

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة  
باجي  
عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingéniorat  
Département : Métallurgie  
Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Métallurgie  
Spécialité : Génie des Surfaces métalliques

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**L'Aluminium et ses alliages,  
cas de l'entreprise SNVI Rouiba.**

Présenté par : *Akaba Imed*

Encadrant : *Khettache Abdelkader, Prof., Université Badji-Mokhtar Annaba*

### Jury de Soutenance :

Zahzouh Moussa	Prof.	UBMA	Président
Khettache Abdelkader	Prof.	UBMA	Encadrant
Baccouche Mostefa	Prof.	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## *Remerciement*

Du nom de dieu clément et miséricordieux, le plus grand merci lui revient car il a éclairé notre chemin et nous a aidés à achever ce travail dans meilleures conditions.

Je remercie tout d'abord le directeur de ce mémoire : KHETTACHE ABDELKADER pour ses conseils, pour ses orientations et pour le temps qu'il m'a consacré.

Il m'est tout à fait agréable d'exprimer ma profonde gratitude à monsieur HERIZI MOUNIR ingénieur de labo dans l'atelier de fonderie d'aluminium dans SNVI Rouiba pour son aide précieux pour faire ce travail.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Monsieur ZAHZOUH MOUSSA professeur à l'université Badji Mokhtar, pour avoir accepté de faire partie de ce jury pour présider le jury de ce mémoire.

Un grand merci à Monsieur BACCOUCHE MOSTAFA professeur à l'université Badji Mokhtar pour avoir lui aussi bien voulu faire de cette partie de ce jury et accepté d'examiner ce travail.

Je ne pourrais pas oublier de remercier chaleureusement tous les enseignements qui nous ont formés durant ces années

## *Dédicace*

Avec tout mon respect, je dédie ce mémoire à ma mère et mon père qui n'ont pas cessé de me soutenir durant toute ma scolarité, m'ont éclairé, guidé et aidé à gravir les échelons, pour cela je leur dédie ce travail on leur disant

**"Que dieu vous bénisse, je n'oublierais jamais ce que vous avez fait pour moi"**

Et à toute ma famille et mes amies.

## Table des matières

### Introduction générale

### Chapitre I: Généralité sur l'aluminium et ses alliages

I.1. Introduction.....	3
I.2. Production de l'Aluminium .....	3
I.2.1.Obtention de l'alumine : Procédé Bayer.....	3
I.2.2.Obtention de l'alumine : Procédé Hall-Héroult.....	5
I.3. L'Aluminium.....	5
I.4. Les caractéristiques d'aluminium .....	5
I.4.1. Légèreté.....	5
I.4.2. La conductivité électrique et thermique.....	6
I.4.3. La tenue à la corrosion.....	6
I.4.4. Aptitudes aux traitements de surface .....	6
I.4.5. Le recyclage.....	7
I.4.6. Propriétés mécaniques.....	7
I.4.7. Propriétés physiques.....	7
I.5. Les alliages d'aluminium.....	8
I.5.1. Les alliages à durcissement structurales.....	9
I.5.2. Les alliages sans durcissement structural.....	9
I.5.3. Les alliages Al–Mg–Si.....	10
I.6. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	11

I.6.1. Traitements d'homogénéisation.....	12
I.6.2. Traitements d'adoucissement .....	12
I.6.3. Traitement de vieillissement.....	12
I.6.3.1. Vieillissement naturel (Maturation).....	12
I.6.3.2. Vieillissement artificiel (Revenu).....	13
I.6.4. Les Traitements thermiques de durcissement structural.....	13
I.6.4.1. Mise en solution.....	13
I.6.4.2. Trempe.....	13
I.6.4.3. Vieillissement.....	14
I.6.5. Désignation des états métallurgiques.....	14
I.7. Les applications de l'aluminium et ses alliages.....	16
I.7.1. Domaine de transport.....	16
I.7.2. Domaine d'alimentation.....	16
I.7.3. Domaine de l'énergie électrique.....	16
<b>Chapitre II : Précipitation dans les alliages Al Mg Si</b>	
II.1. Introduction.....	17
II.2. Phénomène de la précipitation.....	17
II.2.1. Différent type de la précipitation.....	17
II.2.1.1. Précipitation continue.....	17
II.2.1.2. Précipitation discontinue .....	18
II.2.2. Décomposition d'une solution solide sursaturée.....	18
II.2.2.1. La germination.....	19

a).La germination homogène .....	19
b). La germination hétérogène .....	21
II.2.2.2. Croissance des précipités.....	21
1. Précipités cohérents .....	22
2. Précipités semi cohérents .....	22
3. Précipités incohérents .....	22
II.2.2.3. Coalescence des précipites.....	23
II.3. La précipitation dans les alliages Al-Mg-Si.....	23
II.4. Les phases dans la précipitation.....	24
II.4.1. Nucléation des zones G P.....	24
II.4.2. La Phase durcissant $\beta''$ .....	25
II.4.3. La Phase $\beta'$ .....	26
II.4.4. La phase d'équilibre $\beta$ -Mg <sub>2</sub> Si.....	27
II.4.5. Les phases quaternaires Q' et Q.....	28
II.5. La séquence de précipitation .....	29
II.5. 1.Cas des alliages Al-Mg-Si-(Cu) .....	30
II.6.Effet du rapport $\frac{Mg}{Si}$ .....	31

### **Chapitre III : Solidification dans les alliages Al Mg Si**

III .1.Introduction .....	33
III.2.Les alliages d'aluminium .....	33
III.2.1.Alliages d'aluminium de corroyage .....	33

III .2.1.1.Désignation .....	34
III.2.2.Alliages d'aluminium de fonderie .....	34
III.2.2.1.Désignation : (norme internationale NF EN 1780) .....	35
III.3.classification des alliages d'aluminium .....	36
III.3.1.Alliage aluminium silicium .....	37
III.3.1.1.Diagramme d'équilibre Al-Si .....	37
III .3.2.Solidification de l'alliage Al-Si .....	38
III .3.2.1Alliages eutectiques .....	38
III .3.2.1.a. Eutectiques lamellaires .....	38
III .3.2.2Alliages de composition hors eutectique .....	39
III .3.2.2.a. Alliages pour lesquels $C_a < C < C_e$ .....	39
III.3.2.2.b. Alliages pour lesquels $C_e < C < C_b$ .....	39
III.3.2.2.b.1. Eutectique aciculaire .....	40
III.3.2.2.b.2. Eutectique fibreux ou modifié .....	40
III .3.2.3.Alliages de concentration $C < C_1$ .....	41
III .3.2.4. Alliages de composition $C_1 < C < C_a$ .....	41
III.3.3. Quelques alliages d'aluminium-silicium .....	42
III .3.3.1.Al <sub>7</sub> SiMg et ses variantes (Al <sub>7</sub> Si <sub>0</sub> , 3Mg et Al <sub>7</sub> Si <sub>0</sub> , 6Mg).....	42
III .3.3.2.Al <sub>10</sub> SiMg .....	42
III.3.3.3.Al Si 13 (ALPAX) .....	42
III.4. Effet des éléments allient .....	43
III.4.1. Effet du Magnésium .....	43
III.4.2.Effet du cuivre .....	43
III.4.3.Effet du Fer .....	43
III.4.4. Effet du Manganèse .....	44

III.5. Alliages apparentés au système Al-Si-Cu-Mg .....	44
III.5.1.Système binaire Al-Si .....	44
III.5.2. Système binaire Al-Mg .....	45
III.5.3.Système binaire Al-Cu .....	45
III .5.4.Système ternaire Al-Si-Mg .....	46
III.5.5.Système ternaire Al-Cu-Si .....	46
III.5.6. Système ternaire Al-Cu-Mg (Si) .....	47
<b>Chapitre IV: Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13</b>	
IV.1.introduction.....	48
IV.2.Matériaux étudiés .....	48
IV.3.Compositions chimiques des alliages .....	48
IV4. Compositions chimiques des lingots livrés par l'aluminium français .....	49
IV.5.Caractéristique .....	50
IV.6.Matériel utilisé.....	51
IV .6.1.Le four de fusion .....	51
IV .6.2.Le four de maintien .....	51
IV .6.3.La poche de coulée .....	52
IV.6.4.La coulée .....	52
IV .6.5.Dégazage .....	53
IV .6.6.L'affinage du grain .....	54
IV.6.7.Mise au titre .....	54
IV.6.8.Moulage .....	55

IV.6.8.1.En sable .....	55
a).Moulage au sable silico – argileux, sable noir.....	55
b).Moulage au sable à prise chimique.....	56
IV.6.8.2.En coquille .....	56
IV .6.9.L'ébarbage .....	58
IV .7.Procédure expérimentale de chargement du four .....	59
IV.8. Recommandation.....	60
IV.9.Règles générales de fusion .....	60
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>62</b>
<b>Références.....</b>	<b>64</b>

Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b> : Production de l'Aluminium.	3
<b>Figure I.2</b> : La bauxite	4
<b>Figure I.3</b> : L'alumine	4
<b>Figure I.4</b> : Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg <sub>2</sub> Si, coupe pseudo binaire	11
<b>Figure II.1</b> : Illustration schématique des deux types de réactions de précipitation.	18
<b>Figure II.2</b> : Variation de l'enthalpie libre de formation d'un germe sphérique $\Delta G$ en fonction du rayon $r$ de ce germe	21
<b>Figure II.3</b> : Représentation schématique de trois types de précipitation	22
<b>Figure II.4</b> : Zones G P dans un alliage Al-Mg <sub>2</sub> Si (aiguilles le long [100] Al)	25
<b>Figure II.5</b> : Image de MET haute résolution obtenue sur une aiguille de $\beta''$ par Andersen et al	26
<b>Figure II.6</b> : Précipitation de la phase $\beta'$ d'un alliage Al-Mg-Si	27
<b>Figure II.7</b> : Précipitation de la phase $\beta$ (Mg <sub>2</sub> Si) d'un alliage Al-Mg-Si et le modèle de sa structure	28
<b>Figure II.8</b> : Section du diagramme de phase pseudo-binaire de l'alliage Al-Mg-Si-(Cu)	29
<b>Figure III.1</b> : désignation des aluminiums et alliages – produits corroyés NF EN 573	34
<b>Figure III.2</b> : désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie NF EN 1780	35
<b>Figure III.3</b> : diagramme d'équilibre Al-Si	37
<b>Figure III.4</b> : solidification d'un alliage eutectique A-Ce%B.	39

<b>Figure III.5</b> : solidification d'un alliage hypo-eutectique A-B.	40
<b>Figure III.6</b> : solidification de l'alliage A-C1%B.	41
<b>Figure III.7</b> : solidification de l'alliage A-C2%B	42
<b>Figure III.8</b> : le système binaire Al-Mg	45
<b>Figure III.9</b> : le système binaire Al-Cu	46
<b>Figure IV.1</b> : four de fusion	51
<b>Figure IV.2</b> : four de maintien	51
<b>Figure IV.3</b> : poche de coulée.	52
<b>Figure IV.4</b> : Dégazeur N° 701	54
<b>Figure IV.5</b> : moule en sable...empreinte...Partie supérieur...Partie inférieur	55
<b>Figure IV.6</b> : Sable à prise chimique.	56
<b>Figure IV.7</b> : différentes structure de noyau	56
<b>Figure IV.8</b> : Les AQUAGELS et les DYCOTES	57
<b>Figure IV.9</b> : moulage en coquille par gravité.	57
<b>Figure IV.10</b> : Éprouvette en coquille...Éprouvette en sable	58
<b>Figure IV.11</b> : Scie mécanique vertical.	59

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1:</b> Propriétés physiques de l'aluminium	7
<b>Tableau I.2 :</b> Les chiffres de l'état H	15
<b>Tableau I.3 :</b> Différents traitements thermiques et leurs symboles	15
<b>Tableau II.1 :</b> la séquence de précipitation dans les alliages de la série 6xxx	31
<b>Tableau III.1:</b> Désignation des alliages d'aluminium selon l'Aluminium Association	36
<b>Tableau IV.1 :</b> Composition chimique de l'alliage <b>AlSi10Mg</b> .	49
<b>Tableau IV.2 :</b> Composition chimique de l'alliage <b>AlSi13</b>	49
<b>Tableau IV .3 :</b> Composition des lingots <b>AlSi10Mg</b> , livrés par l'Aluminium Français.	49
<b>Tableau IV.4 :</b> Composition des lingots <b>AlSi13</b> , livrés par l'Aluminium Français.	50
<b>Tableau IV.5 :</b> Caractéristiques mécaniques minimales de l'alliage <b>AlSi10Mg</b> .	50
<b>Tableau IV.6 :</b> Caractéristiques mécaniques minimales de l'alliage <b>AlSi13</b>	50

**Liste des symboles**

<b>Symboles</b>	<b>Définition</b>
$\Delta G_v$	Énergie libre volumique de formation d'un germe ou d'un Précipité
$\Delta G_s$	Énergie libre de surface
$\Delta G_d$	Énergie élastique de distorsion des réseaux
$G_\alpha, G_\beta$	Les enthalpies libres et volumiques spécifiques des phases
R	Rayon
$r_c$	Rayon critique
dQ/dt	Le dégagement de chaleur

**Liste des abréviations**

<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
ZAT	Zone thermiquement affectée
Z.G.P	Zones de Guinier et Preston
SSS	Solution solide sursaturée

## **Introduction générale**

L'aluminium a été connu pour la première fois par le chimiste français Sainte-Claire Deville en 1854 qui a présenté un petit lingot réalisé par voie chimique, Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages s'est produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats-Unis. Puis, l'introduction des alliages de l'aluminium après certains développements par plusieurs travaux de recherches scientifiques, joue un rôle important dans le sens de l'amélioration des performances d'aluminium.

Aujourd'hui, l'aluminium et ses alliages occupent la deuxième place dans la construction industrielle de différentes pièces après le fer. Ils se trouvent dans une grande variété d'applications grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques. En plus, la faible densité des alliages d'aluminium a une résistance notable à la déformation.

On note qu'il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium qui diffèrent par leurs éléments d'addition. Nous focalisons dans ce travail sur les alliages Al-Mg-Si (série 6000), qui possèdent des propriétés mécaniques intéressantes. Le problème de ces alliages est qu'ils subissent des changements mécaniques durant leur stockage à la température ambiante (vieillesse naturelle). Ces alliages possèdent aussi des propriétés thermodynamiques remarquables.

Parmi les transformations de phases à l'état solide les plus intéressantes et qui ont longtemps attirées les chercheurs, c'est la précipitation qui se produit lors des traitements de vieillissement et représentant une transformation à l'état solide à partir d'une solution solide sursaturée.

La formation de différentes phases à partir de la solution solide sursaturée dans les alliages Al-Mg-Si-(Cu) dépend du rapport Mg/Si, de la concentration de cuivre (Cu), de la température, et de temps de maintien à ces températures.

Nous avons organisé la présentation de ce mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons commencé par donner des supports théoriques sur l'aluminium et ses alliages. Dans le deuxième chapitre, nous présentons la précipitation dans les alliages de la série 6000 (Al-Mg-Si), ainsi que la phase du traitement thermique et, et dans le troisième

chapitre nous montrons la solidification et les systèmes binaire et ternaires et dans le quatrième chapitre on a expliqué la procédure de l'élaboration de ces alliages et le matériel utilisé.

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons parlés de façon générale sur l'aluminium et ses alliages et leurs domaines d'applications. On focalise sur la série 6000 utilisant le magnésium et le silicium (Al-Mg-Si) avec et sans cuivre (Cu). Ce sont des alliages obtenus par corroyage, renfermant des éléments d'addition en faibles quantité susceptibles aux traitements thermiques, d'où leur dénomination alliages à durcissement structural.

Leurs propriétés sont largement déterminées par l'existence et la prédominance de la phase Mg<sub>2</sub>Si.

## I.2. Production de l'Aluminium :

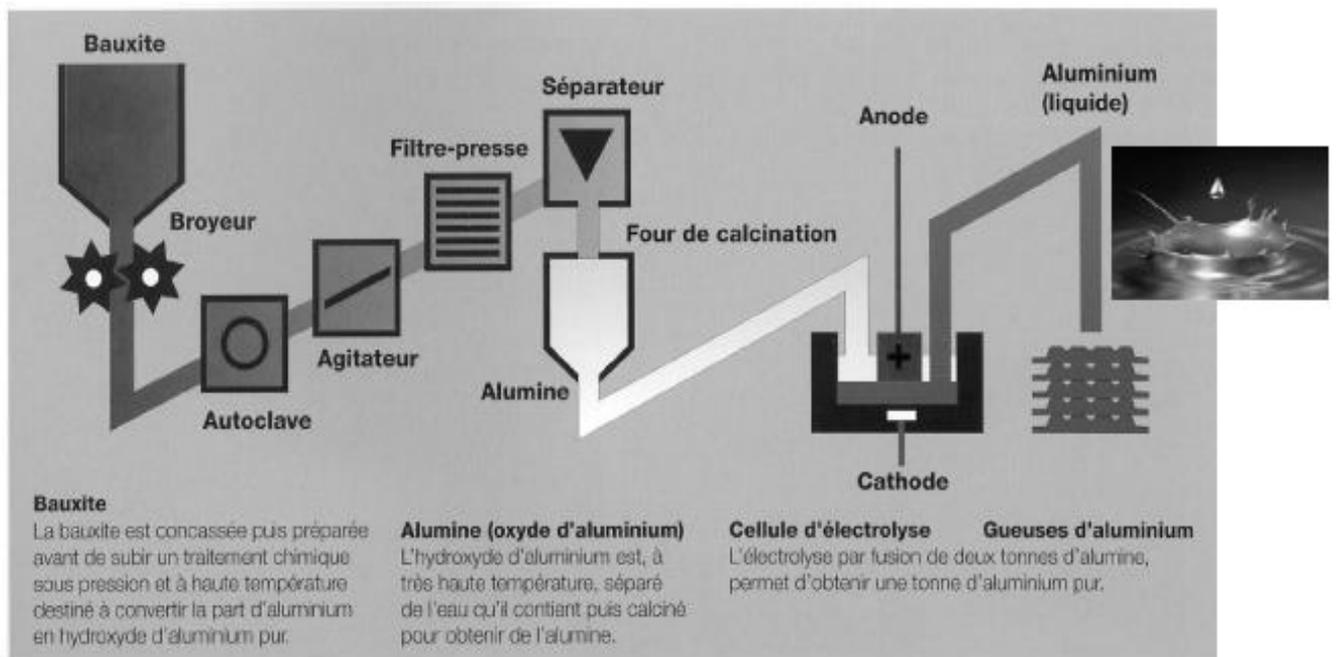


Figure I.1 : Production de l'Aluminium.

