

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 surface

Thème :

Effet du vieillissement artificiel
sur les caractéristiques mécaniques et
microstructurales de l'alliage de fonderie
Al10SiMg

Proposé et dirigé par :

M.BOURNANE

A.BRAHIMI

Présenté par :

HAMOUDA HAMZA

Année universitaire 2014/2015

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes parents

Mes frères et sœurs

Ma cousine Nabila

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

Remerciement

En premier, je remercie **DIEU** pour m'avoir donné la patience et le courage durant ces années de mémoire.

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire de SDM du département de mécanique et au niveau de la SNVI de Rouiba.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'être présents lors de ma soutenance.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur **BRAHIMI** chef du département et Monsieur **BOURNANE** pour leurs conseils, et leurs disponibilités.

Un grand merci à monsieur **LOUKMANE REDOUANE** et à monsieur **MENSOURI SALAH EDDINE**, pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également les doctorants **NACER DILMI** et **NEMRI YACINE** pour leurs esprits critiques et leurs disponibilités.

Je remercie tous les travailleurs de la fonderie d'aluminium de la **SNVI**.

Je remercie également tous les enseignants et travailleurs de notre département.

Je remercie ma cousine **NABILA** pour toute son aide.

Finalement, je remercie tous ceux qui ont apporté leur contribution à la réalisation de ce travail.

❖ CHAPITRE I : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

INTRODUCTION.....	
I.1) GÉNÉRALITÉS SUR L'ALUMINIUM.....	1
I.2) L'OBTENTION D'ALUMINIUM.....	1
I.3) PROPRIÉTÉS D'ALUMINIUM	3
I.3.1) Masse volumique.....	3
I.3.2) Résistance à la corrosion.....	3
I.3.3) La conductibilité électrique.....	3
I.3.4) Propriétés mécaniques.....	3
I.3.5) Propriétés optiques.....	4
I.3.6) Propriétés physique de l'aluminium.....	4
I.4) PRINCIPALES UTILISATIONS DE L'ALUMINIUM.....	4
I.5) LES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	5
I.5.1) Les alliages corroyés.....	5
I.5.2) Les alliages de moulage.....	5
I.5.3) Les alliages frittés.....	5
I.6) DESIGNATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	6
I.6.1) Désignation numérique (EN 1780-1)	6
I.6.2) Désignation chimique (EN 1780-2)	6
I.6.3) Procédés de moulage	6
I.6.4) Traitements thermiques	7
I.7) ALLIAGES DE FONDERIE Al – Si.....	7
Introduction.....	7
I.7.a) AlSi10Mg	7
I.7.b) AlSi7Mg	8
I.7.c) AlSi13	8
I.7.1) DIAGRAMME D'EQUILIBRE	8
I.8) EFFETS DES ÉLÉMENTS D'ADDITION ET SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	9
I.9) APPLICATIONS DES ALLIAGES DE FONDERIE.....	11

❖ CHAPITRE II : ELABORATION ET TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES AL10SiMG.

II) ELABORATION INDUSTRIELLE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE	
AL10SiMG	12
Introduction	12
II.1) Matériaux étudiés	12
II.1.1) Compositions chimiques de l'alliage	12
II.1.2) Compositions chimiques des lingots livrés par l'aluminium français	13
II.1.3) Elaboration de l'alliage étudié	13
II.1.3.1) Matériel utilisé	13
II.1.3.1.1) Le four de fusion	13
II.1.3.1.2) Le four de maintien	13
II.1.3.1.3) La poche de coulée	14
II.1.3.1.4) Le pyromètre de Type K	14
II.1.3.2) La coulée	14
II.1.3.2.1) Dégazage	15
II.1.3.2.2) L'affinage du grain	15
II.1.3.2.3) Mise au titre	15
II.1.3.3) Moulage	16
II.1.3.3.1) Moulage au sable silico – argileux, sable noir	16
II.1.3.3.2) Moulage au sable à prise chimique	16
II.1.3.3.3) En coquille	17
II.1.3.4) L'ébarbage	19
II.1.4) Structure et traitements thermiques	19
II.1.4.1) Structure	19
II.1.4.2) Défauts internes	20
II.1.4.2.1) Défauts chimiques	20
II.1.4.2.2) Défauts physiques	20
II.1.4.3) Traitements thermiques industriels des alliages Al-Si	20
II.1.5) Principaux paramètres influençant les traitements thermiques	21
II.1.5.1) Température de mise en solution	21
II.1.5.2) Temps de mise en solution	22
II.1.5.3) Vitesse de refroidissement	22
II.1.5.4) Température de revenu et II.1.5.5) Durée de revenu	22
II.1.6) Différents durcissements	22
II.1.6.1) Durcissement par solution solide d'insertion ou de substitution	23
II.1.6.2) Durcissement structural par précipitation	23
II.1.6.3) Durcissement par affinement de la taille des grains	23
II.1.6.4) Existence de dislocations initiales	24
II.1.6.5) Conclusion	24
II.1.7) Structure de solidification des alliages Al10SiMg	24

❖ CHAPITRE III : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE ET ÉLABORATION

III.1) MATÉRIAU ÉTUDIÉ.....	26
III.2) CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES.....	26
III.3) LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L' AISi10Mg SUIVANT LA NORME AF.A57.702.....	27
III.4) TRAITEMENT THERMIQUE.....	27
III.4.1) Mise en solution	27
III.4.2) Trempe	27
III.4.3) Revenu	27
III.5) EXAMEN MICROGRAPHIQUE.....	28
III.5.1) Préparation des surfaces	28
III.5.2) Enrobage	28
III.5.3) Dressage	29
III.5.4) Dégrossissage	29
III.5.5) Finissage	29
III.5.6) Attaque chimique	29
III.6) OBSERVATION MICROSCOPIQUE.....	29
III.7) ESSAIS MÉCANIQUES.....	30
III.7.1) Essai de traction	30
III.7.1.1) Eprouvettes	31
III.7.1.2) Caractéristiques obtenues	33
III.8.2) Essai de dureté	33
III.8.2.1) Introduction	33
III.8.2.2) Principe	33
III.7.4) Essai de résilience	34
Introduction	34
Définition	34

❖ CHAPITRE IV : DISCUSSION DES RESULTATS

Introduction	36
IV.1) Métallographie	36
IV.1.1) Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg coulée en sable	36
Etat brut de coulée	36
Etat mise en solution homogénéisation de la structure à 495°C pendant 2h	37
Etat mise en solution homogénéisation de la structure à 525°C pendant 6h	37
Revenu ou vieillissement artificiel	38
IV.1.2) Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg coulée en coquille	38
Etat brut de coulée	38
Etat mise en solution homogénéisation de la structure à 495°C pendant 2h	39
Etat mise en solution homogénéisation de la structure à 525°C pendant 6h.....	39
Revenu ou vieillissement artificiel	40
IV.2) essai de traction	42
IV.3) Essai de dureté	49
IV.4) Essai de résilience	51

Conclusion générale

Références

LISTE DES TABLEAUX

Tab (I.1)	Propriétés physiques de l'aluminium.	4
Tab (I.2)	Familles des alliages d'aluminium moulés.	6
Tab (II.1)	Composition chimique de l'alliage Al10SiMg.	12
Tab (II.2)	Compositions chimiques des lingots livrés par l'aluminium français.	13
Tab (III.1)	Caractéristiques et désignation des états sable et coquille	26
Tab (III.2)	la composition chimique de l'alliage AlSi10Mg suivant la Norme AF.A57.7	27
Tab (IV.1)	caractéristiques mécanique de traction Brut de coulées sable 1 et 2	42
Tab (IV.2)	caractéristiques mécanique de traction Brut de coulées coquille 1 et 2	43
Tab (IV.3)	caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 495°C pendant 2h sable 1 et 2	43
Tab (IV.4)	caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 495°C pendant 2h coquille 1 et 2	43
Tab (IV.5)	caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 525°C pendant 6h sable 1 et 2	44
Tab (IV.6)	caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 525°C pendant 6h coquille 1 et 2	44
Tab (IV.7)	caractéristiques mécanique de traction, Revenu à 175°C pendant 8h sable 1 et 2	45
Tab (IV.8)	caractéristiques mécanique de traction, Revenu à 175°C pendant 8h coquille 1 et 2	45
Tab (IV.9)	valeurs de dureté HB de l'alliage Al10SiMg pour les deux modes coulée	49
Tab(IV.10)	valeurs de KC de l'alliage Al10SiMg pour les deux modes coulées	51

Introduction Générale

La forte demande qui ne cesse d'augmenter chaque année des alliages AlSiMg par les différents secteurs d'activité est dû aux divers avantages qu'offrent les trois principaux constituants de ces alliages de fonderie.

L'aluminium, le silicium et le magnésium sont, d'une part fortement distingués par leur très faible densité ($d = 2,6$ soit $1/3$ de l'acier), ce qui conduit à réduire le poids des structures et des engins dans les différentes industries en vue de diminuer leur consommation en carburant ou d'augmenter leur charge utile, d'autre part en abondance dans l'écorce terrestre ce qui permet leur extraction et leur fabrication à bon prix.

L'aluminium a une excellente conductivité électrique ce qui le favorise pour le transport d'énergie, une excellente conductivité thermique avec sa place dans les échangeurs thermiques et ce qui permet la diffusion facile dans les traitements thermiques, un pouvoir réflecteur élevé à la lumière ce qui le favorise pour la construction des appareils optiques et des télescopes, une bonne résistance à l'oxydation ce qui garantit un aspect inaltérable, une capacité à résister à la corrosion qui privilégie la durabilité. Par ailleurs, son usinage est économique et donne aux pièces un aspect extérieur agréable voire esthétique qui peut être complété par divers traitements de surface (peinture, anodisation,...).

L'aluminium et ses alliages se prêtent également à tous les processus de transformation et sont recyclables et intègrent les préoccupations environnementales.

Tous ces points forts brassent aujourd'hui un très grand domaine de leur utilisation qu'ils soient dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres : routier et ferroviaire, maritimes, aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique, menuiserie aluminium.....

Les alliages d'aluminium de fonderie ont l'avantage de pouvoir être utilisés dans tous les procédés de moulage connus. Compte tenu de leur température de fusion modérée et de leur bonne aptitude au moulage, ce sont les procédés en moules métalliques, qui sont les plus répandus notamment pour les grandes séries, le moulage en sable reste particulièrement bien adapté aux pièces à caractéristiques particulières exigées par l'automobile ou l'aéronautique, compte tenu de la diversité des procédés disponibles en fonderie d'aluminium, c'est le choix

judicieux du couple alliage /procédé le mieux adapté, qui permet la réalisation de pièces moulées dans les meilleures conditions de qualité et de rentabilité.

Les alliages Al-Si qui ont de bonnes propriétés de fonderie telle que la coulabilité, sont les plus utilisés.

Notre travail porte sur l'étude de l'effet du vieillissement artificiel sur le comportement mécanique de l'alliage de fonderie Al10SiMg utilisé dans la fabrication de diverses pièces à l'unité de fonderie de la SNVI.

Les deux modes de coulée sont sable et coquille et les différents états étudiés pour chaque mode sont l'homogénéisation à 495°C pendant 2h, suivi d'un refroidissement à l'air libre, homogénéisation à 525°C pendant 6h suivi d'une trempe à l'eau chauffée à 65°C, et d'un revenu à 175°C pendant 8h.

On effectuera des essais mécaniques de Traction, dureté, et Résilience, ainsi que la métallographie pour ces différents régimes de traitement thermique et pour chaque mode de coulée.

Notre étude s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre consacré à un rappel bibliographique qui traite l'aluminium et ses alliages.

Le deuxième chapitre consacré à l'élaboration et traitements thermiques des alliages Al10SiMg.

Le chapitre trois est la partie expérimentale, nous avons présenté le matériau étudié en donnant un descriptif détaillé des méthodes expérimentales utilisées pour la détermination des caractéristiques mécaniques de traction, de dureté, de résilience et de microstructure.

Le dernier chapitre est réservé à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

L'aluminium et ses alliages

I.1) Généralités sur l'aluminium :

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 inventé 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...

I.2) L'obtention d'aluminium :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre ; il constitue le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal [1]. L'élaboration de l'aluminium consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis à réduire cette dernière en aluminium pur. Le cycle de fabrication est celui du procédé Bayer, breveté en 1887 et toujours en service [1]. L'aluminium est un métal très répandu sur terre ; il constitue le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal. L'élaboration de l'Al consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis à réduire cette dernière en aluminium pur. Le cycle de fabrication est celui du procédé Bayer, breveté en 1887 et toujours en service [2].

- **La Bauxite**

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

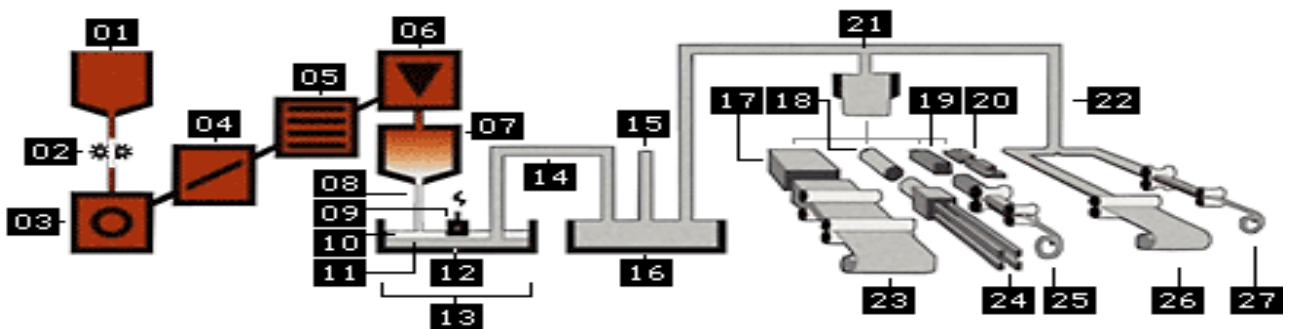
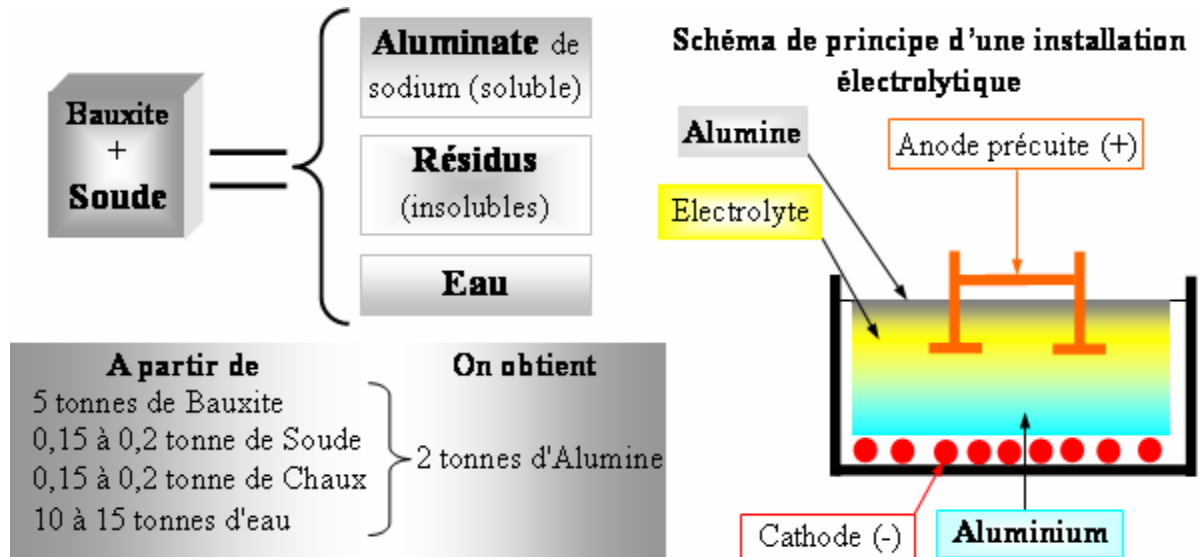
- **L'alumine**

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.

