

006/021

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

**UNIVERSITE DE BLIDA**  
**INSTITUT D'AERONAUTIQUE**

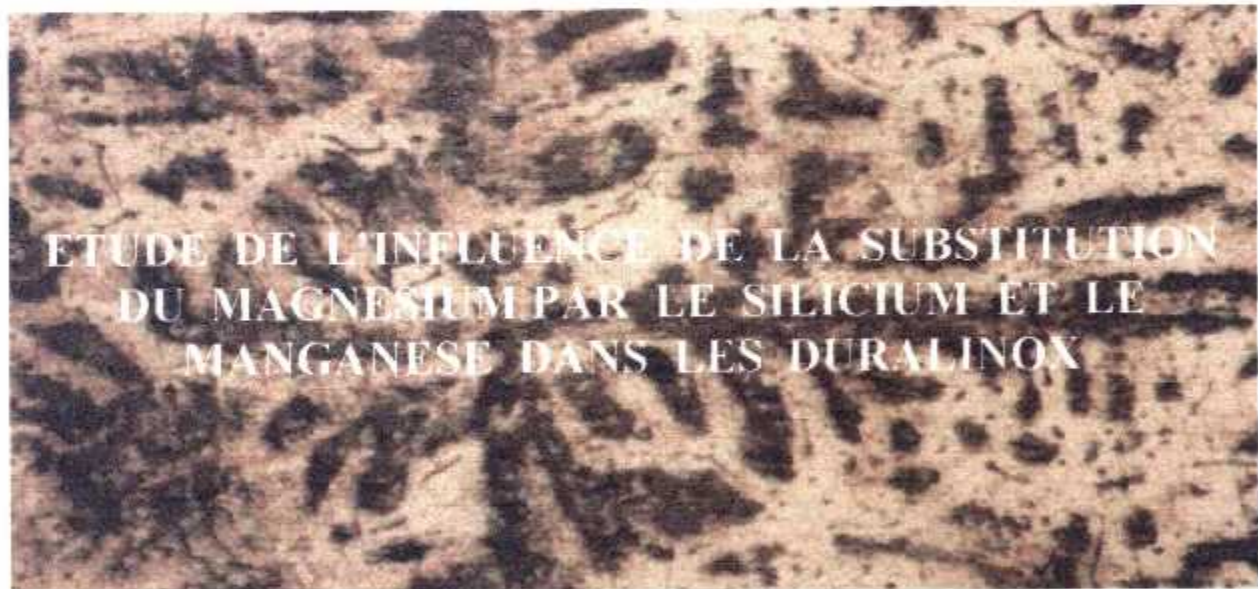


**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du diplôme*  
*D'ingénieur d'état En AERONAUTIQUE*

**OPTION : STRUCTURE**

**THÈME**



**Proposé & Dirigé par :**

Mr A.DJIDJELI

**Etudié Par :**

Mlle soumaya BOUDEHANE

**Promotion : 2000/2001**

# Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*À ma chère mère que Dieu tout puissant lui accorde sa Sainte Miséricorde.*

*À mon frère aîné Mohamed.*

*À mon frère Nezar.*

*À mes sœurs : Dalila, Samia, Nadjet et Meriem.*

*À mes nièces et neveux : Manel, Maha, Housseem Eddine, Hiba,*

*Mohamed Amine, Lilia Fatima,*

*Ziad, Et le chouchou Mehdi.*

*À mes amies : Hayet, Hanane, Lamia, Khalida, Nabila, Mouna et Zohra.*

*À toute la promotion 2001 de l'Aéronautique.*

souma

# Remerciements

*Je remercie particulièrement :*

*Mr A. Djidjeli, mon promoteur, surtout pour sa patience, pour sa compréhension  
et pour l'apport de son expérience qui m'a été précieux,*

*Mr M. Daouadji, responsable du laboratoire de micro fonderie  
(Institut d' Aéronautique de Blida), qui m'a appris bien des choses en  
pratique de fonderie.*

*A tous les techniciens de l'institut d' Aéronautique.*

*Aux membre de Jury, qui ont acceptés d'examiner cette étude.*

*A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.*

## ملخص

مع تطور التكنولوجيا ، اتخذت سبائك الألمنيوم أهمية كبيرة في الصناعات المتعددة بفضل خصائصها ومميزاتها الملائمة .

