

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

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie
Mécanique

Option : Matériaux et traitement de surfaces

Thème :

Les alliages d'aluminium de
fonderie AL-SI-CU

Proposé et dirigé par :

Promoteur : Pr. Hadji mohamed

Co-promoteur : Mr. nemri yacine

Présenté par :

noureddine houa

Année universitaire : 2015/2016

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma chère maman

Mes frères

Ma sœur

A ma belle famille

*A tous mes amis de l'université et en dehors de
l'université.*

Noureddine

Conclusion Générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux alliages d'aluminium de fonderie du groupe Al-Si, Afin de réaliser les principales étapes de l'élaboration de nos alliages. Premièrement nous avons étudié les effets des éléments d'addition et d'autre part, l'influence des traitements thermiques sur les propriétés de ces alliages. Nous avons d'abord procédé au traitement thermique usuel, consistant en la mise en solution, suivi d'une trempe à l'eau, puis d'un traitement de revenu.

Nos investigations nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

-La température optimale pour la mise en solution est 490°C qui finit par la valeur maximal de résilience 26,6 j pour l'alliage M1

-Les microstructures des alliages étudiés montrent une différence avant et après traitements thermiques concernant la forme, les dimensions, et la répartition des phases (les symboles chinois et des phases intermétalliques sous forme de polyèdres, la présence de phase sous forme d'aiguilles).

-l'addition du Mg fait augmenter la dureté, mais fait chuter la résilience, tandis que l'addition du Zn a peu d'effet sur la dureté, mais améliore la résilience.

REFERENCES

- [1] Aluminium et alliages d'aluminium Lycée Raymond LOEWY, PDF.
- [2] Laboratoire de chimie de l'École normale supérieure (mentions « Premier aluminium, 1855 » et « Aluminium 1855, H Ste-Claire Deville »)
- [3]Mémoire de Hamza hammouda 2014 ,caractéristiques mécanique et microscopique d'un alliage d'aluminium al 10SiMg SAAD DAHLEB DE BLIDA
- [4] <http://www.lenntech.fr/aluminium-fiche-identite.htm>
- [5] <http://www.aluminium.fr/industrie/associations>
- [6] [Handbook, M. (1990). "vol. 2." Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials: 102]
- [7] www.Wikipédia.com F. d. a.
- [8] Barlas, B. (2004). Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [9] RICHARD, M. (1998). "Application de la norme NF en 1706 aluminium et alliages d'aluminium-pieces moulees." Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui(178):
- [10] JACOB, S. (2001). "Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie." Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques(M4675): M4675. 4671-M4675. 4613.
- [11] Kaufman, J. G. and E. L. Rooy (2004). "Aluminum Alloy Castings." ASM international: 295
- [12] Zakia, S. (2010). Influence d'éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des alliages al-si, Université M'hamed Bougara de Boumerdès.
- [13]:www.histalu.org/iha-rubrique-article.php.
- [14] Pedersen, L. and L. Arnberg (2001). "The effect of solution heat treatment and quenching rates on mechanical properties and microstructures in AlSiMg foundry alloys." Metallurgical and Materials Transactions A **32**(3): 525-532.
- [15] CUENIN, P. (1995). "Moulage-Noyautage." Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques(M3512a).
- [16] C. Marty, J.M Linares, « Procédés de mise en forme T 3» Hermès Science, Paris 1999, France.
- [17] Gilles DOUR, « Fonderie alliages, procédés, propriétés d'usage, défauts », Editeur Dunod 2004, France..

- [18] SHEN, P. (2012). "THE EFFECTS OF HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE AA2618 DC CAST PLATE."
- [19] Mohamed, A. (2008). Effect of Additives on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum-silicon Alloys,
- [20] George E. Tot ten, D. S. M. (2006). "handbook of aluminium volume 2 Alloy Production and materials manufacturing."
- [21] Dons, A. L., G. Heiberg, et al. (2005). "On the effect of additions of Cu and Mg on the ductility of AlSi foundry alloys cast with a cooling rate of approximately 3K/s." *Materials Science and Engineering: A* **413**: 561-566.
- [22] C. Marty, J.M Linares, « Procédés de mise en forme T 3» Hermès Science, Paris 1999, France.
- [23] Handbook, A. S. M. (1992). "Vol. 3." Alloy phase diagrams 2: 44.

RESUME

Les alliages d'aluminium de fonderie sont largement employés dans l'industrie pour diverses Applications. Dans notre travail nous nous intéressons aux alliages Al-Si.

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

Ce travail a pour but d'étudier les modifications de la microstructure et les variations de propriétés mécaniques tel que la résilience, et la dureté en fonction de la composition des alliages et du traitement thermique appliqué, pour cela, 8 alliages avec différentes composition ont été étudiés **M1, M2,M3, M4, Z1,Z2, M3, M4**. Pour la première série (M1, M2, M3, M4) nous avons fait varier le taux de Magnésium, et pour la deuxième (Z1, Z2, Z3, Z4) c'est la teneur en Zinc qui a été variée. Nous avons étudié ces alliages à l'état brut, et traité thermiquement (vieillessement) et nous avons constaté une évolution de la dureté et de la résilience en fonction des taux de Zn et de Mg.

Remerciement

*Tout d'abord je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage , la santé et la patience de mener à bien mon modeste travail de PFE.*

*Je tient à remercie mon promoteur **Pr. MOHAMED HADJI** pour avoir accepté de diriger ce travail, sur le plan scientifique et humain.*

*Je remercie infiniment mon Co-promoteur **Mr Nemri yacine** pour sa disponibilité , son aide considérable et ses conseils précieux
Un très grand merci je souhaité la meilleur pour toi .*

Je remercie aussi la technicienne de laboratoire des sciences des matériaux, Mme bouafia hanifa.

Nous remercions également tous les enseignants et travailleurs de notre département.

Je souhaiterai également remercie tous mes collègues de la promotion MTS 2016 ainsi que D.Nacer et Ch.nabil, pour avoir encouragé accomplir ce travail .

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont apporté leur contribution à la réalisation de ce travail.

I.1.Historique :	1
I.2. L'obtention d'aluminium :	2
I.2.1. la bauxite :	2
I.2.2.l'alumine :	2
I.2.3. l'aluminium :	2
I.2.4. principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium :	2
I.3.l'aluminium :	3
I.3.1.principales propriétés :	3
I.3.1.1.Légèreté :	3
I.3.1.2.Résistance mécanique :	3
I.3.1.3. Résistance à la corrosion :	4
I.3.1.4.Conductivité thermique et électrique :	4
I.3.1.5.Ductilité, malléabilité :	4
I.3.1.6. Recyclabilité :	4
I.3.1.7. Imperméabilité, effet barrière :	4
I.3.1.8. Propriétés réfléchissantes :	4
I.4.Principales utilisations de l'aluminium :	5
I.4.1.Transport :	5
I.4.2.bâtiment :	5
I.4.3.Emballages :	5
I.4.4.Electricité :	6
I.4.5.Sports et loisirs :	6
I.4.6.Les objets de la vie quotidienne :	6
I.5. Les alliages d'aluminium :	6
I.6.Les alliages d'aluminium de fonderie :	7
I.6.1. Histoire :	8
I.6.2. Structure des alliages de fonderie :	9
I.6.3.Désignations :	10
I.6.3.1.Symbolisation européenne :	10
I.6.3.2.Procédés de moulage :	11
I.6.3.3.Traitement thermique :	11
I.6.4.Alliages normalisés :	11
I.6.5. Alliages non normalisés :	13
I.6.5. 1.Alliages autotremnants :	13

I.6.5. 2. Alliages à très haute résistance mécanique :	13
I.6.5. 3. Alliages ductiles pour moulage sous pression :	14
I.6.5.4. Alliages aluminium-manganèse :	14
I.6.5.5. Solidification:	14
I.6.5.6. Traitement thermique :	15
I.6.6. Les alliages d'aluminium de fonderie : Avantages et inconvénients :	15
I.6.7. Effets des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques :	16
I.6.8. Effet du traitement thermique :	18
I.6.9. Les alliages Aluminium-Silicium :	20
1.6.9.1. Alliages Al –Si :	20
1.6.9.2. Microstructure et caractéristiques des ALLIAGES Al-Si.....	20
I.6.9.3. Silicium eutectique	21
I.6.9.4. Phases intermétalliques	21
I.6.9.5. Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS).....	21
I.6.9.6. Diagrammes de phases de l'alliage Al-Si.....	22
I.7. Procédé de fonderie :	23
I.7.1. Généralités :	23
I.7.2. Moulage en sable :	23
I.7.3. Moulage naturel sur modèle :	24
I.7.4. Méthodes modernes de fonderie :	24
I.7.4. 1. Moulage par centrifugation :	24
I.7.4.2. Moulage par enrobage ou à la cire perdue :	25
I.7.5. Moulage en coquille :	25
I.7.5.1. Moulage par gravité :	25
I.7.5.2. Moulage sous pression :	25
I.7.5.3. d. Avantages et inconvénients de la coulée sous pression :	26
II.1 Introduction :	27
II.2. But :	27
II.3. Désignation :	28
II.4. Traitements de durcissement structural :	29
II.4.1. Mise en solution solide :	30
II.4.2. trempe :	30
II.4.3. Effets de la géométrie et contraintes résiduelles :	30
II.4.4. Vieillessement artificiel :	31

II.5. Phénomènes de durcissement :.....	31
II.5.1.Durcissement structural (Zones Guinier-Preston) :.....	32
II.5.2. Précipitation dans les alliages à durcissement structural :.....	32
II.6. Conclusion :.....	33
III. 1.Introduction :.....	34
III.2. Elaboration des Alliages étudiés :.....	34
III.3.Préparation et traitement thermique :	35
III.3.1. introduction :	35
III .3.Composition chimique :.....	36
III.4. Les principaux traitements thermiques :.....	37
III.4.1.La mise en solution :.....	37
III.4.2.La trempe :.....	37
III.4.3.Le revenu :.....	37
III.5. Essai dureté :.....	38
III.6.Essai de résilience :.....	39
III.7. Préparation métallographique :.....	40
III.7.1.L`enrobage :.....	40
III.7.2.le polissage :.....	41
III.7.2.1.Polissage abrasion (grossier) :.....	41
III.7.2.2.Polissage de finition :.....	42
IV.6.3.Attaque chimique :.....	42
III.7.4.Microscopie optique :.....	42
IV.1. microstructure :.....	43
IV.1.1.Sur les échantillons bruts :.....	48
IV.1.2.Effet du traitement thermique :.....	48
IV.2.dureté :.....	50
IV.2.1.Durcissement :.....	51
IV.2.1.1.Mécanisme de durcissement :.....	51
IV.2.1.2.Effet du Magnésium :.....	52
IV.2.1.3.Effet du Zinc :.....	53
IV.3.Résilience :	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Production de l'aluminium

Tableau I.2: carte d'identité de l'aluminium

Tableaux I.3 : alliage d'aluminium normalisée sous la norme européen EN

Tableau III .1 : Compositions chimiques des alliages étudiés

Tableau IV 1 : résultats obtenu après essai de résilience

Liste des figures

- Figure I .1 : Premiers culots et lamelles d'aluminium
- Figure I .2 : principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium
- Figure I .3: Schéma d'une dendrite, (Massinon D.,Constantin V., 2002)
- Figure I.4 : moulage en sable
- Figure I.5 : Moulage naturel sur modèle
- Figure I.6: Moulage sous pression
- Figure III.1 : un four à gaz de marque CIFE Impianti
- Figure III .2 : un spectromètre de marque GNR Metal Lab Plus
- Figure III .3 : Le four utilisé pour le traitement de mise en solution
- Figure III .4 : creuset en graphite et moule a lingot ouvert en acier
- Figure III .5 : pièce après moulage
- Figure III .7: cycle de traitement thermique des échantillon.
- Figure III .8: duromètre
- Figure III.9: Eprouvette normalisée
- Figure III .10.Enrobeuse
- Figure III.11 : échantillons
- Figure III .12 : Appareil de polissage de finition
- Figure III .13 : Appareil de polissage de finition
- Figure III.14: Microscope optique
- Figure IV.1.1 Microstructure de l'alliage M1 avant traitement thermique
- figure IV.1.2.Microstructure de l'alliage M2 avant traitement thermique
- Figure IV.1.3.Microstructure de l'alliage M3 avant traitement thermique
- Figure IV.1.4.Microstructure de l'alliage M4avant traitement thermique
- Figure IV.1.5.Microstructure de l'alliage Z1 avant traitement thermique
- Figure IV.1.6.Microstructure de l'alliage Z2 avant traitement thermique
- Figure IV.1.7.Microstructure de l'alliage Z3 avant traitement thermique
- Figure IV.1.8.Microstructure de l'alliage Z4 avant traitement thermique
- Figure IV.1.9.Micrographie électronique de l'alliage M3 après le traitement thermique
- Figure IV.1.10.Micrographie électronique de l'alliage Z1 après traitement thermique
- Figure IV.2.1.dureté en fonction de pourcentage de Mg
- Figure IV.2.2.dureté en fonction de pourcentage de Zn
- Figure IV.3.1.Résilience en fonction de pourcentage de Mg

[Tapez le titre du document]

Figure IV.3.2. Résilience en fonction de pourcentage de Zn

Chapitre 1

Les Alliages D'Aluminium

I.1.Historique :

L'aluminium a fait son apparition en 1854 lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1886 fut inventer le procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult(France) et Charles Martin Hall (USA). Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport : aviation, automobile, Marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc.. [1].



Figure I.1 : Premiers culots et lamelles d'aluminium [2] .

Année	Production mondiale (tonnes)
1920	121 000
1930	269 000
1940	810 000
1960	4 624 000
1997	21 800 000
1999	28 000 000

Tableau I.1 : Production de l'aluminium

I.2. L'obtention d'aluminium :

I.2.1. 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 (45à60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

I.2.2.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.

I.2.3. 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. [1].

