

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME

MASTER II EN GÉNIE MÉCANIQUE OPTION : SCIENCES DES MATÉRIAUX.

THÈME :

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES ALLIAGES

AL-SI (7%,10G,13%,22%)

SOLIDIFIER RAPIDEMENT PAR « MELT-SPINING »

PROPOSÉ ET ENCADRÉ PAR:

CO-PROMEUTEUR :

DR. SAOUDI ELYÈS .

MR .M. OUCHAABANE.

RÉALISÉ PAR:

HADJ AHMED SOFIANE.

ANNÉE 2014/2015.

Dédicaces

À mes parents qui me sont les plus chers au monde, que Dieu les protège, À mes frères et sœurs chacun à son nom ; À tous les membres de la famille HADJ AHMED ; À tous mes amis ; À tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient ; À tous ceux qui comptent pour moi ; À tous ceux qui m'ont aidée de loin et de près

; Je dédie ce modeste travail.

Remerciements

Tout d'abord je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon projet de fin d'études.

A mes professeur qui m'en encadré dans mes études universitaires, et a tout les membres de département de génie mécanique U.Saad Dahleb .Blida 1

A Monsieur le Professeur Dr. SAOUDI Elyes, mon promoteur, et Monsieur Mohamed Ouchaabane tout les membre de CDTA tout mes amis (Ahmed ,Hichem,Yazid,Sidali,Yacine Nabil, Abdelhamide Mdm Bouafia,yacine Bench..... etc) ,recevez Messieurs, mes plus sincères remerciements pour votre rigueur scientifique, votre enthousiasme et vos précieux conseils qui ont fait progresser ce travail. La confiance que vous m'avez accordée pendant ces mois m'a permis de progresser. Soyez assuré de toute mon estime et de mon profond respect.

Je voudrais particulièrement remercier les membres du jury pour m'avoir honoré de leurs présences de mon jury de soutenance.

Table des matières

Liste des figure

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.

Chapitre I: La solidification Classique.

I.1	Introduction	1
I.2	Germination et croissance	2
1)-	Réseau cristallin	3
2)-	Motif atomique	3
I.3	La diffusion	3
I.4	Les défauts cristallins	4
1)-	Les défauts ponctuels	4
2)-	Les défauts linéaires	4
3)-	Les défauts surfaciques	5
4)-	Les défauts volumiques	6
I.5	La précipitation	6
I.6	La microstructure de solidification	7
1)-	La microstructure eutectique	8
2)-	La microstructure dendritique	8
A)-	Croissance dendritique	9
B)-	Morphologie d'une dendrite	9
C)-	Conditions de croissance des dendrites	10

Chapitre II : La solidification rapide

II.1	Introduction	12
II.2	La Transition vitreuse	12
1)-	Aspect cinétique de la vitrification	13
2)-	Aptitude à l'amorphisation (Glass Forming Ability)	13
3)-	Affinement de la structure dendritique et granulaire	14
II.3	Techniques d'élaboration des alliages métalliques SR	15
1)-	Elaboration par la méthode "Liqui-Sol"	15
A)-	Méthode du Melt-Spining	15
B)-	Méthode du Splat Cooling	16
C)-	Méthode du Melt-drag	16
D)-	Méthodes de laminoirs (doubles rouleaux)	17
E)-	Méthode à effet centrifuge	17
F)-	Méthode du melt- extraction	18
G)-	Méthode de flot planaire	18
H)-	Solidification rapide de poudre métallique (atomisation centrifuge)	18
II.4	Propriétés et applications des verres métalliques	19
1)-	Propriétés chimiques	19
2)-	Propriétés électriques	19
3)-	Propriétés magnétiques	19
4)-	Propriétés mécaniques	19

Chapitre III : Aluminium est ces alliages

III.1	Introduction	21
III.2	Obtention de l'aluminium	21
	1)- La bauxite	21
	2)- L'alumine	21
	3)- L'aluminium	21
III.3	L'aluminium	22
	1)- Principales propriétés	22
	2)- Emploi	22
	3)- Caractéristiques de l'aluminium	23
	A)- Caractéristiques mécaniques	22
	B)- Caractéristiques physiques	23
	C)- Caractéristiques chimiques	23
	D)- Caractéristiques atomiques	23
III.4	Alliages d'aluminium	24
	1)- Les alliages de corroyage	24
	2)- Les alliages de fonderie	24
III.5	Désignation des alliages d'aluminium	24
III.6	Désignation des alliages de moulage	25
	A)- Désignation numérique	25
	B)- Désignation symbolique	25
	C)- Anciennes normes de désignation	25
	D)- Composition chimique	25
III.7	Influence des éléments d'addition	26
	1)- Silicium « Si »	26
	2)- Cuivre « Cu »	26
	3)- Magnésium « Mg »	26
III.8	Alliage Aluminium-Silicium <<Al-Si>>	27
III.9	Solidification rapide des alliages d'aluminium	28
	1)- Structures des alliages d'aluminium SR	28
	2)- Structure amorphe des alliages d'aluminium	28
	3)- Propriétés des verres d'aluminium	29
	A)- Propriétés mécaniques	29
	B)- Propriétés électriques	29
	C)- Propriétés chimique	29

Chapitre IV : Technique Expérimentales

IV.1	Introduction	31
IV.2	Matériaux utilisés	31
IV.3	Procédures et techniques d'analyses	31
	1)- La solidification classique par fonderie (moulage en sable)	31
	2)- La solidification rapide par La méthode Melt-spining	33
	3)- La Métallographie	35
	4)- La diffraction (DRX)	38
	5)- L'essai de microdureté	39

Chapitre V : Résultats et interprétation

V.1	Interprétations des structures métallographiques	40
	1)- Interprétation des alliages obtenues par (moulage en sable)	40
	2)- Interprétation des alliages obtenues par « Melt-spining »	44
V.2	Interprétation des résultats de DRX	48
	1)- Les échantillons obtenus par le moulage en sable	48

2)- Les échantillons obtenues par Melt-spining	48
V.3 Détermination de la vitesse de solidification	49
V.4 Interprétation des résultats de microdureté	49
1)- Les échantillons obtenus par fonderie (moulage en sable)	49
2)- Les échantillons obtenues par « Melt-Spining »	50
CONCLUSION GENERALE.	

La liste des figures

Chapitre I :La solidification classique.

Figure I-1: Diagramme d'analyse thermique de la solidification classique d'un corps pur.....	2
Figure I-2: Bilan énergétique de l'apparition d'un germe.....	2
Figure I-3: Transformation allotropique $\beta \rightarrow \alpha$ d'un corps pur a T_A	3
Figure I-4 : Défauts ponctuels.....	4
Figure I-5: Ligne de dislocation coin et ligne de dislocation vis.....	5
Figure I-6: Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases.....	5
Figure I-7: a) Précipité cohérent. b) Précipité semi-cohérent. c) Précipité incohérente	6
Figure I-8: Microstructures obtenues dans un alliage Al-4% Cu.....	6
a) par refroidissement Lent à partir de 550°C.	
b) par refroidissement rapide à partir de 550°C.	
Figure I-9: Microstructure colonnaires (a) et équiaxes (b).....	7
Figure I-10 : Types de morphologie eutectique binaire.....	8
Figure I-11 : Interface solide-liquide dans la zone colonnaire d'une coulée avec distribution de température.....	8
Figure I-12 : Représentation à 3D de dendrites.....	9
Figure I-13: Condition de croissance d'une dendrite colonnaire et équiaxe.....	10
Chapitre II : La solidification rapide.	
Figure II-1 : La viscosité en fonction de la température réduite lors de.....	13
la solidification	
Figure II-2: distance entre bras dendritique en fonction de la vitesse de solidification.....	14
Figure II-3: Méthode de melt- spinning a) avec une roue b) avec deux roue.....	15
Figure II-4: Schéma représentatif de la technique de melt-drag.....	16
Figure II -5 : Solidification rapide des rubans entre cylindres de laminoir.....	17
Figure II-7: Représentation schématique de la méthode de l'atomisation par l'effet Centrifuge.....	18
Chapitre III : L'aluminium et ces alliages	
Figure III-1: Série d'extraction de l'aluminium.....	21
Figure III-2 : la maille de l'aluminium.....	23
Figure III -3 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	27
Techniques Expérimentales.	
Figure IV-1 : Représente les étapes de la coulée des alliages Al-si.....	32
Figure IV-2 : représente le produit final après le moulage en sable.....	32
Figure IV-3 : Schémas représentant le procédé du Melt-spinning.....	33
Figure IV-4 : le coté roue-moteur de la machine « Melt-spinning ».....	33
Figure IV-5 : Représente les rubans.....	34
Figure IV-6 : L'enrobage des rubans.....	34
Figure IV -7 : microscope optique Carl Zeiss.....	35
Figure IV-8 : Représente la polisseuse mécanique.....	36
Figure IV-9 : Représente des échantillons attaqués chimiquement.....	37
Figure IV -10 : distance interatomique λ	37
Figure IV -11 : Représente le diffractomètre a rayon X (DRX).....	38
Figure IV -12 : Le microduromètre à différentes indenteur (Vickers, Brinel).....	39

Interprétation des résultats

<u>Figure V-1</u> : AS7 (100x).....	40
<u>Figure V-2</u> : AS7 (200x).....	40
<u>Figure V-3</u> : AS10G (100x).....	41
<u>Figure V-4</u> : AS10G (200x).....	41
<u>Figure V-5</u> : AS13 (200x).....	42
<u>Figure V-6</u> : AS13 (100x).....	42
<u>Figure V-7</u> : AS22 (100x).....	43
<u>Figure V-8</u> : AS22 (200x).....	43
<u>Figure V-9</u> : AS22 (x2000).....	44
<u>Figure V-10</u> : AS13 (x2000).....	45
<u>Figure V-11</u> : AS7(x1000).....	45
<u>Figure V-12</u> : AS7 suivant la largeur du ruban (2000x) [7].....	46
<u>Figure V-13</u> : AS22 suivant la largeur du ruban (2000x) [7].....	46
<u>Figure V-14</u> : Les spectres de diffraction des rayons X des échantillons obtenues par moulage en sable .	48
<u>Figure V-15</u> : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de Melts-spining.....	48
<u>Figure V-16</u> : Evolution de la dureté (Hv) en fonction de pourcentage de Si	50

La liste des Tableau :

<u>Tableau IV-1</u> : représente la composition chimiques des lingot d'aluminium.....	31
<u>Tableau V-1</u> : La distance λ Solidification lente.....	49
<u>Tableau V-2</u> :La distance λ Solidification par Mélt-spining.....	49
<u>Tableau V-3</u> : représente la microdureté (Hv) des alliages Al-si.....	50
<u>Tableau V-4</u> : Représente la microdureté (Hv) des alliages Al-Si avec la vitesse de solidification.....	50

Références Bibliographique

- [1] Djellabi oussama ;etudes des alliages (7-17% si ; 1-3% cu) solidifier rapidement ,Etude mécanique.... U.Saad dahleb Blida 12014
- [2] Hicham Boudierba, Thèse de magister, Influence de la trempe sur la précipitation...., Université de Constantine 1999.
- [3] Aide mémoire de science des matériaux. Michel Dupeux, Edition Dunod.
- [4] R.Bensimon, Tome1 : Généralités sur la surface des matériaux, Pye Edition, 1970.
- [5] Youcef Aouabdia, Thèse magistère, Etude de l'effet de cuivre et l'excès de silicium sur la stabilité micro ... , Université de Constantine, 2005.
- [6] M.F. Ashby, D.Jones, Sources des matériaux 1999.
- [7] E.Saoudi, thèse magistère, étude et modélisation des phénomènes de solidification des alliages Al-Si industriels (7-22%), ENP Alger, 1994.
- [8] M.ALJERF, Thèse doctorat, Propriété Mécaniques des Verres Métalliques ; Mise en Forme et Applications, Université de Grounoble 2011.
- [9] A.K. Jena, A.K. Gupta and M.C. Chaturvedi, 'A différentiel scanning calometric' Acta metal, Vol 37, Année 1987.
- [10] Desre, P.J, On the effect of the number of components on glass-forming ability of alloys from the liquid state: Application to the new génération of multi component bulk glasses .Matériels Transactions Jim, 1997
- [11] Inoue, A., Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys.Acta Materialia, 2000.
- [12] T.Gloriant, D.H.Ping, Colloque SF2M Section-Ouest: Surface et interface, indentation, rayage et abrasion, Angers, 2005.
- [13] T.Gloriant, D.H.Ping, K.Hono, A.L. Greer, M.D. Baro, Mater. Sci Eng A P:304-306-316, 2001.
- [14] B.A.Alhamid, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2002.
- [15] Kanta Suzuki and Toshio Haga, Refined solidification structure, Tokyo Institute of technology, Vol 45, 2004.
- [16] A. Mahroug, Thèse de magistère, Université de Constantine, 2003.
- [17] M.Boucheur, Thèse de magistère, Etude des phénomènes de cristallisation et précipitation dans les alliages Al 9% Mg et 5% Cu, Université de Constantine, 1994.
- [18] Mémoire .Aluminium et alliages aluminium...
- [19] Inoue, A. and N. Nishiyama, New bulk metallic glasses for applications as magneticsensing, Chemical, and structural materials.Mrs Bulletin, 2007.
- [20] Ashby, M.F. and A.L. Greer, Metallic glasses as structural materials.Scripta Materialia, 2006.
- [21] Cottrell, A.H., The mechanical properties of matter.John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [22] R.Bensimon, Tome 1 , Généralités sur les surface des matériaux, Pyc Edition, 1970.
- [23] P. BARRAND. L'Aluminium Tome 1, Editions EYROLLES. Paris 1964.
- [24] J. HOUZE. Production d'aluminium. Ecole des mines d'ALBI CARMAUX France 2007.
- [25] J. Barralis , G. Meader. Précis de Metallurgie, Editions Nathan, Paris 2005.
- [26] Matériaux métalliques, édition OPU 1992.
- [27] C. VARGEL.Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, édition DUNOD, Paris 1979.
- [28] F. HERBULOT. Récupération et recyclage de l'aluminium, Techniques de

l'Ingénieur M 2345, 2001.

Introduction

I-Introduction Générale.

Avant de parler de l'utilisation d'un matériau dans des applications diverses, il faut d'abord le concevoir et élaborer. En métallurgie, l'élaboration est à la base de toute étude quelle qu'elle soit (mécanique, traitement thermique, chimique etc.). La maîtrise de la technologie des matériaux est tout d'abord la maîtrise des procédés d'obtention de ceux-ci. Lorsque l'on parle d'élaboration on pense généralement à un mélange liquide (alliage métallique ou autre) qui se solidifie par la suite. Et réussir l'élaboration d'un mélange c'est réussir sa solidification. La compréhension du phénomène de solidification devient donc fondamentale.

C'est la raison qui nous a incités à diriger notre recherche vers la solidification.

Comme matériau de base, notre choix s'est porté sur les alliages Al-Si. Cette préférence est due au fait qu'actuellement, l'un des principaux axes de recherche dans le domaine des matériaux est l'étude et le développement des alliages légers.

Comme les principaux alliages sont à base d'aluminium car leurs caractéristiques nous offrent un champ d'application très vaste. Parmi ceux-ci les alliages Al-Si que l'on retrouve dans la plus part des domaines tels, l'industrie automobile, mécanique, aéronautique, électronique, et maritime.

Notre recherche consiste de donner une claire et précise sur le comportement des alliages Al-Si. Pour cela, nous avons divisé notre travail en deux parties

***Partie théorique :**

Cette partie consiste à étudier des généralités sur les phénomènes de solidification des alliages Al-Si et ces aspects fondamentaux des deux types de solidification suivant des trois chapitres :

- La solidification classique et rapide.
- Généralités sur l'aluminium et ces alliages.

*** Partie expérimentale :**

- L'obtention des alliages solidifier classiquement et par melt spinning .
- comparaison caractéristique mécanique entre les deux produits obtenues.

Chapitre I :

La solidification classique

I.1 Introduction :

Un alliage peut exister sous différents états: solide, liquide. Ces différents états représentent les diverses phases contenues dans l'alliage et qui peuvent changer en fonction des conditions imposées à ce «système thermodynamique», principalement la composition chimique et la température, mais aussi la pression. Pour réaliser l'équilibre, il est nécessaire que tous les atomes des constituants puissent se déplacer à l'intérieur de toutes les phases : c'est ce que l'on appelle la diffusion chimique qui s'effectue par permutation avec les sites vacants sur le réseau cristallin.

C'est l'expérience qui permet d'observer les phases coexistant dans un alliage en fonction de la composition chimique, de la température de réalisation de l'équilibre, voir de la pression appliquée. C'est également l'expérience qui permet de déterminer les lignes des transitions de phases sur lesquelles apparaissent ou disparaissent certaines d'entre elles.

Les diagrammes d'équilibre de phases représentent donc les domaines d'existence à l'équilibre des diverses phases qui se forment dans le système en fonction de sa composition chimique et des paramètres externes qui lui sont imposés. Puisque les propriétés des alliages dépendent largement des phases qui le constituent, on comprend l'intérêt d'une telle représentation qui permet de matérialiser les conditions d'obtention des phases souhaitées ou, à l'inverse, d'éviter la formation des phases indésirables. Les diagrammes d'équilibre constituent donc le document de base des métallurgistes, outil indispensable que l'on consulte en priorité [1].

I.2 Germination et croissance :

Les idées de base de la théorie classique de la germination ont été données par Gibbs en 1878, elles tournaient autour que la germination nécessite un rapport d'énergie pour créer une interface entre la nouvelle phase et la phase mère [2].

Lors de la solidification classique d'un corps pur, la courbe d'analyse thermique enregistrée descend en général au-dessous de la température théorique de solidification, avant d'y remonter lorsque la cristallisation commence (Figure I-1). Pendant une période d'incubation, une surfusion ΔT est nécessaire avant qu'en apparaissent les premiers germes stables : premiers agglomérats d'atomes structurés sous forme cristalline. Ceux-ci croissent ensuite en rejoignant la température d'équilibre. Après consommation complète du liquide, les cristaux se rejoignent pour former les grains du poly-cristal [3].

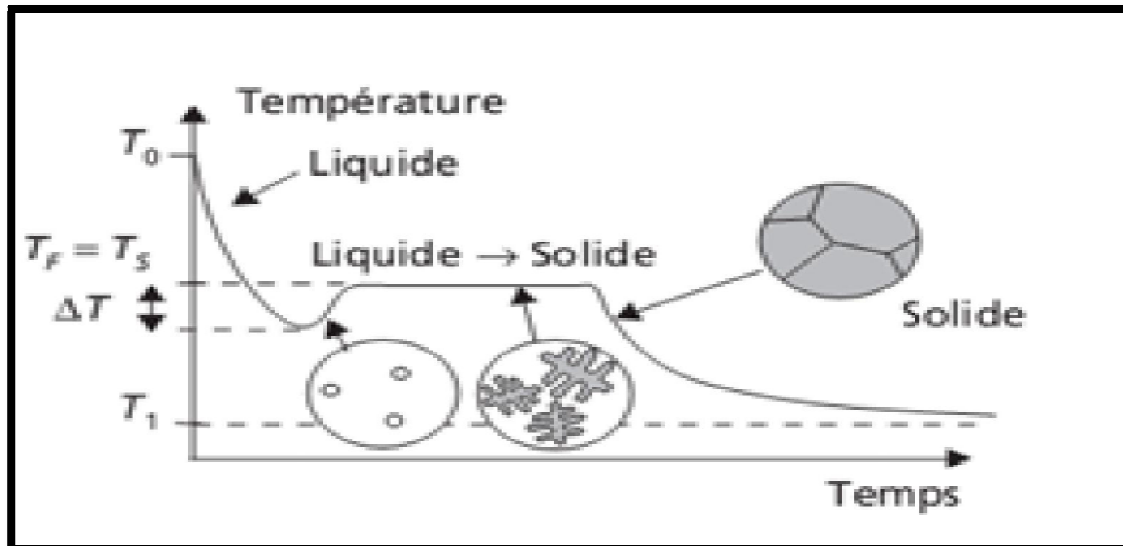


Figure I-1: Diagramme d'analyse thermique de la solidification classique d'un corps pur [3].

