



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
GENIE MECANIQUE
Spécialité : INGENIERIE DES MATERIAUX
ET DES SURFACE

Titre
LES ALLIAGES D'ALUMINIUM
DE FONDERIE
Al-Si

Proposé et encadré par :

● Dr : NEMRI YCINE

Réalisé par :

● ARIDJ REDHOUANE

● BRAHIMI MOHAMED

Année universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

En premier je remercie dieu pour m'avoir donné la patience et le courage durant ces années de mémoire .Dieu merci.

Je tiens a remercié mon promoteur Dr Y.Nemri d'avoir bien voulu me proposer le sujet et ensuite encadre mon travail en m'apportant l'orientation et l'aide nécessaire.

Je remercie les enseignant de département Génie Mécaniques en particulier ceux de la spécialité Ingénierie des Matériaux et des Surfaces.

Je n'oublie pas de remercie ma famille, mes amis et tous mes collègues de université Saad Dahleb en général et mes collègues de la promotion IMS 2020 en particulier et je remercie tous ceux qui m'ont soutenu moralement.

RESUME

Les alliages de fonderie Al-Si sont largement utilisés dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique grâce à leurs excellentes propriétés de moulage, leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leurs propriétés mécaniques intéressantes.

Ces alliages ont l'avantage d'être recyclés à l'infini ce qui nous impose de prendre en considération la faisabilité par recyclage lors de l'élaboration de nouveaux alliages.

La microstructure des alliages d'aluminium de fonderie comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypo-eutectiques), des eutectiques plus ou moins complexes (binaires, ternaires) et des constituants intermétalliques.

On distingue 3 catégories d'alliages Al-Si. Les alliages hypo-eutectiques qui contiennent 5% à 10% Si, les alliages eutectiques avec 10% à 13% Si et les alliages hyper-eutectiques qui contiennent plus de 13% Si.

Les phases intermétalliques les plus présentes dans ces alliages sont α -Al₁₅(FeMnCr)₃Si₂, β -Al₅FeSi, β -Mg₂Si, θ -Al₂Cu et Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆.

Les traitements thermiques, en permettant l'obtention de meilleures propriétés pour les matériaux métalliques.

SOMMAIRE

- Remerciement
- Résumé
- Sommaire
- Table des figures
- Liste des tableaux
- Introduction général

I	ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	1
I.1	Introduction	1
I.2	Historique	2
I.3	Fiche D'Identité de L' Aluminium	3
I.4	Obtention de L' Aluminium	3
I.4.1	La Bauxite	3
I.4.2	L'Alumine	4
I.4.3	L'Aluminium	4
I.5	Production D' Aluminium	4
I.6	Principles Propriétés de l'Aluminium	4
I.6.1	Physico – Chimiques	4
I.6.2	Mécaniques	4
I.6.3	Propriétés de Mise en Forme	6
I.7	La Consommation D'Aluminium	6
I.8	Principales Utilisations de L' Aluminium	6
I.8.1	Transport	7
I.8.2	Emballage	7
I.8.3	Bâtiment	7
I.8.4	Electricité et Electronique	8
I.8.5	Les Objets de la Vie Quotidienne	8
I.9	Cycle de Vie Type pour un Produit en Aluminium	8
I.10	Alliages D'Aluminium	9
I.10.1	Les Alliages Corroyés	10
I.10.1.1	Désignation	10
I.10.2	Les Alliages Fonderie	11
I.10.2.1	Désignation (Norme Internationale NF EN 1780)	11

SOMMAIRE

I.10.2.2	Ancienne Désignation Afnor :	12
I.11	Mise en Oeuvre	13
I.12	Traitements Thermiques	13
I.13	Traitements de Surface	13
I.14	Les Avantages de L'Aluminium	14
I.14.1	Durable	14
I.14.2	Résistant à la Corrosion	14
I.14.3	Économique	14
I.14.4	Malléable	14
I.14.5	Masse Volumique	15
I.14.6	Conductivité.....	15
I.14.7	Recyclage.....	15
I.14.8	Le Processus de Recyclage	16
I.15	Inconvénients de L'Aluminium	16
II	LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE Al-Si.....	17
II.1	Les Alliages d'Aluminium de Fonderie.....	17
II.1.1	Introduction.....	17
II.1.2	Désignation	19
II.1.2.1	Désignation Européenne	19
II.1.2.2	Désignation Américaine	21
II.1.3	Alliages Normalisés	22
II.1.3.1	Alliages AlCu.....	22
II.1.3.2	Alliages AlSiMgTi.....	22
II.1.3.3	Alliages AlSi7Mg.....	23
II.1.3.4	Alliages AlSi10Mg.....	23
II.1.3.5	Alliages AlSi	24
II.1.3.6	Alliages AlSi5Cu.....	25
II.1.3.7	Alliages AlSi9Cu.....	25
II.1.3.8	Alliages AlSi(Cu).....	26
II.1.3.9	Alliages AlSiCuNiMg.....	26
II.1.3.10	Alliages AlMg	26
II.1.3.11	Alliages AlZnMg.....	26

SOMMAIRE

II.1.4	Alliages Non Normalisés	27
II.1.4.1	Alliages Autotremnants	27
II.1.4.2	Alliages à Très Haute Résistance Mécanique	27
II.1.4.3	Alliages Ductiles pour Moulage Sous Pression	27
II.1.4.4	Alliages Aluminium-Manganèse.....	28
II.1.5	Propriétés Générales	28
II.1.6	Les Propriétés Physiques et Mécaniques des Pièces Coulées en Aluminium.....	29
II.1.7	Processus de Moulage :	29
II.1.8	Solidification.....	29
II.1.9	Effets des Eléments D'Addition	30
II.1.9.1	Silicium Si	30
II.1.9.2	Cuivre Cu	31
II.1.9.3	Magnésium Mg	31
II.1.9.4	Fer Fe.....	31
II.1.9.5	Nickel Ni.....	31
II.1.9.6	Zinc Zn	31
II.1.9.7	Chrome Cr	31
II.1.9.8	Strontium Sr	32
II.1.9.9	Titane Ti.....	32
II.1.10	Effet du Traitement Thermique	32
II.1.11	Procédé de Fonderie	34
II.1.12	Les Techniques de Moulages les Plus Connus sont	35
II.1.12.1	Le Moulage en Sable	35
II.1.12.2	Moulage Naturel sur Modèle	35
II.1.13	Méthodes Modernes de Fonderie.....	36
II.1.13.1	Moulage par Centrifugation.....	36
II.1.14	Moulage par Enrobage ou à la Cire perdue :	36
II.1.14.1	Moulage en Coquille.....	36
II.1.14.2	Le Moulage en Coquille par Gravité	36
II.1.14.3	Moulage en Coquille sous Pression.....	37
II.2	Les Alliages d'Aluminium Fonderie Al Si (4xx.x).....	38

SOMMAIRE

II.2.1	Alliages Aluminium-Silicium.....	38
II.2.1.1	Le Silicium pour effet	39
II.2.2	Microstructure des Alliages d'Aluminium de Fonderie	39
II.2.3	Solidification.....	40
II.2.4	SDAS	41
II.2.5	L'Eutectique Al-Si.....	42
II.2.5.1	La Modification de L'Eutectique	45
II.2.6	Phases Intermétalliques	46
II.2.6.1	Phases Intermétalliques de Fer	46
II.2.6.2	La Phase α -Fe.....	47
II.2.6.3	La Phase β -Fe	49
III	TRAITEMENT THERMIQUE.....	52
III.1	Introduction	52
III.2	Les effets des Traitements Thermiques Pour une Pièce Dépendent	53
III.3	But	53
III.4	Désignation.....	54
III.5	Traitements de Durcissement Structural	56
III.6	Mise en Solution.....	56
III.7	Trempe	56
III.7.1	Milieus de Trempe	57
III.7.2	Effets de la Géométrie et Contraintes Résiduelles	58
III.8	Vieillissement	59
III.9	Phénomènes de Durcissement	60
III.10	Durcissement Structural (Zones Guinier-Preston)	60
III.11	Précipitation dans les Alliages à Durcissement Structural.....	60
III.12	Conclusion.....	62
	<ul style="list-style-type: none">• Conclusion général• Références	

TABLE DES FIGURES

Figure 1 poudre d'aluminium.....	2
Figure 2 Lingot.....	2
Figure 3 : Principaux stades et flux dans la fabrication de l'Aluminium.....	4
Figure 4 Repartition de la consolation d'Aluminium.....	6
Figure 5 les Alliage d'aluminium corroyes.....	10
Figure 6 désignation des alliages corroyes.....	10
Figure 7 pièces moulées.....	11
Figure 8 designation des alliages de fonderies.....	11
Figure 9 Ancienne désignation Afnor.....	12
Figure 10 les alliages d'aluminium fonderie.....	17
Figure 11 dendrite.....	18
Figure 12 : Moulage en sable.....	35
Figure 13 : Moulage naturel sur modèle.....	35
Figure 14 Moulage par gravité.....	36
Figure 15 Moulage sous pression.....	37
Figure 16 Diagramme Al – Si.....	39
Figure 17 – Micrographie optique illustrant la mesure des espacements des bras dendritiques secondaires (SDAS).....	41
Figure 18 Diagramme et Diagramme Al-Si.....	43
Figure 19 Micrographies optiques d'un alliage AlSi11.....	44
Figure 20 – Morphologie de la phase α -Fe intermétallique, avec différentes Morphologies.....	47
Figure 21 – Micrographies électroniques montrant.....	49
Figure 22 le cycle thermique.....	52
Figure 23 mise en solution.....	59

LISTE DES TABLEAUX



Tableau 1: désignation des alliages d'aluminium de fonderie.....20

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique, Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherches sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux l'aluminium et ses alliages se sont vite imposés comme la meilleure alternative grâce à leur nombreux avantages techniques et économiques.

On peut distinguer deux grandes familles d'alliages d'aluminium :

Les alliages corroyés et les alliages de fonderie, Dans le cas des alliages corroyés on procède à la mise en forme des produits finis par déformation à chaud des lingots ou des billettes selon un mode de coulée continue.

Pour les alliages de fonderie, les pièces coulées ont leur forme définitive après démoulage et ne subissent pas de déformation plastique ultérieure.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement aux alliages d'aluminium de fonderie et à l'évolution des propriétés des alliages d'aluminium de fonderie en fonction de divers paramètres microstructuraux comme la composition chimique, les traitements thermiques.



CHAPITRE I

ALUMINIUM ET SES ALLIAGES



I ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera de façon générale à l'aluminium, leur Propriétés, principales utilisations, les avantages, les inconvénients, et leur alliages.

On s'intéressera en particulier a la famille de ces alliages et leur désignation.

On verra aussi l'effet de traitement thermique et traitement de surface.

I.2 Historique

En 1825, Hans Christian Oersted obtient l'aluminium à l'état de corps simple, sous forme de poudre grise avec une très grande quantité d'impuretés, En 1827, Friedrich Wöhler obtient cette même poudre grise d'aluminium contenant cependant moins d'impuretés.



Figure 1 poudre d'aluminium

Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte-Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu, à l'état fondu, par un procédé mis en application en 1859.



Figure 2 lingot

L'aluminium a connu en un peu plus de cent ans une croissance prodigieuse, le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux, derrière le fer.

Le premier alliage d'aluminium fut inventé par Alfred Wilm, chimiste allemand, en 1908. Cet alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium fut exploité par les usines de Düren et fut baptisé l'aluminium de Düren, le «Duralumin ».

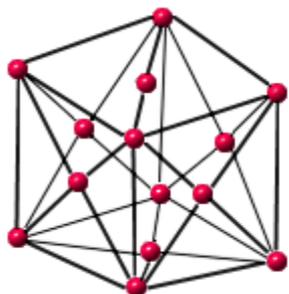
C'est un alliage à « durcissement structural » par traitement thermique, phénomène découvert par Conrad Claessen en 1905.

Le second alliage d'aluminium fut découvert en 1920 par le hongrois Aladar Pacz, émigré aux Etats-Unis ; c'est un alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium, baptisé l'« Alpax », alliage dévolu au moulage et autrefois appelé en France l'A-S13.

I.3 Fiche D'Identité de L'Aluminium

Symbole

Al



Numéro Atomique	13
Masse molaire atomique	27g.mol ⁻¹
Température de fusion	660°C
Point d'ébullition	2056°C
Densité	2,7
Résistivité électrique	2,7.10 ⁻⁸ ohm.m
Conductivité thermique	22 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Capacité thermique massique	9.10 ² J.kg ⁻¹ .°K ⁻¹
Système cristallin	Cubique à faces centrées
Coefficient de dilatation	24.10 ⁻⁶ .°K ⁻¹
Module d'élasticité	69 000 MPa

I.4 Obtention de L'Aluminium

I.4.1 La Bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium

Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal. [1]

I.4.2 L'Alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude.

On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine. [1]

I.4.3 L'Aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode).

L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.[2]

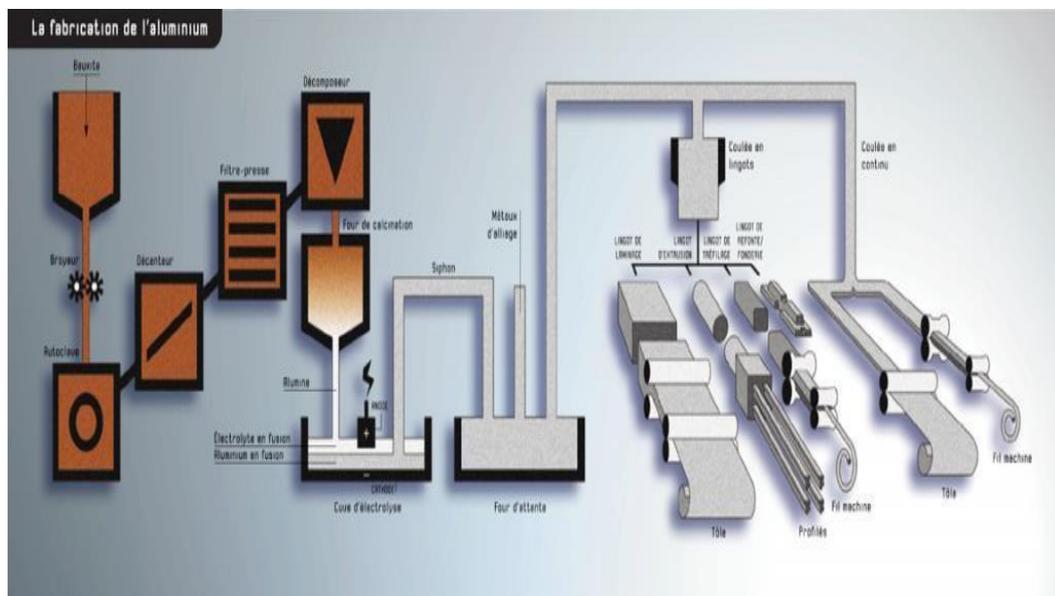


Figure 3 : Principaux stades et flux dans la fabrication de l'Aluminium [2]

I.5 Production D'Aluminium

Quelques repères pour la production d'aluminium primaire :

il faut environ 4 tonnes de bauxite pour obtenir 2 tonnes d'alumine, desquelles on extrait par électrolyse 1 tonne d'aluminium.

Les chiffres du développement de la production mondiale d'aluminium primaire

- 1895 : 2 500 T
- 1918 : 120 000T
- 1945 : 1 500 000 T
- 2010 : 40 000 000 T
- 2015 : 57 000 000 T

I.6 Principes Propriétés de l'Aluminium

I.6.1 Physico – Chimiques

L'aluminium est un élément du groupe III dans le tableau périodique.

Son numéro atomique étant $Z=13$.

Il est de structure cubique à faces centrées de paramètre $a=4,0412 \text{ \AA}$

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité.

C'est un métal blanc brillant, de densité 2,7 fondant à 660°C .

Il est assez mou et malléable.

C'est entre 100 et 150°C qu' il se laisse le mieux travailler, ce qui permet de confectionner avec facilité les pièces de profilés les plus variées et très compliquées.

L'aluminium est pratiquement inaltérable à l'air car il est recouvert d'une fine couche protectrice d'alumine.