I.2.4. principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium :

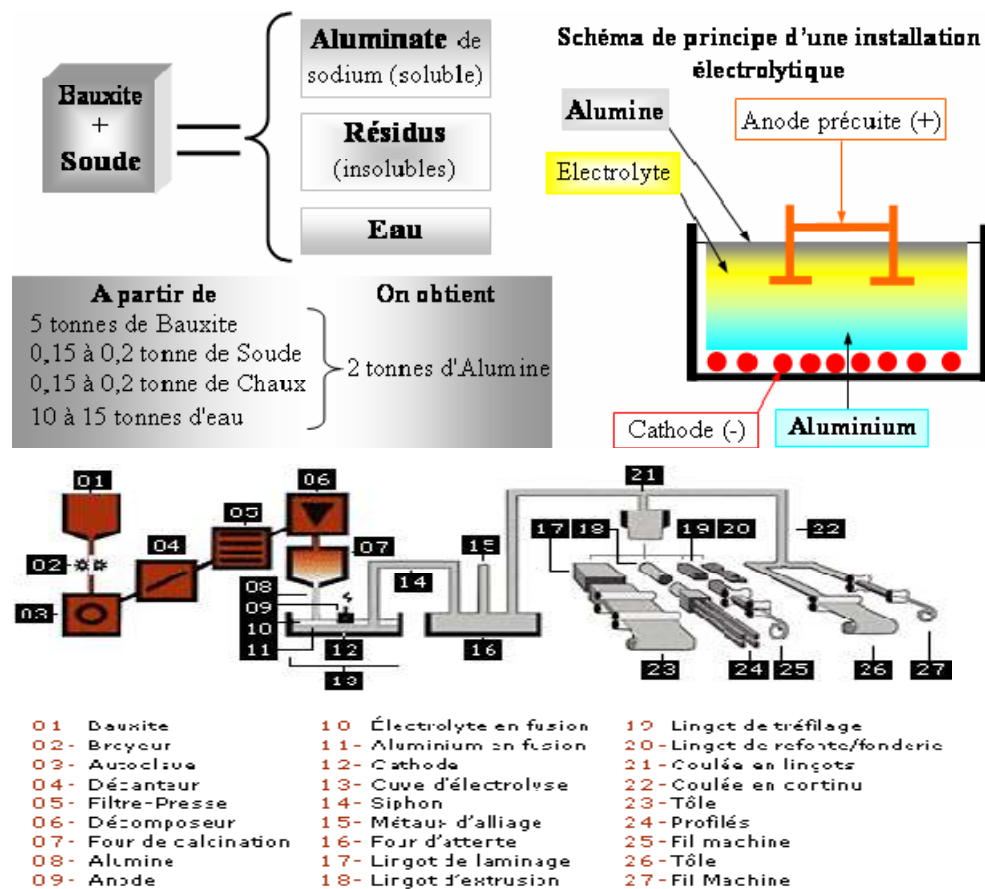


Figure I.2 : principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium [3] .

I.3.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 a face centrée
Coefficient de dilatation	24.10 ⁻⁶ .°K ⁻¹
Module d'élasticité	69 000 MPa

Tableau I.2 :carte d'identité de l'aluminium[4].**I.3.1.principales propriétés :**

La demande pour des produits en aluminium ou intégrant de l'aluminium dans leur composition ne cesse de croître année après année. Au-delà de la croissance démographique mondiale et de l'augmentation du pouvoir d'achat dans les pays émergents, la consommation d'aluminium augmente aussi en Europe et en France par l'effet de substitution l'aluminium remplaçant progressivement d'autres matériaux) grâce à une combinaison unique de propriétés telles que légèreté, résistance mécanique et résistance à la corrosion, conductivité, ductilité, recyclabilité et de nombreuses autres propriétés.

I.3.1.1.Légèreté :

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96g/cm³).

I.3.1.2.Résistance mécanique :

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise. A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

I.3.1.3. Résistance à la corrosion :

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).

I.3.1.4. Conductivité thermique et électrique :

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).

A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

I.3.1.5. Ductilité, malléabilité :

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.

I.3.1.6. Recyclabilité :

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.

I.3.1.7. Imperméabilité, effet barrière :

Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

I.3.1.8. Propriétés réfléchissantes :

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie.

I.4.Principales utilisations de l'aluminium :

I.4.1.Transport :

rois fois plus léger que l'acier, l'aluminium est le matériau de la mobilité ! Il est utilisé dans tous les moyens de transport actuels :

- les véhicules routiers : automobiles, bus, camions ;
- l'aéronautique : il n'y aurait pas d'avion sans aluminium ;
- les transports maritimes, 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..etc.

I.4.2.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-corps.

I.4.3.Emballages :

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.

Sur le marché de l'aluminium d'emballage, on estime qu'une moitié des tonnages alimente les applications rigides, notamment les canettes, et que l'autre trouve des

débouchés dans les applications semi-rigides (barquettes pour plats cuisinés, capsules,...) et souples.

I.4.4. Electricité :

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

- lignes haute tension,
- câbles 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.4.5. Sports et loisirs :

La légèreté de l'aluminium lui assure une place privilégiée :

- dans la fabrication des caravanes,
- du matériel de camping,
- de plongée et d'alpinisme,
- dans les structures des ailes volantes,
- les bâtons de ski,
- le clubs de golf,
- les VTT,
- la trottinette...

I.4.6. 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, [5].

I.5. Les alliages d'aluminium :

Dans ses principales applications, l'aluminium est utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique, mais souvent au détriment d'autres propriétés telle que la ductilité. Pour trouver le meilleur compromis entre les propriétés pour un usage

donné, les métallurgistes agissent sur la composition de l'alliage, mais aussi sur les traitements thermiques ou thermo- mécaniques.

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.

On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium:

➤ Les alliages corroyés (ou de forge) qui sont destinés à la fabrication de pièces ou de demi-produits, par des procédés de déformation mécanique à partir de l'état solide (forgeage, matriçage, laminage, tréfilage, filage, etc.).

➤ -Parmi les alliages de forge et suivant le processus utilisé pour l'obtention des niveaux de caractéristiques mécaniques, nous pouvons différencier deux familles:

- Les alliages à durcissement par écrouissage : Le durcissement est obtenu par déformations importantes à température ambiante.

- Les alliages à durcissement par précipitation: Des traitements thermiques (principalement trempe et revenu) provoquent des modifications de microstructure et permettent ainsi d'augmenter la limite d'élasticité.

Les alliages d'aluminium à durcissement par précipitation sont de loin les plus employés dans l'industrie aéronautique. En effet, ils possédant des caractéristique mécanique beaucoup plus élevées que les alliages à durcissement par écrouissage et conservent une ductilité importante.[6].

I.6.Les alliages d'aluminium de fonderie :

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 [6].

1.6.1. Histoire :

La fonderie était le premier marché important pour l'aluminium, à la suite la commercialisation du processus de la réduction électrolytique Hall-Héroult. Dans un premier temps, les applications ont été limitées à ces curiosités comme les numéros de maison, miroirs à main, des peignes, des brosses, des pinces de cravates, boutons de manchette, épingles à chapeaux, et boîtiers de lampes décoratifs...etc. Le coût de l'aluminium a baissé régulièrement, et vers la fin du 19ème siècle des applications de l'ingénierie sont devenues économiquement viables. Trois marchés émergents ont coïncidés avec l'apparition de l'aluminium comme un matériau alternatif:

- L'Électrification : exige non seulement une faible densité, et une résistance à la corrosion, l'aluminium était bien adapté pour les fils à haute conductivité et câbles, mais aussi les tours de transmission.

- Les pionniers de l'automobile ont cherché des matériaux innovants pour améliorer la performance et l'apparence de leurs produits.

• Lorsque les frères Wright ont réussi un vol motorisé, le moteur et d'autres pièces étaient en aluminium coulé, ça a représenté le début d'une collaboration étroite avec ce qui allait devenir l'industrie de l'aviation et de l'aérospatiale [7].

I.6.2. Structure des alliages de fonderie :

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

Dans le système Al-Si, les cristaux solides d'aluminium se forment sur les parois du moule (Plus froides que le cœur) et croissent vers l'intérieur. Leur composition en Si est inférieure à celle du liquide qui les entoure car la solubilité du Si dans Al décroît avec la température. Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température de solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion). Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche [8].

Mais si un germe du cristal en croissance parvient à traverser cette couche de liquide en surfusion, il se retrouve dans un milieu non enrichi en silicium et peut se solidifier, ce qui est thermodynamiquement favorable. Cette protubérance est instable et croît rapidement, ce qui explique que les cristaux d'aluminium se développent non sous forme de sphères ou d'aiguilles mais sous forme d'arborescences appelées dendrites, dont les bras secondaires sont espacés de quelques dizaines de micromètres, cette distance est appelée : espacement des bras de dendrite. Nous utiliserons par la suite l'acronyme anglais classique :

DAS (Dendrite Arm Spacing), ou SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing)

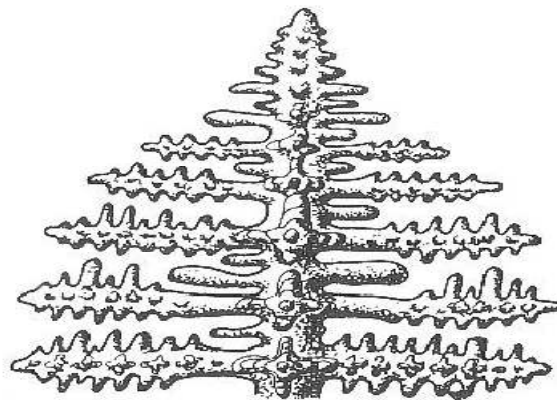


Figure I.3. Schéma d'une dendrite, (Massinon D., Constantin V., 2002)[8].

I.6.3. Désignations :

I.6.3.1. Symbolisation 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 indiquent les spécifications et caractéristiques des alliages d'aluminium de fonderie. Toutes ces normes sont enregistrées en France par l'Afnor sous la désignation NF EN suivie du numéro de norme européenne .

La base de la codification est la suivante [9].

➤ Alliage

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 les fils machine...etc.
- Un tiret.

Ces quatre éléments sont communs aux deux désignations, numérique et chimique, contrairement aux éléments suivants :

Pour la désignation numérique, cinq chiffres qui 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 (Al Si7Mg, Al Si10Mg, etc.), le 3e chiffre est arbitraire, le 4e chiffre est généralement 0, et le 5e 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.

- On peut utiliser les deux désignations simultanément en mettant entre crochets la désignation chimique. [10] [9].

I.6.3.2. 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)

I.6.3.3. 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-vieillissement artificiel (sous revenu)

T7 : mise en solution et sur-vieillissement artificiel (sur-revenu)

Exemple de dénomination complète :

EN 1706 AC-42000KT6 (numérique)

EN 1706 AC- AlSi7MgKT6 (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 [10] [9].

I.6.4. Alliages normalisés :

La norme européenne EN 1706 distingue six groupes d'alliages différents, qui sont récapitulés dans le **tableau I.3**. 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 et les caractéristiques. [10].

Les onze groupes d'alliages d'aluminium selon la norme EN 1706[10]		
Groupe d'alliage	Désignation numérique EN	Désignation symbolique EN
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg
	EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg
	EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)
AlSi	EN AC-44000	EN AC-Al Si11
	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)
	EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)
	EN AC-44400	EN AC-Al Si9
AlSi5Cu	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4
	EN AC-45100	EN AC-Al Si5Cu3Mg
	EN AC-45200	EN AC-Al Si5Cu3Mn
	EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg
	EN AC-45400	EN AC-Al Si5Cu3

Tableaux I.3 : alliage d'aluminium normalisée sous la norme européen EN

Alliages Al Cu :

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[11].

Al Si Mg Ti :

Une teneur croissante en silicium favorise les propriétés de fonderie des alliages de la série 4XXX. Elle augmente en particulier leur aptitude à la coulée de pièces minces et étanches, mais défavorise l'usinabilité et l'aptitude au traitement d'oxydation anodique 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'oxydation anodique 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[11].

AlSi7Mg :

Ce sont des alliages à hautes propriétés mécaniques. La teneur moyenne en silicium, permet l'obtention d'excellentes propriétés de fonderie, et la teneur en magnésium rend possibles les traitements thermiques. 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 [11].

AlSi13 :

Il est le plus ancien et est encore très utilisé, du fait de son excellente aptitude au moulage et de sa bonne résistance à la corrosion, pour la fabrication des appareils ménagers, bâtiment et mécanique [11].

I.6.5. 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.

I.6.5. 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 hypo-eutectiques. 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.

I.6.5. 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 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[11].

I.6.5. 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 durcissant que les alliages pour moulage sous pression classiques. En particulier, les teneurs en fer et en manganèse, éléments qui favorisent le non-collage des alliages, mais diminuent leurs propriétés mécaniques, doivent faire l'objet d'une optimisation précise. Les alliages Al Si₁₁ Mg Sr ou Al Si₉ Mg Sr à teneurs moyennes en fer et manganèse permettant d'obtenir un bon compromis collage au moule-propriétés mécaniques, ainsi que les alliages Al Mg₅ Si₂ sont parmi les nuances les plus utilisées.

I.6.5.4. 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 [11].

I.6.5.5. Solidification:

Les moulage 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 ductilité, tandis que les défauts de surface influencent fortement les propriétés mécaniques et la fatigue[11].

I.6.5.6. Traitement thermique :

Les propriétés mécaniques peuvent être modifiées par des traitements thermiques, notamment le recuit, la mise en solution, et le vieillissement par précipitation. Post solidification densification: le traitement isostatique à chaud (HIP) de pièces moulées peut entraîner l'amélioration des propriétés de traction, la ductilité et résistance à la fatigue[11].

I.6.6. Les alliages d'aluminium de fonderie : Avantages et inconvénients :

Les pièces moulées en aluminium sont des produits d'une grande polyvalence dans les caractéristiques que l'on peut obtenir. Plus de 100 compositions sont enregistrés auprès de l'Aluminium Association, plus de 300 alliages sont utilisés à internationale.