- **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.

Schémas 1 : Principaux stades dans la fabrication de l'aluminium



- | | | |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 01 - Bauxite | 10 - Électrolyte en fusion | 19 - Lingot de tréfilage |
| 02 - Broyeur | 11 - Aluminium en fusion | 20 - Lingot de fonte/fonderie |
| 03 - Autoclave | 12 - Cathode | 21 - Coulée en lingots |
| 04 - Décanteur | 13 - Cuve d'électrolyse | 22 - Coulée en continu |
| 05 - Filtre-Pressé | 14 - Siphon | 23 - Tôle |
| 06 - Décomposeur | 15 - Métaux d'alliage | 24 - Profilés |
| 07 - Four de calcination | 16 - Four d'attente | 25 - Fil machine |
| 08 - Alumine | 17 - Lingot de laminage | 26 - Tôle |
| 09 - Anode | 18 - Lingot d'extrusion | 27 - Fil Machine |

I.3) Propriétés d'aluminium :

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières.

I.3.1) Masse volumique :

La masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m^3 . L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

I.3.2) Résistance à la corrosion :

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche d'oxyde protectrice plus épaisse par anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs dans le bâtiment. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium sont sujets à la corrosion par piqûre, la corrosion sous contrainte, la fatigue corrosion, voire la corrosion généralisée. Le degré de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

I.3.3) La conductibilité électrique :

La conductibilité électrique de l'aluminium commercial atteint 62 % de celle du cuivre. Par ailleurs, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium. Un conducteur en aluminium dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins.

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité. La forme sous laquelle ces éléments sont intégrés dans la matrice d'aluminium modifie ses propriétés.

I.3.4) Propriétés mécaniques :

L'aluminium commercial possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois les améliorer considérablement par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas.

Les principales propriétés mécaniques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau (I.1)

Tab (I.1) : Propriétés physiques de l'aluminium [2].

<i>Propriétés</i> \ <i>état</i>	<i>Coulée</i>	<i>Laminé recuit</i>
<i>Résistance traction (N/mm)</i>	70 à 100	70 à 90
<i>Limite d'élasticité (N/mm²)</i>	30 à 40	30 à 40
<i>Allongement (%)</i>	15 à 25	40 à 30
<i>Dureté Brinell</i>	15 à 25	15 à 25
<i>Module d'élasticité (N/mm²)</i>	67500	67500

I.3.5) Propriétés optiques :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre du visible, il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage. Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

I.3.6) Propriétés physiques :

L'aluminium est un élément du groupe III dans le tableau de Mendéléiev. Son numéro atomique étant $Z=3$, sa masse atomique $M=26,97$. ses températures de fusion et d'ébullition sont 660°C et 1800°C respectivement. il est de structure cubique à faces centrées de paramètre $a=4,0412 \text{ \AA}$. La caractéristique physique principale de l'aluminium est sa faible densité $2,7\text{g/cm}^3$ [6].

I.4) Principales utilisations de l'aluminium :

Les caractéristiques intrinsèques de l'aluminium (légèreté, conductivité, résistance à la corrosion, propriétés mécaniques) ainsi que le développement de ses alliages d'une part et des techniques de mise en forme d'autre part, lui ont ouvert d'innombrables domaines d'utilisation, dont les principaux sont : les transports, le bâtiment, la construction électrique et l'emballage [2].

Dans les transports, il est utilisé pour la fabrication des carrosseries, pare-chocs, blocs moteurs, etc. Par rapport à l'acier et à la fonte, l'aluminium permet un gain sensible de poids et donc une certaine économie d'énergie. De plus, il ne rouille pas, il peut être moulé sous pression, s'usine facilement et permet d'obtenir des formes complexes par filage.

Par rapport aux matières plastiques, il présente l'avantage d'une meilleure tenue à la chaleur et au vieillissement et d'une mise en forme plus rapide [2].

Dans le Bâtiment, il est utilisé dans les ossatures, les bardages, les toitures, la menuiserie et les balcons). Ainsi, l'aluminium remplace aussi bien l'acier que le bois : il ne demande pas d'entretien, il présente une bonne persistance des performances, une possibilité de formes complexes et un encombrement réduit [2].

Dans la Construction électrique: (câbles isolés, câble nus, transformateurs), 1kg d'Aluminium est équivalent à 2 kg de cuivre, Dans l'Emballage (boîtes, aérosols, emballages divers), l'aluminium présente, par rapport au fer blanc, l'avantage de ne pas rouiller, de s'emboutir, de se filer et de s'usiner facilement.

Il a par ailleurs une grande aptitude à la décoration, de même qu'il est imperméable (gaz, eau, lumière) [2].

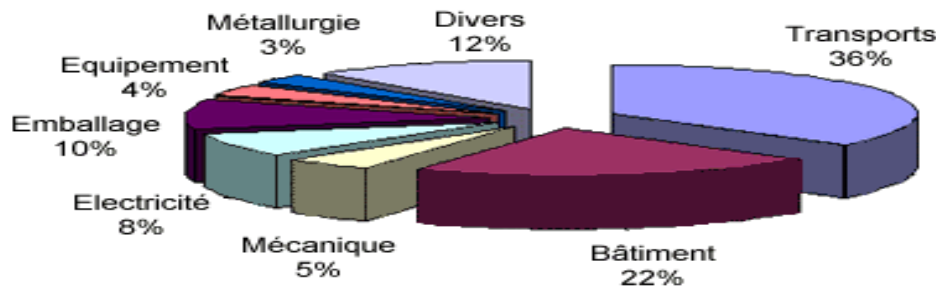


Fig.I.1 : Répartition de la consommation d'aluminium

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 [3].

Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

I.5.1) Les alliages corroyés : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage et le laminage.

I.5.2) Les alliages de moulage: obtenus par fonderie seulement.

I.5.3) Les alliages frittés: élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

I.6) Désignation des alliages d'aluminium :

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.

Le préfixe EN suivi d'un espace.

- La lettre A qui représente l'aluminium.

- Une lettre qui représente la forme du produit.

C pour les pièces moulées et Un tiret.

I.6.1) Désignation numérique (EN 1706-1) :

Elle dépend essentiellement de l'élément d'alliage principal comme l'indique sur le tableau.I.2 [3].

Tab (I.2) : Familles des alliages d'aluminium moulés [3].

Famille	Désignation	Élément d'alliage principal
Série 20000	2xxxx	Cuivre (Cu)
Série 40000	4xxxx	Silicium (Si)
Série 50000	5xxxx	Magnésium (Mg)
Série 70000	7xxxx	Zinc (Zn)

I.6.2) Désignation chimique (EN 1706-2) :

Elle est dite "chimique" ou "symbolique", car elle est basée sur les symboles des éléments alliés. Cette désignation reprend les symboles des constituants de l'alliage, suivis, pour les principaux, de leurs proportions dans l'alliage. Ces dernières sont indiquées en pourcentage massique.

Exemple :

EN 1706 AC-43000 (numérique),

EN 1706 AC-**Al10SiMg** (chimique).

AS10G (Métallurgique).

I.6.3) Procédés de moulage :

Y : signifie métal moulé.

- le premier chiffre indique le mode de moulage

(2) -moulage sable.

(3) -moulage coquille.

-le deuxième chiffre indique la nature du traitement thermique.

(0) -sans traitement.

(3) -trempé et revenu.

I.6.4) Traitement thermique :

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

F : état brut de fonderie sans traitement thermique.

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).

I.7) Alliages de fonderie Al – Si :

I.7.1) Introduction :

Le moulage est un procédé le plus facile d'obtention à partir de l'état liquide des pièces ayant leurs formes définitives et leurs côtes presque exactes après démoulages.

Il existe plusieurs procédés de moulage. Le choix de l'un d'eux est souvent dicté par trois facteurs suivants :

- Forme et dimensions de la pièce.
- Ses propriétés recherchées.
- Son prix de revient.

Les alliages de moulage qui régissent notre étude sont de la famille Aluminium – Silicium (Avec magnésium) : série 40000 et qui sont très loin les plus utilisés.

La très grande majorité de ces alliages présentent une composition hypo-eutectique, eutectique ou hyper-eutectique.

Ils se coulent aussi bien dans des moules en sable que dans des coquilles par gravité 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 [4]. Parmi les principaux alliages de ces séries on peut citer:

III.4.2. a. AlSi10Mg

La teneur en silicium, donne à cet alliage une composition proche de l'eutectique et lui confère d'excellentes propriétés de fonderie. A 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 [5].

III.4.2. b. 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 [5].

III.4.2. c. 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 [5].

I.7.3) Diagramme d'équilibre Al-Si :

Le diagramme d'équilibre des alliages de fonderie Al-Si représenté par la figure I.1.1. Nous montre :

- Le pourcentage maximum de silicium soluble dans l'aluminium à l'état solide est de 1,65 % à la température $T_E = 577^\circ\text{C}$, donné par le point A.
- Le pourcentage maximum d'aluminium soluble dans le silicium à l'état solide est de 97 % à la température $T_E = 577^\circ\text{C}$, représenté par le point F.
- Deux solutions solides α et β respectivement riche en Aluminium et en Silicium.
- la droite AB : le solvus.
- **Le liquidus** : constitué de deux courbes CE et ED avec un point eutectique E défini par une température de 577°C ,
- **Le solidus** constitué de trois droites CA, AEF droite horizontale représentant l'eutectique et FD
- $0\% < \text{Si} < 1,65\%$ solution solide α riche en Aluminium.
- $1,65\% \leq \text{Si} \leq 10,5\%$ alliages de composition hypoeutectique.
- $11\% \leq \text{Si} \leq 13,5\%$ alliages de composition eutectique.
- $14\% \leq \text{Si} < 97\%$ alliages de composition hypereutectique.

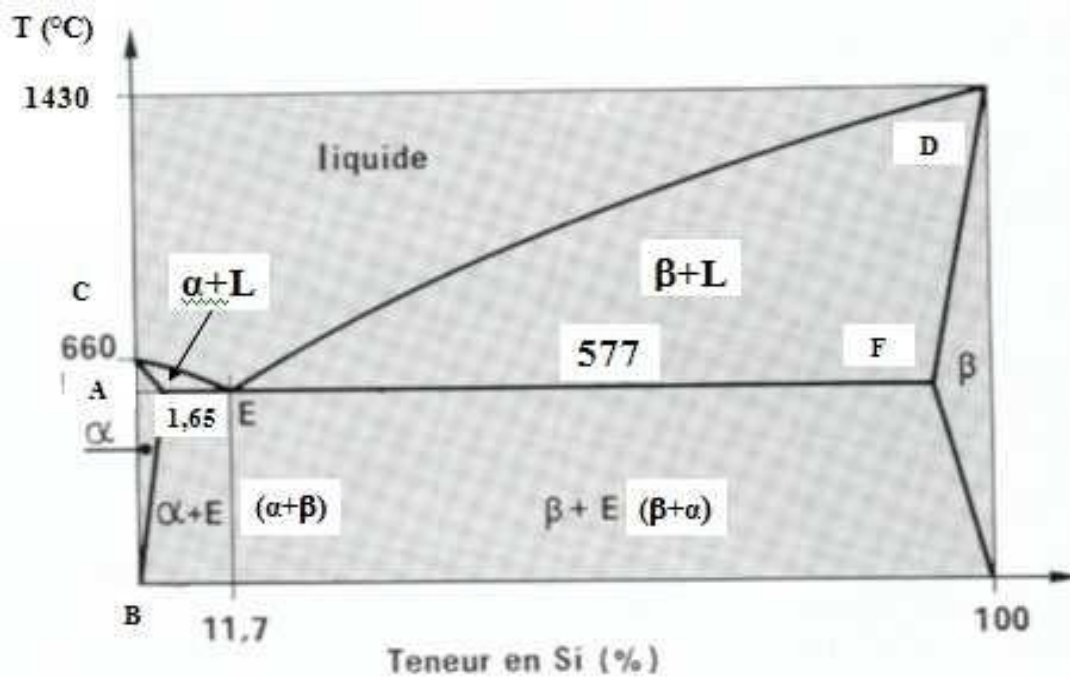


Fig.I.2 : Diagramme d'équilibre Al-Si

I.8) 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 [6]. 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. [6]

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. [7]

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 à chaud mais coûte 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.9) Applications des alliages de fonderie :

Dans la catégorie des alliages au silicium, selon la norme AFNOR NF A 02-004 (la lettre du métal de base et les lettres correspondants aux éléments d'addition sont rangées par ordre de teneur décroissante en %), nous pouvons citer :

- les **AS9U3G** ou **AS7U3G**, destinés à une utilisation générale, traitables thermiquement et faciles à couler (culasses, blocs moteur, carters...); l'alliage étudié par [8] était un alliage de deuxième fusion appelé 319 (AS7U3G T5).
- les **AS5U3**, semblables aux alliages précédents mais plus facile à obtenir en première fusion (culasses, maitres cylindres de frein).
- les **AS7G** (aussi appelés A356) qui s'usinent moins aisément que les précédents mais présentent une excellente résistance à la corrosion, une grande tolérance au dommage et sont les plus utilisés (culasses, jantes).
- les **AS10G**, qui ont des propriétés intermédiaires entre AS7G et AS13 (culasses, collecteurs, cache culbuterie, tube de pont, carters, anneaux de synchronisation de boîte de vitesse...).
- les **AS10GU** qui peuvent présenter un système durcissant secondaire plus complexe (culasse).
- les **AS13** et **AS12UNG** dans lesquels la forte teneur en silicium conduit à une excellente coulabilité, une faible dilatation thermique et une bonne résistance à l'usure (pistons).
- les **AU8S** qui présentent une excellente usinabilité et une bonne dureté à chaud sans traitement thermique avec cependant une résistance à la corrosion médiocre.

Chapitre II

**Elaboration et traitements
thermiques des alliages Al10SiMg**

II) Elaboration industrielle des alliages d'aluminium de fonderie Al10SiMg :

Introduction :

Dans cette contribution nous nous sommes intéressés à l'étude de l'élaboration d'alliages d'aluminium de fonderie Al10SiMg disponible à la S.N.V.I de Rouiba Unité Fonderie Aluminium, livrés par Pechiney sous forme de lingots de dimensions normalisées. Son élaboration, dont la charge est composée respectivement de \approx (40 à 50) % de lingots neufs et d'un mélange de jets de coulée \approx (50 à 60) % de retour, nécessitent beaucoup de soins et de précautions à prendre car cet alliage s'oxyde rapidement à haute température et se contamine facilement en atmosphère libre et au contact d'outils de manutention. Pour corriger la perte due au feu du magnésium et l'appauvrissement en manganèse et en silicium du retour, la fonderie dispose respectivement de trois types d'alliages mères AlMg10, AlMn10 et AlSi22 livrés par la même société Française sous forme de lingots. [12]

II.1) Matériaux étudiés :

Les matériaux utilisés sont fournis gracieusement par la S.N.V.I. Il s'agit des alliages à base d'aluminium contenant 10% de silicium en pourcentage massique, une quantité de magnésium inférieure à 1% et quelques traces d'impuretés. Cet alliage est désigné par : Al10SiMg et donne des résultats surs, reproductibles et conformes à la norme, à condition que : La composition chimique de l'alliage reste dans les tolérances prévues, l'emploi des flux soit observé conjointement aux règles générales de fusion et le traitement thermique éventuel soit effectué correctement.

II.1.1) Compositions chimiques de l'alliage :

Les tableaux ci-dessous présentent les compositions chimiques de l'alliage considéré selon la norme NF A57-702 et selon l'analyse effective à la SNVI. Les compositions ci-dessous correspondent aux tolérances de composition dans les pièces coulées en sable et en coquille. Les alliages entrant dans ces tolérances de composition, convenablement élaborés et éventuellement traités thermiquement, donnent des éprouvettes ayant au moins les caractéristiques mécaniques bien déterminées.

Tab II.1) Composition chimique de l'alliage Al10SiMg

Eléments chimiques	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Co
% Selon NFA57-702	$\leq 0,55$	$9 \div 10,5$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$0,17 \div 0,4$	$\leq 0,5$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	$\leq 0,2$

II.1.2) Compositions chimiques des lingots livrés par l'aluminium français :

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

Tab II.2) Composition des lingots Al10SiMg, livrés par l'Aluminium Français.