في هذا السياق ، اخترنا إعداد هذا البحث حول مدى تأثير المنغنيز و السيليسيوم على صلابة سبائك سلسلة Al-Mg .

ولإنجاز هذا البحث ، تعين علينا تحقيق مرحلتين ( مرحلة نظرية و أخرى تطبيقية ) .

أ — دراسة نظرية ، والتي تمثلت في :

إعطاء نظرة عامة حول الألمنيوم وخصائصه ، دور المواد المضافة في سبائك الألمنيوم بالإضافة إلى تعريف بعض السبائك المستعملة في الطيران و أخيرا دراسة ظاهرتا التجمد و التصلد.

ب — دراسة تطبيقية ، والتي تحتوي على :

○ إعداد سبائك الألمنيوم الخاصة بدراستنا .

○ الاختبارات الميكانيكية المتمثلة في اختبارات صلادة فيكرس (VICKERS).

○ دراسة و مقارنة تغير الصلادة بدلالة ( نسبة السيليسيوم ، نسبة المنغنيز و المعالجات

الحرارية ) .

نختم هذا البحث بخلاصة .

## RESUME

Avec le développement de la technologie, et grâce à leurs caractéristiques convenant aux impératifs industriels ; Les alliages d'Aluminium ont conquis une place importante.

Notre travail porte sur l'étude de l'influence de la substitution du Manganèse par le Silicium et le Manganèse dans les duralinox.

Pour cela nous avons partagé notre travail en deux grandes parties (partie théorique et partie expérimentale).

*La partie théorique :* porte sur les principales caractéristiques de l'Aluminium et de ses alliages, sur le rôle des éléments d'addition ainsi que sur les deux phénomènes : durcissement et solidification.

*La partie expérimentale :*

- Elaboration des alliages
- Les tests de dureté sur ces alliages
- Etude et comparaison de la variation de la dureté en fonction des paramètres choisis

Une conclusion pour terminer cette étude.

## ABSTRACT

With developing technologies, and thanks to their characteristics suitable to the industrial needs; The Aluminium alloys have conquered an important place.

Our research carries the study of the influence of the substitution of Mg by the Si and the Mn in the Duralinox.

For this reason, we have shared our work into two principal parts (theoretical part - experimental part).

1- **Theoretical part:** Relates to the principal characteristics of the Al and its alloys, on the role of additional elements, also on the phenomenon of solidification and lastly.

2- **Experimental part:**

- Elaboration of the alloys
- Hardness tests on the alloys
- Study and comparison of the hardness variation according to the chosen parameters

Finally, a conclusion of the achieved work.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
<i>Partie théorique :</i>	
<b>I- Généralités sur L'Aluminium et ses alliages</b>	
1- L'Aluminium et ses principales caractéristiques.....	5
1-1 propriétés physiques.....	5
1-2 propriétés mécaniques.....	5
1-3 propriétés chimiques.....	6
2- Les alliages d'Aluminium.....	7
2-1 Alliages corroyés.....	8
2-2 Alliages de fonderie.....	9
3- Influence des éléments d'addition.....	10
3-1 Le Magnésium.....	10
3-2 Le Silicium.....	10
3-3 Le Manganèse.....	10
3-4 Le Cuivre.....	11
3-5 Le Zinc.....	11
3-6 Le Nickel.....	11
3-7 Le Titane.....	11
4- Désignation des alliages d'Aluminium.....	12
<b>II- Alliages d'Aluminium comme matériaux Aéronautique</b>	
1- Alliages Aluminium-Silicium.....	14
2- Alliages Aluminium-Cuivre.....	15
3- Alliages Aluminium-Zinc.....	16
4- Alliages Aluminium-Magnésium.....	17
<b>III- Phénomène de durcissement</b>	
Introduction.....	19
1- Durcissement par écrouissage.....	20
2- Durcissement par affinement de la taille des grains.....	20
3- Durcissement par solution solide.....	21
4- Durcissement structural.....	22
<b>IV- Phénomène de solidification</b>	
1- Phénomène de solidification.....	25
1-1 Germination.....	25
1-1-1 Théorie classique de la Germination.....	25
1-2 Croissance.....	29