Les avantages affichés par ces alliages sont:

- La capacité de produire des pièces finies avec des dimensions précises, une finition de surface contrôlée, des géométries complexes, et des propriétés compatibles avec les exigences l'ingénierie, et représentent d'importants avantages fabrication.
- Dans de nombreux cas, un ensemble de pièces soudées ou assemblées peuvent être remplacées par une seule pièce coulée.
 - Les exigences d'usinage sont réduites.
 - affichage des pièces moulées en aluminium variations contrôlées dans de coulée finition.
 - Contrastes entre de coulée et finitions usinées peuvent être mis en évidence pour créer des effets cosmétiques agréables.
 - Les couts sont généralement moins élevés que pour les produits usinés.
 - Les pièces bimétalliques métallurgique ment ou mécaniquement liés peuvent être moulées.
 - Les pièces en aluminium peuvent être produite par chaque procédé connu, offrant une large gamme de volumes, de productivité, et de qualité.
 - Beaucoup d'alliages d'aluminium de fonderie affichent une excellente fluidité pour couler des fines sections et des détails fins.
 - Les alliages d'aluminium de fonderie fondent à des températures relativement basses.
 - Les processus peuvent être hautement automatisés [12].

I.6.7.Effets des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques :

Les investigations les plus récentes sur les alliages industriels Al-Si, portent essentiellement sur l'effet des éléments d'addition, sur les caractéristiques microstructurales et mécaniques. Cependant, les additifs ne peuvent généralement prendre effet que par des traitements thermiques appropriés. La mise en solution par exemple, permet de dissoudre des composés qui peuvent être néfastes pour les propriétés mécaniques, tels que $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$, tandis que le traitement de revenu permet la formation d'autres composés tels que Mg_2Si qui sont considérés comme phases de renforcement pour ces alliages, sachant qu'ils contribuent de manière significative à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques[13].

Quatre grandes familles d'alliages d'aluminium de fonderie, qui sont fonction des éléments d'alliages ajoutés. Ceux-ci se retrouvent soit en solution solide soit sous forme de précipités. Ces familles sont les alliages au silicium, au cuivre, au magnésium et au zinc. On distinguera les additions principales déterminantes pour les propriétés du matériau et les additions secondaires, en plus faible quantité, qui ont une action spécifique [8].

Le silicium : confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, une diminution de la criquabilité et de l'aptitude à la

retassure (il se dilate à la solidification). On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure (le silicium est très dur), de l'étanchéité des pièces, mais une diminution de l'allongement à rupture.

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

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

Le zinc : très peu utilisé à cause de ses médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques, il se trouve sous forme de ternaire Al-Zn-Mg, ce qui

donne un alliage à durcissement structural avec des précipités $MgZn_2$, atténue le gazage de l'alliage, améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro retassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu.

Influence des impuretés :

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement Ou non, les diverses propriétés du matériau. On trouve principalement comme Impuretés :

Le fer: c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques et diminue l'étanchéité de la culasse. Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée à moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits à haute pureté ; le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets.

Le nickel : améliore légèrement les propriétés sa chaud mais coute cher.

Le phosphore : est un poison pour les alliages hypo-eutectiques car il constitue un site de germination du silicium, par contre, ce sera un élément affinant pour les alliages hyper eutectiques(hyper-slicés). En effet dans ces alliages, ce sont les plaquettes de Si qui germent en premier et il n'y a donc pas de dendrites d'aluminium.

Le plomb: au-delà de 0.05% il neutralise la modification au strontium et diminue les propriétés mécaniques de l'alliage.

L'étain : abaisse les caractéristiques mécaniques, augmente la porosité, améliore très peu la coulabilité.

L'antimoine : permet de piéger le phosphore mais n'est pas compatible avec le Strontium.

Le lithium : très oxydable, regaze instantanément et considérablement l'alliage.

Les éléments que l'on ajoute volontairement pour leurs propriétés bénéfiques sont indiqués ci-dessous.

Le titane : c'est une impureté de l'aluminium, mais il permet d'affiner la dendrite de solution solide riche en aluminium : c'est un affinant. L'opération d'affinage consiste à ajouter dans l'alliage liquide des germes de cristallisation comme TiB_2 en grand nombre afin d'augmenter le nombre de grains de l'alliage pour

diminuer la taille de dendrite et augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la durée de vie en fatigue.

Le sodium ou le strontium : modifient la structure de l'eutectique naturellement lamellaire en eutectique globulaire, ce qui permet de diminuer le risque de retassures, de faciliter l'usinage et d'augmenter les caractéristiques mécaniques.

Le calcium : prolonge le temps de modification par le sodium.

I.6.8.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.

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 spécifiés 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 réalisée par le traitement thermique d'un grand nombre de ces alliages.

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 manipulés pour influencer les propriétés du matériau.

En plus des changements de phase et la morphologie associés 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 [11].

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 que si des microfissures sont initiées, il serait beaucoup plus sûr que cela se produise dans les particules que dans la matrice [14] [11].

1.6.9. Les alliages Aluminium-Silicium :

1.6.9.1. Alliages Al –Si :

Ces alliages sont industriellement de loin, les plus importants parmi les alliages moulés. Bien que leurs teneurs en Si varient de 5 à 20%, la plus grande majorité de ces alliages présentent une composition eutectique ou hypo-eutectique. Cette dernière leur confère une excellente coulabilité. Par ailleurs, ces alliages présentent une bonne résistance à la corrosion. Les moulages obtenus sont meilleurs sachant que ces alliages peuvent être coulés en sable, en coquille, ou sous pression; leurs caractéristiques mécaniques dépendent de leur composition chimique, du mode d'élaboration et de coulée ainsi que des traitements thermiques ou mécaniques[12]. Parmi les principaux alliages de ces séries on peut citer:

- **AlSi10Mg**

La teneur en silicium, donne à cet alliage une composition proche de l'eutectique 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.

- **AlSi7Mg**

Ce sont des alliages à hautes propriétés mécaniques. La teneur moyenne en silicium, permet l'obtention d'excellentes propriétés de fonderie, et la teneur en magnésium rend possibles les traitements thermiques. 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[12].

- **AlSi13**

Il est le plus ancien et est encore très utilisé, du fait de son excellente aptitude au moulage et de sa bonne résistance à la corrosion, pour la fabrication des appareils ménagers, bâtiment et mécanique[12].

1.6.9.2. Microstructure et caractéristiques des ALLIAGES Al-Si

L'importance notable des alliages Al-Si dans l'industrie a motivé plusieurs chercheurs à étudier la microstructure de ces alliages en même temps que leurs propriétés. Deux écoles de pensée existent, chacune avec sa conception distincte de la formation de l'eutectique l'Al-Si et la modification de sa morphologie. Une école estime que c'est le mécanisme de nucléation du silicium eutectique dans les alliages Al-Si qui détermine la morphologie du silicium eutectique; Les autres attribuent sa morphologie

à la cinétique de la croissance de l'eutectique de silicium. La microstructure des alliages Al-Si dépend de la composition chimique, le processus de coulée, et le traitement thermique impliqué. La microstructure des alliages Al-Si est composée de deux phases, à savoir Al et Si. Ces alliages sont une combinaison d'une phase à haute résistance fragile (Si) et une de faible résistance et ductile (Al), où la microstructure est typiquement composée d'une matrice d'aluminium contenant du silicium eutectique. Ce silicium peut être présent sous la forme des plaques d'aiguilles aciculaires, en forme de bloc ou d'une structure fibreuse, raffinée selon le niveau de la modification chimique et la vitesse de refroidissement de la pièce moulée. En général, l'eutectique silicium n'est pas uniformément réparti, mais tend à se concentrer aux limites inter dendritiques[19].

1.6.9.3. Silicium eutectique

Silicium eutectique présente une structure à gros grains semblable à une plaque dans laquelle les plaques secondaires servent de concentrateurs de contraintes et de fournissent des plans de faiblesses; les deux, peuvent être combinés pour améliorer la résistance à l'initiation des fissures et leur propagation. La morphologie du silicium eutectique peut être modifiée par l'ajout de de petites quantités de Na ou Sr, à l'état fondu, alors que la modification peut aussi être obtenu par l'augmentation de la vitesse de solidification[19].

1.6.9.4. Phases intermétalliques

Deux des principales phases intermétalliques dans les alliages AL-Si sont des composés intermétalliques à base de Fer et de Cuivre. Les intermétalliques à base de fer ont tendance à former des β -Fe et / ou α -Fe ; Les particules β -Fe sont des plaquettes aciculaires qui ont un effet nocif sur les propriétés mécaniques, alors que les particules de la phase α -Fe apparaissent de façon plus compacte, sous forme de symboles chinois, et sont moins nocives pour les propriétés de l'alliage. Les intermétallique à base de Cu est principalement Al_2Cu , qui se trouve soit sous forme de particules en forme de blocs ou d'une fine eutectique Al- Al_2Cu [21].

1.6.9.5. Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS)

L'Espacement des bras dendritiques secondaires est la distance linéaire entre deux des dendrites secondaire (ou bras) α -Al. Comme ce SDAS est régie par les conditions de solidification, il fournit donc une mesure directe de la vitesse de solidification. En général, les propriétés mécaniques des pièces moulées en aluminium ont tendance à corrélérer mieux avec les DAS que la taille de grain. Plus les vitesses de solidification

sont grandes, plus l'espacement est fin, ce qui fournit de meilleures propriétés mécaniques[8].

I.6.9.6. Diagrammes de phases de l'alliage Al-Si

Examinons le diagramme d'équilibre du système Al-Si présenté dans la figure ;

Il est à noter que le point eutectique E est caractérisé par la température de fusion la plus basse sur l'ensemble des alliages Al-Si de différentes concentrations, qui peuvent exister. Nous remarquons que le pourcentage de silicium soluble dans l'aluminium à l'état solide est de 1,65% à la température $T_E=578\text{C}$. Cette solubilité maximale est représentée par le point A. Tous les alliages Al-Si pour lesquels la teneur en Si est inférieure à 1,65% se solidifient à l'équilibre. A l'issue de leur solidification, ces alliages se présentent comme des matériaux monophasés dans lesquels tout le silicium est entièrement dissout dans la matrice d'aluminium : Il s'agit de la phase α riche en aluminium. Il faut remarquer que la solubilité de Si dans Al à l'état solide diminue avec la température. Aussi, elle passe de 1,65% à 0 % à basse température. Cette solubilité en fonction de la température est décrite par la courbe AB : le solvus. [23]

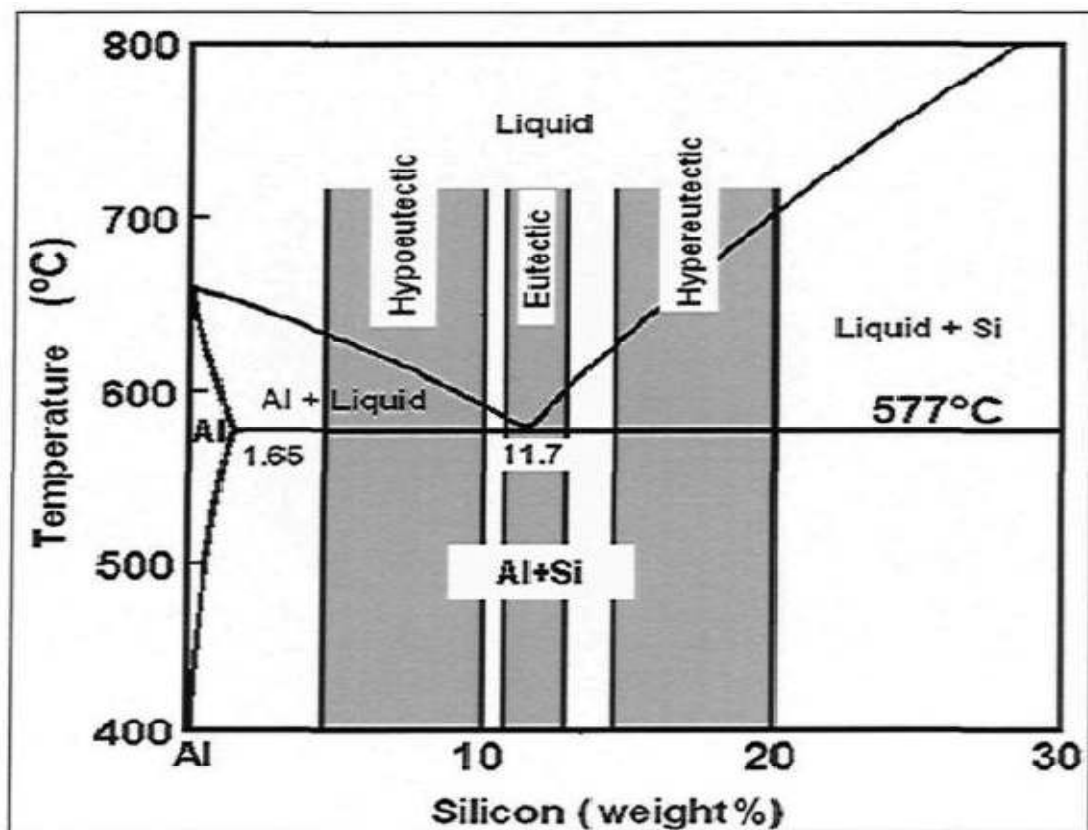


Figure I.4 : Diagrammes de phases de l'alliage Al-Si[23]

Les principales courbes constituant le diagramme sont :

□ Le liquidus: il est formé par deux branches de courbe CED dont l'intersection forme le point eutectique E défini par une température de 578C. Le liquidus constitue, dans le diagramme, les lieux de début de solidification. Au-dessus de ces branches, tous les mélanges Al-Si sont à l'état liquide. La température du point E est inférieure à la température de fusion des deux constituants et de tous les différents alliages qu'ils peuvent former[12].

