

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الكيمياء الصناعية

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du diplôme de Master en : **Génie des Procédés**

Option : Génie Chimique

# Etude structurale et mécanique d'un alliage d'aluminium AlSi12

Présenté par :

Mouaki Dadi Abderahim

Devant le jury composé de :

President : D<sup>r</sup> A. Sakri

Encadreur : D<sup>r</sup> C. Bouremel

Examineur : M<sup>me</sup> D. Smail

Promotion 2016

## *Dédicace*

*Au nom du Dieu le clément et Miséricordieux,*

*Et En termes d'amour et de fidélité.*

*Je dédie de présent mémoire :*

*Aux deux êtres les plus précieux au monde*

*Ma MÈRE et mon PÈRE*

*QUE DIEU PROTÈGE.*

*Mes sœurs et mes frères*

*A mes chères amies*

*Mounir, Jouda, Kamel, Karim, Amine*



## *Remerciements*

*Je tiens d'abord à remercier dieu, le toute puissant, qui m'a aidé à réaliser ce travail.*

*Ce travail a été effectué au laboratoire de physique et chimie des matériaux et laboratoire métallurgie de la faculté des Sciences et Technologie de l'Université de Biskra.*

*J'exprime mes profonds remerciements à l'encadreur de ce mémoire le docteur **M<sup>me</sup> Cherifa.Bouremel**, pour son aide précieuse, sa confiance ses encouragements.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à **D<sup>r</sup> A.Sakri** qui m'a constamment guidé, conseillé et aidé.*

*J'exprime mes plus sincères remerciements au **M<sup>eur</sup> A. Sakri**, pour m'avoir fait l'honneur de président le jury de soutenance et au **M<sup>me</sup> D. Smail** pour m'avoir fait l'honneur d'être examinatrice.*

*Je remercie très sincèrement l'ingénieur **B. Gasmi** de DRX et **M<sup>me</sup> SAIDA.Seghirou** qui' on contribué à la réalisation de ce travail à Université de Biskra.*

*Grandes remerciements au responsable de laboratoire de métallurgie de département de génie mécanique de l'université de Biskra.*

*Mes remerciements à mon collègue **Nacer Mounir** pour son aide.*

*Sans oublié de remercier vivement tous les enseignants de département de Chimie industrielle.*

*En fin, merci à tous mes collègues de promotion  
2015/2016.*

## Liste des figures

**Figure I.1** : structure d'aluminium en perspective

**Figure I.2** : Schéma d'une dendrite

**Figure I-3** : Diagramme de phases Al-Cu

**Figure II.1** Diagramme d'équilibre Al-Si

**Figure II.2** : Microstructure de l'alliage AlSi12 : a) eutectique aciculaire non modifié;  
b) eutectique modifié au Sr ; c) eutectique globulaire modifié au Na

**Figure II.3** : Schéma du traitement thermique (mise en solution et trempe)

**Figure II.4** : Evolution schématique de la micro-dureté au cours du traitement thermique

**Figure III.1** : Four programmable pour traitement thermique.

**Figure III.2** : Polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260.

**Figure III.3** : Microscope optique de type Hund WETZLAR T100

**Figure III.4**: diffraction rayon X

**Figure III .5**: Diffractomètre de type D8 Advance.

**Figure III.6** : la Microduremètre Vickers de type 402MVD Z.

**Figure III.7** : Principe de l'essai de dureté Vickers [51].

**Figure III.8** : Empreinte de la microdureté Hv

**Figure IV.1** : Microstructures de l'alliage AlSi12 avant traitement thermique  
A) AlSi eutectique, B) et C) intermétallique ( $\alpha$ Fe)

**Figure IV.2** : Microstructures de la zone (MB) de l'alliage AlSi12 montre la présence des Intermétallique à 500°C pendant : A) 4heure, B) 10 heures C) 15heures

**Figure IV.3** : Microstructures de la zone (MB) de l'alliage AlSi12 montre la présence des Intermétallique à 540°C pendant : A) 4heure B) 10 heures C) 15heures

**Figure IV.4**: Microstructures de l'alliage AlSi12 traité thermiquement à 550°C pendant 20heure.

**Figure IV.5** : Diffractogrammes DRX de l'alliage AlSi12 avant traitement thermique

**Figure IV.6** : Diffractogrammes DRX de l'alliage AlSi12 traité thermiquement à 500°C pendant 4heures

**Figure IV.7** : Diffractogrammes DRX de l'alliage AlSi12 traité thermiquement à 540°C pendant 4heures

**Figure IV.8** : Diffractogrammes DRX de l'alliage AlSi12 traité thermiquement à 550°C pendant 4heures

**Figure IV.9** : Microdureté Vickers HV de MB des échantillons AlSi12 non traite et traité thermiquement à 500 et 540°C pendant 4h

**Figure IV.10** : Microdureté Vickers HV de MB des échantillons AlSi12 non traite et traité thermiquement à 500 et 540°C pendant 10h

**Figure IV.11** : Microdureté Vickers HV de MB des échantillons AlSi12 non traité et traité thermiquement à 500 et 540°C pendant 15h

## Liste des tableaux

**Tableau I-1:** Effets des éléments d'addition

**Tableau I-2** Tableau des différents types d'alliages d'aluminium corroyés

**Tableau I-3:** Différents alliages d'aluminium de fonderie

**Tableau I-4 :** Désignation des séries principales des alliages aluminium

**Tableau I-5 :** Caractéristiques des alliages d'aluminium

**Tableau I.6 :** Qualité des alliages fonderies

**Tableau II-1:** Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12

**Tableau II-2:** Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12

**Tableau II-3 :** Propriété mécanique de l'alliage AlSi12

**Tableau III.1 :** composition chimique de l'alliage d'aluminium Al-Si12.

**Tableau IV.1 :** Résultats de DRX de l'alliage AlSi12 traité thermiquement à des températures de 500°C, 540°C et 550°C pendant 4heures

**Résumé :**

L'objectif de ce travail est l'étude sur alliage d'aluminium de fonderie AlSi12, L'alliage étudié est élaboré au niveau de l'usine IMO de Constantine. Pour réaliser ce but Le traitement thermique à des différentes températures de ces échantillons a été fais pour améliorer l'homogénéité et le comportement mécanique de métal de base (MB) présentent au niveau de chaque échantillon. L'étude mécanique et microstructural ont été fait à l'aide d'un : un microscope optique Microduremètre, et la diffraction des rayons X. Les résultats obtenus permettent de dire que le traitement thermique de cet alliage améliore l'homogénéité de MB dans AlSi12.

**Mots clés :** Aluminium, Alliage d'aluminium AlSi12, traitement thermique, l'homogène.

**Abstract:**

The objective of this work is the casting of aluminum alloy on AlSi12. The studied alloy is elaborated in IMO factory of Constantine. To realize this purpose The heat treatment in various temperatures of these samples was make to improve the homogeneity and the mechanical behavior of basic metal (BM) are in each sample. The mechanical design and microstructure were made using a an optical microscope Microduremètre, and the X-ray diffraction .The obtained results(profits) allow to say that the heat treatment of this alloy improves the homogeneity of MB in AlSi12

**Keywords:** Aluminum, Aluminum Alloy AlSi12, heat treatment,

**ملخص**

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة عيّنات AlSi12. الخليط المدروس حضر على مستوى مصنع IMO قسنطينة و لتحقيق هذا الهدف المعالجة الحرارية عند درجات حرارة مختلفة من هذه العينات كان القيام به لتحسين التجانس والخصائص الميكانيكية للمعدن الأصلي في كل عينة. الدراسات الميكانيكية والمجهرية (بنوية) تمت بواسطة : المجهر الضوئي, جهاز قياس الصلادة, و جهاز حيود الأشعة السينية. من خلال النتائج المتحصل عليها يمكننا القول إن المعالجة الحرارية لهذا الخليط تكون مستعصية.

**كلمات البحث:** الألمنيوم وسبائك الألمنيوم AlSi12 ، المعالجة الحرارية، متجانسة

## *Introduction générale*

Depuis 20ème siècle des alliages d'aluminium, Il est largement utilisé pour les transports, bâtiments, énergies, emballages, les portes, les dispositifs de protection solaire. Il occupe deuxième place des métaux les plus utilisés après le fer.

Les matériaux en général et les métaux en particulier jouent un rôle important pour tout développement industriel ou progrès technologique. Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux. Vu les exigences de l'industrie moderne, de nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que 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].

L'aluminium est un métal très actif qui doit sa résistance à la corrosion par la formation d'une couche d'alumine ( $Al_2O_3$ ) protectrice. Compte tenu de l'importance de ses applications, il est nécessaire de le protéger contre la corrosion. Pour prévenir ce phénomène, plusieurs techniques peuvent être utilisées à savoir l'addition des inhibiteurs de corrosion, les revêtements et les traitements de surface [2].

Les alliages eutectiques sont largement utilisés en industrie pour leurs propriétés remarquables en tant que matériaux destinés à la fonderie. Grâce à leur bas point de fusion minimisant ainsi l'énergie requis pour leur fabrication, ces alliages présentent une excellente coulabilité sachant que la différence entre la température de coulée et celle de fusion de l'alliage est maximale à la composition eutectique. Parmi ces matériaux il y a les alliages d'aluminium-silicium (Al-Si) qui constituent la majorité des matériaux de fonderie. Les alliages (Al-Si) forment la famille la plus importante des alliages destinés à l'industrie automobile [3].

Les alliages d'aluminium, en plus d'être légers, peuvent en effet présenter d'excellentes caractéristiques mécaniques ainsi qu'une résistance à la corrosion nettement meilleure que celle des aciers. Cette utilisation massive a rapidement engendré des besoins des industriels en traitements de surface adaptés à ces alliages [4].

L'objectif de ce travail est de préparer des échantillons d'un alliage d'aluminium de fonderie AlSi12, le traitement thermique de ces échantillons a été fais pour améliorer l'homogénéité dans le métal de base au niveau de chaque échantillon. Les propriétés

structurales ont été étudiées à l'aide : un microscope optique et un diffractomètre de rayon x.

Pour les propriétés mécaniques on a utilisé un Microduremètre.

Le travail présent dans ce mémoire consiste de quatre chapitre

Chapitre I : Généralité sur l'aluminium et ses alliages

Chapitre II : Généralité sur les alliages aluminium- silicium et traitement thermique

Chapitre III : matériaux et procédés expérimentales

Chapitre IV : résultats et discussions

Et enfin on termine par une conclusion générale.

## I.GENERALITE SUR L'ALUMINIUM

### I.1.Introduction

Ce chapitre se propose de rappeler quelques notions générales sur les alliages D'aluminium, les propriétés mécaniques, les traitements thermiques et l'utilisation de ces alliages dans le domaine de l'industrie.

### I.2.Définition de l'aluminium

L'aluminium est un métal brillant, blanc-argent, dont le nombre atomique est 13, caractérisé par sa faible densité, ses hautes conductibilités électrique et thermique et sa résistance aux agents chimiques.

Cependant il ne s'y trouve pas à l'état métallique, mais sous forme de combinaisons, le plus souvent avec l'oxygène et le silicium.

L'aluminium se n'est pas un matériau naturel il existe grâce a l'intervention de l'homme il se trouve dans la nature mais complètement oxyde et mélange a d'autres produits. Il se trouve dans une terre rouge appelée BAUXITE [5].

L'aluminium est le troisième élément constitutif de l'écorce terrestre le plus abondant juste après le silicium et l'oxygène. C'est le métal plus utilisé après le fer et les aciers.

#### I.2.1.Historique :

La production industrielle a commencé au début du 20ème siècle :

**1808** : Découverte de l'aluminium par Sir Humphrey Davy, chimiste anglais (1778-1829). Davy tenta vainement de produire de l'aluminium par électrolyse d'un mélange fondu d'alumine et de potasse.

**1821** : P. Berthier (chimiste Français) découvre près des Baux de Provence dans le sud-est de la France une mine contenant 52% d'oxyde d'aluminium. On l'appela bauxite. C'est le minerai le plus fréquent d'aluminium.

**1827** : Le physicien Danois H.C. Oersted continua les travaux de Davy toujours par la même technique. Il produisit les premiers nodules d'aluminium.

**1845** :L'Allemand Friedrich Wöhler mit en évidence des propriétés du métal aluminium et en particulier sa légèreté, ce qui excita ses contemporains.