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

II.1.3) Elaboration de l'alliage étudié :

II.1.3.1) Matériel utilisé:

II.1.3.1.1) Le four de fusion : est constitué d'un couvercle principal et d'une virole métallique entourée de deux couches, la première en béton isolant, la deuxième en béton réfractaire, d'épaisseurs de 150mm chacune. A l'intérieur de la virole, trois briques réfractaires formant le formage sont disposées sur la sole du four sur lesquelles repose un creuset en graphite de charge 350kg. Le four est chauffé par deux brûleurs à gaz de production et s'articule de l'avant (coulée) vers l'arrière (chargement) avec ses différents accessoires.



FigII.1: four de fusion.

II.1.3.1.2) Le four de maintien :

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

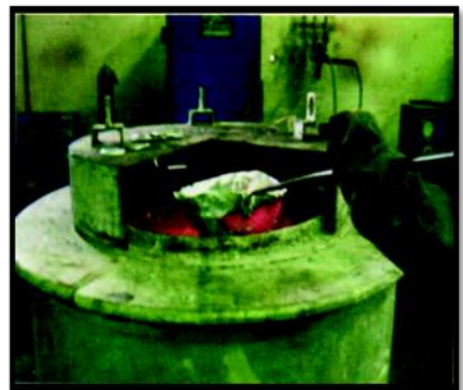


Fig.II.2: four de maintien.

II.1.3.1.3) La poche de coulée : en graphite de 50 kg est manipulée à l'aide d'un pont roulant. La poche est préalablement maintenue chauffée continuellement toute la journée à l'aide d'un brûleur à gaz qu'on remplit directement à partir du four de fusion en position avant, et c'est à partir de cette poche, montée sur un support pivotant et généralement munie d'un volant de manœuvre, que l'on coule les moules préparés ou que l'on remplit le four de maintien.



Fig. III.3: poche de coulée.

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

II.1.3.1.4) Le pyromètre de Type K : c'est un thermocouple standard qui permet de mesurer dans une gamme de températures comprise entre (270 à 1372) °C de composition : Chromel, alliage de (NiCr) et d'Alumel, alliage de (NiAl₅Si).

II.1.3.2) La coulée :

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

≈ (40 à 50) %, (140 à 175) Kg de lingots neufs de dimensions (720×100×80) mm³ livrés par Pechiney et d'un mélange de jets de coulée ≈ (50 à 60) %, (175 à 210) Kg de retour (masselottes, trous et canaux de coulée, pièces défectueuses et rebutées...etc.).

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

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

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

II.1.3.2.1) Dégazage :

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



Fig.II.4: Dégazeur N° 701.

II.1.3.2.2) L'affinage du grain :

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

- modifier la texture et l'orientation des cristaux de silicium.
- affiner la structure.

II.1.3.2.3) Mise au titre :

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

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

II.1.3.3) Moulage :

En sable :

Deux types de sable peuvent être utilisés :

II.1.3.3.1) Moulage au sable silico – argileux, sable noir.

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



Fig. II.5: moule en sable empreinte Partie supérieur Partie inférieur

II.1.3.3.2) Moulage au sable à prise chimique

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



Fig. II.6: Sable à prise chimique.



Fig. II.7 : différentes structure de noyau.

II.1.3.3.3) En coquille :

Dans ce mode de moulage, le moule se compose de deux chapes en acier (5% de chrome), qui a pour rôle de maintenir les empreintes. Ces chapes, séparées par un plan de joint, doivent être éventuellement préparées et chauffées à une température (200 à 300)°C à l'aide d'un brûleur à gaz pour permettre à la masse liquide en fusion de bien occuper complètement tout le volume de l'empreinte afin d'éviter tous les défauts volumiques de criquabilité et de retassures. Pour augmenter la fluidité et la coulabilité du métal liquide à l'intérieur des empreintes qui sont traitées thermiquement et peuvent faire l'objet de traitements de surface (carbo-nitruration et traitement de surface), on doit appliquer sur les deux demies empreintes, deux couches avec l'AQUAGEL87 et le DYCOTE 34 qui servent de protection, d'isolant et de conducteur. Les AQUAGELS et les DYCOTES sont des pâtes de couleurs rouge et blanche. Leur préparation nécessite un mélange de 1Kg de cette poudre dans 8 litres d'eau qu'on projette à l'aide d'un pistolet à air comprimé. Les DYCOTES étant plus fins ce qui donne un meilleur plan et une bonne santé de pièce et après tout ça on remplit avec du métal en fusion pour obtenir l'éprouvette.

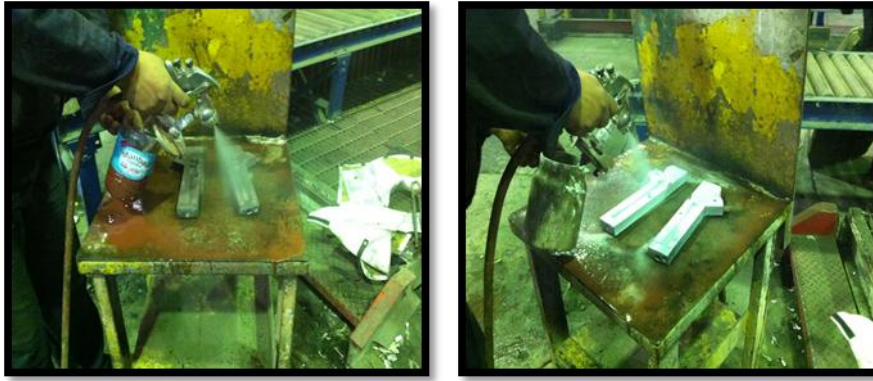


Fig. II .8: Les AQUAGELS et les DYCOTES.

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



Fig. II. 9: moulage en coquille par gravité.

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



FigII.10 : Éprouvette en coquille, Éprouvette en sable

II.1.3.4) L'ébarbage :

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

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



Fig. II.11 : Scie mécanique vertical.

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

II.1.4) Structure et traitements thermiques :

La composition de l'alliage seule n'est pas suffisante pour conférer au matériau les propriétés mécaniques requises pour les applications industrielles, c'est pourquoi on a recours à des traitements thermiques, qui, selon les cas, produisent un adoucissement ou un durcissement, ainsi que des changements de comportement vis-à-vis de la résistance à la corrosion, de la fatigue, du fluage, de l'allongement.

II.1.4.1) Structure :

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

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.

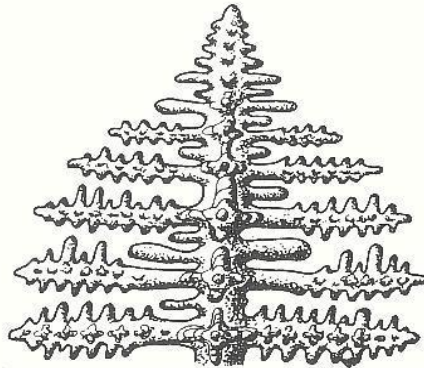
Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température de solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion).

Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche [9].

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

espacées 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) [12].



II.1.4.2) Défauts internes :

II.1.4.2.1) Défauts chimiques :

Les défauts de structure couramment rencontrés dans les cristaux sont de quatre types :

- Défauts ponctuels : ordre de grandeur d'un atome : atome en substitution ou en insertion
- Défauts linéaires ou dislocations: perturbations de la structure du cristal le long d'une ligne d'atomes ou d'une rangée réticulaire.
- Défauts bidimensionnels ou défauts plans: imperfections situées à l'interface séparant deux cristaux: joint de grain.
- Défauts volumiques : retassures, cavités, micros retassures, criques, précipités, inclusions et pores.

II.1.4.2.2) Défauts physiques :

- Défauts thermiques (phonons) :

L'agitation thermique ($T \neq 0$) est décrite en termes d'un défaut (phonon).

II.1.4.3) Traitements thermiques industriels des alliages Al-Si :

Le durcissement par affinement de la taille des grains et structural s'obtient par une succession de traitements thermiques contrôlés dont le but final est l'obtention d'une structure fine avec une répartition optimale et homogène des éléments ajoutés et des précipités dans la matrice. Plus les grains et les précipités sont petits et nombreux, plus le mouvement des dislocations seront entravées, ce qui améliore considérablement les propriétés mécaniques de résistance de ces derniers.

En général, les traitements thermiques des alliages Al-Si sont : l'homogénéisation, la trempe, et le revenu.

Le traitement thermique de durcissement structural se fait en quatre étapes suivantes :

1ère étape : chauffage (450°C à 600°C pendant 4h à 48h, en fonction de l'alliage), mise en solution avec homogénéisation par diffusion afin d'obtenir une composition chimique uniforme.

2ème étape : trempe structurale dans un fluide (15°C à 70°C en fonction des risques de tensions internes de l'alliage), figer la structure sursaturée à température considérée: température ambiante en évitant tout changement de phase.

Le choc thermique du à la trempe des alliages provoque instantanément un champ de contraintes internes résiduelles avec un retrait de compression en surface et un autre de traction au cœur.

3ème étape : revenu ou vieillissement artificiel (150°C à 200°C, pendant 4h à 25 h, en fonction de l'alliage avec refroidissement à l'air ambiant), recherche d'une structure d'équilibre avec accélération d'une part de la relaxation des contraintes internes résiduelles et d'autre part du durcissement structural par précipitation de l'alliage considéré (Zone G.P. Ou précipités cohérents), puis diminuent jusqu'à l'atteinte de l'équilibre (précipités semi cohérents puis incohérents). Cela est dû à l'évolution de la taille des précipités et des grains et à leur nature. Ces précipités sont de type **Mg₂Si** pour des alliages Al-Si-Mg.

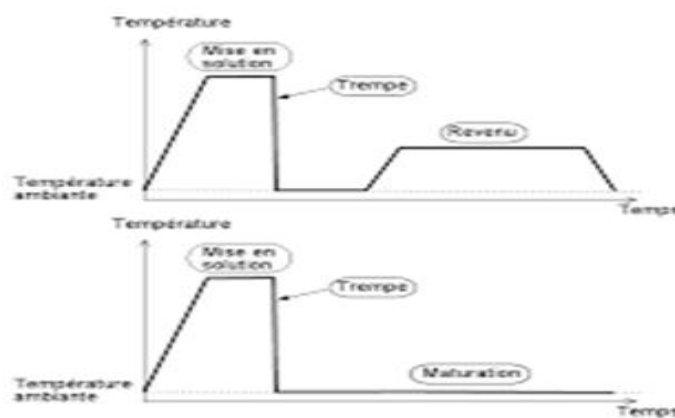


Fig.II.12 : traitement thermique des Alliages d'aluminium.

II.1.5) Principaux paramètres influençant les traitements thermiques :

Le bon choix d'un cycle de traitement de durcissement structural d'un alliage dépend de six facteurs essentiels. Son importance a une très grande influence sur une nette amélioration des caractéristiques mécaniques de l'alliage.

II.1.5.1) Température de mise en solution :

En principe la température de mise en solution est juste en dessous de celle de l'eutectique Mais deux choix peuvent se présenter :

1er choix : La température est inférieure à celle requise, l'homogénéisation ainsi que l'uniformité de la composition chimique seront inachevées ce qui entraîne l'obtention de faibles caractéristiques mécaniques que celles recherchées.

2er choix : La température est supérieure à celle requise: l'homogénéisation ainsi que l'uniformité de la composition chimique seront complètes mais on constate un phénomène de brûlure aux joints des grains qui entraîne une détérioration des caractéristiques mécaniques que celles recherchées.

II.1.5.2) Temps de mise en solution :

Cette durée est fonction :

- de l'homogénéité de l'alliage.
- de la masse de la pièce.
- de sa forme (cylindrique, conique, sphérique.....).
- du four utilisé.

II.1.5.3) Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement dépend essentiellement du fluide de trempe qui peut être : l'air sous pression, l'huile et l'air à l'ambient ou dans le four éteint, l'eau potable et l'eau de mer de (15°C à 70°C).

Selon le fluide considéré, on peut aboutir soit à une trempe ou un recuit de l'alliage.

II.1.5.4) Température de revenu et II.1.5.5) Durée de revenu

Ces deux paramètres ont pour influence d'accélérer d'une part la relaxation des contraintes internes résiduelles dues au choc thermique de la trempe et d'autre part une augmentation de plus en plus du durcissement structural par précipitation de l'alliage considéré.

II.1.6) Différents durcissements :

Le durcissement des alliages consiste en général à l'augmentation des caractéristiques de résistance en général au détriment des caractéristiques de ductilité par :

- L'empêchement du mouvement des dislocations.

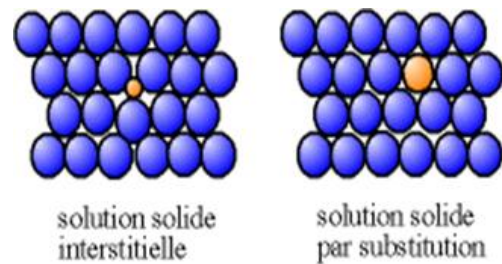
Il existe plusieurs méthodes pour ralentir le glissement des dislocations

Dans notre cas, pour améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié, il existe quatre possibilités pour gêner le mouvement des dislocations dans toute la masse de l'alliage:

II.1.6.1) Durcissement par solution solide d'insertion ou de substitution :

On constate deux facteurs qui génèrent le blocage du mouvement des dislocations :

- L'interaction entre ce champ de contrainte (tension dans le cas d'insertion et compression dans le cas de substitution) et les dislocations rend leur déplacement difficile,



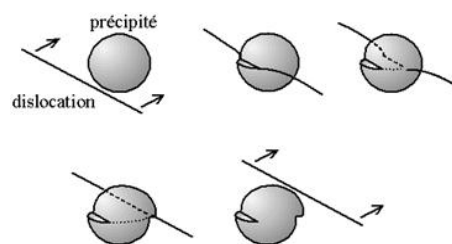
- Les atomes en solution solide tendent à diffuser vers les dislocations, dislocations ancrées par ces atomes.

II.1.6.2) Durcissement structural par précipitation :

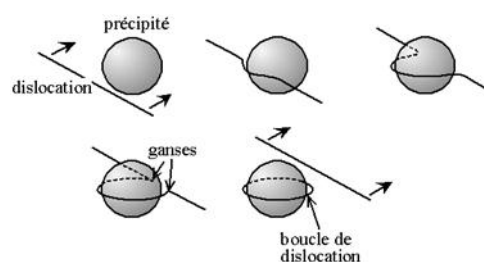
Obtention d'une répartition optimale des précipités (Mg_2Si) dans la matrice Al. Plus les précipités sont petits et nombreux, plus ils génèrent des obstacles aux déplacements des dislocations.

Il peut alors se produire deux mécanismes lors du passage d'une dislocation au niveau de ces précipités :

- cisaillement des précipités par la dislocation.



- contournement des précipités et création de défauts.



Mais dans les deux cas, il faut plus d'énergie à la dislocation pour passer au niveau des précipités, ce qui augmente la valeur de σ_e .

II.1.6.3) Durcissement par affinement de la taille des grains :

L'affinement de la taille des grains entraîne l'augmentation des joints de grain dont leur rôle est double. Ils peuvent constituer respectivement soit des pièges ou des barrières avec disparition ou accumulation des dislocations.

Plus il y a de joints de grains, plus la déformation plastique est difficile.

II.1.6.4) Existence de dislocations initiales :

Il existe des champs de déformation autour des dislocations qui exercent une influence sur leur mobilité. Les interactions entre dislocations étant plus répulsives, le déplacement de chacune se trouve entraver par la présence des autres.

Une contrainte en cisaillement supplémentaire, est nécessaire pour faire avancer les dislocations au voisinage d'autres dislocations.

II.1.6.5) Conclusion:

Tout ce qui bloque le mouvement des dislocations augmente les caractéristiques de résistance des alliages Al-Si considérés.