□ Le solidus: CAEFD il est formé par un palier eutectique AEF à l'exception des deux extrémités en raison de l'existence de deux phases solides α et β , dont la première est riche en Al et la seconde en Si. Ainsi, le solidus constitue les lieux de fin de solidification[12]

I.7.Procédé de fonderie :

I.7.1.Généralités :

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 ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. 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 [15].

I.7.2.Moulage en sable :

Le sable est serré à l'intérieur d'un châssis, cadres rigides généralement métalliques pourvus de poignées de manœuvres, de dispositifs de repérage. Un moule comporte au moins deux parties ; avec des surfaces de séparation appelées joint. Ce joint doit passer par une section maximum du modèle pour que celui-ci puisse être enlevé après serrage, sans détérioration du moule ; les arrachements de sable sont à éviter par la pente ou la dépouille [15].

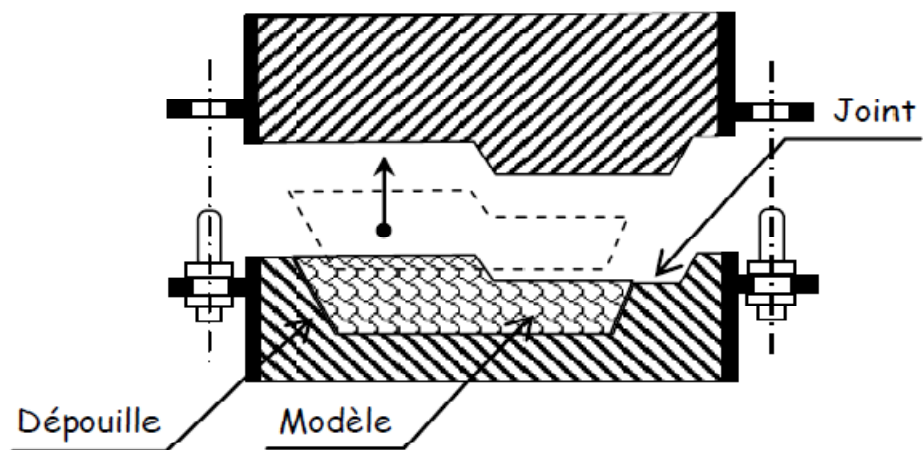


Figure I.5 : moulage en sable

I.7.3. 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 [15].

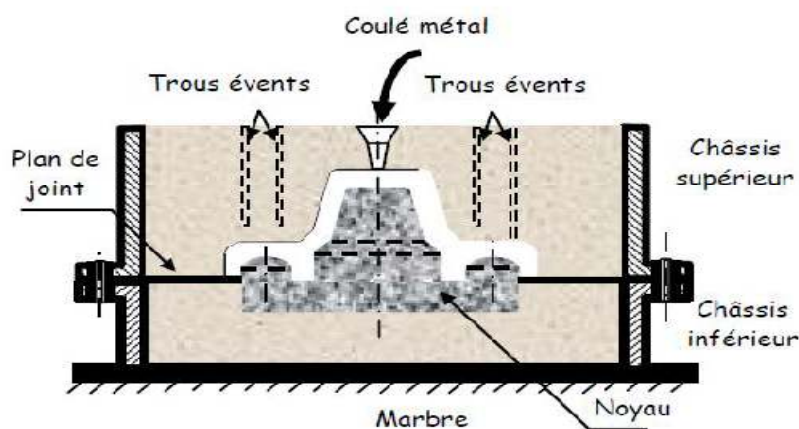


Figure I.6: Moulage naturel sur modèle

I.7.4. Méthodes modernes de fonderie :

I.7.4. 1. Moulage par centrifugation :

Le moulage par centrifugation est une méthode adaptée pour couler des objets de forme circulaire, tels que des tuyaux métalliques. Pendant la coulée, on imprime une rotation rapide au moule circulaire, il n'y a pas besoin de noyau car la rotation du moule plaque le métal par l'effet de la force centrifuge [16].

I.7.4.2. 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].

I.7.5. Moulage en coquille :

Une coquille est un moule métallique usiné, en fonte ou en acier, 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

I.7.5.1. Moulage par gravité :

Le métal liquide est versé dans le moule et rempli ce dernier sous l'action de la pesanteur ou gravitation [16].

I.7.5.2. Moulage sous pression :

La fonderie sous pression est destinée à réaliser des pièces en grandes séries. Cette technologie consiste à injecter à grande vitesse le métal liquide dans un moule métallique. On obtient ainsi un bon état de surface et on évite le maximum de reprise d'usinage. Il exige l'emploi de machines spéciales à couler, le métal est injecté dans la coquille sous l'action d'un piston[20].

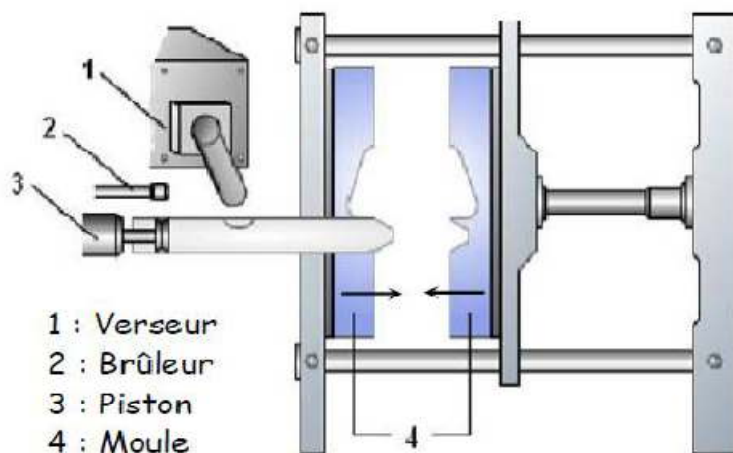


Figure I.7: Moulage sous pression

L'idée du procédé remonte à 1830 et les premiers essais industriels à 1840. Mais c'est avec le 20^e siècle que le procédé se développa, les premiers alliages étant facilement fusibles (plomb, étain, alliages plomb-étain-antimoine). L'essor industriel correspond pratiquement à celui de l'automobile. Le procédé a été appliqué ensuite aux alliages de zinc et d'aluminium. Le développement de ce genre de moulage pour les métaux non ferreux a été prodigieux ; en France, par exemple, la production de pièces en 1948 atteignait 5 000 t, en 1970 : 90 000 t et en 1991 : 145 000 t (sur les 230 000 t de production totale d'alliages légers, soit plus de 60 % de la production totale[15]).

I.7.5.3. d. Avantages et inconvénients de la coulée sous pression :

Les avantages sont nombreux ; citons parmi les plus significatifs :

- bel aspect des pièces ;
- très grande précision, réduisant les masses et limitant l'usinage ;
- possibilité d'inserts ;
- meilleure étanchéité des pièces (carburateurs en *zamak* par exemple) ;
- caractéristiques des alliages un peu améliorées ;
- faibles dépouilles permettant d'économiser la matière, etc.

Par contre, les investissements sont toujours élevés, surtout pour les grosses pièces ; les outillages sont importants, très coûteux, et il faut prévoir pour les fabrications de grandes séries un équipement de deux outillages et parfois trois par machine. Les formes des pièces doivent être pensées en fonction de ce procédé, simples à l'intérieur, plus compliquées à l'extérieur. Les inserts ne sont pas commodes à positionner dans les moules ; ils doivent être chauffés, introduits et mis en place entre chaque cycle en ralentissant les cadences. Les carters-moteurs peuvent de cette façon être moulés avec des chemises en fonte insérées dans le moule[15] [17].

Chapitre 2

Les Traitements Thermiques

II.1 Introduction

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières (NF A 02-010)[20].

La structure micrographique est liée aux procédés d'élaborations, mais surtout aux conditions dans lesquelles les procédés de mise en forme sont utilisés. Elle peut être profondément modifiée par des traitements thermiques. En effet, les modifications structurales apportées par les procédés de mise en forme sont parfois favorables aux propriétés (écrouissage par exemple), mais présentent la plupart du temps certains inconvénients que les traitements thermiques peuvent souvent effacer. Toutefois, certains d'entre eux ne sont pas toujours réparables : par exemple, le fibrage apporté par le forgeage ou le filage, qui abaisse la résistance dans le sens travers, est indélébile ; les textures apportées par une déformation à froid, bien qu'elles puissent être modifiées, sont toujours à l'origine d'une certaine anisotropie souvent gênante

II.2. 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.

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[11].

II.3. Désignation :

Il existe plusieurs façons de présenter une pièce faite d'un alliage d'aluminium. De façon générale, on a les cinq désignations suivantes : F, O, W, T et H, qui représentent le traitement thermique ou le durcissement subi par la pièce. Les pièces portant la mention F sont livrées telles que produites. Ces pièces ont été mises en forme sans qu'il n'y ait un contrôle des conditions thermiques ou des contraintes de mise en forme. Les pièces de type O ont subi un recuit et une recristallisation. Cela est utilisé sur les produits coulés, pour avoir une meilleure ductilité ou pour une meilleure stabilité des dimensions. Le symbole O peut être suivi d'un chiffre, pour avoir plus de précisions sur le traitement utilisé. Les pièces identifiées d'un W ont subi une mise en solution, suivie d'une trempe. Cela est utilisé seulement pour les pièces qui ont un vieillissement naturel rapide qui se produit immédiatement après la mise en solution. Le temps requis au vieillissement naturel doit être indiqué pour que la désignation soit acceptable, par exemple : W lh. Pour être dans la catégorie T, il faut subir un traitement thermique qui fournit un produit stable après la trempe et qui est différent des trois autres. traitements[22].

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[22].

II.4.Traitements de durcissement structural :

La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire[15].

Les stades du traitement de durcissement structural :

Le traitement thermique dit de durcissement structural comporte trois grands stade

II.4.1 Mise en solution solide :

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

II.4.2. trempe :

Après sa mise en solution, l'alliage doit être refroidi suffisamment rapidement pour maintenir à la température ambiante la solution solide : c'est le traitement de trempe. Aussitôt après trempe, l'alliage est dit dans un état de « trempe fraîche », il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité.

II.4.3. 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 différentes 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[9].

II.4.4. Vieillessement artificiel :

Ce processus peut être très long, mais ce n'est pas le cas pour tous les alliages. Pour remédier à ce problème, un vieillissement artificiel est appliqué. Le vieillissement artificiel consiste à élever, pendant une durée suffisante, la température des alliages d'aluminium en solution solide afin d'améliorer et de stabiliser plus rapidement leurs propriétés. L'instabilité des alliages vient du fait que la solution solide sursaturée en éléments alliés, obtenue lors de la trempe, tend à retourner à l'état d'équilibre. Ce retour à l'état d'équilibre des alliages se fait d'autant plus rapidement que la température de vieillissement est élevée.

Les propriétés mécaniques augmentent avec le temps de vieillissement, jusqu'à un maximum, pour ensuite redescendre.

Le maximum des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium est obtenu lorsque la solution solide contient des zones de Guinier-Preston et des précipités métastables correspondants aux états intermédiaires des précipités à l'équilibre. Les précipités stables ne se forment pas directement. Il y a d'abord la formation de zones de Guinier-Preston. Ces zones GP, des petits amas d'atomes cohérents avec la matrice, sont en fait un enrichissement local de la solution solide en atomes de soluté. En augmentant le temps de vieillissement, la taille des zones GP augmente ainsi que la dureté de l'alliage. En poursuivant le vieillissement, les zones GP continuent de croître ; et les zones qui contiennent un pourcentage élevé en éléments alliés forment des phases plus grosses qui sont, en fait, les formes transitoires des précipités stables. Ces phases transitoires sont généralement cohérentes avec la matrice, et deviennent incohérentes lorsque leur taille augmente. Les propriétés mécaniques diminuent lorsque les précipités deviennent incohérents[18].

II.5. Phénomènes de durcissement

Il est à noter qu'il existe deux phénomènes principaux de durcissement: le durcissement structural et 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[18].

II.5.1. Durcissement structural (Zones Guinier-Preston) :

Certains alliages Al-Cu, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg issus de fonderie ou de forgeage, peuvent être durcis. Après mise en solution puis trempe à l'eau (froide ou chaude), l'alliage se trouve dans son état le plus doux (trempe fraîche) permettant redressages, conformations, cintrages et/ou emboutissages. Cet état peut-être maintenu (congélation) par conservation à une température inférieure à la température ambiante. Le durcissement est obtenu après revenu ou maturation. La qualité du traitement réside dans la qualité de préparation de la charge, la précision des températures (± 3 °C), le respect d'un temps de transfert entre four de mise en solution et bac de trempe et enfin une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de trempe. Le choix du milieu de refroidissement (eau 20 °C à 100 °C, émulsion polymère) est déterminé par les exigences géométriques des pièces.

II.5.2. 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[21] .

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[21].

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[22]. 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 ($> 1 \mu\text{m}$),

II.6. 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.

Pour cette raison, les traitements thermiques offrent certaines difficultés de réalisation, et l'utilisation des pièces traitées demande souvent des précautions.

Chapitre 3

Procédures Expérimentales

III. 1.Introduction :

On présente dans ce chapitre la partie expérimentale, en premier lieu les principales étapes de l'élaboration de nos alliages, et leurs caractéristiques. Ensuite, on expose les différentes étapes de la préparation des échantillons passant par les traitements thermiques. Des essais de résilience sont effectués, on effectue aussi une observation métallographique par microscope optique (MO).

III.2. Elaboration des Alliages étudiés :

L'Elaboration des alliages a été faite dans un four à gaz de marque « CIFE Impianti », dans des creusets en graphite. Au niveau de « S.M.O DE FONDERIE » à Mostaganem .



Figure III.1 : un four à gaz de marque CIFE Impianti

L'Analyse de la composition a été fait par analyse par spectrométrie à émission optique, avec un spectromètre de marque « GNR Metal Lab Plus ».