**1854** : Henri Sainte Claire Deville met au point un procédé de réduction utilisant le sodium. Ce procédé est repris dans toute l'Europe. On fabrique l'aluminium par kilogrammes, il est très cher.

**1855** : Une barre d'aluminium, nouveau métal précieux est montrée à l'Exposition de Paris.

**1860** :L'usine de Salindres, dans le Gard, fut pratiquement la seule au monde, pendant 30 ans à produire de l'aluminium selon le procédé de SAINTE-CLAIRE DEVILLE.

**1886** : Paul HEROULT, en France et, quelques mois plus tard Charles MARTIN HALL, aux États-Unis, découvrirent, indépendamment, que l'oxyde d'aluminium, ou alumine, se dissolvait dans la cryolite et pouvait ensuite être décomposé par électrolyse pour donner le métal brut en fusion.

**1887** : Carl-Joseph BAYER, fils du fondateur de la société chimique BAYER, fait breveter un procédé de transformation du minerai de bauxite en alumine. Préparation de l'alumine par attaque à la soude de la bauxite et réprécipitation de l'hydrate d'aluminium purifié. C'est le procédé le plus courant pour produire la matière première nécessaire à la réduction électrochimique

**1887** : Création de la Société Electrométallurgique Française, elle met en place un an plus tard, à Froges dans l'Isère, une usine équipée des premières cuves de fabrication industrielle d'aluminium électrolytique existant en France.

**1888** : Naissance des premières compagnies en France, Suisse et USA.

**1907** : A Saint-Jean de Maurienne, démarre la construction d'une des plus importantes usines de transformation de l'aluminium, dotée de cuves de 10 000 ampères. En 1952, elle possède des cuves de 100 000 ampères, puis de 180 000 ampères en 1979. En 1986, elle est la première usine au monde à accueillir une série de cuves atteignant 280 000 ampères.

**1920** : La production annuelle d'aluminium est de 128.000 tonnes

**1946** : La production annuelle est de 681.000 tonnes.

**1947** : Premières voitures de série, sur les chaînes de fabrication de la DYNA PANHARD, conçue par l'ingénieur J.A GREGOIRE. L'aluminium fut ensuite utilisé pour la fabrication des cycles, chemin de fer, l'aéronautique

**1997** Production annuelle, 22 millions de tonnes [6].

### **I.2.2. Structure de l'aluminium**

La structure de l'aluminium émane de celle du Cubique à Faces Centrées CFC. Le CFC correspond donc à la maille présentée en Figure I-1 qui montre la structure en perspective [7]:

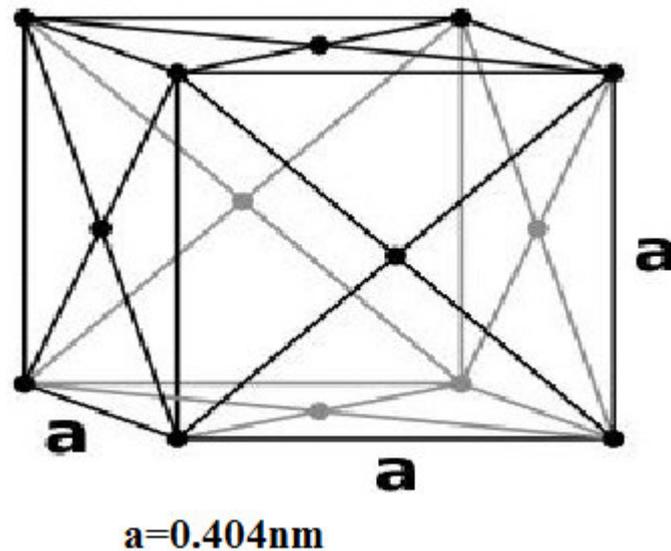


Figure I.1 : structure d'aluminium en perspective [7].

### I.2.3. Caractéristiques de l'aluminium

#### I.2.3.1. Propriétés physiques

- Paramètre du maille  $a = 0,4049596 \text{ nm}$  à  $298 \text{ K}$
- Température de fusion :  $657^\circ\text{C} - 660,45^\circ\text{C}$ .
- Point d'ébullition :  $2056^\circ\text{C}$ .
- Masse volumique  $2,7\text{g/cm}^3$  à  $25^\circ\text{C}$
- coefficient de dilatation moyen entre  $25^\circ\text{C}$  :  $23,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Capacité thermique massique à  $25^\circ\text{C}$  :  $c = 897 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique à  $27^\circ\text{C}$  :  $\lambda = 237 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
  - À  $0^\circ\text{C}$ :  $0,50 \text{ cal/cm.s } ^\circ\text{C}$ .
  - À  $100^\circ\text{C}$ :  $0,51 \text{ cal/cm.s } ^\circ\text{C}$ .
  - À  $200^\circ\text{C}$ :  $0,52 \text{ cal/cm.s } ^\circ\text{C}$ .
- Bonne résistance à la corrosion atmosphérique
- Résistivité électrique à l'état pur  $\rho = 2,63 \cdot 10^{-8} \Omega.\text{m}$  [1].
- L'aluminium, symbole chimique **Al**, a pour numéro atomique ( $Z = 13$ ) lequel correspondant à 13 électrons répartis sur les couches orbitales s et p de la manière suivante :  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^1$  [8].

#### I.2.3.2. Propriétés mécaniques

Grace a sa structure du type cubique à face centrée (CFC), l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile [9].

La résistance mécanique, l'allongement et le module d'élasticité évoluent favorablement lorsqu'on abaisse la température jusqu'au voisinage du zéro absolu. Aucun alliage d'aluminium ne devient fragile aux basses températures. Le module d'élasticité  $E$  de l'aluminium est faible  $65000 \text{ N/mm}^2$  à  $70000 \text{ N/mm}^2$  [10].

L'aluminium a une résistance supérieure à la corrosion que d'autres métaux du fait de la protection conférée par le film mince mais tenace d'oxyde. Cette couche d'oxyde est toujours présente sur la surface de l'aluminium dans une atmosphère d'oxygène.

Le silicium augmente la limite d'élasticité et la résistance de l'aluminium plus que le fer.

A cause de la faible résistance à l'état recuit d'adoucissement, les produits en aluminium pur et très pur subissent un durcissement à froid répété.

- Al 99,99 % :  $\sigma_{0,2} = 15$  à  $25 \text{ N/mm}^2$  et  $\sigma_{MB} = 40$  à  $60 \text{ N/mm}^2$ .

- Al 99,5 % :  $\sigma_{0,2} = 35$  à  $45 \text{ N/mm}^2$  et  $\sigma_{MB} = 70$  à  $90 \text{ N/mm}^2$ .

Avec :  $\sigma$  : la résistance à la traction

MB : métal de base [9].

### I.2.3.3. Propriétés chimiques

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions  $\text{Al}^{3+}$ . Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de l'aluminium avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (soude) produit de l'aluminate de sodium et du dihydrogène gazeux, selon une réaction exothermique d'équation :



Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations  $\text{Al}^{3+}$  à l'aide d'une base. Cette méthode permet de former selon les conditions de précipitation différentes phases cristallographiques tel que, la boehmite, la gibbsite.

L'aluminium est aussi utilisé en tant que réducteur fort, notamment pour l'aluminothermie et en pyrotechnie dans les feux d'artifice, où il joue un rôle similaire au magnésium, à moindre coût et avec une puissance plus grande [11].

## **I.3. Alliages d'aluminium**

### **I.3.1. Introduction**

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 constitutif, généralement ; les propriétés physiques, telle que la densité et la conductivité d'un alliage ne peut diffère grandement de ceux de ses éléments constitutifs, mais les propriétés mécaniques telles que résistance a la traction et la résistance au cisaillement peut être considérablement différents de ceux des métaux constitutif. Exemple l'acier est plus fort que son élément en fer [12].

### **I.3.2. Définition d'alliages d'aluminium**

L'aluminium est un métal extrêmement ductile (A% jusqu'à 70% pour l'aluminium pur à 99,99% à l'état recristallisé [13]. Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans les différents domaines de l'industrie du fait de leur légèreté et Bonne tenue à la corrosion de leurs bonnes propriétés mécaniques [14].

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d'améliorer ces propriétés, il 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 en formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels. Enfin, des éléments peuvent être présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique [1].

Ces alliages sont classés en deux grandes familles ; les alliages de corroyage (ou de forgeage) et les alliages de fonderie (ou de moulage). La différence entre les alliages est essentiellement liée à l'élément d'addition principal.

### **I.3.3. Eléments d'additions**

L'addition c'est éléments secondaires va également influencer sur les caractéristiques physico-chimiques Sont ajoutés en plus faible quantité en général moins de **1%**. Ils sont là pour améliorer certaines propriétés telles que la finesse du grain de fonderie, la trempabilité et soudabilité. Les additions classiques sont le chrome, le manganèse, le titane, le zirconium.

#### **➤ Addition Le silicium**

L'alliage d'excellentes propriétés de fonderie et présent dans la majorité des alliages pour fonderie. Sa principale caractéristique est d'améliorer la coulabilité du métal, par

conséquent, de limiter les risques de criques. Aujourd'hui, des alliages à fort pourcentage de silicium sont préférés pour obtenir des pièces aux formes complexes et fines [1,15].

### ➤ **Addition de cuivre**

Le cuivre contribue fortement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages et améliore considérablement les aptitudes à l'usinage des pièces réalisées, À l'inverse, le cuivre est défavorable à la tenue à la corrosion de la pièce. Une protection de surface. Mais diminue la résistance à la corrosion et augmente l'aptitude à la crique.

### ➤ **Addition de magnésium**

Le magnésium est le principal agent d'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium Augmente la résistance à la corrosion, aux dommages mais diminue les propriétés de fonderie.

### ➤ **Addition de zinc**

Le zinc augmente les caractéristiques mécaniques de l'alliage. Dans une nettement moindre mesure que le cuivre, le zinc diminue un peu la tenue à la corrosion . Il se trouve sous forme de ternaire Al -Zn-Mg, ce qui donne un alliage à durcissement structural avec des précipités  $MgZn_2$  la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro-retassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu [15].

### ➤ **Addition de (Mg + Mn) :**

Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage [1].

### ➤ **Addition de (Co + Ti + Zn) :**

Accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité, l'addition de Cu et de Zn facilite l'usinage [1].

## **I.3.4.Influence des éléments d'addition**

Les éléments d'additions peuvent être classés selon la contribution de chacun dans l'amélioration de la performance de l'anode. Un élément d'addition est ajouté au matériau de base pour :

- ◆ Avoir un potentiel plus électronégatif que celui du métal de base.
- ◆ Eviter la passivation de l'anode dans le milieu où elle est utilisée.
- ◆ Augmenter la capacité de l'anode.
- ◆ Améliorer la morphologie de la dissolution.
- ◆ Annuler les effets nuisibles des impuretés.
- ◆ Améliorer les propriétés mécaniques de l'anode.

De ce fait, les effets des éléments d'addition sont rassemblés dans le tableau suivant [16] :

**Tableau I.1:** Effets des éléments d'addition [16].

Elément	Effets
Manganèse (Mn)	Il est ajouté pour éliminer l'effet nuisible de fer en évitant la formation de la phase Fe-Al
Zinc (Zn 5%)	L'addition du zinc jusqu'à 5% abaisse le potentiel de l'anode mais au-dessus de ce niveau aucun n'avantage n'est obtenu. En dessous de 0.9% le zinc peu d'influence sur l'exécution des anodes d'aluminium
Mercure(Hg), l'indium(In) Ou de l'étain(Sn)	Il active la surface de l'anode en évitant sa passivation ils déplacent le potentiel de corrosion vers des valeurs plus électro-négative
Magnésium (Mg 0.2% à 2%)	Il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau
Cadmium (Cd)	Il est ajouté pour favoriser la formation d'un produit mou de corrosion
Titane (Ti)	Ils agissent en tant qu'acquéreur pour l'hydrogène ou sert simplement à raffiner les grains et à augmenter le secteur de frontière de grain diluant de ce fait l'effet de fragilisation

#### I.4. Différents types d'alliage d'aluminium

Il existe deux grandes familles d'alliages, les alliages pour fonderies et les alliages corroyés.

##### I.4.1. Alliages corroyés

Sont des alliages à base d'aluminium destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de forge (laminage, filage, matricage, forge, etc.). Ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, Profiles, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge produites par laminage, pressage, forgeage [17].