### I.2.1. Obtention de l'alumine : Procédé Bayer

La bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression (30 atm) et de la température (200 à 240°C) l'alumine contenue dans la bauxite se transforme en une solution d'aluminate de sodium.



## Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages

Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "bouesrouges" sont retirés par décantation et filtration. Le fer précipite ainsi que le titanate de soude, la silice précipite également sous forme de silico-aluminate de soude. Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium.



**Figure I.2 :** La bauxite

Cette dernière est obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30m de haut dans lesquels on ajoute du trihydrate d'alumine pur très fin, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le trihydrate d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée. [1]



L'alumine  $Al_2O_3$  est déshydratée par chauffage à  $1100^\circ C$  en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche qui titre à 99%.



**Figure I.3 :** L'alumine.

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

### **I.2.2. Obtention de l'alumine : Procédé Hall-Héroult**

Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Héroult", du nom de leurs inventeurs, l'américain Charles Martin Hall et le français Paul Héroult. Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , qui est un sel fondu, alumino fluorure de sodium). Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre 900 et 1000°C.

L'alumine ne fondrait qu'au-dessus de 2000°C si elle n'était pas en présence de cryolithe et de fluorure de calcium pour produire un kilo d'aluminium, il faut compter en moyenne 15 kWh.

Le four servant à l'électrolyse est un four en acier revêtu de briques réfractaires dont la cuve est en charbon aggloméré constituant la cathode sur laquelle se dépose l'aluminium fondu et il y a un dégagement d'oxygène sur l'anode en coke de pétrole + brai qui est oxydée [1].

### **I.3. L'Aluminium**

L'aluminium est un élément métallique, parmi les métaux les plus abondants dans la croûte terrestre, c'est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev juste après le silicium et l'oxygène, dont le numéro atomique 13, la masse atomique 2698.7 kg/m<sup>3</sup> (environ 27) et la structure cristalline de type cubique à faces centrées. [2].

### **I.4. Les caractéristiques d'aluminium**

#### **I.4.1. Légèreté**

L'aluminium est plus léger, et présente des caractéristiques mécaniques très élevées, il est largement utilisé dans les transports terrestres rapides et la fabrication des carrosseries des véhicules. La production d'aluminium n'est seulement un peu plus 2 % de celle de l'acier ce métal et ses alliages qui en dérivent arrivent en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier inoxydable [3].

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

### **I.4.2. La conductivité électrique et thermique**

L'aluminium fournit une excellente prise électrique, et est utilisé de plus en plus pour les lignes à haute tension parce qu'un poids inférieur à celui du cuivre, et aussi il offre un fort pouvoir caloporteur comme l'utilisation dans des dispositifs de refroidissement [4].

### **I.4.3. La tenue à la corrosion**

L'aluminium et ses alliages ont généralement une bonne tenue à la corrosion (atmosphérique, en milieu marin). L'aluminium est couramment utilisé par les architectes, ainsi que dans les bâtiments publics (La pyramide du Louvre « constituée de verre et de métal »). Toute offre de nombreuses possibilités de formes et de traitements de surface, des structures de construction, transformation de l'aluminium nécessite beaucoup d'entretien et de la résistance au fil du temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi :

- D'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de portes, des bateaux..., vieux de plusieurs décennies [3], [5].
- D'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à traitements de coloration. [5]

### **I.4.4. Aptitudes aux traitements de surfaces :**

Les traitements de surfaces sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels : [6]

- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante.
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûre ou le noircissement.
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle.
- La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire.

## Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages

### I.4.5. Le recyclage

Le recyclage de l'aluminium plus efficace par rapport à d'autres métaux, et ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir d'un minerai (plan économique), et l'expérience montre que les déchets d'aluminium ont une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles car une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite, en évitant l'étape de l'électrolyse, ce qui nécessite beaucoup d'énergie et d'éviter les polluants associés émissions. L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités [3], [5].

### I.4.6. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur dans l'état recuit a une faible propriété mécanique mais peut grandement améliorer ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques, selon les cas. Ainsi, il apparaît à l'état recuit une excellente ductilité par rapport aux aciers. L'aluminium est un matériau relativement élastique mais peu malléable. [4], [6]. La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont tout aussi différentes de celles de l'acier. C'est pourquoi il est important de bien connaître les limites du matériau avant de l'utiliser. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés, il faut retenir ce paradoxe : « Plus on soude l'aluminium, plus on l'affaibli ». Cette situation se produit en raison d'un changement des propriétés métallurgiques de l'aluminium de base dans la zone thermiquement affectée (ZAT). [4], [6].

### I.4.7. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans tableau suivant :

Propriété	Unité	Valeur
Paramètre de maille (à 298.15°K)	Å	4.05
Point de fusion	°C	660.45
Point d'ébullition	°C	2056
Pression de vapeur	Pa	0.0037
Energie interne massique $\mu$	J kg <sup>-1</sup>	398000

Capacité thermique massique $C_p$ (à 298.15°K)	$J\ kg^{-1}\ k^{-1}$	897
Conductivité thermique $\lambda$ (à 298.15K)	$W\ m^{-1}\ k^{-1}$	237
Résistivité électrique $\rho$ (à 298.15 K)	$10^{-9}\ \Omega\ m$	26.548

Tableau I.1: Propriétés physiques de l'aluminium [8].

### I.5. Les alliages d'aluminium

L'aluminium pur possède plusieurs inconvénients au niveau de ses propriétés mécaniques, afin d'améliorer ces propriétés, des éléments métalliques peuvent être ajoutés au cours du traitement thermique, tels que, Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, et Zn ... etc. Ces additifs appelés les éléments d'alliages, ils permettent d'assurer une très bonne résistance mécanique, au même temps en conservant sa légèreté pour se laisser déformer facilement.

Le choix de ces matériaux dépend de leurs disponibilités, leurs coûts, leurs facilités de déformation et leurs propriétés physiques. Tout progrès technologique important est presque toujours lié au développement des matériaux soit par l'amélioration des propriétés mécaniques ou par l'usinage de nouveaux matériaux.

Les propriétés mécaniques des alliages observés, sont affectées par l'addition du cuivre et l'excès du silicium, ce dernier affecte aussi la stabilité structurale. Les propriétés mécaniques sont améliorées par réduction de la taille moyenne des grains, ainsi que par la dureté et la limite d'élasticité du matériau [9].

Les éléments de transition, tels que Mn ou Cr et Fe, forment des dispersives, parfois assez grossiers [10]. Leurs interfaces avec la matrice, constituent un site de germination préférentielle pour la phase durcissant [11]. Ils sont utilisés afin de contrôler pour détenir une bonne résistance de ces alliages. L'addition de ces éléments se fait généralement à des taux très faibles.

Parmi les propriétés des alliages d'aluminium, citons ce qui suit :

- La résistance à chaud est faible au-delà de 100°C, sauf pour la série 2000 (Al-Cu) où l'on peut atteindre 300°C [12].

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

- Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres.

Par contre, ils sont sensibles à la corrosion galvanique et des précautions sont à prendre en particulier avec le fer. Il est à signaler que des risques de corrosion inter granulaire et de corrosion sous tension existent dans les alliages des séries 2000 et 7000 [12].

- Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'écrouissage  $n = 0.2$  à  $0.3$ ) [13], facile à emboutir. Par conséquent, le chaudronnage et le repoussage est des opérations aisées.

Dans l'état d'équilibre tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques telles que  $Mg_2Si$  (phase  $\beta$ ). Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium déformés plastiquement : [14].

### **I.5.1. Les alliages à durcissement structurales**

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Le durcissement structural obtenu par un processus comporte :

- La mise en solution : solubiliser les éléments durcissement précipités.
- La trempe : c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- Vieillessement : à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

### **I.5.2. Les alliages sans durcissement structural**

Différent mécanisme de durcissement intervient dans ces alliages pour moduler les propriétés mécaniques tels que :

- ✓ Le durcissement par écrouissage : est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire. Vous pouvez obtenir de restaurer les propriétés initiales de l'alliage après traitement thermique approprié.

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

- ✓ Le durcissement par addition en solution : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.
- ✓ Le durcissement par l'effet de phase dispersée : lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite.

### **I.5.3. Les alliages Al–Mg–Si**

Les alliages Al–Mg–Si sont des alliages à solution solide type Al-Mg<sub>2</sub>Si, série 6000 faisant partie de la catégorie des alliages corroyés à durcissement structural. Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si), cette famille d'alliage à une grande importance industrielle. Ces alliages sont généralement livrés après homogénéisation, trempe et vieillissement naturel. La famille des alliages Al-Mg- Si-Cu est formée lorsque le cuivre est ajouté à la série 6000, ou réciproquement, quand le silicium est ajouté aux alliages Al-Cu-Mg de la série 2000. Les alliages Al-Mg-Si 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. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et peuvent être améliorées par addition de silicium qui formera avec le Mg, le précipité durcissant Mg<sub>2</sub>Si. Ils présentent une bonne résistance à la corrosion notamment atmosphérique.

Ils se soudent très bien (souder à l'arc ou brasure) par rapport à d'autres alliages (ex : série 7000). On peut les classer en deux groupes :

- Un groupe dont les compositions sont plus riches en magnésium et silicium tel que les alliages 6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...). [15]
- Une deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 qui permettra

## Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages

de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. [15]

Le diagramme de phase obtenu à l'équilibre peut être relativement simplifié si on le considère comme étant binaire c'est à dire : aluminium et  $Mg_2Si$ .

La température de cet eutectique appelé pseudo binaire est de 595 °C. La composition du liquide eutectique est de 8,15 % poids Mg et de 4,75 % poids Si en équilibre, avec une solution solide d'aluminium contenant 1,13 % poids Mg et 0,67 % poids Si (pour un total d'environ 1,85 % poids  $Mg_2Si$ ).

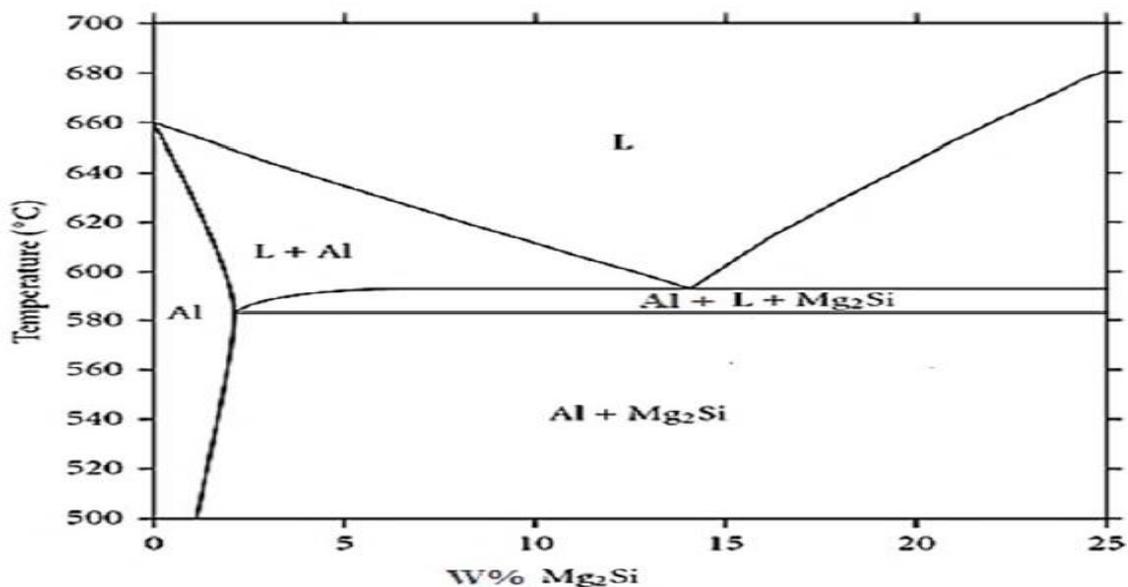


Figure I.4 : Partie du diagramme d'équilibre Aluminium- $Mg_2Si$ , coupe pseudo binaire [16].

### I.6. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les traitements thermiques ont pour but de modifier en générale la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier.

En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : l'homogénéisation, l'adoucissement, le vieillissement et le durcissement structural.

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

### **I.6.1. Traitements d'homogénéisation**

Les traitements d'homogénéisation sont fonction de la durée et la température des traitements thermiques qui dépendent généralement de la massivité de pièces, de la composition des alliages et de l'importance des ségrégations. Les domaines des températures d'homogénéisation s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590°C pour les alliages d'aluminium [17].

### **I.6.2. Traitements d'adoucissement :**

Le but de ces traitements pour d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Nous notons parmi ces traitements thermiques le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, et le traitement de recuit de précipitation dans le cas de matériaux trempés. Ce traitement consiste à chauffer une période relativement longue à une température élevée pour ramollir l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

### **I.6.3. Traitement de vieillissement**

Ce terme 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 (se produit en surface de la pièce considérée) chimique du matériau avec son environnement. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact. Il y a deux types sont :

#### **I.6.3.1. Vieillissement naturel (Maturation)**

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. 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 durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

### **I.6.3.2. Vieillissement artificiel (Revenu)**

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 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.

### **I.6.4. Les Traitements thermiques de durcissement structural**

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques. Ce type de traitement, spécifique aux alliages à durcissement structural comprend :

#### **I.6.4.1. Mise en solution**

L'obtention d'une solution solide à l'aide de la réaction du durcissement par précipitation est très importante dans l'opération du traitement thermique. L'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez long afin d'obtenir une solution solide homogène. Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590 °C pour ses alliages [18].

#### **I.6.4.2. Trempe**

La trempe est une opération nécessaire pour effectuer un traitement thermique. Cette opération consiste en un refroidissement suffisamment rapide de la solution solide obtenue dans la première étape, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile ou dans des métaux en fusion à différents intervalles. Son but est de supprimer la formation de la phase à l'équilibre Mg<sub>2</sub>Si pendant le refroidissement et de

## *Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages*

préservé la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide ( $\sim 260$  °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [18].

### **I.6.4.3. Vieillissement**

Le but principal des traitements de vieillissement est de modifier les propriétés mécaniques des alliages après trempe. Ces propriétés mécaniques sont convenables pour plusieurs applications

### **I.6.5. Désignation des états métallurgiques**

L'état métallurgique d'un alliage, en lien avec ses propriétés mécaniques, résultant de l'application d'un traitement thermique, est représenté par une désignation standard, décrite pour les alliages corroyés [18]. Un traitement thermique est désigné par les lettres suivantes :

**F** : Tel que fabriqué à chaud **O** : Recuit ou recristallisé

**H** : Ecroui par déformation à froid **T** : Traité thermiquement

Les états **F** et **O** n'ont pas de subdivision. Les états **H** et **T** sont définis de façon plus précise par des chiffres complémentaires.

Subdivision de l'état **H** : Pour les pièces écrouies, la lettre H est suivie de deux nombres présents dans le tableau suivante. Le premier chiffre derrière le symbole H indique le mode d'obtention de la dureté d'alliage et le second chiffre indique le niveau de dureté du métal. Par exemple : H24 : écroui 1/2 dur et recuit

## Chapitre I Généralité sur l'aluminium et ses alliages

<i>Chiffre</i>	Premier chiffre	Second chiffre
1	Écroui	
2	Écroui-recuit	1/4 dur
3	Écroui-stabilisé	
4		1/2 dur
6		3/4 dur
8		4/4 dur
9		Extra dur

**Tableau I.2** : Les chiffres de l'état H

Subdivision de l'état **T** : Les principaux traitements thermiques sont rassemblés dans le tableau suivant :

		Traitement thermique		<i>Symbole</i>
<b>Traitement avec mise en solution séparée.</b>	<b>Sans Ecrouissage</b>	Mûri		T4
		Revenu		T6
		Sur revenue		T7
	<b>Avec Ecrouissage</b>	Ecroui	Mûri	T3
		Revenu		T8
		Revenu et Ecroui		T9
<b>Traitement sans mise en solution séparée.</b>	<b>Sans Ecrouissage</b>	Mûri		T1
		Revenu		T5
	<b>Avec Ecrouissage</b>	Revenu et Ecroui		T10
		Ecroui Mûri		T11
		Revenu		T12

**Tableau I.3** : Différents traitements thermiques et leurs symboles [19]

### **I.7. Les applications de l'aluminium et ses alliages**

#### **I.7.1. Domaine de transport**

En raison de sa légèreté, l'aluminium et ses alliages peut être utilisé dans le domaine de transport, dans le sens de la construction des automobiles, des véhicules ferroviaires (les trains, les tramways, les métros), ainsi que l'aéronautique (les avions). Car il réduit les émissions de carburant et le bruit, les vibrations et la résistance à la corrosion de la consommation, et absorbe aussi le choc de l'accident, l'aluminium ne rouille pas dans la petite voiture, le poids de la structure de l'aluminium peut être jusqu'à 45 % inférieurs à la structure en acier, et aujourd'hui, 50 % des moteurs hors-bords sont fait d'aluminium. Une coque en aluminium peut tenir plus de 30 ans sans donner le moindre signe de fatigue, demande peu d'entretien que ces matériaux sont le résultat de son utilisation dans le domaine de la marine [4], [6].