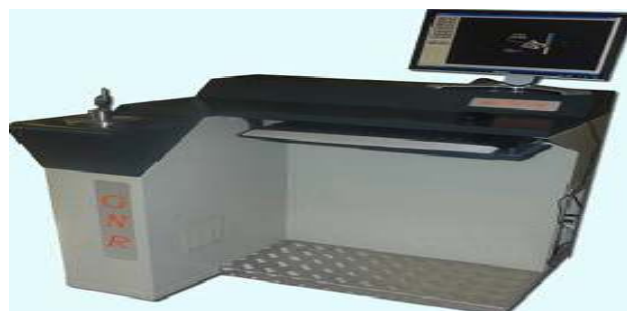


Figure III .2 : un spectromètre de marque GNR Metal Lab Plus

III.3.Préparation et traitement thermique :

III.3.1. introduction :

Les alliages ont été fournis par mon promoteur .et j'ai appliqué des traitements thermiques suivant à huit échantillons « M1 ,M2,M3,M4 ; Z1,Z2,Z3,Z4 » de différentes compositions chimiques .

- L'élaboration des échantillons a été faite dans un four électrique Nabertherm ,



Figure III .3 : Le four utilisé pour le traitement de mise en solution

Le métal liquide a été coulé à 800°C dans des moules à lingots ouverts, en acier, et sans préchauffage.



Figure III .4 : creuset en graphite et moule à lingot ouvert en acier

Les échantillons obtenus sous forme de lingots, ont été redimensionné a l'aide d'une polisseuse de menuiserie, pour obtenir des pièces sous forme de rectangle 55*10*10 mm .



Figure III .5 : pièce après moulage

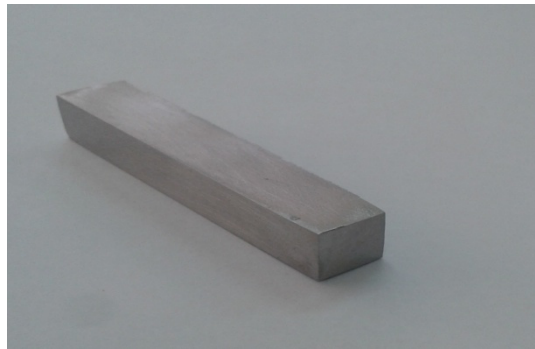


Figure III .Pièces fini

III .3.Composition chimique :

Designation	Elements(%)							
	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Cr	Zn
M1	85,774	10,8	1,9	0,71	0,1	0,289	0,027	0,4
M2	85,711	10,4	1,9	0,747	0,62	0,224	0,018	0,38
M3	85,346	10,4	1,9	0,74	0,98	0,23	0,024	0,38
Z1	86,098	10,9	2	0,655	0,1	0,209	0,008	0,03
Z2	85,774	10,8	1,9	0,71	0,1	0,289	0,027	0,4
Z3	84,54	10,9	2	0,685	0,1	0,283	0,032	1,46

Tableau III .1 : Compositions chimiques des alliages étudiés

III.4. Les principaux traitements thermiques :

Le traitement thermique d'une pièce consiste à lui faire subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite d'élasticité, ...

III.4.1. La mise en solution :

Cette opération consiste à un chauffage à température élevée (470 °C). La mise en solution est sensée homogénéiser la microstructure, à l'état brut de coulée, et minimiser la ségrégation des éléments alliés. Comme mentionné précédemment, la mise en solution permet surtout de dissoudre les composés intermétalliques. Dans notre expérience, Nous avons appliquées pour chaque alliage un traitement de mise en solution sur des températures **490°C** avec un temps de maintien de **7h**.

III.4.2. La trempe :

Après sa mise en solution, l'alliage doit être refroidi rapidement pour maintenir à la température ambiante la solution solide : c'est le traitement de trempe. Aussitôt après la trempe, l'alliage est dit dans un état de « trempe fraîche », il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité. Dans notre cas la trempe est à l'eau **60°C**

III.4.3. Le revenu :

Le revenu se pratique après une trempe, pour réduire les contraintes mécaniques internes créent durant celle-ci. Le revenu permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées, de rétablir les valeurs de résilience et de réduire les contraintes mécaniques internes. La dureté diminue également d'un peu (Dissolution de certains composants fragiles tels que les carbures favorisés). La température déterminée en fonction du type de matériau, et de refroidir cette pièce très lentement.

Dans notre traitement, le revenu est fait à **200°C** pendant **4,30h**, ensuite on refroidit nos échantillons à l'air.

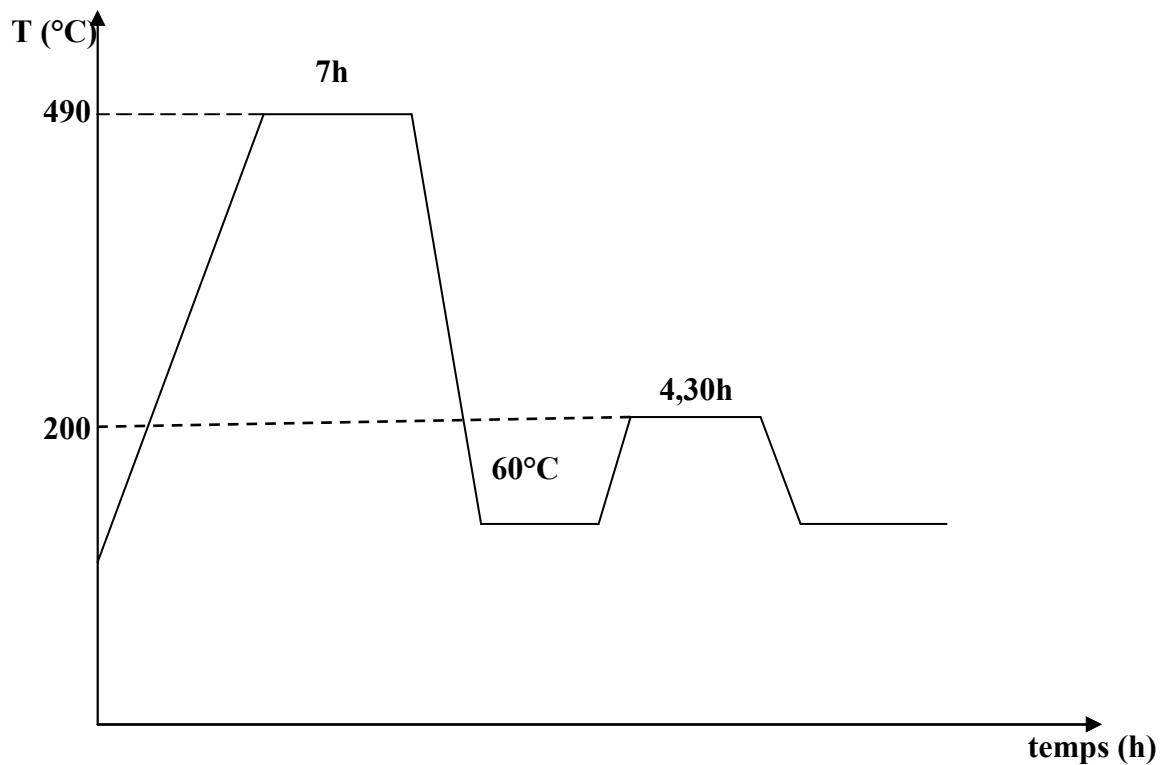


Figure III .7: cycle de traitement thermique des échantillon.

III.5. Essai dureté :

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

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

Le centre dispose d'une machine d'essai de dureté INNOVATEST, étalonnée avec des forces allant de 10 kgf à 300 kgf pour un processus de mesure rapide et fiable.

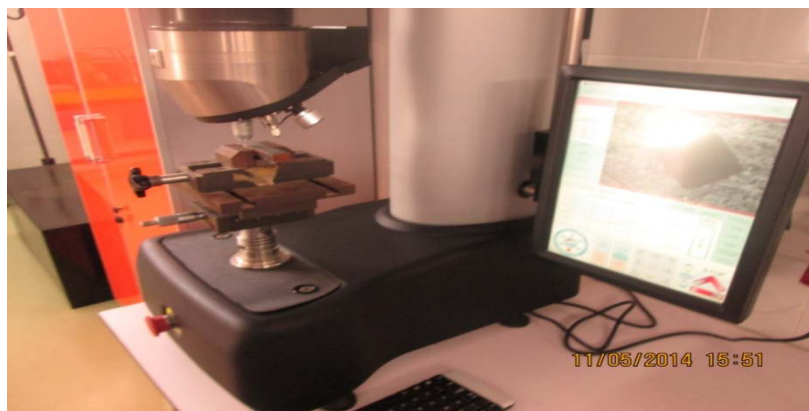


Figure III .8: duromètre

III.6. Essai de résilience :

Les matériaux présentent dans la réalité souvent des caractéristiques au niveau de leur microstructure qui diminuent leur résistance à la propagation des fissures. De ce fait, la ténacité à la rupture est déterminée par la propagation des fissures en suivant des chemins de fissuration faciles. La distribution des chemins de fissuration faciles est importante pour pouvoir déterminer la ténacité à la rupture.

Les dimensions, le mode de fissuration et la distribution de ces constituants de la microstructure sont importants pour pouvoir déterminer la facilité avec laquelle une fissure peut se propager dans le matériau, et par conséquent pour pouvoir déterminer la ténacité à la rupture. Ces paramètres peuvent varier en changeant la composition de l'alliage ou le traitement du composant.

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de certains essais (essai de traction) peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans les conditions particulières qui rendent le métal fragile. Un des moyens, le plus classique et le plus ancien, pour caractériser la fragilisation d'un matériau est fournie par l'essai de résilience sur éprouvettes entaillées, qui est décrit dans la norme NF EN 10045. Le principe consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

En mesurant la résilience en fonction de la température, on peut tracer une courbe mettant en évidence, si elle existe, une zone de transition ductile-fragile qui correspond à un changement de comportement de ductile à fragile.

Cette transition est rarement abrupte et on choisit des températures de transition arbitraires.

On peut observer les différents faciès des surfaces de rupture pour différentes températures, et noter que dans le domaine de rupture ductile, où l'énergie de rupture est élevée, le faciès est à nerfs.

Avant d'entamer l'expérience, des éprouvettes entaillées (forme V) ont été préparées conformément aux normes.

Celles-ci sont représentées dans la figure suivante.

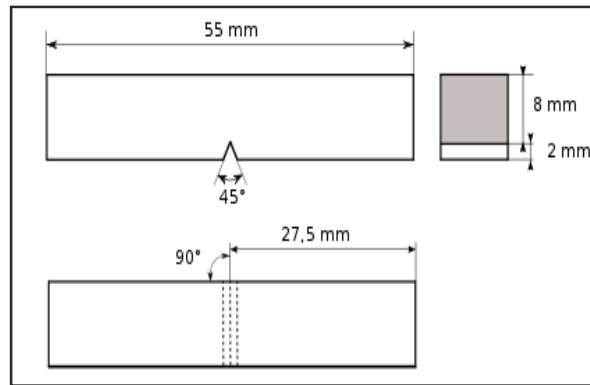


Figure III.9: Epreuve normalisée

A travers l'essai de résilience, on mesure les énergies nécessaires à la rupture de notre matériau à l'état non traité et après les différents traitements thermiques.

L'influence de la forme de l'entaille sur l'énergie de rupture est très grande.

La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joules par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (Joules)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}}$$

L'énergie cinétique des débris de l'éprouvette étant négligeable après la rupture; le résultat de l'essai de résilience est donnée par l'énergie de rupture.

L'expérience s'est déroulée au niveau du Centre National de la Recherche et Contrôle de Cherraga.

III.7. Préparation métallographique

Pour caractériser les couches obtenues, une préparation métallographique est nécessaire afin d'observer les microstructures et effectuer par la suite des mesures de dureté.

Elle se fait en 3 étapes :

III.7.1.L'enrobage

Les échantillons sont enrobés dans une résine thermodurcissable à l'aide d'une enrobeuse marque Struers – prestopress-3, il permet de limiter les effets de bords pendant l'étape de polissage. Le choix d'une résine adaptée à la dureté du matériau à polir rendra possible l'examen de la périphérie de l'échantillon.



Figure III .10.Enrobeuse enrobés



Figure III.11 : échantillons

III.7.2.le polissage

Cette opération comporte deux étapes:

III.7.2.1.Polissage abrasion (grossier)

Cette étape a pour but de débarrasser de la surface du métal de la couche écrouie lors du prélèvement et pour cela on utilise un papier abrasif de granulométrie décroissante 280, 400, 600, 1000, 1200. On obtient une série de raies fines, et on croise les raies de 90° après chaque opération La polisseuse utilisée est du type METASINEX



Figure III .12 : Appareil de polissage de finition

III.7.2.2. Polissage de finition :

Cette étape est effectuée sur un disque tournant du type MONTASUPAL ayant un support en feutre et en utilisant une poudre d'alumine (Al_2O_3) de granulométrie inférieure à $1\mu m$ diluée dans l'eau, l'état final de surface poli est tel un miroir (poli spéculaire)

A la fin du polissage, les échantillons doivent être lavés à l'eau pour éliminer toute particule solide retenue en surface, Puis les sécher (à l'aide d'un séchoir).



Figure III .13 : Appareil de polissage de finition

III.7.3. Attaque chimique

L'attaque chimique a pour rôle de révéler les joints des grains. Elle a été réalisée avec le réactif de KELLER de composition chimique suivante :

- 2 ml d'HF (48%).
- 5 ml de HNO_3 (concentré).
- 3 ml de HCL (concentré).
- 190 ml de H_2O .

On immerge les échantillons pendant 30 a40 secondes dans le réactif puis ils sont lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un séchoir.

III.7.4. Microscopie optique :

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

Le Microscope utilisé est de type (Carl Zeiss avec un agrandissement de 100 à 1000), équipé d'un dispositif permettant la prise des photos de la microstructure observée à

l'aide d'un appareil à photo connecté à l'ordinateur. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, il permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Les micrographies optiques ont été réalisées dans le sens perpendiculaire au flux de diffusion des éléments afin de montrer l'effet du profil de l'élément diffusé sur la microstructure.