Les séries 1XXX, 3XXX, 5XXX et la plupart des 4XXX ne peuvent pas être traitées, sont dites non trempantes ou sans durcissement structural. Cependant, leurs caractéristiques peuvent être modifiées par écrouissage ("durcissement mécanique") ou par modification de la grosseur du grain. De plus, comme la solubilité des éléments d'alliage est faible dans l'aluminium à température ambiante, leur capacité de durcissement par mise en solution ou maturation est très limitée.

Les séries 2XXX, 6XXX et 7XXX peuvent être traitées et sont dites trempantes ou avec durcissement structural. Bien qu'il soit possible d'avoir un bon rapport résistance/poids

avec ces alliages, leur capacité à précipiter ou à se transformer reste modérée. De plus, en utilisation au-dessus de 175°C les traitements disparaissent [18].

Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications :

- Résistance mécanique
  - Ductilité
  - Résistance à la propagation des fissures
  - Résistance à la fatigue (efforts alternés)
  - Résistance aux multiples formes de corrosion
- Conductibilité électrique [19].

Les alliages corroyés ont un code à quatre chiffres. Le premier chiffre permet d'identifier l'élément chimique ajouté à l'alliage :

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.

Exemple : la teneur en fer (Fe) des alliages 7075 (maximum 0,50 %) et 7175 (maximum 0,20 %).

- Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage.
- La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium. (ex : 1000 est un alliage avec 90% d'aluminium) [20].

**Tableau I.2** Tableau des différents types d'alliages d'aluminium corroyés [19]

	<b>Elément d'alliage principal</b>	<b>Elément d'alliage principal</b>	<b>Phase principale présente dans l'alliage</b>
1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	
2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al <sub>2</sub> Cu – Al <sub>2</sub> CuMg
3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al <sub>6</sub> Mn
4000	4XXX	Silicium (Si)	
5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>
6000	6XXX	Magnésium (Mg) + Silicium (Si)	Mg <sub>2</sub> Si
7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn <sub>2</sub>
8000	8XXX	Lithium (Li) et autres	Al <sub>3</sub> Li

### I.4.2. Alliages de fonderies

Les alliages d'aluminium pour fonderie sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, destinés à être transformés par des techniques de fonderie.

Ils sont souvent nommés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie [17].

Beaucoup des alliages usuels contiennent suffisamment de silicium pour entraîner une réaction eutectique, ce qui donne aux alliages un bas point de fusion, une bonne fluidité et une bonne moulabilité.

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 Si est inférieure à celle du liquide qui les entoure car la solubilité de Si dans Al 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). Ce ci 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 croit 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 I-2, dont les bras secondaires sont espacés de quelques dizaines de micromètres, cette distance est appelée espacement des bras de dendrite. Nous utiliserons par la suite l'acronyme anglais classique [21].

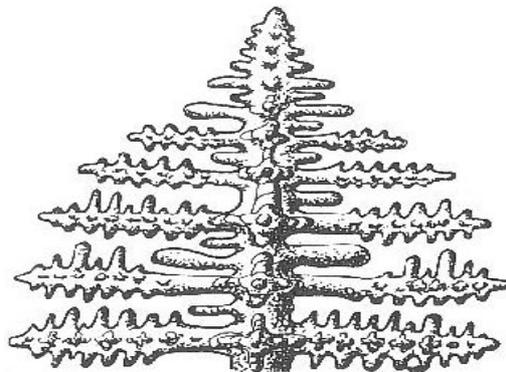


Figure I.2 : Schéma d'une dendrite [21].

Les différents types sont désignés par un nombre de quatre chiffres et sont classés en fonction des éléments d'alliages comme indiqué dans le tableau I.3

**Tableau I.3:** Différents alliages d'aluminium de fonderie [19].

Série	Élément d'alliage principal
100.0	Al commercial
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

### I.4.2.3. Caractéristique des alliages de fonderie

Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Les alliages utilisés par notre fonderie sont des alliages légers puisque élaborés à partir d'aluminium
- Les alliages légers employés lors de nos fabrications sont de première fusion et se présentent sous forme de lingots d'aluminium
- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- Ces alliages sont essentiellement des alliages aluminium-silicium-magnésium et des alliages aluminium-silicium
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.
- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Un bon fini de surface avec des surfaces lustrées et peu ou pas de défauts
- Ces alliages sont aussi facilement mis en forme sous vide pour éviter la contamination, sous basse pression pour les moules fragiles de même que sous l'effet d'une force centrifuge ou moulage par projection [22].

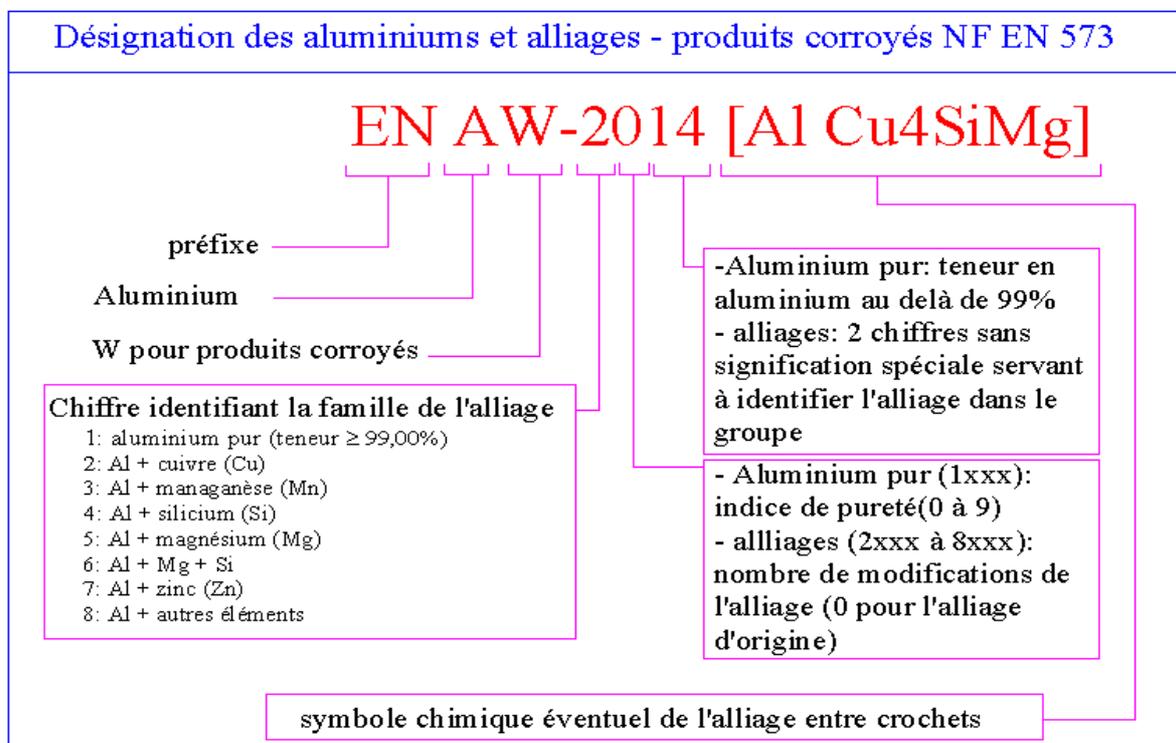
## I.5. Désignation des différents alliages d'aluminium :

Elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW comme préfixe (EN pour norme européenne, A pour aluminium, W pour corroyé éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets), tous deux, font référence à la composition chimique :

- un système numérique (Partie 1).
- un système alphanumérique (Partie 2).

les premiers chiffres de la série indiquent le principal élément alliant en présence et les chiffres subséquents indiquent la composition (voir tableau I.4) [18].

**Tableau I.4 :** Désignation des séries principales des alliages aluminium [18].



### I.5.1. Alliages sans durcissement structural

Parmi les huit classes illustrées dans le tableau I-2- précédente, une autre distinction peut être faite entre les alliages non trempant correspondent aux séries 1000, 3000 et 5000 (alliages sans durcissement structural) et les alliages trempant a durcissement structural, aux séries 2000, 6000 et 7000 [19].

#### I.5.1.1. Série 1000 (alliage non allié)

Les alliages de la série 1000 sont principalement utilisés pour leur capacité à être déformés à froid. Cette série d'alliages ne peut être traitée thermiquement, la résistance élevée à la corrosion et leur bonne conductibilité électrique et la résistance à la traction varie entre

69 à 186 N/mm<sup>2</sup> L'addition d'autres éléments d'alliage peut augmenter considérablement sa résistance à la traction, mais modifie bien d'autres propriétés. Ainsi, un large éventail d'alliages à base d'aluminium a été développé Les alliages de haute pureté (99.99%) Ces alliages présentent un faible intervalle de fusion et comme ils ont de faibles propriétés mécaniques ils sont rarement utilisés en construction.

#### **I.5.1.2.Série 3000 (alliage Al-Mn)**

Ces alliages sont à base d'aluminium et de manganèse la résistance à la traction est de 110 à 283 N/mm<sup>2</sup> à teneur en manganèse qui varie entre .La résistance de ces alliages est modérée mais ils possèdent une bonne résistance à la corrosion, et pouvant être utilisés à haute température.

#### **I.5.1.3.Série 5000 (Al-Mg)**

A ce groupe appartiennent les alliages avec une teneur en magnésium de 0,2 à 7,2 % et une teneur en Mn de 0,2 à 0,8%. Les alliages avec une teneur (> 5 %) en Mn se laissent difficilement travailler et posent des problèmes aux soudages. Les alliages à 7 % Mn sont caractérisés par de bonnes propriétés de surface.

### **I.5.2.Alliages à durcissement structural**

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand Alfred Wilhr dans le système Al-Cu-Mg. Il est très connu aujourd'hui pour plusieurs alliages. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau. Les différents alliages d'aluminium destinés au durcissement sont : AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu [19].

#### **I.5.2.1.Série 2000 (alliage Al-Cu)**

Le cuivre est l'un des éléments d'alliages les plus importants dans l'aluminium, notamment à cause de sa solubilité et de sa contribution au durcissement du métal. Plusieurs alliages commerciaux contiennent du cuivre, soit comme élément majeur d'addition avec une teneur qui varie entre 0.7 à 6.8%, et celle du magnésium entre 0.5 à 1.5% ou comme élément complémentaire dans les alliages ternaires ou quaternaires; il est souvent utilisé avec le magnésium et le silicium dans les alliages d'aluminium. Le diagramme d'équilibre Al-Cu est présenté à la figure. La partie riche en aluminium est caractérisée par un point eutectique Al-CuAl<sub>2</sub> dont les coordonnées sont: 548°C, 33,2% en masse de cuivre. Au point eutectique, le liquide est en équilibre avec une solution solide contenant 5,7% en masse de cuivre et le composé CuAl<sub>2</sub> Ces alliages peuvent être traités thermiquement, la résistance à la traction varie entre 186 à 427 N/m<sup>2</sup> donc a résistance très élevée par rapport à la série précédente. Ces alliages sont utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale en raison de leur durcissement structural qui leur confère d'excellentes propriétés mécaniques [23].

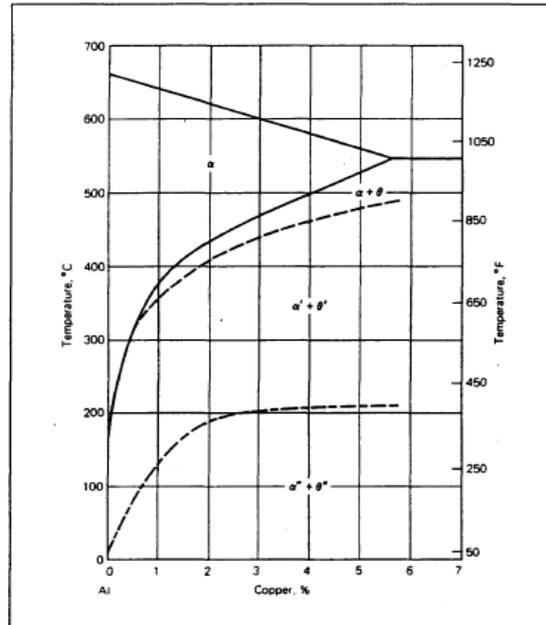


Figure I.3 : Diagramme de phases Al-Cu [23]

#### I.5.2.2.Série 4000 (alliage Al-Si)

Dans le diagramme d'équilibre Al-Si, Ces alliages sont en aluminium silicium d'une teneur entre 0.6 à 21.5% en Si on peut remarquer une solubilité presque nulle à l'état solide de l'un des métaux dans l'autre [19]; il y a constitution d'un alliage eutectique à la concentration de 12.6% de Si. L'ajout de silicium à la matrice d'aluminium permet d'augmenter la fluidité du liquide, d'abaisser la température de fusion mais également de réduire la contraction qui intervient lors du changement d'état à la solidification. Au dessous de cette concentration, l'aluminium se solidifie en premier et l'eutectique Al-Si se forme aux joints de grains. Au-delà de cette concentration il y a formation de silicium primaire et solidification finale de l'eutectique Il n'a pas formation de phases intermétalliques. C'est la seule série susceptible de traitement thermique. Les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles. Toutes ces propriétés concourent à donner aux alliages Al-Si les qualités recherchées pour les procédés de fonderie [24].