L'eau distillée, l'eau de pluie, la vapeur d'eau n'ont aucune action sensible sur l'aluminium. En revanche, l'eau de Mer l'attaque.

Les acides ont peu d'action sur l'aluminium de même que l'eau oxygénée.

Par contre, la soude en solution, le carbonate de soude, le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium l'attaquent fortement. [5]

I.6.2 Mécaniques

La résistance à la rupture de l'aluminium est de l'ordre de 80 MPa pour l'aluminium ordinaire et de 60 MPa pour l'aluminium extra pur.

La dureté de l'aluminium est accrue par la présence d'impuretés (cuivre, nickel, argent, phosphore, etc.).

Le défaut de l'aluminium est donc sa faible résistance mécanique, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour la réalisation d'éléments porteurs dans la construction.

Cependant, les qualités mécaniques de l'aluminium sont fortement améliorées lorsqu'on lui ajoute du cuivre, du manganèse et du magnésium pour se présenter sous forme d'alliages légers.

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire [5]

I.6.3 Propriétés de Mise en Forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°C.

Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie.

L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Ce matériau peut être mis en forme soit par corroyage ou soit par fonderie.

On peut lui faire subir :

- A froid : laminage, filage, pliage, ...
- A chaud : moulage, soudage, usinage, ...

I.7 La Consommation D'Aluminium

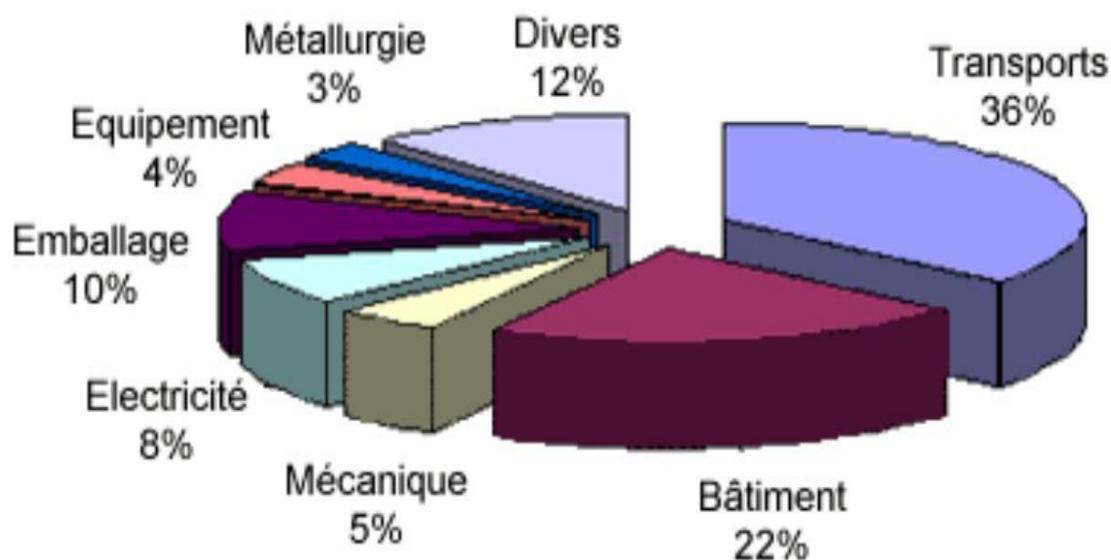


Figure 4 Répartition de la Consommation D'Aluminium

I.8 Principales Utilisations de L'Aluminium

I.8.1 Transport

- les véhicules routiers : automobiles, bus, camions.
- l'aéronautique : il n'y aurait pas d'avion sans aluminium.
- les transports maritimes, L'aluminium, très résistant à la corrosion notamment.
- les navires à grande vitesse (ferries,...).
- le transport ferroviaire : trains à grande vitesse, mais aussi trains de marchandises pour le transport en vrac, trains de montagne, transports urbains les plus modernes avec les métros légers automatisés, les tramways. [9]

I.8.2 Emballage

L'aluminium d'emballages est partie intégrante de notre quotidien.

Ses qualités « barrière » pour préserver les denrées alimentaires, sa légèreté et sa grande facilité de recyclage le confirment comme un matériau d'emballage d'avenir.[9]

I.8.3 Bâtiment

L'aluminium sous forme de profilés est aujourd'hui utilisé pour un large éventail d'applications dans le bâtiment et les travaux publics, et constitue le matériau de choix pour les murs rideaux, les cadres de fenêtre, les vérandas et d'autres structures vitrées.

Sous forme de produits laminés, il est largement utilisé pour les volets roulants, les portes, les bardages, les toitures, les plafonds suspendus, les panneaux muraux, les panneaux isolants, les cloisons, les équipements de chauffage, de ventilation, les dispositifs de protection solaire, les réflecteurs de lumière et les bâtiments entièrement préfabriqués.

Les structures telles que les locaux d'habitation, les plateformes pétrolières, les ponts d'atterrissage pour les hélicoptères, les garde-corps, les échafaudages et les échelles sont, d'une manière générale, fabriquées en aluminium.

Les profilés de formes harmonieuses sont un atout supplémentaire de décoration: agencement de magasins, garde-corp [9]

I.8.4 Electricité et Electronique

Câbles pour le transport et la distribution de l'énergie :

- lignes haute tension.
- cables souterrains.
- fils de bobinage pour transformateurs.

L'excellente conductivité de l'aluminium, mais aussi sa légèreté et sa solidité expliquent son développement dans ce domaine.

I.8.5 Les Objets de la Vie Quotidienne

L'aluminium se retrouve dans de multiples objets qui font partie de l'environnement quotidien :

- équipement de la maison (ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs).
- les objets de loisirs (I-Pod, revêtement des CD,...).
- le mobilier urbain,
- la signalisation routière .

I.9 Cycle de Vie Type pour un Produit en Aluminium

- Extraction de la bauxite : première étape de la production d'aluminium.
- Production d'alumine : matériau brut pour la production de l'aluminium primaire, elle est extraite de la bauxite.
- Production de l'aluminium primaire : produit par électrolyse.
- La semi-fabrication inclut plusieurs procédés industriels : le laminage, le filage, le moulage,...
- Fabrication du produit : l'aluminium est ensuite transformé en produits.
- Phase d'utilisation : les principaux débouchés pour les produits en aluminium sont le transport, la construction de bâtiments, l'emballage et l'ingénierie.
- Recyclage : tous les produits en aluminium collectés sont recyclés et utilisés à nouveau dans d'autres usines.[7]

I.10 Alliages D'Aluminium

L'aluminium à l'état pur présente des faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques.

Cependant, l'ajout d'éléments d'addition pour utiliser l'aluminium sous forme d'alliages.

Certains éléments d'alliage augmentent la résistance mécanique ou la résistance à la corrosion.

D'autres améliorent l'aptitude à l'usinage, la malléabilité, la soudabilité et la résistance aux températures élevées.

Deux grandes familles :

- **les Aluminiums corroyés**, obtenus par déformation plastique (laminage...)
- **Les Aluminiums pour la fonderie.**

Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempant . [5]

Des exemples :

- Les canettes d'aluminium sont faites d'un alliage renfermant du magnésium et du manganèse, qui leur procurent plus de résistance et plus de malléabilité
- Les métaux d'addition les plus couramment ajoutés à l'aluminium sont : le silicium, le cuivre, le manganèse, le zinc, le magnésium, le titane ...etc.

I.10.1 Les Alliages Corroyés



Figure 5 les alliages d'aluminium corroyés

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 refusion, les composites utilisant l'aluminium et ceux issus de la métallurgie des poudres.

I.10.1.1 Désignation

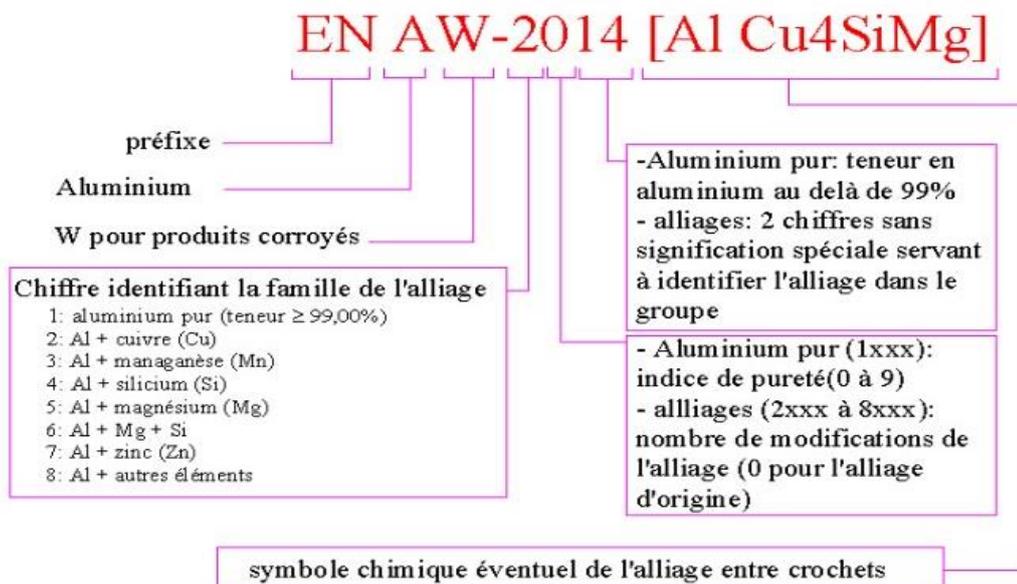


Figure 6 designation des alliages corroyés

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 99,00% avec contrôle d'impuretés,

EN AW-5086 [Al Mg 4] est un alliage d'aluminium avec 4% de magnésium,

EN AW 2017 [AlCu4MgSi] ("duralumin ou A-U4G") est un alliage avec 4,5% de cuivre contenant aussi du manganèse (0,5%), du magnésium (0,5%)...

I.10.2 Les Alliages Fonderie

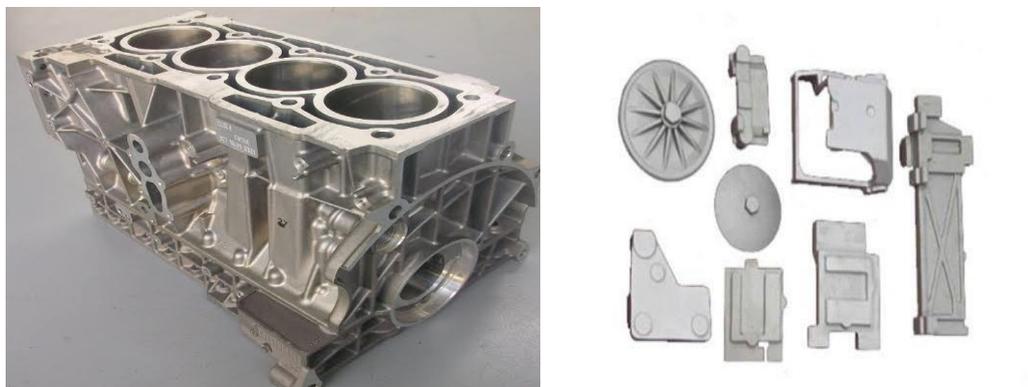


Figure 7 pièces moulées

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire.

I.10.2.1 Désignation (Norme Internationale NF EN 1780)

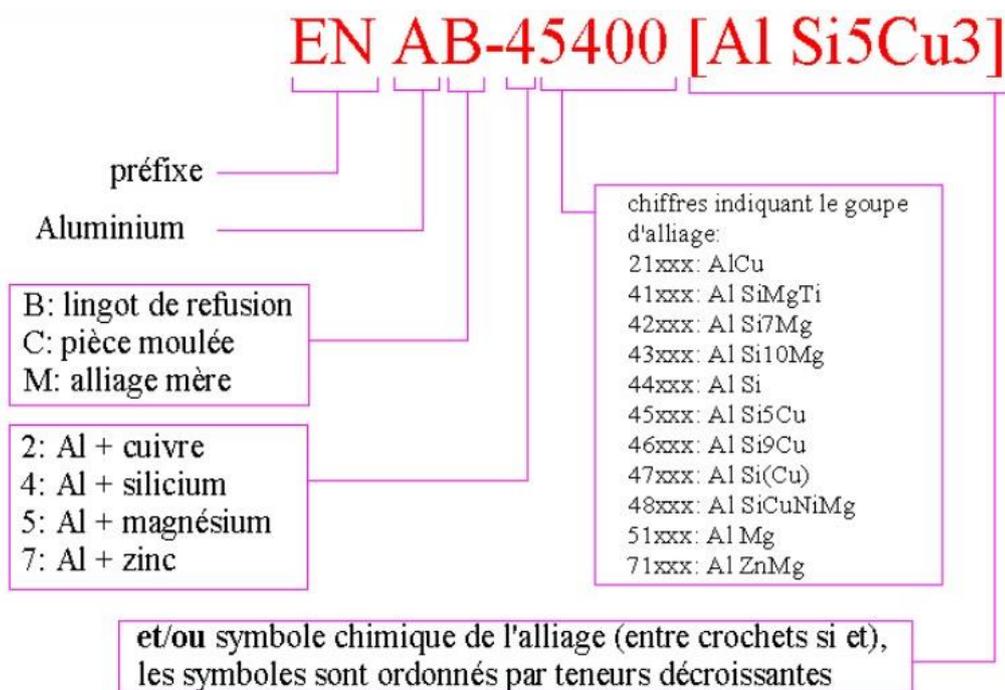


Figure 8 désignation des alliages de fonderies

Exemples :

EN AB-Al 99,8 : lingot pour refusion en aluminium pur à 99,8%.

EN AB-Al 99,7 E : lingot pour refusion en aluminium pur à 99,7% pour usage électrique (E).

EN AB-45400 [Al Si5Cu3] ou EN AB-Al Si5Cu3 ; lingot pour refusion 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 AM-Al Sr10Ti1B0,2 : alliage mère d'aluminium avec 10% de strontium, 1% de titane et 0,2% de bore.

EN AB-Al Si9Cu3(Fe)(Zn) : lingot pour refusion en alliage d'aluminium avec 9% de silicium, 3% de cuivre et des impuretés (fer et zinc).

I.10.2.2 Ancienne Désignation Afnor :

Utilisée, elle se compose du symbole métallurgique du métal de base, un tiret de séparation suivi des principaux éléments d'addition (en ordre décroissant) avec la (Commune à la plupart des métaux et alliages non ferreux) : encore régulièrement teneur correspondante.

Exemple : A-S9U3 : alliage d'aluminium avec 9% de silicium et 3% de cuivre.

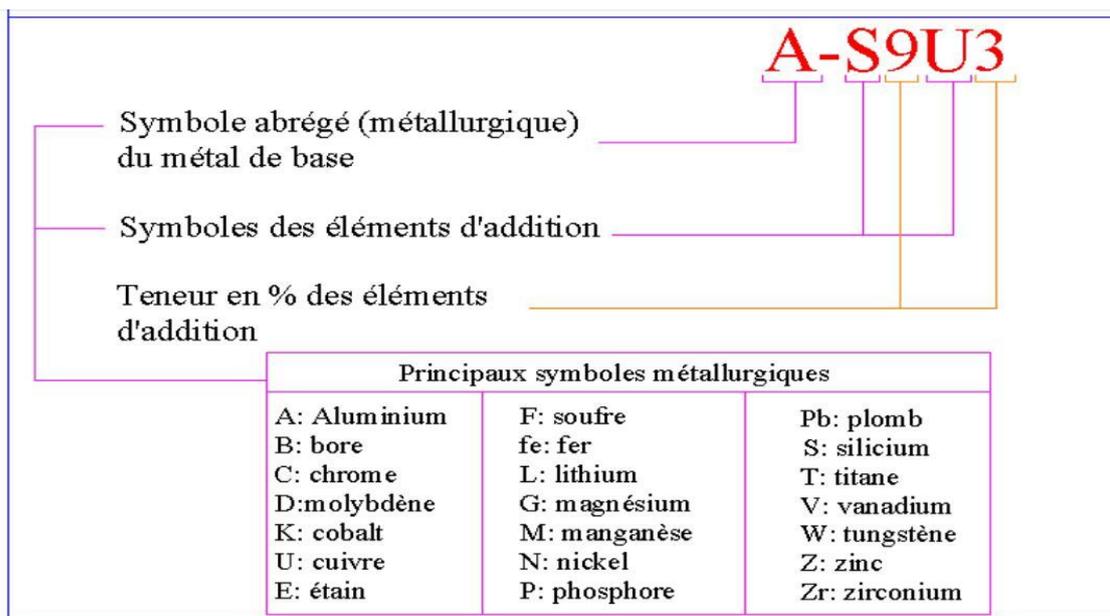


figure 9 Ancienne désignation Afnor

I.11 Mise en Oeuvre

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés : laminage, moulage, forgeage, formage, filage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres, usinage...

Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage.

L'élasticité, assez élevée, peut être une gêne dans certains cas d'usinages.

La soudabilité (MIG, TIG...) dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage.

I.12 Traitements Thermiques

Ils sont tout à fait différents de ceux des aciers. Après trempe, le durcissement est obtenu par vieillissement naturel ou maturation à température ambiante, ou par revenu à température élevée.

Les alliages avec le cuivre, le silicium, le zinc et ceux avec le magnésium plus le silicium sont dits trempants ; ils sont dits avec durcissement structural.

L'aluminium pur, les alliages avec le manganèse et le magnésium ne sont pas trempants ; ils sont dits sans durcissement structural.

I.13 Traitements de Surface

Les traitements de surface possibles sont nombreux : traitements mécaniques (sablage, polissage...), chimiques (décapage, brillantage...), par peintures (primaire + peinture), dépôts électrolytiques (cuifrage, nickelage, cadmiage, chromage...), anodisation (propre à l'aluminium, couche protectrice et décorative de 10 à 20 μm).

Les aspects brillants peuvent être obtenus par polissage mécanique, brillantage chimique ou électrolytique, les aspects mats obtenus par brossage, sablage, satinage, décapage...

Anodisation : le traitement, en milieu sulfurique (ou chromatique...), crée en surface une couche poreuse d'alumine (5 à 30 μm) qu'il est possible de colorer.

Après coloration, la couche est colmatée (eau bouillante...), devient compacte, continue, étanche, transparente et isolante ("électriquement").

I.14 Les Avantages de L'Aluminium

L'aluminium est un matériau exceptionnel en raison de ses multiples avantages.

Il est très apprécié notamment dans les secteurs de la construction, des infrastructures et des transports en raison de sa longue durée de vie, de son entretien minime et de sa contribution à la performance énergétique, pour ne nommer que ceux-là mais il y en a plusieurs autres !

I.14.1 Durable

L'aluminium est très résistant à la corrosion et permet ainsi de réaliser des ouvrages dont l'entretien sera minimal.

Il importe toutefois de sélectionner correctement les alliages ainsi que les méthodes d'assemblage pour assurer le maximum de sa durabilité.[1]

I.14.2 Résistant à la Corrosion

Une solide couche d'oxyde (Al_2O_3) se crée naturellement à la surface de l'aluminium au contact de l'air. Cette passivation naturelle fait office de barrière entre l'atmosphère et l'aluminium ce qui protège bien les alliages d'aluminium à la corrosion.

I.14.3 Économique

L'aluminium requiert peu d'entretien ce qui se traduit par une réduction des coûts de maintenance à long terme. Aucune mesure de prévention n'est nécessaire pour préserver les caractéristiques de celui-ci.

En un mot l'aluminium requiert un investissement minimal et a un impact économique et social maximal.

I.14.4 Malléable

L'aluminium est un métal facile à travailler. Sa température de fusion relativement basse, le rend alors avantageux pour les opérations de fonderie.

En plus, l'aluminium est un métal ductile.

Ce qui fait de lui un métal facile à laminier, à forger, à extruder et pour tous les autres modes de transformation par déformation plastique.

Ce matériau peut être découpé en formes tridimensionnelles, façonné, soudé, vissé, etc. De plus, les extrusions peuvent être faites sur mesure selon le design du concepteur à un coût raisonnable ou acheté de distributeurs qui gardent des inventaires de profilés extrudés standards.

I.14.5 Masse Volumique

L'aluminium est une solution de remplacement de choix afin de réduire la masse des structures. La masse volumique de l'aluminium est environ trois fois plus petite que celle de l'acier et il est possible d'avoir des alliages d'aluminium ayant une limite élastique et ultime semblables à celles des aciers commerciaux.

Notons cependant que le module d'élasticité de l'aluminium est aussi trois fois plus petit que celui de l'acier, d'où la nécessité de bien intégrer l'ensemble des propriétés lors de la conception d'une structure.

L'aluminium permet de réduire la charge à vide, qui augmente la charge utile, ce qui est un avantage majeur dans le marché du transport.

I.14.6 Conductivité

L'aluminium est un bon conducteur autant électrique que thermique.

L'aluminium est utilisé comme fil électrique de haute tension pour son rapport conductibilité et masse volumique.

Il est aussi très fréquent d'utiliser l'aluminium dans des systèmes de transfert de chaleur comme des échangeurs de chaleur de système de climatisation, des radiateurs d'automobile, etc.

I.14.7 Recyclage

L'aluminium est l'un des matériaux les plus recyclés. Près de 75 % de l'aluminium produit dans le monde, et ce, depuis le début de la production industrielle, est toujours utilisé aujourd'hui.

L'aluminium peut être recyclé indéfiniment dans une véritable boucle fermée.

Le recyclage de l'aluminium est relativement simple et consomme moins de 95 % d'énergie que le procédé d'électrolyse.

L'économie de l'aluminium contribue également à sa position comme l'un des métaux les plus recyclés au monde.

Contrairement à beaucoup d'autres matériaux, l'aluminium est plus payant par son propre recyclage que dans le flux de déchets industriels. En d'autres mots, recycler l'aluminium est plus payant que de le jeter.

La raison est que la demande d'aluminium continue de monter et que le recyclage de l'aluminium permet d'économiser plus de 95 % de l'énergie requise par rapport à la production de nouveaux métaux.[3]

I.14.8 Le Processus de Recyclage

Les grandes étapes sont les suivantes :

1. Collecte.
2. Préparation des déchets.
3. Fonte.
4. Raffinage.
5. Refonte.

I.15 Inconvénients de L'Aluminium

Plus difficile à former que l'acier ou l'acier inoxydable [10]



CHAPITRE II
LES
ALLIAGES
D' ALUMINIUM
DE
FONDERIE
Al-Si

II LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDRIE Al-Si

II.1 Les Alliages d'Aluminium de Fonderie



Figure 10 les alliages d'aluminium fonderie

II.1.1 Introduction

L'aluminium est relativement malléable par rapport à d'autres matériaux, et il est bien adapté pour des applications de formage des métaux.

Dans sa forme pure, cependant, l'aluminium est doué d'une faible résistance pour cette raison, il est généralement allié à d'autres éléments d'alliages.

Un certain nombre de métaux peut être allié avec l'aluminium, mais seulement quelques-uns sont utilisés comme des éléments d'alliage majeurs dans les alliages à base d'aluminium commerciaux ; d'autres sont utilisés en tant que suppléments aux éléments d'alliage pour l'amélioration des propriétés de l'alliage et ces caractéristiques.

Les effets de ces additifs sur les propriétés des alliages d'aluminium dépendent de chacun des éléments et des quantités ajoutées, ainsi que sur leur interaction avec l'aluminium et les uns avec les autres.

Les principaux ajouts sont principalement utilisés pour le renforcement des propriétés mécaniques, tandis que d'autres éléments sont utilisés pour obtenir une microstructure spécifique, une taille de grain plus fine, la recristallisation à température critique, ou bien de bloquer les effets nocifs de certaines impuretés.

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans de nombreux aspects de la vie moderne, des canettes de soda à l'aluminium ménager en passant par les voitures et les avions où les gens voyagent.

Les éléments d'addition dans les alliages d'aluminium peuvent être présents sous la forme de solution solide, dispersoïdes, précipités à l'intérieur du grain, ou des composés intermétalliques aux joints de grains.

En raison de la multiplicité des éléments d'alliage, de nombreuses phases différentes se précipitent au cours de la solidification et du refroidissement ultérieur. Les alliages d'aluminium de fonderie sont les plus polyvalents de tous les alliages de fonderie.

Pour les grandes productions, les trois principaux procédés sont :

le moulage en sable, en moule permanent, et le moulage sous pression.

L'aluminium est également moulé à l'aide du processus de cire perdue, mousse perdue, ainsi que les processus de plâtre, centrifuges ...etc.

Les alliages corroyés diffèrent des alliages coulés parce qu'ils peuvent être mis en forme par déformation.

Les alliages d'aluminium coulés et les alliages forgés peuvent être séparés en alliages traitables thermiquement, et alliages non-traitables thermiquement, où les alliages sont renforcés à l'aide de traitements thermiques dans le premier cas, et le travail de durcissement dans le second .

La structure des alliages d'aluminium de fonderie comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypo eutectiques), des eutectiques plus ou moins complexes (binaires, ternaires) et des constituants intermétalliques [2]

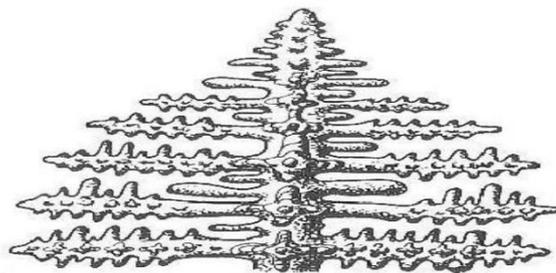


Figure 11 Dendrite[2]

II.1.2 Désignation

II.1.2.1 Désignation Européenne

Les règles de désignation sont définies par les normes EN 1780-1,1780-2 et 1780-3. Elles prévoient la coexistence de deux systèmes, l'un numérique et l'autre basé sur les symboles chimiques des éléments.

Les normes EN 1706 pour les pièces moulées et EN 1676 pour les lingots pour refusions en aluminium allié.[7]

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

- Le préfixe EN suivi d'un espace.
- La lettre A qui représente l'aluminium.
- Une lettre qui représente la forme du produit :
 - B pour les lingots pour refusions en aluminium non allié ou allié
 - C pour les pièces moulées,
 - M pour les alliages mères,
 - W pour le les fils machine...etc.
 - Un tiret.

Pour la désignation numérique, cinq chiffres représentent les éléments de composition de l'alliage.

- Le premier chiffre indique l'élément principal de l'alliage :
 - Cuivre 2XXXX
 - Magnésium 5XXXX
 - Silicium 4XXXX
 - Zinc 7XXXX
- Le second des cinq chiffres indique le groupe d'alliage (exemple Al Si7Mg, Al Si10Mg...etc.),
- le 3eme chiffre est arbitraire,
- le 4e chiffre est généralement 0
- le 5eme également sauf pour les alliages pour applications aérospatiales.

Pour la désignation chimique, l'alliage est désigné par le symbole Al suivi d'un espace, du ou des symboles chimiques des éléments d'alliages suivis de leur teneur nominale, ordonnés de façon décroissante[4].

Système de désignation des alliages d'aluminium de fonderie selon l'aluminium
Association

Alliage	Élément d'alliage principal
1xx,x	Aluminium pur 99 %
2xx,x	Cuivre (Cu)
3xx,x	Silicium (Si) avec du cuivre (Cu) et magnésium (Mg)
4xx,x	Silicium (Si)
5xx,x	Magnésium (Mg)
7xx,x	Zinc (Zn)
8xx,x	Étain (Sn)
9xx,x	Autres éléments
* La série 6xx,x n'est pas utilisée	

Tableau 1: désignation des alliages d'aluminium de fonderie [4]



II.1.2.2 Désignation Américaine

C'est une désignation numérique a trois chiffres plus un quatrième après la virgule.

- Le premier désigne le groupe d'alliages, comme le montre le tableau.

Le groupe 1xx,x désigne l'Al pur, et les autres groupes (2xx,x a 8xx,x) correspondent aux différentes familles d'alliages d'aluminium de fonderie.

Chaque chiffre représente l'élément d'alliage qui est present en plus grande teneur (ex : 2xx,x pour les alliages a base de cuivre).

- Le 2eme et 3eme chiffres servent a indiquer spécifiquement l'alliage sauf dans le cas de la série 1xx,x ou ils indiquent la pureté.
- Le chiffre après la virgule indique l'état de l'alliage, par exemple 0 pour une pièce moulée et 1 pour un lingot
- Procédés de moulage Les abréviations suivantes sont utilisées pour désigner les différents

procédés de moulage

- S : moulage au sable
- K : moulage en coquille
- D : moulage sous pression
- L : moulage de précision (cire perdue)

Traitement thermique

Les conditions de traitement thermique sont désignées de la manière suivante :

- F : brut de fonderie
- O : recuit
- T1 : refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation)
- T4 : mise en solution et vieillissement naturel (maturation)
- T5 : refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel ou sur revenu
- T6 : mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximal
- T64 : mise en solution et sous-vieillessement artificiel (sous revenu)
- T7 : mise en solution et sur-vieillessement artificiel (sur-revenu)

Exemple de dénomination complète EN 1706 AC-42000KT6 (numérique) EN 1706 ACAISi7MgKT6 (chimique) Désigne un alliage d'aluminium 42000 pour pièce moulée, coulé en coquille avec traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximal .[3]

II.1.3 Alliages Normalisés

La norme européenne EN 1706 distingue onze groupes alliages différents, qui sont récapitulés dans la figure 8.

Dans chaque groupe, les alliages figurent en ordre décroissant de tonnage de pièces moulées produites en Europe.

La norme EN 1706 indique, pour l'ensemble des alliages, les spécifications concernant les compositions chimiques. [5]

II.1.3.1 Alliages AlCu

Le cuivre a un effet durcissant sur les alliages de fonderie, particulièrement après traitement thermique complet T6.

La présence de magnésium permet le traitement T4, avec un compromis résistance à la traction/allongement favorisant l'allongement.

Le cuivre a un effet favorable sur l'usinabilité et sur la tenue à chaud, mais défavorable sur la résistance à la corrosion.

Les deux alliages de ce groupe possèdent, après le traitement thermique T4 dans le cas de l'alliage Al Cu4MgTi, et T6 pour l'alliage Al Cu4Ti, les caractéristiques mécaniques les plus élevées parmi les alliages normalisés, non seulement en statique, mais également en endurance ou en résilience.

Mais leurs propriétés de fonderie sont médiocres et limitent leur utilisation aux pièces peu complexes et très fortement sollicitées. [5]

II.1.3.2 Alliages AlSiMgTi

Une teneur croissante en silicium favorise les propriétés de fonderie des alliages de la série 4xx.x.

Elle augmente en particulier leur aptitude à la coulée de pièces minces et étanches, mais défavorise l'usinabilité et l'aptitude au traitement d'anodisation de décoration.

Au-delà d'une teneur de 4%, la couche d'oxyde prend en effet un aspect grisâtre : les alliages ont alors une bonne aptitude au traitement d'anodisation de protection, mais non de décoration.

L'alliage de ce groupe, Al Si2MgTi, possède une bonne aptitude à l'oxydation anodique de protection et de décoration à cause de sa faible teneur en silicium ; il a des propriétés de fonderie médiocres, mais conserve de bonnes propriétés mécaniques grâce à la présence de magnésium qui permet le traitement à l'état T6. Il est principalement utilisé pour des pièces de quincaillerie de bâtiment. [6]

II.1.3.3 Alliages AlSi7Mg

Ce sont des alliages à hautes propriétés mécaniques.

La teneur en silicium, moyenne, permet l'obtention d'excellentes propriétés de fonderie, et la teneur en magnésium rend possibles les traitements thermiques T6 ou T64.

On peut obtenir ainsi des degrés de durcissement variables et donc des compromis intéressants entre charge de rupture et limite d'élasticité d'une part, et allongement d'autre part.[8]

Les alliages Al Si7Mg0,3, et Al Si7Mg0,6, à cause de leur faible teneur en impuretés, sont les deux alliages les plus utilisés pour des applications où l'on recherche d'excellentes propriétés mécaniques associées à des pièces de forme complexe.