#### **I.7.2. Domaine d'alimentation**

L'aluminium a un grand champ d'utilisation dans le domaine de l'alimentation, par exemple il est utilisé dans la construction des boîtes de conservation, les papiers aluminium, canettes, barquettes, ustensiles de cuisine. Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets néfastes pour le système nerveux. Il a été reporté que des personnes aient développé une encéphalopathie (forme de démence) [4], [5].

#### **I.7.3. Domaine de l'énergie électrique**

Les lignes aériennes et des câbles d'alimentation de la distribution et la transmission de l'énergie électrique, des câbles électriques à usage industriel. L'aluminium est particulièrement bien adapté à cet usage en raison de sa conductivité électrique élevée, une densité et une bonne résistance à la corrosion de base [20].

## ***Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si***

### **II.1. Introduction**

Le but de ce chapitre est de donner une introduction sur les alliages de la série 6000 et les séquences de précipitation dans les alliages ternaires Al-Mg-Si et quaternaires Al-Mg-Si(Cu). La précipitation dans les alliages Al-Mg-Si et le phénomène de durcissement structural sont des exemples types d'une problématique scientifique où l'innovation industrielle, les chercheurs théoriciens, les expérimentateurs et les instruments d'observation et de caractérisation ont progressé ensemble, et progressent encore.

Le durcissement des alliages d'aluminium par précipitation est caractérisé par la connaissance qualitative de la séquence de précipitation et son influence sur leurs propriétés mécaniques.

### **II.2. Phénomène de la précipitation**

Pour minimiser son énergie, Tout système hors d'équilibre effectue un réarrangement atomique par la diffusion des atomes et des défauts de structure pour atteindre un état d'équilibre stable ou métastable. L'apparition d'une nouvelle phase au sein d'une matrice sursaturée commence par des fluctuations dans l'arrangement atomique (étape dite de pré précipitation) où il y a regroupement des atomes de mêmes espèces en clusters appelés zones de Guinier et Preston (Z.G.P). L'évolution de ces clusters donne naissance à des embryons de la nouvelle phase instable appelés souvent zones (G.P.2), qui peuvent disparaître ou se développer suite à un traitement de vieillissement. Ces germes (G.P.2) peuvent croître jusqu'à l'état d'équilibre et donner ainsi lieu à la formation directe de la phase d'équilibre ou bien passer d'abord par un état intermédiaire instable dont l'évolution peut conduire à la phase d'équilibre suivant les conditions de vieillissement [21]. Il existe deux types de précipitations: la précipitation discontinue et la précipitation continue.

#### **II.2.1. Différent type de la précipitation**

Il existe deux types de précipitation :

##### **II.2.1.1. Précipitation continue**

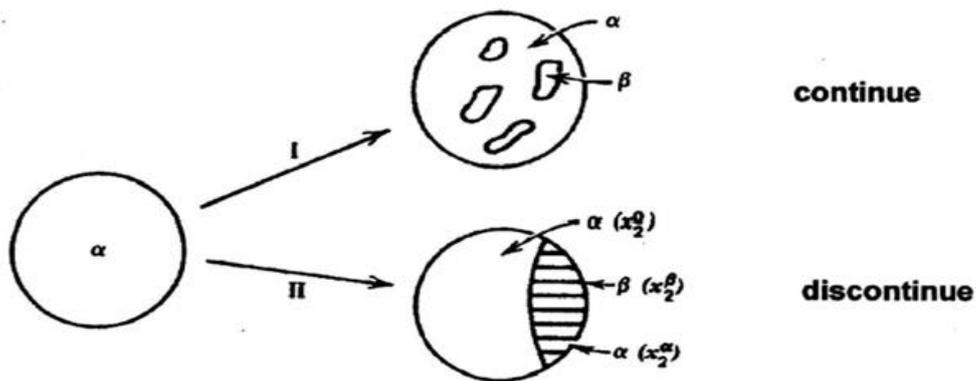
Ce type est une transformation pendant laquelle la concentration en soluté de la phase mère diminue continûment jusqu'à sa valeur d'équilibre. Cette précipitation conduit donc, au moins dans un premier temps, à l'obtention d'un certain nombre de précipités isolés qui

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

grossissent par le drainage des atomes de soluté. Cependant, ces précipités n'ont pas tous, dans des conditions thermiques données, la même probabilité d'apparition.

### II.2.1.2. Précipitation discontinue :

On dit qu'il y'a précipitation discontinue quand, pendant la transformation, le cristal est divisé en deux catégories de régions, les unes où la transformation est complète, les autres où la solution solide sursaturée reste inchangée. Elle nécessite donc la germination et la croissance de cellules constituées de produits biphasés (lamelles de la seconde phase noyées dans la matrice d'équilibre). Partant de la solution solide, on obtient donc un mélange d'une solution solide réorientée ou non par rapport à la phase mère qui est appauvrie, et d'une nouvelle phase dispersée dans la matrice.



**Figure II.1 :** Illustration schématique des deux types de réactions de précipitation [22].

### II.2.2. Décomposition d'une solution solide sursaturée

La décomposition d'une solution solide sursaturée est un processus physique et chimique déterminé par plusieurs facteurs, notamment la présence de défauts de réseau et de distribution dans l'alliage et le type de transformation (précipitation continue et précipitation discontinue). Ceci est principalement dû à des changements dans les propriétés mécaniques des solutions solides qui peuvent être causés par une réaction à l'importance attachée à l'étude de ces interactions. La décomposition peut être décrite par une succession de trois phases : la germination, la croissance et la coalescence

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

### II.2.2.1. La germination

La germination est l'étape initiale de la précipitation, elle suppose la formation d'une matrice riche en germes stable soluté (dans une configuration complètement différente pour une solution solide) et l'interface spécifique avec la matrice.

La germination est aléatoire, ce qui est dû à des fluctuations naturelles de la concentration de la phase mère. On distingue deux types de germination :

#### a).La germination homogène :

Ce type n'existe pas théoriquement que dans un cristal parfait. Les germes peuvent résulter de fluctuations statistiques de composition de taille suffisante (de l'ordre du nanomètre) au sein de la solution solide avec une cinétique de formation très rapide en présence de lacunes en sursaturation.

Pour qu'il y ait germination homogène, il faudrait qu'un élément de petit volume de la phase mère soit structurellement, chimiquement et énergétiquement identique à n'importe quel autre élément de cette phase. Le processus de germination homogène implique la formation d'une interface. Celui-ci d'enthalpie libre donnée par l'expression :

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s + \Delta G_d \dots\dots\dots (1) [23]$$

Avec  $\Delta G_v \leq 0$ , et  $\Delta G_s, \Delta G_d \geq 0$

Où  $\Delta G_v$ : Énergie libre volumique de formation d'un germe ou d'un précipité

$\Delta G_s$ : Énergie libre de surface

$\Delta G_d$ : Énergie élastique de distorsion des réseaux (la variation d'enthalpie de déformation).

Le terme  $\Delta G_d$  est généralement négligeable en première approximation vu sa faible contribution au premier stade de la germination. A ce stade le germe est de très petite dimension. Les deux autres termes de variations d'enthalpie libre sont étroitement liés aux dimensions du germe Si on suppose que les germes ont une forme sphérique [24, 25], de rayon r on obtient :

$$\Delta G_v = \frac{4}{3} \pi r^3 (G_\alpha - G_\beta) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \delta \dots\dots\dots (3)$$

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

Où  $G_\alpha$  et  $G_\beta$  sont respectivement les enthalpies libres et volumiques spécifiques des phases, et  $\delta$  représente l'enthalpie libre superficielle spécifique aux interfaces  $\alpha/\beta$ . Par substitution dans l'équation (1) on a alors :

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 (G_\alpha - G_\beta) + 4 \pi r^2 \delta \dots\dots (4) [26].$$

Elle englobe deux termes, l'un négatif  $\Delta G_v$  et l'autre positif  $\Delta G_s$ .

Une valeur critique du rayon  $r_c$  du germe est déterminée par la condition suivante :

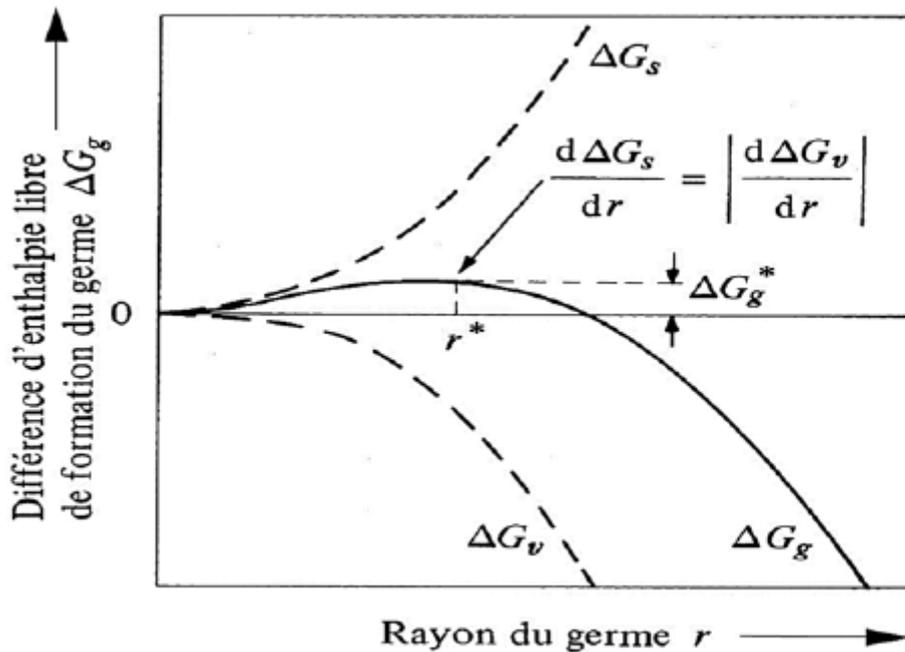
$$\frac{d\Delta G}{dr} = 4 \pi r^2 (G_\alpha - G_\beta) + 8 \pi r \delta = 0 \dots\dots(5) [28].$$

$$r_c = \frac{-2\delta}{(G_\alpha - G_\beta)} \dots\dots\dots (6) [27].$$

Toute croissance du germe de rayon  $r$  inférieure au rayon critique  $r_c$ , ( $r \leq r_c$ ) entraîne un accroissement de l'enthalpie libre de l'alliage, ce qui est impossible car  $\frac{d\Delta G}{dr} > 0$ .

Dans le cas où  $r > r_c$ , on obtient  $\frac{d\Delta G}{dr} < 0$  toute croissance du germe de rayon supérieur à  $r_c$  entraîne une diminution de l'enthalpie libre de l'alliage ; c'est-à-dire un accroissement de la stabilité [27] (figure II.2).

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si



**Figure II.2:** Variation de l'enthalpie libre de formation d'un germe sphérique  $\Delta G$  en fonction du rayon  $r$  de ce germe [27].

### b). La germination hétérogène :

La germination débute presque toujours des hétérogénéités sur la phase mère, ce qui diminue l'enthalpie libre de formation de germes, soit en réduisant l'énergie de surface ou une énergie de déformation, ou les deux. Ces défauts peuvent être joints de grains et les surfaces de polygonisation des perturbations isolées, des défauts d'empilement et les défauts points.

#### II.2.2.2. Croissance des précipités

La croissance de la nouvelle phase se fait par adjonction d'atomes ou de molécules au niveau de l'interface qui délimite la phase mère de la phase en formation. Il se produit un flux d'atomes ou de molécules de la phase mère vers la phase en développement. La différence entre le réseau cristallin de la matrice et celui du précipité va provoquer d'une part, un changement de volume qui a pour conséquence une déformation élastique dans l'une ou l'autre des deux phases, et d'autre part l'apparition d'une surface entre le précipité et la matrice, de sorte que la différence entre les énergies de liaison atomique dans deux milieux en cet endroit donne ce qu'on appelle l'énergie d'interface. Les deux

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

termes de l'énergie de déformation et celui de l'énergie d'interface jouent un rôle important sur les différentes interfaces existantes entre la phase mère et le précipité. [28]

Les trois types de précipités sont :

### 1. Précipités cohérents :

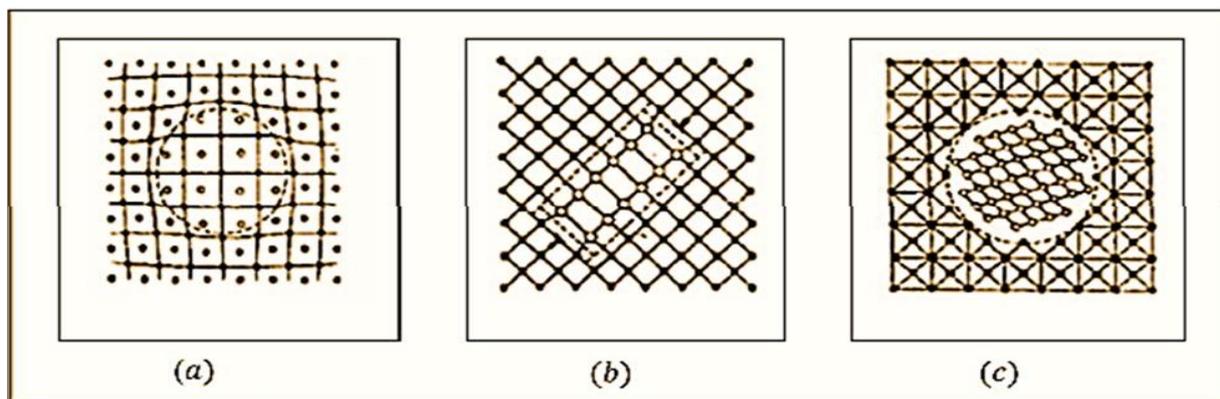
Ces précipités constituent l'interface compatible avec la phase mère, ce qui signifie que le plan qui forme l'interface, quelle que soit la nature chimique de ces dépôts est commune avec les deux phases. Essentiels à la cohésion est une condition que les cristaux ont la configuration des plans cristallographiques et l'espacement des atomes soient identique (figure II. 2. a).

### 2. Précipités semi cohérents :

Ce type de précipité constitue une interface entre les précipités et la matrice. Il constitue une région de cohérence totale, séparée par des réseaux de dislocation (figure II.2.b).

### 3. Précipités incohérents :

Ces précipités forment une interface avec la matrice à travers laquelle il n'existe aucune continuité de réseau cristallin. La structure et la composition changent brusquement d'une phase à l'autre adjacente (figure II.2.c)



**a** : précipité cohérent. **b** : précipité semi cohérent **c**: précipité incohérent

**Figure II.3:** Représentation schématique de trois types de précipitation [28].

## ***Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si***

### **II.2.2.3. Coalescence des précipités**

Lorsqu'un système contenant une phase dispersée est maintenu à une température relativement élevée, le nombre de particules de la phase dispersée décroît tandis que la taille moyenne des particules augmente. Pendant cette coalescence, les grosses particules croissent aux dépens des plus petites [28]. La force motrice derrière ce changement est la tendance du système pour réduire l'énergie libre globale en réduisant la superficie totale des interfaces. Atomes de solutés répartis dans les zones voisines de petites molécules sur de grandes surfaces qui entourent le processus exigé, ce qui signifie que la concentration de soluté en équilibre avec la plus grande solution de dépôt pour précipiter les petites particules telles que des particules de grande taille. Étant donné que la proportion d'atomes dans l'interface locale par incréments réduit également la taille, il en résulte que l'énergie libre de l'atome le plus grand dépôt de particules plus petites. Dans un système contenant des particules de diverses tailles, des gradients de concentration existent dans la matrice, ce qui produit la diffusion du soluté des régions entourant les petites particules vers celles adjacentes aux grosses. La coalescence est généralement accompagnée d'une diminution de la résistance mécanique de l'alliage [29].

### **II.3. La précipitation dans les alliages Al-Mg-Si**

Nous traitons exclusivement pour la précipitation, et cela signifie les régions de formation GP qui diffèrent par le nombre et la taille, les formes et la cinétique de l'alliage à l'autre de la croissance, tandis que, en raison de la germination, le stade de problèmes stables ou d'autres phases métastables de la présence de différentes structures cristallographiques de la stabilité d'aluminium, ne peuvent pas apparaître. Pour le revenu, même si elle peut encore être l'apparition précoce de zones GP, il est remplacé, en général par une ou plusieurs des phases métastables. Plusieurs études sur la cinétique de précipitation des alliages Al-Mg-Si-(Cu) en modes isothermes et anisothermes [30-33]. Description de la séquence de décomposition appliquée pendant l'effet de chauffage sur la cinétique de la vitesse de transformation, une séquence complexe de précipitation dans cet alliage de l'existence de phases métastables et au moins deux éléments d'additions distincts (Mg et Si).

## *Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si*

### **II.4. Les phases dans la précipitation**

Les phases et leur séquence pendant la précipitation sont tout à fait complexes.

La tentative est faite ici de systématiser les résultats, prêtant l'attention seulement à ces phases métastables que produisent près des pics dans les conditions moyennes et maximales, et les phases stables sont tout à fait complexes.

Pour les alliages Al-Cu-Mg-Si, un modèle de **Cayron** [34] a proposé des transitions structurales de phase pour expliquer la sous-structure commune des phases de Q, QC et QP.

Études systématiques détaillées par **Cayron et al** [34, 35] Sur les alliages Al-Mg-Si-Cu.

Les phases QP (hexagonal) [36] et QC (hexagonal) [37] ont été également rapportées au précipité comme des phases précurseur de la phase Q dans les alliages Al-Mg-Si contenant du Cu. La phase QP, qui a la forme d'une lamelle, sont rapportées au précipité dans la condition du pic vieilli, alors que les phases Q est habituellement observées à la fin de vieillissement dans les alliages. La phase L est observée également dans l'alliage Al-Mg-Si (Al-0.65%Si, 0.87%Mg) contenant une teneur importante de Cu. La présence de Cu augmente la proportion relative de  $\beta''$  [38]. La phase L également devient plus prééminente au moyen. La précipitation dans les alliages ternaires d'excès de Si fournit un contraste notable à celui dans l'alliage ternaire équilibré. Dans les conditions suivantes :

$Mg/Si < 1.73$ ,  $(Mg) > 2(Cu)$ , et  $(Cu) > 1\%$ , cette phase peut coexister avec la phase  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) qui apparaît dans les alliages Al-Cu-Mg-Si avec une quantité suffisante de cuivre  $> 4\%$ .