#### I.5.2.3.Série 6000 (Al-Mg/Si)

Les alliages Al-Mg-Si de la série 6xxx ont été largement étudiés, Ce groupe d'alliage comprend les alliages avec (0,4 à 1.4 %) Mg, (0,3 à 1,6 %) Si et de (0 à 1 %) Mn, Leur durcissement est du a la précipitation de la phase durcissant  $Mg_2Si$ . Une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants a la corrosion [19]. Les alliages Al-Mg-Si(Cu) sont largement utilisés comme des alliages structuraux de moyenne résistance qui allient les avantages suivants : une bonne formabilité, une bonne soudabilité et une résistance remarquable à la corrosion [25]. Cette famille d'alliage à une grande importance industrielle.

Elle est très utilisée pour les profilés. Ils ont une bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2XXX et 7XXX. Ces caractéristiques peuvent être améliorées par l'addition de silicium qui formera avec Mg, Ils présentent une bonne résistance à la corrosion notamment atmosphérique L'addition de cuivre améliore également les propriétés mécaniques mais la teneur est limitée à 0.5% la aussi à cause de la résistance à la corrosion [26].

Ceux de la série 6000 (Al Mg Si) ont de très bonnes capacités de formage, ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion : ils sont donc plutôt utilisés pour la conception de conducteur électrique tel que les câbles des lignes à haute et moyenne tension [19].

#### **I.5.2.4.Série 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg/Cu)**

Les alliages appartenant à ce groupe ont une teneur en Zn de (4 à 5 %), de Mg (0,5 à 3,5 %), de Mn (0 à 1 %), et de Cr (0 à 0,3 %). possédant de bonnes propriétés de déformation. Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croit. La tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques peuvent être améliorées par l'addition de faibles quantités de manganèse par un refroidissement lent jusqu'à moyen. L'alliage Al-Zn-Mg/Cu est une suite développée des alliages Al-Zn-Mg, présentant une haute résistance. L'addition du cuivre et du manganèse augmente la résistance mécanique, la bonne tenue à la corrosion est obtenue aussi par l'addition de Mn, Cr, Va. Comme matériaux de plaquage, on utilise un alliage d'aluminium contenant du zinc (1 à 3%) [19].

**Tableau I.5 :** Caractéristiques des alliages d'aluminium [21].

n° de série	Éléments Constitutifs	Caractéristiques
1000	Al pur	Immunité à la corrosion ; facile à souder ; facile à travailler/mettre en forme ; faible solidité.
2000	Al- Cu	La solidité de l'alliage traité thermiquement est égale ou supérieure à celle de l'acier. Généralement pas très résistant à la corrosion.
3000	Al – Mn	Tout en gardant les mêmes caractéristiques que l'aluminium pur, la solidité est légèrement plus élevée.
4000	AL- Si	Point de fusion peu élevé ; principalement pour les métaux d'apport en soudage.
5000	Al – Mg	Immunité à la corrosion ; facile à souder ; facile à travailler/mettre en forme.
6000	Al – Mg – Si	Excellente malléabilité, immunité à la corrosion
7000	Al- Zn – Mg	Alliage à traitement thermique ; c'est le plus solide des alliages d'aluminium

### **I.6. Propriétés générales des alliages d'aluminium**

La production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de celle des aciers, ce métal (et les alliages qui en dérivent) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette à un ensemble des propriétés qui, dans bien des circonstances, en font un matériau irremplaçable. Parmi celles ci, citons ce qui suit :

#### **➤ Résistance à chaud :**

D'une certaine manière, la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où elle est de 300°C.

#### **➤ Résistance à basses températures**

De part de leur structure CFC (cubique à face centré), ces alliages ne sont pas fragiles, d'où leur application en cryogénie.

#### **➤ Faible poids spécifique :**

Le poids spécifique de 2,7 est environ le tiers de celui du fer ou du cuivre.

#### **➤ Résistance chimique élevée :**

L'aluminium et ses alliages exposés à l'air se recouvrent rapidement d'une mince couche d'oxyde. Celle-ci est très compacte, dure et adhérente et constitue grâce à sa bonne

résistance chimique la cause principale de la résistance de l'aluminium à la corrosion. L'affinité de l'aluminium pour l'oxygène est telle que cette couche d'oxyde se reforme immédiatement si la surface du métal est entamée. Cette couche est en outre isolante au point de vue électrique.

#### ➤ **Bonne conductivité électrique :**

Celle-ci est environ de 60 % de celle du cuivre.

#### ➤ **Le recyclage :**

Les alliages d'aluminium peuvent être facilement revalorisés et retraités (recyclage). Le retraitement ne requiert que 5% des besoins en énergie nécessaire à la fabrication de l'aluminium primaire. L'aluminium peut être recyclé plusieurs fois [27].

#### ➤ **Résistance mécanique élevée :**

Depuis qu'on a développé des alliages d'aluminium à haute valeur, une des propriétés essentielles de ceux-ci est leur résistance mécanique élevée. Certains alliages présentent une limite d'élasticité de 30 à 50 kg/mm<sup>2</sup>, une limite de rupture de 40 à 60 kg/mm<sup>2</sup> et un allongement spécifique de plus de 12 %.

#### ➤ **Résistance à la fatigue**

En général, le coefficient d'endurance est de l'ordre de 0.5 pour les alliages non trempant, 0.25-0.3 pour les alliages trempant.

#### ➤ **Mise en forme des alliages d'aluminium**

Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'écrouissage  $n = 0.2$  à  $0.3$ ) et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud [27].

### **I.7. Qualités recherchées**

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie [28].

**Tableau I.6 : Qualité des alliages fonderies [28].**

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

## **I.8. Propriétés, Avantage de ces alliages légers**

Les propriétés de ces alliages d'aluminium sont multiples : légèreté, bonne résistance à l'oxydation, excellente tenue à la corrosion, bonne conductivité électrique et thermique, facilité d'usinage, bonnes caractéristiques de finition.

Le moulage en coquille, caractérisé par un refroidissement rapide par rapport à d'autres procédés de moulage, permet d'optimiser les propriétés des alliages.

Les formes générales des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium obtenues suite à des transformations mécaniques et/ou thermiques, on distingue pour les alliages d'aluminium de corroyage :

- ☞ Les alliages à durcissement structural.
- ☞ Les alliages non susceptibles au durcissement structural [22].

## **I.9. Utilisation des alliages d'Aluminium**

Les caractéristiques intrinsèques de l'aluminium (légèreté, conductivité, résistance à la corrosion, propriétés mécaniques) ainsi que le développement de ses alliages d'une part et des techniques de mise en forme d'autre part, lui ont ouvert d'innombrables domaines d'utilisation, dont les principaux sont : les transports, le bâtiment, la construction électrique et l'emballage [12].

Les champs des applications de l'aluminium est très variée allant de l'emballage à l'aéronautique et le spatial. Ceci est possible parce qu'il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium dont les propriétés sont différentes, avec de nombreux alliages dans chacune d'entre elles.

Les champs des applications de l'aluminium est très variée allant de l'emballage à l'aéronautique et le spatial. Ceci est possible parce qu'il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium dont les propriétés sont différentes, avec de nombreux alliages dans chacune d'entre elles [29].

Il y a donc une certaine spécialisation des alliages en fonction des domaines d'application. Il en va de même pour les questions relatives à la corrosion de l'aluminium.

Les principaux domaines d'application concernés sont :

- le bâtiment
- la construction navale
- l'équipement du territoire
- les transports terrestres
- l'aéronautique
- la mécanique

- les échangeurs thermiques
- les énergies renouvelables
- la construction électrique

### ➤ **Domaine de l'automobile**

Même si les aciers sont les matériaux les plus utilisés dans l'industrie automobile, les besoins récents de véhicules dont le degré de sécurité et de confort est très élevé pour une consommation en carburant. Son utilisation réduit le bruit et les vibrations. Réduite font des alliages d'aluminium. En effet, ils peuvent posséder des caractéristiques mécaniques excellentes pour une masse plus faible. Son absorption de l'énergie cinétique fait que, dans un accident, une grande partie du choc est absorbé par la structure en aluminium. La longévité d'une pièce en aluminium est trois à quatre fois supérieure à celle de l'acier.

### ➤ **Domaine de la construction**

Les alliages Al-Mg-Si sont largement utilisés pour la résistance moyenne des applications structurales et dans les sections architecturales. Le poids et la polyvalence de l'aluminium font de lui un matériau idéal pour les bâtiments et les revêtements. Sa résistance à la corrosion l'exempt pratiquement d'entretien.

### ➤ **Domaine de l'Alimentation**

Boîtes de conserves, papier aluminium, canettes, ustensiles de cuisine [29].

### ➤ **Domaine de transports**

Il est utilisé pour la fabrication des carrosseries, pare-chocs, blocs moteurs, etc.

Par rapport à l'acier et à la fonte, l'aluminium permet un gain sensible de poids et donc une certaine économie d'énergie. De plus, il ne rouille pas, il peut être moulé sous pression, s'usine facilement et permet d'obtenir des formes complexes par filage.

Par rapport aux matières plastiques, il présente l'avantage d'une meilleure tenue à la chaleur et au vieillissement et d'une mise en forme plus rapide.

### ➤ **Domaine de Bâtiment,**

Il est utilisé dans les ossatures, les bardages, les toitures, la menuiserie et les balcons). Ainsi, l'aluminium remplace aussi bien l'acier que le bois : il ne demande pas d'entretien, il présente une bonne persistance des performances, une possibilité de formes complexes et un encombrement réduit.

### ➤ **Domaine de la Construction électrique:**

(Câbles isolés, câble nus, transformateurs), 1kg d'Aluminium est équivalent à 2 kg de cuivre.

**➤ Domaine de l'Emballage**

(Boîtes, aérosols, emballages divers), l'aluminium présente, par rapport au fer blanc, l'avantage de ne pas rouiller, de s'emboutir, de se filer et de s'usiner facilement. Il a par ailleurs une grande aptitude à la décoration, de même qu'il est imperméable (gaz, eau, lumière) [20].

## II.1. Les alliages de fonderie Al-Si

### II.1.1. Introduction

Les alliages du silicium avec l'aluminium étaient connus déjà par Sainte-Claire Deville et par Wöhler mais leur application industrielle de ces alliages par des sels alcalins, en améliorant ainsi sensiblement leurs propriétés mécaniques. Les alliages voisins de l'eutectique furent alors employés dans la fonderie des métaux légers. La structure des alliages aluminium-silicium est simple : deux faibles solutions solides du côté de l'aluminium et du silicium et des mélanges formant eutectiques. Seules les propriétés mécaniques des alliages, surtout au voisinage de l'eutectique, furent soigneusement étudiées, alors que l'étude des autres propriétés physiques, en fonction de la composition, fut négligée, à l'exception de l'analyse thermique [30].

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 [31].

Les alliages d'aluminium de fonderie appartiennent, selon la classification de l'Aluminium Association, à la série 3xx.x pour les alliages Al-Si additionnés de Cu ou de Mg, et à la série 4xx.x pour les alliages Al-Si. La teneur en Si de ces alliages se situe autour de la composition eutectique à 12.6wt.%Si et reste généralement comprise entre 5 et 23wt.%. L'ajoute de Si à la matrice Al permet d'augmenter la fluidité du liquide, d'abaisser la température de fusion mais également de réduire la contraction qui intervient lors du changement d'état à la solidification. Toutes ces propriétés concourent à donner aux alliages Al-Si les qualités recherchées pour les procédés de fonderie [32].