II.1.7) Structure de solidification des alliages Al10SiMg :

Le principe fondamental de la solidification des alliages d'aluminium Al-Si eutectique et hypoeutectique est basé sur la naissance en particulier des cristaux solides α en nombre limité qui grandissent de plus en plus en volume à l'approche de la température de l'eutectique et baignant dans un liquide. Au fur et à mesure qu'on se rapproche de la température ambiante, d'autres particules de types α et β en formes de lamelles germent tandis que l'alliage se solidifie complètement.

Les cristaux solides α sont riches en aluminium et pauvres en silicium par contre les particules β , en solution solide sont de composition inverse, riches en silicium et pauvres en aluminium.

- Alliage hypoeutectique AlSi10Mg
- Si $T > 600^\circ\text{C}$ l'alliage AlSi10Mg est à l'état liquide
- Si $T_E = 577^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C}$ l'alliage AlSi10Mg est en grande partie à l'état liquide avec naissance des phases en solution solide α en nombre restreint qui croissent de plus en plus à l'approche de la température de l'eutectique.

Réaction monotectique

Liquide L \rightarrow Solide α + Liquide L_E

- Si $T = T_E = 577^\circ\text{C}$ la solution solide α n'aura aucune transformation, par contre le

Liquide L_E eutectique se transformera suivant la réaction:

Réaction eutectique

Liquide L_E \rightarrow E ($\alpha + \beta$)

La phase α est la solution solide du silicium dans l'aluminium.

La phase β est la solution solide de l'aluminium dans le silicium.

- Si $T < T_E = 577^\circ\text{C}$ formation des précipités incohérents de la phase $E(\alpha + \beta)$ en nombre croissant qui viennent "cimenter" complètement les phases α en nombre limité .

L'eutectique $E(\alpha + \beta)$ est formé principalement de deux phases α et β en formes de lamelles disposées l'une sur l'autre qui croissent en volume au fur et à mesure qu'on se rapproche de la température ambiante ou l'alliage AlSi10Mg se trouve complètement à l'état solide.

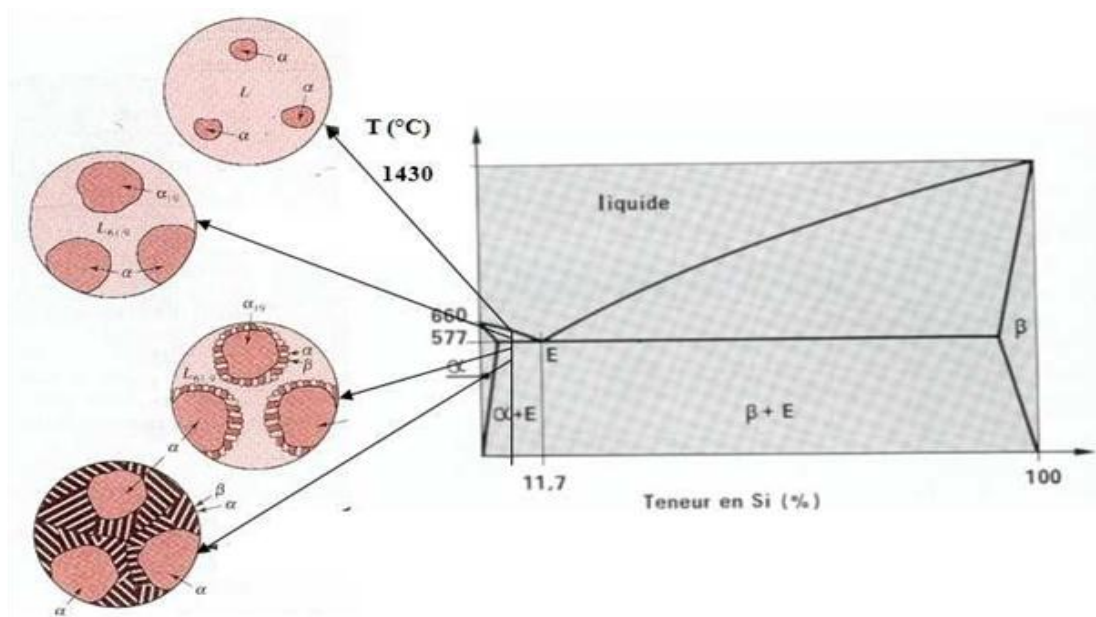


Fig. II.13 - Diagramme et structures de solidification de l'alliage Al10SiMg.

Chapitre III

Méthode expérimentale

III.1) Matériau étudié :

III.1.1) Matière première Al10SiMg :

Dans toutes nos expériences, nous avons utilisé l'alliage de fonderie AlSi10Mg, contenant 10% de silicium en pourcentage massique, une quantité du magnésium inférieur à 1% (en masse). Cet alliage de fonderie à traitement thermique est de type 43000 (AlSi10Mg), obtenu par deux coulées différentes : coulée en sable et coulée en coquille.

La matière est faite à base d'aluminium neuf et retour (40 % neuf + 60 % retour)

L'aluminium neufs et sous forme de lingots (FrancePechiney)

Le retour et l'ensemble de bavure, système de coulée, pièce rebuté ...



60% retour

40% lingots neuf

Fig. III.1 : matière première Al10SiMg neuf et retour.

III.2) Caractéristique mécaniques :

Sur les éprouvettes coulée suivant la Norme AF.A 57.702 et sur un alliage ayant subi obligatoirement un traitement de modification.

Tab (III.1) : Caractéristiques et désignation des états sable et coquille.

Désignation	État	R _m Kgf/mm ²	R _e Kgf /mm ²	A%	Dureté Brinell
Sable	Y20	16	9.5	3.5	55
-	Y23	23	18	1.5	75
Coquille	Y30	18	11	2	65
-	Y33	26	18	1.5	80

III.3) Composition chimique de l'Al10SiMg suivant l'unité de fonderie de Rouïba SNVI :

La composition ci-dessous correspond aux tolérances de composition dans les pièces coulée en sable et en coquille.

Tab (III.2) : la composition chimique de l'alliage AlSi10Mg suivant l'unité de fonderie de Rouïba SNVI.

% Fe	% Si	% Cu	% Zn	% Mg	% Mn	% Pb	% Sn	% Ti	% Co
0,1	9.85	0.002	0.003	0,19	0.030	/	/	0.011	/

III.4) Traitement thermique :

Avant de commencer le traitement, on prélève 5 éprouvettes de sable, 5 autres de coquille qui vont rester à l'état brut. Les autres éprouvettes vont subir les traitements thermiques suivant :

III.4.1) Homogénéisation (Mise en solution) :

La mise en solution consiste à amener le magnésium en solution sursaturée à une température avoisinant les 500 °C. Pour notre alliage Al10SiMg, le traitement de mise en solution a été effectué à 525°C (juste au-dessous de la température de l'eutectique), pendant 06h. Quant au choix du temps de maintien à cette température, il doit être suffisant pour que le silicium, présent dans les espaces inter dendritiques à l'état brut de coulée, puisse diffuser équitablement vers l'intérieur du matériau d'une part et pour laisser le temps aux composés intermétalliques $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ et $Al_8Mg_3FeSi_6$ de se dissoudre [10].

III.4.2) Trempe :

Le traitement de mise en solution doit être systématiquement suivi d'une trempe à l'eau, dans les traitements industriels usuels. Afin de réduire les champs de contraintes à l'intérieur du matériau, on peut chauffer l'eau de trempe à une température avoisinant les 70 °C. Concernant nos échantillons, ils ont subi une trempe à l'eau chauffée à 65°C.

III.4.3) Revenu (vieillessement artificiel):

Appelé aussi traitement de vieillissement artificiel, ce traitement s'effectue à 170°C pendant 8h, est destiné aux échantillons ayant subi une mise en solution suivie d'une trempe.

Les différents régimes de traitement thermique ont été faits à laboratoire SDM du département de Génie mécanique de Blida.



Fig. III.2 : Four de recuit et de revenu.

III.5) Examen micrographique :

III.5.1) Préparation des surfaces :

Les échantillons sont découpés des éprouvettes de traction pour les deux modes de coulées, à l'aide d'une scie diamanté.



Fig. III.3 : Scie diamanté.

III.5.2) L'enrobage :

L'enrobage se fait à froid pour éviter tout risque d'échauffement.

Ces échantillons sont polis mécaniquement afin de rendre les faces de l'échantillon planes et brillantes de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. Le polissage comporte trois phases.

III.5.3) Dressage :

Le dressage a pour but de créer une surface plate d'examen. Elle est faite sur papier abrasif de granulométries, P120, P140, P400, sur une polisseuse avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement.



Fig. III.4 : Polisseuse de finition - la Polisseuse.

III.5.4) Dégrossissage :

Cette phase, qui est la plus délicate, permet d'arriver à une surface lisse ne contenant que des très fines rayures invisibles à l'œil nu qui disparaîtront dans la dernière phase. Les granulométries des papiers utilisés sont, P400, P600, P800, P1000, P 1200, P2000.

III.5.5) Finissage :

Son objectif est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine.

III.5.6) Attaque chimique :

L'observation de l'échantillon au microscope, nécessite une attaque chimique, après le polissage, afin de révéler certains détails de la microstructure. Nous avons utilisé un réactif **Killer** dont la composition est la suivante :

- Acide fluorhydrique HF : 2ml.
- Acide chlorhydrique HCL : 3ml.
- Acide nitrique HNO_3 : 5ml.
- Eau distillée H_2O : 180 ml.

Le rôle de l'attaque chimique est de donner une bonne visibilité à l'échantillon pendant l'analyse microscopique.

III.6) Observation microscopique :

Pour l'observation des microstructures, nous avons utilisé un microscope optique universel de type ZEISS AXIOVER T40 MAT alimenté sous une tension de 220V avec une fréquence de 50 Hz, muni d'un appareil photo automatique, avec pouvoir de grossissement allant de 100 à 1000 fois.



Fig.III.5 : Microscope optique.

III.7) essais mécaniques :

La caractérisation physique, chimique en général et mécanique en particulier revêt une importance capitale pour le dimensionnement de différentes pièces métalliques soumises aux efforts extérieurs variés constituant divers mécanismes en mouvement composant un dispositif mécanique. Le concepteur ne peut donc ni calculer, ni dimensionner ces pièces sans identifier et chiffrer leurs caractéristiques. Pour les déterminer, on reproduit ces sollicitations à l'aide d'essais statiques ou dynamiques, généralement effectués sur des éprouvettes normalisées.

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes et techniques expérimentales utilisées avant et après traitements thermique.

- La traction pour identifier les différentes contraintes.
- La dureté Brinell H_B pour identifier l'intensité du champ de contraintes.
- La résilience K_{cv} nous renseigne sur le mode de fracture, la fragilité et la résistance au choc.
- La microstructure pour identifier les différentes structures.

III.7.1) Essai de traction :

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial - du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uni axiale.

Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc... nécessaires dans les calculs de structure.

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie

inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique).

Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc... selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage.



Fig. III.6 : machine de traction.

III.7.1.1) Eprouvettes :

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate.

La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives.

Nous avons procédé à deux types d'éprouvettes de coulée, coulée en sable et en coquille.



Fig.III.7 : Eprouvette coulée en sable.



Fig.III.8 : Eprouvette coulée en coquille.

L'essai est normalisé sous la norme DIN 50 125, La forme et la dimension des éprouvettes des deux modes de coulée sont représentées sur les Fig.III.9 et Fig.III.10.

• Éprouvettes en sable :

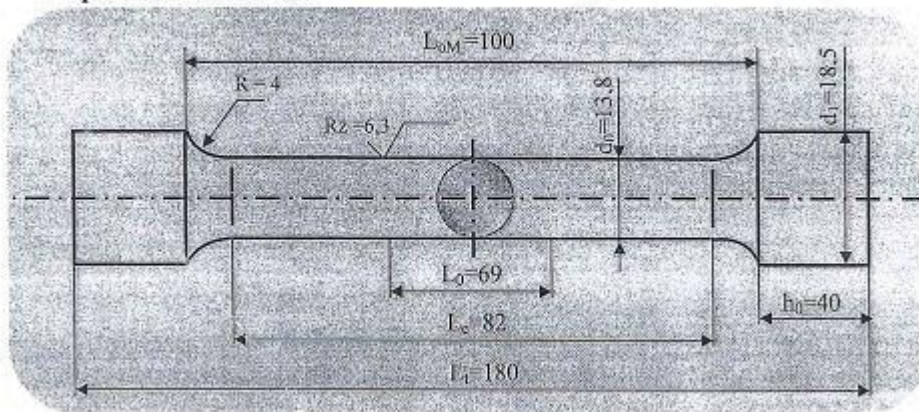


Fig.III.9 : Epreuve coulée en sable, normalisée (SNVI).

• Éprouvettes en coquille :

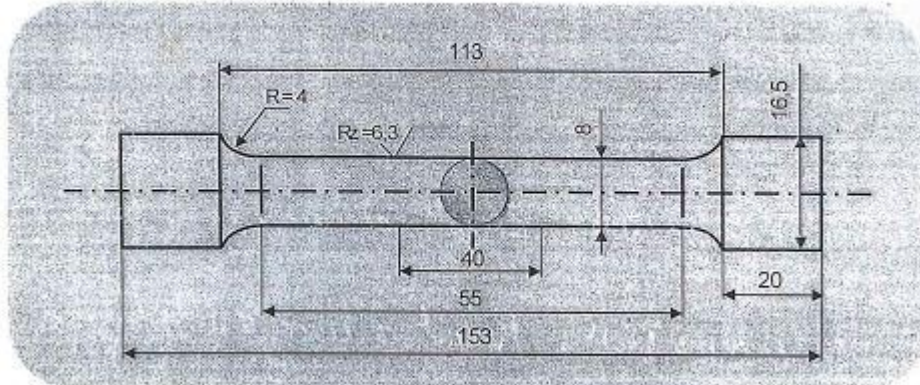


Fig.III.10 : Epreuve coulée en coquille, normalisée (SNVI).

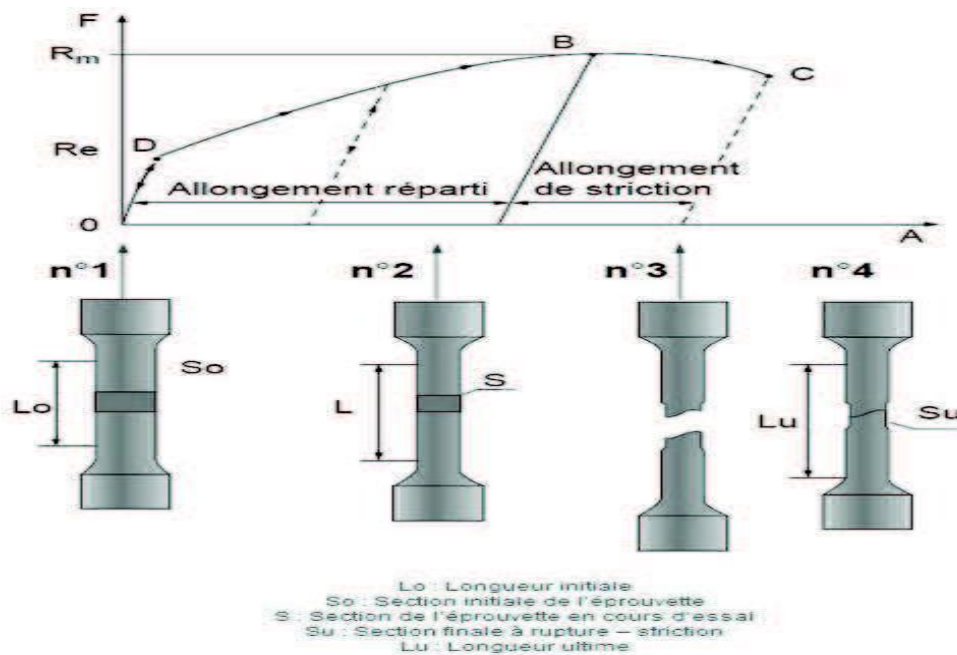


Fig.III.11 : Principe de l'essai de traction

III.7.1.2) Caractéristiques obtenues :

A chaque incrément d'effort, la contrainte normale et la déformation de la barre sont portées sur une courbe. Cette opération est effectuée régulièrement jusqu'à la rupture de la barre. On obtient ainsi la courbe contrainte - déformation caractérisant le matériau.