Les différentes phases pendant la précipitation sont :

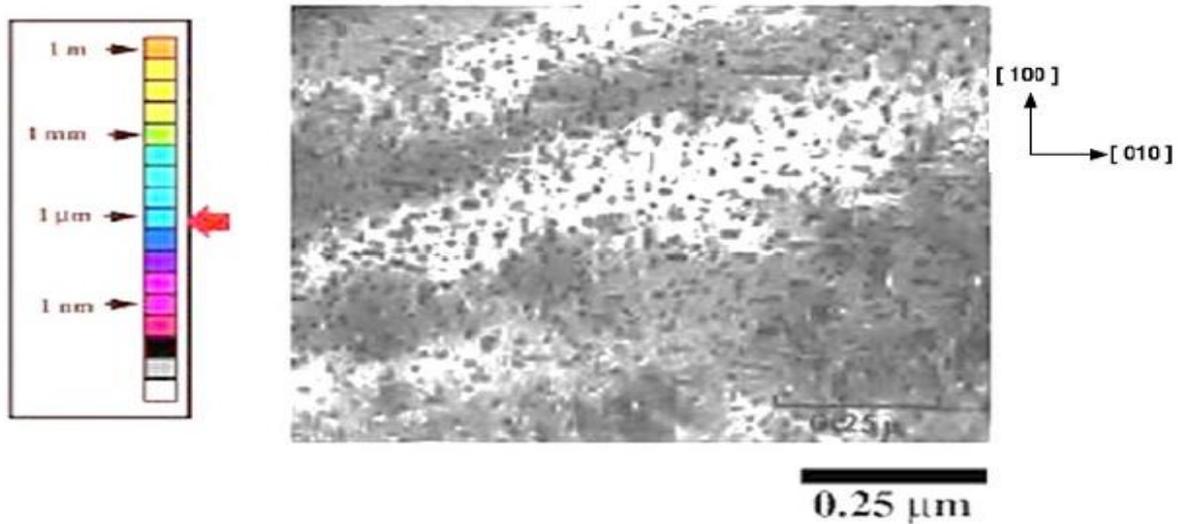
#### **II.4.1. Nucléation des zones G P**

Bien qu'il soit représenté indirectement par l'augmentation de la dureté de l'alliage, et la formation de zones GP à température ambiante, il est extrêmement difficile à observer expérimentalement. Supposant que toutes les zones aient une taille comprise entre 1 et 5 nm de diamètre. Un microscope électronique à transmission d'ombrage traditionnel

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

(MET) à des objets de cette taille a des valeurs presque impossibles de facteurs de dispersion électronique, très proche de l'aluminium, du magnésium, du silicium [39].

A ce stade, ces groupes de carbone sont plus ou moins sphérique [39]. Ces groupes contiennent des atomes principalement d'aluminium elle représente une zone limitée dans l'espace où la concentration de soluté supérieure à la concentration moyenne en alliage.



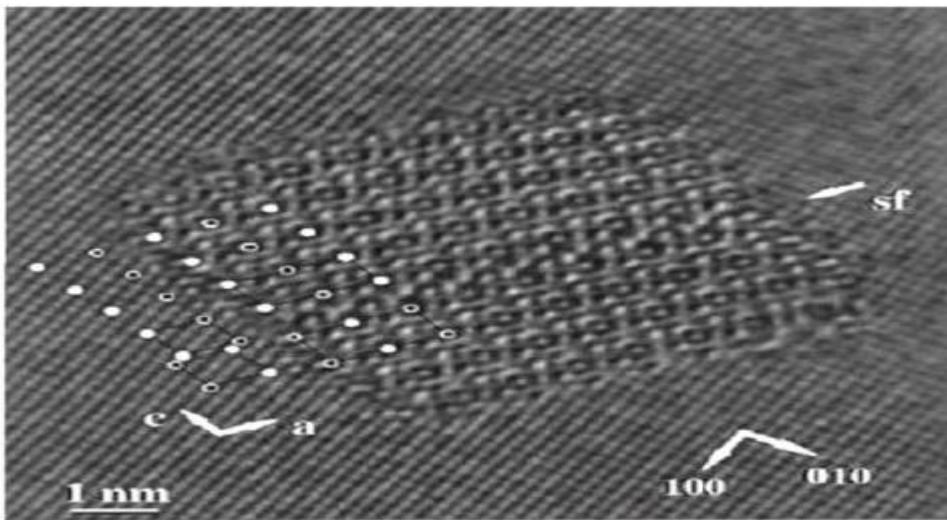
**Figure II.4** : Zones G P dans un alliage Al-Mg<sub>2</sub>Si (aiguilles le long [100] Al) [40].

### II.4.2. La Phase durcissant $\beta''$

Cette phase spécifique du courtier  $\beta''$  est cohérente avec la matrice et la présence d'une morphologie similaire à ceux des blocs de zones dissous (GP) [41]. Elle est déposée au détriment des précurseurs qui sont des blocs qui contiennent beaucoup Mg que de Si étirement le long des directions  $\langle 100 \rangle$  Al. En effet, il a été considéré pendant longtemps dans la littérature comme un médecin généraliste de la zone (GP-II), car il conduit à un schéma de diffraction électronique avec des stries diffuses perpendiculaires aux directions [001] \* réseau réciproque de la matrice d'aluminium. Et interprété ces bandes de la même manière pour les zones GP d'Al-Cu est également très belles zones iso structurales [40]. La structure  $\beta''$  a été identifié par **Sagalowicz et al** [42]. Après la diffraction de l'étude des rayons X de l'alliage Al-Mg-Si, cette structure est un type simple. Selon les œuvres des auteurs [47-45], la phase cohérente responsables de microscopiques correspondant à la dureté de pointe dans les alliages Al-Mg-Si(Cu)

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

modèles ou la faible teneur industrielle de cuivre. En conséquence, les étonnantes études en particulier émergents de tous ces sédiments dans l'enquête est que le rapport Mg /Si des précipités est inférieur à 2, un taux de parité correspondant à la phase stable Mg<sub>2</sub>Si [46-48]. Ces ratios mesurent entre 1 et 1,7, alors que **Matsuda et al** [49] a constaté que le rapport est égal à 0,17, il semble appuyer fortement sur la composition nominale de l'alliage Al-Mg<sub>2</sub>Si. Il est de l'ordre de 1,7 alliage et environ 1 dans les alliages en excès de Si. Précipités observés dimensions peuvent être responsables des écarts par rapport à la stœchiométrie. En effet, la microstructure correspondante au pic de dureté montre des précipités dont les dimensions sont de l'ordre de 2 nm [48].



**Figure II.5** : Image de MET haute résolution obtenue sur une aiguille de  $\beta''$  par Andersen et al [50].

Le faisceau est orienté dans une direction  $[001]$  de l'aluminium

### II.4.3. La Phase $\beta'$

Un rapport Mg/Si plus faible dans la phase intermédiaire que celui de la phase d'équilibre. Les rapports Mg/Si trouvés dans la littérature sont pratiquement identique à celles mesurés de la phase  $\beta'$  (varie entre 1 et 1,7 dépendant de la composition de l'alliage).

Cette phase précipite sous forme de bâtonnets mesurant entre 5 et 15 nm de diamètre.

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

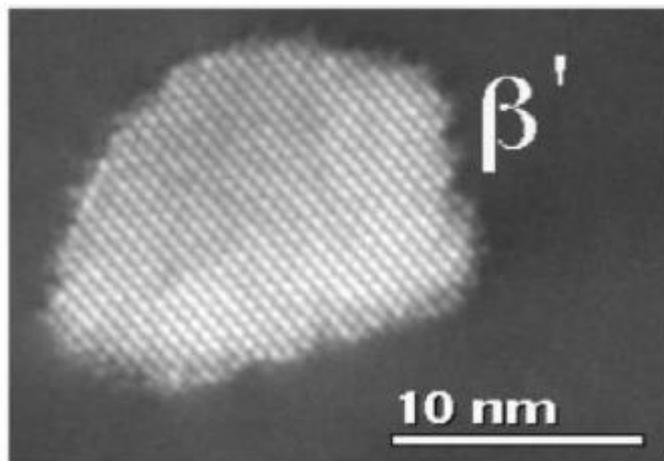
La structure de cette dernière a été bien déterminée par diffraction électronique [50], elle s'agit d'une maille hexagonale de paramètres :

$a = 0,705 \text{ nm}$ ,  $c = 0,405 \text{ nm}$ , rapport Mg/Si: 1.73 [51]

$a = b = 0,407 \text{ nm}$ ,  $c = 0,405 \text{ nm}$ , rapport Mg/Si : 1.54 [51]

Les aiguilles  $\beta''$ , les bâtonnets  $\beta'$  sont semi cohérents avec la matrice  $\alpha$ -aluminium le long des grands axes. **Anderson et al** [52] proposent la stœchiométrie suivante  $\text{Mg}_{18}\text{Si}_{10}$ .

**P. M. Derlet et al**, **X. Fang et al** [53, 54] en utilisant le MET à haute résolution ont montré que cette phase pouvait coexister avec  $\beta''$  dans un même précipité



**Figure II.6** : Précipitation de la phase  $\beta'$  d'un alliage Al-Mg-Si [55].

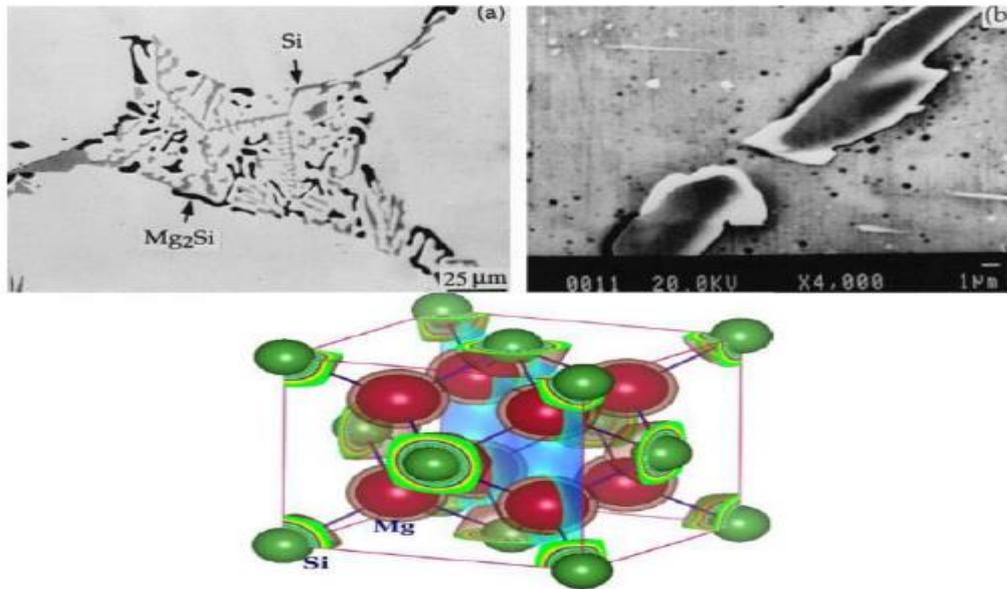
### II.4.4. La phase d'équilibre $\beta$ - $\text{Mg}_2\text{Si}$

La phase stable  $\beta$  - $\text{Mg}_2\text{Si}$  est la phase la plus connue, figure II.7. Elle précipite sous forme de plaquettes carrées d'épaisseur proche de la dizaine de nm et de quelques centaines de nm de côté. Sa structure est cubique à faces centrées ordonnée comme  $\text{CaF}_2$ .

Elle ne contient pas d'aluminium. La phase  $\beta$  - $\text{Mg}_2\text{Si}$  est incohérente avec la matrice, mais conserve toutefois des relations d'orientation :

**$(001) \beta // (001) \text{Al}$  et  $[110] \beta // [100] \text{Al}$ .**

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si



**Figure II.7:** Précipitation de la phase  $\beta$ (Mg<sub>2</sub>Si) d'un alliage Al-Mg-Si et le modèle de sa structure [55].

### II.4.5. LES PHASES QUATERNAIRES Q' et Q

Plusieurs auteurs [43, 44,56] ont montré que l'addition du cuivre dans les alliages Al Mg-Si, est à l'origine de la formation d'autres phases qui sont des phases quaternaires Q' et Q. La phase métastable  $\beta'$  est considérée comme phase précurseur de la phase métastable Q-Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> apparue dans les alliages Al-Mg-Si, La structure de Q' est proposée identique à celle de la phase Q. Cette dernière a une structure hexagonale de paramètres  $a=0.3932$  nm et  $c=0.40173$  nm

La phase Q a été observé expérimentalement en laboratoire d'Alcoa est une formule de quarte composite Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> [43]. Depuis lors, cette étape a été nommé différent désignée par Q [44, 56]. En effet, cette phase de la structure hexagonale se précipite en phase d'équilibre avec la solution solide  $\alpha$ -aluminium.

**La figure II.8** représente une section du diagramme de phase pseudo- binaire, des phases d'équilibres dans les alliages du type 6022 contenant 0.07% Cu et 0.9 % Cu.

L'analyse de ce diagramme offre une meilleure compréhension de la séquence de précipitation.

- Dans l'alliage contenant 0.07% Cu :

## *Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si*

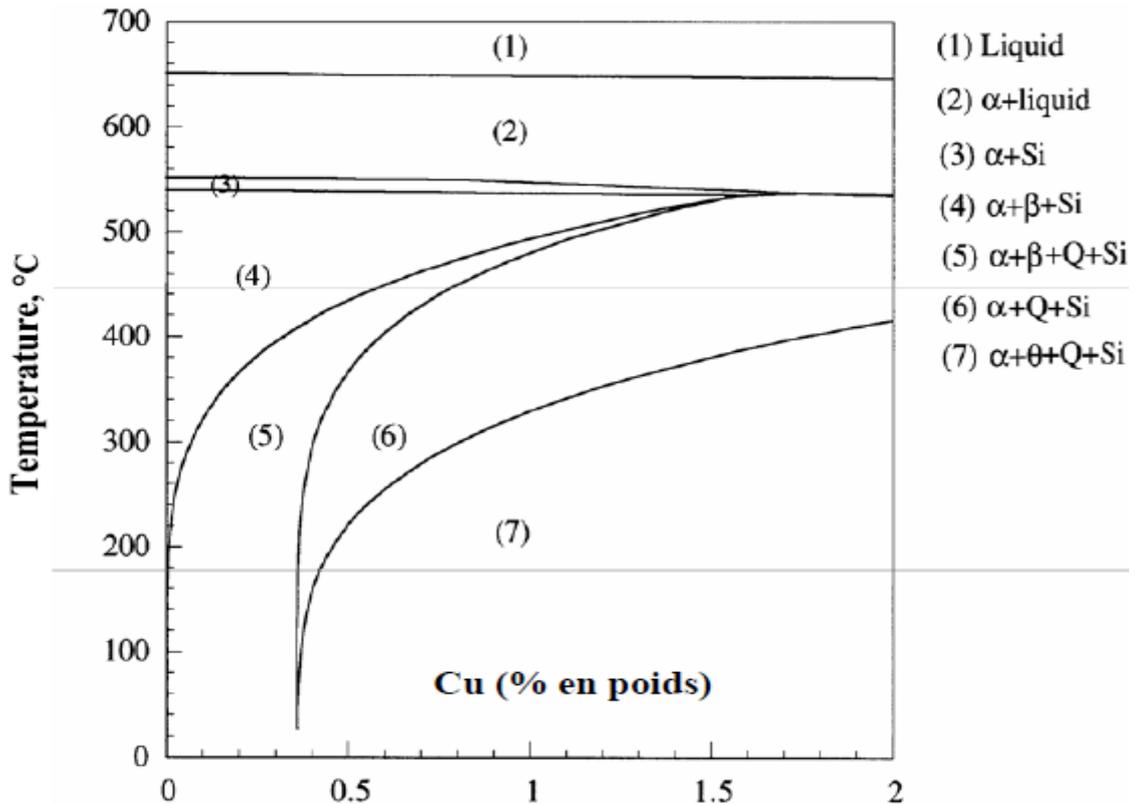
Si la température est inférieure à 300°C, les précipités d'équilibres sont les deux phases  $\beta$  et Q. Si 300°C < T < 540°C les précipités d'équilibres deviennent  $\beta$  et Si

- Dans l'alliage contenant 0.9 % Cu :

Si la température inférieure à 320°C, les précipités d'équilibre sont les phases  $\theta$ , Q et Si.

Si 320°C < T < 460°C, les précipités d'équilibres deviennent les phases Q et Si.

On remarque que la phase d'équilibre  $\beta$  apparaît dans les deux alliages entre 460 et 530°C.

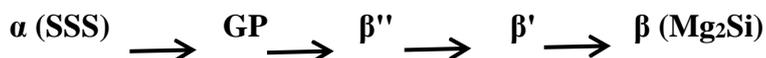


**Figure II.8** : Section du diagramme de phase pseudo-binaire de l'alliage Al-Mg-Si-(Cu)

[44]

### **II.5. La séquence de précipitation :**

Dans l'alliage équilibré, la séquence de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si est généralement la suivante :



## *Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si*

- $\alpha$  (SSS) : solution solide sursaturée de la matrice  $\alpha$ -aluminium
- **GP** : zones Guiner Preston apparemment de formes sphériques avec des structures inconnues
- $\beta''$  : Phase métastable sous forme d'aiguilles
- $\beta'$  : phase métastable sous forme de bâtonnets
- $\beta$  : Phase stable,  $Mg_2Si$  sous forme de plaquettes

### **II.5. 1.Cas des alliages Al-Mg-Si-(Cu) :**

La présence du cuivre dans les alliages Al-Mg-Si, l'origine de la formation d'autres phases telles que Q' et Q.