Figure III.14: Microscope optique

Chapitre 4

Résultats et Interprétation

Pour les huit alliages (M1,M2,M3, M4, Z1, Z2, Z3, Z4), on a mesuré la dureté, la résilience, et nous avons observé la microstructure de chaque alliage avant et après le traitement thermique.

IV.1. microstructure :

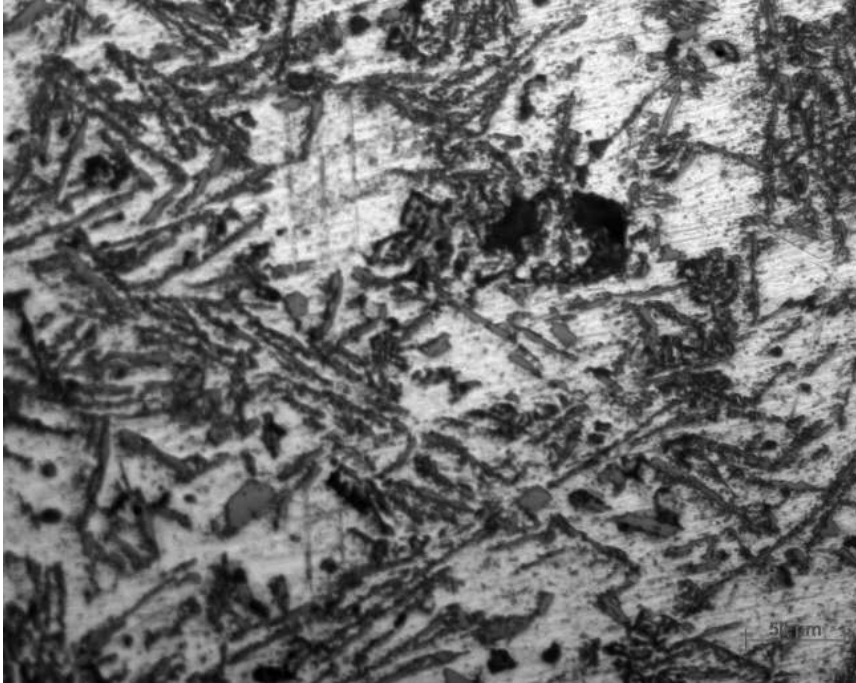


Figure IV.1.1 Microstructure de l'alliage M1 avant traitement thermique

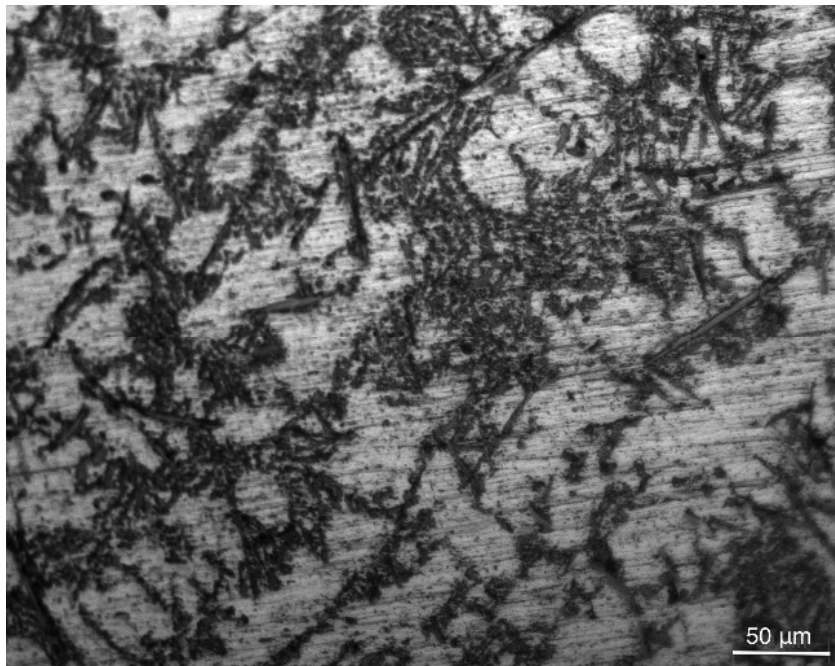


Figure IV.1.2. Microstructure de l'alliage M2 avant traitement thermique

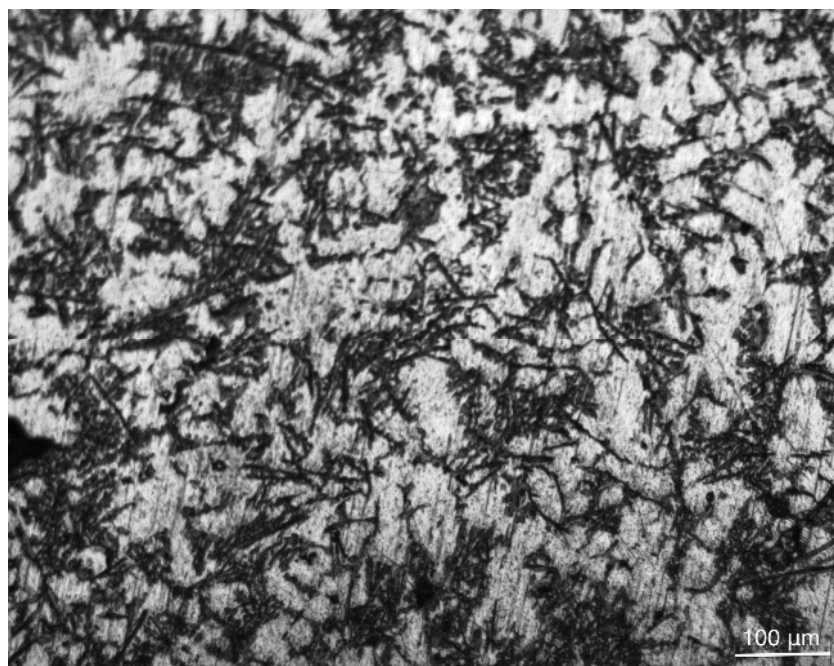


Figure IV.1.3. Microstructure de l'alliage M3 avant traitement thermique



Figure IV.1.4. Microstructure de l'alliage M4 avant traitement thermique

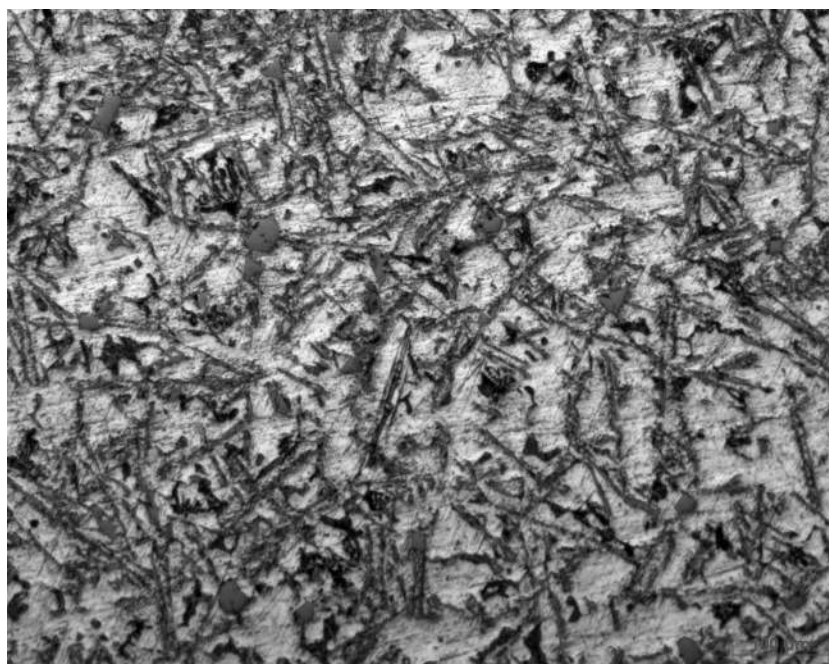


Figure IV.1.5. Microstructure de l'alliage Z1 avant traitement thermique

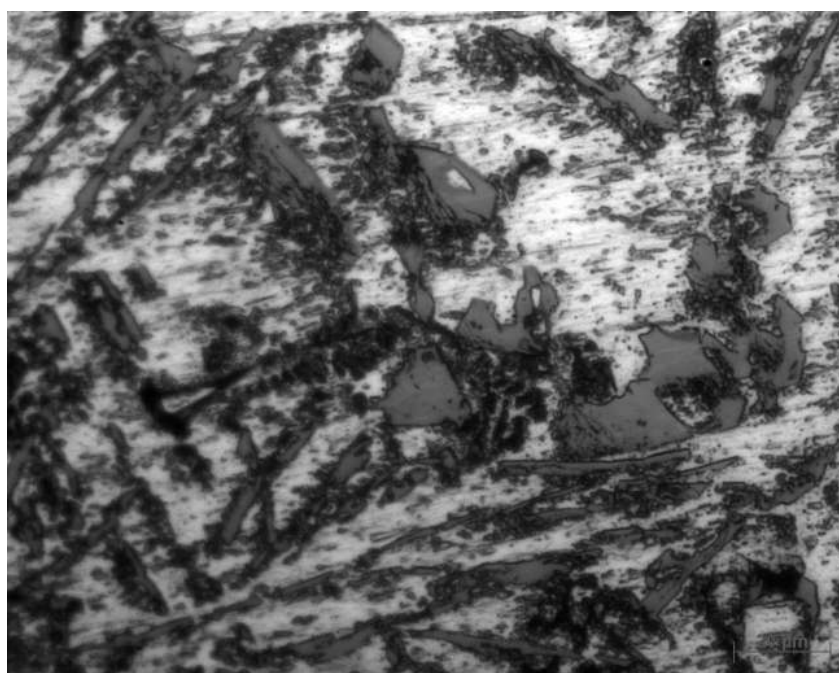


Figure IV.1.6. Microstructure de l'alliage Z2 avant traitement thermique

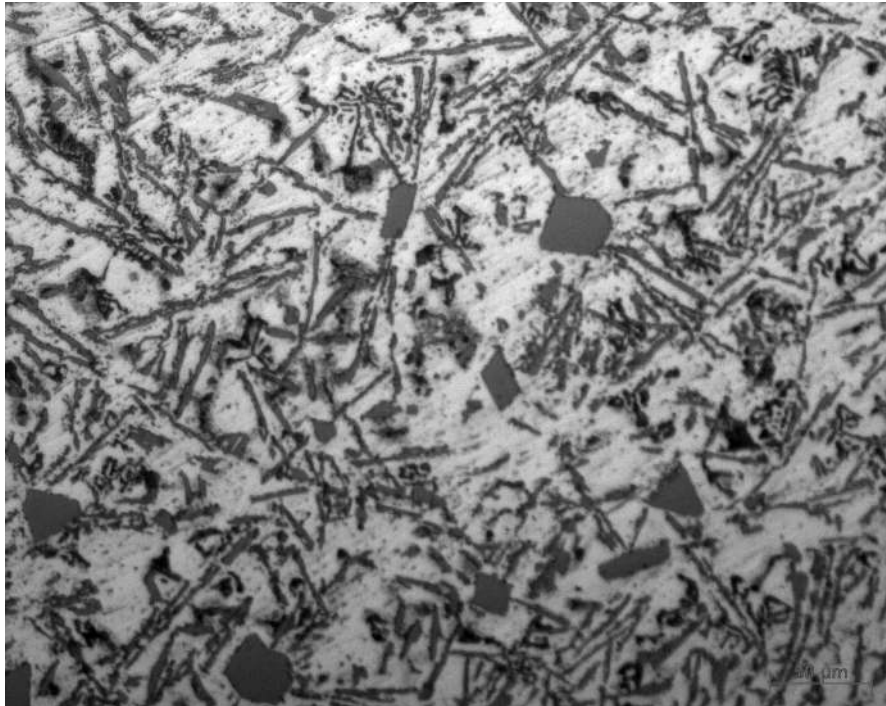


Figure IV.1.7. Microstructure de l'alliage Z3 avant traitement thermique

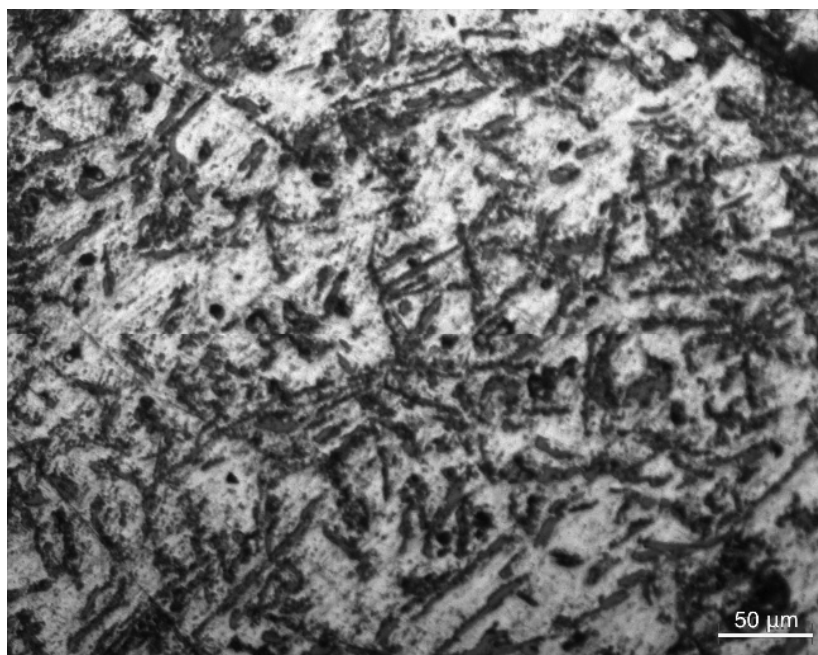


Figure IV.1.8. Microstructure de l'alliage Z4 avant traitement thermique

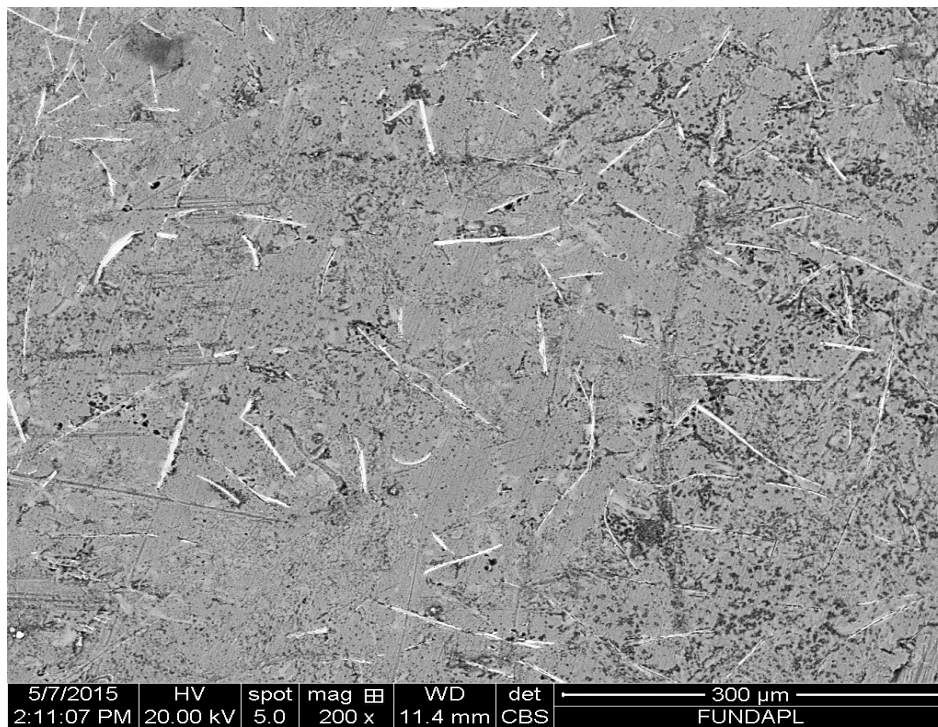


Figure IV.1.9. Micrographie électronique de l'alliage M3 après le traitement thermique

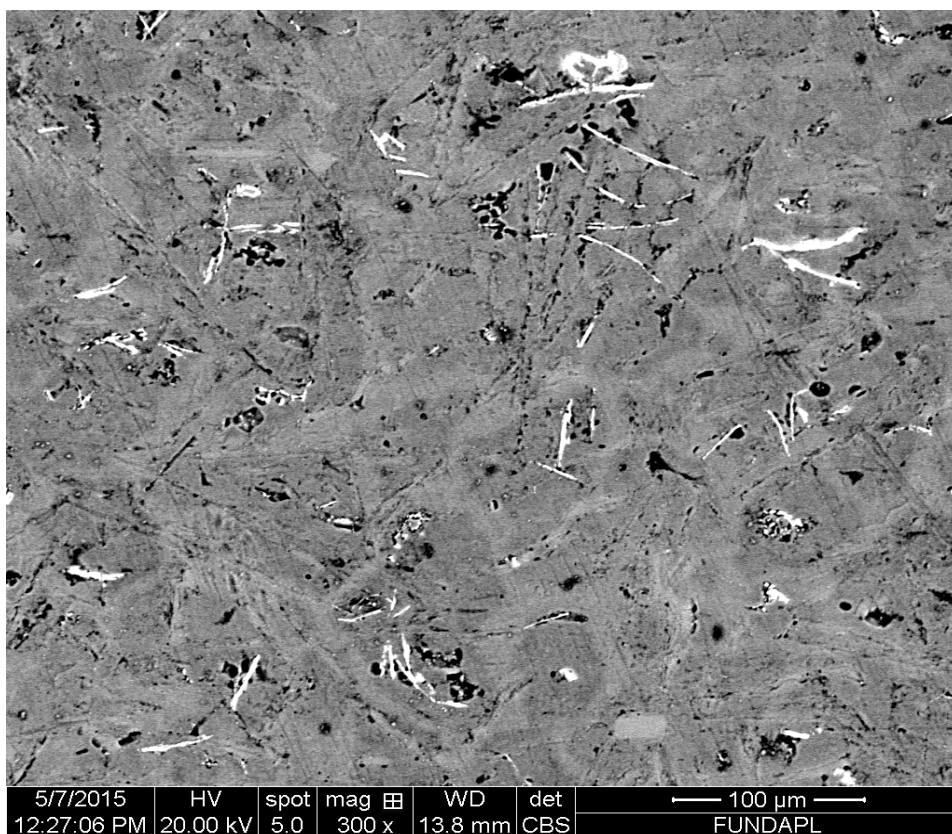


Figure IV.1.10. Micrographie électronique de l'alliage Z1 après traitement thermique

IV.1.1. Sur les échantillons bruts :

Fig1.1-1.8 montrent les microstructures optiques des alliages brutes; Sur tous les échantillons, les particules de silicium ont une morphologie aciculaire/lamellaire, une structure typique des alliages Al-Si proches de l'eutectique est observé, avec une structure dendritique plus au moins prononcée.

Effet du Magnésium : On note que l'ajout de Mg accentue la structure dendritique, et modifie la morphologie des particules de Si eutectique, et leur donne une forme lamellaire, plutôt qu'aciculaire pour les alliages sans Mg. Ce résultat est en accord avec les travaux d'Aguillera Luna et Al (2014) qui montrent une modification de la morphologie aciculaire vers le lamellaire lorsque le taux de Mg augmente de 0,4% à 0,6%, et que l'augmentation de ce dernier de 0,6% à 0,9% n'a pas d'effet significatif sur la morphologie du Silicium eutectique.

Effet du Zn : On remarque par contre que l'ajout de Zinc fait disparaître la structure dendritique.

IV.1.2. Effet du traitement thermique :

Après le traitement thermique qui consiste en une mise en solution à 490°C, suivie d'une trempe dans de l'eau tiède (60°C) puis d'un revenu à 200°C pendant 4h30, on constate une fragmentation et une sphéroïdisation des particules de Si eutectique, sauf sur les échantillons contenant de hautes teneurs en Zn (Z3, et Z4)