Citons par exemple les pièces pour l'industrie aéronautique, les roues de voitures, les pièces de suspension, les culasses de moteurs turbo Diesel fortement sollicitées...etc. [6]

II.1.3.4 Alliages AlSi10Mg

La teneur en silicium donne à cet alliage une composition proche de l'eutectique de cette famille et lui confère d'excellentes propriétés de fonderie, la présence de magnésium rend possible le traitement thermique

Les propriétés mécaniques sont moyennes, ce qui fait que ces alliages sont utilisables pour des applications très diverses.

Cette famille regroupe cinq alliages qui se différencient par leurs teneurs en impuretés : seul l'EN AC-Al Si9Mg est un alliage de 1re fusion, les quatre autres sont des alliages de 2e fusion.

Les alliages EN AC-Al Si10Mg(a), EN AC-Al Si10Mg(b) et l'EN AC-Al Si10Mg (Cu) ne diffèrent essentiellement que par leur teneur en cuivre, élément durcissant et néfaste pour la résistance à la corrosion des alliages, et sont utilisés pour le moulage en coquille ou basse pression de pièces diverses.

La variante EN AC-Al Si9Mg est utilisée pour des applications où l'on recherche des propriétés mécaniques élevées après traitement thermique, mais peut être utilisée également sans traitement thermique pour la réalisation de pièces devant posséder une bonne ductilité.

La variante EN AC-Al Si10Mg (Fe) est utilisée pour le moulage sous pression lorsqu'une bonne résistance des pièces à la corrosion, ou un usage alimentaire des pièces sont requis.[8]

II.1.3.5 Alliages AlSi

Le système aluminium-silicium forme un eutectique pour une teneur en silicium de 12,6% en masse.

Les systèmes eutectiques possèdent en général d'excellentes propriétés de fonderie, et l'eutectique AlSi a été l'un des premiers alliages de fonderie à être utilisé industriellement.

Le traitement dit de « Modification » par le sodium, découvert par Aladar Pacz en 1920[?], a permis d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de cet alliage par transformation de la structure naturellement aciculaire en structure fibreuse.

Cela a contribué à l'essor des alliages de fonderie à cette époque.

Les alliages de cette famille sont eutectiques ou voisins de l'eutectique.

On réservera les alliages eutectiques EN AC-Al Si12(a) et EN AC-Al Si12(b) à la coulée de pièces en coquille minces et complexes à cause de leur très bonne aptitude au moulage, la première variante ayant une teneur en cuivre plus faible favorisant une bonne tenue à la corrosion. Les variantes hypoeutectiques sont d'usage plus général, et la nuance EN AC-Al Si11 est très utilisée par exemple pour la réalisation de roues de voitures à l'état non traité thermiquement.

Les nuances EN AC-Al Si12(Fe) et EN AC-Al Si9 sont utilisées en moulage sous pression, la dernière variante présentant des allongements importants à cause des impuretés en faible teneur. [8]

II.1.3.6 Alliages AlSi5Cu

Les alliages EN AC-AlSi6Cu4, EN AC-AlSi5Cu3Mg, EN ACAISi5Cu3Mn et EN AC-AlSi5Cu3 sont des alliages d'utilisation générale, destinés à la réalisation de pièces automobiles comme les culasses ou les carters.

Leurs propriétés de fonderie sont très bonnes, la présence de cuivre facilite l'usinage et augmente la tenue à chaud, et le magnésium permet le traitement thermique lorsque l'on souhaite des propriétés mécaniques élevées, comme c'est le cas de certaines culasses de moteurs Diesel ou turbo Diesel.

L'alliage EN AC-AlSi5Cu1Mg est un alliage à hautes caractéristiques mécaniques à l'état T6 et est souvent utilisé pour la coulée de pièces pour l'aéronautique ou pour l'automobile (turbines de turbocompresseurs) [13]

II.1.3.7 Alliages AlSi9Cu

Les alliages EN AC-Al Si9Cu3(Fe), EN AC-AlSi11Cu2(Fe) et EN ACAISi9Cu3(Fe) (Zn) sont presque exclusivement utilisés en moulage sous pression, à cause de leurs bonnes propriétés de fonderie associées au prix de revient intéressant lié au recyclage. Ce sont donc des alliages de 2nd fusion, où les teneurs en impuretés comme le fer ou le manganèse sont notables, et favorisent le non collage au moule de ces alliages sans trop abaisser les propriétés mécaniques à cause de la structure très fine due aux vitesses de refroidissement élevées du procédé.

Ces alliages couvrent plus de 90% du tonnage des pièces coulées sous pression, telles que carters cylindres, carters de boîtes de vitesses ou d'embrayage, corps de pompe à eau, semelles de fers à repasser, etc.

L'alliage EN AC-AlSi8Cu3 est utilisé à la fois pour la sous-pression et pour le moulage en coquille pour des pièces d'usage général.

Les alliages EN ACAISi7Cu3Mg, EN AC-AlSi9Cu1Mg et EN ACAISi7Cu2 sont d'usage également général, et sont utilisés comme la famille précédente pour le moulage en coquille ou basse pression de culasses ou de blocs, à l'état traité ou non selon les spécifications [4]

II.1.3.8 Alliages AlSi(Cu)

Les alliages de cette famille sont des alliages eutectiques, donc à propriétés de fonderie excellentes.

On réservera la nuance EN AC-Al Si12(Cu) pour la coulée par gravité de pièces très minces et d'épaisseurs uniformes, et la nuance EN AC-Al Si12Cu1(Fe) pour la coulée sous pression de pièces minces diverses. [5]

II.1.3.9 Alliages AlSiCuNiMg

La seule nuance normalisée de cette famille, l'Al Si12CuNiMg, est exclusivement réservée à la réalisation de pistons ou de cylindres à ailettes.

C'est un alliage eutectique AlSi à propriétés de fonderie excellentes, avec des additions de cuivre, nickel et magnésium pour favoriser la tenue à chaud, typiquement 250 °C.

II.1.3.10 Alliages AlMg

Ce sont des alliages ayant une très bonne tenue à la corrosion, notamment en atmosphère marine.

Ils sont particulièrement aptes à l'oxydation anodique de décoration, et sont utilisés par exemple pour des pièces d'accastillage de bateaux ou pour la quincaillerie de bâtiment.

Ils ont malheureusement des propriétés de fonderie médiocres, et sont sensibles à l'oxydation à l'état liquide.

Les nuances EN AC-Al Mg5 et EN AC-Al Mg5(Si) peuvent être également utilisées pour des pièces où l'on recherche une tenue à chaud élevée, car les alliages AlMg sont les alliages d'aluminium moulés dont les propriétés à chaud sont les plus élevées au-dessus de 250 °C.

La nuance EN AC-Al Mg9 est utilisée pour le moulage sous pression, mais assez rarement. [14]

II.1.3.11 Alliages AlZnMg

Cette nuance EN AC-Al Zn5Mg est dite autotrempeant, et acquiert par simple mûrissement à température ambiante des caractéristiques mécaniques qui se rapprochent de celles des alliages traités thermiquement.

Elle présente un intérêt pour la construction moulée-soudée.

Mais sa mise en œuvre est délicate à cause de propriétés de fonderie médiocres, et en particulier la criquabilité, et ne convient pratiquement que pour la coulée en sable. [13]

II.1.4 Alliages Non Normalisés

La norme européenne ne regroupe pas l'ensemble des alliages, et certains d'entre eux sont parfois utilisés en raison de leur intérêt particulier

II.1.4.1 Alliages Autotremnants

Ces alliages de la famille aluminium-zinc-silicium, comme par exemple l'Al Zn10Si8Mg, ont la particularité de présenter un durcissement structural par simple maturation à la température ambiante, avec des propriétés de fonderie se rapprochant de celles des alliages Al-Si hypoeutectiques.

Les propriétés mécaniques de ces alliages se rapprochent, sans toutefois les atteindre, de celles des alliages traités thermiquement.

Les applications concernent des pièces à résistance mécanique moyenne, obtenues surtout par moulage en coquille (le moulage au sable de pièces épaisses conduit à des allongements faibles), où les frais de transformation sont réduits par l'absence de traitement thermique et pour lesquelles on recherche une grande stabilité dimensionnelle.[6]

II.1.4.2 Alliages à Très Haute Résistance Mécanique

Ce sont des alliages dérivés de l'Al Cu4MgTi, qui se caractérisent par leur très faible teneur en impuretés, notamment en fer et en silicium (< 0,02%), et par des additions de zinc, de manganèse ou d'argent.

Ils possèdent les propriétés mécaniques les plus élevées de tous les alliages d'aluminium moulés.

Ils doivent subir un traitement de sur-revenu (températures légèrement supérieures, de 5 °C à 10 °C, à celles pratiquées habituellement) pour les désensibiliser à la corrosion sous tension.

La mise en solution est également assez longue et réalisée par paliers.

Ces alliages sont coûteux, et trouvent leurs principales applications dans les industries aéronautiques ou spatiales.

Les principales nuances utilisées sont : Al Cu4Zn3Mg, Al Cu5MgMnTi et Al Cu5MgAgTi. [7]

II.1.4.3 Alliages Ductiles pour Moulage Sous Pression

Les nouvelles exigences des constructeurs automobiles en matière d'allègement ont fait apparaître, pour la réalisation de pièces de structures devant résister au crash, de nouvelles familles d'alliages ductiles et aptes au moulage sous pression.

Ce sont des alliages à plus faibles teneurs en impuretés ou en éléments

En particulier, les teneurs en fer et en manganèse, éléments qui favorisent le non collage des alliages, mais diminuent leurs propriétés mécaniques, doivent faire durcir que les alliages pour moulage sous pression classiques.

L'objet d'une optimisation précise. [8]

Les alliages Al Si11MgSr ou Al Si9MgSr à teneurs moyennes en fer et manganèse permettant d'obtenir un bon compromis collage au moule propriétés mécaniques, ainsi que les alliages Al Mg5Si2 sont parmi les nuances les plus utilisées. [8]

II.1.4.4 Alliages Aluminium-Manganèse

Les nuances utilisées sont l'Al Mn4 et l'Al Mn2Ni2.

Ces alliages sont caractérisés par une température de début de fusion relativement élevée, de l'ordre de 658 °C par exemple pour l'alliage Al Mn4.

Ils sont donc peu fusibles et peuvent être utilisés comme grilles de brûleurs, chapeaux de brûleurs coulés En coquille ou sous pression.

Leur coulabilité n'est pas très bonne, et ils présentent une certaine tendance à la crique.

II.1.5 Propriétés Générales

Les alliages d'aluminium de fonderie ont toutes les caractéristiques nécessaires pour être utilisés de façon efficace dans la production de pièces coulées

- masse volumique faible
- résistance à la corrosion
- caractéristiques mécaniques intéressantes
- durcissement important par traitement thermique
- bas point de fusion (658 °C)
- mise en œuvre assez facile par laminage, forgeage, moulage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres
- Une fluidité élevée qui permet de remplir complètement les moules
- Un transfert de chaleur rapide entre l'aluminium et le moule, que l'aluminium soit liquide ou solide [11]

II.1.6 Les Propriétés Physiques et Mécaniques des Pièces Coulées en Aluminium

Les propriétés des pièces coulées peuvent être modifiées par :

Composition chimique de l'alliage :

La composition des alliages détermine le potentiel. Pour obtenir des propriétés physiques et mécaniques spécifiques.

La teneur en éléments d'alliage est choisie pour produire des caractéristiques qui comprennent coulabilité ainsi que des capacités de performances souhaitées.

La composition chimique a un effet majeur sur la microstructure, ainsi que sur la nature et la morphologie des phases obtenues.

La vitesse de refroidissement pendant et après solidification :

Les conditions de solidification déterminent la structure caractéristique qui influence sur les propriétés physiques et mécaniques d'un alliage. [18]

II.1.7 Processus de Moulage :

Il y a un grand nombre de procédés de moulage, et imposent chacun différents taux d'extraction de la chaleur, des vitesses de solidification, et des moyens de compenser le retrait lors de la solidification.

II.1.8 Solidification

Les moulages peuvent contenir des défauts intérieurs et des défauts superficiels. Les géométries complexes des pièces, la dynamique des fluides et la mécanique de solidification se combinent pour présenter des défis uniques et difficiles à atteindre. Réaliser des pièces denses sans discontinuités, sans porosités internes souvent dues à l'hydrogène, ainsi que des défauts détectables visuellement tels que des fissures, des retassures, des réactions d'humidité...etc.

Des inclusions non métalliques affectent les propriétés mécaniques comme la résistance à la traction, résistance à la fatigue, la ténacité et la ductilité, tandis que les défauts de surface influencent fortement les propriétés mécaniques et la fatigue[1].

II.1.9 Effets des Eléments D'Addition

II.1.9.1 Silicium Si

L'effet du silicium dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des caractéristiques de la fonderie l'Additions de silicium améliore la fluidité de façon spectaculaire, et la résistance à chaud.

Les compositions les plus utilisées dans tout le processus de moulage l'aluminium sont celle dans lesquels le silicium joue un rôle majeur.

Les alliages commerciaux couvrent les gammes hypoeutectiques et hypereutectiques jusqu'à environ 30 % de Si L'augmentation de la teneur en silicium améliore la fluidité de remplissage des parois minces et pour reproduire des modèles plus complexes et les détails.

Les alliages aluminium-silicium sont généralement plus résistants à la fissuration de solidification et présentent une excellente coulabilité.

Le pourcentage de liquide dans l'intervalle de solidification est dicté par la première composition et par le degré de refroidissement.[3]

Pour processus solidification des taux plus élevés tels que moulage sous pression et coulée en moule permanent et pour des sections plus minces dans lequel plus rapide solidification a lieu, le retrait porosité est fortement affectée par la température à laquelle la masse de l'alimentation de liquide à partiellement structures solidifiées ne se produit plus.

L'alimentation pour minimiser le rétrécissement porosité d'autant meilleure que la fraction volumique solidifiée est augmentée à la température à laquelle la masse de l'alimentation cesse.

Pour cette raison, teneur en silicium la plus désirable de l'aluminium - silicium alliages correspond à la vitesse de solidification des processus caractéristique.

Pour lente refroidissement des processus de taux tels que le plâtre, l'investissement et le sable, la gamme préférée est de 5 à 7%, pour le moule permanent 7 à 9%, et pour moulage sous pression de 8 à 12%.

Les bases de ces recommandations sont la relation entre le taux de refroidissement et de la fluidité et de l'effet de pourcentage d'eutectique sur l'alimentation que la solidification progresse.

Le silicium se combine avec le magnésium pour former Mg_2Si dans les alliages traitables thermiquement.

Il se combine avec le fer et d'autres éléments pour former phases insolubles complexe. Silicium et permet également de réduire l'effet spécifique du coefficient d'expansion thermique .[6]

II.1.9.2 Cuivre Cu

L'effet du cuivre dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des propriétés mécaniques par durcissement structural principalement la résistance mécanique et de la dureté, des alliages soumis à des traitements thermiques. [5]

II.1.9.3 Magnésium Mg

Le magnésium (Mg) est un élément de renforcement structural plus puissant que le cuivre, Son rôle principal dans ces alliages consiste à la modification des composés de fer de la forme α à la forme β . il augmente la résistance à la corrosion,

La coulabilité est moins bonne que pour les alliages précédents.[5]

II.1.9.4 Fer Fe

Le fer améliore la résistance à la fissuration à chaud et facilite le démoulage une haute teneur en fer augmente la résistance à la traction, mais affecte négativement l'élongation à la rupture.

II.1.9.5 Nickel Ni

Utilise avec le cuivre pour améliorer la résistance à haute température, on le retrouve dans des concentration importante dans les alliages pour pistons.

II.1.9.6 Zinc Zn

En tant qu'élément allié aux alliages d'aluminium de fonderie contenant du cuivre et du magnésium en proportions suffisantes et étant soumis à des traitements thermiques appropriés, permet d'obtenir une microstructure intéressante et une bonne résistance mécanique.

Dans un système Al-Zn-Mg-Cu, le zinc et le magnésium conditionnent le processus de vieillissement, et le cuivre contribue à accélérer le vieillissement en augmentant le degré de sursaturation de la phase CuMg.[7]

II.1.9.7 Titane Ti

l'addition de ces éléments améliore la résistance à haute température et la dureté en formant des nano-précipités [7]

II.1.9.8 Chrome Cr

Ajoute en faible proportion pour donner de la stabilité a certains alliages et supprimer le grossissement du grain.