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 [31].

### II.1.2. Principaux effets de silicium dans un alliage

Sont le suivant :

- 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
- Faible usinabilité en raison de dureté de silicium [33].

### II.1.3. Diagramme de phase aluminium-silicium

Outil du métallurgiste, le diagramme de phase est une source de renseignements sur un métal ou un alliage. Il s'agit d'une représentation des lignes de transformation (température en fonction du pourcentage d'élément), qui permet de connaître les quantités et d'analyser les phases en présence et les températures de changement de phase. Cependant, le diagramme de phase n'est valable que pour des conditions proches de l'équilibre, (refroidissement ou chauffage suffisamment lent) [34].

Examinons le diagramme d'équilibre du système Al-Si présenté dans la figure II.1 ; Il est à noter que le point eutectique E est caractérisé par la température de fusion la plus basse sur l'ensemble des alliages Al-Si, de différentes concentrations, qui peuvent exister.

Nous remarquons que le pourcentage de silicium soluble dans l'aluminium à l'état solide est de 1,65% à la température  $T_E=577^{\circ}\text{C}$ . Cette solubilité maximale est représentée par le point A. Tous les alliages Al-Si pour lesquels la teneur en Si est inférieure à 1,65% se solidifient à l'équilibre. A l'issue de leur solidification, ces alliages se présentent comme des matériaux monophasés dans lesquels tout le silicium est entièrement solubilisé dans la matrice d'aluminium : Il s'agit de la phase  $\alpha$  riche en aluminium. Il faut remarquer que la solubilité de Si dans Al à l'état solide diminue avec la température. Aussi, elle passe de 1,65% à 0 % à basse température. Cette solubilité en fonction de la température est décrite par la courbe AB : le solvus [35].

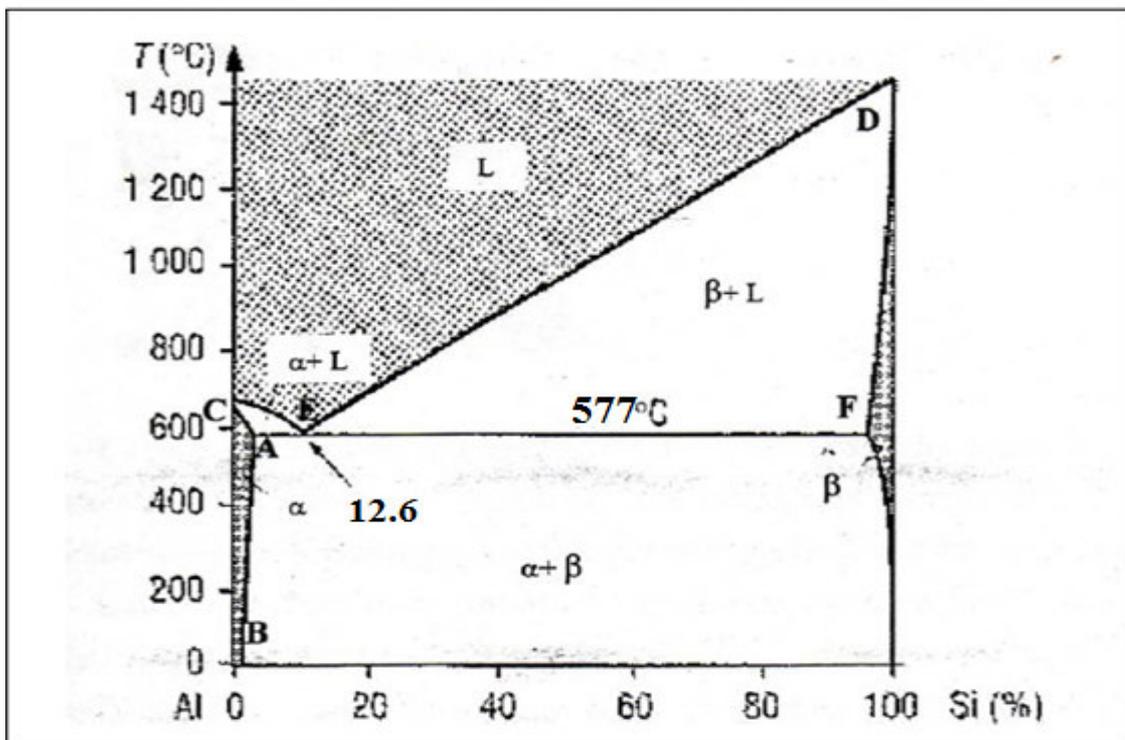


Figure II.1 Diagramme d'équilibre Al-Si [35].

Les principales courbes constituant le diagramme sont :

- a. Le liquidus:** il est formé par deux branches de courbe CED dont l'intersection forme le point eutectique E défini par une température de 577°C.
- b. Le solidus:** CAEFD il est formé par un palier eutectique AEF à l'exception des deux extrémités en raison de l'existence de deux phases solides  $\alpha$  et  $\beta$ , dont la première est riche en Al et la seconde en Si [35].

#### II.1.4. Principaux alliages Al-Si

Les alliages Al-Si constituent une gamme importante de matériaux utilisés dans les alliages de fonderie en raison de leur rapport poids/résistance élevé et de leur remarquable coulabilité'. Ceux-ci sont caractérisés par la formation d'eutectiques pour une concentration en silicium d'environ 12%. Ils se classent en trois principaux groupes, selon leur teneur en silicium : Les alliages hypo eutectique (5-10%Si), eutectique (11-12%Si) et hyper eutectique (14-20%Si). Le silicium, lorsqu'il est combiné à l'aluminium pur, améliore les caractéristiques de mise en forme, la résistance au craquage à chaud et la fluidité [36,37].

#### II.2. Alliage d'aluminium-silicium (Al-Si12)

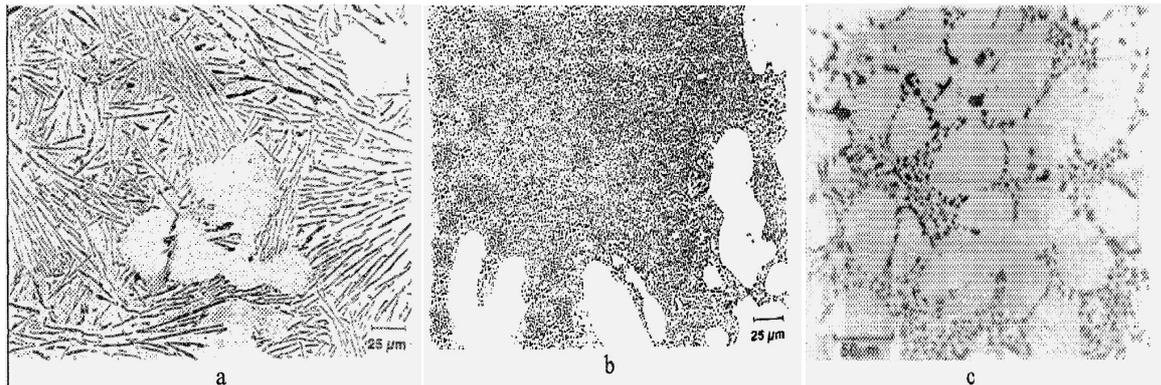
Alliage d'aluminium dont le pourcentage en poids de silicium est d'environ 12%, c'est un alliage eutectique aux excellents pouvoirs de remplissage du moule, hautes résistances à la fissuration à chaud et aux excellentes propriétés de coulée par grande résistance chimique. Généralement la composition chimique de cet alliage est comme suit [38]:

**Tableau II.1:** Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12 [38].

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

### II.2.1. Microstructure de l'alliage d'aluminium Al-Si12

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 sodium pour avoir une résistance adéquate. L'alliage eutectique présente des particules de silicium lamellaires ou aciculaires dispersées dans la matrice d'aluminium (figure II.2). La présence de particules polyédriques de silicium primaire peut aussi être observée [39].



**Figure II.2 :** Microstructure de l'alliage AlSi12 : a) eutectique aciculaire non modifié; b) eutectique modifié au Sr ; c) eutectique globulaire modifié au Na [40].

### II.2.2. Propriété physique de Al/Si12

Se sont indiquant dans tableau suivante

**Tableau II.2:** Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage AlSi12 [39].

Propriété	Valeur
Densité	2576kg/m <sup>3</sup>
Coefficient d'expansion	20.4um/m-k
Chaleur spécifique	963j/kg-k
Chaleur latente de fusion	389kj/kg
Conductivité thermique	121w/mk
Conductivité électrique	31% S.m <sup>-1</sup>
Résistivité électrique	55.6 Ω·m
Température de fusion	577-630°C
Température de coulée	635-704°C

### II.2.3. Propriété mécanique de Al/Si12

Se sont indiquant dans tableau suivante [1] :

**Tableau II.3** : Propriété mécanique de l'alliage AlSi12 [1].

Densité	Resistance a la fatigue Rm (Mpa)	Limite élastique Rp0.2 (Mpa)	Allongement à la rupture	Dureté Vickers (Hv)
2.6	125-150	70-85	15-30	55

## II.3 Traitement thermique des alliages d'aluminium

### II.3.1. Définition

Les traitements thermiques sont d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement. Pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables et pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un métal [41].

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Qui, selon les cas, produisent un adoucissement ou un durcissement, ainsi que des changements de comportement vis-à-vis de la résistance à la corrosion, de la fatigue, du fluage, de l'allongement [21]. En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : la trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement [41].

### II.3.2. Vocabulaire des traitements thermiques

Les vocabulaires du traitement thermique sont fixés par la norme AFNOR A 02-011 (Association française de normalisation) qui s'applique aux produits corroyés ou moulés. Il est important de rappeler les définitions les plus usuelles [26] :

#### II.3.2.1. Alliages sans traitement thermique :

Ce sont des alliages pour mi-fabriqués ; produits de base pour la fabrication des tôles, des barres, des profilés et des tubes. : Expression couramment employée pour désigner un alliage non durcissable par traitement thermique

#### II.3.2.2. Alliages à traitement thermique :

Ce traitement thermique consiste en principe en un recuit à haute température suivi immédiatement d'une trempe dans l'eau et ensuite d'un revenu nommé aussi vieillissement. Celui-ci se produit pour certains métaux à la température ordinaire (on parle alors de vieillissement naturel) et pour d'autres à des températures plus élevés (on parle alors de

vieillessement artificiel) expression couramment employée pour désigner alliage durcissable par traitement thermique.

#### **II.3.2.3.Mise en solution :**

Traitement suivant lequel un alliage est chauffé à une température convenable et maintenu à cette température pendant un temps suffisant pour permettre aux constituants solubles d'entrer en solution solide où ils seront retenus en état sursaturé après la trempe.

#### **II.3.2.4.Trempe :**

Opération de refroidissement effectuée de façon que la solution solide obtenue à chaud à température appropriée soit maintenue en état de sursaturation.

#### **II.3.2.5.Vitesse critique de trempe :**

Vitesse minimale conduisant à la loi critique de refroidissement qui permet le maintien des constituants en solution solide sursaturée et l'obtention de caractéristiques minimales garanties après le phénomène de durcissement.

#### **II.3.2.6.Alliage autotrempe :**

Alliage dont la vitesse critique de trempe est inférieure à la vitesse de refroidissement naturel se produisant en air calme après transformation à chaud, ou dans le moule après solidification des pièces coulées.

#### **II.3.2.7.Trempe structurale :**

Traitement thermique complet assurant un durcissement structural ; ce traitement comprend généralement une mise en solution immédiatement :

D'un refroidissement convenable maintenant la solution solide en sursaturation (trempe proprement dite).

D'une maturation ou/et d'un revenu produisant un durcissement.

#### **II.3.2.8.Durcissement structural :**

Durcissement résultant de l'évolution physico-chimique par maturation ou revenu d'une solution solide sursaturée.

#### **II.3.2.9.Maturation :**

Évolution spontanée à température ordinaire de la solution solide sursaturée. Après cette évolution, l'alliage est dit à l'état mûri.

#### **II.3.2.10.Revenu ou maturation artificielle :**

Durcissement à température supérieure à la température ordinaire d'une solution solide sursaturée obtenue par trempe de l'alliage.