2- Structure générale de solidification.....	30
2-1 Zone de peau.....	30
2-2 Zone colonnaire.....	30
2-3 Zone équiaxe.....	30
3- Défauts dus a la solidification.....	31
3-1 Ségrégation.....	31
3-2 Retrait.....	31
3-2-1 Retassures.....	31
3-2-2 Criques.....	32

**Partie expérimentale :**

**V- Techniques expérimentales**

Introduction.....	35
1- Elaboration des matériaux.....	36
1-1 Matériaux élaborés.....	36
1-2 Matériels et produits.....	37
1-2-1 Produits.....	37
1-2-2 Matériels.....	37
1-3 Techniques opératoires.....	38
1-3-1 Le poteyage.....	38
1-3-2 La fusion.....	38
1-3-3 Temps de maintient.....	38
1-3-4 L'affinage.....	39
1-3-5 La coulée en coquille par gravité.....	39
1-4 Opération d'élaboration.....	40
1-4-1 Méthode de calcul des pourcentages d'éléments d'addition.....	40
1-4-2 Méthode Sandwich.....	40
1-5- Traitement thermique.....	41
1-5-1 Mise en solution.....	42
1-5-2 Trempe.....	42
1-5-3 Revenu.....	42
1-6- Essais mécaniques.....	43
1-6-1 Dureté.....	43
1-7- Techniques métallographiques.....	44
1-7-1 Principe.....	44
1-7-2 Techniques.....	44
1-7-2-1 Enrobage.....	44
1-7-2-2 Polissage.....	45



1-7-2-3 Attaque.....	45
1-7-2-4 Observation.....	46
<b>VI- Résultats et interprétation</b>	
1- Caractérisation macroscopique.....	48
2- Caractérisation microscopique.....	49
2-1 Alliage Aluminium-Magnésium.....	49
2-2 Effet du Manganèse.....	55
2-3 Effet du Silicium.....	56
3- Etude comparative du durcissement par effet des additions.....	58
3-1 Tableau des résultats.....	58
3-2 Courbes.....	59
3-3 Interprétations.....	61
3-3-1 Effet du Magnésium.....	61
3-3-2 Effet du Manganèse.....	61
3-3-3 Effet du Silicium.....	61
4- Influence du traitement thermique sur le durcissement.....	63
4-1 Tableau des résultats.....	63
4-2 Courbes.....	64
4-3 Interprétations.....	67
CONCLUSION.....	70

# INTRODUCTION

Le sujet que nous nous proposons de traiter dans ce présent mémoire porte sur l'étude de l'influence de la substitution du magnésium par le silicium et le manganèse dans les Duralinox.

Les duralinox sont des alliages Al-Mg contenant moins de 5% de Magnésium. Ces alliages qui font preuve d'une excellente résistance à la corrosion ainsi qu'une très bonne soudabilité sont utilisés en construction aéronautique essentiellement dans les systèmes de tuyauterie.

La recherche que nous avons entreprise sur le plan expérimental s'est déroulée en deux étapes :

Une première, consacrée à l'élaboration des différentes nuances d'alliage, et une seconde à la caractérisation de ces derniers. Cette caractérisation se présente sous deux dimensions, l'une structurale et l'autre fonctionnelle, il sera particulièrement important de rechercher les relations existantes entre ces deux aspects.

Notons que l'aspect fonctionnel a été limité principalement à l'étude de l'évolution du durcissement par effet de soluté et par effet du traitement thermique.

Le phénomène de durcissement des métaux et alliages est d'un intérêt particulier pour les métallurgistes. Au point de vue pratique c'est l'un de leurs buts essentiels d'obtenir des caractéristiques mécaniques de plus en plus élevées. Signalons que l'étude menée sur le durcissement ne tient pas compte de son effet sur la résistance à la corrosion pouvant être néfaste dans plusieurs situations.

Pour ce qui est de la partie théorique de ce mémoire, nous avons présenté des principes et des méthodes d'interprétation en concordance avec le travail expérimental sans pour autant alourdir le contenu. Nous incitons pour cela le

lecteur à se reporter aux ouvrages cités dans la bibliographie chaque fois qu'il est nécessaire d'approfondir et de compléter ses connaissances en la matière.