Il entre aussi dans la composition de certaines phases intermétalliques, notamment les phases sludges, et a un effet positif sur la dureté [5]

II.1.9.9 Strontium Sr

Comme mentionné précédemment, le silicium des alliages eutectiques est généralement de forme aciculaire ; et une addition de strontium, en conjugaison avec des traitements thermiques, transforme celle-ci en une morphologie fibreuse ou globulaire. Bien que le silicium apparaisse sous forme de particules discrètes, celui-ci est en fait constitué d'un réseau de fibres interconnectées.

Comme dans toute microstructure de ce type, les propriétés de contraintes mécaniques et de ductilité, mesurées en pourcentage de déformations, ne sont pas aussi élevées que celles associées à des constituants de dimensions plus fines et de formes arrondies [22]

II.1.10 Effet du Traitement Thermique

La métallurgie de l'aluminium et de ses alliages offre une gamme de possibilités de traitements thermiques pour obtenir des combinaisons souhaitables de propriétés mécaniques et physiques.

Grâce à la sélection du traitement, il est possible d'obtenir des propriétés qui sont en grande partie responsables de l'utilisation actuelle des pièces moulées en alliage d'aluminium dans pratiquement tous les domaines d'application.

Le traitement thermique est utilisé pour décrire toutes les pratiques thermiques destinées à modifier la structure métallurgique des produits, et c'est de cette manière que les caractéristiques physiques et mécaniques sont contrôlables. [17]

Un ou plusieurs des objectifs suivants sont à la base du choix du traitement thermique :

- Augmenter la dureté
- Améliorer l'usinabilité
- Améliorer la résistance à l'usure
- Augmenter la force et / ou de produire les propriétés mécaniques spécifiées pour un état particulier de la matière
- Stabiliser les propriétés mécaniques et physiques

- Assurer la stabilité dimensionnelle
- Modifier les caractéristiques électriques
- Modifier résistance à la corrosion
- Soulager les contraintes résiduelles

La polyvalence de l'aluminium est reflétée par le nombre d'alliages qui ont été développés et utilisés dans le commerce.

Une large gamme de combinaisons souhaitables de propriétés mécaniques et physiques peut être réalisé par le traitement thermique d'un grand nombre de ces alliages. [8]

Le traitement thermique des alliages d'aluminium est basé sur le variant solubilités des phases métallurgiques dans un système cristallographiquement monotropique.

La solubilité des phases eutectiques augmente avec l'augmentation de la température du solidus, la formation et la distribution des phases précipitées peuvent être manipulées pour influencer les propriétés du matériau.

En plus des changements de phase et les morphologies associées à des éléments et des composés solubles, d'autres effets (parfois souhaitables) peuvent accompagner un traitement à température élevée.

Les micro-ségrégations solidifiées sont minimisées ou éliminés.

Les contraintes résiduelles causées par la trempe ou par la solidification sont réduites.

Les phases insolubles peuvent être modifiées physiquement, et la sensibilité à corrosion peut être affectée.

En contrôlant la température et le temps de vieillissement, une grande variété de propriétés mécaniques peut être obtenue; La résistance à la traction peut être augmentée, les contraintes résiduelles peuvent être réduites, et la microstructure peut également être stabilisée.

Le processus de précipitation peut être enclenché à température ambiante, où peut être accélérée par un vieillissement artificiel à une température allant de 90 ° C à 260 ° C.

Les exigences de base du durcissement par vieillissement d'un système d'alliage sont de diminuer solubilité lorsque la température diminue, et la formation d'amas d'atomes de soluté cohérente avec la matrice; en d'autres termes, il doit y avoir une relation d'orientation entre les précipités et la matrice.

La plus grande partie de l'augmentation de la résistance à la traction qui accompagne la plupart des traitements thermiques est le résultat de la formation de précipités

hors-équilibre, tels que la phase θ , au cours de l'application des traitements de vieillissement.

Etant donné que la structure et la morphologie des précipités sont contrôlées par le temps et les températures utilisées dans les séquences du traitement thermique il est possible de contrôler et d'optimiser la résistance, de ductilité et ténacité de ces alliages.

Dans les alliages renforcés par précipitation, il est possible que plus d'une phase se précipitent dans la matrice d'une phase prédominante.

Pour obtenir les meilleurs résultats, la phase de précipité devrait être dure et discontinue, ses particules petites et nombreuses, tandis que la morphologie doit être arrondie plutôt que tranchante.

D'autre part, la matrice doit être souple et ductile de sorte . [8]

II.1.11 Procédé de Fonderie

Les organes et pièces constituant les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication telles que le forgeage, l'usinage, l'estampage, la fonderie, etc.

La technique de fonderie est le plus souvent utilisée, car elle est non seulement économique, mais :

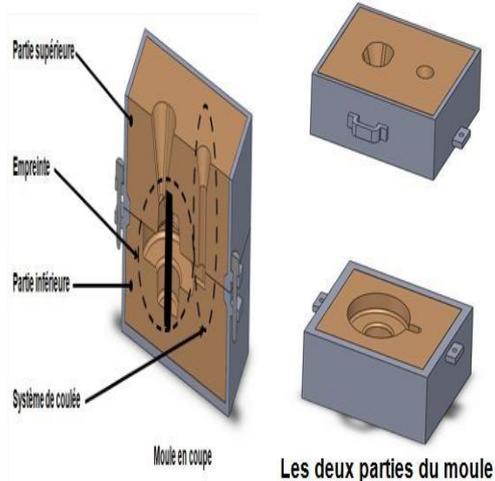
- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- L'obtention de pièces massives telles que bâtis, volants, etc.

Le moulage proprement dit, consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir).

Le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule [12]

II.1.12 Les Techniques de Moulages les Plus Connus sont

II.1.12.1 Le Moulage en Sable



Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage.

Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Figure 12 : Moulage en sable [1]

Un moule simple est constitué de deux parties :

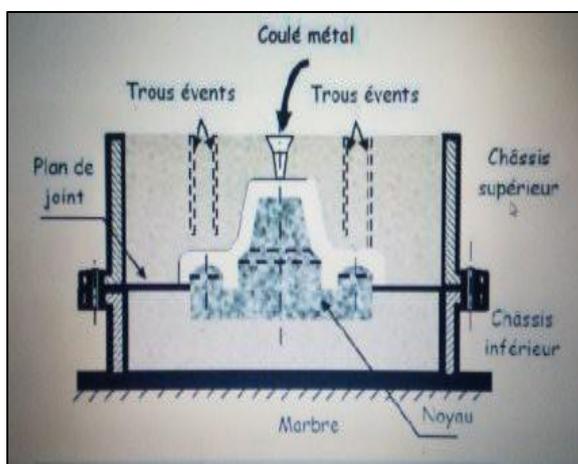
- La partie supérieure.
- la partie inférieure.

La figure représente un moule en sable avec les différentes parties essentielles.

Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'à remplissage de l'empreinte.

Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition. [1]

II.1.12.2 Moulage Naturel sur Modèle



Le moulage à l'aide de modèles de forme simples, et ne présentant pas d'évidements importants, est appelé moulage naturel sur modèle.

Le modèle exécuté auparavant par le modelleur et ayant une forme semblable à la pièce définie par le dessin va être utilisé afin de fabriquer le moule.

Figure 13 : Moulage naturel sur modèle [2]

II.1.13 Méthodes Modernes de Fonderie

II.1.13.1 Moulage par Centrifugation

est un procédé utilisé pour produire des pièces de révolution tels que les tubes, les couronnes, etc sans usage d'un noyau.

Le moule est mis en rotation selon un cycle pendant la coulée et la solidification de l'alliage.

II.1.14 Moulage par Enrobage ou à la Cire perdue

Le modèle est fabriqué en cire, souvent dans une installation de moulage en coquille, et revêtu d'une pâte aqueuse de matériau réfractaire qu'on laisse sécher.

La coque réfractaire, avec le modèle en cire toujours à l'intérieur, est enfouie dans du sable et le moule passe au four.

La cire fond et s'écoule, laissant le moule prêt à recevoir le métal.

Les moulages obtenus par le procédé à la cire perdue donnent une bonne tolérance et reproduisent avec précision les petits détails.[16]

II.1.14.1 Moulage en Coquille

Procédé très ancien, le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, appelé coquille, constitué d'éléments assemblés les pièces obtenues par ce procédé ont donc des dimensions précises et un bel aspect de surface les propriétés mécaniques sont bonnes par suite de la structure fine due au refroidissement rapide du métal.

Le moulage en coquille se fait pour les grandes séries mais pour des pièces de petites et moyennes dimensions ; où l'on distingue deux techniques.[3]

II.1.14.2 Le Moulage en Coquille par Gravité

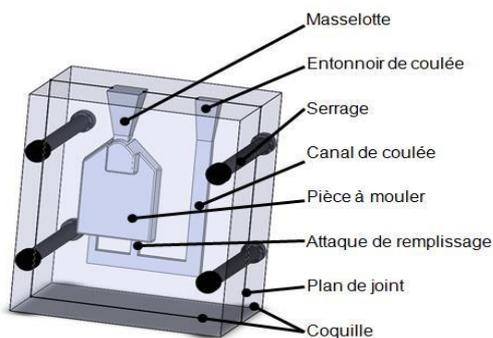


Figure 14 Moulage par gravité[2]

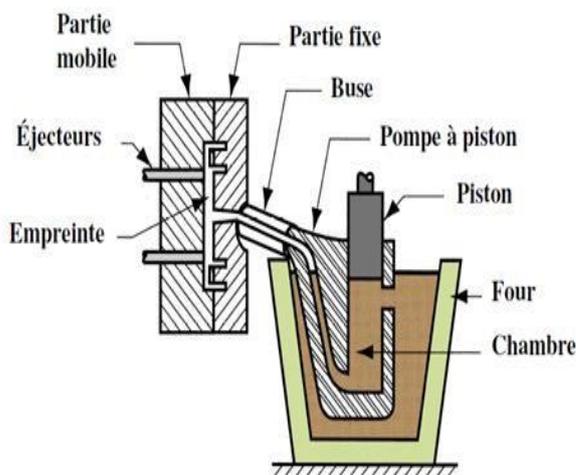
L'alliage liquide est versé par gravité dans un moule permanent, ou coquille, destiné à produire des pièces en série (plusieurs milliers), Le moule est métallique avec noyau en sable.

Il est constitué de plusieurs parties afin de permettre le démoulage. Le moule est réalisé en fonte ou acier spéciaux. [2]

❖ Les étapes du moulage en coquille par gravité

- Le moule est préchauffé et recouvert de poteyage
- Si nécessaire, les noyaux sont placés dans le moule Le métal fondu est versé dans le moule
- Fermeture du moule.
- Coulée du métal en fusion
- Refroidissement et solidification de la pièce
- Ouverture du moule
- Ejection de la pièce moulée

II.1.14.3 Moulage en Coquille sous Pression



L'alliage liquide est poussé très rapidement (jusqu'à 50m/s) dans l'empreinte par un piston qui assure l'alimentation de la pièce en alliage liquide.

Durant la solidification un maintien en pression est nécessaire et impose jusqu'à 1000 bars de pression. [1]

Figure 15 Moulage sous pression [1]

❖ Les étapes du moulage en coquille sous pression :

- Fermeture et verrouillage du moule par système mécanique à genouillère ou vérin hydraulique.
- Injection du métal dans le moule par système immergé dans l'alliage en fusion (chambre chaude)
- Refroidissement et solidification de la pièce par conduction naturelle rapide due à la matière métallique du moulée aux pressions élevées.
- Ouverture du moule [1]
- Ejection de la pièce moulée

II.2 Les Alliages d'Aluminium Fonderie Al Si (4xx.x)

Les alliages de fonderie Al-Si sont largement utilisés dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique grâce à leurs excellentes propriétés de moulage, leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leurs propriétés mécaniques intéressantes.

Ces alliages ont l'avantage d'être recyclés à l'infini ce qui nous impose de prendre en considération la faisabilité par recyclage lors de l'élaboration de nouveaux alliages.

Alliages non traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.

Fluidité excellente permettant la réalisation de pièces à configuration compliquée.

Alliages courants 423.0 - 443.0.

Résistance à la rupture typique comprise entre 117 et 172 MPa.

L'alliage B413.0 est reconnu pour sa très bonne coulabilité et son excellente soudabilité lequel provient de sa composition eutectique et à son point de fusion peu élevé (570°C). Cet alliage combine une ténacité modérée, un bon coefficient d'allongement et une bonne résistance à la corrosion.

Il est particulièrement recommandé pour des pièces moulées résistantes à la fatigue, aux formes compliquées, avec des surfaces minces et étanches.[1]

II.2.1 Alliages Aluminium-Silicium

Le diagramme d'aluminium montre l'existence de deux solutions solides α et β .

La première contient jusqu'à 1,65 % de Si, la seconde contient jusqu'à 3 % d'aluminium.

Un eutectique existe à 12,7 % de Si.

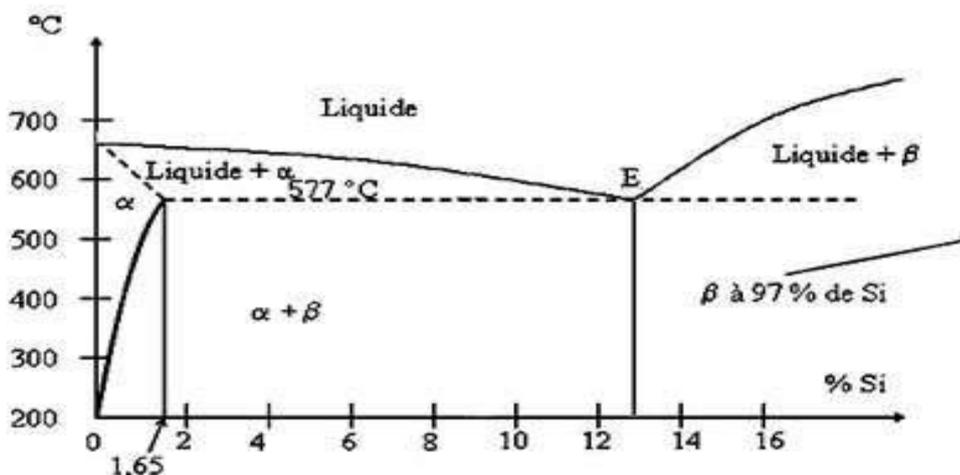


Figure 16 Diagramme Al - Si

La faible solubilité du Si dans l'aluminium et le phénomène de surfusion font que le Si (b) de l'eutectique forme des cristaux polyédriques importants qui rendent l'alliage fragile et difficilement usinable.

Pour cette raison, tous les alliages Al-Si hypoeutectiques doivent subir un traitement de modification.

On traite le bain de fusion avec du sodium (Na), du strontium (Sr) ou encore de l'antimoine (Sb) avant la coulée.

Le traitement d'affinage a pour but d'augmenter le nombre de sites de cristallisation de la phase proeutectique et consiste à ajouter des éléments affinaux au bain de fusion comme le titane ou le bore pour les hypoeutectiques ou du phosphore pour les hypereutectiques.

Ces deux traitements ont pour effet d'augmenter la résistance mécanique :[7]

II.2.1.1 Le Silicium pour effet

D'améliorer la coulabilité de réduire la criquabilité et l'aptitude à la retassure. de diminuer le coefficient de dilatation.

D'une manière générale, les Al-Si sont les alliages d'aluminium qui présentent les meilleures propriétés de fonderie.

Applications : Automobile, aviation, mécanique, appareillages électriques, chimie.[9]

II.2.2 Microstructure des Alliages d'Aluminium de Fonderie

La structure des alliages d'aluminium de fonderie comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypoeutectiques), des eutectiques plus ou moins complexes (binaires, ternaires) et des constituants intermétalliques.

II.2.3 Solidification

Pour l'aluminium pur, la solidification se fait a température constante a 660 °C.