Les germes solides se forment aléatoirement par agitation thermique des atomes. Mais ils ne peuvent survivre à l'agitation thermique que si le bilan énergétique ΔG de leur apparition conduit à un abaissement de l'énergie interne du système liquide + solide + interface solide/liquide (Figure I-1). Pour un germe sphérique de rayon r :

$$\Delta G = - \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \Delta G_V + 4 \pi r^2 \cdot \gamma \dots \dots \dots (1)$$

ΔG_V représente la différence d'énergie entre l'état solide et l'état liquide dans le volume du matériau, et γ l'énergie d'interface solide/ liquide par unité de surface.

L'expression (1) passe par un maximum pour $r = r_c = 2 \gamma / \Delta G_V$.

Les germes sont donc instables ou stables suivant qu'ils se forment avec un rayon inférieur ou supérieur à la valeur critique r_c (Figure I-2) [3].

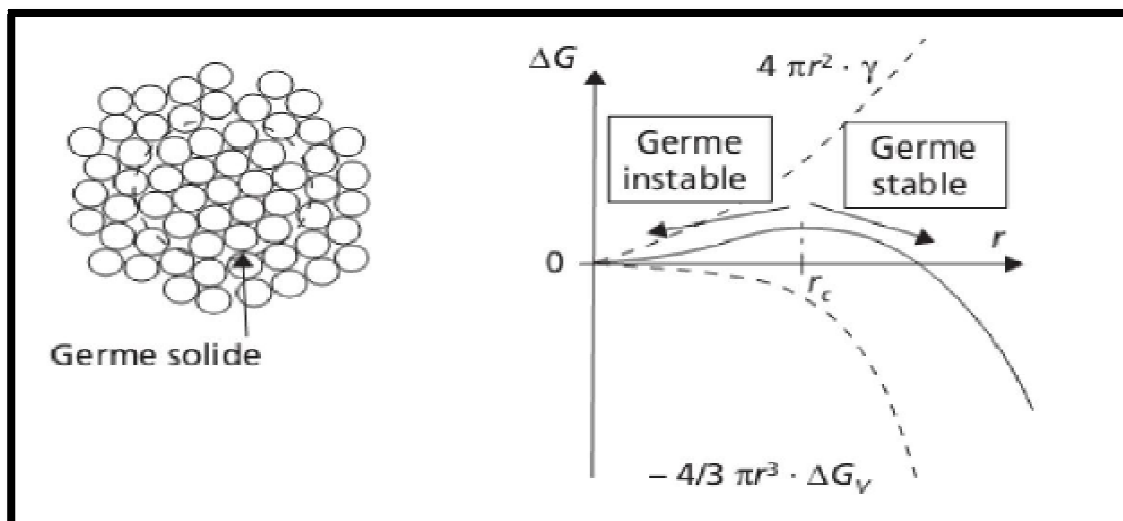


Figure I-2: Bilan énergétique de l'apparition d'un germe.

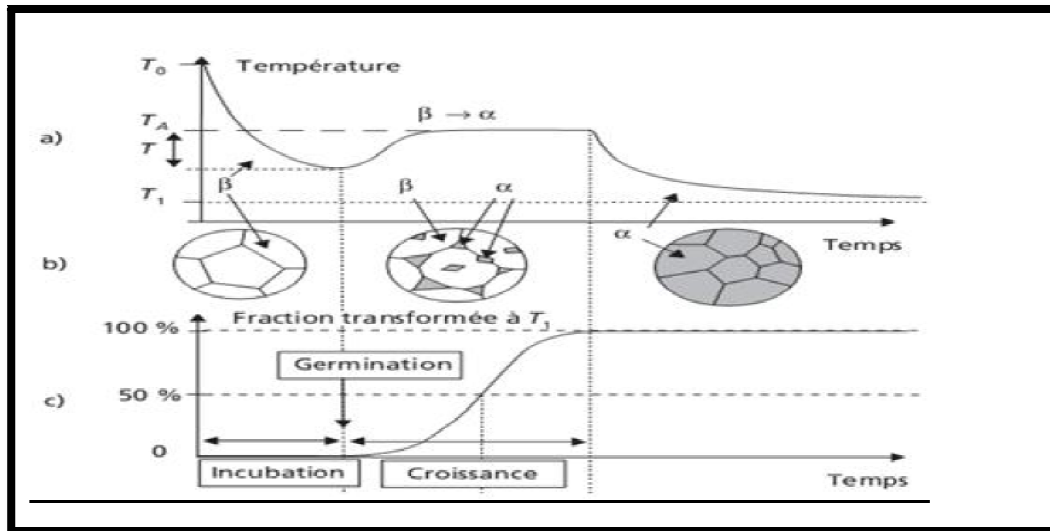


Figure I-3: Transformation allotropique $\beta \rightarrow \alpha$ d'un corps pur à T_A .

Le processus de croissance des précipités à partir d'une solution solide sursaturée Peut être gouverné par :

- La diffusion d'atomes de soluté au sein de la phase mère.
- La traversée de l'interface lorsque les cristaux prendront des dimensions plus grandes et le flux de diffusion diminue progressivement [1].

1)- Réseau cristallin :

Un cristal est un ensemble d'atomes (ou de molécules) disposés de manière périodique dans les trois directions et présentant aussi bien un ordre à courte distance qu'à longue distance. Il peut être défini à partir de deux données : le réseau cristallin et le motif atomique [3].

Le réseau cristallin est un ensemble tridimensionnel de points imaginaires, les nœuds, disposés de manière périodique dans les trois directions de l'espace. Il peut être généré par répétition, un nombre entier de fois, de trois vecteurs de base qui définissent une maille élémentaire du réseau d'origine arbitraire [3].

2)- Motif atomique :

C'est un ensemble d'atomes (identiques ou différents), avec leur position relative, qui doit être reporté en chaque nœud du réseau cristallin pour reconstituer exactement la totalité des atomes du cristal, sans vide ni recouvrement [3].

I.3 La diffusion :

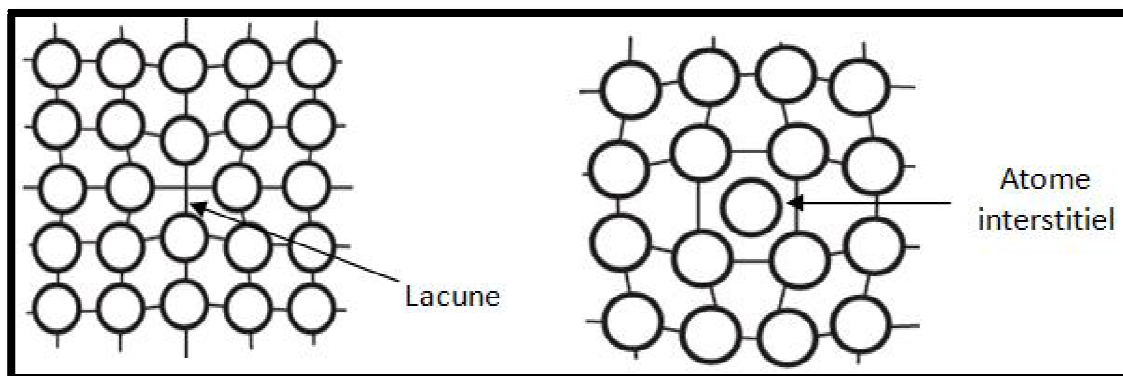
Considérons un constituant C réparti d'une façon non uniforme dans un alliage, soit δ un élément de surface pris dans le métal. Désignons par dm la quantité du constituant C qui traverse cet élément pendant le temps dt ; le rapport (dm/dt) est appelé vitesse de diffusion. La vitesse de diffusion est proportionnelle au gradient de concentration du constituant C et augmente avec la température ; d'une façon plus précise, elle est proportionnelle à une exponentielle de la forme $e^{-Q/RT}$, où R est la constante de gaz, Q est une certaine énergie d'activation et T la température absolue [4]. Sous l'effet de l'agitation thermique, les atomes d'un solide peuvent effectuer des sauts d'un site à un site voisin au sein d'un solide, ce qui provoque leur migration progressive. Les déplacements au sein du cristal, par mécanisme lacunaire ou interstitiel [3].

I.4 Les défauts cristallins :

Les cristaux réels comportent différents types de défauts qui représentent tous un Surcroît d'énergie interne du cristal par rapport à un cristal parfait, et donc un écart par rapport à la stabilité maximale [3].

1)- Les défauts ponctuels :

On parle de lacune qui représente un site vide, c'est-à-dire, un emplacement où devrait normalement se trouver un atome. On parle d'atome Interstitiel représentant un atome excédentaire disposé en un emplacement normalement inoccupé dans le cristal [3].



Dans un cristal contenant un seul type d'atomes, les atomes d'impuretés en solution solide constituent également des défauts ponctuels :

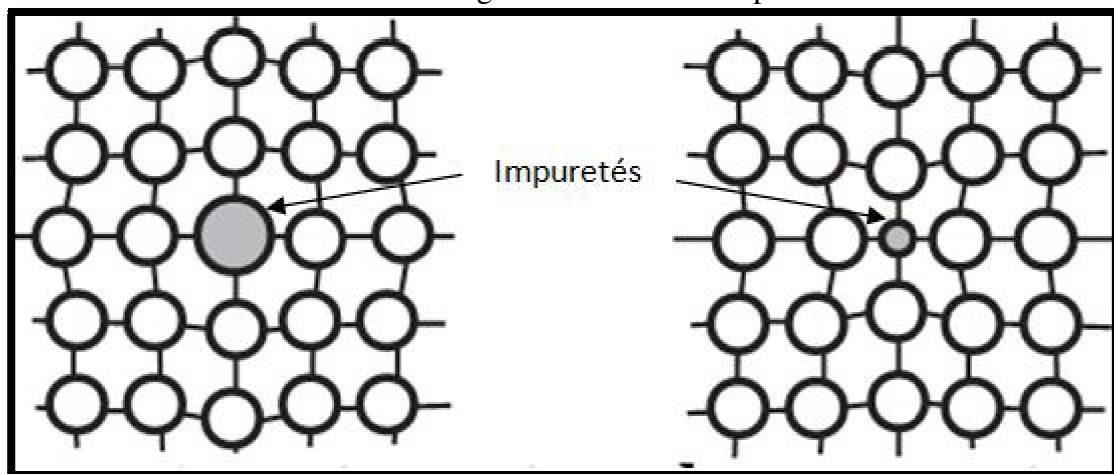


Figure I-4 : Défauts ponctuels [3].

2)- Les défauts linéaires :

Ils constituent des sortes de « plis » des plans atomiques dans le cristal, dont l'amplitude, égale à un nombre entier de distances interatomiques, permet de retrouver le cristal parfait à longue distance. On les appelle dislocations. L'amplitude du « pli », discontinuité de translation qui caractérise le défaut par rapport à un cristal parfait, est caractérisée par le vecteur de Burgers[3].

La Figure I-5 représente schématiquement, dans un cristal cubique simple, deux types

de dislocations :

- une dislocation coin, dont la ligne de dislocation L est perpendiculaire au vecteur de Burgers ;
- une dislocation vis, dont la ligne de dislocation L est parallèle au vecteur de Burgers.

Il peut évidemment exister des dislocations mixtes, dont la ligne fait un angle compris entre 0 et 90° avec le vecteur de Burgers [3].

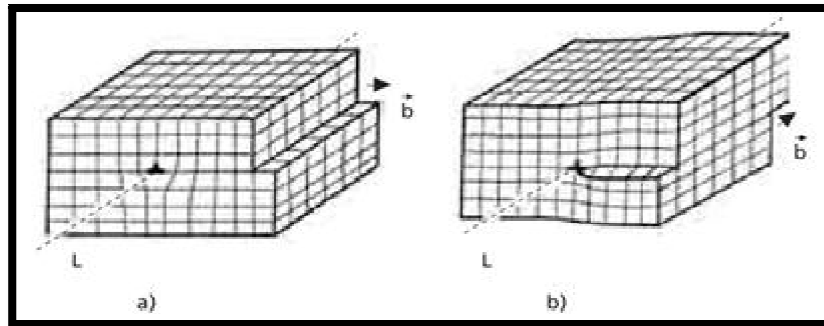


Figure I-5: Ligne de dislocation coin et ligne de dislocation vis [3].

3)- Les défauts surfaciques :

Joint de grains, joint de phases. Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des solides cristallins est constituée d'un agglomérat de cristaux, ou grains accolés avec des orientations différentes. Si ces cristaux sont de nature identique, leur surface d'accolement est appelée joint de grains. Si les cristaux sont de nature différente, leur surface d'accolement est appelée joint de phases [3].

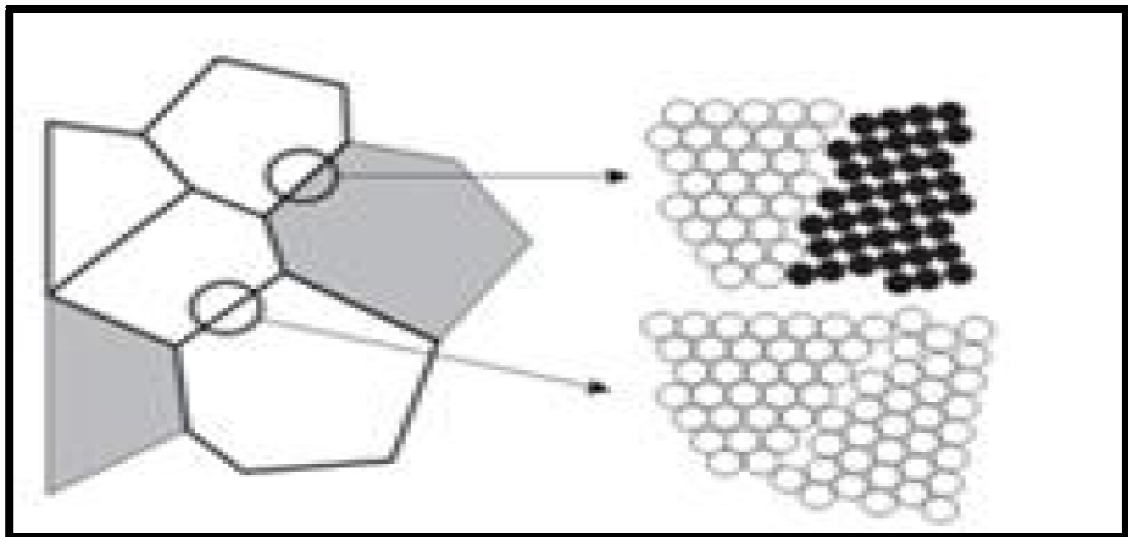


Figure I-6: Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases [3].

4)- Les défauts volumiques

Pore : Cavité fermée à l'intérieur d'un cristal ou d'un poly cristal.

Inclusion : Particule d'un solide de nature différente enrobée dans le solide principal ou matrice.

Précipité : Particule solide de petite taille entièrement enrobée à l'intérieur d'un grain qui constitue sa matrice [3].

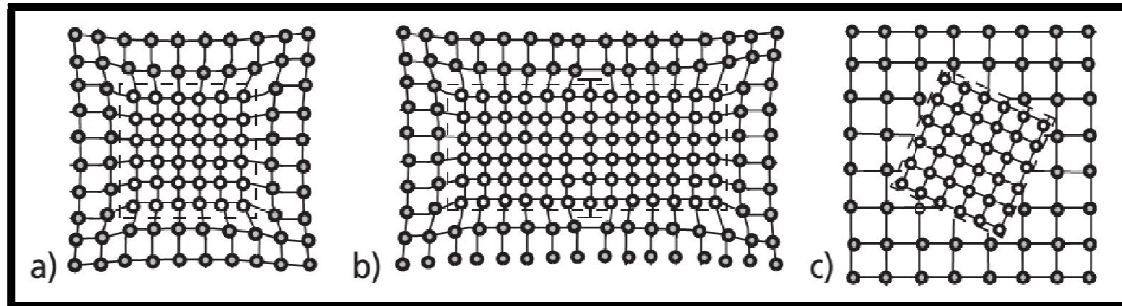


Figure I-7: a) Précipité cohérent. b) Précipité semi-cohérent
c) Précipité incohérent [3].

I.5 La précipitation :

L'apparition d'une seconde phase dans une solution solide sursaturée par précipitation conduit soit à l'apparition d'une phase stable, généralement à une température assez voisine de la température de mise en solution solide du soluté, soit au dépôt de phases intermédiaires métastables, si la réaction se produit à plus basse température.

Après la formation d'un germe stable, la croissance de la nouvelle phase se fait Par adjonction des atomes ou molécules à l'interface qui délimite la phase mère de la phase en formation. Il se produit un flux d'atomes ou de molécules de la phase mère vers la phase en développement. [5].

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés.

Dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés (Figure I-8) [6].

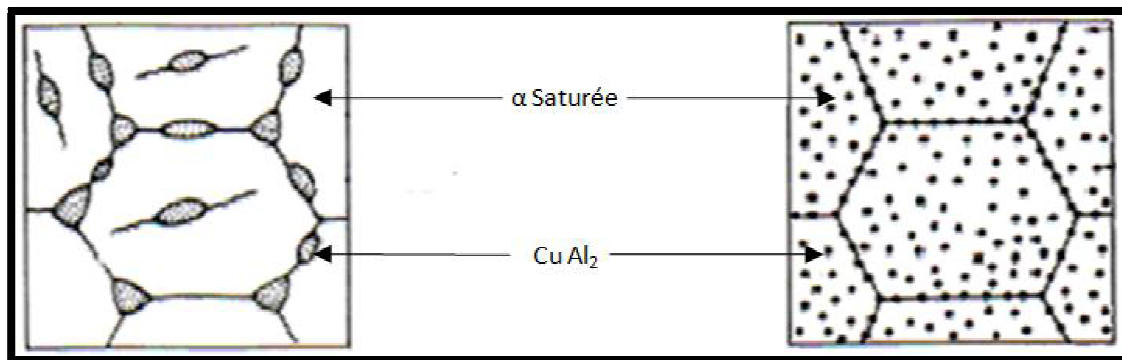


Figure I-8: Microstructures obtenues dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement Lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C [6].

I.6 La microstructure de solidification :

La majorité des microstructures formées lors de la solidification peuvent être groupées en deux catégories :

a- Structures eutectique : caractérisées par la croissance simultanée avec une même interface de deux (ou plusieurs) phases. Cette forme de croissance est appelée croissance couplée.

b- Structures dendritique : caractérisées par la croissance d'une phase sous forme de sapin avec une interface non isotherme.

Les microstructures eutectique et dendritique peuvent apparaître de deux façons (Figure I-9) microstructure colonnaire et microstructure équiaxe .

Pour ce qui est d'un métal pur, la solidification colonnaire conduit toujours à une Surface plane. Si l'on ajoute à ce métal un autre élément, l'interface devient instable et dendrites se forment. Dans le cas de la solidification équiaxe , la formation de dendrites peut être observée aussi bien dans les métaux purs que dans les alliages [7].