Immédiatement après l'homogénéisation et trempe, les séquences proposées pour différentes compositions sont :

La séquence de précipitation de l'alliage avec excès de Si et qui contient une faible teneur de Cu (0.07 % en poids). La profusion de phases plus ou moins semblables ou même ne variant que par leur composition et apparaissant à la place qu'occupait  $\beta'$  dans la séquence ternaire ont conduit **Epicier et al** [57] à redéfinir une nomenclature basée sur Q' : A, B et C. Ces phases sont définies grâce à leur structure cristallographique  $\alpha$  (SSS) **GP aciculaire  $\beta''$  bâtonnets  $\beta'$  +lamellaire Q'  $\beta$ +Si** [58].

La séquence de précipitation de l'alliage avec excès de Silicium et qui contient une forte teneur de Cu (0.91% en poids) est :

$\alpha$  (SSS) **GP aciculaire  $\beta''$  lamellaire Q' lamellaire Q+Si** [59]

La phase Q' se présente sous la forme de lattes selon les directions  $\langle 100 \rangle$  de la matrice  $\alpha$

## Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si

L'alliage	Les phases	Mg/ Si	Structure	Paramètres de la matrice
Al-Mg-Si	$\beta''$ aiguilles	1.0-1.7	Monoclinique	a = 15.2 Å, b = 4.05 Å, c = 6.7 Å, $\beta = 105^\circ$
	$\beta'$ bâtonnets	1.73	Hexagonal	a = 7.05 Å, c = 4.05 Å
	$\beta$ plaquettes	1.73 (Mg <sub>2</sub> Si)	cfc	a = 6.42 Å
	QP	1.54	Hexagonal	a = 3.93 Å, c = 4.05 Å
Al-Cu-Mg-Si	QC	1.54	Hexagonal	a = 6.70 Å, c = 4.05 Å
	Q	1.22 (Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> Al <sub>5</sub> )	Hexagonal	a = 4.05 Å, c = 10.4 Å
	A	0.28	Hexagonal	a = 4.05 Å, c = 6.7 Å
Al-Mg-Si (excès de Si)	B	0.40	Orthorhombique	a = 6.8 Å, b = 7.9 Å, c = 4.05 Å
	C	0.83 (Cu, Si) <sub>8</sub> (Mg, Al) <sub>13</sub>	Hexagonal	a = 10.4 Å, c = 4.05 Å

**Tableau II.1** : la séquence de précipitation dans les alliages de la série 6xxx [34]

### II.6. Effet du rapport $\frac{Mg}{Si}$ :

L'Alliage appelé dont le rapport  $\frac{Mg}{Si} = 2$  est stœchiométrique. Le développement industriel que la présence de ce rapport entre la concentration de Mg et celle de Si de façon à former la phase Mg<sub>2</sub>Si. D'après la différence de la stœchiométrie, il existe deux séries d'alliages alliages avec excès de silicium dont le rapport  $\frac{Mg}{Si}$  se trouve entre 0.8 et 1.8 et alliages avec excès de magnésium avec  $\frac{Mg}{Si}$  supérieur à 2 [40].

La présence d'un excès de magnésium a tendance à favoriser une phase stable Mg<sub>2</sub>Si au dépend des phases durcissant dont le rapport  $\frac{Mg}{Si}$  est < 2 [43], de sorte que l'augmentation de

## ***Chapitre II Précipitation dans les alliages Al Mg Si***

magnésium est indésirable du point de vue des propriétés mécaniques. Tandis que l'excès de silicium améliore les propriétés mécaniques, mais peut affecter la ductilité de l'alliage. En outre l'excès de Si augmente le traitement de maturation à température ambiante, mais ne modifie pas la cinétique de précipitation. Gupta et al [45], déduit que les alliages à excès de Si présentent une dureté supérieure aux alliages dits stœchiométriques. D'une manière générale, l'excès de Si favorise les phases métastables (dont le rapport  $\frac{Mg}{Si} < 2$ ) aux dépens de la phase stable d'équilibre, en affectant la composition des précipités durcissant [43]. Pour les alliages contenant une faible teneur de cuivre, l'excès de Si modifie également la séquence de précipitation [60], c'est-à-dire l'apparition de la phase quaternaire Q et son précurseur Q'.

### **III .1.Introduction :**

Dans ce chapitre nous avons parlés sur les désignations des alliages d'aluminium de corroyage et de fonderie selon les normes internationales

On a parlé aussi sur la solidification dans ces alliages, l'effet des éléments allient et tout les systèmes binaires et ternaires qui se trouvent dans l'alliage de l'aluminium

### **III.2.Les alliages d'aluminium :**

L'aluminium, dont les propriétés mécaniques sont faibles lorsqu'il est pur, est allié à d'autres métaux. Un alliage est constitué de trois types d'éléments : les éléments d'alliages, qui définissent sa famille ; les éléments d'additions, qui modifient certaines propriétés particulières (anti-recristallisant par exemple) ; et les éléments d'impuretés, dont la présence n'est pas désirée, mais qui sont naturellement présentes dans le minerai de base (la bauxite) ou qui proviennent du mode d'élaboration (**Fe, Si, Cu**).

Les éléments d'alliage principalement rencontrés sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Ces alliages sont classés en familles selon les éléments principaux ajoutés et permettent d'atteindre des valeurs très variables de propriétés mécaniques (par exemple la résistance à la traction peut s'étendre de **100 à 600MPa** selon l'alliage et le traitement employé). [61]

#### **III.2.1.Alliages d'aluminium de corroyage :**

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant : barres, profilés, tôles, plaques, bandes ; les produits filés et étirés ; les fils ; les produits forgés ou destinés à la forge, etc. Sont exclus : les produits moulés, les lingots de refusions, les composites utilisant l'aluminium et ceux issus de la métallurgie des poudres. Les séries **1\*\*\*,3\*\*\*, 5\*\*\*** et la plupart des **4\*\*\*** ne peuvent pas être traitées, sont dites non trempâtes 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 **2\*\*\*,6\*\*\*** et **7\*\*\*** peuvent être traitées et sont dites trempâtes ou avec durcissement structural. Bien qu'il soit possible d'avoir un bon rapport résistance/poids avec ces alliages,

## Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si

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

### III .2.1.1.Désignation :

(Norme internationale) : elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW comme préfixe (EN pour norme européenne, A pour aluminium, W pour corroyé).

#### Désignation des aluminiums et alliages - produits corroyés NF EN 573



Figure III.1 : désignation des aluminiums et alliages – produits corroyés NF EN 573. [62]

#### Exemples :

- ✓ EN AW-1050 A [Al 99,5] est un aluminium pur à 99,50%,
- ✓ EN AW-1100 [Al 99,0] un aluminium pur à 99% avec contrôle d'impuretés,
- ✓ EN AW-5086 [Al Mg 4] est un alliage d'aluminium avec 4% de magnésium,

### III.2.2.Alliages d'aluminium de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

### Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si

- 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.
- 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

#### III.2.2.1. Désignation : (norme internationale NF EN 1780) :

Préfixe EN ; espace ; lettre A (pour aluminium) ; lettre B (pour lingots de refusions) ou C (pièces moulées) ou M (alliages mères) ; un tiret ; cinq chiffres représentant la composition de l'alliage et/ou les symboles chimiques donnant la composition de l'alliage ordonnés par teneur décroissante et limités à 4 éléments.

#### Désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie NF EN 1780

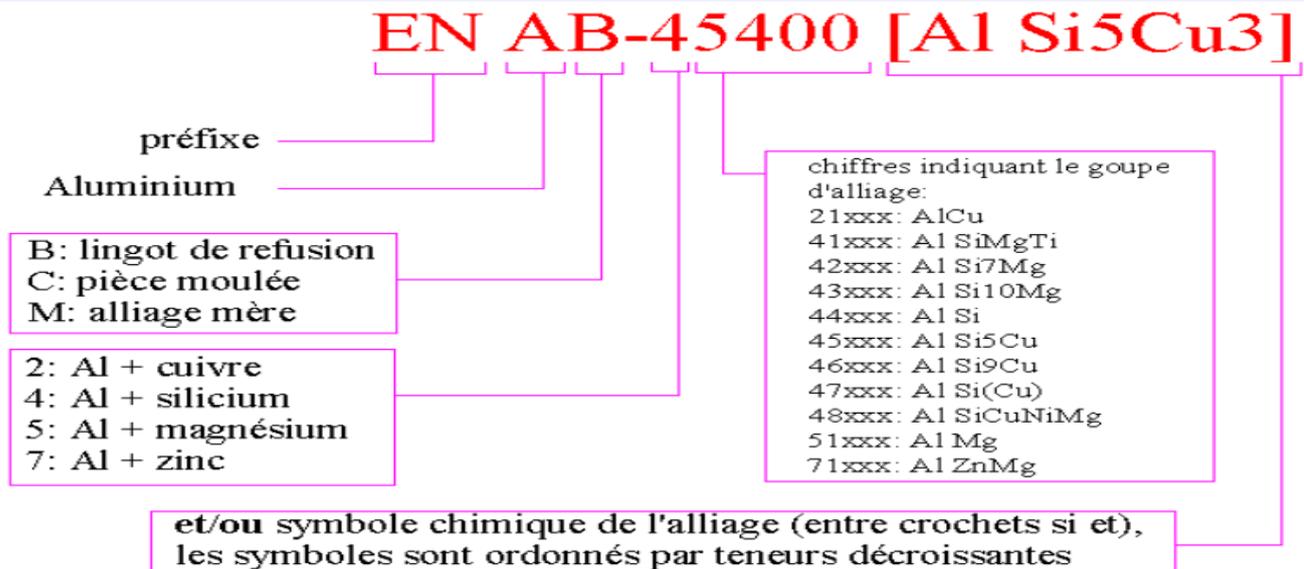


Figure III.2 : désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie NF EN 1780.

## *Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si*

### **Exemples :**

- ✓ EN AB-Al 99,8 : lingot pour refusions en aluminium pur à 99,8%. EN AB-Al 99,7 E : lingot pour refusions en aluminium pur à 99,7% pour usage électrique (E).
- ✓ EN AB-45400 [Al Si5Cu3] ou EN AB-Al Si5Cu3 ; lingot pour refusions en alliage d'aluminium avec 5% de silicium et 3% de cuivre (ancien A-S 5U3).
- ✓ EN AC-Al Si12CuMgNi : alliage d'aluminium pour pièces moulées avec 12% de silicium, du cuivre, du magnésium et du nickel.
- ✓ EN AB-Al Si9Cu3(Fe) (Zn) : lingot pour refusions en alliage d'aluminium avec 9% de silicium, 3% de cuivre et des impuretés (fer et zinc). [62]

### **III.3.classification des alliages d'aluminium :**

Les alliages d'aluminium se classent en deux grandes familles : les alliages corroyés et les alliages de fonderie. Les alliages corroyés sont mis en forme mécaniquement par des procédés tels que le laminage, l'extrusion, le forgeage, l'étirage ou le tréfilage. Les alliages de fonderie sont quant à eux coulés par différents procédés comme le moulage sous pression, le moule permanent, le moule au sable à vert, le moule au sable lié chimiquement, la cire perdue, le moule au plâtre, par coulée centrifuge, le moule sous vide ou à basse pression. On différencie ces deux types d'alliages par leur désignation donnée par l'Aluminium Association

<b>Alliages de fonderie</b>		<b>Alliages corroyés</b>	
Série	Alliage	Série	Alliage
<b>100</b>	Al commercialement pur	<b>1000</b>	Al > 99%
<b>200</b>	Al-Cu	<b>2000</b>	Al-Cu et Al- Cu-Mg
<b>300</b>	Al-Si-Mg et Al- Si-Cu	<b>3000</b>	Al-Mn
<b>400</b>	Al-Si	<b>4000</b>	Al-Si
<b>500</b>	Al-Mg	<b>5000</b>	Al-Mg
<b>700</b>	Al-Zn	<b>6000</b>	Al-Mg-Si
<b>800</b>	Al-Sn	<b>7000.0</b> <b>1</b>	Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu
<b>900</b>	Al et autres éléments	<b>8000</b>	Al et autres Eléments

**Tableau III.1:** Désignation des alliages d'aluminium selon l'Aluminium Association. [62]

### III.3.1. Alliage aluminium silicium :

Les alliages au silicium sont les plus nombreux parmi ceux du moulage, il en existe plusieurs variantes environ 70% du tonnage des pièces moulées.

Ils peuvent être coulés soit en sable, soit en coquille, soit sous pression leurs caractéristiques mécaniques dépendent de leurs compositions et du mode de coulée.

Leurs domaines d'application sont très nombreux : appareils ménagers : brûleurs en A\_M4, bras de suspensions automobile en A\_S12G, blocs moteurs et culasses en A\_S9U3, radiateurs de chauffage central en A\_S12U.

Les alliages de fonderie au silicium, au magnésium, au zinc ont une excellente résistance à la corrosion à l'opposé des alliages contenant de fortes additions de cuivre (au moins 2 à 3%) qui ont une mauvaise résistance à la corrosion.

Les caractéristiques mécaniques des alliages dépendent de leur composition chimique, ainsi que du mode d'élaboration et des traitements thermiques effectués. [63]

#### III.3.1.1. Diagramme d'équilibre Al-Si :

Le diagramme d'équilibre Aluminium silicium est simple, il indique les compositions des phases et la structure de l'alliage en fonction de la température et de la concentration en silicium.

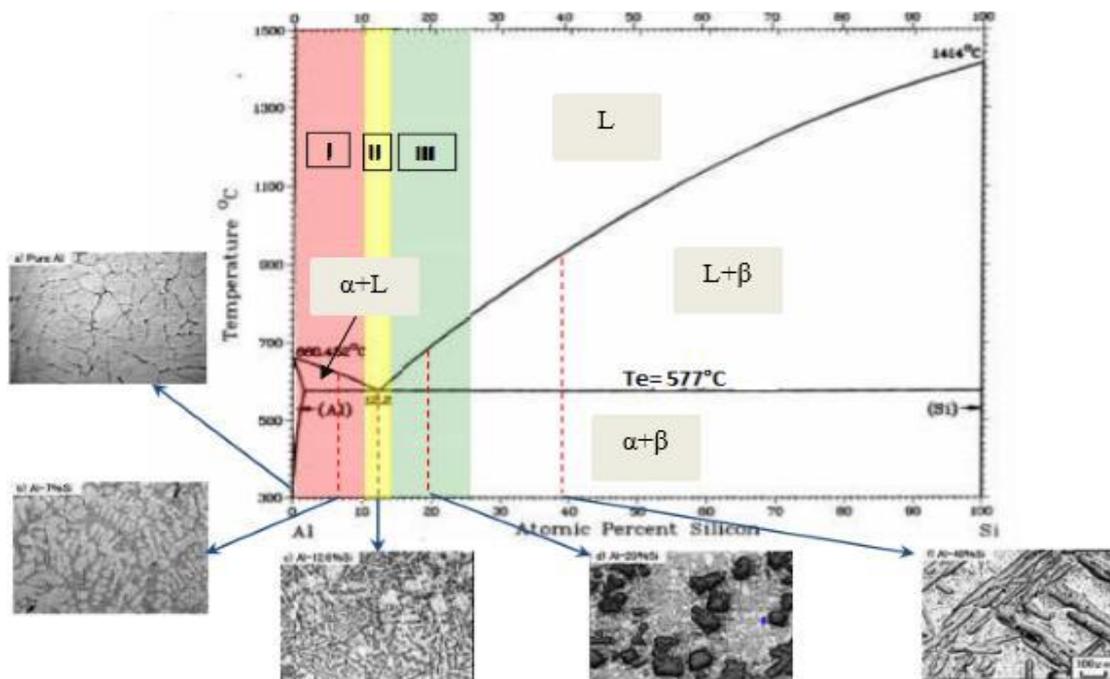


Figure III.3 : diagramme d'équilibre Al-Si.

## Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si

On distingue sur ce diagramme :

- Solution alpha : Riche en aluminium, le maximum est de 1,65% de silicium à 577°C.
- Eutectique ( $\alpha+\beta$ ) : Contient 11,7% de silicium à 577°C.
- Hypo eutectique : constitués de alpha et de l'eutectique ( $\alpha+\beta$ ).
- Hyper eutectique : consiste de bêta et de l'eutectique ( $\alpha+\beta$ ).
- Liquide : forme par deux branches de courbes CEDO.
- Solide : forme par la branche CA et le palier eutectique AEF.
- Solution  $\beta$  : pauvre en aluminium contient au maximum 97% de silicium à 20°C. [64]

### III .3.2.Solidification de l'alliage Al-Si :

Les alliages industriels Al-Si ne sont pas systématiquement de composition eutectique exacte. L'alliage le plus utilisé contient de 10 à 13% de Si il présente une très bonne tenue à la corrosion pour toute température supérieure à la température de l'eutectique  $T_e$ . L'alliage se trouve à l'état liquide.

Sa solidification se produit à la température T et la structure résultante se différencie selon la forme que prend la phase riche en silicium. Cette structure comporte l'eutectique formé des deux phases ( $\alpha+\beta$ ) et, souvent des cristaux de silicium. Voir le diagramme d'équilibre.

Dans ce qui suit, nous illustrons tous les cas de figure qui peuvent se présenter, pour les alliages Al-Si de différentes compositions. Ainsi, il existe différents types d'alliages Al-Si, se distinguant essentiellement par la concentration en Si et donc par la morphologie de la phase riche en Si. Nous en citons :

#### III .3.2.1Alliages eutectiques :

Ces alliages de concentration  $C=C_e$ , présentent une concentration en soluté correspondant à celle du point eutectique E. leur microstructure est divisée en plusieurs familles :

##### III .3.2.1.a. Eutectiques lamellaires :

Ces alliages présentent une microstructure où le Silicium est sous forme de lamelles, c'est une forme connue de l'eutectique quand l'alliage est réduit en impuretés.