Quand un second élément est ajoute a l'aluminium, il fait baisser la température de fusion (de solidification) c'est le cas du Si qui fait baisse le point de fusion de l'aluminium, et l'Al fait aussi baisser le point de fusion du Si.

La composition avec la plus faible température de fusion est l'eutectique (12,6% Si pour l'alliage binaire).

❖ Au point eutectique se produit la réaction suivante :



Suivant le diagramme de phase Al-Si on peut classer les alliages Al-Si en 3 catégories :

- 1) Les alliages hypoeutectiques : qui contiennent 5% a 10% Si
- 2) Les alliages eutectiques : avec 10% a 13% Si
- 3) Les alliages hypereutectiques : Ces alliages contiennent plus de 13% Si

Pour un alliage Al-Si hypoeutectique, la premiere etape de la solidification est la formation des premiers cristaux d'aluminium contenant 1% Si, la solidification continue et la concentration du Si dans le métal liquide augmente car le Si est ségréé et s'accumule dans la phase liquide, le diagramme de phase dit qu'a l'équilibre seulement 13% de silicium se trouve dans l'aluminium solide, les 87% restants sont dans le metal liquide qui entoure les cristaux d'aluminium solidifiés, et plus le Si s'accumule dans le liquide plusson point de fusion baisse.[11]

La ségrégation continue jusqu'au point ou le liquide contient 12,6% Si pour refroidir a la temperature eutectique et former le mix eutectique Al-Si a la morphologie dendritique.

Pour les alliages hypereutectique, une partie du silicium se précipite en premier et forme une phase primaire a la morphologie polygonale.

La seconde phase a se former étant des petites fraction volumiques de dendrites d'aluminium, ensuite c'est la réaction eutectique qui prend place.[12]

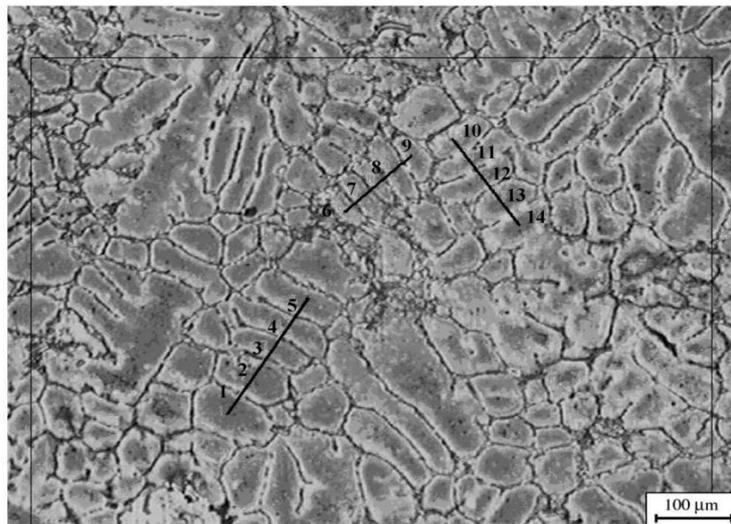


Figure 17 – Micrographie optique illustrant la mesure des espaces des bras dendritiques secondaires (SDAS) [3]

II.2.4 SDAS

Lors de la solidification de l'aluminium, des dendrites se forment à partir du métal liquide.

L'espacement entre les bras de ces dendrites est contrôlé principalement par la vitesse de solidification.

La mesure de l'espacement entre les bras dendritiques permet de donner une indication sur la vitesse de solidification de l'alliage.[6]

Il existe au moins 3 mesures utilisées pour décrire le raffinement dendritique :

- Dendrite Arm Spacing
- Dendrite Cell Intervalu
- Dendrite cell

L'espacement des bras dendritiques secondaires (SDAS) reste néanmoins la mesure la plus utilisée pour quantifier le raffinement microstructural et la vitesse de solidification.

La valeur du SDAS est inversement proportionnelle à la vitesse de solidification, et un faible SDAS est préférable pour les propriétés mécaniques.

Puisque le SDAS dépend quasi exclusivement de la vitesse de solidification, ses valeurs varient en fonction du procédé de moulage, de 100 µm à 1000 µm pour le moulage

en plâtre, 50 μm à 500 μm pour le moulage en sable, de 30 μm à 70 μm pour le procédé de moulage en coquille et de 5 μm à 15 μm pour le moulage sous pression.

Le SDAS influe sensiblement sur les propriétés mécaniques.

Selon Ceschini et al. son effet est important sur la résistance à la traction, la dureté et sur l'élongation à la rupture, mais son effet est négligeable sur la limite élastique.

Une faible valeur de SDAS améliore la ductilité de l'alliage car elle permet de réduire les porosités et favorise le développement de particules de Si fines et distribuées de façon homogène

Le mode de rupture est lui aussi influencé par les valeurs du SDAS.

Wang et al. a trouvé que pour les grandes valeurs de SDAS ($>50 \mu\text{m}$) la rupture se fait au niveau des joints de grains.

Tandis que pour les faibles valeurs de SDAS, la rupture est inter granulaire et le mode de rupture est ductile, tandis que pour les alliages à SDAS élevé, la fracture se fait par cisaillement.

Le SDAS a aussi un effet sur la taille des phases intermétalliques de fer, car une grande vitesse de solidification laisse peu de temps aux composés intermétalliques de croître.

Cet effet sur la taille des composés intermétalliques est d'autant plus important quand le taux de Si est élevé.[9]

II.2.5 L'Eutectique Al-Si

La formation de l'eutectique Al-Si Durant la solidification des alliages hypoeutectiques Al-Si, les dendrites d'Al germent et croissent en premier, suivi par la germination et la croissance de l'eutectique Al-Si.

Shankar et Al ont proposé une théorie qui détaille ces étapes.

Cette théorie est basée sur le fait que le fer est une impureté inévitable dans les alliages Al-Si, et que ces traces de fer jouent un rôle important[9]

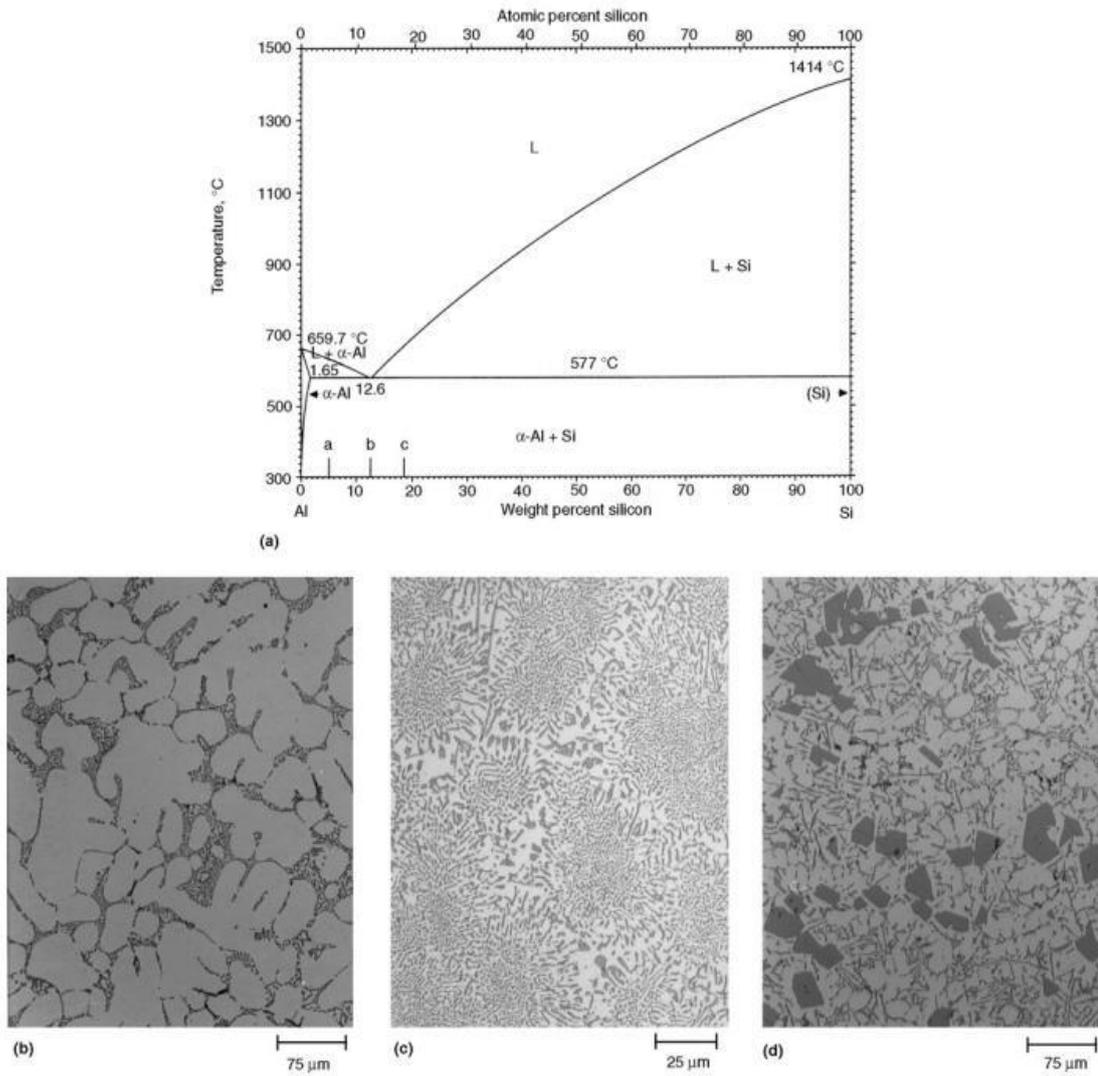


Figure 18 Diagramme et Diagramme Al-Si[3]

- (a) Diagramme d'équilibre Al-Si.
- (b) Microstructure d'un alliage hypoeutectique
- (c) Microstructure d'un alliage eutectique.
- (d) Micro-structure d'un alliage hypereutectique ($\times 150$)

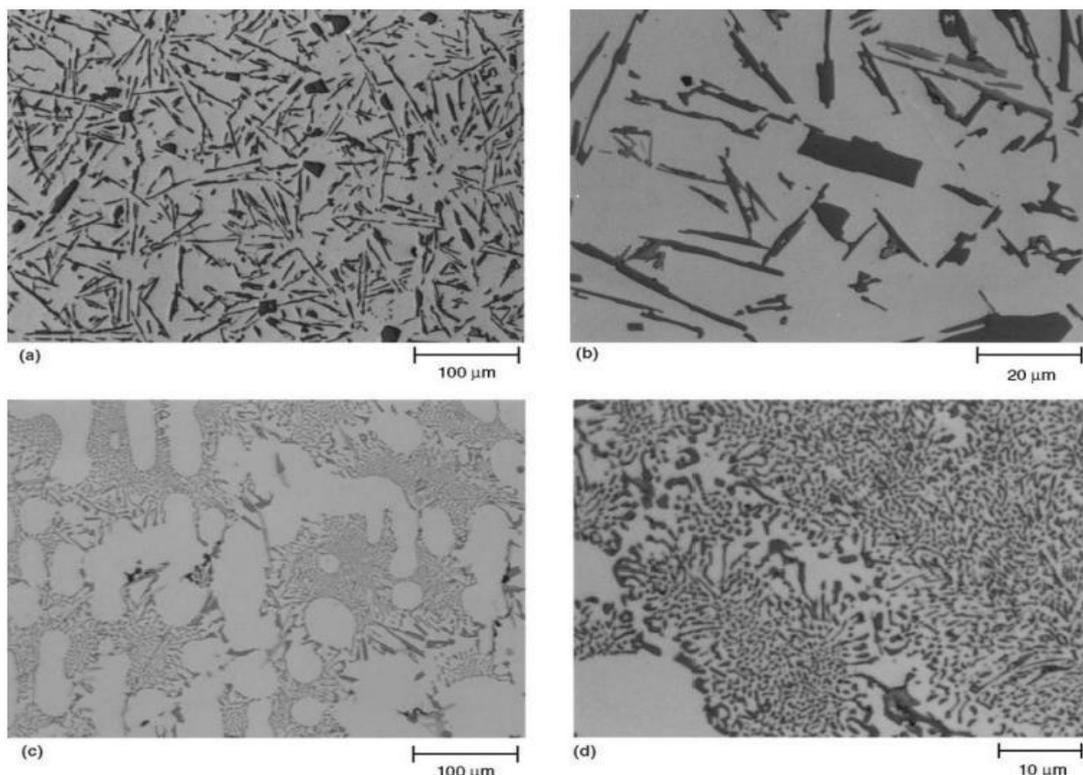


Figure 19 Micrographies optiques d'un alliage AlSi11.[7]

- (a)(b) alliage brut, $\times 150$ et $\times 750$ respectivement.
- (c)(d) alliage modifié, $\times 150$ et $\times 1200$ respectivement dans la germination.

Après que les dendrites d'Al germent a la température du liquidus, les particules de β -Fe germent pendant la croissance des dendrites d'Al, a la température de l'eutectique ou au delà.

Les particules de Si eutectique germent sur les particules β -Fe.

La croissance des dendrites d'Al primaire continue jusqu'à ce qu'elles se heurtent aux cristaux d'Al eutectique.

L'état du bain pendant la germination eutectique est affecté par les réactions qui ont précédé celle ci, spécialement par la croissance dendritique qui peut affecter et la distribution des germes hétérogènes et les concentrations dans les zones proches de l'interface liquide-dendrite, ce qui peut avoir des conséquence sur la germination du Si.[19]

II.2.5.1 La Modification de L'Eutectique

Les propriétés des alliages Al-Si peuvent être affectées par la modification de la forme de l'eutectique.

Un eutectique fin et fibreux peut être obtenu en combinant une grande vitesse de solidification et l'addition de certains éléments.

Le sodium, le strontium, le calcium et l'antimoine sont parmi les éléments utilisés pour achever la modification de l'eutectique pendant la solidification.

Le sodium est le modifiant le plus puissant mais son effet est éphémère à cause de l'oxydation, le strontium est plus stable mais nécessite une bonne vitesse de solidification pour être efficace.

Le calcium est un faible modifiant mais bon marché et l'antimoine a un effet durable mais donne un eutectique lamellaire fin au lieu de la structure fibreuse.

Le strontium est généralement ajouté via un alliage mère qui peut contenir jusqu'à 10% Sr. [17]

Le Sr a la faculté de ne pas trop dégrader la qualité du métal en fusion, contrairement au sodium métallique qui provoque des turbulences et fait augmenter le niveau d'hydrogène.

Pour les alliages hypereutectique Al-Si, c'est le phosphore qui est ajouté pour raffiner les particules de Si primaire.

Le raffinement de la microstructure du au phosphore est plus efficace pour les alliages hypereutectiques que la modification de la forme de l'eutectique

Les alliages Al-Si contenant du P peuvent être refusionnés et resolidifiés sans perdre l'effet qu'a le phosphore sur la microstructure.

À de fortes concentrations, le phosphore forme des particules compactes d' Al_3P , ces particules servent de points d'ancrage pour la germination et la croissance du Si et leur confère une morphologie particulière, tandis qu'à de faibles concentrations, les particules d' Al_3P germent elles mêmes sur des films d'oxydes.

Le Silicium germe sur les particules d' Al_3P et croît sur les films d'oxydes, ce qui donne au Si une morphologie plate. [9]

L'addition de Sr permet d'éliminer les particules d' Al_3P et les films d'oxydes comme sites de germination préférentiels pour le Si, et l'eutectique Al-Si croît à une température plus basse.

Il n'existe pas encore de consensus scientifique sur le mécanisme de modification de l'eutectique par le Sr.

Il a été montré que l'addition de Sr fait baisser la fréquence de germination des cristaux de Si eutectique.

Selon McDonald et al. le Sr altère la germination du Si eutectique à travers l'empoisonnement des sites de germination qui sont les impuretés.

D'après Timpel et al. c'est la co-ségrégation Sr-Al-Si qui inhibe et ralentit la croissance de la phase eutectique du Si et induit un changement de sa morphologie.

Le Sr est ségrégué avec l'Al et le Si dans la phase de Si eutectique selon deux mécanismes différents :

Type I : la ségrégation est responsable de la formation de macles multiples dans le cristal de Si et active sa croissance dans différentes directions cristallographiques.