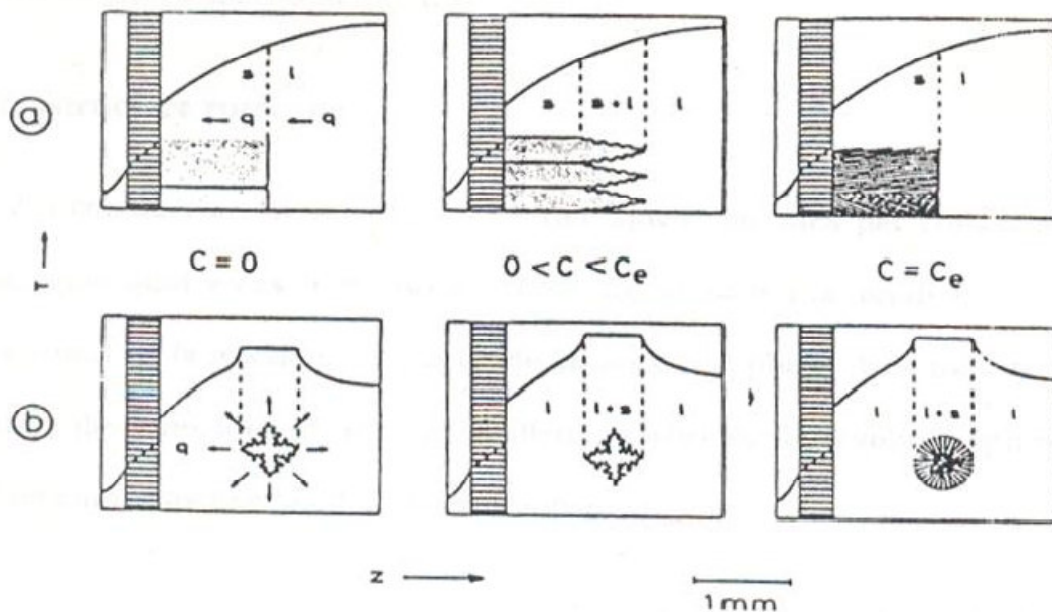


Figure I-9: Microstructure colonnaires (a) et équiaxes (b) [7].

4)- La microstructure eutectique :

En considérant uniquement les eutectique obtenues par croissance couplée, on peut distinguer quatre cas de microstructures (Figure I-10).

La formation de fibres ou de lamelles dépend surtout de la fraction volumique de la deuxième phase. Une fraction faible favorise la formation de fibres à cause de leur meilleur rapport surface/volume qui réduit l'énergie interraciale emmagasinée pendant la croissance.

La nature régulière ou irrégulière de l'eutectique dépend de la cinétique d'attachement lors de la solidification représentée par la valeur de l'énergie de l'entropie de fusion de la deuxième phase [7].

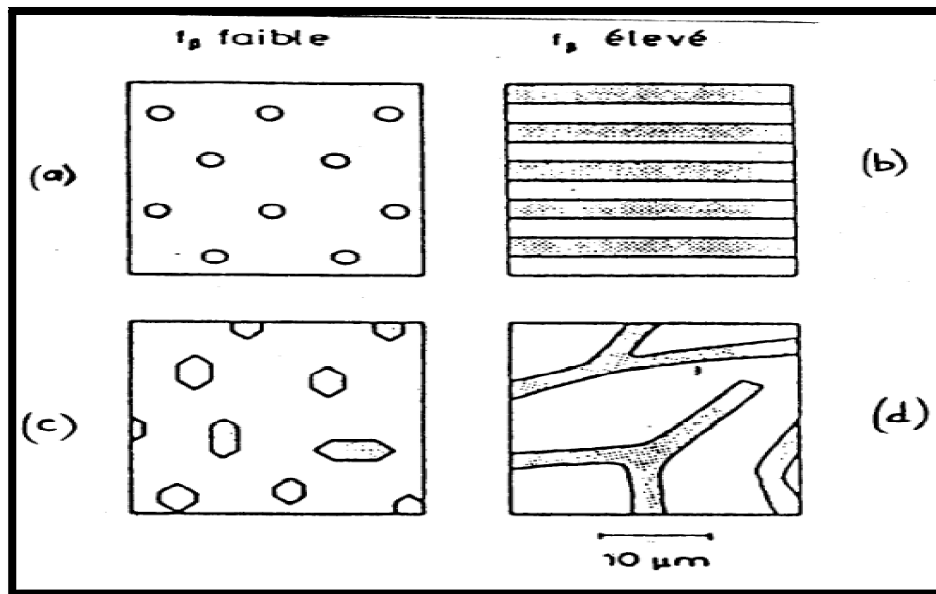


Figure I-10 : Types de morphologie eutectique binaire [7].

2)- La microstructure dendritique :

Les dendrites constituent la morphologie la plus fréquemment rencontrée dans les microstructures de solidification. Même la plus part des alliages eutectique en contiennent. La figure I-11 montre la variation de la fraction solide f_s et de la température entre la pointe des dendrites et la solidification de dernier liquide interdendritique dans la zone colonnaire d'une coulée [7].

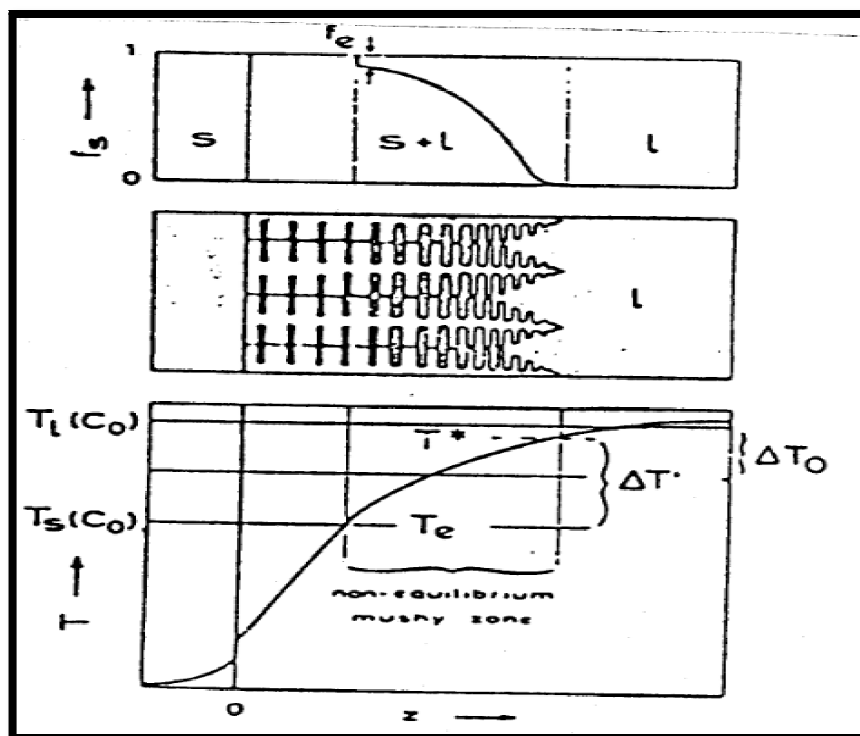


Figure I-11 : Interface solide-liquide dans la zone colonnaire d'une coulée avec distribution de température [7].

A- Croissance dendritique :

La croissance dendritique se produit quand il existe une surfusion en avant du front de solidification. Une des deux causes suivantes peut être à l'origine de cette surfusion : origine thermique ou origine constitutionnelle [7].

B- Morphologie d'une dendrite :

Une dendrite est un monocristal fortement ramifié dont les branches se développent selon des directions cristallographiques simples. La formation de la dendrite passe par les stades suivants (Figure I-12):

- Il apparaît une petite région initiale, la pointe qui se présente sous la forme d'un parabololoïde de révolution.
- Très vite cette pointe devient instable et une perturbation d'espacement initial se développe.
- Les perturbations deviennent des branches secondaires.
- Les perturbations deviennent des branches secondaires.
- Les branches secondaires deviennent à leurs tours instables, formant des branches tertiaires [7].

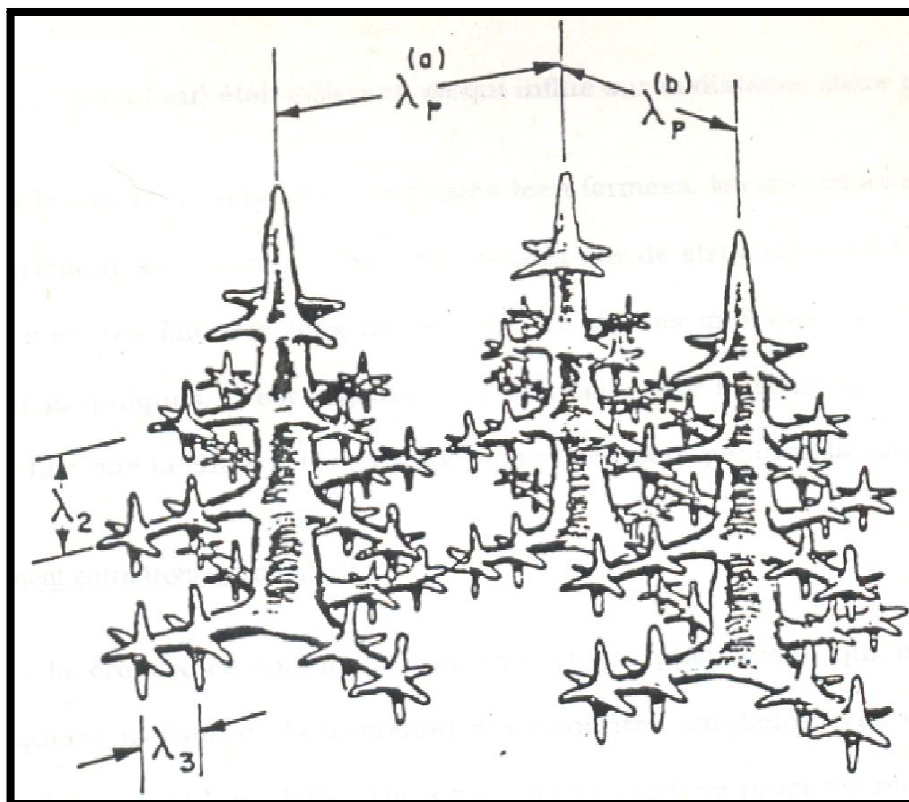


Figure I-12 : Représentation à 3D de dendrites [7].

C- Conditions de croissance des dendrites :

Les conditions de croissance des dendrites équiaxes et colonnaires sont différentes [7]:

- Les structures colonnaires nécessitent toujours un gradient de température macroscopique obtenue par un flux de chaleur unidirectionnel (Figure I-13 a.c). Dans le cas d'une substance pure (Figure I-13 a), il n'y a pas de dendrites. Dans le cas d'un alliage, des dendrites se forment à condition que le gradient de température G soit inférieur au gradient nécessaire pour stabiliser un front plan (sursurfusion constitutionnelle).

Par contre, un alliage eutectique se comporte de façon analogue à un métal pur, avec formation d'un front plan (Figure I-13 c).

- Dans le cas d'une sursurfusion thermique, la croissance dendritique est du type équiaxe, c'est-à-dire, non orientée. Dans ce cas, il y a formation de dendrites dans des substances pures et alliées. (Figure I-13b.d).

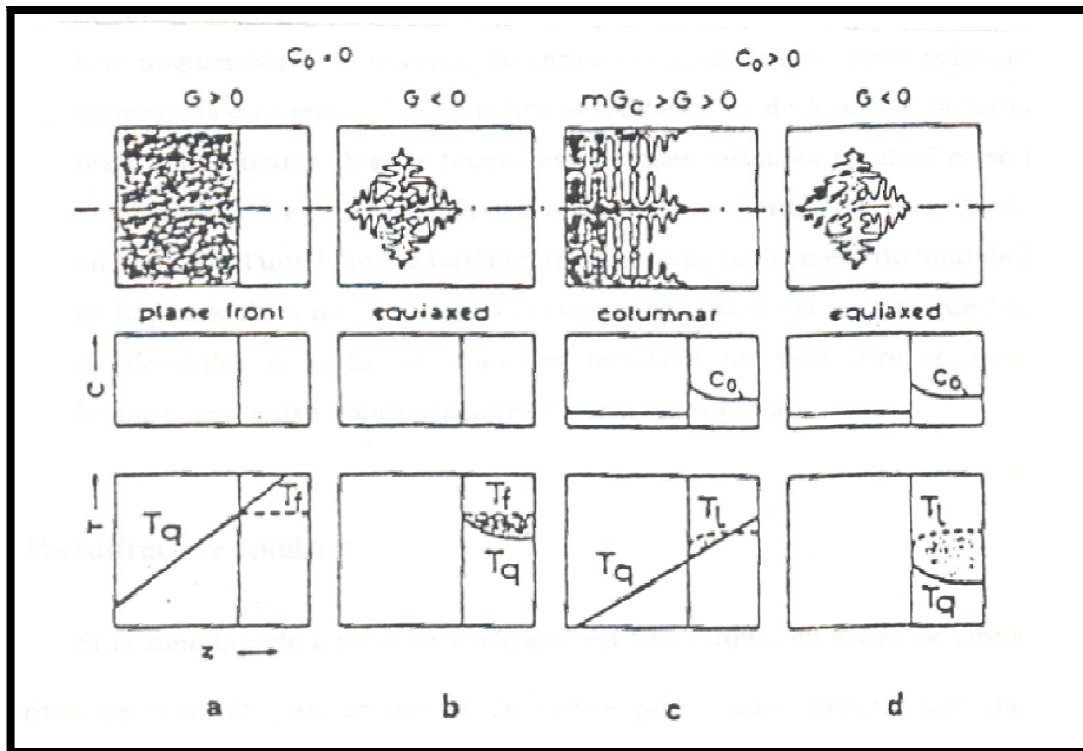


Figure I-13: Condition de croissance d'une dendrite colonnaire et équiaxe [7].

Chapitre II :

La solidification Rapide.

II.1 Introduction :

Le verre a toujours été un élément de développement des techniques. Les verres habituels sont des silicates, à base de silicium et d'oxygène. À la différence des verres d'oxyde classiques constitués de molécules de type SiO_2 , les verres métalliques principalement constitués d'atomes d'éléments métalliques.

Comme les verres classiques, les verres métalliques ne possèdent pas d'ordre à longue distance ou de structure cristalline. Leur structure possède un ordre chimique mais sans périodicité à longue distance, c'est à dire au-delà de deux ou trois distances interatomiques. Étant métalliques, ils ne sont pas transparents à la lumière. Si certaines propriétés des verres métalliques ne ressemblent pas beaucoup à celles des verres d'oxyde, elles sont néanmoins très différentes des métaux cristallins.

En général, quand un liquide est refroidi, atomes et molécules s'organisent en occupant des positions déterminées dans une maille, ce qui donne lieu à la formation de cristaux. Par contre, lors de la vitrification, les atomes du liquide restent dans un état désordonné avec un ordre chimique et topologique à courte distance. La formation d'un verre métallique consiste à refroidir le métal fondu à une vitesse suffisamment rapide pour éviter toute cristallisation [8].

II.2 La Transition vitreuse :

Les cinétiques de germination et de croissance dépendent de la vitesse de diffusion des atomes dans le liquide et finalement, de la vitesse à laquelle les atomes arrivent à l'interface cristal-liquide ; ces vitesses dépendent de la température. À l'équilibre thermodynamique, la solidification a lieu à la température de fusion T_f . Si on augmente suffisamment la vitesse de refroidissement, la cristallisation ne se produit pas et le liquide reste en surfusion pour les températures inférieure à T_f .

Or dans un liquide, au dessous d'une certaine température, les vitesses de diffusion des atomes décroissent de façon exponentielle avec la température. Au dessous de cette température appelée température de transition vitreuse, la configuration des atomes est donc gelée et toute réorganisations n'est que locale ; cette température est comprise entre un tiers et deux tiers de la température de fusion de l'alliage [1].

1)- Aspect cinétique de la vitrification :

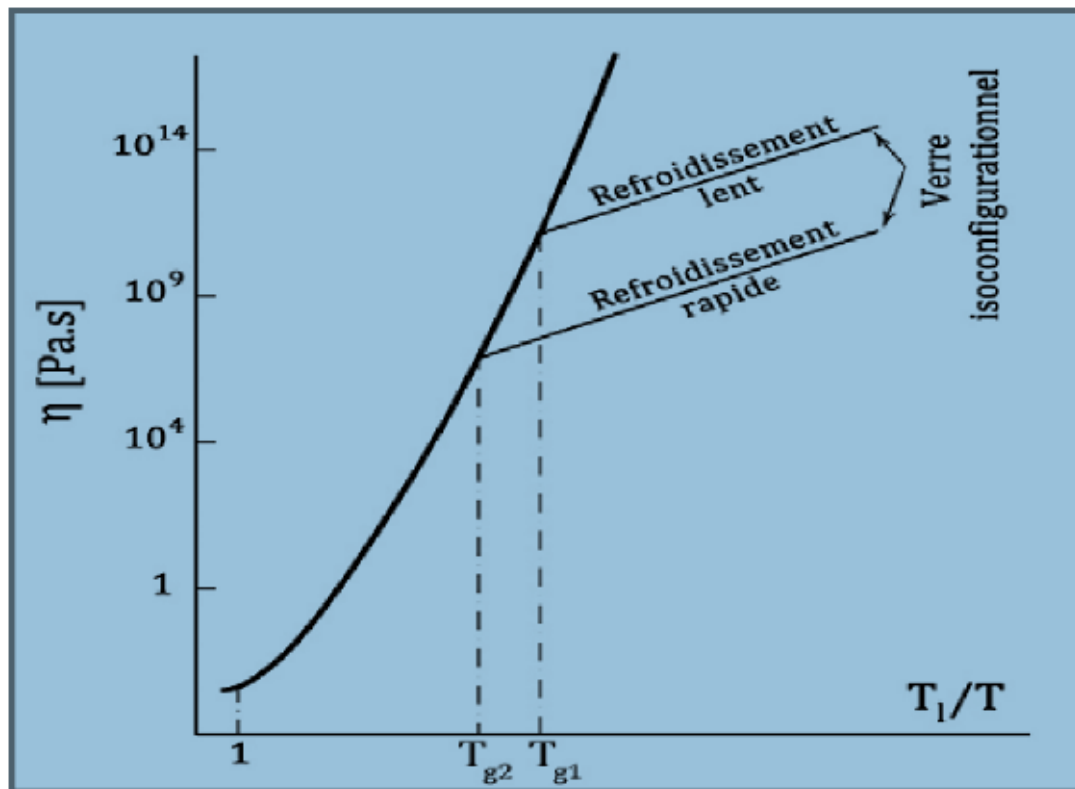


Figure II-1 : La viscosité en fonction de la température réduite lors de la solidification.

Expérimentalement, le paramètre clef de la formation du verre métallique est la viscosité η ou son inverse, la mobilité atomique. Comme le montre le schéma de la figure II-1, à l'état liquide, la viscosité d'un métal a des valeurs inférieures à l'unité. Lorsque l'alliage fondu est trempé pour éviter la cristallisation, la viscosité augmente rapidement en dessous de T_l . À des températures près de T_g , la configuration atomique devient gelée à cause de la haute viscosité qui empêche le réarrangement structural [8].

2)- Aptitude à l'amorphisation : (Glass Forming Ability GFA)

Lors de la cristallisation des liquides amorphisables on observe une variation de volume quasi - nulle, Yavarí a démontré l'importance de la grande compacité de l'alliage liquide pour les cinétiques de l'amorphisation : un petit changement de volume lors de la solidification est une propriété générale des alliages ayant une bonne GFA [8].

Par ailleurs, Desré a évalué l'influence du nombre de constituants sur la cristallisation en calculant la probabilité d'existence de fluctuations de composition nécessaires pour la germination. La probabilité pour que ces fluctuations se produisent est réduite d'un facteur 10 avec l'ajout d'un nouveau constituant [9].

Aussi, Inoue a proposé trois critères pour la formation d'un verre métallique [10]:

- I. L'alliage polyconstitué doit être composé d'au moins trois éléments.
- II. Les principaux éléments doivent avoir une différence de taille atomique au-delà de 12%.
- III. Les principaux éléments doivent avoir une enthalpie de mélange négative.

Ces critères, Bien qu'ils soient empiriques et basés sur un grand nombre de données expérimentales, peuvent être associés à différents aspects théoriques Thermodynamiquement, pour avoir une meilleure GFA, il faut que la transformation liquide-cristal possède une énergie libre motrice faiblement négative. Le deuxième principe de la thermodynamique formule cette énergie par :

$$\Delta G(T) = \Delta H(T) - T\Delta S(T),$$

Ce qui nécessite une enthalpie de fusion ΔH faible et une entropie de fusion ΔS élevée [8].

3)- Affinement de la structure dendritique et granulaire :

Plus la vitesse de solidification est importante, plus les dimensions des dendrites sont petites et plus la structure est fine.

