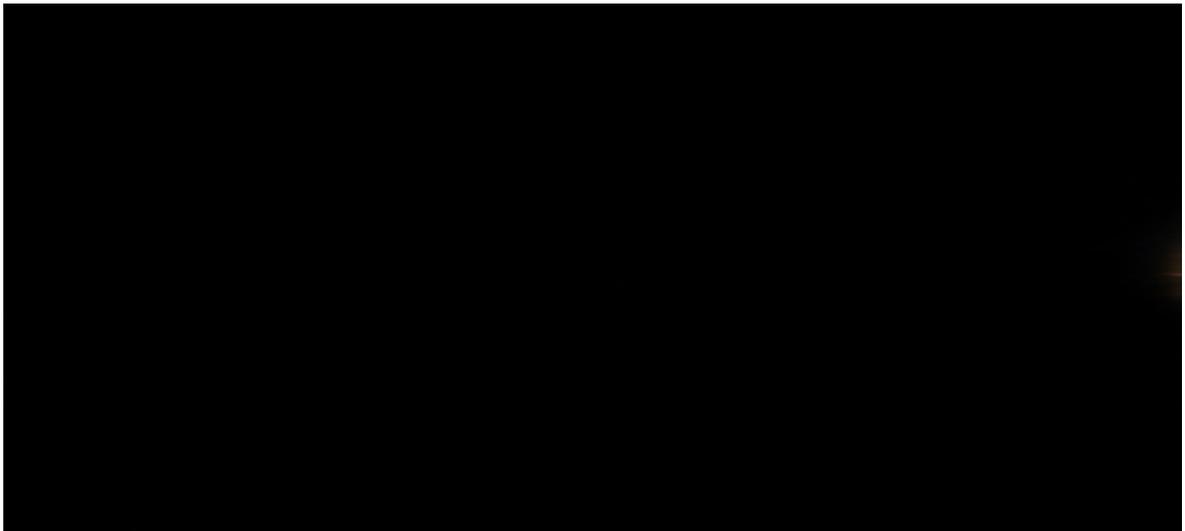
**Figure V.11** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 100 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.



**Figure V.12** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 200 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.



**Figure V.13 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 300 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.



**Figure V.14 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 400 °C pendant 30 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

### **V.3.2.2. Traitement thermique pendant 45 minutes**

Les spectres de diffraction des rayons X des échantillons traités thermiquement à 100°C, 200°C, 300°C et 400°C pendant 45 minutes sont illustrés sur les figures V.15, V.16, V.17 et V.18 respectivement.

➤ **100°C**

Pour la même position  $2\theta=29.56^\circ$  on trouve un pic (104) (d'intensité=92.68% dans le MB et 100% dans la ZAT), pour la ZF et pour la même position, il ya un pic d'intensité=6.01%

Ceci implique que dans le MB et ZF il ya un petit nombre des grains qui sont orientés selon l'axe c.

La diminution de l'intensité de pic ((200),  $2\theta=31.85^\circ$ ) de la ZAT par rapport à celle qui se trouve au niveau de MB par les même caractéristiques indique aussi qu'il ya un petit nombre des grains dans la ZAT qui sont orientés selon l'axe c. on remarque la disparition de ce pic dans la ZF.