Dans ce cadre nous avons élaboré quatre chapitres :

Une présentation de généralités sur les alliages d'Aluminium a fait l'objet du premier chapitre, le deuxième comporte une étude plus détaillée sur les alliages d'Aluminium utilisé en aéronautique, le troisième chapitre sur les différents procédés mécaniques et mécanismes de durcissement, et enfin la solidification comme étape importante dans l'élaboration a été traitée dans le quatrième chapitre.

*Partie*

*Théorique*

# Chapitre I

*Généralités sur l'Aluminium et ses alliages*

## 1- L'Aluminium et ses principales caractéristiques :

Bien que , en tonnage , la production de l'Aluminium ne représente qu'un peu plus de 2 % de celle des aciers , ce métal ( et les alliages qui en dérivent ) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques .L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui dans bien des circonstances , en font un matériau irremplaçable .Parmi celles-ci , citons les plus importantes :

### 1-1 Propriétés physiques :

Les propriétés essentielles qu'il faut connaître au moins qualitativement sont les suivantes :

Maille Cristalline .....	cubique à face centrées (CFC)
	$a = 4,04 \text{ \AA}$
Densité .....	2,7
Point de fusion .....	658°C
Coefficient de dilatation .....	24 x 10 <sup>-6</sup> de 0 à 100°
	27,9 x 10 <sup>-6</sup> de 100° à 500°
Conductivité thermique à 20°C .....	200 K cal /m/h/degré
Diffusivité thermique à 20°C.....	0,35 m <sup>2</sup> /h
Chaleur spécifique .....	0,23 K cal /Kg
Résistivité électrique .....	2,7 μΩ x cm
Potentiel galvanique .....	-1,69 volts

### 1-2 Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques de l'Aluminium dépendent beaucoup de l'état dans lequel on le considère ; il est en effet particulièrement sensible à l'érouissage qui augmente la dureté , la charge de rupture et la limite élastique , et diminue l'allongement et la résilience .

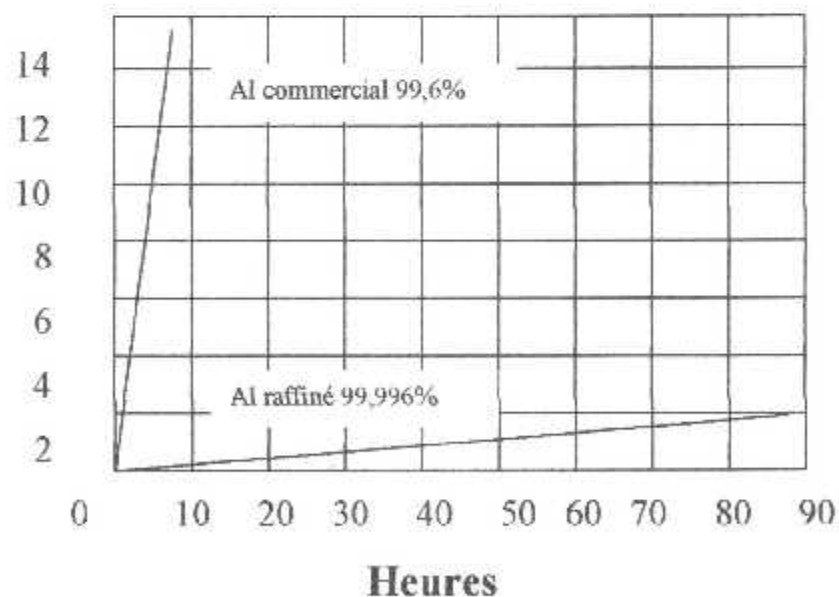
- Coefficient de poisson : 0,34
- Module d'Elasticité :6700 h bar
- Module De torsion :2700 h.bar

### 1-3 Propriétés chimiques :

Grâce à la couche d'oxyde ( $Al_2O_3$ ) qui se forme à leur surfaces , l'Aluminium et ses alliages résistent relativement bien à la corrosion , on peut d'ailleurs rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par anodisation . L'Aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisée sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs.