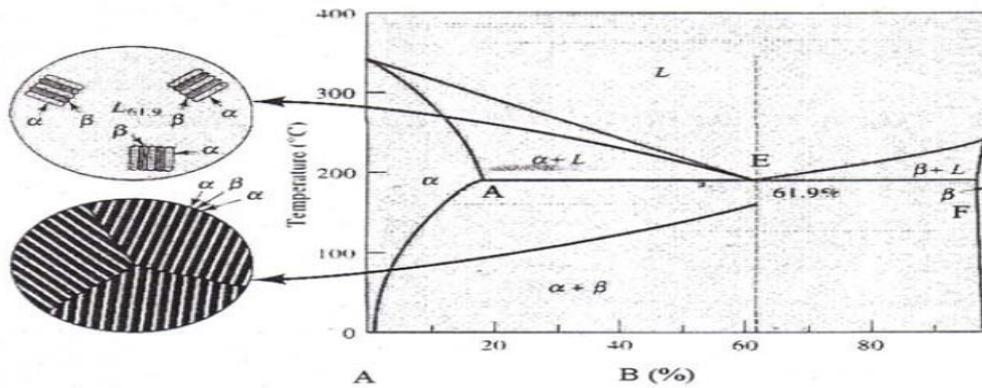


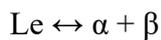
Figure III.4 : solidification d'un alliage eutectique A-Ce%B.

### III .3.2.2 Alliages de composition hors eutectique :

On en distingue deux types :

#### III .3.2.2.a. Alliages pour lesquels $C_a < C < C_e$

Ils sont appelés alliages hypoeutectiques. A  $T = T_e + \epsilon$ , l'alliage est biphasé il est constitué du liquide et de cristaux de solution solide  $\alpha$ . La phase solide qui se forme la première dans un Liquide, s'appelle phase primaire (ou proeutectique). Les cristaux de la phase primaire prennent des formes de dendrites à  $T = T_e$ , la solution solide proeutectique ne subit aucune transformation seul le liquide eutectique à subir la transformation suivante :



A  $T = T_e - \epsilon$ , l'alliage est biphasé : il contient toujours une proportion d'eutectique, avec des dendrites primaires de la phase riche en aluminium.

#### III.3.2.2.b. Alliages pour lesquels $C_e < C < C_b$

Ils sont appelés alliages hypereutectique. Leur étude est similaire à celle pour les alliages hypoeutectiques. La phase proeutectique étant cette fois-ci  $\beta$ , est constituée des cristaux polyédriques de silicium.

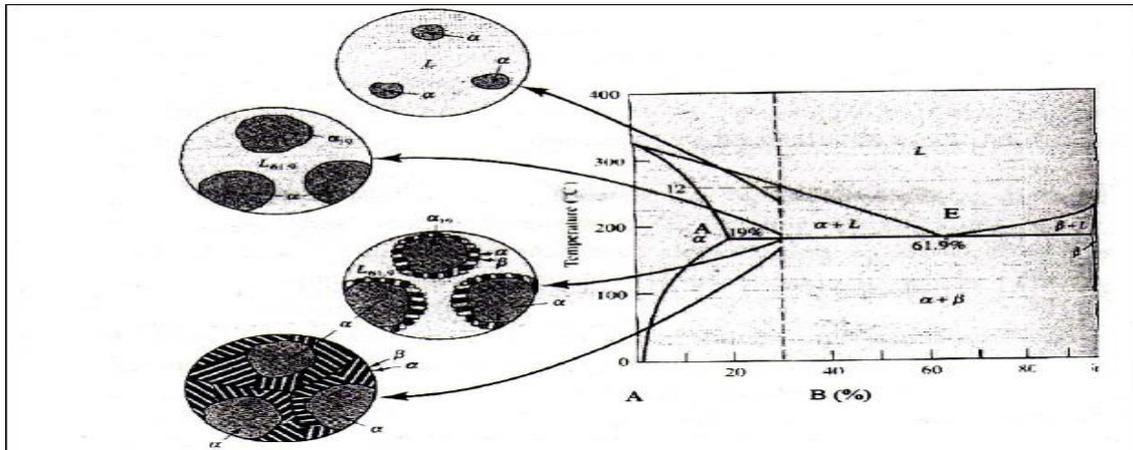


Figure III.5 : solidification d'un alliage hypo-eutectique A-B.

Les alliages de composition hypoeutectiques contiennent généralement entre 13 et 25% de Si. Les microstructures qu'ils présentent, sont de deux types :

#### III.3.2.2.b.1. Eutectique aciculaire

La phase riche en Si se présente en plaquettes épaisses orientées au hasard, qui apparaissent sous forme d'aiguilles au microscope. Cette structure est favorisée par la présence de traces de phosphore (10 à 15 ppm), qui est utilisé comme affinant. En effet, on procède à l'affinage des grains de silicium primaire par l'addition de phosphore aux alliages AL-Si industriels hypoeutectique ( $C < C_e$ ). Ainsi les tailles de grains industriellement obtenues, sont comprises entre 20 et 40  $\mu\text{m}$  et confèrent à ces alliages d'excellentes propriétés de frottements et d'usure. [64]

#### III.3.2.2.b.2. Eutectique fibreux ou modifié

La structure eutectique peut être modifiée par addition d'éléments tels que le sodium et le strontium, les alliages concernés par cette modification sont de composition comprise entre 4 et 13% de Si. Le principal avantage de cette modification est d'améliorer la ductilité (allongement) de ces alliages. Les éléments chimiques modificateurs les germes de phosphore d'aluminium et agissent sur croissance des plaquettes de silicium en multipliant le nombre de branchements. Ainsi, la phase riche en silicium présente une morphologie de fibres allongées ayant de corail.

### III .3.2.3. Alliages de concentration $C < C_1$

Les alliages de cette catégorie forment toujours des solutions solides lors de leur solidification (Figure III.6)

Liquide  $\rightarrow$  particules  $\alpha$  plongées dans le liquide  $\rightarrow$  solution polycristalline de grains  $\alpha$

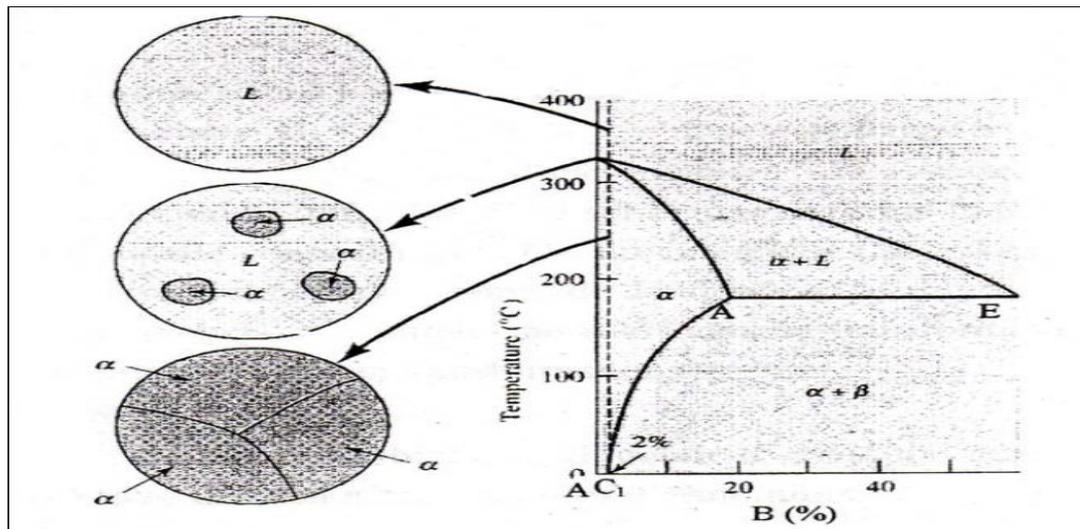


Figure III.6 : solidification de l'alliage A-C1%B.

### III .3.2.4. Alliages de composition $C_1 < C < C_a$

A l'issue de la solidification, ou en présence d'un solide  $\alpha$  susceptible de se décomposer, à partir du solvus. En un solide biphasé formé d'un agrégat de phases  $\alpha$  et  $\beta$  (Figure III.7) illustre la formation de précipités de la nouvelle phase  $\beta$  dans la matrice  $\alpha$ .

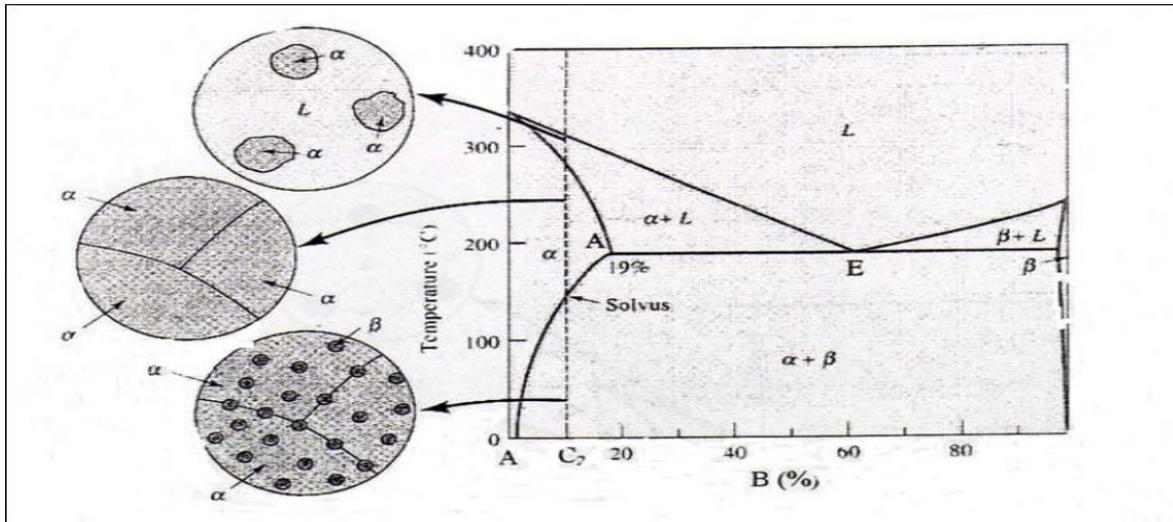


Figure III.7 : solidification de l'alliage A-C2%B

### III.3.3. Quelques alliages d'aluminium-silicium :

#### III .3.3.1. Al7SiMg et ses variantes (Al7Si0, 3Mg et Al7Si0, 6Mg)

Qui peuvent être traitées thermiquement, présentent de bonnes propriétés pour la coulée en sable et en coquille, une bonne aptitude à donner des pièces étanches au soudage, une bonne stabilité dimensionnelle et résistance à la corrosion. Ces alliages occupent, dans la plupart des pays industrialisés, une position prédominante parmi les alliages moulés dans les secteurs suivants : l'automobile (roues, bras de suspension, traverses, pivots, étriers, corps de vérins...etc.), et l'armement. [65]

#### III .3.3.2. Al10SiMg

Pouvant également être coulée sous pression, et utilisé pour des pièces mécaniques variées. Il tend cependant à être supplanté par les alliages AlSi7Mg.

#### III.3.3.3. Al Si 13 (ALPAX)

Il est le plus ancien, du fait de son excellente aptitude au moulage et de sa bonne résistance à la corrosion, il est encore très utilisé pour la fabrication des appareils ménagers, bâtiments et mécanique.

### **III.4. Effet des éléments allient :**

Il est possible de modifier les différentes propriétés d'un métal en lui ajoutant des éléments d'alliage. Les nouveaux alliages ainsi formés sont soit plus résistants, plus ductiles, plus durs, etc. selon le choix. Toutefois, pour obtenir précisément ce que l'on veut, il faut savoir que l'élément fait quel effet. Dans ce but, certaines sociétés comme l'ASM (American Society of Métal) ou le CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie) publient des volumes à cet effet. [66]

#### **III.4.1. Effet du Magnésium :**

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

#### **III.4.2. Effet du cuivre :**

Cet élément forme avec l'aluminium le  $CuAl_2$  servant au durcissement des alliages. De plus, il contribue de plus à l'augmentation de la résistance mécanique, à la réduction durerait lors de la coulée et à l'amélioration de l'usinabilité. Toutefois, il diminue généralement la résistance à la corrosion. Les alliages contenant de 4 à 6 % de cuivre sont ceux qui répondent le plus fortement aux traitements thermiques.

#### **III.4.3. Effet du Fer :**

Le fer accroît la résistance au craquage à chaud et réduit la tendance de l'alliage à se coller ou à se souder aux parois du moule. Or, l'augmentation de la proportion de fer est normalement accompagnée d'une réduction de la ductilité. Le fer réagit pour former plusieurs phases insolubles dans les alliages d'aluminium, les plus communes étant le  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$  et  $\alpha AlFeSi$ . Ces phases insolubles ou intermétalliques sont responsables de l'amélioration de la résistance, spécialement à température élevée, même si elles donnent des structures grossières et fragiles. Comme le pourcentage de phases insolubles croît avec l'augmentation

## *Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si*

de la proportion de fer, les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide sont affectées. On doit alors tenir compte de ce facteur lors de la procédure de mise en forme. Le fer participe également à la formation de plaquettes ségréguées avec le manganèse, le chrome et d'autres éléments.

### **III.4.4. Effet du Manganèse :**

Il sert à augmenter la résistance mécanique à haute température des alliages de fonderie (suite à la formation d'une structure fibreuse) et à réduire le retrait lors de la solidification. Mais, comme ces alliages ne possèdent pas d'opération de durcissement mécanique, le manganèse n'offre pas d'effets bénéfiques pour ces derniers. Certains le considèrent comme une impureté à cause de sa faible solubilité. Cependant, un pourcentage élevé en volume de MnAl6 dans les alliages contenant plus de 0,5 % de manganèse peut influencer favorablement l'équilibre interne de la pièce après la mise en forme. [66]

### **III.5. Alliages apparentés au système Al-Si-Cu-Mg :**

L'analyse exhaustive des différents systèmes qui s'apparentent au système Al-Si-Cu-Mg permet d'identifier les phases susceptibles de réagir aux traitements thermiques.

Beaucoup d'informations recueillies par différents chercheurs depuis plusieurs années Donnent la possibilité de caractériser le comportement de ces différentes phases lorsqu'elles sont soumises à des traitements thermiques de mise en solution ou de vieillissement par exemple. Donc, avec l'aide de systèmes binaires et ternaires, il est plus facile de comprendre ce qui se passe exactement dans le système Al-Si-Cu-Mg. [64]

#### **III.5.1.Système binaire Al-Si :**

Le silicium est l'élément d'alliage le plus important dans les alliages d'aluminium. C'est d'ailleurs cet élément qui permet de différencier les aluminiums de fonderie de ceux de corroyage. La présence du silicium réduit le retrait des pièces en plus d'améliorer la fluidité des alliages, facilitant ainsi le moulage. Toutefois, il rend les alliages plus difficiles à usiner. Un autre avantage indéniable du silicium c'est que pour les alliages hypoeutectiques on peut modifier la répartition (homogénéisation) des particules de ce dernier en le combinant au sodium ou au strontium.

### Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si

Le système Al-Si forme un alliage eutectique simple avec une solubilité limitée des deux éléments à l'état solide. Le point eutectique se situe à une concentration en poids de 11,7 % de silicium et à une température de 577 °C. Il n'y a aucune formation de phase secondaire.

#### III.5.2. Système binaire Al-Mg :

Le magnésium possède une solubilité élevée de 17,4 % en poids à 450 °C dans L'aluminium solide. Pour qu'il ait un effet bénéfique au niveau du durcissement structural, il doit être présent à une concentration supérieure à 7 % en poids. La présence du magnésium augmente la résistance à la corrosion, donne un bon fini de surface, facilite le travail à froid à cause de la ductilité qu'il confère aux alliages et accroît les propriétés des soudures d'alliages d'aluminium. La figure III.8 représente le système binaire Al-Mg.

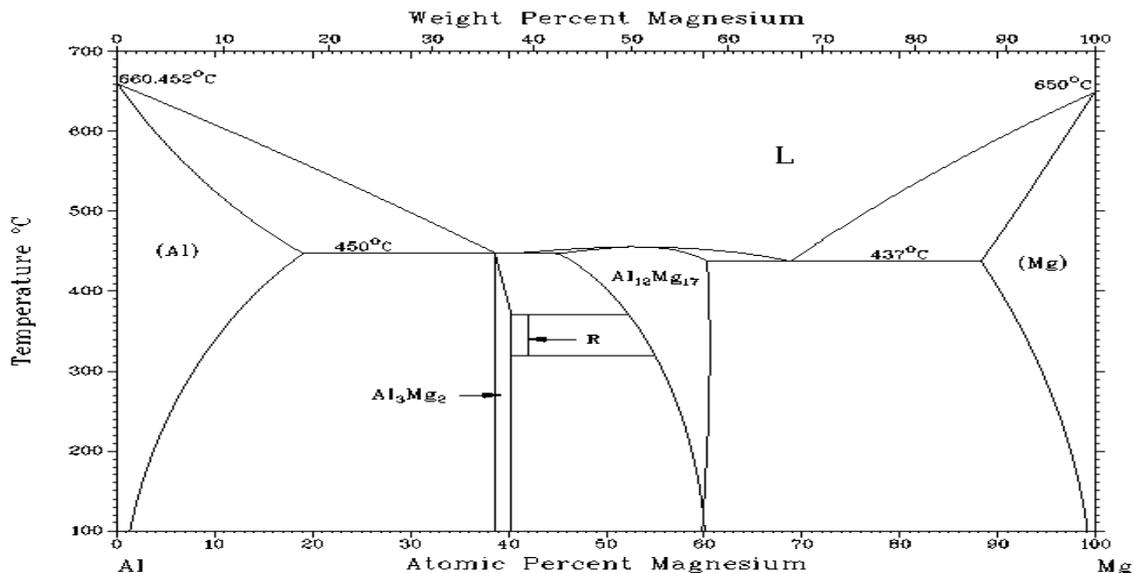


Figure III.8 : le système binaire Al-Mg

#### III.5.3. Système binaire Al-Cu :

Le fait que le cuivre contribue au durcissement structural des alliages lui vaut une Place de choix parmi les éléments d'addition complémentaires. Le constituant responsable de cette propriété est l'eutectique Al-CuAl<sub>2</sub>. On le retrouve sur le diagramme d'équilibre de la figure III.9 à une température de 548 °C, en compagnie du liquide eutectique qui est constitué

### Chapitre III Solidification dans les alliages Al Mg Si

d'aluminium et de 32,3 % en poids Cu, en équilibre avec une solution solide d'aluminium contenant 5,7 % poids Cu.