➤ **200°C**

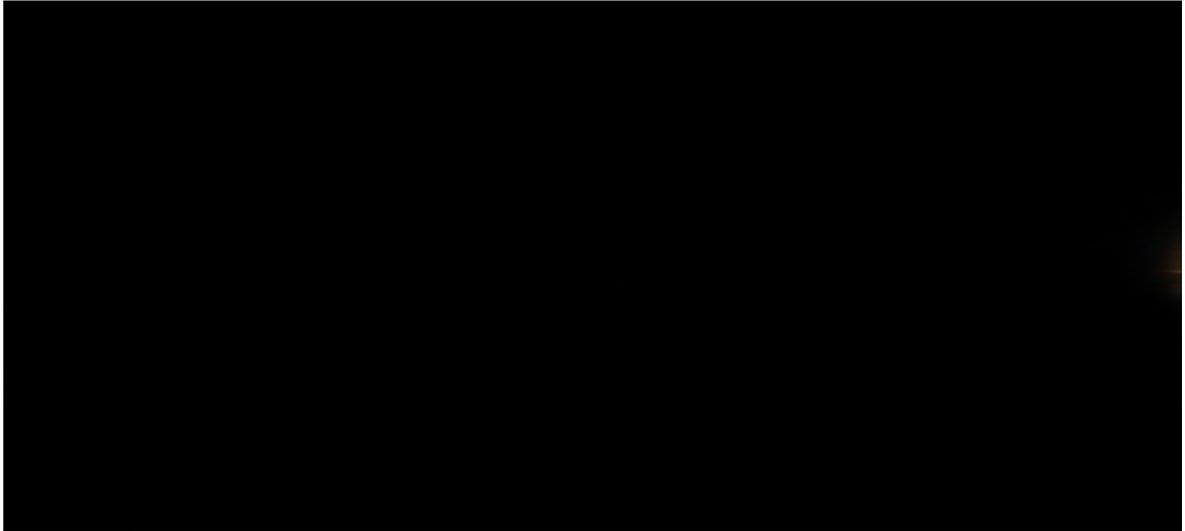
On observe un bruit et désordre qui indique la présence des contraintes [25], ainsi, beaucoup des pics de différents positions et intensités apparaissent surtout dans le spectre de la ZAT et ZF de cet échantillon. La plus part de ces pics sont un peu larges et orienté selon les trois axes a, b et c. On observe aussi qu'il ya un grand décalage des pics les plus intenses d'un spectre à un autre.

➤ **300°C**

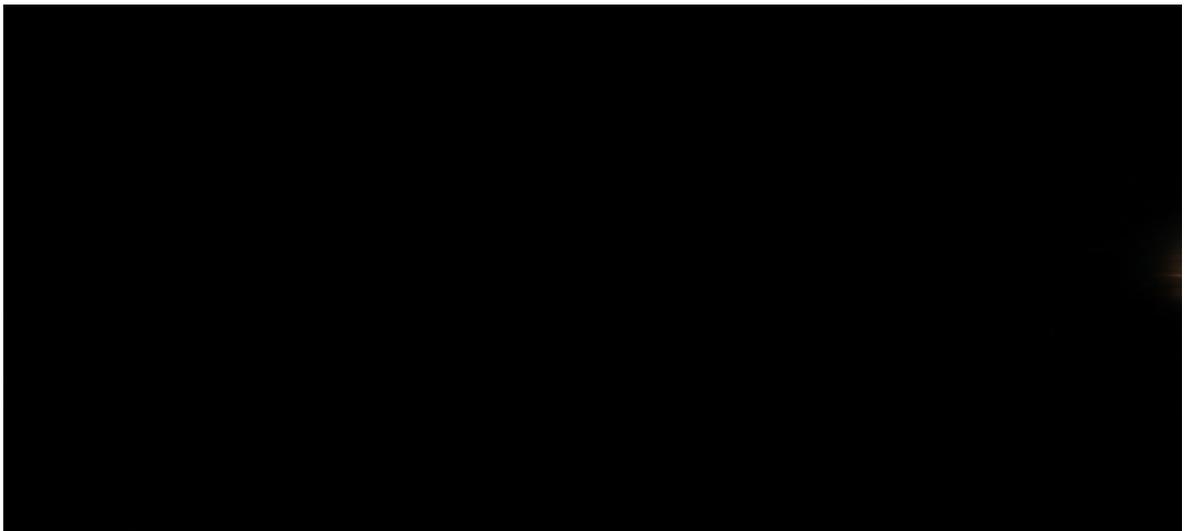
On note qu'il ya des petits variations des caractéristiques des pics et généralement l'orientation se fait selon les axes a et c.