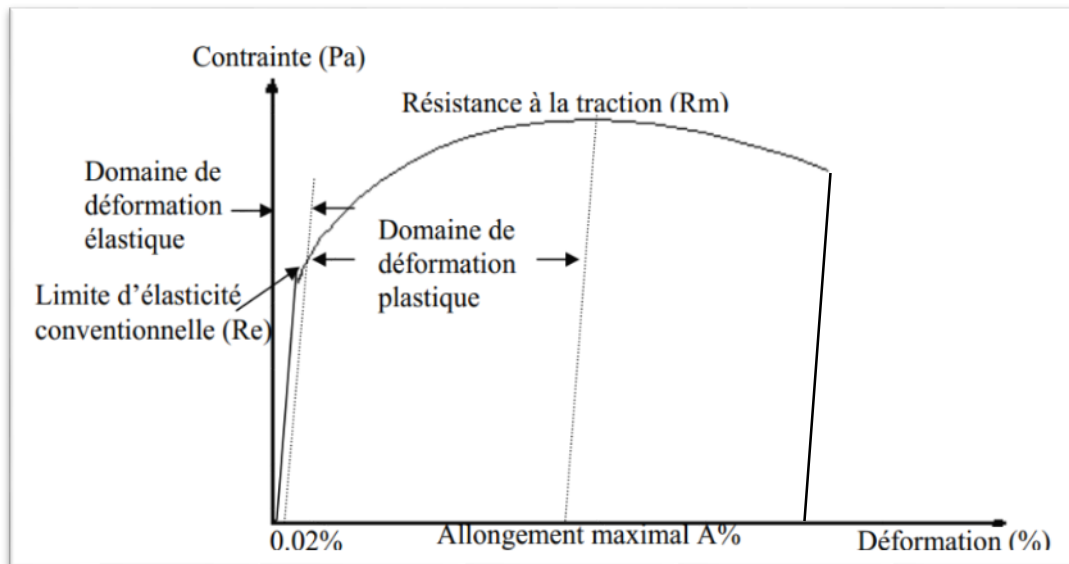


Fig.III.12: courbe de traction contrainte – déformation.

III.7.2) Essai de dureté :

Introduction :

Les essais de dureté représentent une grande utilité pour notre étude en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la productibilité et la fidélité des résultats. Ceci explique le grand nombre de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons. Les essais les plus courants se font par pénétration.

Principe :

Le procédé de dureté par pénétration statique est largement utilisé actuellement pour déterminer la dureté des métaux. Le test de dureté de pénétration normalisée universellement reconnue et a été proposé par Brinell en 1900. L'essai de dureté Brinell consiste de mettre en retrait un métal surface avec une bille d'acier de 10 mm de diamètre, sous une charge de 3000 kg de masse.

Pour les métaux tendres comme l'aluminium, la charge est réduite à 500 kg à éviter profonde impression, tandis que pour les métaux très durs une bille de carbure de tungstène est utilisée pour minimiser distorsion du pénétrateur. La charge est appliquée pour une durée standard, généralement 15 à 30 secondes, et le diamètre de l'empreinte est mesuré avec un microscope de faible puissance après enlèvement de la charge. L'indice de dureté Brinell est calculé en divisant la charge appliqué par la surface de l'indentation.

On mesure le diamètre (d) de l'empreinte en millimètres.

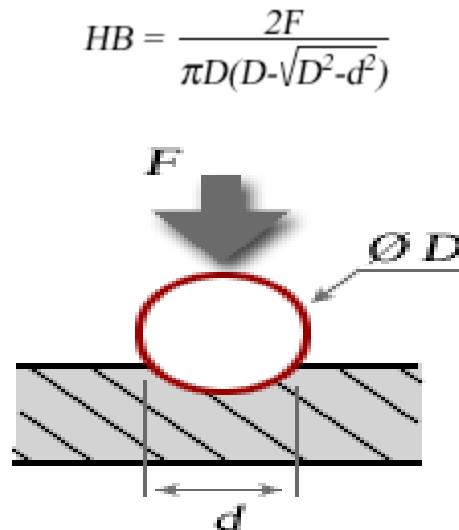


Fig.III.13 : Caractéristiques de l'essai de dureté

III.7.4) Essai de résilience :

Introduction :

L'un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un matériau est fourni par l'essai de résilience sur des éprouvettes entaillées, décrit dans la norme NF EN 10045. Le principe consiste à rompre, d'un seul coup à l'aide d'un mouton CHARPY, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine alors l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

Définition :

La résilience est l'énergie en (Joule/Cm²) nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette placée sur deux appuis.

$$K_{cv} = W / S \text{ (J/Cm}^2\text{)}.$$

K_{cv} : La résilience.

W : Energie d'impact absorbée en joule.

S : Section à l'entaille de l'éprouvette en cm².

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

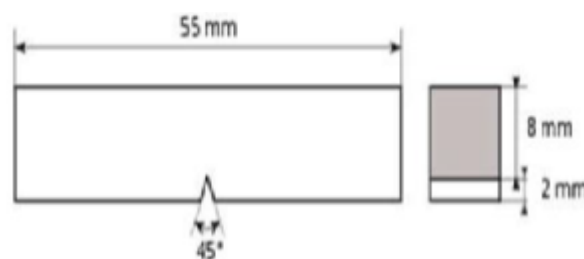


Fig.III.14 : Eprouvette normalisée avec entaille de forme V.



Fig.III.15 : Epreuve normalisée avec et sans entaille en forme V.

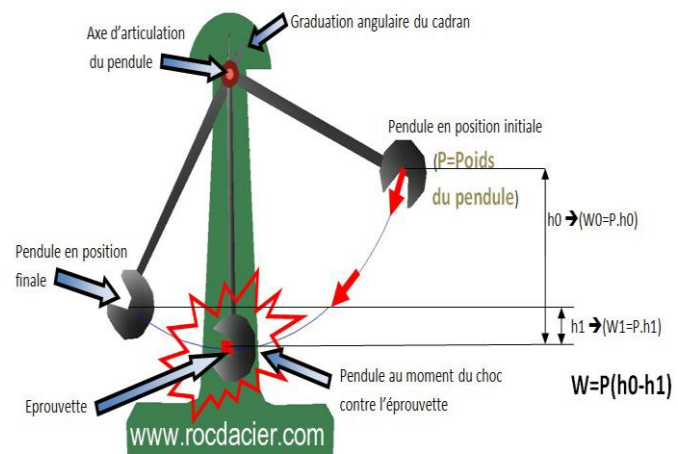
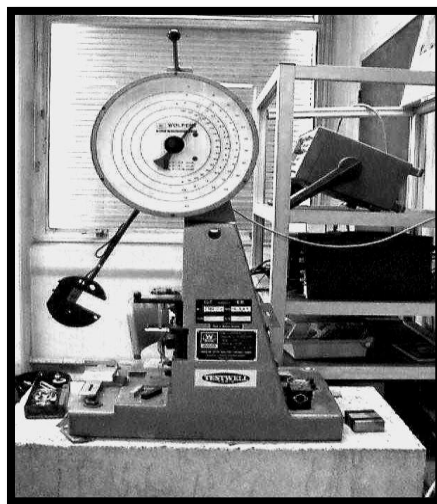


Fig.III.16 : Pendule mouton CHARPY.

-Au départ, le pendule est placé à une hauteur paramétrée qui devra délivrer une énergie normalisée de 294 Joules (si l'on tient compte de la gravité de 9,81 m/s²).

-Le pendule est libéré, ce qui grâce à son propre poids, provoquera un choc.

L'épreuve encaissera une partie du choc, mais sera brisée.

-Le pendule continuera dans son élan jusqu'à une certaine hauteur, ce qui permettra de mesurer l'énergie absorbée par l'épreuve-l'énergie absorbée est calculée grâce à $W = P (h_0 - h_1)$ (P en N).

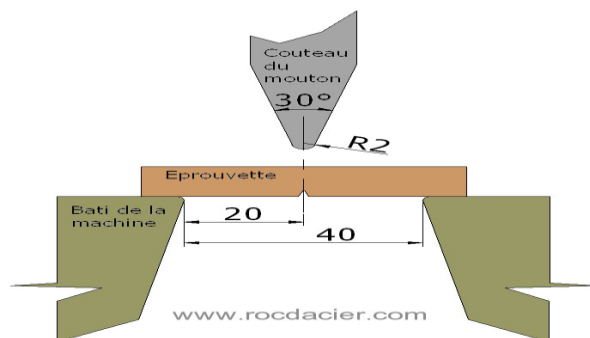


Fig.III.17: Positionnement d'une épreuve sur une machine.

Chapitre IV

Analyse et interprétation des résultats

Introduction :

Dans ce chapitre on présentera les résultats et interprétations des caractéristiques mécaniques de ces alliages pour différents régimes de traitement thermique et pour les deux modes de coulée (sable et coquille), à partir des essais mécaniques suivants : métallographie, traction, dureté.

IV.1) Métallographie :

Les propriétés mécaniques dépendent dans une très large mesure de la constitution du matériau, c'est-à-dire non seulement de sa composition chimique, mais aussi de l'organisation des diverses phases présentées (leur taille, leur forme, leur distribution), donc de sa microstructure pour bien comprendre les comportements des matériaux en service et pour pouvoir maîtriser leurs propriétés, il est nécessaire de décrire et de quantifier leur microstructure.

Les échantillons ont été observés au microscope métallographique à laboratoire du département de Génie mécanique de Blida après les opérations d'enrobage et de polissage et attaque chimique. L'examen a permis d'obtenir les micrographies des différents échantillons à des grossissements : x200, x500 et x1000 et pour différents régimes de traitement thermique état brut de coulée, homogénéisation à 495°C pendant 2h suivi d'un refroidissement à l'air libre, homogénéisation à 525°C pendant 6h suivi d'une trempe à l'eau chauffé 65°C et enfin un vieillissement artificiel à 175°C pendant 8h.

Les photos sont prise aux échèles X200.

IV.1.1) Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg coulée en sable :

Etat brut de coulée : on remarque une structure dendritique, elle est dû à la grande différence de température de fusion entre l'aluminium et le silicium, ce qui provoque une ségrégation du silicium ; lors de la solidification le liquide riche en Si se solidifie en premier, sous forme de dendrite, et emprisonne le liquide riche en aluminium entre les bras de ces dendrites. Des constituants eutectiques et la matrice la phase riche en aluminium.

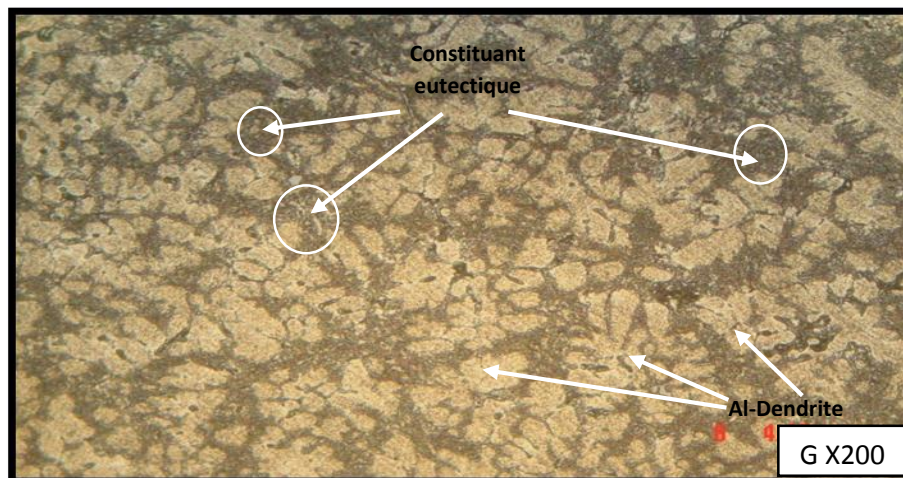


Fig. III. 1. Microstructures de l'alliage de fonderie Al10SiMg à l'état brut de coulée : moulage en sable avec attaque chimique (X200)

- **Etat mise en solution** : homogénéisation de la structure à 495°C pendant 2h.

On remarque une certaine proportion de l'eutectique aciculaire et lamellaire et une sphéroïdisation des dendrites dû à l'homogénéisation.

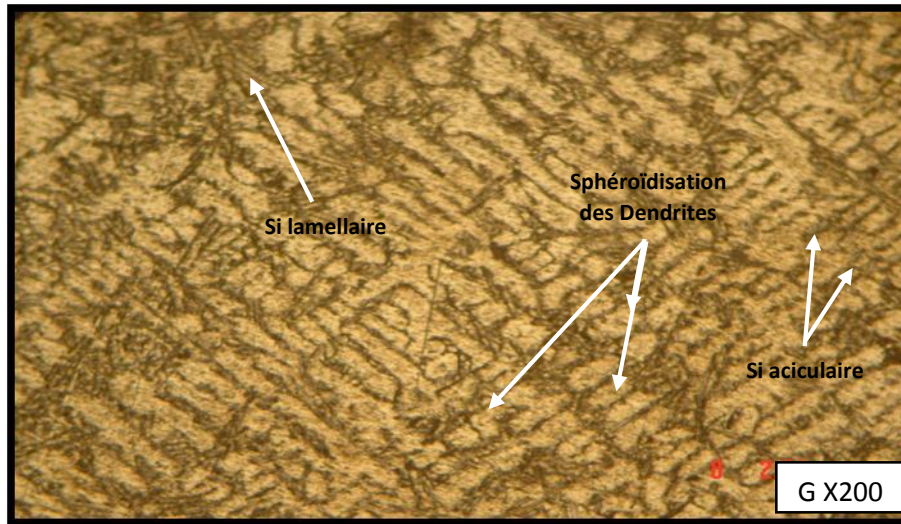


Fig. III. 2. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg après mise en solution à 495° C pendant 2h moulage en sable avec attaque chimique. (X200)

- **Etat mise en solution** : homogénéisation de la structure à 525°C pendant 6h.

On remarque la sphéroïdisation des dendrites Al, et des composés intermétalliques β -Fe.

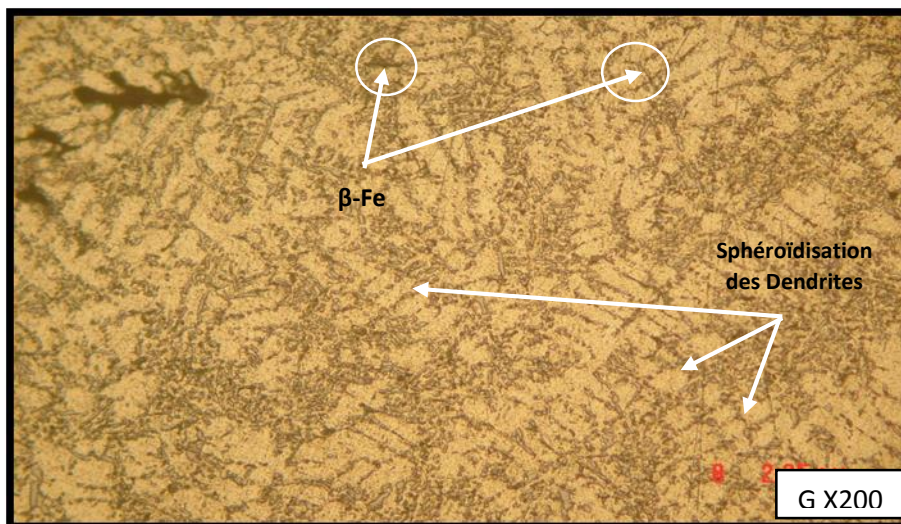


Fig. III. 3. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg après mise en solution à 525°C pendant 6h moulage en sable avec attaque chimique. (X200)

- **Revenu ou vieillissement artificiel :** on remarque une fragmentation et une sphéroïdisation complète concernant les dendrites de la phase riche en Al de l'alliage. On remarque aussi le Si primaire, et le β -Fe sous forme d'aiguilles.