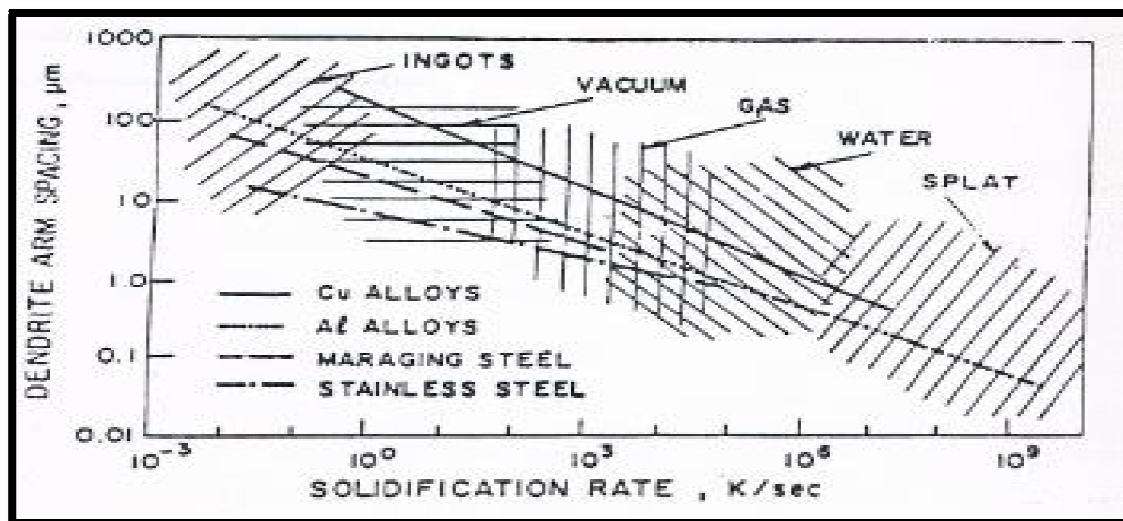


Figure II-2: distance entre bras dendritique en fonction de la vitesse de solidification.

La figure II-2 nous donne une idée des distances inter dendritique en fonction de la vitesse de solidification pour différents alliages et formes .

II.3 Techniques d'élaboration des alliages métalliques SR :

1)- Elaboration par la méthode : (Liqui-Sol)

A- Méthode du Melt-Spining :

C'est la méthode de l'hypertrempe la plus utilisée dans les laboratoires du fait de sa simplicité de mise en œuvre. Le jet liquide est projeté, à basse pression contre la surface externe d'un tambour en cuivre tournant avec une vitesse bien connue soit avec une seule roue (Figure II-3a), ou avec double roue (Figure II-3 b)[11], mais ce procédé possède un inconvénient, à l'impact du jet il se forme une petite boule de liquide ou flaque (puddle) en équilibre sur le substrat mobile, qui est responsable de nombreuse instabilité rendant impossible l'obtention de rubans larges et uniformes. Les paramètres expérimentaux agissant sur la morphologie du ruban et sur la vitesse de trempe sont bien connus. L'épaisseur du ruban augmente avec la pression d'éjection et diminue avec la vitesse de substrat. La largeur dépend du flux de liquide introduit, c'est à dire de la pression et du diamètre de la buse. L'inclinaison du jet sur la surface agit sur la morphologie du ruban et sur la vitesse de trempe.

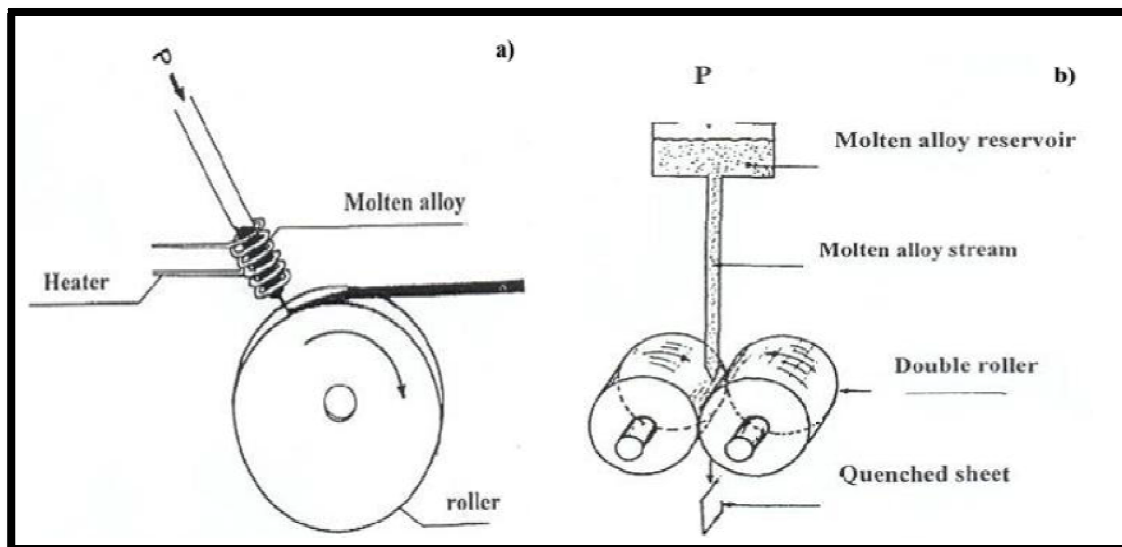


Figure II-3: Méthode de melt-spining a) avec une roue b) avec deux roues [1].

L'équipement et technique de la méthode « melt-spinnig», présente la sélection de la roue et du creuset, en général le matériau de creuset est basé sur la compatibilité chimique avec l'alliage fondu, sa résistance à la température, sa résistance au choc thermique, basse conductivité thermique, le matériau de la roue doit avoir une bonne conductivité thermique. Ainsi que les méthodes de chauffage, de mesure de la température, nature de gaz d'éjection et atmosphère de la chambre.

En général la roue est en cuivre, mais en acier dans le cas des alliages à base de fer. La largeur de la roue varie entre 7 à 10mm et de diamètre entre 150 et 250 mm.

La vitesse linéaire moyenne de la roue entre 16 et 36 m/s, et pour certains cas pour former l'état amorphe la vitesse atteint 50 m/s.

Le gaz d'éjection en général est l'argon et dans quelques expériences l'éjection se fait par gaz He, avec une pression variant entre 0.3 et 2 bar. Le creuset en quartz avec un diamètre de la buse de 0.5 à 1.5 mm, et une distance buse roue entre 0.15 à 5 mm.

B- Méthode du Splat Cooling :

Le principe consiste à écraser une goutte liquide entre deux plaques métalliques en cuivre ou à projeter celle-ci à grande vitesse sur une plaque métallique. On bénéficie ainsi d'un bon contact thermique pour les échanges de chaleur qui sont aussi favorisés par une valeur très grande du rapport surface volume. [1].

On peut écraser suivant différents modes:

- Soit projeter la goutte sur un substrat très conducteur ou à l'intérieur d'un cylindre venant à la rencontre du jet,
- soit écraser la goutte entre un marteau et une enclume.

Les ordres de grandeurs des vitesses vont de 105 à 108 k/s. L'échantillon produit à une surface de l'ordre de centimètre carré et une épaisseur de quelques dizaines de micromètres [1].

C- Méthode du Melt-drag :

Dans cette méthode, les roulements doivent tirer le métal contre le travail de la gravité à la présence de la force de rotation. Les deux roues ayant même diamètre, les roulements ont été orientés tels que leur point de contact se trouve au dessous de la piscine, et le jet liquide s'échappe à la paroi latérale du réservoir et forme le ruban au contact du tambour (Figure II-4) [12].

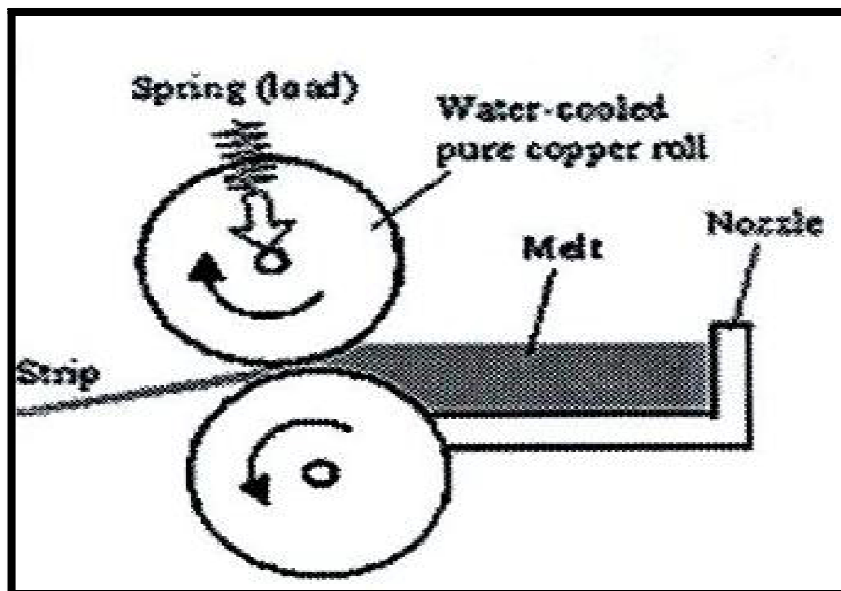


Figure II -4: Schéma représentatif de la technique de melt drag [1]

D- Méthodes de laminoirs : (doubles rouleaux)

Une veine de métal liquide est dirigée entre deux cylindres d'un laminoir. L'écart entre les rouleaux doit être faible ($\sim 0.1\text{mm}$), et le débit de liquide bien contrôlé. Par certains aspects cette technique est intéressante puisque le refroidissement est symétrique (Figure II-5). Cependant le ruban quitte rapidement les rouleaux et reste longtemps à haute température ce qui favorise les conditions de solidification. L'avantage de cette méthode par rapport aux autres méthodes est qu'elle présente une uniformité dans l'épaisseur [1].

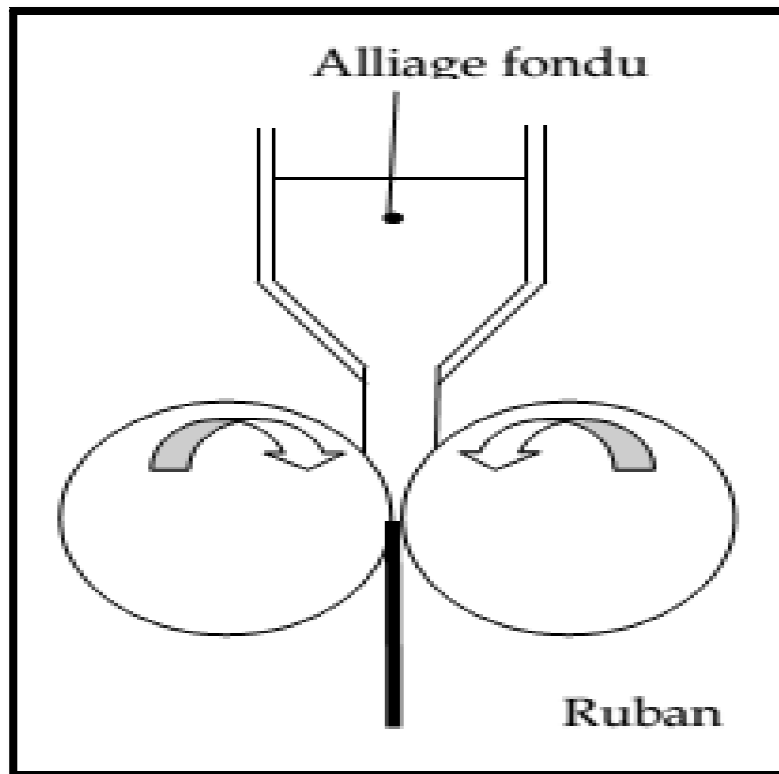


Figure II -5 : Solidification rapide des rubans entre cylindres de laminoir [1].

E- Méthode à effet centrifuge :

La centrifugation, encore appelée coulée sous pression centrifuge est une technique de coulée basée sur les propriétés physiques de la force centrifuge. En faisant effectuer au moule en sable ou à l'intérieur d'un cylindre métallique tournant à grande vitesse avec une rotation autour d'un axe vertical ou horizontal, le métal acquiert les propriétés physiques supplémentaires suivantes par rapport à la coulée gravité classique [1]:

- Grande homogénéité du métal dans l'ensemble de la pièce,
- Possibilité d'homogénéiser deux alliages métalliques de manière à ce que la pièce possède les propriétés physiques des deux alliages à la fois.

F- Méthode du melt- extraction :

Un disque vient toucher la surface du bain liquide et entraîne le ruban. Cette méthode est utilisée pour la production des fils métalliques amorphes.

Par cette technique, il est possible de préciser les conditions d'extraction, et la morphologie, la stabilité thermique et la résistance mécanique, ainsi que les propriétés mécaniques des alliages sous forme de fils métalliques. Le fil obtenu est de diamètre variant entre 20 et 100 μm et de longueur autour de 10 m [1].

G- Méthode de flot planaire :

Ce procédé est à l'origine d'un développement industriel de la trempe rapide. Le principe de la méthode est issu de celui de melt-spinning avec pour différence essentielle que l'orifice cylindrique à l'extrémité de la buse est remplacé par une fente de quelques dixièmes de millimètres de largeur mais dont la longueur peut atteindre plusieurs centimètres, et l'écoulement de jet liquide est planaire sur le tambour rotatif. La buse placée à une distance du tambour inférieur à 1mm, la flaque liquide est alors bloquée entre le substrat et le nez de la buse ce qui élimine les instabilités que l'on observe en melt spinning et assurant ainsi largeur et uniformité aux rubans [1].

H- Solidification rapide de poudre métallique : (atomisation centrifuge)

Plusieurs techniques de production des alliages solidifiés rapidement sont sous forme de poudre métallique (atomisation par gaz inerte, centrifuge, spinning électrode).

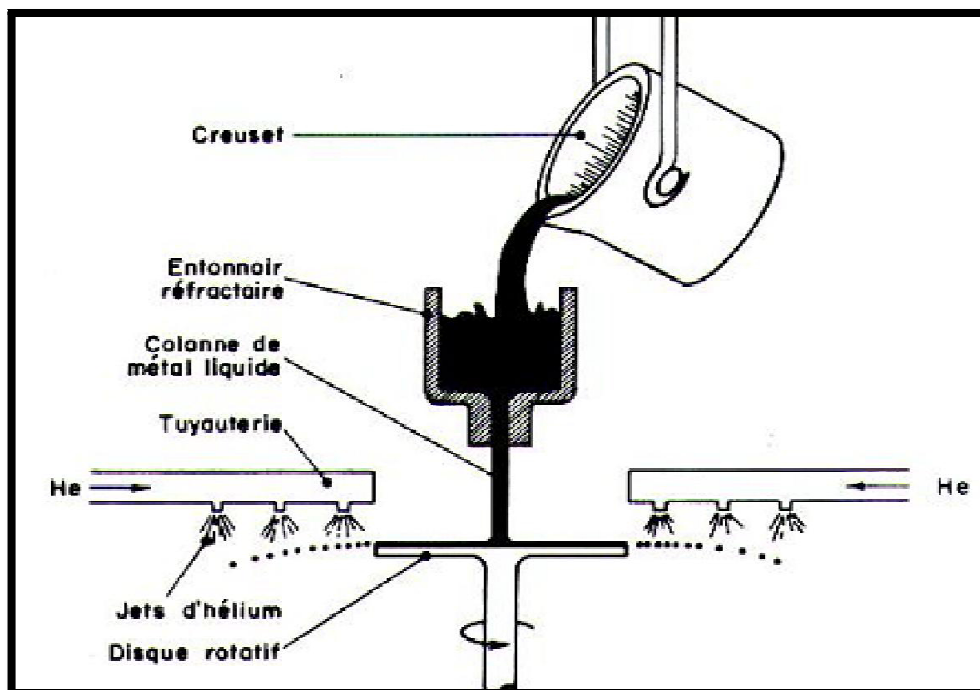


Figure II-7: Représentation schématique de la méthode de l'atomisation par l'effet Centrifuge [13].

La méthode d'atomisation utilisée pour préparer les alliages à base d'Al solidifiés rapidement, dont le liquide tombe sur un disque rotatoire à grande vitesse (4500tr/s), avec une pression normale de gaz d'hélium, sont consolidés par extrusion(FigureII-6). Ce procédé permet de produire des poudres microcristallines à faible ségrégation à des taux de refroidissement de l'ordre de 10^5 °K/s [13].

II.4 Propriétés et applications des verres métalliques :

1)- Propriétés chimiques :

La particularité de l'homogénéité chimique et de l'absence des joints de grains dans les alliages métalliques amorphes dote ces alliages d'une résistance élevée à la corrosion. Cette qualité rajoutée à une haute dureté constitue une combinaison de propriétés très intéressantes dans un métal avec des applications potentielles des verres métalliques dans le domaine biomédical [8].

2)- Propriétés électriques :

La résistivité des matériaux amorphes est plus élevée que celle des matériaux cristallins et plus proche de celle des métaux liquide. À la température ambiante, les valeurs sont généralement de l'ordre de 100-300 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (10 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ pour le fer pur). Cela est attribué à la diffusion des électrons de conduction par les atomes dans la structure désordonnée.

L'exploitation de la résistivité importante des verres métalliques permet son assemblage par effet Joule sans cristallisation [14]. Ce procédé est prometteur au niveau industriel en permettant la réalisation de formes complexes .

3)- Propriétés magnétiques :

En absence des joints de grains et de précipités et avec une anisotropie magnétique très réduite (des perméabilités élevées), ces matériaux soumis à des champs magnétiques alternatifs produisent des pertes faibles et sont utilisés comme circuits magnétiques dans de nombreuses applications [15]. Ce ferromagnétisme doux fait que ces verres métalliques sont également très utilisés comme capteurs ultrasensibles.

4)- Propriétés mécaniques :

Il est maintenant établi que les verres métalliques possèdent une combinaison unique de très haute résistance mécanique et de dureté élevée due à une forte élasticité de l'ordre de 2%.

La disponibilité des données sur les propriétés mécaniques des verres métalliques a permis à Ashby et Greer [16] de les inclure dans la construction des cartes de sélection couvrant plus de 1500 types de matériaux, et de comparer quantitativement leurs propriétés basées sur différents indices de performance d'Ashby. Ils montrent que les verres métalliques occupent des positions bien distinctes comme on le voit sur la figure II-7. Nous pouvons retenir de cette carte que les verres métalliques sont les matériaux qui se rapprochent le plus de leurs limites de la résistance théorique ($\mu/30$ où μ est le module de cisaillement) [17].

Chapitre III :

Aluminium et ces alliages.

III.1 Introduction :

En 1854 la première apparition de l'aluminium 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.

1886: invention du 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.

III.2- Obtention de l'aluminium :

1)- La bauxite :

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

2)- L'alumine :

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

3)- L'aluminium :

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.[18]

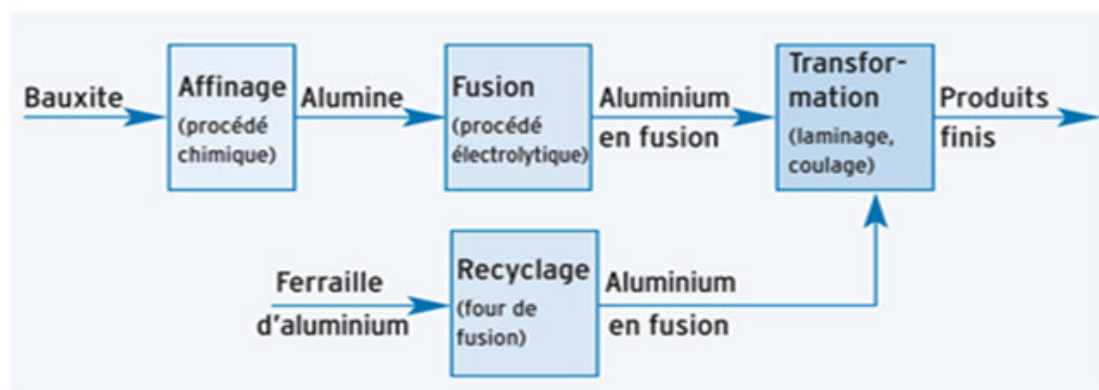


Figure II-1: Série d'extraction de l'aluminium

III.3 L'aluminium :

L'aluminium est un métal de couleur blanche argent d'une structure de type cubique à faces centrées très malléable, son classement dans le tableau de Mendeleïev est dans le groupe IIIA, période 3, bloc P. Son symbole chimique est Al [18] .