➤ **400°C**

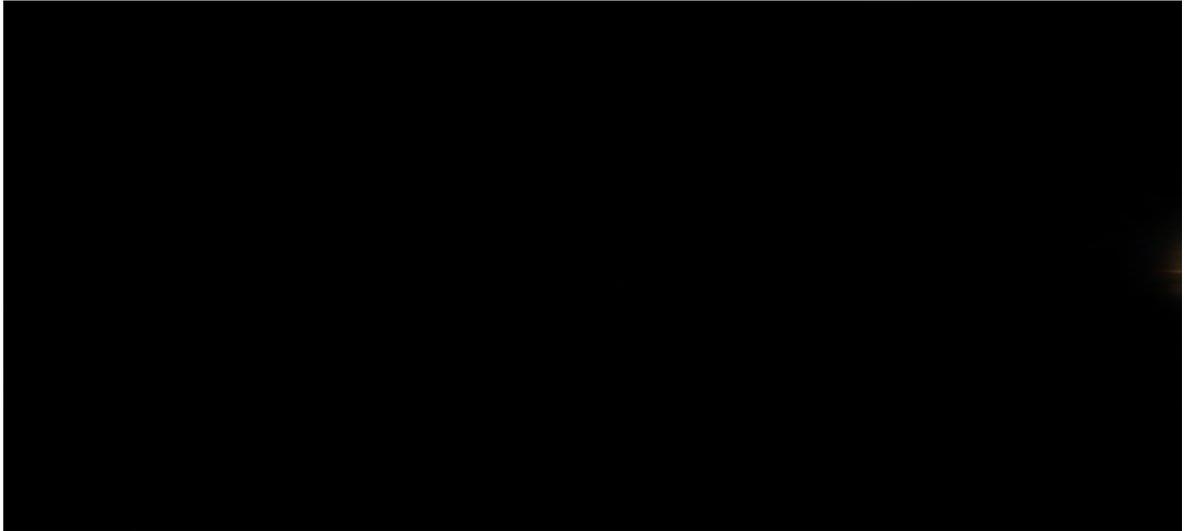
Un décalage de  $\Delta 2\theta=0.22^\circ$  de pic intense ((006),  $2\theta=29.80^\circ$ ) de la ZAT par rapport à celle de MB ((104),  $2\theta=29.58^\circ$ ), un pic de très peu intensité se trouve pour  $2\theta=29.90^\circ$  dans la ZF de cet échantillon alors qu'il ya ici un petit nombre des grains qui sont orienté selon l'axe c. Le pic intense (113) dans la ZF indique que l'orientation se fait selon les axes a, b et c de la maille.



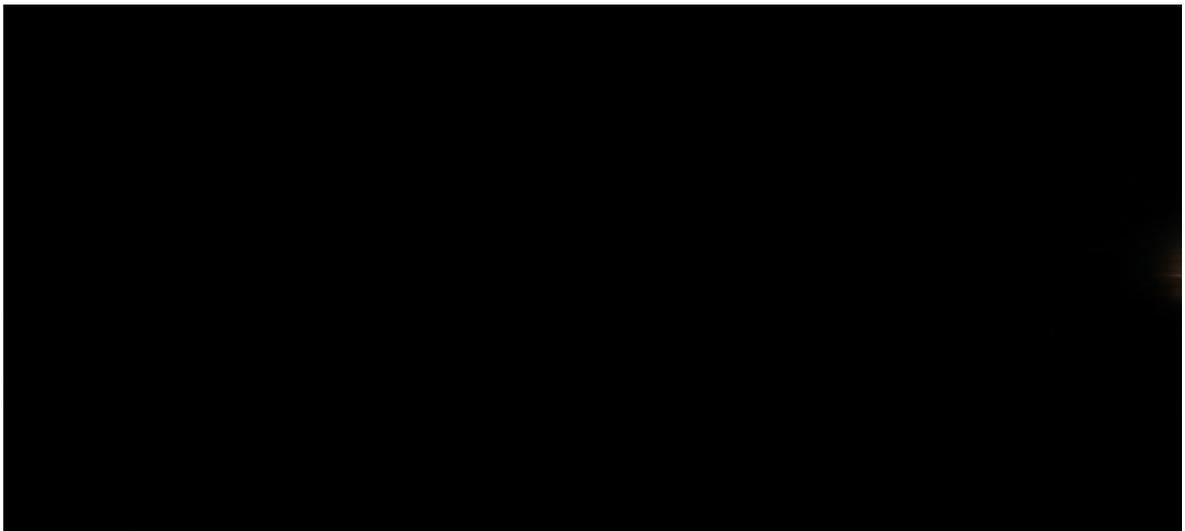
**Figure V.15 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 100 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.