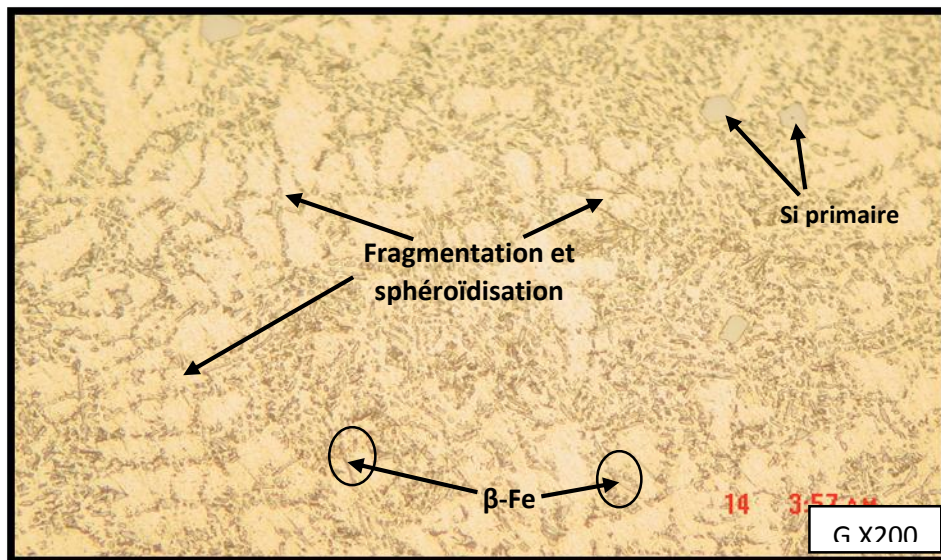


Fig. III. 4. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg à l'état de revenu à 175°C pendant 8h moulage en sable avec attaque chimique. (X200)

IV.1.2) Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg coulée en coquille :

- **Etat brut de coulée :**

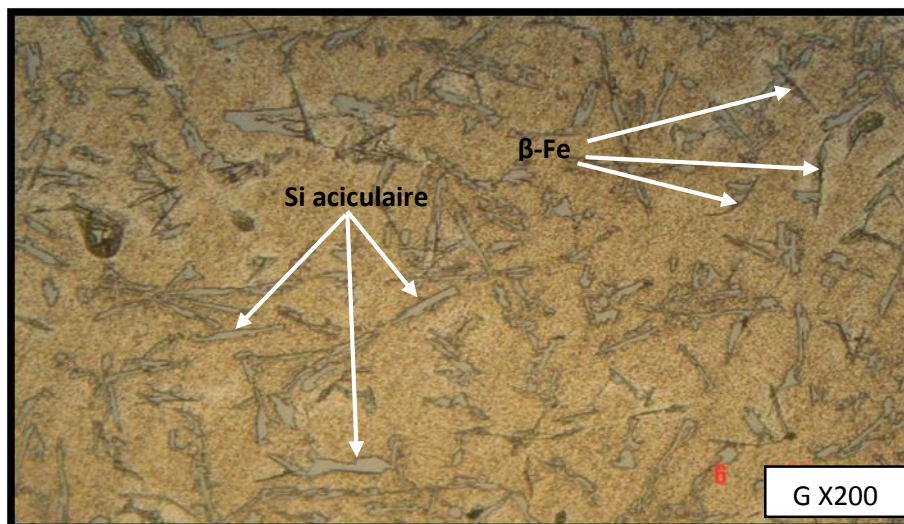


Fig. III. 5. Microstructures de l'alliage de fonderie Al10SiMg à l'état brut de coulée : moulage en coquille avec attaque chimique (X200)

- **Etat mise en solution** : homogénéisation de la structure à 495°C pendant 2h.

Après mise en solution on observe une homogénéisation de la microstructure, fragmentation de Si aciculaire, de Si eutectique linéaire parallèle, et non parallèle, ainsi qu'une partielle dissolution des composés intermétallique β -Fe, ces observations nous conduisent à déduire que ces dernières et les particules ségréguées « Mg et Si » ont passés dans la solution solide d'Al.

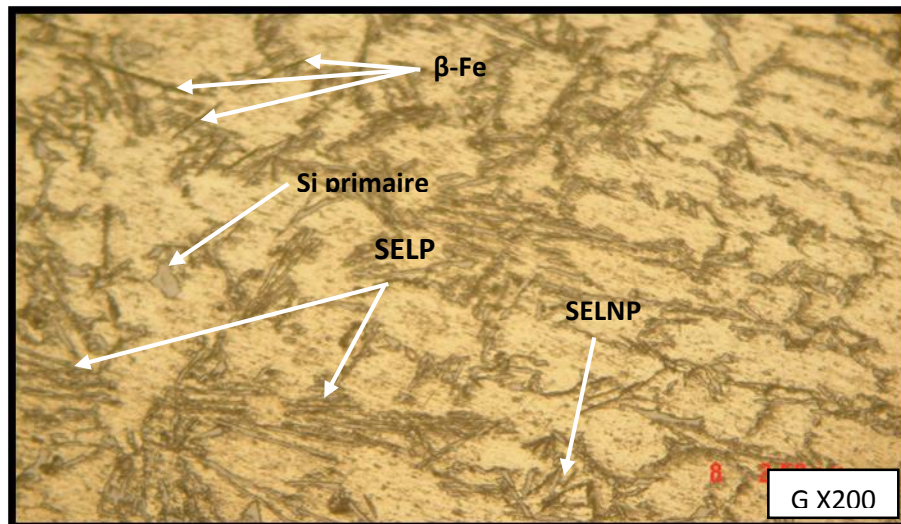


Fig. III. 6. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg après mise en solution à 495°C pendant 2h moulage en coquille avec attaque chimique. (X200)

- **Etat mise en solution** : homogénéisation de la structure à 525°C pendant 6h.

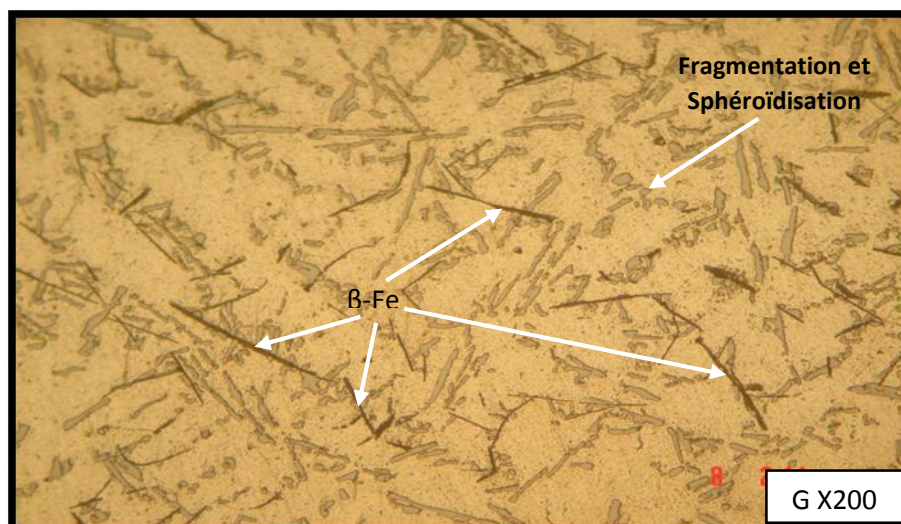


Fig. III. 7. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg après mise en solution à 525°C pendant 6h moulage en coquille avec attaque chimique. (X200)

- **Revenu ou vieillissement artificiel** : on remarque une fragmentation et une sphéroïdisation des particules de l'alliage. du Si primaire, et du β -Fe sous forme d'aiguilles dissoutes partiellement après le traitement thermique. Les précipités n'apparaissent pas à l'observation au microscope optique et une étude plus approfondi au MEB est nécessaire pour les mettre en évidence.

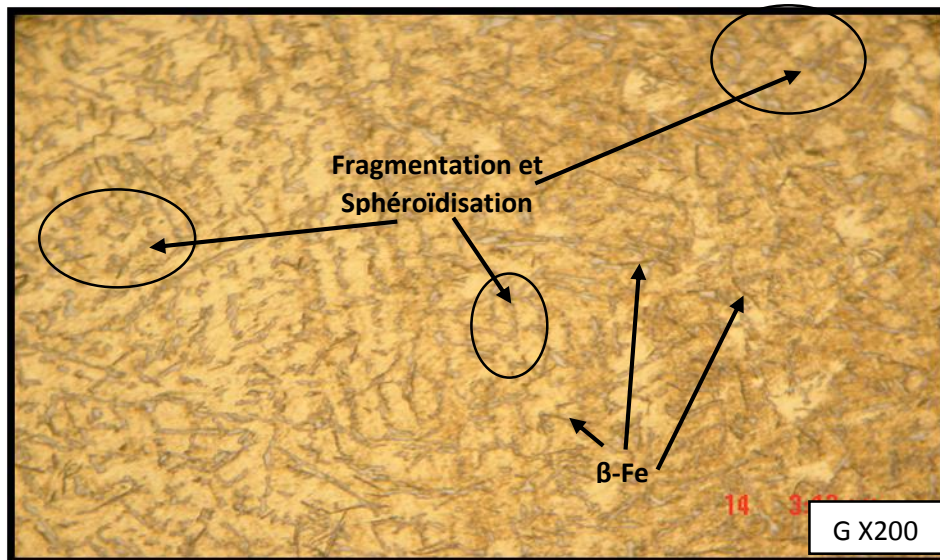


Fig. III. 8. Microstructure de l'alliage de fonderie AlSi10Mg à l'état de revenu à 175°C pendant 8h moulage en coquille Avec attaque chimique. (X200)

La Figure III. 9. regroupe la microstructure observée des composées intermétalliques α -Fe sous forme de script chinois, homogénéisation à 525°C moulage sable et coquille à X500, X1000.

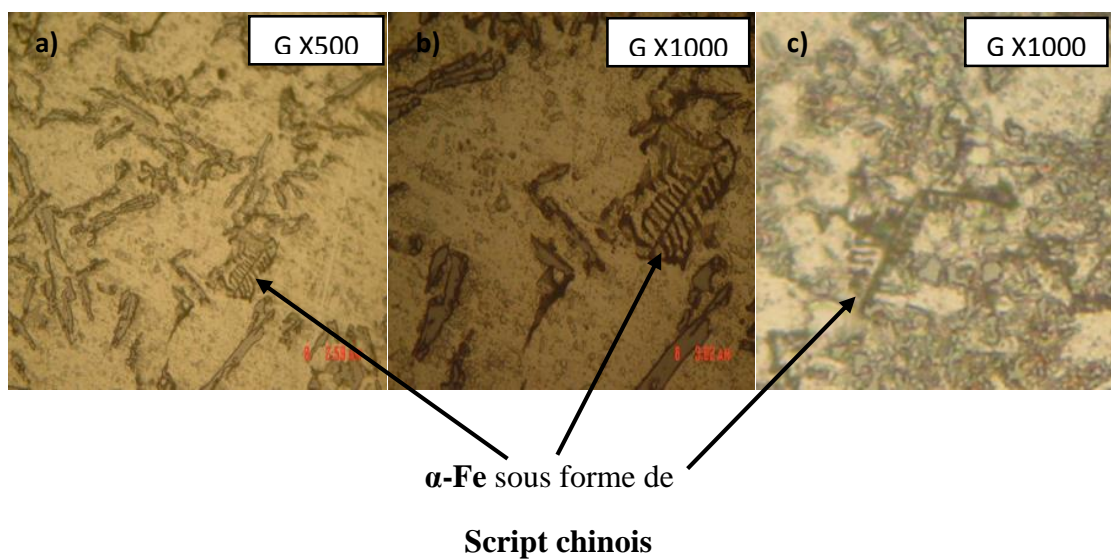


Fig. III. 9. Microstructure de l'alliage de fonderie AlSi10Mg :a)et b) homogénéisation à 525°C moulage en coquille X500, X1000. c) homogénéisation à 525°C moulage en sable X1000.

Les Fig.III.10 Fig.III.11 montrent la microstructure de l'alliage de fonderie sans traitement thermique (état brut de coulée), et après traitement thermique de revenu (vieillessement artificiel) pour les deux modes de coulée (sable et coquille) respectivement.

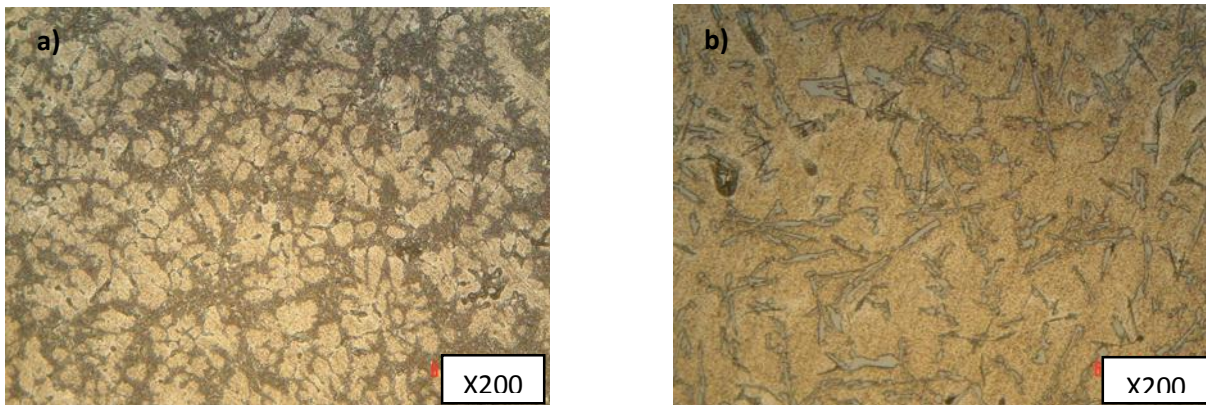


Fig. III. 10. Microstructures de l'alliage de fonderie Al10SiMg état brut de coulée :**a)** moulage en sable, **b)** moulage en coquille .avec attaque chimique (X200).

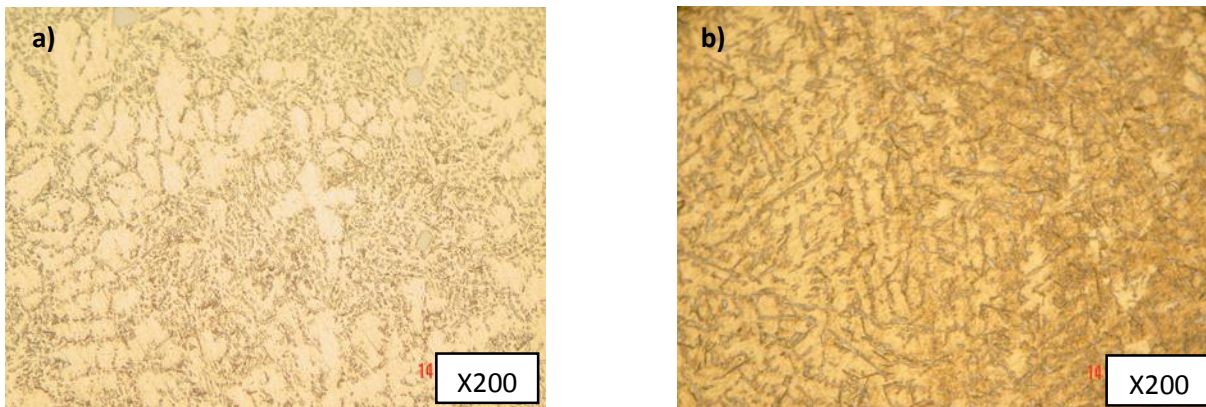


Fig. III. 11. Microstructure de l'alliage de fonderie Al10SiMg état de revenu à 175°C pendant 8h **a)** moulage en sable, **b)** moulage en coquille avec attaque chimique. (X200)

Lors de l'analyse des microstructures obtenues par la microscopie optique, nous avons remarqué que :

L'affinement de la microstructure par la fragmentation et la sphéroïdisation touchant les dendrites et les particules de Si, le passage d'une microstructure grossière vers une microstructure fine et homogène, indique un durcissement structural par solution solide et par la formation de précipités .Ces deux mécanismes multiplient les obstacles au mouvement des dislocations. Donc plus les grains et les précipités sont petits et nombreux, plus le mouvement des dislocations seront entravées.