**II.3.2.11.Sous-revenu :**

Revenu dont la durée est inférieure à celle qui procure le maximum de durcissement structural à la température de maintien effective.

**II.3.2.12.Sur-revenu :**

Revenu dont la durée est supérieure à celle que procure le maximum de durcissement structural à la température de maintien effective.

**II.3.2.13.Revenu étagé (double revenu) :**

Revenu effectué en deux étapes successives à des niveaux différents de température.

**II.3.2.14.Recuit :**

Traitement thermique ayant pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale.

**II.3.2.15.Recuit de recristallisation :**

Chauffage d'un produit écroui à une température relativement élevée et pendant un temps approprié, afin d'obtenir une recristallisation homogène à grains fins conférant au produit un adoucissement maximal.

**II.3.2.16.Recuit de précipitation :**

chauffage assez prolongé à température comprise entre la température de revenu et la température de mise en solution d'un produit trempé et mûri ou revenu, dans le but d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

**II.3.2.17.Traitement de restauration :**

Traitement thermique d'un métal ou d'un alliage écroui ayant pour but d'abaisser ses propriétés de résistance mécanique à un niveau contrôlé (par exemple états 1/4 dur, 1/2 dur).

**II.3.2.18.Homogénéisation :**

Traitement comportant un chauffage à température relativement élevée, appliqué à certains produits bruts de fonderie ou corroyés.

**II.3.2.19.Traitement de stabilisation :**

Chauffage et maintien à température appropriée d'un produit dont les propriétés sont susceptibles d'évoluer dans le temps ou dans les conditions d'emploi, afin d'interdire ou de limiter cette évolution [26].

**I.4. Vieillessement thermique**

Le terme vieillissement désigne l'évolution (généralement défavorable) des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant. Bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus

spécifiquement une dégradation et/ ou une perte de matière par réaction chimique du matériau avec son environnement, réaction qui se produit en surface de la pièce considérée. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact. L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ  $0.5 T_{\text{fusion}}$  par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique [42].

#### **I.4.1 Vieillissement naturel**

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années. Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissants et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante [42].

#### **I.4.2 Vieillissement artificiel**

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C dans le cas de la série 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné [42].

### **II.5.Types de traitement thermique**

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

#### **II.5.1.Traitements d'homogénéisation**

Plus particulièrement destiné aux alliages moulés (fonderie), il consiste en un maintien prolongé (6 à 48h) à une température la plus élevée allant de 450°C à 610°C qui ont pour but général de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide. Possible afin de modifier la structure de l'alliage permettant de faciliter sa mise en œuvre ou améliorer ses propriétés [43].

##### **II.5.1.1Selon les alliages, il favorise :**

- La dissolution des phases métalliques en excès
- L'homogénéisation des concentrations

- La coalescence [43].

## **II.5.2.Traitement d'adoucissement**

L'objectif est de conférer à un alliage donné écroui la plus faible limite d'élasticité tout en lui rendant ses propriétés et meilleures capacités de déformation.

Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium. Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

### **II.5.2.1.Le traitement Restauration :**

Adoucissement partiel par réchauffage à température modérée (250 °C) pendant une à 8 heures permettant une réorganisation des dislocations.

### **II.5.2.2Le traitement Recristallisation :**

Adoucissement complet par chauffage à température plus élevée à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures permettant la formation de nouveaux grains.

### **II.5.2.3Le traitement Coalescence :**

Durcissement structural par grossissement de précipités résultant de dissolution à haute température de fines particules [43].

## **II.5.3.Traitement thermique de trempe structurale (Trempe + Revenu ou Maturation)**

Certains alliages Al-Cu, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg issus de fonderie ou de forgeage, peuvent être durcis. Après mise en solution puis trempe à l'eau (froide ou chaude), l'alliage se trouve dans son état le plus doux (trempe fraîche) permettant redressages, conformations, cintrages et/ou emboutissages. Cet état peut être maintenu (congélation) par conservation à une température inférieure à la température ambiante. Le durcissement est obtenu après revenu ou maturation.

La qualité du traitement réside dans la qualité de préparation de la charge, la précision des températures ( $\pm 3$  °C), le respect d'un temps de transfert entre four de mise en solution et bac de trempe et enfin une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de trempe. Le choix du milieu de refroidissement (eau 20 °C à 100 °C, émulsion polymère) est déterminé par les exigences géométriques des pièces [43].

## **II.6.Différentes étapes d'un traitement thermique des alliages d'aluminium**

### **II.6.1.Mise en solution :**

Chauffage à haute température  $T_0$  (500-560°C) afin de solubiliser les éléments d'alliage dans l'aluminium et former une phase unique ( $\alpha$ ) sans toutefois atteindre la

température du liquidus. La solubilité des éléments d'alliage est généralement plus élevée à haute température [44].

### II.6.2. Trempe :

Refroidissement de l'alliage plus ou moins rapide jusqu'à la température de la pièce suite à la mise en solution afin d'obtenir une solution sursaturée en éléments d'alliage (Si).

La trempe peut être faite par immersion dans l'eau ou par convection forcée avec l'air ambiant ou une brume. La vitesse de refroidissement influence les propriétés mécaniques de l'alliage. Un taux de refroidissement supérieur à  $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$  permet généralement d'obtenir un alliage complètement sursaturé. Une trempe trop sévère peut occasionner des contraintes résiduelles et la distorsion des pièces [44].

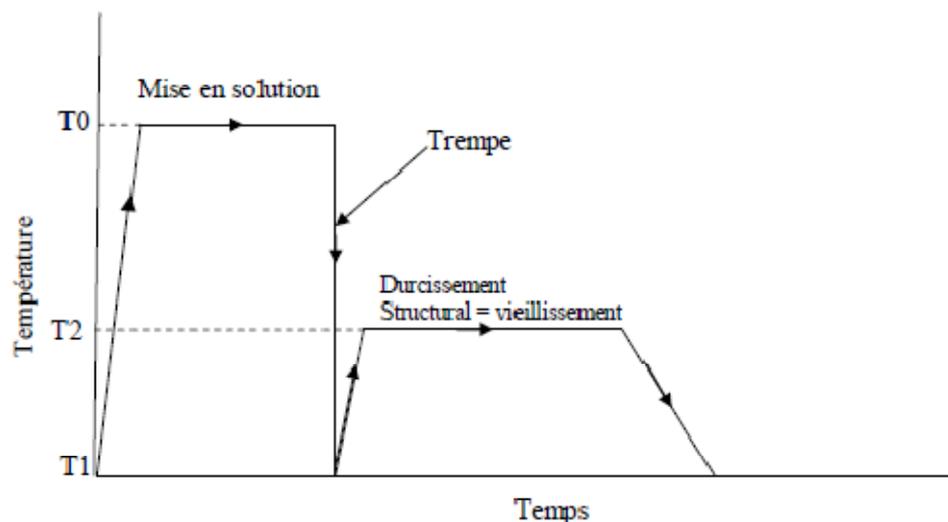


Figure II.3 : Schéma du traitement thermique (mise en solution et trempe) [14].

### II.6.3. Détentionnement par revenu (ou stabilisation ou Détentionnement)

Après la trempe, des contraintes résiduelles peuvent apparaître au sein du matériau, d'autant plus que le produit est épais. Donc c'est élimination des contraintes résiduelles par relaxation thermique à des températures de l'ordre de  $120$  à  $140^{\circ}\text{C}$ .

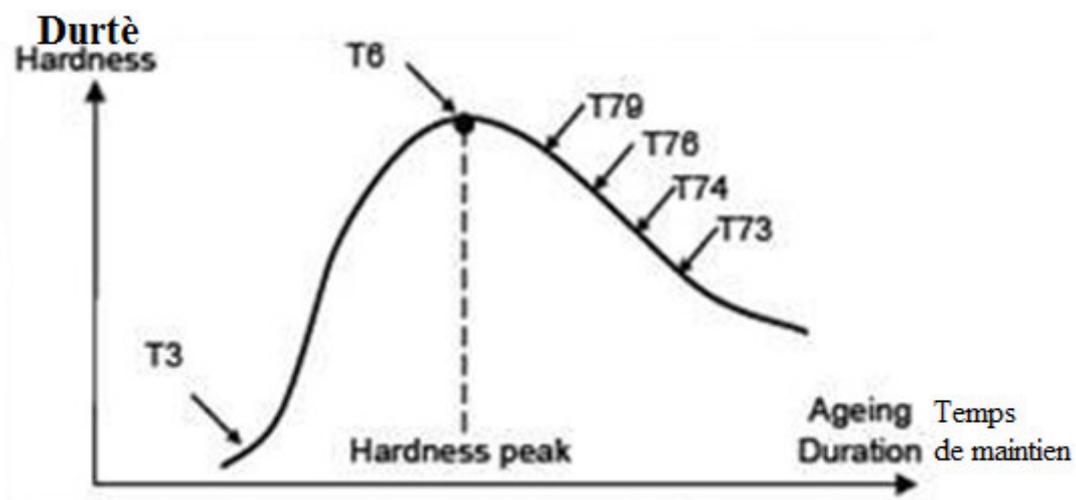
### II.6.4. Maturation

Durant une période de maturation à température ambiante (ou vieillissement naturel), cette solution solide se décompose pour former les zones GP (les zones de Guinier-Preston). Cette étape dure généralement plusieurs jours, et conduit à une augmentation notable de la dureté de l'alliage. Les lacunes apparues au moment de la trempe favorisent la cinétique d'apparition des zones GP; Qu'Elles sont le résultat des premiers stades de décomposition d'une solution solide après une trempe. La solution solide se décompose pour former des

amas de faible taille ( $<1$  nm) riches en atomes de soluté : ces amas sont connus sous le nom de « zones Guinier-Preston », ou plus simplement zones GP. Leur formation semble dépendre fortement de la concentration en lacunes suivant la trempe, et donc de la vitesse de trempe [45].

### II.6.5.Revenu

Les alliages à haute résistance à la base de la construction aéronautique moderne) présentent à l'état T6 (trempé revenu) des niveaux de caractéristiques mécaniques particulièrement élevés. Toutefois, ces caractéristiques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion sous tension qui peut s'avérer relativement faible dans le sens travers court des produits épais (tôles laminées, pièces forgées). Différents types de traitements T7 (double revenu ou revenu étagé) ont été généralisés afin d'obtenir un compromis entre les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion et la ténacité. Le traitement T73 apporte une complète désensibilisation vis-à-vis de la corrosion sous tension et une amélioration importante de la résistance à la corrosion exfoliante. La figure II.4 représente schématiquement l'évolution de la microdureté au cours d'un traitement thermique (l'état T3 correspond à un état trempé, déformé et mûri à température ambiante).



**Figure II.4 :** Evolution schématique de la microdureté au cours du traitement thermique [46].

## II.7. Nomenclature des différents traitements thermique des alliages d'aluminium

On distingue les différents traitements thermiques par les notations : T1, T2...T10. Les plus utilisés pour les pièces de fonderie sont [21] :

- F : état brut de fonderie sans traitement thermique ;
- T1 : mise en solution, refroidissement contrôlé après solidification et maturation (vieillessement naturel à 20°C).
- T4 : mise en solution, trempe et maturation.
- T5 (pour les alliages au Cu) : mise en solution à 495 °C (et non 540°C car la température de l'eutectique est abaissée par la présence du Cu), puis refroidissement contrôlé après solidification de 450°C à 220°C par tunnel à air forcé. Avantage de la méthode : pas de trempe donc peu de contraintes résiduelles et pas de revenu donc cout moindre.
- T6 : mise en solution à 540°C, trempe et revenu au pic de dureté. Une trempe à l'eau chaude (90°C) permet de limiter les chocs thermiques et donc les tapures de trempe.
- T64 : mise en solution à 540°C, trempe et revenu légèrement avant le pic de dureté

### Sous-vieillessement

- T7 : mise en solution à 540°C, trempe et revenu légèrement après le pic de dureté.

### Sur-vieillessement

Dans le cas de T7, le matériau a subi une trempe structurale, le système durcissant est  $Mg_2Si$  connu sous le nom de phase  $\beta$ .

Pour T5, le matériau a subi un refroidissement contrôlé, le système durcissant est  $Al_2Cu$  connu sous le nom de phase  $\theta$ .

On notera que les méthodes de moulage sont aussi soumises à notations (norme AFNOR) :

Y2 : coulée en sable.