Par contre, dans certaines conditions d'utilisation, milieux corrosifs , système de contraintes appliquées , statique ou dynamique , les alliages d'Al peuvent subir les effets de la corrosion : piqûres , corrosion sous contrainte ; fatigue –corrosion , pour des conditions données , la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état (recuit ou écroui , traité ou non). [3 ]

#### Pertes de poids $g/cm^2$



**Fig 1 : Corrosion par Hcl à 30%**

## 2- Les alliages d'Aluminium :

Les propriétés mécaniques de l'Aluminium pur, quoique intéressantes, ne sont pas suffisantes pour permettre de l'utiliser dans tous les cas comme matériaux de construction ; on serait conduit , dans certaines applications , à des dimensions de pièces qui feraient perdre en partie l'avantage de la faible densité.

L'addition d'éléments d'alliages permet d'améliorer dans une large mesure les propriétés mécaniques de l'aluminium sans altérer pour autant les caractéristiques les plus intéressantes .

Ces alliages à base d'Al constituent la grande famille dite des alliages légers qui ont pris dans de très nombreux domaines une importance de premier plan. [3]

Les divers alliages d'Al ont trouvé de larges emplois industriels notamment en construction aéronautique .

On regroupe souvent les alliages d'Aluminium suivants :

- Les alliages dits « sans traitement thermique »
- Les alliages à traitement thermique

Les alliages d'Aluminium se partagent aussi selon le mode de fabrication de demi produit en :

- Alliage de fonderie
- Alliages corroyés

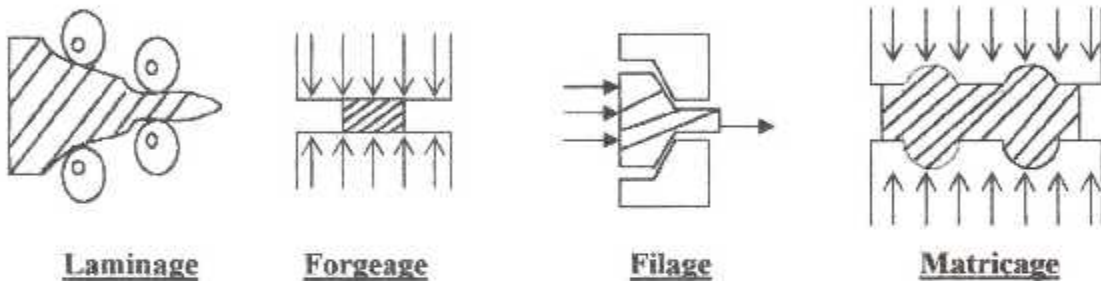


## 2-1 Alliages corroyés :

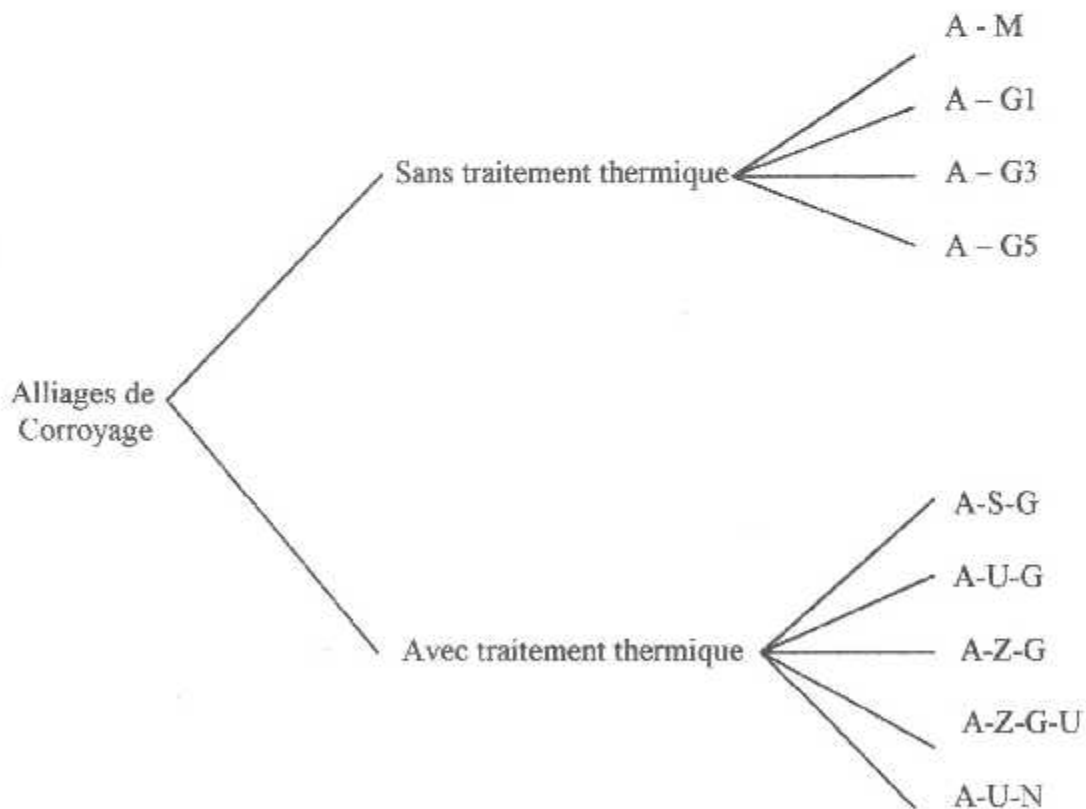
### Définition :