Nous avons remarqué aussi que la taille des grains obtenus par le moulage en coquille est plus fine que celle obtenue par moulage en sable, quels que soient les états de traitements considérés.

IV.2) essai de traction :

Les essais de traction ont été faits à laboratoire de métallurgie de l'université de l'USTHB, sur une machine de type MTS, de charge maximale 50 KN, Nous avons utilisé des éprouvettes normalisé de longueur $L_0=82\text{mm}$, $L_0=55\text{mm}$ et des diamètres différents : $d=13,8\text{mm}$, $d=8\text{mm}$ des deux modes de coulée sable et coquille respectivement.

Les figures 12,13, 14, 15, 16, 17, 18 et 19 représentent les courbes de traction : des deux modes de coulée sable et coquille, avec différents régimes de traitement thermique. Nous avons pris deux éprouvettes pour chaque mode de coulée en état brut, homogénéisation à 495°C pendant 2h suivi d'un refroidissement à l'air libre, homogénéisation à 525°C suivi d'une trempe à l'eau chauffé à (65°C) et un revenu (vieillessement artificiel) à 175°C pendant 8h.les caractéristiques mécaniques déduites de ces courbe sont regroupées sur les tableaux 1, 2, 3, 4, 5,6,7 et 8:

$R_{0,2}$: limite élastique.

R_m = La résistance à la traction.

$A\%$: L'allongement à la rupture.

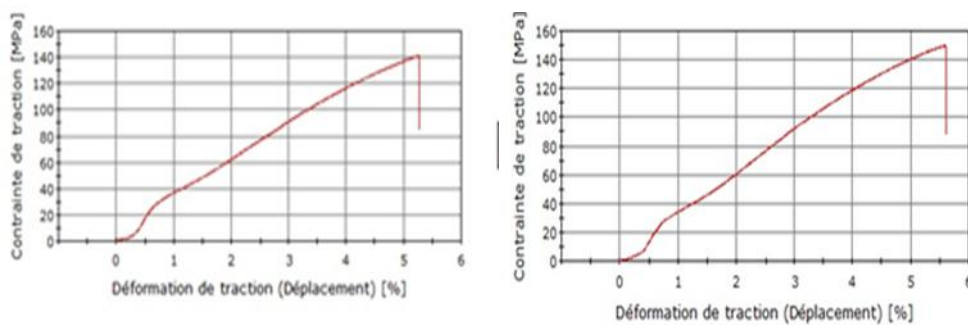


Fig.IV.12 : Brut de coulée sable 1, sable 2.

Tab.IV.1 caractéristiques mécanique de traction Brut de coulées sable 1 et 2

Etat	R_m [MPa]		$R_{0,2}$ [MPa]		A%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Brut de coulée	140,30	149,70	62,30	60,68	3	3

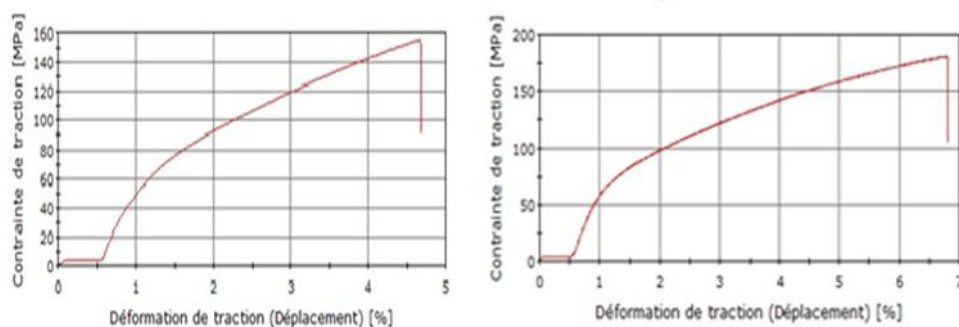


Fig.IV.13 : Brut de coulée coquille 1, coquille 2.

Tab.IV.2 caractéristiques mécanique de traction Brut de coulées coquille 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Brut de coulée	155,92	180,68	92,63	97,85	2,7	5

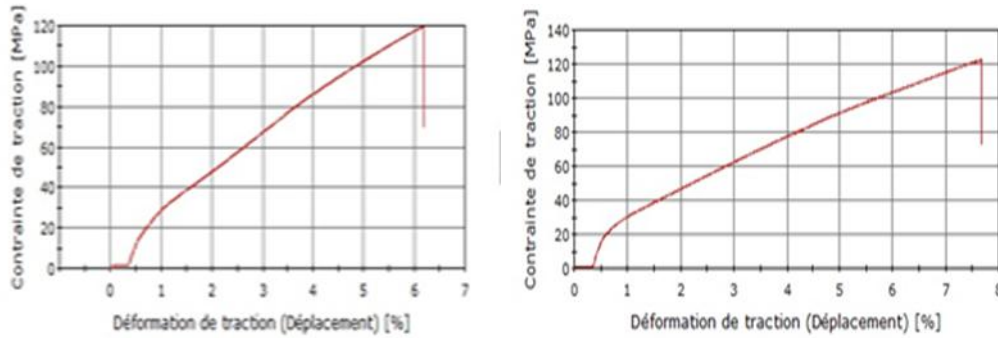


Fig.IV.14 : Homogénéisation à 495°C pendant 2h sable 1, sable 2.

Tab.IV.3 caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 495°C pendant 2h sable 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Homogénéisation à 495°C pendant 2h	122,30	119,46	46,59	47,77	8,7	3,8

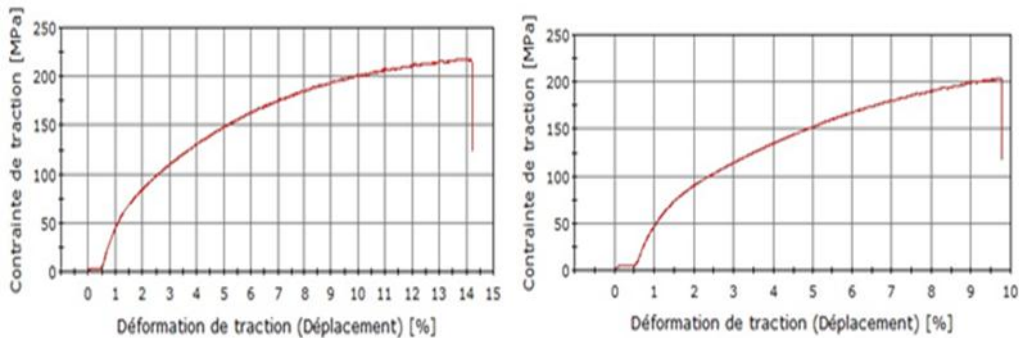


Fig.IV.15 : Homogénéisation à 495°C pendant 2h coquille 1, coquille 2.

Tab.IV.4 caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 495°C pendant 2h coquille 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Homogénéisation à 495°C pendant 2h	215,64	231,06	84,54	123,43	9	6,5

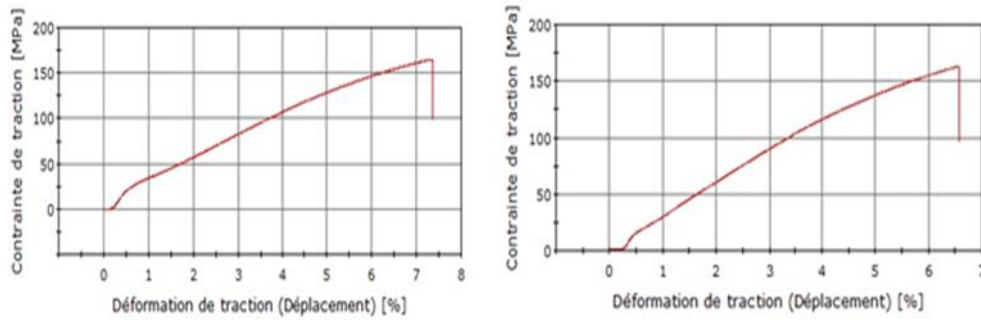


Fig.IV.16 : Homogénéisation à 525°C pendant 6h sable 1, sable2.

Tab.IV.5 caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 525°C pendant 6h sable 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Homogénéisation à 525°C pendant 6h	122,30	162,75	46,59	60,60	4,1	4,3

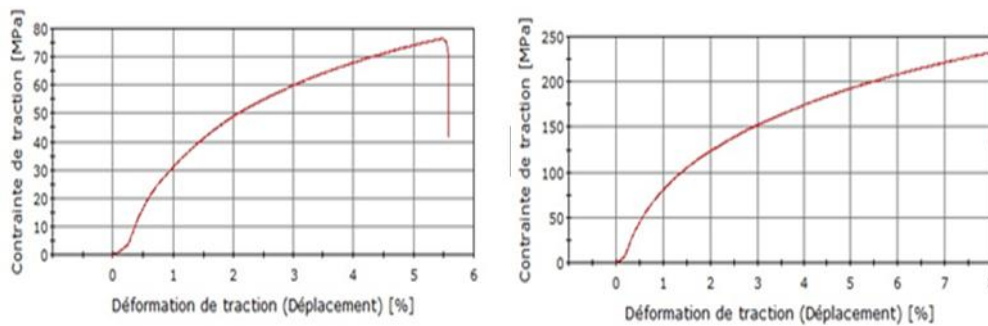


Fig.IV.17 : Homogénéisation à 525°C pendant 6h coquille 1, coquille2.

Tab.IV.6 caractéristiques mécanique de traction, Homogénéisation à 525°C pendant 6h coquille 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Homogénéisation à 525°C pendant 6h	122,30	231,27	46,59	123,18	3,7	5,9

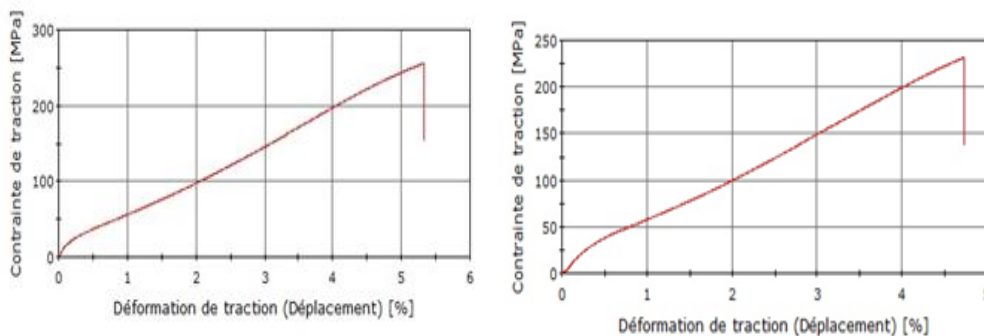


Fig.IV.18 : Revenu à 175°C pendant 8h sable 1, sable 2.

Tab.IV.7 caractéristiques mécanique de traction, Revenu à 175°C pendant 8h sable 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Revenu à 175°C pendant 8h	255,40	231,56	97,43	99,66	3,5	2,4

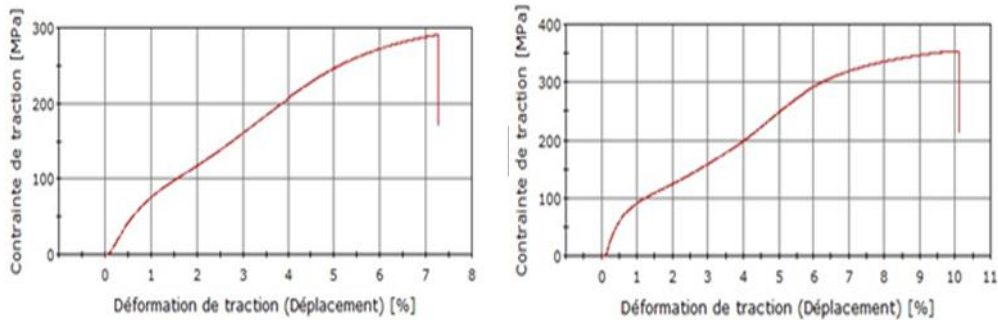


Fig.IV.19 : Revenu à 175°C pendant 8h coquille 1, coquille 2.

Tab.IV.8 caractéristiques mécanique de traction, Revenu à 175°C pendant 8h coquille 1 et 2

Etat	R _m [MPa]		R _{0,2} [MPa]		A%	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Revenu à 175°C pendant 8h	290,04	353,62	117,15	124,06	3,5	6,8

On regroupe les courbes des éprouvettes pour chaque mode de coulée (sable 1, sable 2, coquille1, coquille2), dans une seule courbe et pour chaque traitement thermique.

Les figures IV.20, IV.21, IV.22 et IV.23 représentent le regroupement des courbes d'éprouvettes pour les deux modes de (coulée sable et coquille), pour chaque traitement thermique.