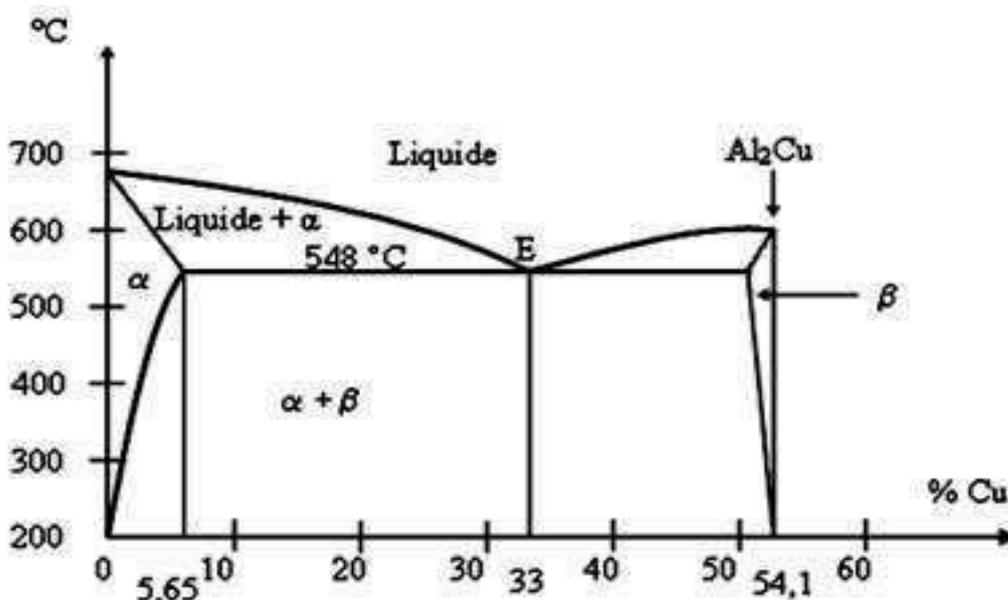


Figure III.9 : le système binaire Al-Cu

#### III .5.4.Système ternaire Al-Si-Mg :

Le système ternaire Aluminium-Silicium-Magnésium est à la base de plusieurs alliages sensibles aux traitements thermiques. Le diagramme de phase obtenu à l'équilibre peut être relativement simplifié si on le considère comme étant binaire c'est-à-dire : aluminium et  $Mg_2Si$  pour une proportion de magnésium - silicium qui voisine 1,73 pour 1 (toujours en pourcentage poids).

#### III.5.5.Système ternaire Al-Cu-Si :

Les alliages d'aluminium-cuivre-silicium sont relativement populaires dans les alliages Commerciaux. La composition chimique de ces alliages fait en sorte qu'ils sont sensibles aux défauts et aux criques que l'on peut retrouver dans des pièces soudées ou moulées. La présence d'une phase eutectique minimum contribue au développement maximal de ces défauts. Les phases en équilibre avec l'aluminium sont le Si et le  $CuAl_2$ , bien connu. Il est à noter qu'il n'y a aucun composé ternaire pour cette famille d'alliages.

L'alliage eutectique (liquide) contient 26 % à 31 % poids de cuivre et 5 % à 6 % poids de silicium à 524 °C.

### **III.5.6. Système ternaire Al-Cu-Mg (Si) :**

Même si les alliages d'aluminium-cuivre-magnésium représentent un système ternaire, ces alliages commerciaux contiennent habituellement suffisamment de silicium pour les considérer comme un système quaternaire. Néanmoins, les principales réactions de précipitation qui peuvent être utilisées afin d'obtenir un durcissement structural proviennent du système ternaire Al-Cu-Mg. La proportion appréciable de cuivre que l'on retrouve dans cette famille d'alliages explique le fait que les réactions de phases qui se produisent sont celles entre une solution solide d'aluminium et les phases intermétalliques CuAl et CuMgAl. Sur les liquides, on trouve deux points eutectiques ternaires. Un premier à 451 °C avec 2,7 % poids Cu, 32 % poids Mg et 65,3 % poids Al. Puis un deuxième à 507 °C avec 6 % poids Mg, 33,1 % poids Cu,  $G1Al_2$ , CuMgAl<sub>2</sub> et une solution solide d'aluminium qui contient 4,28 % poids Cu et 1,35 % poids Mg, se produit à une température de 510 °C.

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

### **IV .1.introduction**

Dans cette contribution nous nous sommes intéressés à présenter l'élaboration de deux types d'alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13 disponibles à la S.N.V.I de Rouiba Unité Fonderie Aluminium, livrés par Pechiney sous forme de lingots de dimensions normalisées. Leurs élaborations, dont la charge est composée respectivement de  $\approx (40 \div 50)$  % de lingots neufs et d'un mélange de jets de coulée  $\approx (50 \div 60)$  % de retour, nécessitent beaucoup de soins et de précautions à prendre car ces alliages s'oxydent rapidement à haute température et se contaminent facilement en atmosphère libre et au contact d'outils de manutention. Pour corriger la perte due au feu du magnésium et l'appauvrissement en manganèse et en silicium du retour, la fonderie dispose respectivement de trois types d'alliages - mères AlMg10, AlMn10 et AlSi22 livrés par la même société Française sous forme de lingots. [67]

### **IV .2.Matériaux utilisés**

Les matériaux utilisés sont fournis gracieusement par la S.N.V.I. Il s'agit des alliages à base d'aluminium contenant 10% et 13% de silicium en pourcentage massique, une quantité de magnésium inférieure à 1% et quelques traces d'impuretés. Ces alliages sont désignés par : AlSi10Mg et AlSi13 et donnent des résultats surs, reproductibles et conformes à la norme, à condition que : La composition chimique de l'alliage reste dans les tolérances prévues, l'emploi des flux soit observé conjointement aux règles générales de fusion et le traitement thermique éventuel soit effectué correctement.

### **IV.3.Compositions chimiques des alliages**

Les tableaux ci-dessous présentent les compositions chimiques des alliages considérés selon la norme NF A57-702 et selon l'analyse effective à la SNVI.

Les compositions ci-dessous correspondent aux tolérances de composition dans les pièces coulées en sable et en coquille. Les alliages entrant dans ces tolérances de composition, convenablement élaborés et éventuellement traités thermiquement, donnent des éprouvettes ayant au moins les caractéristiques mécaniques bien déterminées.

**Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie**  
**AlSi10Mg et AlSi13**

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	≤ 0,55	9÷10,5	≤ 0,1	≤ 0,1	0,17÷0,4	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,2	.....
% Selon SNVI	0,33	9,60	Trace	-	0,25	0,38	-	-	-	-	.....

**Tableau IV.1 :** Composition chimique de l'alliage **AlSi10Mg**. [67]

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	≤ 0,7	11 ÷ 13,5	≤ 0,1	≤ 0,15	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,15	≤ 0,2
% Selon SNVI	0,64	12	trace	-	0,08	0,31	-	-	-	-	-

**Tableau IV.2 :** Composition chimique de l'alliage **AlSi13**

#### **IV.4. Compositions chimiques des lingots livrés par l'aluminium français**

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

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	≤ 0,35	9÷10	≤ 0,05	≤ 0,05	0,22÷0,35	0,1÷0,2	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,03÷0,1	≤ 0,05

**Tableau IV .3 :** Composition des lingots **AlSi10Mg**, livrés par l'Aluminium Français.

**Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie**  
**AlSi10Mg et AlSi13**

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	0,4÷0,65	12,5÷13,5	≤0,05	≤0,1	≤0,05	≤0,1	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,1	≤0,1

**Tableau IV.4 :** Composition des lingots **AlSi13**, livrés par l'Aluminium Français.

### IV.5.Caractéristique

Les caractéristiques mécaniques minimales sur éprouvettes coulées à part suivant la norme *NF A57-702* et sur un alliage ayant subi obligatoirement un traitement de modification sont les suivantes :

Mode de coulee	Etats		$\sigma_r$ (Mpa)	$\sigma_e$ (Mpa)	A%.	Dureté (HB)
	Nouveaux	Anciens				
Sable	SF	Y20	150	90	3	55
	ST <sub>6</sub>	Y23	230	180	1	75
Coquille	KF	Y30	170	110	4	65
	KT <sub>6</sub>	Y33	250	180	1,5	80

**Tableau IV.5 :** Caractéristiques mécaniques minimales de l'alliage **AlSi10Mg**.

Mode de coulée	Etats		$\sigma_r$ (Mpa)	$\sigma_e$ (Mpa)	A %	Dureté (HB)
	Nouveaux	Anciens				
Sable	SF	Y20	165	80	4	50
Coquille	KF	Y30	180	80	5	50

**Tableau IV.6 :** Caractéristiques mécaniques minimales de l'alliage **AlSi13**

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

### **IV6.Matériel utilisé**

#### **IV.6.1.Le four de fusion :**

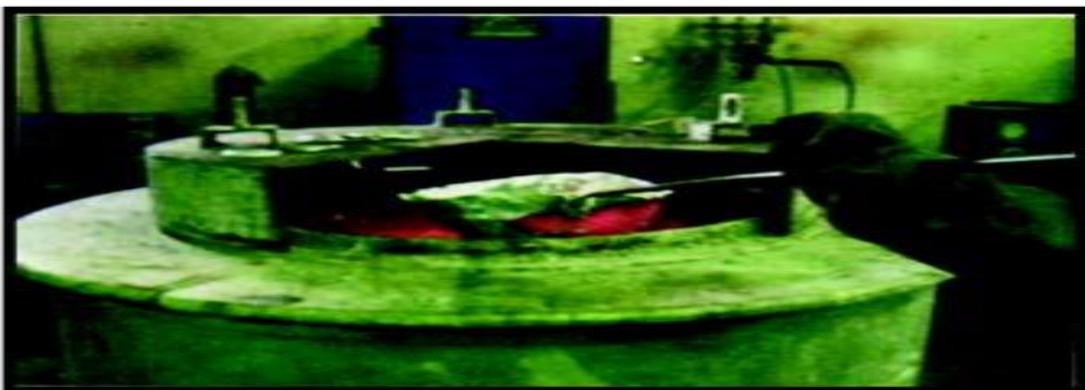
Est constitué d'un couvercle principal et d'une virole métallique entourée de deux couches, la première en béton isolant, la deuxième en béton réfractaire, d'épaisseurs de 150mm chacune. A l'intérieur de la virole, trois briques réfractaires formant le formage sont disposées sur la sole du four sur lesquelles repose un creuset en graphite de charge 350kg. Le four est chauffé par deux brûleurs à gaz de production et s'articule de l'avant (coulée) vers l'arrière (chargement) avec ses différents accessoires.



**Figure IV.1 : four de fusion**

#### **IV .6.2.Le four de maintien :**

Dont le creuset est de capacité de 150kg construit de la même façon que le four de fusion avec ses différentes louches.

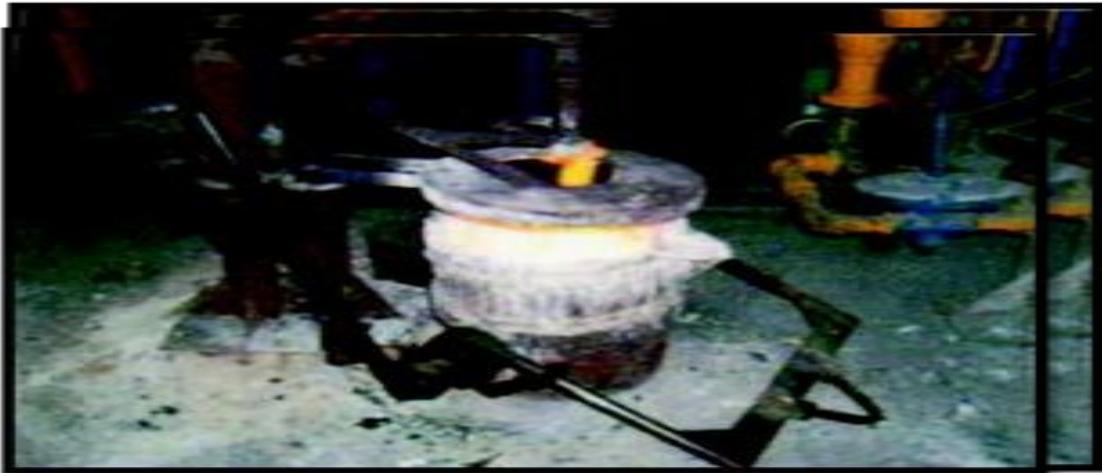


**Figure IV.2 : four de maintien**

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

### **IV .6.3.La poche de coulée :**

En graphite de 50 kg est manipulée à l'aide d'un pont roulant. La poche est préalablement maintenue chauffée continuellement toute la journée à l'aide d'un brûleur à gaz qu'on remplit directement à partir du four de fusion en position avant, et c'est à partir de cette poche, montée sur un support pivotant et généralement munie d'un volant de manœuvre, que l'on coule les moules préparés ou que l'on remplit le four de maintien.



**Figure IV.3 :** poche de coulée.

Les fours de fusion et de maintien ainsi que la poche de coulée doivent être nettoyés périodiquement à l'aide de matériel approprié.

**Le pyromètre de Type K :** c'est un thermocouple standard qui permet de mesurer dans une gamme de températures comprise entre (270 à 1372) °C de composition : Chromel, alliage de (NiCr) et d'Alumel, alliage de (NiAl5Si).

### **IV .6.4.La coulée :**

La fusion du métal se fait dans un four à gaz de production, se basculant de l'avant vers l'arrière, comportant un creuset en graphite de capacité 350Kg dont la charge est composée approximativement :

≈ (40 à 50) %, (140 à 175) Kg de lingots neufs de dimensions (720×100×80) mm<sup>3</sup> livrés par Pechiney et d'un mélange de jets de coulée ≈ (50 à 60) %, (175 à 210) Kg de retour (masselottes, trous et canaux de coulée, pièces défectueuses et rebutées...etc.).

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

Une fois la masse en fusion totale est devenue liquide à environ 700°C, on procède au premier décrassage et écrémage à l'aide d'une louche appropriée et on prélève une première éprouvette de spectrométrie pour analyse chimique immédiate. Des résultats de cette analyse, on effectue la première correction s'il y a lieu. La masse liquide subit ensuite un traitement de dégazage suivi d'un deuxième décrassage et de couverture dans le four. Ensuite le métal est coulé dans une poche de préchauffage où l'on procède aux opérations d'affinages et de décrassages. On réalise une seconde éprouvette pour vérifier l'effet de correction. Si les résultats d'analyse de cette seconde éprouvette sont conformes, les pièces peuvent être coulées respectivement dans la coquille métallique unique ou des moules en sable préparés à cet effet, ainsi les éprouvettes de référence sont appelées brut de coulée notées : F.

Pour chercher à augmenter plus les caractéristiques de résistances de l'état F et obtenir essentiellement de grandes contraintes d'élasticité, de grands modules de rigidité avec de faibles déformations, le matériau de désignation numérique 43000 est soumis aux traitements spécifiques T6.

La correction de la composition chimique de la masse liquide se fait à l'aide d'alliages - mères sous forme de lingots neufs en AlSi22, AlMg10 et AlMn10 livrés par Pechiney. Pour corriger la perte au feu en Magnésium due à la fusion, on ajoute  $\approx 2\%$  (6kg) de AlMg10 en lingots neufs de dimensions  $(600 \times 100 \times 40) \text{ mm}^3$ , pour réajuster le titre en Manganèse ainsi que celui en Silicium dû à l'appauvrissement des jets de coulée, on introduit respectivement  $\approx 1\%$  (3kg) de Al10Mn lingots neufs de dimensions  $(600 \times 100 \times 40) \text{ mm}^3$  et quelque fois d'un pourcentage de AlSi22 lingots neufs de dimensions  $(740 \times 100 \times 80) \text{ mm}^3$  à déterminer après analyse chimique de la charge pour l'obtention d'une concentration exacte en AlSi10Mg conforme à la norme NF A57-702. [67]

### **IV .6.5.Dégazage :**

La masse liquide subit un traitement de dégazage dans le four. On utilise un dégazeur portant un numéro défini (N° 701), qui se présente sous forme des pastilles et qui réagit à une température de 720°C. La dose d'emploi est de 0.30% de la charge totale. Le dégazage doit être assuré sous vide. Il est à noter qu'on procède à l'opération du dégazage afin d'éviter la formation de porosités. On procède ensuite, au contrôle de l'efficacité de cette opération de dégazage à l'aide d'un microscope.

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*



**Figure IV.4 :** Dégazeur N° 701

### **IV.6.6.L'affinage du grain :**

L'opération d'affinage du grain est indispensable pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques et se fait dans une poche à une température de 750°C. On utilise un produit appelé COVERAL 32D, qui consiste en des pastilles à base de titane et qui se présente sous forme d'une poudre bleue. Cette opération a pour but de :

- ✓ Modifier la texture et l'orientation des cristaux de silicium.
- ✓ Affiner la structure.

### **IV.6.7.Mise au titre :**

Pour s'assurer de l'exactitude de la composition de nos alliages, on procède à des prélèvements de médailles du bain liquide, afin d'effectuer une analyse chimique. Cette analyse a pour but d'éviter deux situations possibles :

- Un élément étant à teneur trop faible: par exemple, dans le cas du magnésium, en effectue une correction au métal fondu au moyen d'alliages mères de type AlMg10.
- Un élément se trouvant en excès: dans ce cas, on doit dans la mesure du possible, ajouter du métal neuf contenant en principe moins de cet élément, au métal fondu pour le diluer.