Terme général employé pour les alliages obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud et /ou à froid tels que :

Filage ,Forgeage , matriçage , laminage à chaud , laminage ou étirage à froid , soit exclusivement par l'un de ces procédés , soit par une combinaison de ceux-ci permettant d'obtenir des produits à la forme désirée.



**Fig 2 : Structure métallurgique optimisée, grains « fins » éventuellement réorientés**

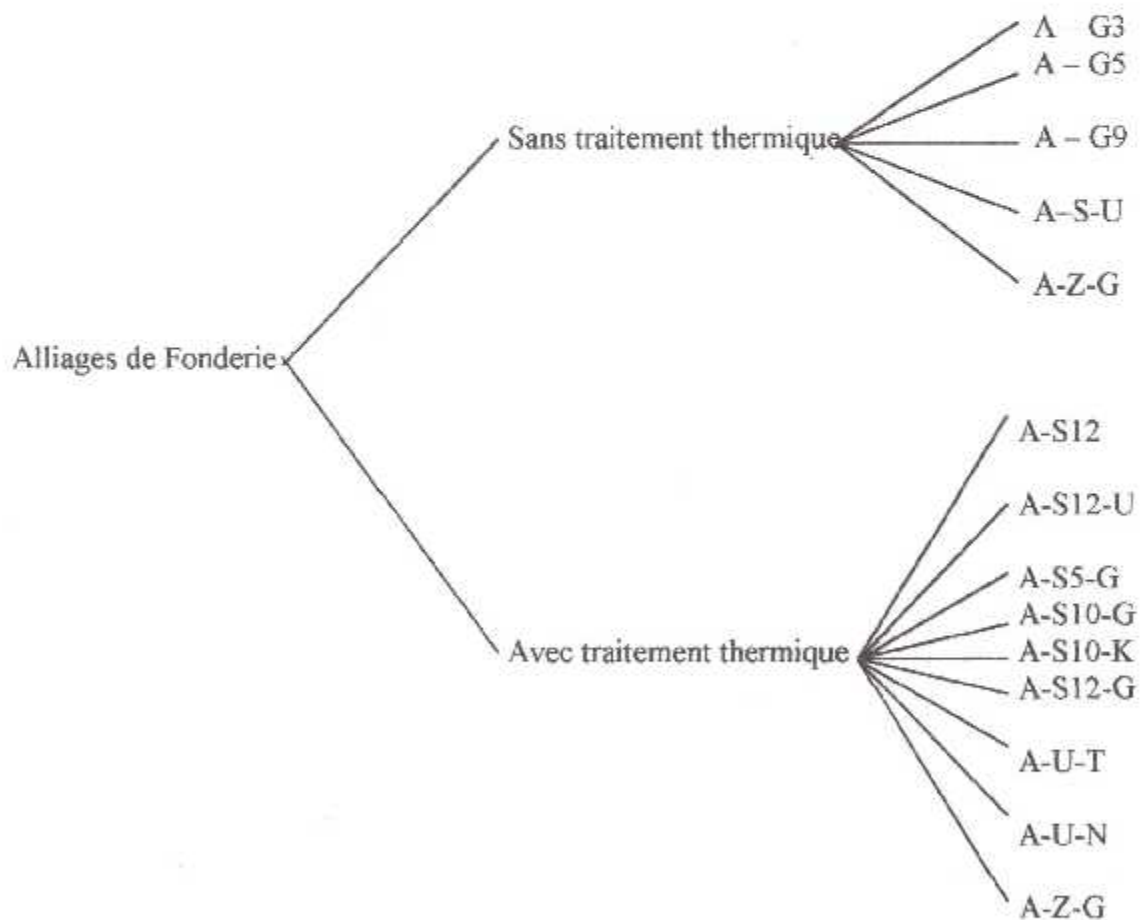


## 2-2 Alliages de fonderie :

### Définition :

Les alliages chauffés à des températures convenables passent de l'état solide à l'état liquide . Cette phase liquide permet de couler le métal dans des moules et d'obtenir ainsi les pièces par moulage .

Le principe de cette fabrication consiste à créer , en creux , dans du sable ou dans une matière susceptible de supporter le métal en fusion , une forme semblable à celle de la pièce à réaliser .



### 3- Influences des éléments d'addition :

#### 3-1 Le magnésium :

Dans les alliages industriels , la teneur en magnésium ne dépasse pas 13% . Le magnésium est soluble dans l'Aluminium jusqu'à 13% à l'état liquide , mais nettement moins à froid .Du fait de la lente diffusion du magnésium pendant le refroidissement , les cristaux présentent une faible teneur en magnésium au centre qu'à la périphérie .Au dessus de 4% , on note la présence de  $Al_3Mg_2$  ce qui permet d'envisager des traitements thermiques. Les alliages Aluminium Magnésium ont une coulabilité très inférieure aux autres alliages d'Aluminium et un intervalle de solidification assez important , ce qui les rend fragiles à chaud .