Y3 : coulée en coquille.

Y4 : coulée sous pression.

L'ajoute à la suite le numéro du traitement thermique (exemple : Y35=coulée en coquille, Traitement thermique T5) [21].

## II.8. Traitement thermique des alliages métalliques par recuits

Le recuit est utilisé pour:

- (1) Eliminer les contraintes résiduelles
- (2) Diminuer la dureté et améliorer la ductilité et ténacité
- (3) Produire une microstructure particulière

Tous les recuits comportent trois étapes:

- (1) Chauffage jusqu'à obtention de la température désirée
- (2) Maintient de cette température pendant le temps d'incubation nécessaire
- (3) Refroidissement, généralement à température ambiante

Pour éviter fissuration et gondolements, la vitesse de refroidissement doit être assez lente pour permettre à la température de s'homogénéiser dans toute la pièce.

Le recuit doit être assez long pour permettre à laisser le temps à la transformation de se compléter [47].

On distingue plusieurs types de recuit [47,48]:

- Recuit d'homogénéisation
- Recuit de régénération
- Recuit complet
- Recuit de détente (stabilisation)
- Recuit de recristallisation

## II.9. Importance de traitement thermique

L'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques puisqu'on trouve à chaque extrémité de ce domaine, d'une part, l'aluminium raffiné à l'état recuit avec une résistance à la rupture de l'ordre de 50 MPa et, d'autre part, les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu (7049 A) fortement chargés en éléments d'addition et capables, à l'état trempé revenu, d'une résistance à la rupture de 65 à 750 MPa.

Une telle gamme de caractéristiques mécaniques est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent d'ailleurs d'agir dans deux sens, à savoir

- soit dans le sens d'une diminution de la résistance mécanique, diminution accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement) [26].

- Soit au contraire dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique.

(Ce sont les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que l'aptitude à la transformation

à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique, la stabilité dimensionnelle, etc.

Aussi, semble-t-il que de plus en plus, dans la métallurgie des alliages d'aluminium la tendance soit de mettre au point ou de définir des traitements thermiques vraiment spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé (de nombreux exemples seront cités à cet égard) [26].

### III. Méthodes et procédures expérimentales

#### III.1. Introduction

Le problème de soudabilité de l'aluminium et de ses alliages reste un sujet de recherche d'actualité, car ce matériau est d'un grand intérêt industriel. L'objectif de ce travail consiste à étudier l'effet de traitement thermique sur un alliage d'aluminium.

Dans ce chapitre, nous avons décrit les techniques d'analyse utilisée pour la caractérisation des échantillons qui sont le microscope optique et Diffraction des rayons X et Microdureté.

#### III.2. Matériaux utilisés

Notre étude a été faite sur des échantillons d'un alliage d'aluminium connu sous le nom chimique AlSi12. Les matériaux étudiés sont élaborés au niveau de l'usine IMO de Constantine ; le tableau suivant présente la composition chimique de l'alliage d'aluminium utilisé en pourcentage massique.

**Tableau III.1** : composition chimique de l'alliage d'aluminium Al-Si12.

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

#### III.3. Préparation des échantillons et technique d'analyse :

##### III.3.1 Préparation des échantillons

Pour l'étude microstructurale, l'observation en microscope optique nécessite une bonne préparation de la surface pour mieux étudier (la zone de métal de base MB) ont été prélevés.

##### III.3.2. Traitement thermique :

Les traitements thermique ont été réalisé dans un four électrique programmable, Les températures de recuit appliquées aux échantillons sont T=500°C et 540°C 550°C570°C pendant 04h et 6h et 10h et 15h et 20heurs.



**Figure III.1 :** Four programmable pour traitement thermique.

### III.3.3. Polissage :

Les échantillons traités ont subi un polissage mécanique, cette opération qui permet d'avoir des états de surface semblable abrasifs à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométries des grains abrasifs du plus gros au plus fin : 120 jusqu'à 1200. Cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage fin est terminé de finition à la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant. Sur le second disque de la polisseuse recouvert d'un tissu feutre, la pâte diamantée (la granulométrie) utilisée est de 1 $\mu$ m. Pour cette opération nous avons utilisé une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260[49].



Figure III.2 :Polisseuse mécanique.

### III.3.4.L'attaque chimique :

L'attaque chimique d'un échantillon pour relever la structure macrographique fait apparaître entre les zones constitutives de la soudure, pour rendre les grains et les joints des grains [49].

Les échantillons sont plongés 40 secondes dans la solution. Et sont ensuite nettoyée par l'eau distillée et séchés sous un flux d'air chaud. Le réactif d'attaque c'est le réactif de KELLER employé à la composition chimique suivante :

- \* 10ml HF,
- \* 17ml HCl,
- \* 48ml HNO<sub>3</sub>
- \* 147ml H<sub>2</sub>O.

## III.4.Caractérisation des échantillons

### III.4.1.Caractéristiques microstructurales

Les différentes techniques de caractérisation des microstructures qui ont été employées sont :

#### III.4.1.1.Microscopie optique

L'étude microstructurale a été fait à l'aide d'un microscope optique de type « Hund WETZLAR T100 » ; muni d'un appareille photo numérique [9].

Le microscope optique sert à déterminer ou observer la microstructure de l'échantillon (taille et forme des grains .....), ainsi que l'évolution microstructure des échantillons ayant subi des traitements thermiques [49].

Nous avons réalisé cette analyse au sein du laboratoire de département de métallurgie à l'université de Biskra.

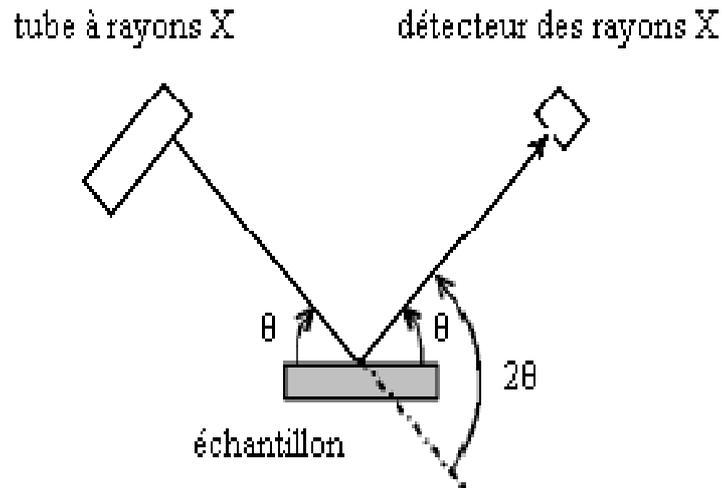


**Figure III.3 :** Microscope optique de

#### **III.4.1.2. Diffraction de rayon X (DRX)**

La diffraction des rayons X est considérée comme la technique la plus utilisée pour résoudre les structures cristallines grâce à sa grande sensibilité aux changements affectant la maille élémentaire de cristaux ou de matériaux poly-cristallins.

La technique de diffraction des RX est employée pour identifier les différentes phases formées et déterminer leurs structures cristallines, à l'aide d'un diffractomètre PANalytical X'Pert MPD en configuration Bragg /Brentano  $2\theta$  équipé d'un monochromateur arrière utilisant le rayonnement  $K_{\alpha}$  ( $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ) d'une anticathode de cuivre [50].



**Figure III.4:** diffraction rayon X [50].

Dans la configuration dite  $2\theta$ , le tube à rayons X et le détecteur bougent symétriquement en faisant chacun un angle  $\theta$  (variable) avec la surface horizontale de l'échantillon. Lorsqu'un angle correspondant à une famille de plans (hkl) dans les conditions de Bragg est atteint, le détecteur enregistre une augmentation de l'intensité diffractée. On obtient ainsi des diffractogrammes ( $I = f(2\theta)$ ) lesquels sont comparés aux spectres de diffraction X des matériaux références en poudre rassemblés dans la base de données cristallographiques JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standard), permettant de connaître la ou les phases sous laquelle l'échantillon a cristallisé.

La loi de Bragg est une loi empirique qui rend compte des interférences constructives entre les faisceaux diffusés ; elle permet de relier la périodicité du réseau aux angles pour lesquels les maxima de diffraction sont observés :

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

$d_{hkl}$  : Distance réticulaire caractéristiques des plans atomiques (hkl)

$n$  : Ordre de l'interférence (nombre entier)

$\lambda$  : Longueur d'onde de rayonnement

$\theta$  : Angle d'incidence du rayonnement X sur le plan réticulaire (hkl) [50]



**Figure III .5:**Diffractomètre de type D8 Advance.

### **III.4.2.Caractéristiques mécaniques**

#### **III.4.2.1.Microdureté Vickers(Hv) :**

La mesure de Microdureté est largement utilisée dans la caractérisation des paramètres physiques de microstructure (phases intermétalliques, matrice, structure de grains, zone affectée thermiquement, effet matriciel). L'appareil est entièrement automatisé et permet la programmation de patrons de mesure complexes. Ainsi, des centaines d'empreintes couvrant de larges portions d'échantillons sont exécutées, lues et discriminées en mode automatique [49].



**Figure III.6:** la Microduremètre Vickers.

Les essais de dureté ont été réalisés sur une machine de dureté .Nous avons choisi l'essai Vickers, qui est effectué avec un pénétrateur en diamant de forme pyramide à base carrée. L'angle entre deux faces opposées de cette pyramide est de  $136^\circ$ . On obtient la valeur  $d$  en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . C'est  $d$  qui sera utilisé pour le calcul de la dureté .La valeur de la dureté Vickers  $Hv$  est le rapport de la charge  $F$  qui est égale 250 g à la surface  $S$  de l'empreinte et le temps de maintien 10s comme le montre la relation[49]:

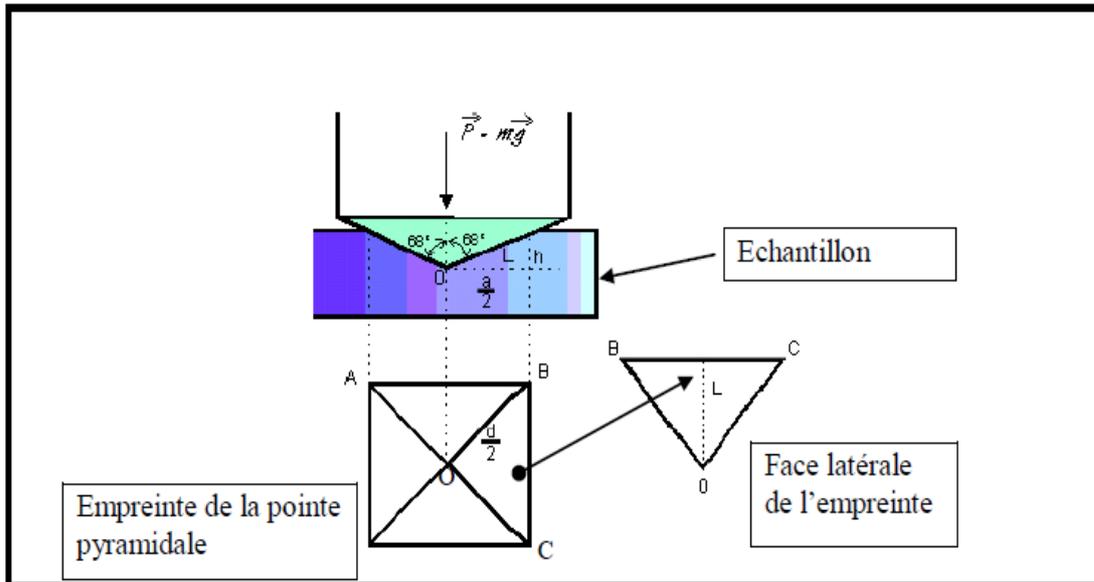
$$Hv = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