1)- Principales propriétés :

- bon conducteur de chaleur et d'électricité
- faible masse volumique : $2,7 \text{ kg/cm}^3$
- point de fusion : 658°C
- faible module d'Young : 70000 N/mm^2
- le coefficient de rigidité par unité de masse est sensiblement égal à celui de l'acier
- faible limite élastique
- fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)

La résistance à la corrosion est bonne à condition que la couche d'alumine soit formée car ensuite elle empêche la corrosion de pénétrer dans l'aluminium. Par contre, l'association avec un métal plus électropositif (acier, alliages de cuivre) détruit la couche d'alumine qui ne peut donc plus protéger l'aluminium.[18]

2)- Emploi :

L'emploi de l'aluminium est surtout motivé par sa faible masse volumique (le tiers de celle de l'acier et du cuivre). C'est un matériau qui se moule bien. Il est aussi utilisé dans l'industrie électrique grâce à sa bonne conductibilité (677 % de celle du cuivre). L'aluminium est employé aussi comme isolant thermique.[18]

3)- Caractéristiques de l'aluminium :

A)- Caractéristiques mécaniques :

	Coulé	laminé recuit
Résistance traction N/mm^2	70 à 100	70 à 90
limite app d'elast. N/mm^2	30 à 40	30 à 40
Allongement %	15 à 25	40 à 30
Dureté Brinell	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité N/mm^2	67500	67500

Tableau III -1 : Représente certaines caractéristique a l'état laminé recuits et coulé.

L'allongement à l'état recuit (amélioré à chaud) permet d'utiliser les procédés de laminage, forgeage. La pureté du métal joue un rôle essentiel car plus le métal est pur, plus la dureté, la charge à la rupture diminuent alors que l'allongement augmente. D'où l'emploi d'éléments d'alliage dans l'aluminium. Cette pureté améliore considérablement la résistance chimique du matériau.

B)- Caractéristiques physiques :

Le matériau est solide dans son état ordinaire, de masse volumique $\rho = 2,6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ son point de fusion $T_f = 660,323 \text{ }^\circ\text{C}$ possédant une énergie de $10,79 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, et un point d'ébullition $T = 2519 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité, sa conductivité électrique $\sigma = 37,7 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ et sa conductivité thermique $\lambda = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [19].

- Un coefficient de dilatation:

* $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

* $\alpha = 25,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

* $\alpha = 28,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $600 \text{ }^\circ\text{C}$ [18].

C)- Caractéristiques chimiques :

La position de l'aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ($E^\circ \text{Al}/\text{Al}^{3+} = -1,66 \text{ V}/\text{ENH}$), ce qui pourrait faire craindre une grande corrodabilité.

Cette grande réactivité implique une très forte affinité pour l'oxygène, ce qui fait que l'aluminium se recouvre d'une pellicule très dure et adhérente d'oxyde Al_2O_3 qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'aluminium de s'auto-protéger en se passivant [18].

D)- Caractéristiques atomiques :

L'aluminium cristallise dans une structure cubique à faces centrées ($a = 4,05 \text{ \AA}$). C'est un métal léger de masse atomique M de 26,98, son rayon de covalence et de Van.

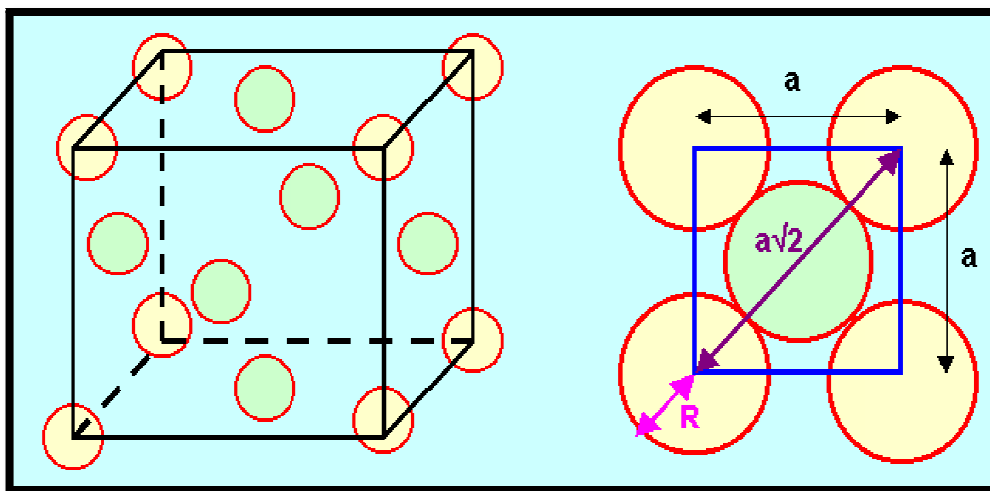


Figure II-2 : la maille CFC de l'aluminium

Les rayons de Van der Waals sont respectivement $1,21 \text{ \AA}$ et 205 pm . Le principal isotope est Al stable comprenant 14 neutrons et 13 protons [18].

III.4 Alliages d'aluminium :

- Nous examinerons successivement [18]:
- 1)- **Les alliages de corroyage** : la mise en forme du métal s'effectue, dans ce cas, par laminage, filage et forgeage.
- 2)- **Les alliages de fonderie** : la mise en forme du métal s'effectue par le moulage.

III.5 Désignation des alliages d'aluminium :

1)- Les Alliages de corroyage :

B)- Désignation numérique :

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre W qui représente les produits corroyés
- quatre chiffres représentant la composition chimique :
- **1er chiffre** : indique le groupe d'alliage selon le tableau ci dessous :

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium non allié
2	Aluminium - cuivre
3	Aluminium - manganèse
4	Aluminium - silicium
5	Aluminium - magnésium
6	Aluminium - magnésium - silicium
7	Aluminium - zinc
8	Autres alliages d'aluminium

- **2ème chiffre** : pour le groupe 1 : le pourcentage de certaines impureté
- **3ème et 4ème chiffres** : indiquent pour le groupe 1 le pourcentage d'aluminium au-delà de 99% et pour les autres groupes, l'identification de l'alliages.

* **Alliages aluminium-cuivre :**

- Le cuivre améliore les caractéristiques mécaniques, l'usinabilité, la forgeabilité et la résistance au fluage, mais il réduit la soudabilité et la résistance à la corrosion.
- Exemple : Alliage 2618A.

* **Alliages aluminium-manganèse :**

- Le manganèse allié à l'Al permet d'obtenir une bonne résistance à la corrosion et une bonne aptitude à l'emboutissage.
- Exemple : Alliage 3003.

* **Alliages aluminium-magnésium :**

- Très bonne résistance à la corrosion, bonne soudabilité et bonne usinabilité, aptitude à l'anodisation.
- Exemple: Alliage 5005.

*** Alliages aluminium-magnésium-silicium (AGS) :**

- Ce sont les alliages de filage par excellence, pour tous les types de profilés d'usage courant avec ou sans anodisation.

Exemple : Alliage 6060.

*** Alliages aluminium-zinc :**

- Ces alliages ont les meilleures caractéristiques mécaniques et sont très employés dans l'aéronautique. Ils doivent être protégés contre la corrosion.

- Exemple : Alliage 7075.

III.6 Désignation des alliages de moulage :

A)- Désignation numérique :

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- cinq chiffres représentant la composition chimique :
 - 2 premiers indiquent le groupe d'alliage
 - 3 derniers indiquent la composition chimique.

Exemple : EN AC-21000 : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane.

B)- Désignation symbolique :

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci.

Exemple : EN AC-AlCu4MgTi : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane

C)- Anciennes normes de désignation :

Les alliages d'aluminium de fonderie sont encore souvent désignés par leurs anciennes normes.

D)- Composition chimique :

La désignation est alphanumérique

- Cas des aluminium non alliés :

A suivie d'un indice de pureté chimique représenté par un chiffre dont la valeur augmente avec la pureté

Exemple : A4 = aluminium de pureté $\geq 99,0\%$

A5 = aluminium de pureté $\geq 99,5\%$

- Cas des alliages:

A suivie du symbole des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes

-Etat de livraison

La lettre Y qui signifie alliage moulé est suivie de deux chiffres:

- le premier chiffre indique le mode de moulage
 - 2: moulage en sable
 - 3: moulage en coquille
 - 4: moulage sous pression
 - 8: moulage par centrifugation
 - 9: moulage suivant prescriptions
- le deuxième chiffre indique le traitement thermique
 - 0: pas de traitement
 - 1: recuit
 - 3: mis en solution, trempé revenu
 - 4: mis en solution, trempé et mûri
 - 5: stabilisé
 - 9: suivant prescription

Exemple: A-U5GT-Y24

Alliage de moulage contenant 5% de cuivre, du magnésium et du titane, moulé en sable, mis en solution, trempé et mûri.

III.7 Influence des éléments d'addition :

1)- Silicium « Si » :

- Diminue de manière significative la contraction volumétrique à la solidification.
- Diminue le retrait à l'état solide et le coefficient de dilatation.
- Augmente la dureté et la résistance à l'usure (tribologie).
- Améliore la coulabilité de l'aluminium " chaleur latente (enthalpie) de fusion".
- Forme avec l'aluminium un mélange eutectique (12,6 % Si – 578 °C) [1].

2)- Cuivre « Cu » :

- Diminue la contraction volumétrique mais beaucoup moins que le Si.
- Augmente la dureté de l'aluminium à la température ambiante et aux températures élevées (seuil 200 °C).
- Permet le durcissement structural.
- Augmente la sensibilité à la corrosion atmosphérique marine et sous tension (il existe des concentrations « seuils »).
- Forme avec l'aluminium une solution solide et un eutectique (33% Cu, $T_f=548,2^{\circ}\text{C}$).
- Les alliages industriels contiennent entre 2 et 10 % de cuivre [1].

3)- Magnésium « Mg » :

- Diminue légèrement la contraction volumétrique à la solidification.
- Les alliages Al-Mg sont insensibles à la corrosion atmosphérique et marine.
- Ajouté en faible quantité (0,20 à 0,60 %) aux alliages contenant du silicium favorise le durcissement structural.

- Forme avec l'aluminium une solution solide (α Al).
- Les alliages industriels contiennent entre 3 et 6 % de magnésium.
- Les alliages formés, possèdent une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, lorsqu'avec l'aluminium, il s'avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leur poli à cause de la haute résistance chimique [1].

III.8 Alliage Aluminium-Silicium : Al-Si

Sur le diagramme d'état (Figure III. 3). On voit que l'intervalle de solidification de l'alliage 5% Si est de 50°C environ, ce qui prédispose peu aux microstructures.

Ce type d'alliages est par conséquent peu sensible au criquage à chaud [1].

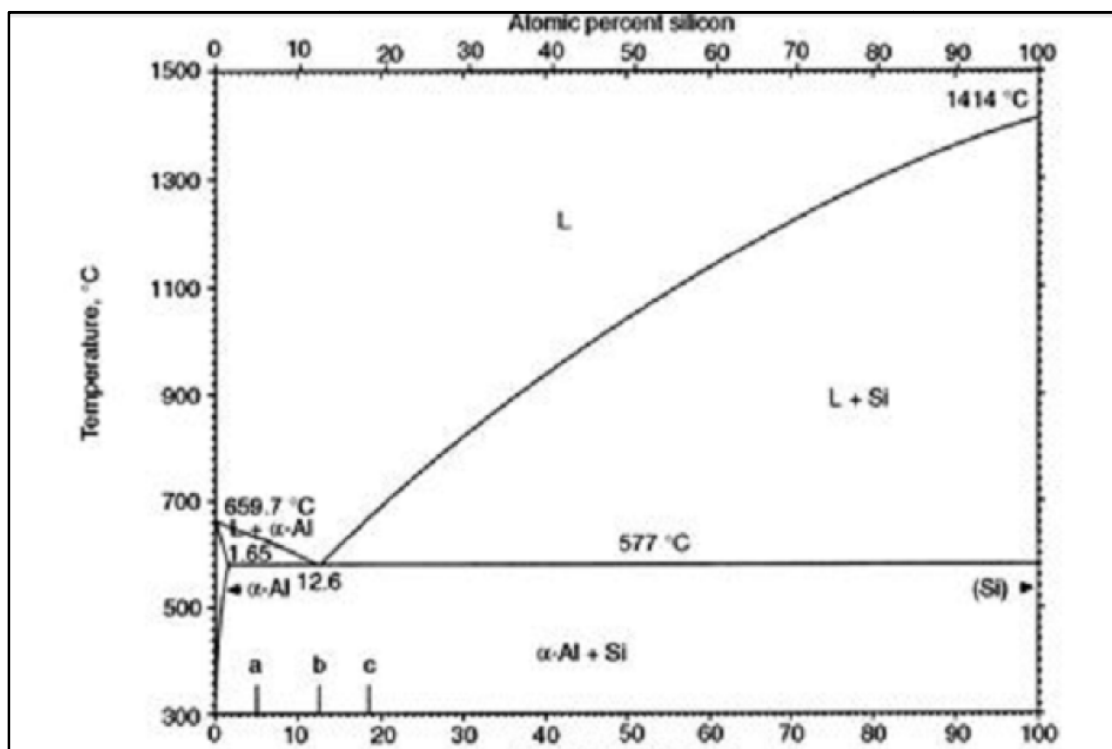


Figure III -3 : Diagramme d'équilibre Al-Si [1].

Les alliages d'aluminium contenant du silicium comme le principal élément d'alliages offrent une excellente coulabilité, une haute résistance à l'usure et à la corrosion, une bonne soudabilité, une bonne usinabilité, une bonne résistance au déchirement à chaud, une bonne fluidité, une faible densité, une haute conductivité thermique, la réduction de la dilatation thermique (de silicium), et une bonne conservation des propriétés physiques et mécaniques à des températures élevées.

En conséquence, l'aluminium-silicium constitue de 85 % à 90 % du total des pièces moulées en aluminium produit [18].

III.9 Solidification rapide des alliages d'aluminium :

1)- Structures des alliages d'aluminium SR :

- Les alliages d'aluminium solidifiés rapidement peuvent se classer en général en trois groupes [10]:

** Les alliages de premier groupe :*

- Haute solidité et résistance à la corrosion élevée, basse densité, bonnes résistances mécaniques. Ils contiennent un élément d'addition ou plus. Ces types d'alliages sont préparés usuellement par atomisation.

** Les alliages de second groupe :*

- Sont basés au lithium additionné avec d'autres éléments tels que le cuivre, magnésium et zirconium.

** Les alliages du troisième groupe :*

- Consistent à l'addition de deux ou plus d'éléments insolubles, tels que métal de transition et les éléments de terre rare. Les alliages binaires d'aluminium amorphisables par la technique de trempe sur rouleau comportent de l'aluminium et une terre rare (yttrium, cérium ou lanthane) sont peux nombreux.

- La plupart des compositions amorphisables comportent au moins trois éléments. Ceci correspond bien l'idée intuitive que plus les espèces sont nombreuses, plus les structures sont complexes, favorables au désordre et plus facilement amorphisables. Ainsi les verres métalliques sont-ils de compositions très différentes de celles des alliages commerciaux à base d'aluminium.

- Les trois classes d'alliages amorphisables ternaires incluent en plus de l'aluminium :

* Soit un élément de transition de la droite du tableau de Mendeleïev (Cu, Ni, Fe, Mn ou Cr) et un métalloïde (Si ou Ge).

* Soit un élément de transition de la droite du tableau de Mendeleïev (Cu, Co, Ni ou Fe) et un élément à gauche du tableau (Ti, Zr, Hf, V, Nb ou Mo).

* Soit une terre rare et un élément de la droite de tableau de Mendeleïev.

- Les teneurs minimales en éléments d'addition sont de l'ordre de 10 pour cent en l'absence de métalloïde et de 20 pour cent quand un métalloïde est présent [18].

2)- Structure amorphe des alliages d'aluminium :

Les verres métalliques à base d'aluminium on fait l'objet de beaucoup de recherches à travers le monde du fait de leurs excellentes propriétés mécaniques. Ces propriétés mécaniques peuvent devenir meilleures s'il est possible d'obtenir une structure biphasée constituée d'une précipitation de nano-cristaux d'Al (diamètre entre 10 et 100 nm) à partir de la matrice amorphe mère par traitement thermique de vitrification.

Il a été observé que les compositions les plus amorphisables sont celles élaborées à partir des systèmes ternaires Al-Ni-TR (TR : Terres rares, Y, Ce, Yb, Sm...) dans ce contexte, et à cause des épaisseurs réduites obtenues lors de l'élaboration des verres métalliques à base d'aluminium, les recherches ont été focalisées sur les propriétés tribologiques, avec comme but de rendre attractif l'utilisation de ces matériaux

amorphes et nano-structurés comme revêtement de protection par la combinaison d'une bonne dureté et d'une bonne résistance à l'usure [18] .

3)- Propriétés des verres d'aluminium :

- Les recherches d'application visent à valoriser des propriétés originales des verres d'aluminium sous la forme de produits minces (rubans, fils), des revêtements de surface ou de produit massifs.
- Le ruban directement obtenu par solidification rapide présente un ensemble de propriétés de résistance mécanique, de ductilité et de résistance à la corrosion adaptés au renfort d'autres matériaux composites.

A)- Propriétés mécaniques :

- Beaucoup de rubans amorphes à base d'aluminium se brisent en morceaux très fins à la moindre déformation: on les dit fragiles. Cependant, pour certaines compositions riches en aluminium, il est possible de plier le ruban à 180 degrés sans le rompre, auquel cas on le dit ductile. Cette fragilité est expliquée par l'ordre local relevé dans le verre à base d'aluminium.

- La mesure de la résistance à la traction des verres d'aluminium atteint des valeurs très élevées. Dans les alliages Al87Ni5Y8, ces valeurs sont deux fois plus élevées que celles des meilleurs alliages commerciaux.

- La dureté peut prendre des valeurs très différentes suivant la taille, la nature de La distribution des différents constituants [19]. Ils présentent aussi une bonne tenue à la fatigue et une résistance à la traction élevée. Les propriétés mécaniques des alliages amorphes dépendant cependant fortement du domaine de température où les essais sont réalisés [18].

B)- Propriétés électriques :

- Bien que les verres métalliques aient en générale une forte densité d'électrons de conduction, leur comportement électrique est assez différent du micro-cristallisé correspondant. Tous désordre perturbe le trajet des électrons est correspond à une augmentation de la résistance électrique: l'amorphe est plus résistif que le cristal de même composition.

- La résistance électrique augmente fortement avec la température dans l'alliage cristallin, par un effet de distorsion du réseau; dans un verre, la température modifie la densité d'électrons de conduction et la résistance électrique augmente ou diminue selon les alliages; cette variation est très faible que dans le cas de l'alliage cristallin correspondant [24].

C)- Propriétés chimique :

Les verres métalliques à base d'aluminium présentent une résistance à la corrosion bien supérieure à celles relevées sur des alliages d'aluminium classiques [23] , ce qui peut être attribué à l'homogénéité chimique et à l'absence de précipités ou de phases secondaires et de défauts structuraux (joints de grains, dislocations, défauts d'empilement...) qui constituent des emplacements préférentiels pour une attaque corrosive [23].

Chapitre IV :

Technique Expérimentale.

IV.1 Introduction :

Notre objectif dans ce travail est basé sur la réalisation est l'obtention des vitesses de refroidissement de plus en plus élevées pour alliages industriels Al-Si avec différentes teneur en Si. On réalise deux types de solidifications:

*La solidification lente : Cette étape consiste à élaborer des échantillons en Al-Si par le moulage en sable pour obtenir les échantillons alliages Al-Si.