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie*

### *AlSi10Mg et AlSi13*

#### **IV .6.8.Moulage :**

##### **IV.6.8.1.En sable :**

Deux types de sable peuvent être utilisés :

##### **a).Moulage au sable silico – argileux, sable noir**

Ce moulage est composé de deux demies empreintes laissées par le modèle dans le sable tassé, ce sable est principalement un mélange composé de silice, d'argile  $\approx 10\%$  et d'eau  $\approx 4\%$ , il est directement réutilisable après avoir été convenablement humidifié, aéré et tamisé. L'argile humidifiée sert de liant entre les grains de silice de granulométrie bien déterminée. Il est de couleur brun - jaune lorsqu'il est neuf, mais il se colore très rapidement en noir au contact du métal chaud, d'où l'appellation de sable noir. Pour faire un moule, on utilise généralement deux plaques modèles et deux châssis sur la plaque modèle de façon que celle-ci laisse son empreinte dans le sable, on ferme ensuite le moule par l'assemblage des deux châssis, généralement en acier, qui comportent des douilles de centrage dans lesquelles on introduit des broches afin d'assurer le positionnement des deux demi moules et on remplit avec du métal en fusion pour obtenir l'éprouvette par gravitation



**Figure IV.5 :** moule en sable    empreinte

Partie supérieur    Partie inferieur

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

### **b).Moulage au sable à prise chimique**

Ce sable à prise chimique est constitué principalement d'un gaz spécial injecté au sable noir. La technique du sable à prise chimique permet plus de précision que le sable noir et donne un meilleur aspect de peau de pièce. On peut obtenir, avec ce procédé, des toiles beaucoup plus fines. En général le sable à prise chimique est destiné à la réalisation des noyaux.



**Figure IV.6 :** Sable à prise chimique.



**Figure IV.7 :** différentes structure de noyau

#### **IV.6.8.2.En coquille :**

Dans ce mode de moulage, le moule se compose de deux chapes en acier (5% de chrome), qui a pour rôle de maintenir les empreintes .Ces chapes, séparées par un plan de joint, doivent être éventuellement préparées et chauffées à une température (200 à 300)°C à l'aide d'un brûleur à gaz pour permettre à la masse liquide en fusion de bien occuper complètement tout le volume de l'empreinte afin d'éviter tous les défauts volumiques de criquabilité et de

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

retassures. Pour augmenter la fluidité et la coulabilité du métal liquide à l'intérieur des empreintes qui sont traités thermiquement et peuvent faire l'objet de traitements de surface (carbo- nitruration et traitement de surface), on doit appliquer sur les deux demies empreintes, deux couches avec l'AQUAGEL87 et le DYCOTE 34 qui servent de protection, d'isolant et de conducteur. Les AQUAGELS et les DYCOTES sont des pâtes de couleurs rouge et blanche. Leur préparation nécessite un mélange de 1Kg de cette poudre dans 8 litres d'eau qu'on projette à l'aide d'un pistolet à air comprimé. Les DYCOTES étant plus fins ce qui donne un meilleur plan et une bonne santé de pièce et après tout ça on remplit avec du métal en fusion pour obtenir l'éprouvette.



**Figure IV.8 :** Les AQUAGELS et les DYCOTES

Dans le cas du moulage en coquille par gravité, pour de petites séries, les coquilles sont munies de poignées étudiées pour dissiper la chaleur, manipulées à l'aide des gants spéciaux et manœuvrées manuellement.



**Figure IV.9 :** moulage en coquille par gravité.

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*

Après refroidissement, on retire les éprouvettes des moules en sable et en coquille, ainsi le métal solidifié est dit brut de coulée noté F. Les éprouvettes brutes de coulée sont ensuite acheminées vers le poste de parachèvement pour dessablage à l'aide d'une grenailleuse, sciage, meulage, ébarbage, finition et contrôle des côtes.



**Figure. IV.10 :** Éprouvette en coquille

Eprouvette en sable

### **IV.6.9.L'ébarbage :**

L'ébarbage est l'opération qui consiste à séparer des différents appendices de coulée, ainsi qu'à supprimer les traces et les bavures éventuelles qui peuvent survenir, notamment au niveau de plan de joint ou de liaison entre le moule et le noyau.

L'ébarbeur doit connaître le plan de la pièce finie pour éliminer les parties fines qui font partie intégrante de la pièce.

Après avoir retiré les éprouvettes coulées en sable de leur moule, on procède à la découpe du chenal de coulée et des masselottes. On utilise pour cela une scie mécanique. [67]

## *Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13*



**Figure IV.11:** Scie mécanique vertical.

### **IV .7.Procédure expérimentale de chargement du four :**

La charge composée de l'alliage solide doit être préchauffé avant de l'introduire progressivement dans le four de la manière suivante :

- A 500°C, on procède au chargement de (25 ÷ 30) % (87,5 ÷ 105) kg du mélange de jets de coulée : retour de fonderie composé de préférence de la petite pièce puis on étale la première couche de couverture,
- A 680°C, on introduit (20 ÷ 25) % (70 ÷ 87,5) kg de lingots neufs,
- A 690°C, on ajoute les (20 ÷ 25) % (70 ÷ 87,5) kg de lingots neufs,
- A 710°C, on complète par (25 ÷ 30) % (87,5 ÷ 105) kg de retour suivi d'un premier écrémage,
- A 720°C, on introduit (1kg) de DEGAZER **covéral 701 SM** suivi d'un deuxième écrémage,
- A 740°C, on étale (4Kg) de poudre **covéral 55** pour protection superficielle du bain
- A 760°C, on remplit l'enceinte de préchauffe suivi d'un écrémage,
- A (730 ÷ 750) °C. on procède aux opérations d'affinage avec 0,25Kg de **covéral 36 A**, ensuite on dégrasse. Puis attendre 10 à 15 secondes pour verser 0,25Kg de **poudre B** suivi d'un écrémage

## ***Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie AlSi10Mg et AlSi13***

- **entre (680 ÷ 750) °C.** coulées dans des moules en sable et en coquille avec *filtres en toile de verre* insérés par précaution dans les moules au niveau des canaux de coulée.

### **IV.8.Recommandation**

- ✓ Par mesures de précautions, il est impérativement obligé de conserver les alliages d'élaboration de désignations AlSi10Mg et AlSi13, les alliages – mères de correction AlSi22, AlMg10 et AlMn10 livrés par Pechiney sous forme de lingots de dimensions normalisées, ainsi que le retour de fonderie composé d'appendices de coulée, de masselottes, d'évents etc. dans un endroit chauffé et couvert pour éviter toute humidité néfaste lors de la coulée.
- ✓ Les fours de fusion et de maintien ainsi que la poche de coulée doivent être calcinés et nettoyés périodiquement à chaque fin de journée à l'aide de matériel approprié.
- ✓ Chaque charge respective introduite progressivement dans le four de fusion doit être préchauffée sur le carreau de son couvercle principal pour éviter toute projection du métal.
- ✓ L'affinage dans le four de maintien doit être renouvelé à chaque heure car il perd son effet.
- ✓ L'alliage en fusion ne doit pas séjourner plus de 24h car il perd ses qualités.

### **IV.9. Règles générales de fusion**

- 01.** Contrôler la température avec un pyromètre régulièrement étalonné. Eviter de dépasser les valeurs prescrites.
- 02.** Eviter toute humidité de quelque origine : coke, creusets, réfractaires, outils, métal, flux, etc.
- 03.** Régler convenablement les brûleurs.
- 04.** Eviter l'enrichissement en fer par contact avec des outils non protégés.

***Chapitre IV Elaboration industriel des alliages d'aluminium de fonderie  
AlSi10Mg et AlSi13***

- 05.** Ne pas utiliser de creusets en fonte. Poteyer soigneusement les outils de fusion et de coulée.
- 06.** Contrôler périodiquement la composition chimique de la masse liquide en fusion.
- 07.** Procéder aux opérations de dégazages, de couvertures, d'affinages, d'écémages et de décrassages.
- 08.** Etablir la correction de la mass liquide en fusion à l'aide de lingots – mères.
- 09.** Pour avoir une bonne santé de la pièce, la masse liquide, les moules doivent être bien préparés et la température de coulée doit être comprise entre  $(680 \div 750)$  °C.
- 10.** Avant de procéder à tout chargement du four, il faut impérativement nettoyer et calciner les creusets en graphite convenablement

## Conclusion générale

---

Le thème que j'ai étudié m'a été proposé par le laboratoire de l'atelier de fonderie d'aluminium de l'entreprise SNVI Rouiba, lieu d'affectation prévu pour mon stage en milieu professionnel. Ce stage n'a duré qu'une semaine en raison de la pandémie du COVID-19. Dans ce qui suit nous présentons des conclusions essentiellement bibliographique sur l'aluminium et ses alliages.

Ce travail m'a permis de consolider mes connaissances des supports théoriques sur l'aluminium et ses alliages acquises durant ma formation de licence et master.

- L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier inoxydable.
- L'aluminium fournit une excellente prise électrique, et est utilisé de plus en plus pour les lignes à haute tension parce qu'un poids inférieur à celui du cuivre, et aussi il offre un fort pouvoir caloporteur comme l'utilisation dans des dispositifs de refroidissement.
- L'aluminium et ses alliages ont généralement une bonne tenue à la corrosion (atmosphérique, en milieu marin). L'aluminium est couramment utilisé par les architectes, ainsi que dans les bâtiments publics.
- Les traitements de surfaces sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels : La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante. La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûre ou le noircissement.. La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire. Par contre, ils sont sensibles à la corrosion galvanique et des précautions sont à prendre en particulier avec le fer.
- L'aluminium pur dans l'état recuit a une faible propriété mécanique mais peuvent être améliorés ces par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques, selon les cas.
- Dans l'état d'équilibre les alliages d'aluminium forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques telles que  $Mg_2Si$  (phase  $\beta$ ).
- Les caractéristiques mécaniques maximales des alliages à durcissement structurales sont obtenues par un traitement en trois étapes : La mise en solution, un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable et vieillissement à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

Dans le cas des caractéristiques mécaniques des alliages sans durcissement structural, différents mécanismes de durcissement interviennent pour moduler les propriétés mécaniques tels que le durcissement par écrouissage, le durcissement par addition en solution, le durcissement par l'effet de phase dispersée.

Dans ce travail, j'ai examiné également l'élaboration industrielle de deux types d'alliages d'aluminium de fonderie  $AlSi10Mg$  et  $AlSi13$  disponibles à la S.N.V.I de Rouiba. livrés par

## Conclusion générale

---

Pechiney sous forme de lingots de dimensions normalisées. Ce qui nous a permis de prendre connaissance des différentes recommandations importantes lors de la production de alliages d'aluminium .

## *Références*

### **Bibliographie**

- [1] Gérard Hartmann, L'aluminium historique  
<http://www.hydroretro.net/etudegh/aluminiumhistorique.Pdf>
- [2] A. Hadouche. Mémoire de mastère. Université de Beskra (2014)
- [3] Elena DIN-STIRBU, thèse de doctorat Université de Pitesti Roumanie.  
(2005)
- [4] J.P Baïllon, J.M.Dorlot, troisième édition, Montréal. Ecole Polytechnique de Montréal,  
p480(2000)
- [5] C.Vargel, corrosion de l'aluminium, paris p501 (1999)
- [6] J.E. Hatch, Metals Park, p319,(1984).
- [7] W.S.Miller, L.Zhuang, Materials science , A280, p 37-49 (2000).
- [8] Though. G. Thompson, p192-201(1997)
- [9] W. Kurz, J. P. Mercier, G. Zambelli, 2eme édition, Presse Polytechnique et universitaires  
Romandes. Suisse p191-203 (1995).
- [10] R.W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, Tome III, North-  
Holland.p2167, 2172(1996).
- [11] C. Chaussin, G. Hilly, Tome II, 2eme édition, Dunod Paris p203-212  
(1978).
- [12] J. Barralis, G. Maeder, Communications actives 5eme édition Paris p128-  
134 (1975).
- [13] M. Nicolas, Thèse de doctorat, Laboratoire de Thermodynamique et de  
Physico-Chimie (2002).
- [14] Y. Ohmori, L. C. Doan, Y. Matsuda, S. Kobayashi, K. Naki, Mater. Trans,  
42(12) p2476-2583,(2001).
- [15] R. Develay, Techniques de l'ingénieur, M 1290 (1991).
- [16] J. Zhang, Z. Fan, Y. Q. Wang and B. L. Zhou, materials sciences and technology 17 p  
494-497(2001).
- [17] ASM handbook; Non ferrous alloys and special purpose materials, 2 (1992).
- [18] S. Vyazovkin, D. Dollimore, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996)

## *Références*

- [19] Roger Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium .Techniques de l'ingénieur M 1290.
- [20] S Payan, Thèse science chimique Bordeaux, Université de Bordeaux,p203 (2001)
- [21] F. Serradj, Mémoire de magister, Université de Constantine, (2005)
- [22] A. AZIZI, Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, (2007)
- [23] S. P. Ringer, K. Hono., Acta Mater, vol.44, p. 1883, (1996).
- [24] S. Mecheri, Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, (2007).
- [25] R. Kaibyskov, F. Musin, , Metals. Trans, vol. 43-10, p. 2392, (2002).
- [26] M. J. Starink, A. Cerezo, J. L. Yan, , Phil Mater, vol. 39, p. 243, (2006).
- [27] S. P. Ringer, S. K. Caralrer, Scripta Mater, vol. 39, p. 1559, (1998).
- [28] E. Hornbgen, Nucleation; M. Becker,Inc New-york p309-378 , (1969).
- [29] J. Mercier, Introduction à la science des matériaux, Lausanne, (2002).
- [30] S. Esmaeili, D. J. Lloyd et W. J. Poole, Acta Mater. Vol 51 p3467–3481(2003)
- [31] N. Maruyama, R. Uemori, Scripta Mater, Vol. 36(1) p 89–93.(1997)
- [32] Y. Aouabdia, A. Boubertakh, Mater. Lett., Vol.64 p353–356 (2010).
- [33] A. Boushaba, Mémoire de Magistère, Université de Constantine (2005).
- [34] C. Cayron, L. Sagalowicz, Phil. Magazine ,79(11) p2833-2851(1999).
- [35] C. Cayron, Thèse doctorat, Ecole Polytech. Fed. Lausanne, (2000).
- [36] L.Lodgaard, N. Ryum, Mater .Sci.Tech. 16 p 599-604. (2000).
- [37] D. Vaumousse, A. Cerezo, Mater. Sci. Forum., 396-402, 693-998(2002).
- [38] L. Sagalowicz, G. Lapasset, G. Hug, Phil. Mag. Lett, 74(2) p57-66(1996).
- [39] F.D. GEUSER. Thèse de doctorat, Université de ROUEN (2005).
- [40] M. H. Jacobs, Precipitation hardening, TALAT lecture 1204 (1999).

## *Références*

- [41] B. Dubost et P. Sainfort, Techniques de l'Ingénieur M240 -M242 (1991)
- [42] Sagalowicz, Conference on Aluminum Alloys, p 636–643 (1994).
- [43] D. J. Chakrabarti, D. E. Laughlin, Mater. Sci, Vol.49p 389–410 (2004).
- [44] W. F. Miao et D. E. Laughlin, Scripta Mater, Vol. 40(7) p 873–878(1999)
- [45] A. K. Gupta, D. J. Lloyd , Mater. Sci. Eng., A, 301p140–146, (2001)
- [46] A. Bigot, Thèse de doctorat, Université de Rouen (1998).
- [47] M. Murayama et K. Hono, Acta Mater., Vol.47 p1537–1548(1999).
- [48] D. J. Chakrabarti, Y. Peng , Mater.Sci , Vols. 396-402 857(2002)
- [49] K. Matsuda, Y. Uetani, Mater. Sci. Trans, 32A p 1293-1299(2001).
- [50] S.J. ANDERSEN, H.W. ZANDBERGEN, ActaMater,46 p3283–3298, (1998).
- [51] A. Fattah, N. Afify, High Temp - High Press, 31 613- 625(1999).
- [52] S. J. Andersen, H.W. Zandbergen,Matre,A 390 p 127-138(2005).
- [53] P. M. Derlet, S. J. Andersen, C. D. Marioara, Phys. Condensed Matter, 4011-4024,14(2002).
- [54] X. Fang, M. Song, K. Li and Y. Du, Journal of Mining and Metallurgy. 46 (2) p 171 -180 B (2010).
- [55] C. Cayron, P. A. Buffat, Acta Mater, 48 p 2639-2653(2000).
- [56] Y. Aouabdia, Thèse de doctorat , Université Mentouri Constantine, (2010).
- [57] T. EPICIER, V. MASS ARDIER Inst. Phys. Conf. Ser,161.6,(1999).
- [58] W. F. Miao, D. E. Laughlin, J. Mater. Sci. Lett., 19 p 201-203. (2000).
- [59] S. Esmaeli, L. M. Cheng, Mater. Sci. Eng. A, 461-465 (2001).
- [60] V. Massardier et T. Epicier, Mater. Sci, p 396-402, 851–856 (2002).
- [61] J.LIGNON, R.MALLEBUAU Etude des matériaux. Les matériaux non ferreux librairie Delagrave.

## *Références*

- [62] JEAN BARRALISS ET GERARD MEADER Précis- métallurgie : élaboration, structure, propriété, normalisation, AFNOR NATHAN, Paris 2001.
- [63] J.E HATCH. Aluminum properties and physical Metallurgy, Ohio:metals Park, 319p, and 1984.
- [64] Melle MECHERI Sara. Etude des réactions des transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles, thèse de magistère 2007, UNIVERSITE MENTOURI Constantine.
- [65] A. HAKEM. Microstructure et propriétés mécanique de l'alliage hypo eutectique AlSi7Mg. UMMTO 2005
- [66] DENIS BEAULIEU. Les caractéristiques de l'aluminium structural, les presses de l'aluminium Laval 2002.
- [67] Fiche technique d'alliage de fonderie (fonderie d'aluminium) de SONACOM.