Type II : ce type de ségrégations restreignent la croissance du Si eutectique et contrôlent ses ramifications.[16]

II.2.6 Phases Intermétalliques

II.2.6.1 Phases Intermétalliques de Fer

Dans la production commerciale d'aluminium, le fer et d'autres impuretés sont inévitables, surtout lorsque des alliages recyclés sont utilisés, car la solubilité du fer dans l'aluminium liquide est élevée, conduisant à une éventuelle dissolution de pièces ferreuses quand elles sont en contact avec l'aluminium liquide.

La solubilité solide du fer dans l'aluminium quand elle est très faible, seulement 0,05% à 660 °C, et encore moins à température ambiante, ou en présence d'autres éléments d'alliages qui forment des composés avec le fer.

Ce qui fait que selon la température et la composition chimique du mix, ainsi que d'autres facteurs, le fer peut se précipiter en tant que composé. . [9]

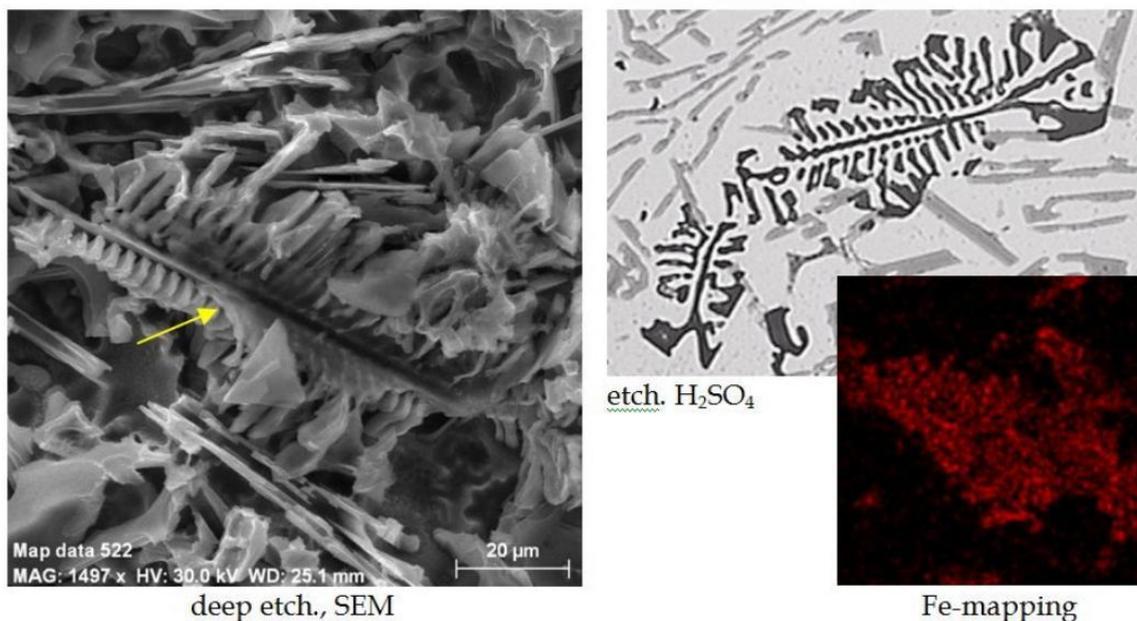


Figure 20 – Morphologie de la phase α -Fe intermétallique, avec différentes morphologies. [3]

Plusieurs phases intermétalliques riches en fer ont été identifiées dans les alliages de fonderie Al-Si, parmi eux α ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ou $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$, β - Al_5FeSi , π - $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$, et δ - Al_4FeSi

Le fer est considéré comme l'impureté la plus préjudiciable aux propriétés mécaniques, principalement à cause de la formation du composé intermétallique fragile β -Fe. [9]

II.2.6.2 La Phase α -Fe

La phase α -Fe peut se trouver sous forme d'écritures chinoises si la phase se crée lors de la solidification euetique, comme elle peut se trouver sous forme de polyèdres si elle se précipite comme phase primaire.

La présence d'éléments comme le chrome favorise l'apparition de la phase en polyèdre, appelée phase "Sludge", car le chrome comme le fer et le manganèse ont tendance à se ségréger au fond du bain ou des fours du maintien et forment des particules solides de la phase $\text{Al}_{15}(\text{FeMnCr})_3\text{Si}_2$ (Sludge)[9]

Ces phases à la morphologie en polyèdres ont une dureté, un point de fusion et une densité élevés comparés à la matrice α -Al, elles agissent comme des points d'ancrage pour les inclusions lors du moulage, et finissent par endommager les outils

durant l'usinage des pièces moulées, de plus elles limitent le flux de métal durant le moulage, ce qui les rend indésirables dans les alliages de fonderie.

De l'autre côté, la morphologie compacte sous forme d'écriture chinoise de la phase α -Fe semble inhiber la propagation des fissures car entourée par une phase ductile, à matrice α -Al.

La phase α -Fe sous forme d'écritures chinoises se précipite lors de la solidification eutectique à partir de la phase "Sludge", et forme un eutectique avec α -Al, et quand α -Al termine sa coalescence, la croissance de l'eutectique provoque la transition de la morphologie en polyèdres vers la morphologie dendritique .

La morphologie de cette phase dépend des concentrations en éléments d'addition et du Sludge Factor (SF).

Jorstad a défini le Sludge Factor comme suit :

$$\text{Sludge Factor (SF)} = (1 \times \text{wt\%Fe}) + (2 \times \text{wt\%Mn}) + (3 \times \text{wt\%Cr}).$$

Plus la valeur de ce facteur augmente, plus la quantité des phases polyédrales augmente, ces phases commencent à apparaître lorsque la valeur du Sludge Factor atteint environ 1,25% .

Les composés intermétalliques α -Fe se précipitent sur les films d'oxydes, et les font couler sous leur poids, et limitent de ce fait les fissures dues aux oxydes dans les alliages d'aluminium de fonderie.[8]

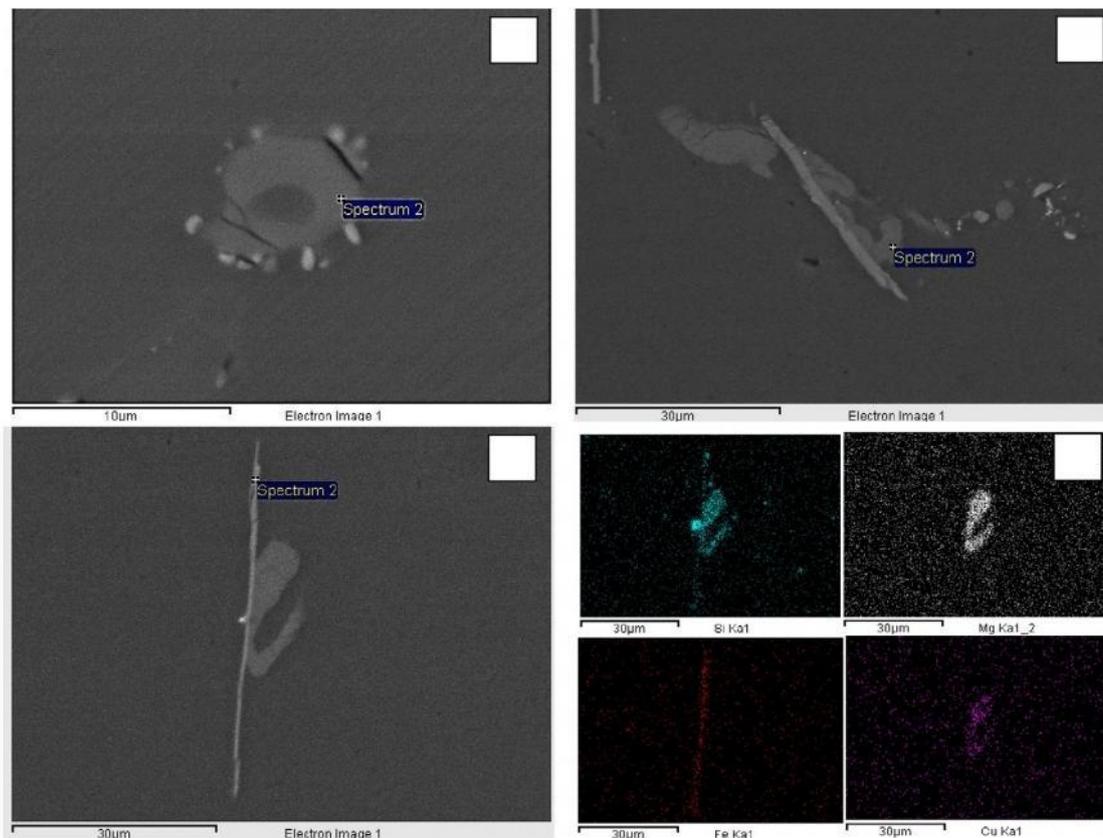


Figure 21– Micrographies électroniques montrant. [2]

(a) La phase π . (b)(c) la phase β -Fe et Q. (d) Mapping EDS

II.2.6.3 La Phase β -Fe

Les phases β -Al₅FeSi se cristallisent durant la solidification même a de faibles teneurs en fer, a cause de la faible solubilité solide du fer dans la matrice α -Al.

La phase β -Fe est associée a des niveaux de fer proches de 1%, si on se fie au diagramme de phase Al-Si-Fe, mais la ségrégation du fer durant la solidification permet à la phase β de se former même lorsque le taux de Fe est largement inférieur à 1%.

Cette phase primaire sous forme de plaquettes, même si elle apparait comme des aiguilles dans les micrographies optiques, ces aiguilles peuvent atteindre plusieurs millimètres de longueur, et c'est de loin la phase la plus prejudiciable pour la résistance et la ductilité des moulages.[9]

Il y a eu pendant longtemps des incertitudes sur la structure cristalline de la phase β -Fe, Hwang et al apporte la preuve finale qu'elle se cristallise dans un système orthorhombique.

L'augmentation de la teneur en fer change la séquence de précipitation de la phase β . A des faibles teneur en Fe, la phase β -Fe est sensée se former à une température plus faible à travers une réaction eutectique ternaire.

Avec des niveaux élevés de fer, la majorité de la phase β se précipite avant le Si eutectique conduisant à la formation de grosse plaquettes β -Fe binaires.

Cette phase peut bloquer les canaux d'alimentation plus tôt, et causer des problèmes d'alimentation, et des porosités.

Selon Samuel et al, la variation du ratio atomique Fe/Si dans les analyses des phases β -Fe qu'on trouve dans la littérature serait très probablement due a la transformation partielle de la phase δ vers la phase β a travers la décomposition péritectique suivante :

$$\text{Liq} + \delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2 \rightarrow \beta\text{-Al}_5\text{FeSi} + \text{Si}$$

Suivant cette réaction, les particules de la phase δ commencent leur transformation en phases β dans des conditions de refroidissement hors-équilibre avec de faibles temps de solidification, et un taux élevé de Si dans l'alliage.

Seuls les particules de phase δ très fines peuvent finir complètement la décomposition péritectique, car la réaction est entièrement contrôlée par la diffusion du silicium hors de la phase δ , ce qui est généralement lent, surtout lorsque la teneur en Si est élevée.[9]

Dans le cas de larges particules de phase δ , la réaction s'épuise avant son achèvement, résultant en la formation de particules semi composes/semi précipités δ - β

Les phases β -Fe sont connues pour être préjudiciables pour les propriétés mécaniques, cela est du notamment a leur morphologie, en plus d'être des sites d'initiation et de propagation des fissures, elles augmentent la tendance a la retassure des alliages d'aluminium de fonderie.

La précipitation de la phase β -Fe bloque les canaux d'alimentation du réseau interdendritique plus tôt. Différentes mesures sont prises pour neutraliser l'effet nuisible de la phase β -Fe, parmi elles

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

La vitesse de refroidissement est le paramètre le plus important pour contrôler la taille et la distribution de la phase β -Fe avec des vitesses de solidification élevées, comme c'est le cas dans le moulage sous pression, l'apparition de la phase Al_5FeSi est décalée vers des niveaux de fer supérieurs à 1%. L'augmentation du taux de Si aide à supprimer les grossières phases β -Fe.

Des éléments d'addition sont utilisés pour éviter la formation de ces phases β -Fe, ou pour diminuer leurs effets sur les propriétés mécaniques.

Le manganèse est l'élément le plus utilisé, il permet d'obtenir la phase α -Fe sous forme d'écritures chinoises au lieu de la phase β - Al_5FeSi . Un rapport $\%Fe/\%Mn = 2/1$ est idéal pour avoir le maximum de α -Fe et le minimum de β -Fe. . [9]

Le Mg quand a lui semble contrer l'effet du manganèse et fait augmenter le nombre de phases β -Fe.

L'addition de Strontium réduit la quantité et la fraction volumique de la phase β - Al_5FeSi à travers sa dissolution et sa fragmentation, mais aussi en réduisant le phénomène de germination (sympathetic nucleation) en empoisonnant les sites de germination des aiguilles β -Fe .

La modification au phosphore quand a elle encourage la formation de β - Al_5FeSi . . [9]



CHAPITRE III

TRAITEMENT THERMIQUE

III TRAITEMENT THERMIQUE

III.1 Introduction

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages.

De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.).

Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion).

En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide.

La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement).

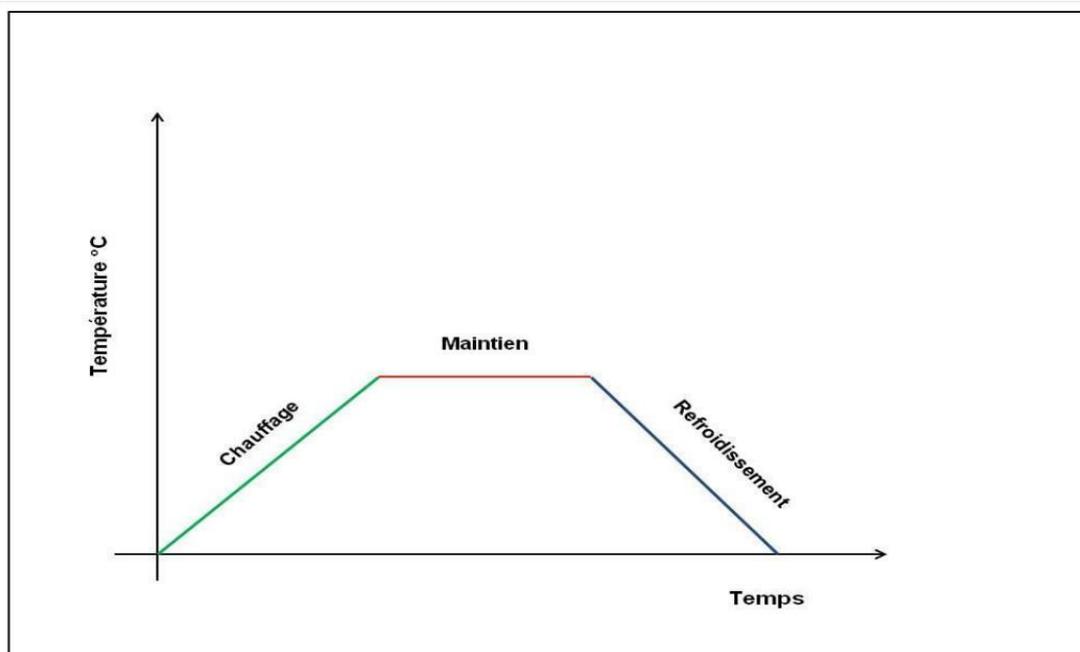


Figure 22 le cycle thermique



III.2 Les effets des Traitements Thermiques Pour une Pièce Dépendent

- de la température maximale.
- de la durée de maintien de la pièce à cette température.
- du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température.
- de la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement.
- des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).[16]

III.3 But

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

Grâce à la sélection de caractère, il est possible d'obtenir des propriétés qui sont en grande partie responsables de l'utilisation actuelle des pièces moulées en alliage d'aluminium dans pratiquement tous les domaines d'application.