*La solidification rapide : On utilise dans cette étape le procédé de melt –spining

Après la réalisation des deux types de solidification on fait une comparaison entre les caractéristiques mécanique des alliages AL-Si avec des différents teneur en Si, obtenue par deux types de solidification précédentes.

IV.2 Matériaux utilisés :

Pour réaliser cette expérience on a choisis quatre alliages d'AL-Si différents, hypo-eutectique, hyper-eutectique .Dans ce travail la solidification est fait par la méthode Melt-spining, le tableau ci-dessous représente la composition chimique des quatre alliages.

IV.3 Procédures et techniques d'analyses :

1)- La solidification classique par fonderie : (moulage en sable)

Cette méthode consiste à couler l'alliage brut de coulé (des lingots normalisés) fondu dans un moule en sable pour reproduire des pièces cylindrique bien dimensionnées destinées au polissage .

	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Sn	Pb	Ti	Co
AS7	≤ 0.50	6.5 à 7.5	≤ 0.10	0.2 à 0.40	≤ 0.50	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.05	0.1 à 0.20	≤ 0.20
AS10G	≤0.50	10 à 10.5	≤ 0.1	≤ 0.5	≤0.30	≤0.15	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.15	≤ 0.20
AS13	≤0.70	11 à 13.50	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.30	≤ 0.15	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.15	≤ 0.20
AS22	≤0.6	22	0.1	0.1	0.30	0.15	0.05	0.10	0.15	0.20

Tableau IV -1 : Représente la composition chimique des lingot d'aluminium.

Les lingots sont fournis de Mr Daouadji (Atelier d'aéronautique) et Mr HAKIM (Atelier d'usinage .faculté de génie mécanique, U. de Blida) .La composition chimique des lingots est mentionné dans le tableau ci-dessus .

Les étapes de moulage en sable

Le moulage en sable se réalise suivant ces étapes :

- Préparation du sable.
- La fusion des matériaux.
- Le noyautage.
- Le moulage.
- Le remmoulage.
- La coulée (avant cette opération on ajoute un décrassant puis un affinant)



Figure IV-1: Représente les étapes de la coulée des alliages Al-si.

Les éprouvettes finale sont des barres cylindrique de 13 cm de longueur et diamètre $D=1.2$ mm.



Figure IV--2 : représente le produit final après le moulage en sable.

2)- La solidification rapide par La méthode Melt-spining :

Cette méthode consiste à refroidir le métal fondu dans un creuset à partir d'un système attribué d'une roue qui tourne avec une vitesse de 3000t/min pour obtenir Des échantillons sous forme des rubans solidifiés rapidement .

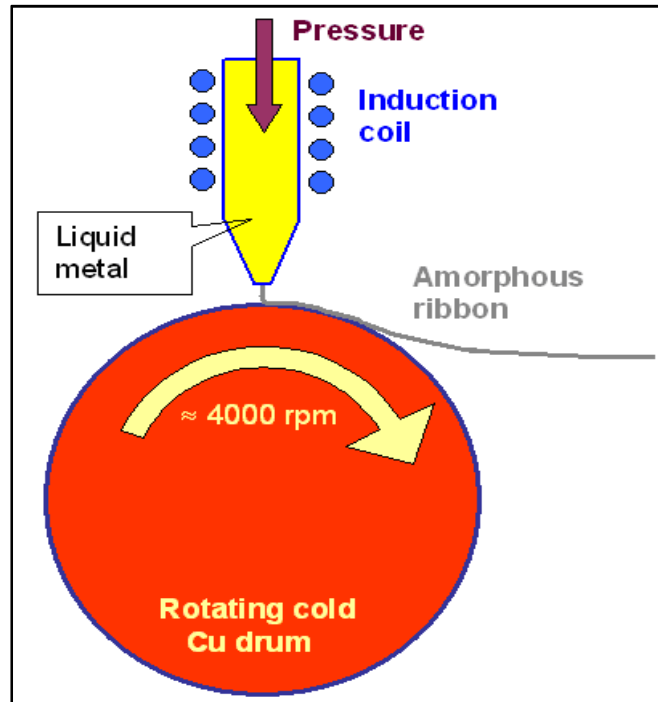


Figure IV -3 : Schémas représentant le procédé du Mélt-spining.

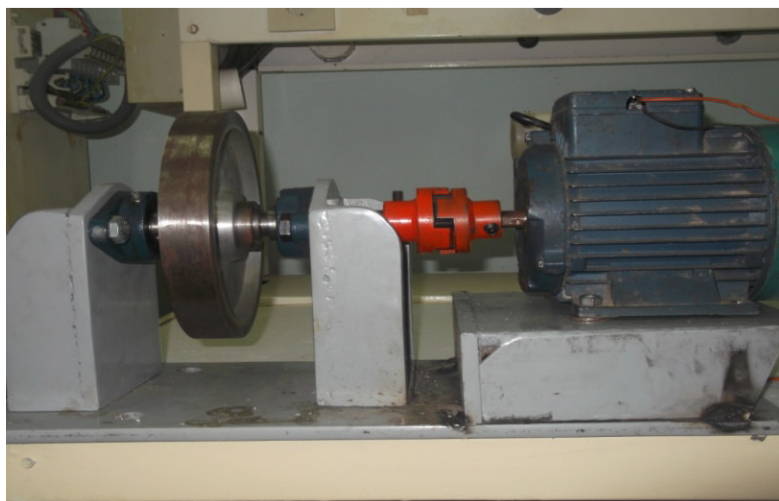


Figure IV-4 : Représente le coté roue-moteur de la machine de « Melt-spining ».

Après l'exécution de procédé « Melt-spining » on obtient des échantillon sous forme des petits rubans du 1cm du longueur, 4 mm de largeur et 1 mm d'épaisseur, destinés a la préparation de surface (enrobage, polissage...etc) et puis au microscope optique pour voir les microstructures.

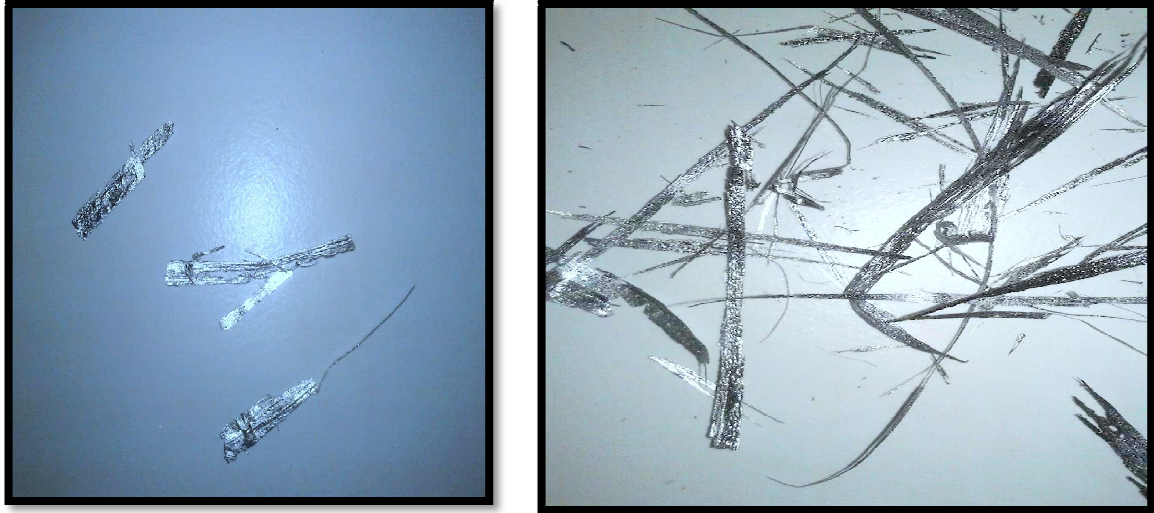


Figure IV-5 :Représente les rubans

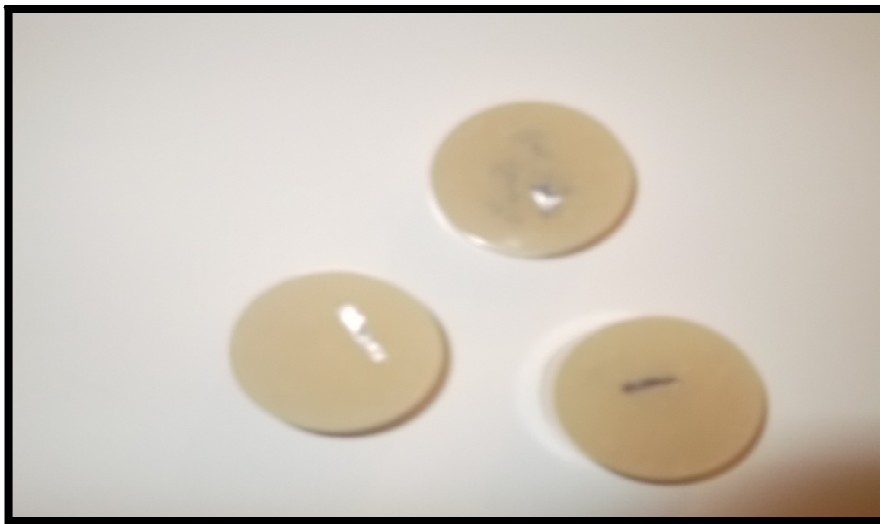


Figure IV-6 : L'enrobage des ruban.

3)- La Métallographie :

La métallographie est une technique qui est basée sur l'observation de la microstructure d'un échantillon en utilisant un microscope optique ou électronique.

L'utilité de microscope optique ,et sa capacité d'obtenir une bonne résolution des surfaces exprime une information globale sur la microstructure des échantillons.

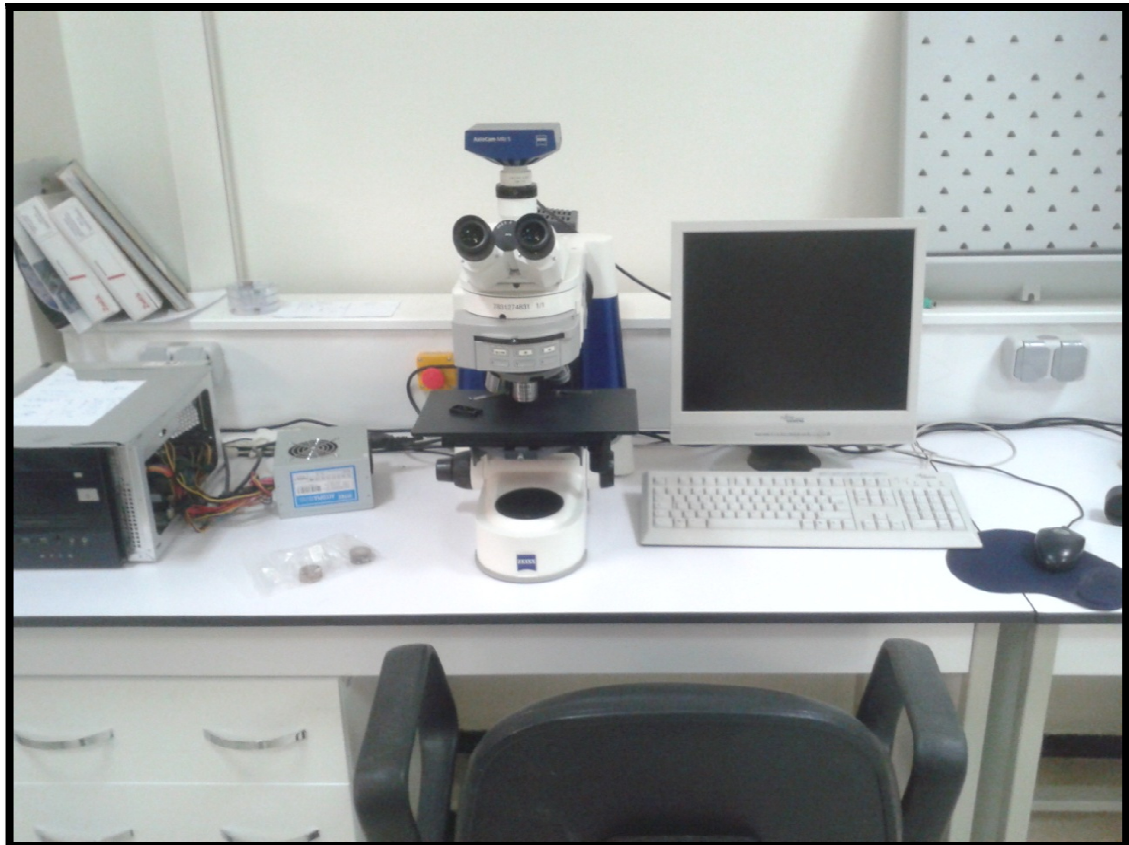


Figure IV -7 : microscope optique Carl Zeiss .

Avant l'observation des échantillons par le microscope, pour préparer la surface il faut suivre les étapes ci-dessous :

****Le polissage***

Le polissage mécanique permet de faciliter l'observation des microstructures à l'aide de microscope optique. avant le polissage les échantillons à observer (cylindrique obtenues par fonderie, rubans obtenues par melt- spinning) sont coupés et enrobés.

L'objectif de polissage mécanique c'est de rendre les surface polis et planes et enlever toutes les rayures, les graisses et tout particule qui gênent.

Cette opération consiste de passer les surfaces échantillons par un papier abrasif d'une granulométrie de plus en plus faible commençant avec P400 jusqu'au P2000 avec un arrosage de l'eau pour éliminer le risque d'échauffement des échantillons.



Figure IV -8 : Représente la polisseuse mécanique.

Le polissage finition fait avec une solution aqueuse d'alumine jusqu'à la dispersion des raies et l'obtention d'une surface miroir.

Un nettoyage des surface avec l'eau distillé puis un séchage a un flux d'air donc la surfaces est prête pour la métallographie

****L'attaque chimique***

Le but de l'attaque métallographique est de créer un contraste révélant la microstructure du matériau lorsque celle-ci n'apparaît pas après le polissage Dans notre travail on a utilisé le Hf (Hydrofluoric acid 40% laboratory reagent) , le temps d'attaque est 10 sec.



Figure IV-9 : Représente des échantillon attaqué chimiquement.

***Détermination de la vitesse de solidification.**

Il s'agit de calculer la distance inter-dendritique entre les branches secondaire, pour cela on a utilisé une lentille quadrillé placé au microscope optique de 1 mm^2 .

Après avoir déterminé la distance « $\lambda (\mu\text{m})$ », il suffit ensuite d'utiliser l'abaque de (la figure II-2) et lire directement la vitesse de solidification ($^\circ\text{C}/\text{s}$).

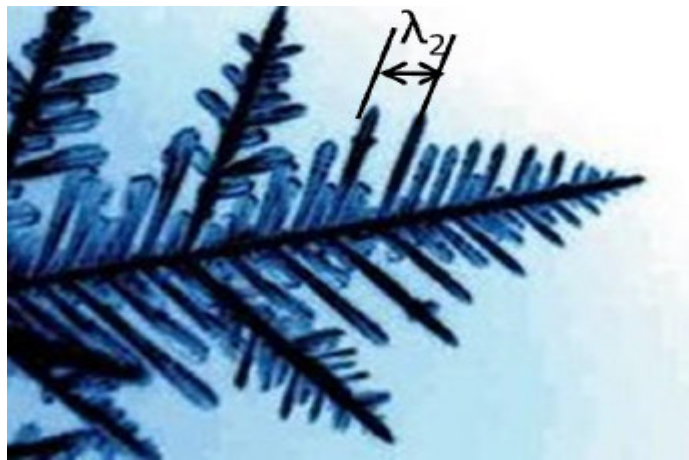


Figure IV -10 : distance inter-branche secondaire λ .

4)- La diffraction (DRX) :

La cristallographie aux rayons X ou diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour (*X-ray diffraction*)) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique .

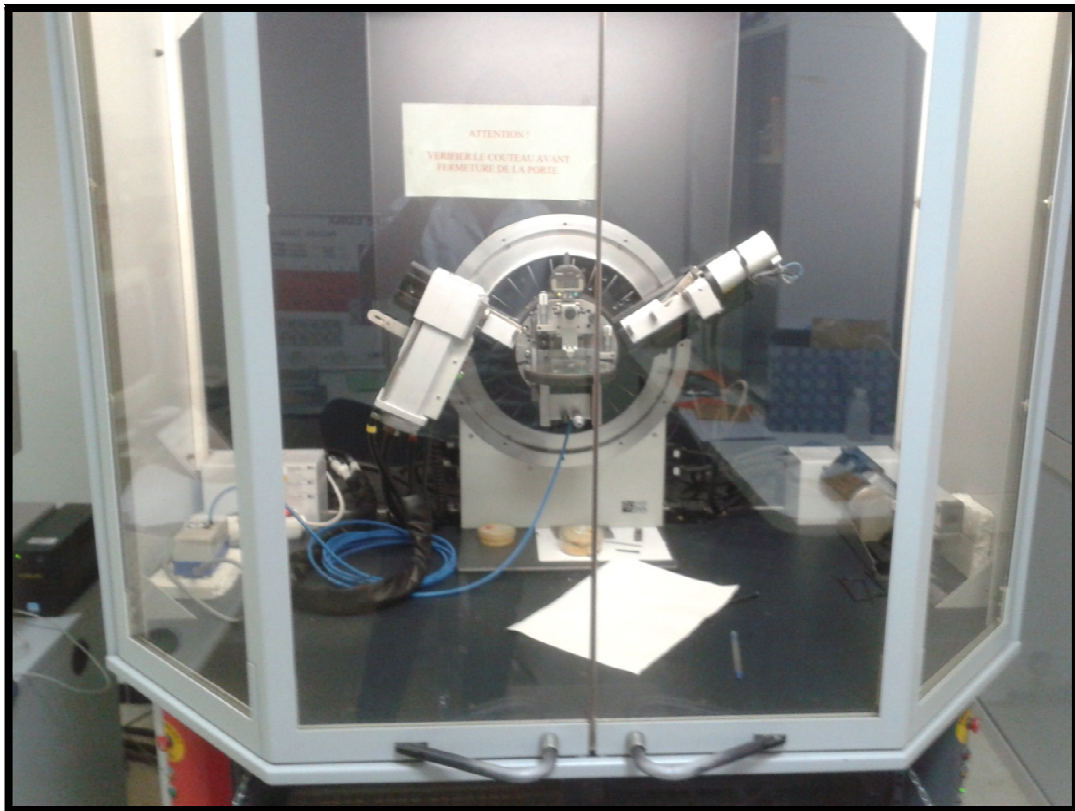


Figure IV -11 : Représente le diffractomètre a rayon X (DRX)

Principe de L'essais :

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations.

5)- L'essai de microdureté :

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinel) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.



Figure IV -12 : Le microduromètre à différentes indenteur (vickers ,Brinel).

Les échantillon (les rubans obtenues par le melt-spinning, les échantillons obtenues par fonderie) sont destinés au polissage, on réalise l'essais de microdureté Vickers.

Chapitre V :

Interprétation des résultats.