**Figure V.16 :** Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 200 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF



**Figure V.17** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 300 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.



**Figure V.18** : Spectres de diffraction des rayons X de l'échantillon traité à 400 °C pendant 45 minutes ; a) MB, b) ZAT, c) ZF.

À l'aide de la fiche ASTM, les positions  $2\theta$  et les plans (hkl) correspondants aux pics les plus intenses des échantillons traités et non traité thermiquement sont indiqués dans le tableau suivant :

**Tableau V.1.** Les plans (hkl) et la position  $2\theta$  des pics les plus intenses des échantillons étudiés de l'alliage AlSi12.

Duré de traitement (minute)	échantillon	zone	(hkl) de pic le plus intense	Position $2\theta$ (°)
/	Non traité	MB	(220)	44.83
		ZAT	(317)	32.62
		ZF	(220)	44.77
30	Traité à 100°C	MB	(200)	32.78
		ZAT	(112)	30.88
		ZF	(006)	31.053
	Traité à 200°C	MB	(200)	32.73
		ZAT	(115)	29.78
		ZF	(104)	29.61
	Traité à 300°C	MB	(104)	29.506
		ZAT	(104)	29.506
		ZF	(104)	29.506
	Traité à 400°C	MB	(020)	29.82
		ZAT	(200)	30.138
		ZF	(006)	30.086
45	Traité à 100°C	MB	(200)	31.11
		ZAT	(104)	29.55
		ZF	(200)	44.67
	Traité à 200°C	MB	(020)	29.81
		ZAT	(-1-13)	38.90
		ZF	(003)	38.90
	Traité à 300°C	MB	(112)	31.10
		ZAT	(200)	31.61
		ZF	(006)	31.60
	Traité à 400°C	MB	(104)	29.58
		ZAT	(006)	29.80
		ZF	(113)	38.79

D'après les spectres obtenus par diffraction des rayons X et à l'aide de la fiche ASTM, les paramètres cristallins correspondants à chaque échantillon étudié ont été extrait et regroupés dans le tableau suivant :

Tableau V.2. Les paramètres cristallins des échantillons étudiés de l'alliage AlSi12.

Échantillon	zone	Paramètres cristallins					
		a(A°)	b(A°)	c(A°)	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$
Non traité	MB	5.721	5.721	5.721	90	90	90
	ZAT	6.09	6.09	9.44	90	90	90
	ZF	5.721	5.721	5.721	90	90	90
Traité à 100 °C	MB	5.750	5.750	5.750	90	90	90
	ZAT	6.12	6.12	41.5	90	90	90
	ZF	5.750	5.750	5.750	90	90	90
Traité à 200 °C	MB	5.4695	5.4695	5.4695	90	90	90
	ZAT	6.09	6.09	9.44	90	90	90
	ZF	5.693	5.693	5.693	90	90	90
Traité à 300 °C	MB	4.98	4.98	17.062	90	90	120
	ZAT	4.98	4.98	17.062	90	90	120
	ZF	4.98	4.98	17.062	90	90	120
Traité à 400 °C	MB	5.721	5.721	5.721	90	90	90
	ZAT	12.40	12.40	26.23	90	90	90
	ZF	5.693	5.693	5.693	90	90	90