Grâce à la sélection du traitement, il est possible d'obtenir des propriétés qui sont en grande partie responsables de l'utilisation actuelle des pièces moulées en alliage d'aluminium dans pratiquement tous les domaines d'application. Le traitement thermique est utilisé pour décrire toutes les pratiques thermiques destinées à modifier la structure métallurgique des produits, et c'est de cette manière que les caractéristiques physiques et mécaniques sont contrôlables. [10]

Un ou plusieurs des objectifs suivants sont à la base du choix du traitement thermique:

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



La polyvalence de l'aluminium est reflétée par le nombre d'alliages qui ont été développés et utilisés dans le commerce.

Une large gamme de combinaisons souhaitables de propriétés mécaniques et physiques peut être réalisé par le traitement thermique d'un grand nombre de ces alliages [10]

III.4 Désignation

Il existe plusieurs façons de présenter une pièce faite d'un alliage d'aluminium. De façon générale, on a les cinq désignations suivantes : F, O, W, T et H, qui représentent le traitement thermique ou le durcissement subi par la pièce.

Les pièces portant la mention F sont livrées telles que produites. Ces pièces ont été mises en forme sans qu'il n'y ait un contrôle des conditions thermiques ou des contraintes de mise en forme.

Les pièces de type O ont subi un recuit et une recristallisation. est utilisé sur les produits coulés, pour avoir une meilleure ductilité ou pour une meilleure stabilité des dimensions.

Le symbole O peut être suivi d'un chiffre, pour avoir plus de précisions sur le traitement utilisé.

Les pièces identifiées d'un W ont subi une mise en solution, suivie d'une trempe. Cela est utilisé seulement pour les pièces qui ont un vieillissement naturel rapide qui se produit immédiatement après la mise en solution.

Le temps requis au vieillissement naturel doit être indiqué pour que la désignation soit acceptable, par exemple : W lh. Pour être dans la catégorie T, il faut subir un traitement thermique qui fournit un produit stable après la trempe et qui est différent des trois autres traitements. [13]

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

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

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

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

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

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

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

T7 : mise en solution et traitement de stabilisation.

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

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

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

Pour tous les traitements thermiques pour lesquels il n'y a pas de mention de travail à froid, ces alliage n'en ont pas subit.

La désignation H représente un état écroui. H1X représente un écrouissage seulement et le X indique le degré d'écrouissage.

H11 : mou

H12 : 1/4 dur

H14 : 1/2dur

H16:3/4dur

H18:4/4dur

H19 : extra dur

Les notations commençant par un H2X, X variant de 2 à 9, représentent des pièces qui ont subi un écrouissage suivi d'un recuit de restauration. Les H3X sont un traitement d'écrouissage suivi d'une stabilisation.[18]



III.5 Traitements de Durcissement Structural

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

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

La série provoque de très fines particules appelées «précipités», une deuxième phase répartie uniformément dans la matrice initiale.

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

- La mise en solution.
- La trempe.
- Le revenu (vieillissement)

III.6 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. Si, Mg, Cu) 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

III.7 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. [19]

III.7.1 Milieux de Trempe

La majorité des trempes se produit dans l'eau.

On peut contrôler le taux de refroidissement des trempes à l'eau en faisant varier la température de cette dernière. De plus, au moment de l'immersion, il est possible de contrôler la stabilité du film de vapeur qui se produit autour de la pièce. Ce film de vapeur ralentit aussi le taux de refroidissement.

On peut le stabiliser en ajoutant des additifs ou obtenir le même effet en abaissant la tension de surface. D'autres additions, comme le polyalkylène glycol (huile synthétique) forment un film isolant stable qui ralentit aussi le taux de refroidissement. Plus le film est épais, plus le taux de transfert de chaleur diminue.

L'addition de ce polymère aide aussi à uniformiser le mouillage de la pièce et minimise ainsi la distorsion de la pièce.

Le film ainsi créé doit résister à l'agitation durant la trempe.

L'agitation a un effet important, surtout lorsque la température de l'eau est supérieure à 60°C.

Le refroidissement des pièces en aluminium lors de la trempe ne se produit pas complètement de façon homogène.

La surface des pièces trempées dans un liquide subit plusieurs régimes différents de transfert de chaleur au cours du refroidissement.

Le refroidissement lors de la trempe à l'eau commence assez lentement, car il y a formation d'un film de vapeur isolant qui se développe autour de la pièce.

Ce film de vapeur empêche l'eau de mouiller la surface et est caractérisé par un faible taux de transfert de chaleur.

Il se produit ensuite une zone où le film de vapeur devient instable et où il y a un mouillage intermittent qui se produit.

Lorsque la température diminue, la couche de vapeur se désintègre et un mouillage permanent se produit. Dans cette zone, le transfert de chaleur devient très rapide et le reste jusqu'à la fin de la trempe.

La courbe de refroidissement de la trempe à l'air n'a pas ces variations de taux de refroidissement, elle montre plutôt un refroidissement quasi constant du début à la fin pièce.[3]

III.7.2 Effets de la Géométrie et Contraintes Résiduelles

Les taux de refroidissement des échantillons sont généralement uniformes, car les échantillons sont petits et refroidissent rapidement. Par ailleurs, plus la pièce est épaisse, moins les propriétés mécaniques sont élevées.

Cela est dû au taux de refroidissement beaucoup plus lent des pièces de grande épaisseur. Avec une pièce dont la géométrie comporte des parties minces et des parties plus épaisses, il y a une grande différence entre le taux de refroidissement de chacune.

Les propriétés mécaniques diffèrent pour chacune des parties. De plus ces différences d'épaisseur génèrent une forte concentration de contraintes internes.

Le gradient de température qui se forme lors de la trempe est à l'origine de ces contraintes internes.

Il provoque des déformations plastiques provenant des différentes zones de compression et d'expansion de la pièce.

Comme la surface refroidit en premier, elle tend à se contracter et à compresser l'intérieur.

La réaction qui se produit alors laisse la surface dans un état de tension. Lorsque le centre de la pièce refroidit, la surface le restreint dans sa contraction.

Le résultat final laisse la surface en compression et le centre, sous contrainte. Ces deux forces s'équilibrent à l'intérieur de la pièce.

Plus le taux de refroidissement est élevé, plus les contraintes internes sont grandes. Lorsque ces forces sont trop importantes, il en résulte une distorsion ou une déformation plastique des pièces.

Une des façons de minimiser les contraintes internes lors de la trempe de pièces constituées de différentes épaisseurs, consiste à recouvrir d'isolant les parties plus minces pour ralentir leur refroidissement.[19]

III.8 Vieillissement

Puisque la solution solide de trempe est sursaturée en éléments d'alliage, l'excès a tendance à précipiter.

Ce phénomène est appelé « vieillissement ou maturation ».

Tous les alliages durcissables vont subir ce phénomène.

Cependant, puisque l'excès en élément d'alliage est réparti uniformément dans l'alliage, les précipités seront très petits et nombreux.

On peut donc dire que plus l'alliage vieillit, plus il durcit jusqu'à un maximum. Au-delà de cette limite, les précipités formés deviennent trop gros et l'alliage devient de plus en plus fragile.

Il existe deux types de vieillissement :

- le vieillissement naturel.
- Le vieillissement artificiel.

Le vieillissement naturel se fait à température ambiante et sur une période de temps beaucoup plus longue.

Seuls les alliages d'aluminium et de zinc sont susceptibles d'être durcis de façon significative par un vieillissement naturel.

Le vieillissement artificiel est réalisé en chauffant et en maintenant l'alliage à la température de revenu (ou de vieillissement).

On crée ainsi une diffusion plus rapide, ce qui favorise une précipitation plus rapide.[3]

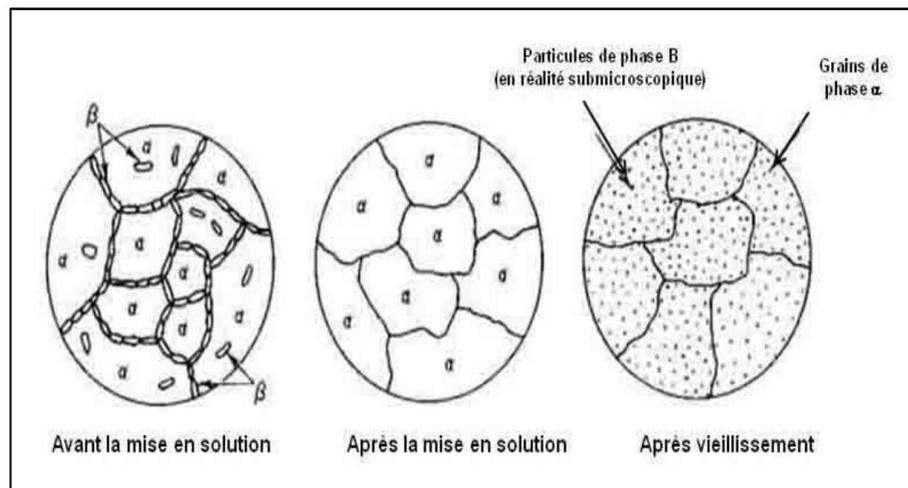


Figure 23 mise en solution[1]



III.9 Phénomènes de Durcissement

Il est à noter qu'il existe deux phénomènes principaux de durcissement:

- le durcissement structural.
- le durcissement par solution solide.

Ce dernier résulte de la création de champ de contraintes, autour des atomes étrangers, dans la solution solide formée.

Cependant, ce type de durcissement ne nous concerne pas, puisque nous nous intéressons particulièrement aux alliages Al-Si destinés à l'industrie. En effet, le pourcentage en Si de ces derniers (2 à 25 %), n'implique pas la solution solide Al-Si.[21]

III.10 Durcissement Structural (Zones Guinier-Preston)

Les mécanismes du durcissement structural ont été imaginés bien avant le développement des techniques d'observation par MET qui permettent, entre autres, l'étude des interactions locales précipité/ dislocations, ainsi que les traitements statiques qui rendent compte de la distribution des obstacles et de leur résistance à l'échelle d'un grain.[2]

III.11 Précipitation dans les Alliages à Durcissement Structural

Le durcissement structural, résultant de la précipitation de fines particules de phases métastables ou stables, présente un intérêt pratique particulier ; à la fois parce qu'il permet d'atteindre un niveau important des caractéristiques mécaniques et aussi parce qu'il peut être ajusté et contrôlé par simple traitement de revenu.

Ce dernier peut être effectué soit sur demi-produits (avant découpage, usinage mécanique ou chimique ...etc.), soit sur pièces finies (après mise en forme, assemblage, etc.)

Les propriétés mécaniques et la dureté des alliages d'aluminium à durcissement structural, sont liées aux changements de microstructure, notamment à travers la formation de zones GP ou de précipités de phases métastables.

La précipitation est influencée conjointement par la nature des éléments d'addition et par le traitement thermique.

Le processus de précipitation débute par la mise en solution des solutés dans l'aluminium.

En portant l'alliage à une température supérieure à la température de solvus TS pendant une durée suffisante, on obtient une solution solide sursaturée en solutés et en lacunes.

Cette sursaturation influence la cinétique de précipitation.

Au cours du maintien de l'alliage à une température constante (ou maturation), se forment des zones GP en grande densité.

Ces dernières consistent en de petits amas d'atomes solutés qui introduisent des distorsions élastiques dans le réseau cristallin de l'aluminium et qui sont donc responsables du durcissement.

Les atomes de soluté des zones GP se placent toujours aux noeuds du réseau de la matrice d'aluminium. Si l'on fait subir ensuite à l'alliage un revenu à une température située entre 100°C et 200°C pendant une durée variable, la précipitation évolue par dissolution d'une partie ou de la totalité des zones GP et par formation de nombreux précipités de transition, de taille nanométrique, qui possèdent leur propre structure cristalline et chimique.

Le mécanisme de durcissement de l'alliage par précipitation implique la formation d'amas cohérents d'atomes de soluté c'est à dire que les atomes de soluté rassemblés dans un amas doivent avoir toujours la même structure cristalline que la phase du solvant.

Ceci crée alors beaucoup de distorsion car les paramètres cristallins des précipités peuvent être légèrement différents de ceux de la matrice du métal.

Conséquemment, la présence de ces particules de précipités procure une plus grande résistance en obstruant et en retardant le mouvement des dislocations.

Dans les alliages d'aluminium pouvant subir un traitement thermique, on retrouve trois classes de particules de précipités : des précipités cohérents et semi-cohérents, lesquels sont la source du durcissement par précipitation et deux types de particules incohérentes :

des particules grossières ($> 1 \mu\text{m}$), [20]



III.12 Conclusion

Les traitements thermiques, en permettant l'obtention de meilleures propriétés pour les matériaux métalliques, par une bonne adaptation de leur structure, contribuent à l'amélioration du comportement en service des pièces métalliques et à leur facilité de fabrication mais, chargés d'améliorer les propriétés des alliages, ils peuvent apporter néanmoins quelques défauts indésirables : on les rencontre au niveau des variations de forme ou de dimensions des pièces traitées, des contraintes résiduelles et de diverses altérations.

Conclusion Générale

Les alliages de fonderie Al-Si sont largement utilisés dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique grâce à leurs excellentes propriétés de moulage, leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leurs propriétés mécaniques intéressantes.

L'effet du silicium dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des caractéristiques de la fonderie. L'addition de silicium améliore la fluidité de façon spectaculaire, et la résistance à chaud.

Les Al-Si sont les alliages d'aluminium qui présentent les meilleures propriétés de fonderie.

La structure des alliages d'aluminium de fonderie comprend des solutions solides sous forme de dendrites

on peut classer les alliages Al-Si en 3 catégories :

- 1) Les alliages hypoeutectiques : qui contiennent 5% à 10% Si
- 2) Les alliages eutectiques : avec 10% à 13% Si
- 3) Les alliages hypereutectiques : Ces alliages contiennent plus de 13% Si

Les propriétés des alliages Al-Si peuvent être affectées par la modification de la forme de l'eutectique.

REFERENCES

- [1] Ben achour, M traitement thermique des alliages d'aluminium de fonderie AL-SI (2014).
- [2] Nour el dine houa. les alliages d'aluminium de fonderie Al-Si-Cu (2016)
- [3] NEMRI Yassin. Les alliages d'aluminium de fonderie Al-Si.
- [4] J.G Kaufman : Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. 2000.
- [5] MICHAEL V. GLAZOFF VADIM S. ZOLOTOREVSKY, NIKOLAI A. BELOV : Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., Oxford, 1st édition, 2007.
- [6] J Gilbert Kaufman et Elwin L Rooy : Castings Properties , Processes , and Applications. 2004.
- [7] S.Zakia , influence d'éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des Alliages Al-Si
- [8] C.Vargel le comportement de l'aluminium et de ses alliages.
- [9] Roger Develay aluminium non allie technique de l'ingenieure
- [10] Aksenov.A.A Belov.N.A, ESkin.G : Multicomponent Phase Diagrams.
- [11] Geoffrey K. Sigworth : Fundamentals of solidification in aluminum castings. International Journal of Metalcasting, 8(1), 2014.
- [12] M Tebib, F Ajersch, A M Samuel et X G Chen : Solidification and microstructural evolution of hypereutectic Al-15Si-4Cu-Mg .
- [13] Aksenov.A.A Belov.N.A, ESkin.G : Multicomponent Phase Diagrams
- [14] <http://www.world-aluminium.org/statistics>
- [15] RICHARD, M. (1998). "Application de la norme NF en 1706 aluminium et alliages d'aluminium-pieces moulees." Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui(178):
- [16] C. Marty, « Procédés de mise en forme T 3 » Hermès Science, Paris 1999, France.
- [17] Cours de sciences des materiaux : Fabien Baillon, Philippe Lours : École des Mines d'Albi-Carmaux <http://www.mines-albi.fr/>. Publié le Septembre 2005
- [18] A.Boushasa. Mémoire de magister. Université de Constantine (2005).
- [19] T. Abid. Mémoire de magister. Université de Constantine (2007).
- [20] JL Jorstad : "Understanding" Sludge. Die Cast. Eng, 30(6):30–36 , 1986.
- [21] J.G Kaufman : Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. 2000.
- [22] JE Sjölander et S Seifeddine : Artificial ageing of Al – Si – Cu – Mg casting alloys. 528:7402–7409, 2011.