V.1 Interprétations des structures métallographiques :

1)- Interprétation des alliages obtenues par (moulage en sable) :

Al-Si 7% :



Figure V-1 :AS7 (100x)

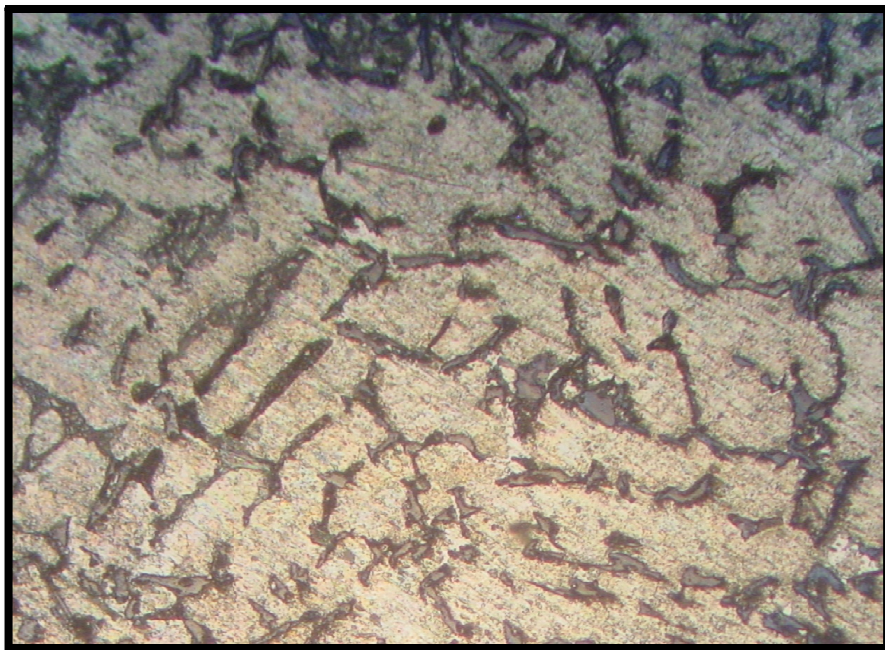


Figure V-2 : AS7(200x).

AS10 G :

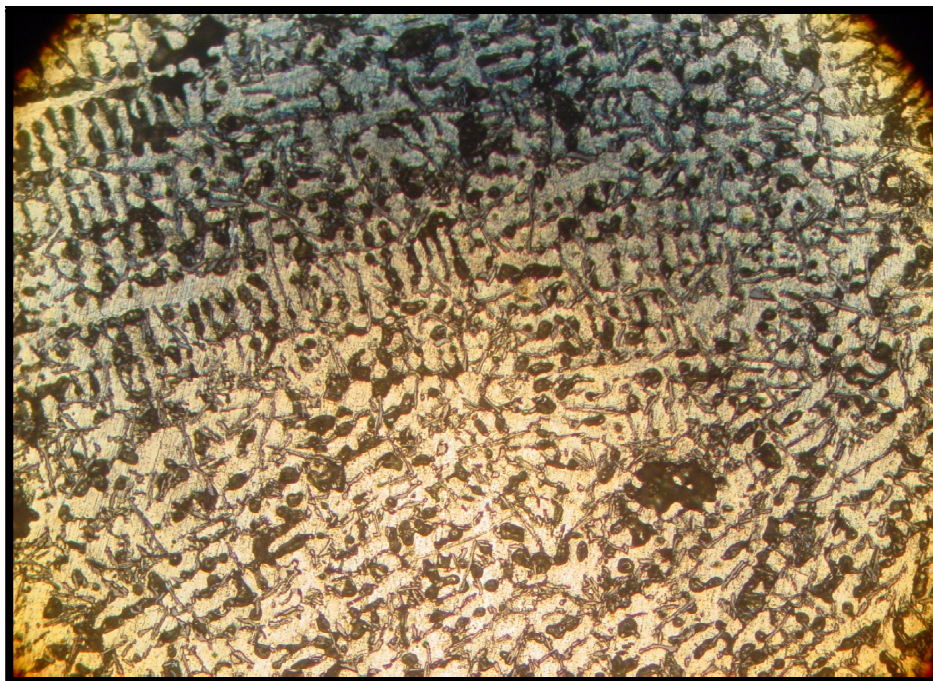


Figure V-3 :AS10G (100x)

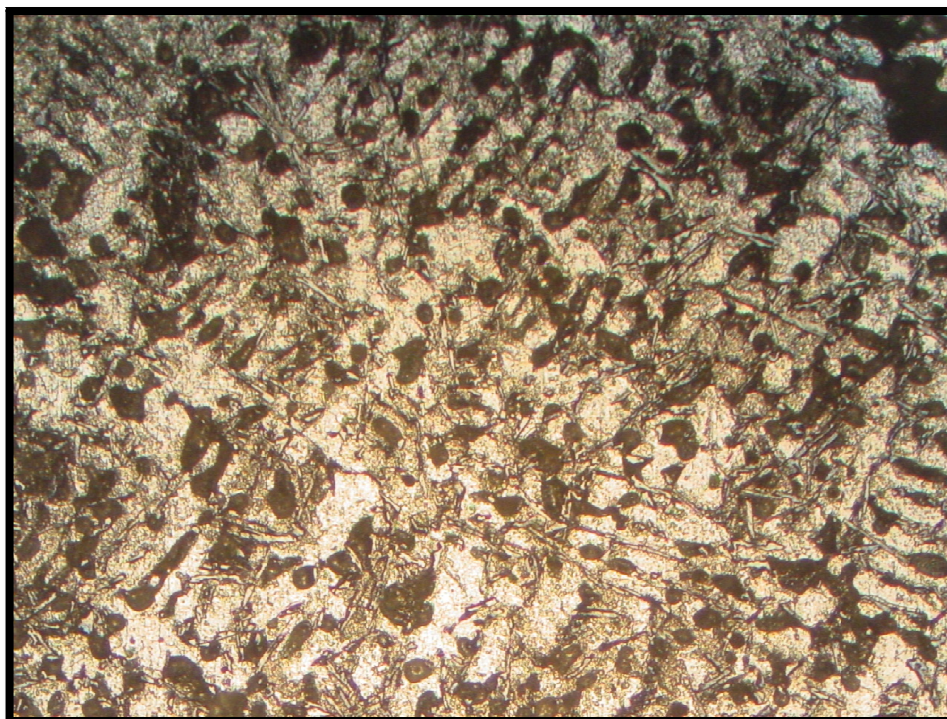


Figure V-4: AS10G (200x)

AS13 (200x) :

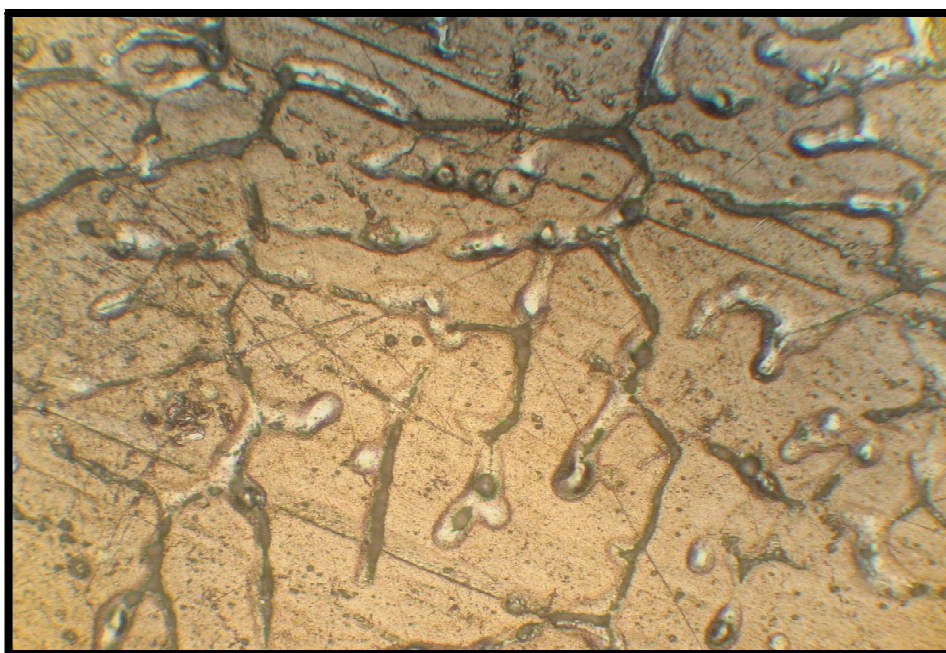


Figure V -5 : AS13 (200x).

AS13 (100x) :

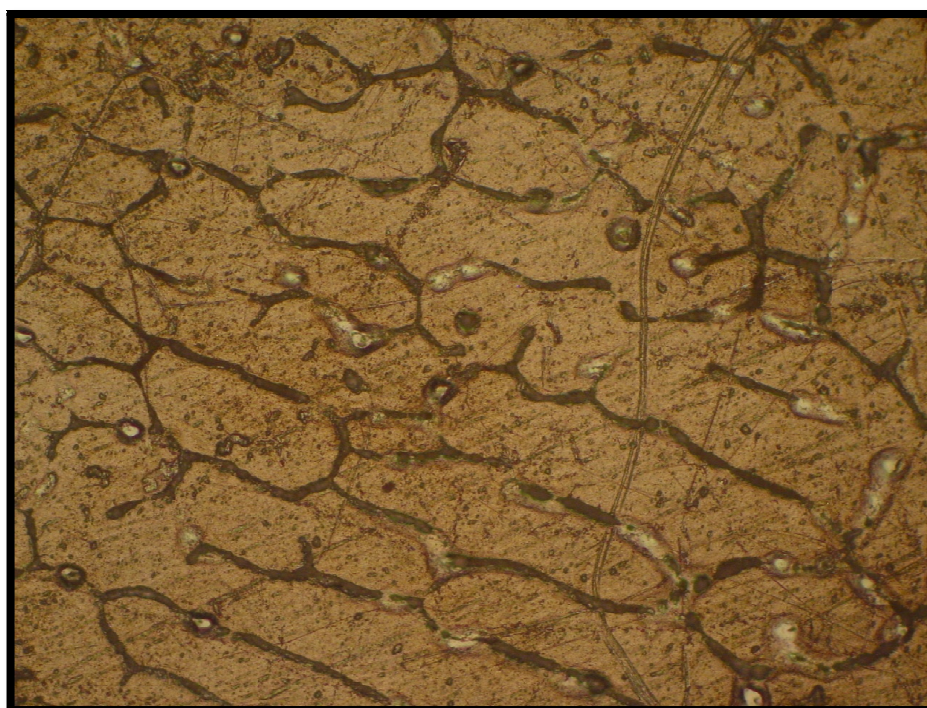


Figure V-6: AS13 (100x).

AS22 (100x) :

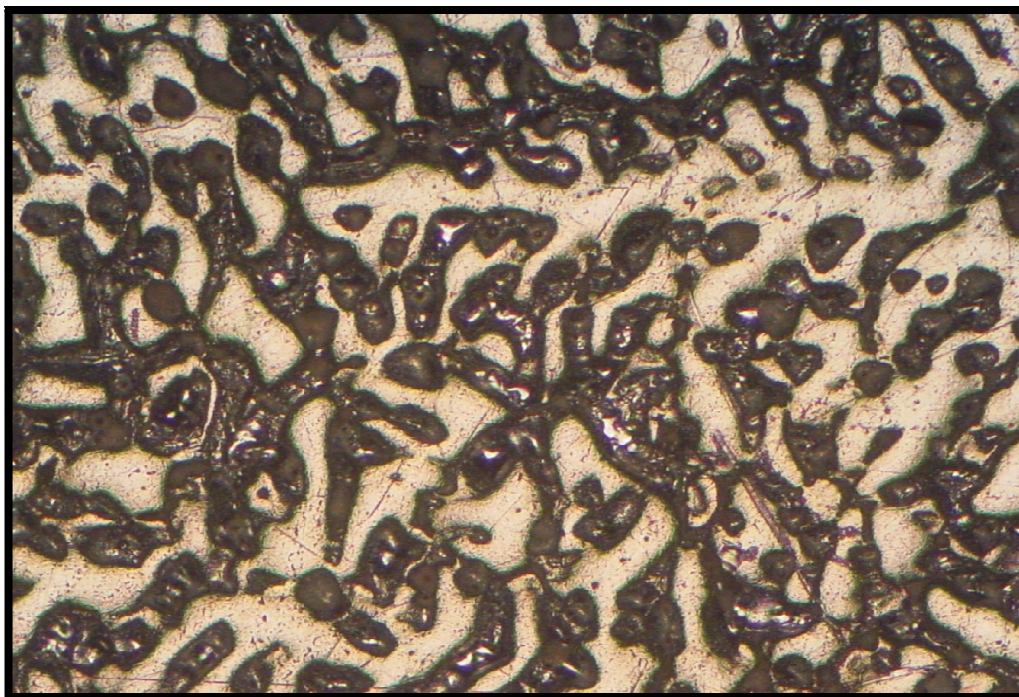


Figure V-7 : AS22 (100x).

AS22 (200x) :

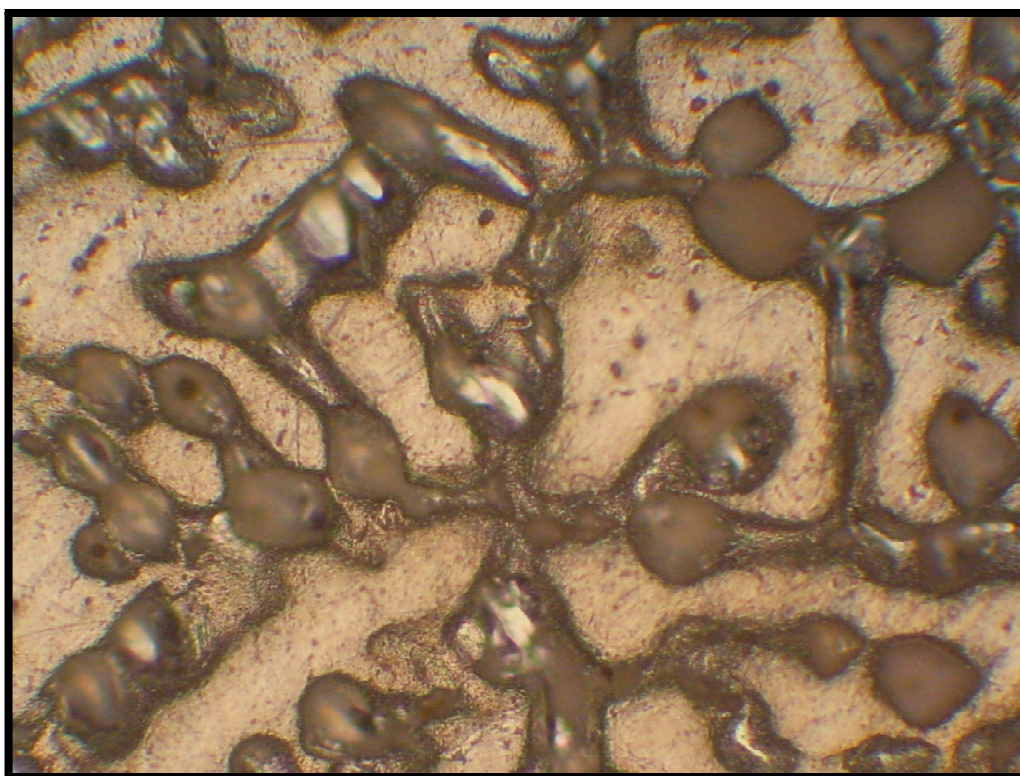


Figure V-8 : AS22 (200x).

D'après ces résultats des alliages de différentes teneur en Si, on remarque que les métallographies montrent une structure dendritique colonnaire (AS7 et AS10G) ainsi que la coalescence du silicium donnant lieu à des structures grossières en arborescence (AS13 et AS22).

2)- Interprétation métallographique des alliages obtenus : « Melt-spining »

Comme les échantillons obtenus sont sous formes des rubans, nous observons les microstructures suivant la largeur et de l'épaisseur en deux zones :

*Suivant l'épaisseur :

- (A) au contact de la roue
- (B) au contact de l'air.

AS22(2000x) :

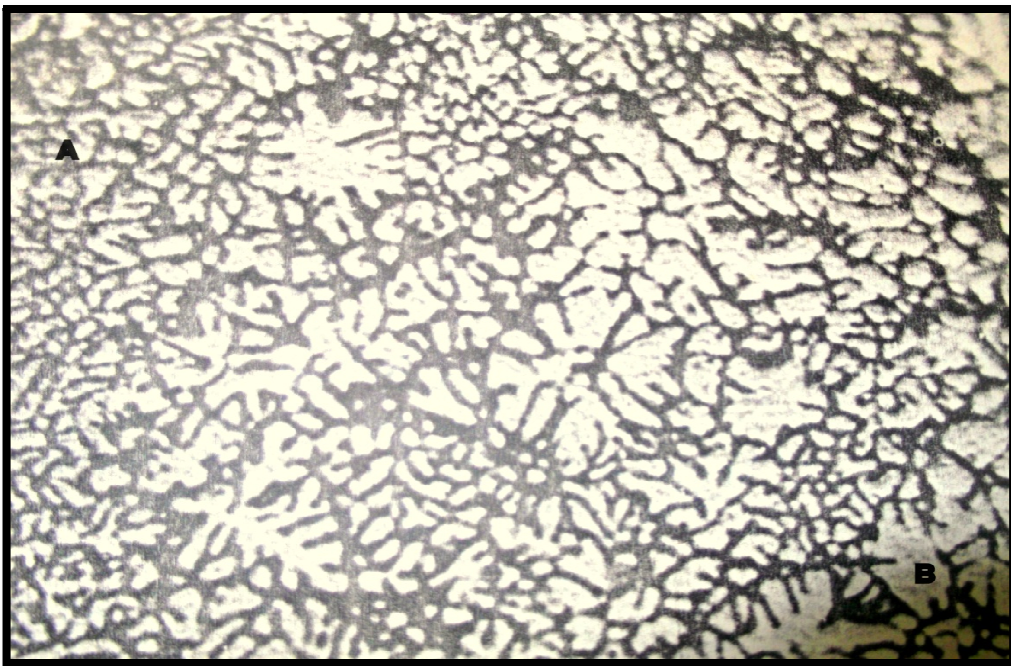


Figure V-9: AS13 (2000 x).

AS13 (x2000) :

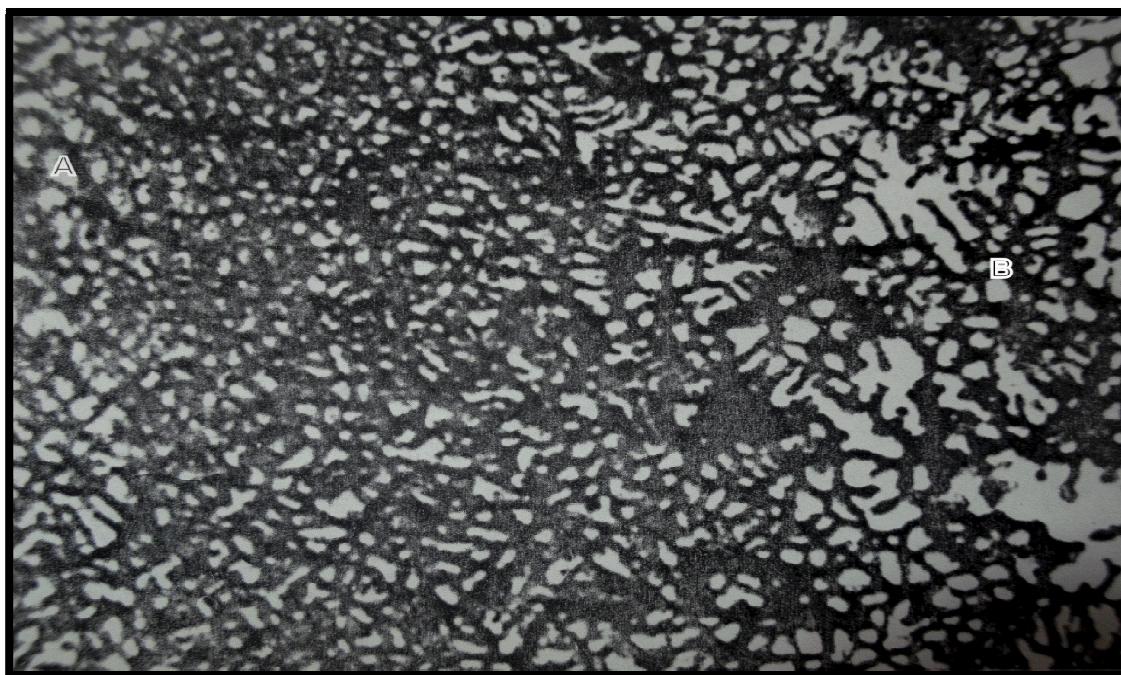


Figure V-10: AS22 (x2000).