Phases intermétalliques :

Intermétalliques à base de Fer :

Les intermétalliques à base de Fer dans les alliages Al-Si sont principalement α -Fe, et β -Fe.

α -Fe peut apparaître sous forme d'écritures chinoises, d'étoiles, ou de sludge (phases polyèdres)

On observe la présence de la phase α -Fe sur tous les échantillons brutes, et cette phase ne change pas après le traitement thermique.

La phase β -Al₅FeSi est observée en petite quantité sur les alliages brutes, sauf sur l'échantillon Fe où elle apparaît en plus grande quantité, après le traitement thermique elle apparaît en grande quantité sur tous les échantillons, sous forme d'aiguilles de

plusieurs dizaines de micromètres de longueur, avec des bords pointus. Cet intermétallique est le plus nuisible aux propriétés mécaniques.

La phase α -Fe est une solution solide du Fer et du Cr dans la matrice cubique $Al_{15}Mn_3Si_2$, ou 90% des atomes de Mn peuvent être substitués par les atomes de Fe et de Cr, pour une stœchiométrie finale de $Al_{15}(Fe,Mn,Cr)_3Si_2$.

La nature des phases intermétalliques du Fer dépend des proportions d'éléments d'alliages, notamment le ratio Fe/Mn. Un ratio Fe/Mn de 2 :1 est idéal pour avoir une quantité maximale de la phase α -Fe, et minimale de β -Fe qui est nocif pour les propriétés mécaniques.

Intermétalliques à base de Mg et Cu :

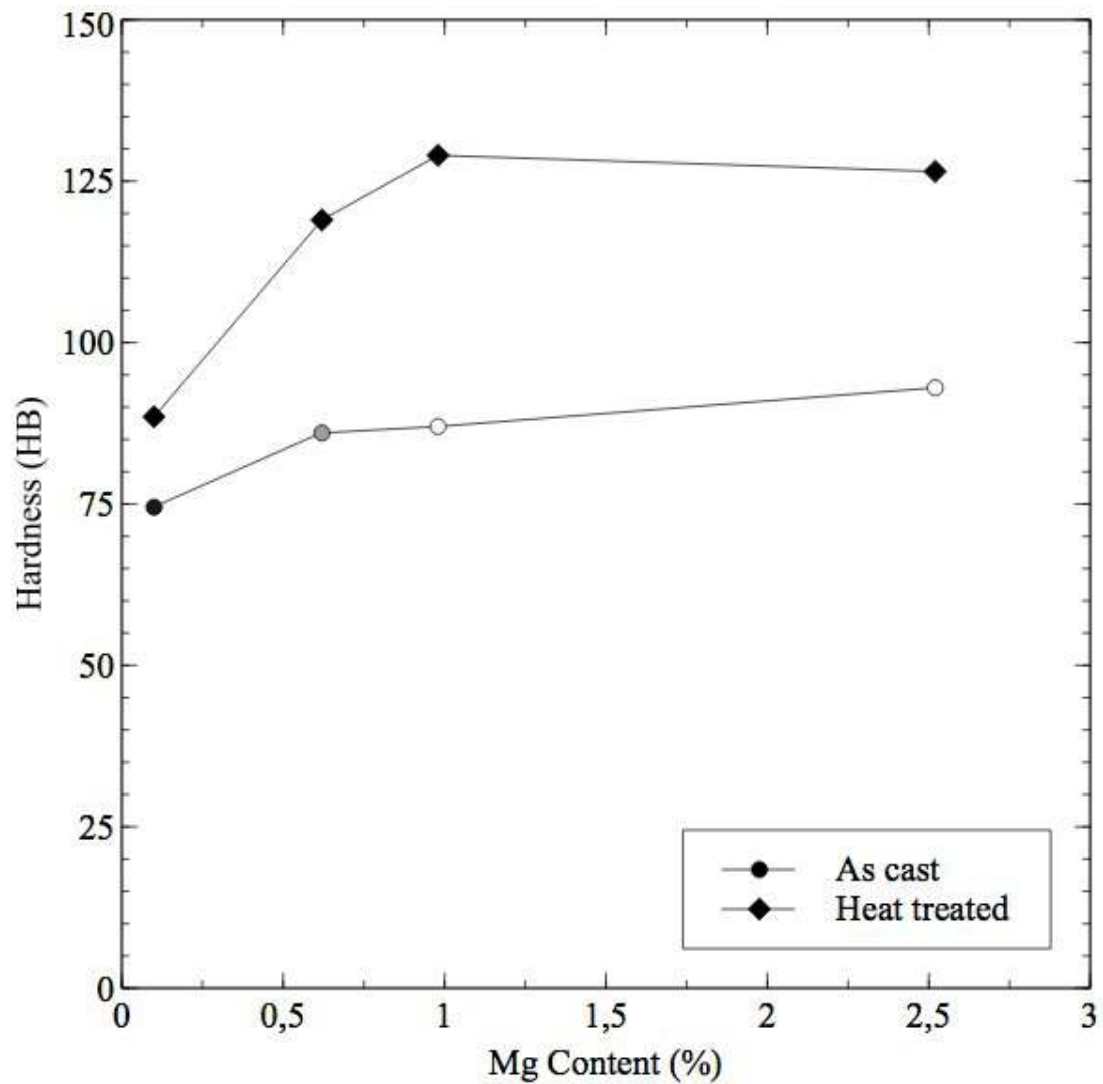
Les phases prédites par le diagramme de phase Al-Si-Cu-Mg (livre diagramme de phase) qui correspondent à nos compositions d'alliages sont les phases d'équilibres θ - Al_2Cu , β - Mg_2Si , et Q- $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$. Les phases β et Q sont présentes uniquement sur les alliages brutes contenant de hautes teneurs en Mg (M2, M3, M4). Fig1.4 montre les phases d'équilibres β - Mg_2Si , et Q- $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ dans l'échantillon brute M4.

Les phases θ et β sont dissoutes durant le traitement de mise en solution, ces phases sont réputées pour être faciles à dissoudre

A la solidification, la température de formation de la phase θ - Al_2Cu est inférieure à celle de la transition eutectique L-Al+ α -Al (655°C) par conséquent les cristaux de α -Fe offrent des sites de nucléation pour les phases de cuivre, le reste de ses phases se précipite au joints de grains α -Al.

La phase de Mg qui se précipite est β - Mg_2Si .

IV.2.dureté : Pour les alliages (M1,M2,M3, M4, Z1,Z2,Z3, Z4), on a mesuré la dureté avant et après un traitement thermique.