**Conclusion**

**générale**

## **Conclusion générale**

Le but de notre travail est d'obtenir une microstructure homogène à partir d'un traitement thermique à des différentes températures et temps sur des échantillons prélevés d'un joint soudé d'un alliage AlSi12Cu. L'utilisation de différentes températures et temps est pour but de trouver la température et le temps optimal à lesquels les conditions d'homogénéisation mécanique et microstructurales se réalisent.

D'après les résultats obtenus, on conclue :

- La disparition des dendrites au niveau de la microstructure de la zone fondue de l'échantillon traité à 200°C et 300°C pendant 45 minutes.
- Le traitement thermique à des températures et temps élevés (400°C pendant 30 et 45 minutes) provoque un changement microstructurale indésirable (l'alliage devient mou)
- Les spectres de diffraction des rayons X obtenues pour l'échantillon traité à 300°C pendant 30 min ont presque les mêmes caractéristiques cristallographiques, ceci indique que l'homogénéité entre les trois zones de joint soudé se réalise à cette thermique et ce temps.

## **Perspectives**

De plus de l'analyse morphologique et structural, on peu aussi noter qu'ils ya plusieurs d'autres méthodes d'analyses qui peuvent aussi empatter résultats obtenues à partir de l'analyse microscopique et structural comme par exemple :

- Utiliser le MET et le MEB pour mieux interpréter les microstructures observées par le microscope optique
- Faire des études mécaniques sur les joints soudés de l'AlSi12 comme l'essai de traction et la mesure de la dureté par le microduromètre.
- Étude thermodynamique par DSC.

**Références**

**bibliographiques**

# Références bibliographiques

- [1] : S. Mecheri ; « Étude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles » ; Mémoire de Magister; Université Mentouri Constantine, Algérie (2007).
- [2] : « Matériaux » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:  
<<http://philippe.fichou.pagesperso-orange.fr/documents/Materiau2003.pdf>>.
- [3] : M. H. Redjaimia ; « L'Aluminium et ses alliages » ; Université Mohamed Khider Biskra, Algérie ; **[en ligne]**. Disponible sur le site :  
<<http://z.mecanoman.13.fr/al.pdf>> (2008).
- [4] : E. Weidmann et A. Guesnier ; « Préparation métallographique de l'aluminium et des alliages d'aluminium » ; Struers Application Notes N°51 ; Copenhagen, Denmark (2008)
- [5] : « L'aluminium et ses alliages » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:  
<[http://www.google.com/search?hl=fr&source=hp&q=l%27aluminium+et+ses+alliances&gbv=2&oq=l%27aluminium+et+ses+alliages&aq=f&aqi=g1g-v1gvC1&aql=&gsm=3&gs\\_upl=28281138734101393591291291014141013281426710.6.13.112010](http://www.google.com/search?hl=fr&source=hp&q=l%27aluminium+et+ses+alliances&gbv=2&oq=l%27aluminium+et+ses+alliages&aq=f&aqi=g1g-v1gvC1&aql=&gsm=3&gs_upl=28281138734101393591291291014141013281426710.6.13.112010)> (2006).
- [6] : « élaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution à 3% en poids de Na Cl » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site :  
<[http://www.ummt0.dz/IMG/pdf/Memoire\\_khireche\\_soraya.pdf](http://www.ummt0.dz/IMG/pdf/Memoire_khireche_soraya.pdf)>
- [7] : « l'aluminium dans tous ses états » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site :  
<<http://www.fonderie-gillet.com/aluminium.pdf>>(2009).
- [8] : « Métaux et alliages non ferreux » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:  
<<http://bensaada.123.fr/documentation/document13.pdf>>
- [9] : S. nayak et A. karthik ; « Synthesis of al-si alloys and study of their mechanical properties » ; A thesis in partial fulfilments of requirements for the award of the degree of Bachelor of Technology ; National institute of technology, Rourkela, India (2011).
- [10] : « Alliages d'aluminium pour fonderie » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:  
<<http://diccionario.sensagent.com/alliages+d+aluminium+pour+fonderie/fr-fr/>>.
- [11] : « les alliages de fonderie » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:

<<http://www.google.com/search?q=les+alliages+d%27aluminium+de+fonderie&hl=fr&gbv=2&prmd=ivns&ei=pl1PT8LJHM7Nswb4ouTaCw&start=0&sa=N>>.

- [12] : C. Moreau ; « Effets des éléments alliés et de la trempe, lors des traitements thermiques t<sub>4</sub> et des vieillissements artificiels, sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages aluminium-silicium de type 413 » ; Mémoire d'ingénieur ; Université du Québec à Chicoutimi, Canada(2004).
- [13] : B. BARLAS ; « Étude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie » ; Thèse de doctorat ; École des Mines de Paris, Collège doctoral, France(2004).
- [14] : G. Dour ; « Aide-mémoire Fonderie Alliages, Procédés, Propriétés d'usage, Défauts » ; 2<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris France(2009).
- [15] : « Les principaux alliages d'aluminium » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site: <[http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/geologie/d/laluminium-un-metal-dexception\\_780/c3/221/p2/](http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/geologie/d/laluminium-un-metal-dexception_780/c3/221/p2/)>.
- [16] : « Évolution de la température lors de la solidification d'un eutectique » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site: <<http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=3367>>
- [17] : « Technical data sheet alloy Al Si 12 » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site: <<http://www.fidat.it/eng/products/forms/Alsi12.htm>>(2011).
- [18] : « Al Si 12 » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site : <<http://www.mfg-germany.com/index.php?ident=120&lang=3>>(2010).
- [19] : B. Taylor et A. Guesnier ; « Métallographie des soudures » ; Struers Application Notes N°51 ; Copenhagen, Denmark (2008)
- [20] : C. Ferdinand ; « mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires » ; Thèse de doctorat ; Institut National Polytechnique de Toulouse, France, (2005).
- [21] : « Les procédés Mécano-Soudés » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site: <[www.umc.edu.dz/vf/images/cours/FabricationMecanique/chapitreiv.pdf](http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/FabricationMecanique/chapitreiv.pdf)>.
- [22] : « Soudage sous protection gazeuse des alliages d'aluminium » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site: <[http://www.messergroup.com/old\\_internet/fr/\\_globalDownloads/\\_Downloads\\_brochures/Brochure\\_Soudage\\_sous\\_protection\\_gazeuse\\_alliages\\_aluminium.pdf](http://www.messergroup.com/old_internet/fr/_globalDownloads/_Downloads_brochures/Brochure_Soudage_sous_protection_gazeuse_alliages_aluminium.pdf)>

- [23] : « matériaux en aluminium Procédés de soudage » ; **[en ligne]**. Disponible sur le site:  
<[http://www.y-o-pdf.com/soudage-d\\_aluminium-pdf.html#a3](http://www.y-o-pdf.com/soudage-d_aluminium-pdf.html#a3) >.
- [24] : R.Gheriani ; « influence de la proportion de phases dans le domaine de températures (400°C–1000°C) sur des films de Ti et de Cr, déposés sur des substrats en aciers » ; thèse de doctorat; Université de Constantine, Algérie (2005).
- [25] : Z.Boumerzoug ; communication privée.
- [26] : Z. Sersour ; « Influence d'éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des alliages Al-Si » ; Mémoire de Magister ; Université Mouhamer Bougara Boumerdes, Algérie(2010)
- [27] : M.R.Boudchicha ; « étude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques préparées à partir de kaolin-dolomite » ; thèse de doctorat ; université el-hadj lakhder –Batna, Algérie(2010).