**HV** : Dureté Vickers.

**F** : Force appliquée [N]

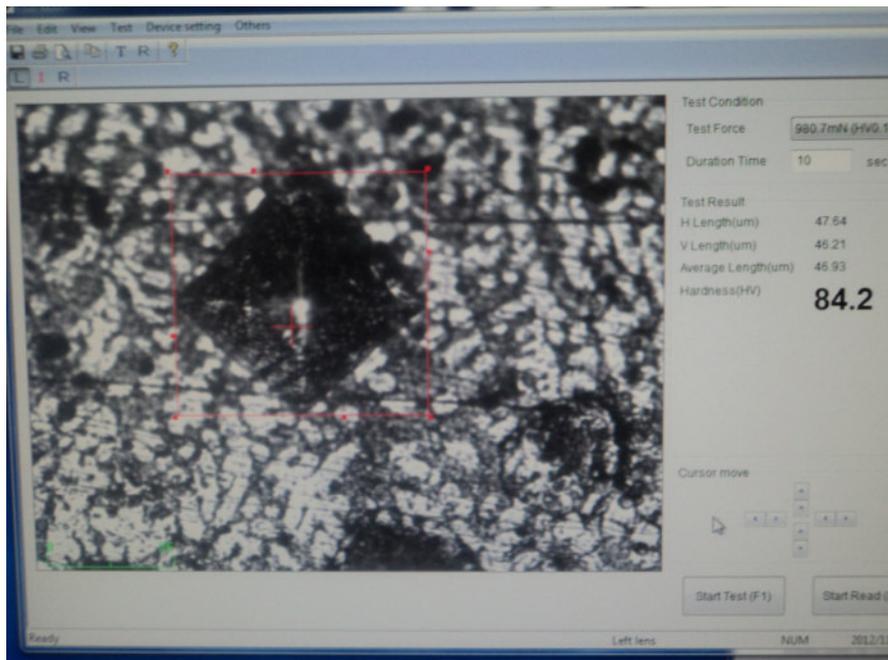
**d** : Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

**g** :  $9.8 \text{ m.s}^{-2}$ [49].



**Figure III.7 :** Principe de l'essai de dureté Vickers[49].

La figure suivante montre clairement une empreinte qui a été fait par cet appareil :



**Figure III.8 :** Empreinte de la microdureté Hv[9].

## Conclusion générale

Le travail présenté est relié à l'étude des traitements thermiques du métal de base (MB) de l'alliage d'aluminium (AlSi12). Le traitement thermique étudié a été le recuit à des différentes températures sont  $T=500^{\circ}\text{C}$  et  $540^{\circ}\text{C}$   $550^{\circ}\text{C}$  pendant 04h, 10h, 15h et 20heurs. Les propriétés métallographiques et mécaniques ont été étudiées pour voir l'effet de traitement thermique sur le métal de base (MB) de cet alliage.

Les résultats obtenus permet de conclure que :

- Les analyses micrographiques des différents échantillons étudiés de l'alliage aluminium-silicium montrent que la zone de métal de base comporte une microstructure Biphases : une phase majoritaire de  $\alpha$ -aluminium avec des précipités des particules de silicium sous forme des plaquettes sans oublier la présence des phases indésirables qui sont les intermétalliques tels que ( $\alpha\text{Fe}$  et  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ).
- Les études microstructural à l'aide d'une diffraction des rayons X(DRX) permet de conclure que le traitement thermique provoque un décalage des pics des phases vers les grands ( $2\theta$ ) ce là peut être montre qu'il ya une substitution des atomes de l'aluminium par les atomes de silicium dans la maille élémentaire.
- Les propriétés mécaniques qu'a été analysés par les mesures de la microdureté (HV) au niveau de MB de l'alliage étudié (AlSi12) montrent que la microdureté diminue avec l'augmentation de la température de traitement thermique ce qui permet de dire que notre alliage à des températures de traitement plus élevées devient mou.

## Référence

- [1] S. Bensaada , « sciences des matériaux », [en ligne] , disponible sur le site : [elearn.univ-biskra.dz/mod/resource/view.php?id=446](http://elearn.univ-biskra.dz/mod/resource/view.php?id=446)
- [2] Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina .Fabrication characterization and application. Thin solid. Films; 29(1-2) -192-201, 1997
- [3] M.A. Moustafa, F.H. Samuel and H.W. Doty; «Effect of solution heat treatment and additives on the microstructure of Al-Si A413.1 automotive alloys", Journal of Material Science, Vol. 38, (2003).
- [4] S. Thibault , « Modifications des propriétés physico-chimiques et de la microstructure de l'aluminium après nitruration par implantation d'ions multichargés », thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie (2006)
- [5] « fiche d'info aluminium » TECHNOLOGIE ALU-VERRE-PVC [en ligne] disponible sur le site <http://docplayer.fr/14083255-Document-ressource-technologie-alu-verre-pvc.html>
- [6] « historique de l'aluminium » [En ligne] disponible sur le site : [<http://lycees.ac-rouen.fr/galilee/historique.html>]
- [7] « PROJET TUTOR L'ALUMINIUM » : [En ligne] disponible sur le site : <http://iut.univ-amu.fr/sites/iut.univ-amu.fr/files/rapport-projet-1a.pdf> 23/01/2016.
- [8] Métaux et alliages, matériaux magnétiques et multilatéraux » [En ligne] disponible sur le site : < [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)>, 17.03.2014.
- [9] E.Djeblihi Mémoire de Master '*Etude mécanique et structurale d'un alliage d'aluminium soudé*' Université Mohamed Khider – Biskra. 2014. Algeria
- [10] G. BELGOURRI 'ELABORATION ET CARACTERISATION DES ALLIAGES Al-5% mass. Cu ET Al-20% mass. Cu SOLIDIFIES RAPIDEMENT ' mémoire magister -Université Mentouri de Constantine. 2007. Algeria
- [11] « Les aluminiums » [En ligne] disponible sur le site : « <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium> »
- [12] S.nayak et A karthik « synthesis of al-si alloys and study of their mechanical propreties »; A thesis in partial fulfilments of requirements for the award of the degré de bachelor of techenology, Rourkela, India (2011)
- [13] M. Shahzad ; « Influence de la rugosité et des traitements d'anodisation sur la tenue en fatigue des alliages d'aluminium aéronautiques 2214 et 7050 » thèse de doctorat ; université de Toulouse ; France (2011).

- [14] B. Barlas ; « Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie » thèse de doctorat ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ; France (2004).
- [15] « Les alliages d'aluminium pour fonderie » [En ligne] disponible sur le site : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_d%27aluminium\\_pour\\_fonderie#R.C3.B4le\\_des\\_principaux\\_constituants](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_fonderie#R.C3.B4le_des_principaux_constituants)
- [16] A.Haddouche ‘‘Caractérisation physico-chimique des alliages d’Aluminium utilisés comme matériau des revêtements mural’’ Mémoire en Master Université Med Khider Biskra 2014. Algérie.
- [17] « Les alliages d'aluminium pour corroyage » [En ligne] disponible sur le site : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_d%27aluminium\\_pour\\_corroyage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage)
- [18] « aluminium et alliages » [En ligne] disponible sur le site : <http://joho.monsite.orange.fr/>
- [19] D. Kadous , « Utilisation des réseaux de neurones comme outil du datamining : Génération de modèle comportemental d'un processus physique à partir de données » , mémoire de magister , Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie (2012)
- [20] Roger Develay, Aluminium non allié technique de l'ingénieur, vol .MB5, M443.
- [21] B. Bruno, « Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie » thèse de doctorat, école des mines de Paris, France (2004)
- [22] « Les alliages d'aluminium pour fonderie » [En ligne] disponible sur le site :<http://www.fonderie-roux-gallois.com/alliages-applications/alliages-aluminium-fonderie.html>
- [23] Aluminium-Eropecties-and-Physical Metallurgy, American, Soeity.for.Metals» Metals Park, OH (1984).
- [24] C. Ville neuve ; «Neutralisation et dissolution des intermétalliques de fer dans les alliages Al-Si » thèse présenté comme exigence partielle de la maitre en ingénierie ; université du Québec à Chicoutimi, Canada (1998).
- [25] S. K. Panigrahi, R. Jayaganthan et V. Pancholi, M.Gupta, Master. Chem.phys. Vol 122, PP. 188-193, (2010).
- [26] R. Develay. Traitements thermiques des allaiages d'Aluminium, Doc. M 1290,les techniques de l'ingénieur (1991).
- [27] Z. Nacer, « Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium », thèse de doctorat, Universités de Mouloud Mammeri,

Tizi-Ouzou, Algérie (2011)

- [28] << Élaboration et étude de la corrosion Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution à 3% en poids de NaCl >> ; [EnLigne] disponible sur le site :  
<< [http://www.ummtto.dz/IMG/pdf/Memoire\\_khireche\\_soraya.pdf](http://www.ummtto.dz/IMG/pdf/Memoire_khireche_soraya.pdf) >>
- [29] H. Marouf, « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure, NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation », mémoire de magister Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie (2012)
- [30] Sur les alliages Aluminium-Silicium par MM. BRONIEWSKI et SMIALOWSKI  
Revue\_de\_Metallurgie\_1932\_t29\_nr11\_s542
- [31] « Les alliages d'aluminium pour fonderie » [En ligne] disponible sur le site :  
< <http://diccionario.sensagent.com/alliages+d+aluminium+pour+fonderie/fr-fr/> >
- [32] Bouayad A, Gerometta C, Radouani M, Saka A. J Adv Res Mech Eng 2010;1:226.
- [33] « 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/)
- [34] Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, J. E. Hatch (éditeur), ASM, Ohio, U.S.A., 1984.
- [35] Jean Baralis, Gérard Maeder, Précis de Métallurgie : (Elaboration, structure propriétés, normalisation), p .232, 1ere édition, Afnor-Nathan, Paris (1997).
- [36] J. E. Hatch; «Aluminum: Properties and Physical Metallurgy»; American Society for Metals, Metals Park Ohio (1984).
- [37] G. Tirand ; « Etude des conditions de soudage laser d'alliages base aluminium par voie expérimentale et à l'aide d'une simulation numérique » ; thèse de doctorat ; Université Bordeaux 1 ; France (2012).
- [38] A. Mohamed ; « Effet Des Additifs Sur La Microstructure et les propriétés Mécaniques Des Alliages D'aluminium-Silicium » thèse présentée comme exigence partielle de doctorat en ingénierie ; université du Québec à Chicoutimi, Canada (2008).
- [39] C. Moreau « Effet des éléments alliés et de la trempe, lors de traitement thermique 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).
- [40] M. Zhe ; « Réactivité et propriétés mécaniques des interfaces entre un alliage Al-Si et

un renfort Fe ou Ti » thèse de doctorat ; Université Claude Bernard Lyon 1 ; =France (2006).

- [41] C. Chaussin et G.Hilly; « Métallurgie : tome I alliages métalliques », 10ème ed., Dunod, Paris, France (1976).
- [42] [M. Dupeux, Aide mémoire science des matériaux, Dunod, (Paris 2004), pp.105-148.
- [43] « Les alliages d'aluminium pour fonderie » [En ligne] disponible sur le site : « www.bodycote.com »
- [44] « Les traitements thermiques » [En ligne] disponible sur le site : « [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement\\_thermique\\_d%27un\\_m%C3%A9tal](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_thermique_d%27un_m%C3%A9tal) »
- [45] Q. Puydt ; « Comportement mécanique de soudures en alliage d'aluminium de la série 7xxx : de la microstructure à la modélisation de la rupture » thèse de doctorat ; Université De Grenoble ; France (2006).
- [46] G. Fribourg ; « Couplages entre précipitation et plasticité dans un alliage d'aluminium 7XXX : application à des traitements thermomécaniques de réduction des distorsions dans des composants aéronautiques ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Matériaux et Génie des Procédés INP Grenoble, France (2009).
- [47] P. Poupeau; « traitement thermique des alliages métalliques » ; Technique de l'ingénieur; M1105
- [48] H.V. Guthy, « Evolution of the Eutectic Microstructure in Chemically Modified and Unmodified Aluminium Silicon Alloys» in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science, Worcester Polytechnic Institute, USA (2002).
- [49] S.GOURZI « Etude thermique et structurale d'un échantillon industriel d'aluminium soudé. » Université Mohamed Khider – Biskra. 2014. Algeria.
- [50] F. Benabdallah, « Evolution des propriétés diélectriques, ferroélectriques et électromécaniques dans le système pseudo-binaire  $(1-x)\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3-x\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{TiO}_3$  / Corrélations structures et propriétés », thèse doctorat, Université Bordeaux1, France, (2013).
- [51] Z. Boumerzoug, C. Bouremel et V. Ji. "Residual Stress and Microstructures Characterization in Welded Al-Si-12Cu Alloy." *Advanced Materials Research*. Vol. 856. (2014).