FigureIV.2.1.dureté en fonction de pourcentage de Mg

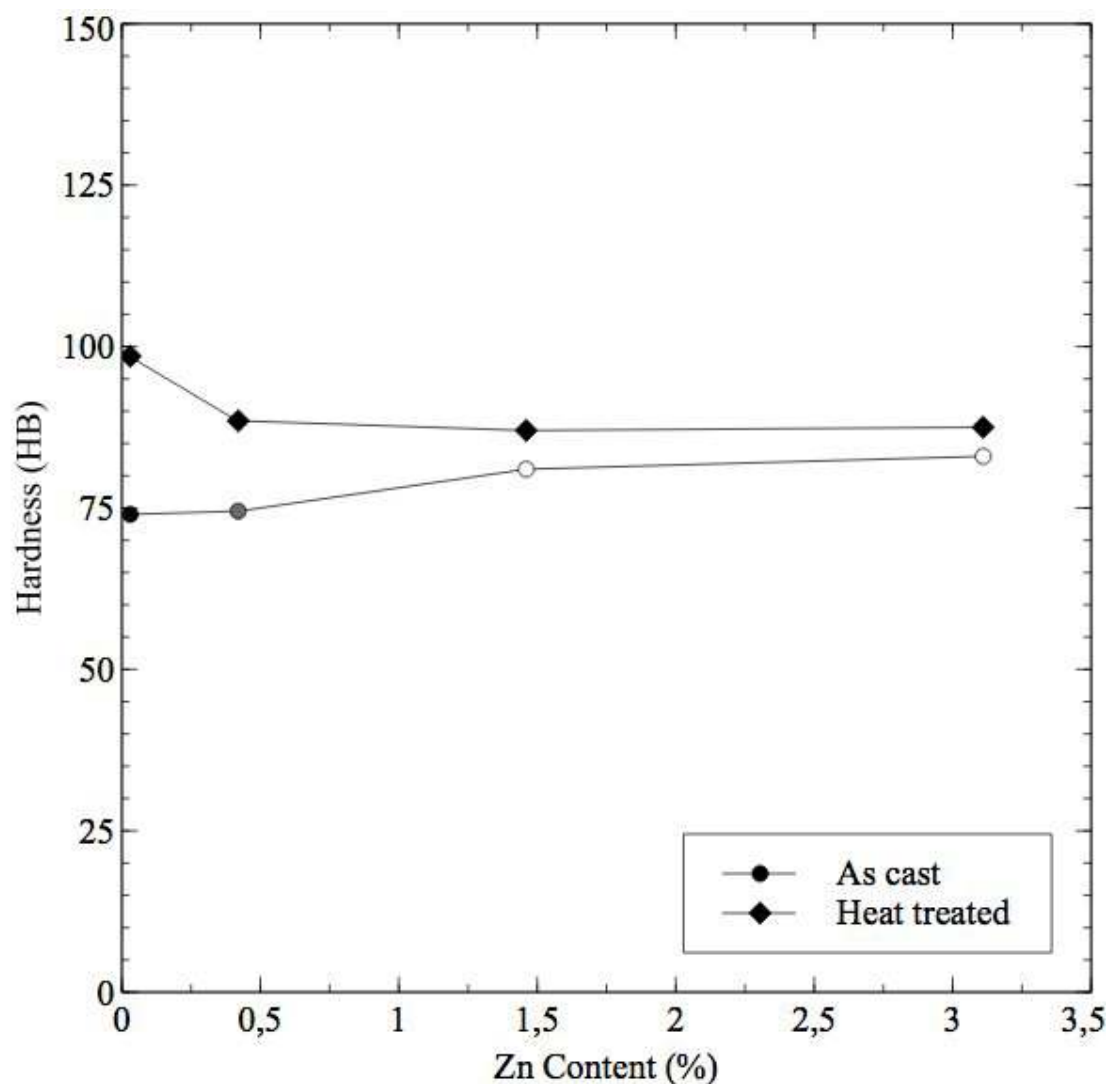


Figure IV.2.2.dureté en fonction de pourcentage de Zn

IV.2.1.Durcissement :

IV.2.1.1.Mécanisme de durcissement :

Le principal type de durcissement qui intervient dans les alliages d'aluminium pour fonderie est le durcissement par précipitation. Les dislocations interagissent avec les précipités et entraînent une action durcissante.

Lorsque le précipité est cohérent, la dislocation va suivre le réseau et le cisailer, et dans le cas d'un précipité incohérent, plus dur que la matrice α -Al, les dislocations

sont obligés de le contourner (Looping) (Mécanisme d'Orowan). Dans la plupart du temps, les alliages Al de fonderie sont soumis au contournement.

Les zones GP sont petites et cohérentes et cèdent au cisaillement, leur résistance augmente avec leurs tailles, et leur transformation en θ'' et θ' semi cohérentes. Le durcissement s'accroît jusqu'à ce que le contournement devienne compétitif avec le cisaillement. La valeur maximale de la dureté est atteinte lorsque le taux de précipités cohérents est à son maximum.

Lorsque les phases intermédiaires θ' , et β' apparaissent, l'adoucissement commence. La taille des phases métastables augmente avec le temps de vieillissement, ce qui fait augmenter leur dureté, mais réduit l'énergie nécessaire à leur contournement, car plus le précipité est gros, plus le rayon de courbure de la dislocation est grand, et plus l'énergie de franchissement est faible. Avec la coalescence des précipités, les plus grands se comportent comme des puits de potentiel pour les atomes de soluté, et croissent, tandis que les petits sont dissouts, ce qui induit une augmentation de la distance inter-précipités, et provoque une chute de la dureté.

Dans le cas d'un sur-vieillissement la coalescence continue jusqu'à l'émergence des phases d'équilibre θ -Al₂Cu, et β -Mg₂Si, ce qui provoque une chute de la dureté.

IV.2.1.2.Effet du Magnésium :

On observe une légère hausse de la dureté avec l'augmentation de la teneur en Magnésium pour les échantillons bruts. La hausse est plus significative entre les alliages M1 et M2 Cette hausse est due au durcissement par solution solide, ainsi que la précipitation à la solidification des phases intermétalliques d'équilibre Mg₂Si, et Al₅Cu₂Mg₈Si₆, le nombre de ces phases augmente avec la teneur en Mg, ce qui explique l'augmentation relativement proportionnelle de la dureté.

Après le traitement thermique, on obtient des valeurs de duretés beaucoup plus élevées qu'avec les échantillons bruts, si pour l'échantillon à 0,1% Mg l'augmentation est légère, elle est très significative pour les autres alliages.

Plusieurs facteurs participent au durcissement de ces alliages : La modification de la morphologie des particules de Silicium eutectique après le traitement thermique, mais surtout la précipitation des phases métastables du Magnésium, et aussi du cuivre β'' -Mg₂Si, β' -Mg₂Si, θ'' -Al₂Cu, et θ' -Al₂Cu.

IV.2.1.3.Effet du Zinc :

Une légère augmentation de la dureté en fonction de la teneur en Zinc est remarquée sur les alliages bruts. Cette augmentation est due au durcissement par solution solide.

Tous le Zn est présent sous forme de solution solide dans la matrice α -Al, à cause de la très grande solubilité du Zn dans l'aluminium (82,8wt%)

IV.3.Résilience :

résultats obtenus après l'essais de résilience

Alliages	Energie absorbé Avant traitement thermique (J)	Energie absorbé Après traitement thermique (J)
M1	12,5	26,6
M2	10,2	6,9
M3	8,7	5,8
M4	4,7	2,6
Z1	5,8	9,4
Z2	12,5	26,6
Z3	9,5	21
Z4	10,1	22,6

Tableau IV 1 : résultats obtenu après essai de résilience

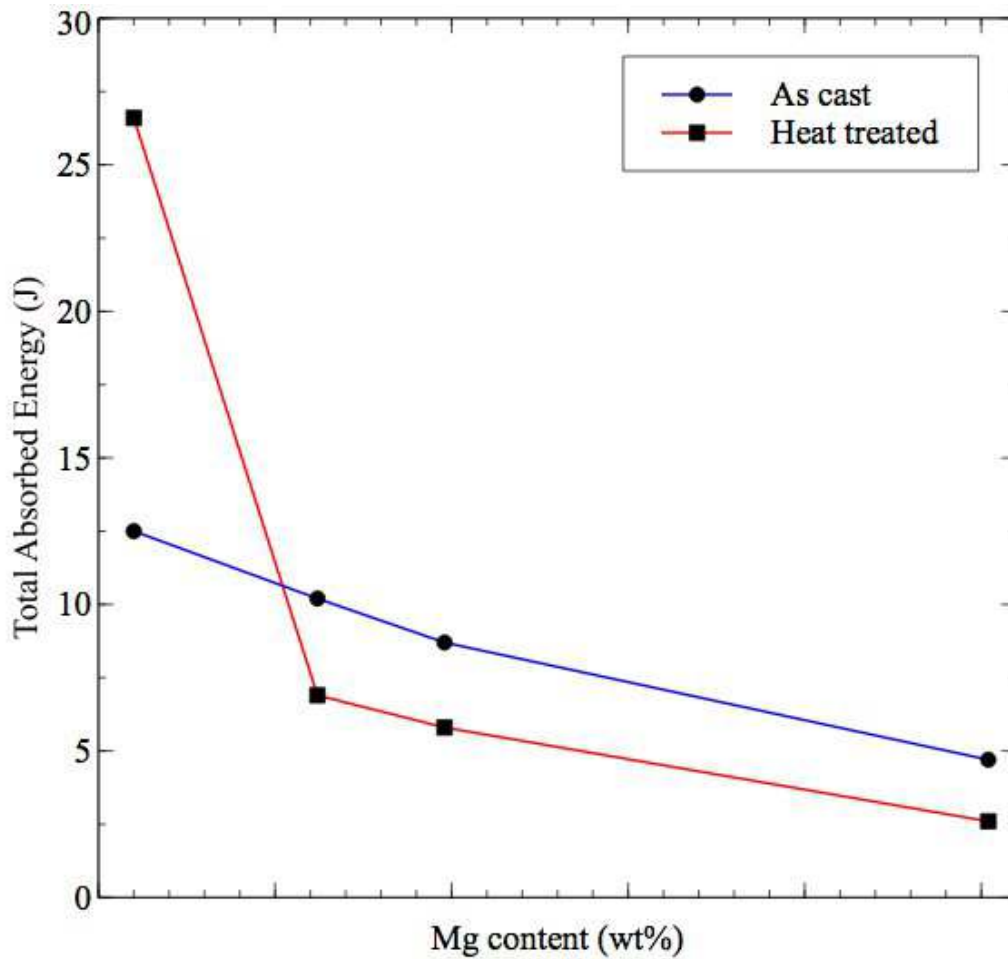


Figure IV.3.1. Résilience en fonction de pourcentage de Mg

Fig3.1 montre une baisse de la résilience des alliages avec l'ajout de Magnésium, que ce soit pour les échantillons brutes ou traités, la baisse est d'autant plus importante pour les alliages traités thermiquement, pour l'alliage M1 avec 0,1% Mg l'énergie absorbée est de 12,5 J pour l'échantillon traité, et de 26,6 J, avec l'ajout de Mg, la résilience baisse significativement pour les alliages brutes, et chute drastiquement pour les alliages traités (26,6 J pour M1, à 6,9 J pour M2).

Cette baisse peut s'expliquer par la précipitation des phases durcissantes du Magnésium, mais aussi par l'augmentation de la quantité des phases intermétalliques

d'équilibre comme Mg_2Si , ces phases sont responsables de l'augmentation de la dureté, mais aussi de la chute de la résilience de ces alliages.

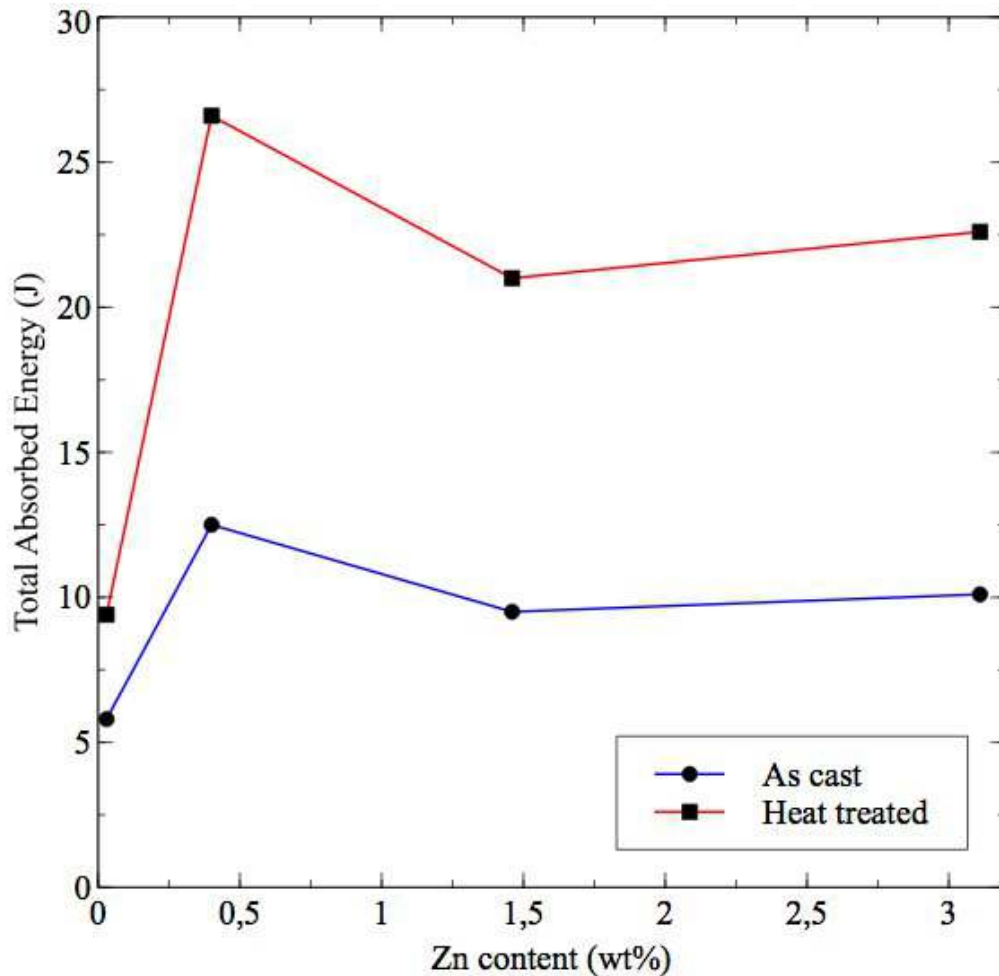


Figure IV.3.2. Résilience en fonction de pourcentage de Zn

Fig3.2 montre l'évolution de l'énergie totale absorbée lors de l'essai Charpy, en fonction de la teneur en Zn des alliages.

On constate que l'alliage sans Zn (Z1) affiche les valeurs les plus basses que ce soit pour l'échantillon brute ou traité, la résilience de ces alliages augmente avec l'ajout de Zn, cette augmentation est due au mécanisme de durcissement du Zn, qui se retrouve entièrement en solution solide, et ne crée pas de précipités ou des composés intermétalliques, contrairement au Mg, le durcissement par solution solide causé par le Zinc a peu d'effet sur la dureté, mais est très important pour la résistance à l'impact.

Conclusion générale