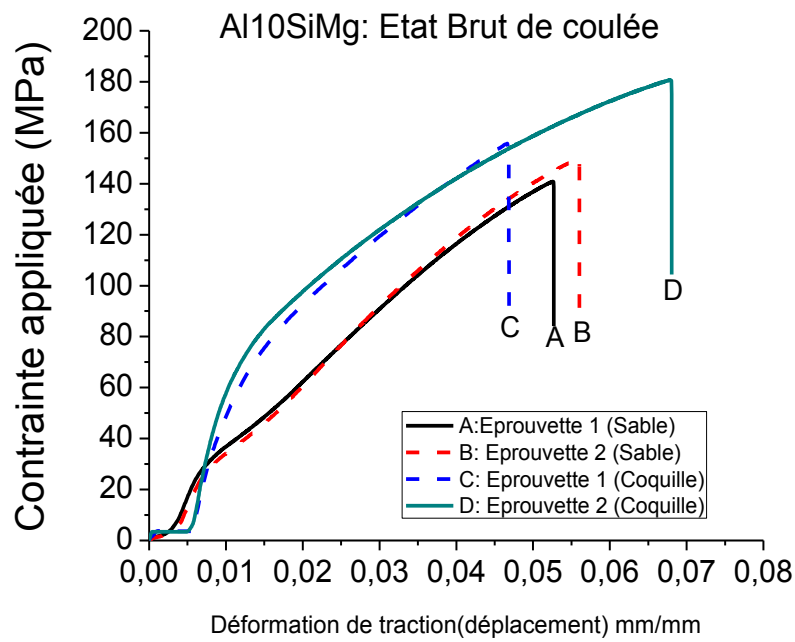


Fig.IV.20 : État brut de coulée sable 1 et 2, Coquille 1 et 2

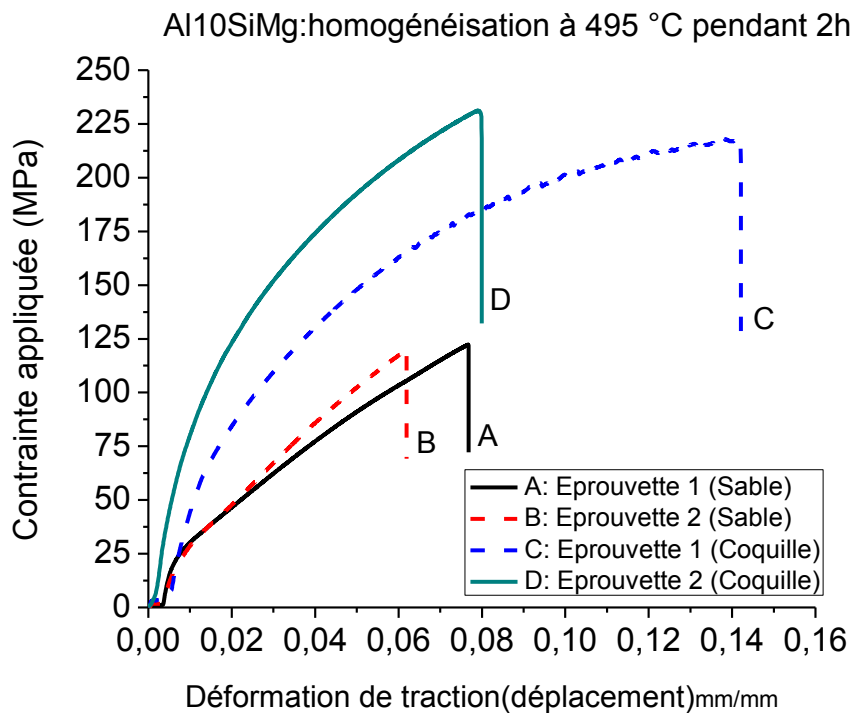


Fig.IV.21: homogénéisation à 495°C pendant 2h sable 1 et 2, Coquille 1 et 2

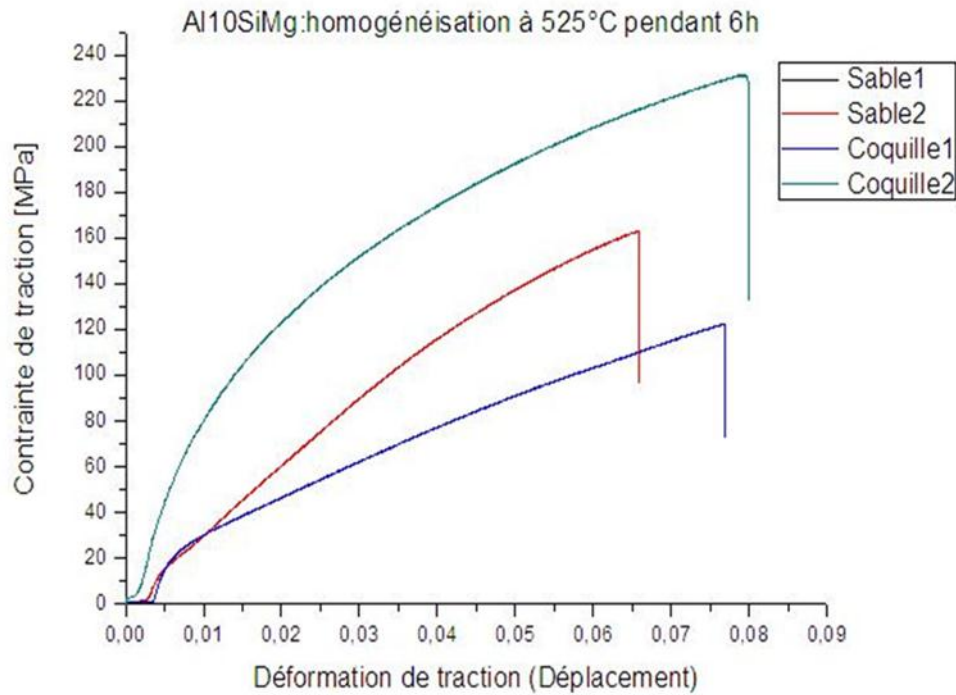


Fig.IV.22 : homogénéisation à 525°C pendant 6h sable 1 et 2, Coquille 1 et 2

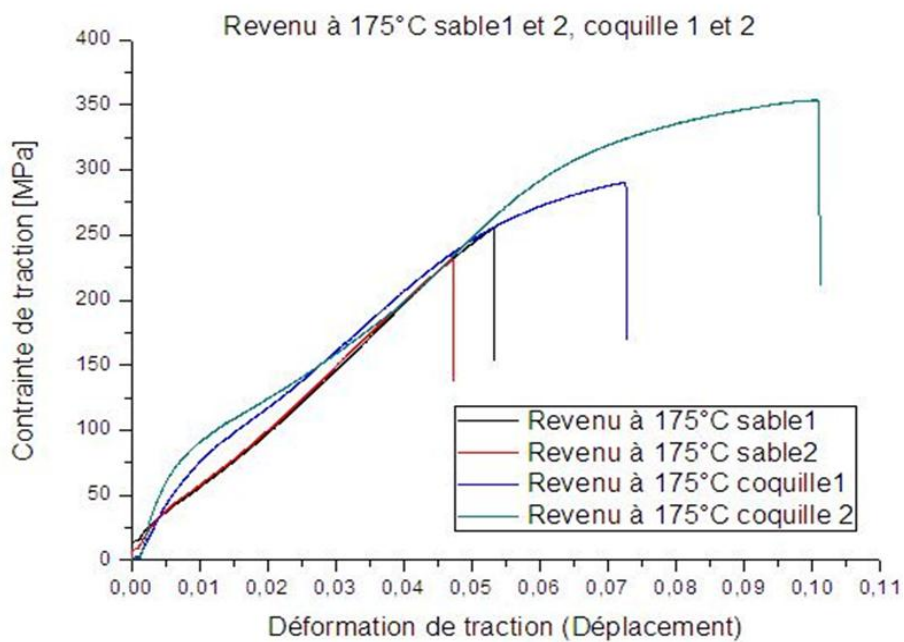


Fig.IV.23 : Revenu à 175°C pendant 8h sable 1 et 2, Coquille 1 et 2

On s'appuyant sur les tableaux des caractéristiques mécaniques, et aux courbes d'éprouvettes (sable1, sable2, coquille1, coquille2), nous avons choisi la grande valeur de résistance à la rupture R_m et la limite élastique $R_{0,2}$ pour chaque mode de coulée, afin d'effectuer une

comparaison entre eux et voir le changement dû aux différents régimes de traitement thermique. Les résultats obtenus sont représenté sur la Fig.IV.13 et Fig.IV.14 :

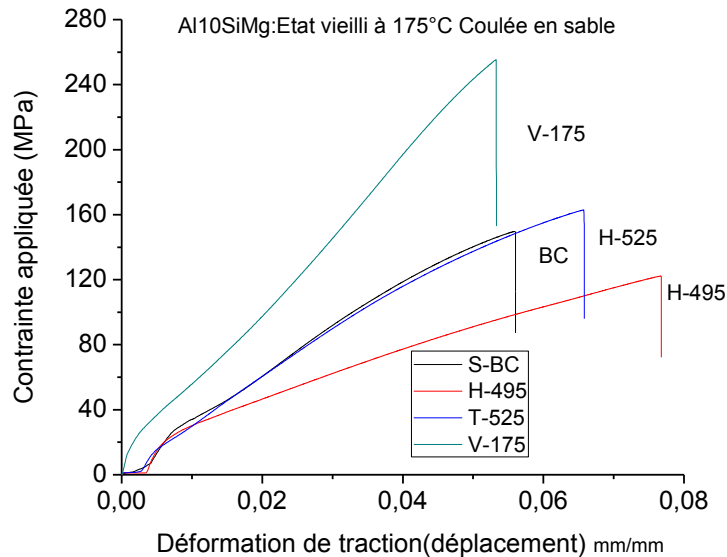


Fig.IV.24 : Brut, homogénéisation à 495° pendant 2h, homogénéisation à 525°C pendant 6h, Revenu à 175°C pendant 8h.coulée en sable.

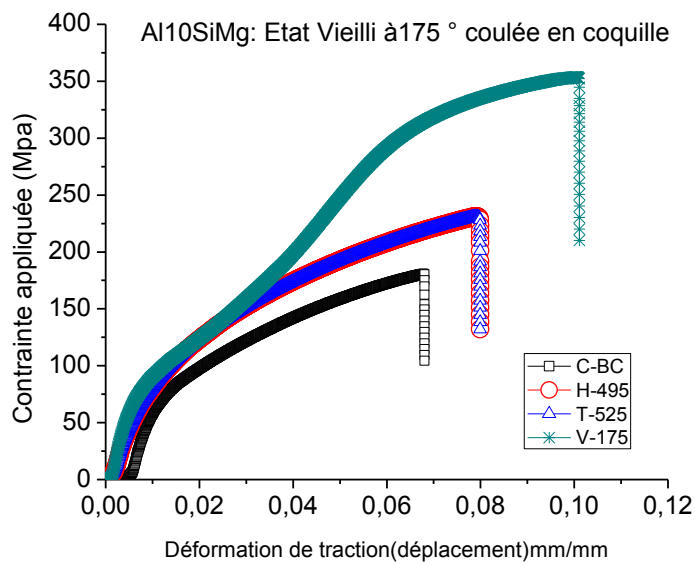


Fig.IV.25 : Brut, homogénéisation à 495° pendant 2h, homogénéisation à 525°C pendant 6h, Revenu à 175°C pendant 8h.coulée en coquille.

D'après les résultats des courbes, on constate que :

- Le traitement de revenu (vieillessement artificiel) à 175°C pendant 8h augmente la résistance à la traction pour les deux modes de coulée, puisqu'elle passe de 149,70MPa à 231,56MPa.
- Le traitement de revenu (vieillessement artificiel) à 175°C pendant 8h diminue l'allongement à la rupture, puisque il passe de 3% à l'état brut de coulée à 2,4% au mode de coulée en sable.
- les résultats de ces études comparatives nous montrent que toutes les courbes du mode de coulée en coquille se situent au-dessus de celle de la coulée en sable, ceci est dû probablement au mode de refroidissement dans les différents moules et aux traitements spécifiques effectués.
- Au cours du durcissement structural, la résistance à la rupture R_m , la limite élastique $R_{0,2}$, augmente et l'allongement pour cent $A\%$ diminue. C'est le résultat que nous avons trouvé.

IV.3) Essai de dureté :

On a mesuré la dureté de l'alliage Al10SiMg pour les deux modes de coulées (sable et coquille) à l'état brut et après les deux mises en solution, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

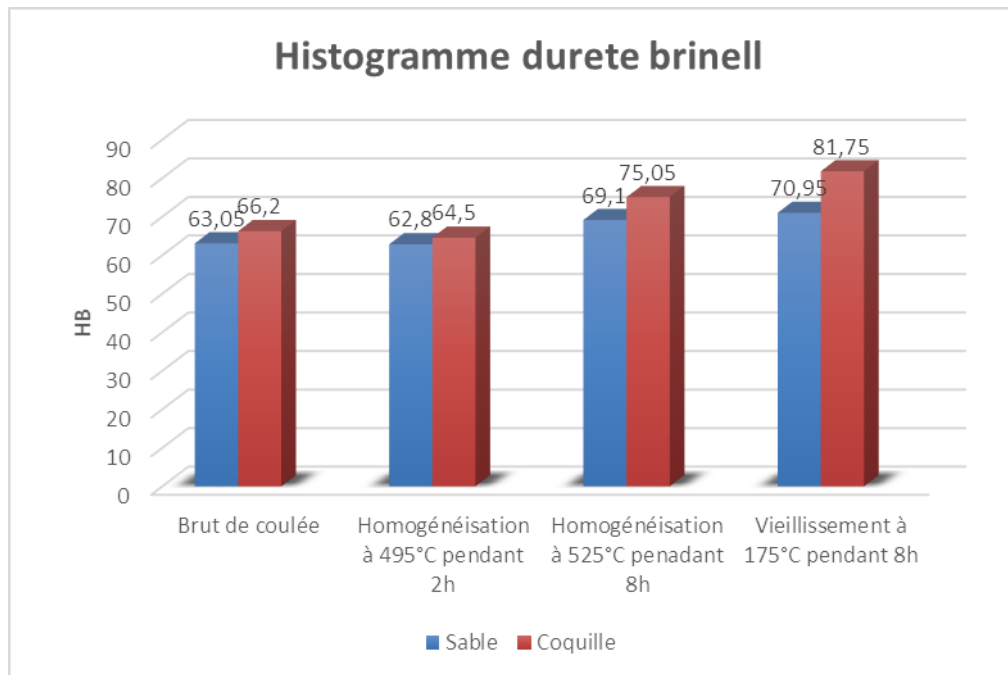
Dureté brinell, charge 1000 N =100kgf.

Tab.IV.9 : valeurs de dureté H_B de l'alliage Al10SiMg pour les deux modes coulée.

		Brut de coulée	Homogénéisation à 495°C pendant 2h	Homogénéisation à 525°C pendant 6h	Vieillessement artificiel à 175°C pendant 8h
Sable	Eprouvette 1	68,8	56,8	78,7	63
	Eprouvette 2	57,3	68,8	59,5	78,9
	Moyenne	63,05	62,8	69,1	70,95
Coquille	Eprouvette 1	64,9	54,3	79,5	82,5
	Eprouvette 2	67,5	74,7	71	81
	Moyenne	66,2	64,5	75,05	81,75

On remarque une augmentation de la dureté de l'état brut de coulée de 63,05 H_B à 70,95 H_B après le traitement (vieillessement artificiel à 175°C) pour la coulée en sable. Pareille pour la coulée en coquille 66,2 H_B état brut de coulée à 81,75 H_B après le traitement (vieillessement artificiel à 175°C). Ce qui explique que l'alliage Al10SiMg a subi un durcissement structural,

et donc création de précipités Mg_2Si qui entravent les mouvements de dislocation, résultant une augmentation de la dureté.



On constate que globalement le traitement de revenu (vieillessement artificiel à 175°C) augmente la dureté du métal pour les deux modes de coulée.

Pour la différence entre la mise en solution à 525°C et 495°C, On dira que l'homogénéisation à 495°C et le temps de maintien ne suffit pas pour que toutes les particules (Mg, Si) et les phases intermétalliques soit dissoutes, par conséquent la solution solide sera moins saturée par rapport aux échantillons traités à l'homogénéisation à 525°C, ce qui implique moins de précipitation, donc moins de durcissement.

IV.4) Essai de résilience :

L'essai de résilience à été réalisé au laboratoire de polytechnique, Harrach. Nous avons réalisé des éprouvettes coulées en sable seulement, et sans entaille.

Les résultats obtenus son représenté sur le tableau suivant :

Tab.IV.10 : valeurs de K_C de l'alliage Al10SiMg pour les deux modes coulées.

	entaille	Brut de coulée	Homogénéisation à 495°C pendant 2h	Homogénéisation à 525°C pendant 6h	Vieillessement à 175°C pendant 8h
Energie absorbée K_C (joule)	Sans	5	4	4	1,5
		6,5	4,5	3,5	2
		5	3	3	1
	Avec	1	--	--	--
		1,5	--	--	--
		1	--	--	--

On remarque que l'alliage Al10SiMg à l'état brut de coulée a une absorption assés grande par rapport aux différents régimes de traitement thermiques.

Donc l'énergie absorbée de l'alliage Al10SiMg est grande à l'état brut de coulée, et faible aux traitements thermiques.

Dans le cas des éprouvettes avec entaille, on remarque que les résultats sont inférieurs à 1 joule, pour les différents traitements thermiques. Ce qui veut dire que ces valeurs sont difficile à déterminer (la machine pendule mouton Charpy est ancienne).

Conclusion générale

- [1] : Aluminium et alliages d'aluminium Lycée Raymond LOEWY, PDF.
- [2] : www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin.
- [3] : L'aluminium et ses alliages prof 15/11/2006.pdf.
- [4] C.Vargel, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages .267 Dunod, paris (1979).
- [5]: M. A. Moustafa, F.H. Samuel, H.W.Doty, J. of Mater. Science, 38, pp 4523-4534. (2003).
- [5]: A. M. A. Mohamed, F.H. Samuel, A M Samuel, J. Mater Design, doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.041 (2009).
- [6]:www.histalu.org/iha-rubrique-article.php.
- [7]: Barlas .pdf sur google recherche.
- [8]Nicouleau-Bourles E., 1999).
- [9] : Guy PLUVINAGE, cours de mécanique de rupture, les 12 principes qui gouvernent le phénomène de rupture, Université Paul Verlaine -Metz.
- [10] : Michel F.Ashby, David R. H Jones, Matériaux: microstructure et mise en œuvre, Tome2, p .385, Dunod, paris (1991).
- [11]: M Tash, F.H. Samuel, F.Mucciardi, H.W.Doty, Materials Science and Engineering A, 443,185- 201 (2007).
- [11] : Sébastien Morin, effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression A380.1, Thèse de Doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, juillet (2002).
- [12] : Documentation interne Aluminium Pechiney ; et Corporation (1996).