AS7 (x1000) :

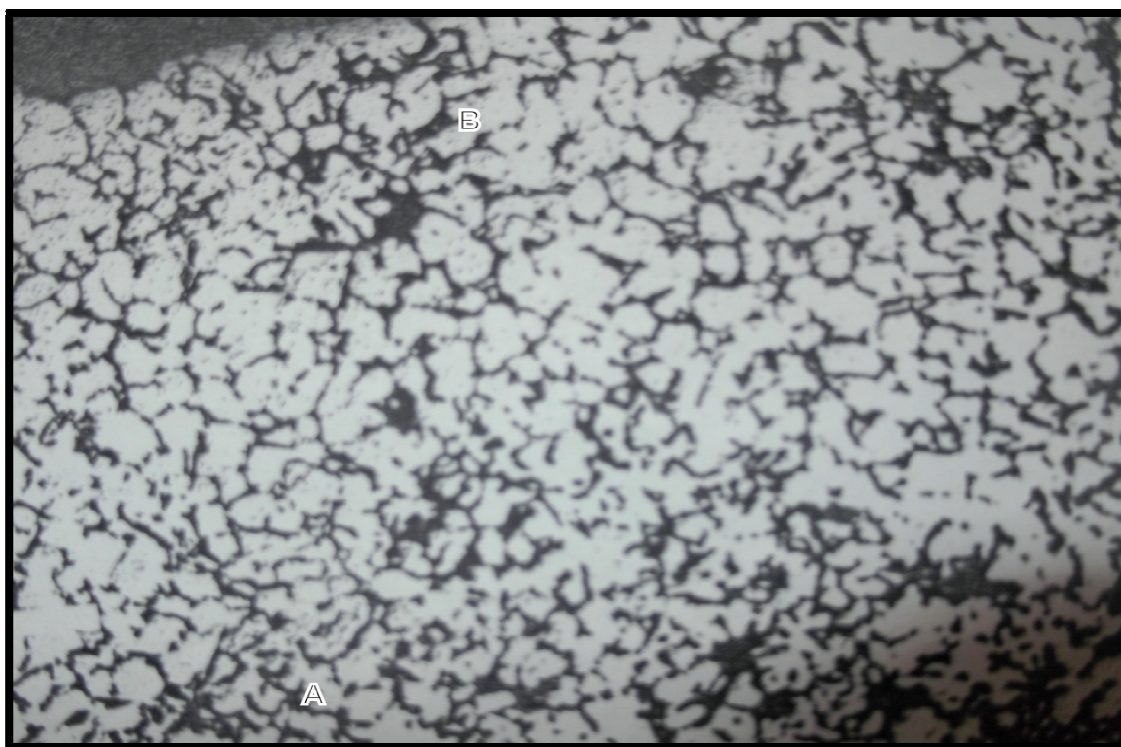


Figure V-11 : AS7(x1000).

AS7 (2000x) :

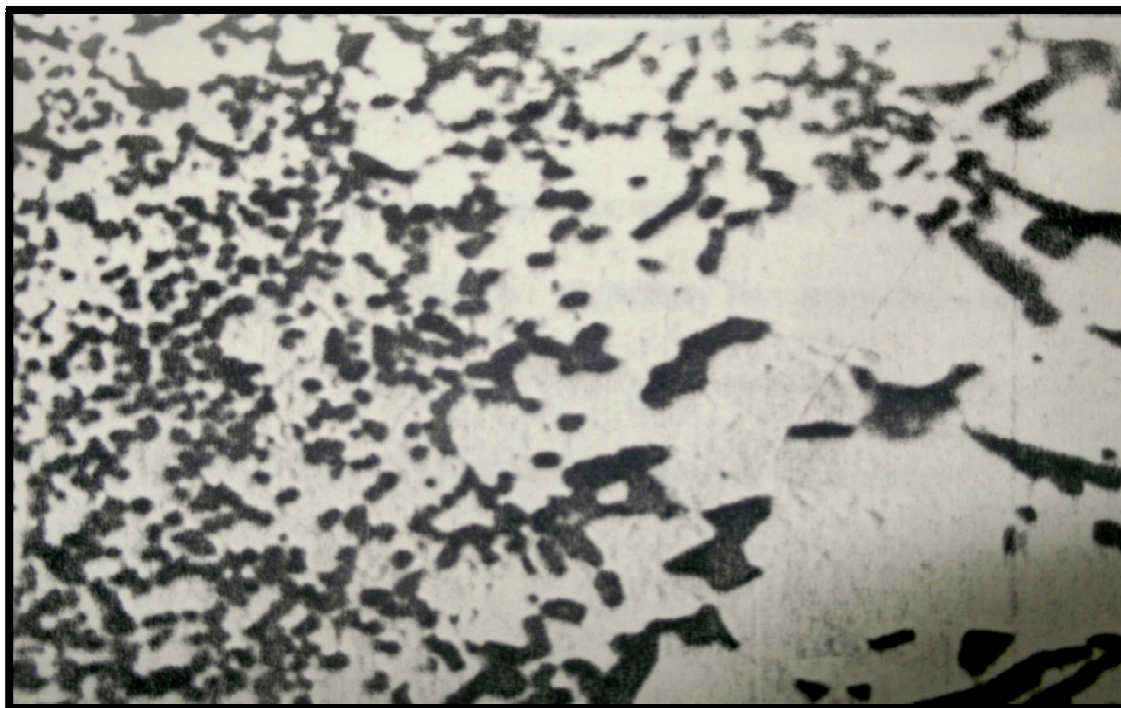


Figure V-12 : AS7 suivant la largeur du ruban (2000x) [7].

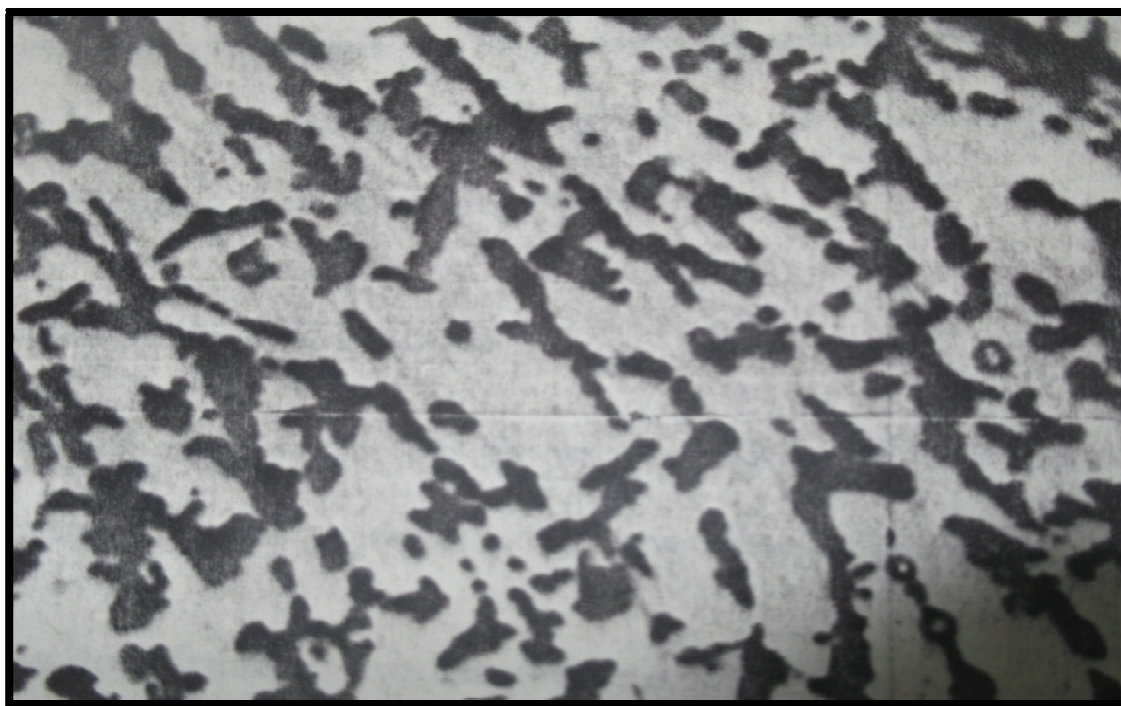


Figure V-13 : AS22 suivant la largeur du ruban (2000x) [7].

D'après l'observation, on remarque qu'on a deux zones qui ont des microstructures distinctes la zone (A) plus fine que la zone (B).

Cette différence est due au transfert de chaleur qui est plus important entre le métal liquide et la roue (zone A), qu'entre le métal liquide et l'air (zone B).

On remarque pour l'AS7 que la structure est homogène sur toute la surface. Les dendrites formées sont de type équiaxe.

Pour l'AS13, on observe une structure dendritique colonnaire fine (zone A) suivie d'une structure dendritique équiaxe bien plus apparente et plus large (milieu et zone B).

Pour l'AS22, on observe trois zones: une zone à grains très fins (zone A) suivie d'une région faisant apparaître des dendrites colonnaires (zone intermédiaire) et une troisième présentant faisant apparaître des dendrites équiaxes (zone B) **Figure V-10**

On peut conclure de ces résultats, qu'en fonction de la teneur en silicium :

Dépassé l'eutectique (13% Si), il est possible de distinguer trois zones :

La première directement au contact de la roue, est formée des grains très fins,

la deuxième présente une croissance dendritique colonnaire qui est le plus souvent observée du côté de la zone A. La troisième, est caractérisée par une croissance dendritique équiaxe.

Deux paramètres influent sur l'apparition de ces zones: le degré de surfusion et la quantité de transfert de chaleur.

A des grandes vitesses de solidification on ne peut plus parler de la phase eutectique parce que les particules de silicium sont extrêmement fines par conséquent, il n'est plus possible d'expliquer leur comportement seulement par les principes de la solidification classique.

Pour essayer de comprendre un peu plus le comportement de ces alliages AL-Si, une étude métallographique suivant la largeur des rubans a été réalisée pour les teneurs extrêmes : l'AS7 et l'AS22.

Dans l'AS7 **Figure V-12** le silicium apparaît sous forme des particules sphériques fines et des microcristaux polygonaux. Dans l'AS22 **Figure V-13** le silicium est sous forme de polygones et de micros lamelles. D'après cette observation on peut dire que la structure est fine est homogène.

V.2 Interprétation des résultats de DRX :

1)- Les échantillons obtenues par le moulage en sable :

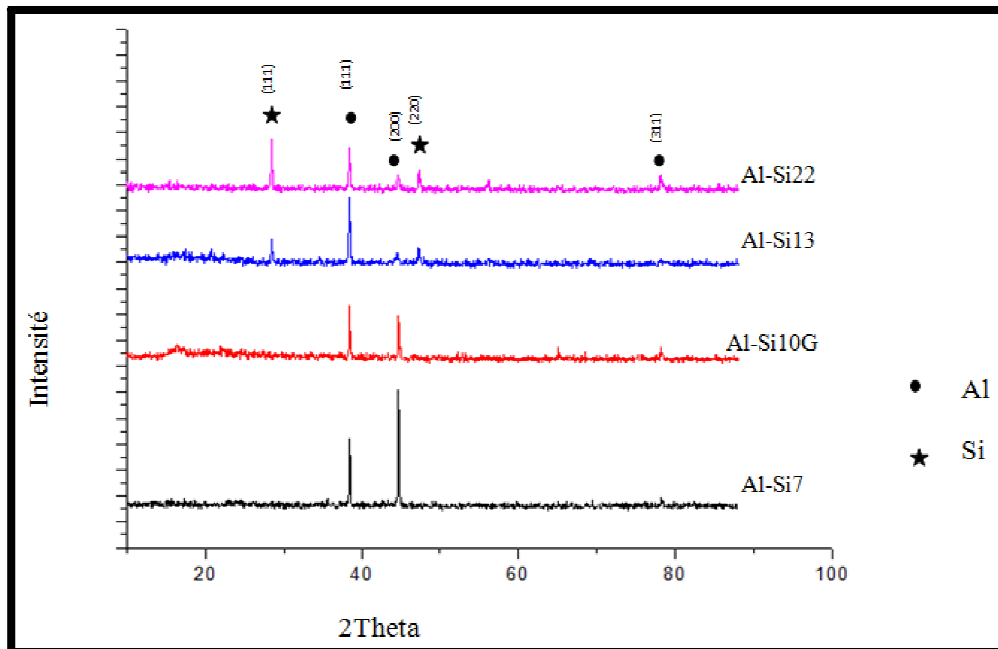


Figure V-14 : Les spectres de diffraction des rayons X des échantillons obtenues par moulage en sable.

1)- Les échantillons obtenues par Melt-spining :

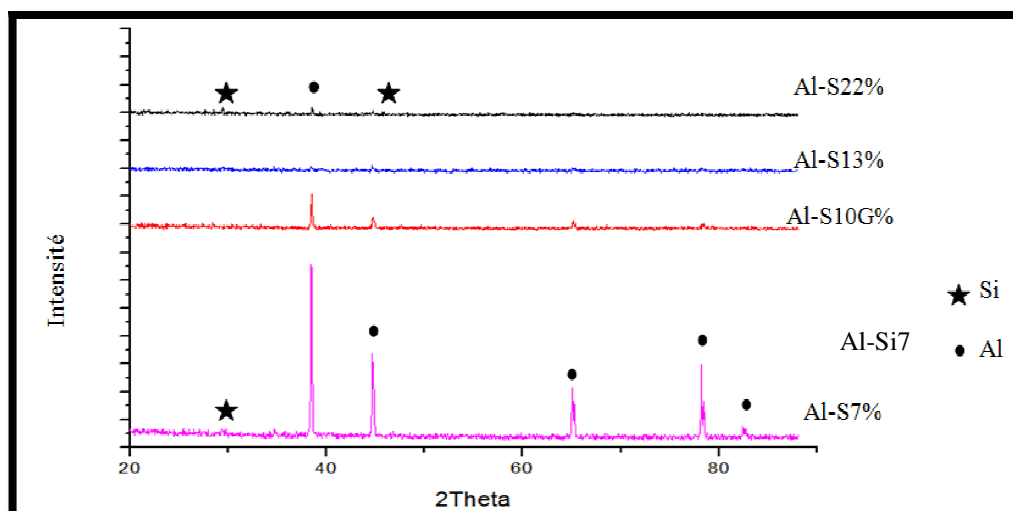


Figure V-15 : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de Melts-spining.

Les deux figures ci-dessus montrent les spectres DRX de différentes échantillons élaborés par moulage en sable et Melt-spining .

On observe que les pics d'Al et Si dans les spectres des échantillons moulés sont plus intenses par rapport à celles de Melt-spining

Et cela est dû à la solidification rapide, la cristallisation diminue c'est-à-dire que l'on tend vers une microcristallisation.

V.3 Détermination de la vitesse de solidification :

A l'aide des figures (II-2, IV-10) on obtient les résultats dans les tableaux suivants :

Al-Si(%)	Distance entre les branches secondaires λ (μm)	Distance moyenne λ (μm)	Vitesse de solidification ($^{\circ}\text{C/s}$)
07	40 à 60	50	10^0
10	35 à 50	40	10^0
13	20 à 50	35	10^0
22	20 à 40	30	10^0

Tableau V-1: La distance λ Solidification lente.

Al-Si(%)	Distance entre les branches secondaire λ (μm)	Distance moyenne λ (μm)	Vitesse de solidification ($^{\circ}\text{C/s}$)
07	1 à 2	1.4	10^5
10G	0.8 à 1.5	1.2	10^5
13	0.7 à 1.4	1.1	10^5
22	0.7 à 1.2	0.8	10^5

Tableau V-2: La distance λ Solidification par Melt-spining.

Les tableaux ci-dessus représentent la variation de la distance inter branches secondaire en fonction de la vitesse de solidification pour les mêmes alliages de différents types de solidification.

On remarque que plus le pourcentage de silicium augmente, la distance Interbranche secondaire diminue et cette diminution devient plus en plus grande avec l'augmentation de la vitesse de la solidification.

V.4 Interprétation des résultats de la microdureté :

1)- La microdureté des échantillons obtenues par fonderie : (moulage en sable)

Alliage(%)	Al-s7%	Al-s10	Al-s13	Al-s22	
Microdureté (Hv)	53	60	69	74	
Vitesse de solidification ($^{\circ}\text{C/s}$)	10^0	10^0	10^0	10^0	

Tableau V-3: représente la microdureté (Hv) des alliages Al-si.

2)- La microdureté des échantillons obtenues par « Melt-Spining » :

Alliage(%)	Al-S7	Al-S10G	Al-S13	Al-S22
Microdureté (Hv)	92	97	106	134
Vitesse de solidification (C°/s)	10^5	10^5	10^5	10^5

Tableau V-4 : Représente la microdureté (Hv) des alliages Al-Si avec la vitesse de solidification.

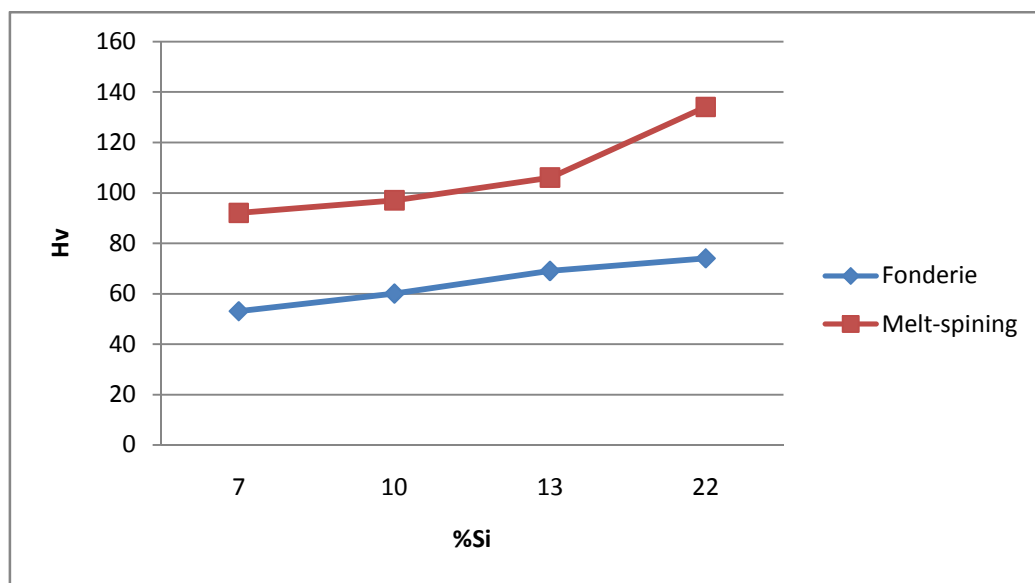


Figure V-16 : Evolution de la dureté (Hv) en fonction de pourcentage de Si.

Les tableaux représente la variation de dureté avec des teneur en silicium différents en fonction de la vitesse de solidification (10^0 et 10^5). On remarque que la dureté augmente avec le pourcentage de Si pour la vitesse de solidification 10^0 C°/s, mais la valeur du dureté devient plus grande avec augmentation de la teneur en Si.

On distingue que la variation de la vitesse de solidification influe sur la dureté et sur l'homogénéité et la finesse de la structure.

Plus la teneur en Si augmente plus la structure est homogène et fine pour les grandes vitesses de solidification.

Conclusion Générale

L'étude des alliages Al-Si solidifiés rapidement par « melt-spining » nous a montré les aspects suivants :

- Ces résultats nous confirment que des teneurs élevées ainsi que la présence de plusieurs éléments d'alliage favorisent l'obtention de structures microcristallines , et à la limite des structures amorphes.
- Plus la teneur en Si augmente plus la structure est homogène et fine pour les grandes vitesses de solidification.

L'augmentation de la teneur d'élément d'alliage permet d'affiner la structure et favorise l'augmentation de la vitesse de solidification.

- On distingue que la variation de la vitesse de solidification influe sur la microdureté .
- Quand on dépasse l'eutectique (13% Si),

la microdureté augmente plus rapidement qu'avant l'eutectique.

Nous conseillons qu'une étude plus approfondie soit faite avec deux à trois éléments d'alliages et non un seul seulement en l'occurrence le silicium