#### 3-2 Le Silicium :

De densité 2,34, le silicium entre en solution jusqu'à la teneur de 1,65 % . A une teneur voisine de 12% on obtient l'alliage dit « eutectique » qui , sans intervalle de solidification , fond à  $577C^{\circ}$ , possède une bonne coulabilité (coulée des pièces minces et de grande surface ) et est doté d'une texture plus fine . Le silicium en combinaison avec l'Aluminium ne joue qu'un très faible rôle quand à la corrosion ; toute fois , si par suite d'une mauvaise élaboration , il en subsiste à l'état libre , le silicium forme un couple qui attaque le métal avec formation d'alumine .

#### 3-3 Le Manganèse :

Très peu soluble dans l'Aluminium , le manganèse est intéressant par son influence sur la dureté - qu'il augmente - et sur la corrosion - qu'il améliore nettement - des alliages binaires . Par contre l'alliage aluminium -manganèse (Al - Mn) est mou .

Le manganèse élève sensiblement le point de fusion des alliages qui en contiennent .On notera que les propriétés de fonderie sont alors moins satisfaisantes .

### 3-4 Le cuivre :

Il existe un eutectique pour 33,3% de cuivre .Au delà , vers 54% de cuivre , Il se forme un composé défini :  $Al_2Cu$  .Pratiquement , on ne dépasse pas 13% de cuivre dans les alliages industriels .A 548°C le cuivre entre en solution jusqu'à une teneur de 5,65% mais , à froid , ce chiffre tombe à 0,3 %.

La coulabilité des alliages aluminium - cuivre est relativement élevée et passe par un minimum pour 2 % de cuivre ; le maximum est pratiquement atteint à 12 % , l'intervalle de solidification est important ( plus de 100°C pour 4 à 5 % de cuivre ) , Ce qui explique une certaine fragilité à chaud. Même à faible teneur, le cuivre diminue la résistance à la corrosion. A noter que tous les alliages d'aluminium au cuivre s'usinent facilement .

### 3-5 Le Zinc :

pour des teneurs ne dépassant 1,5% , le Zinc est en solution dans l'Aluminium .L'intervalle de solidification demeure encore assez important et donne une fragilité à chaud .

La coulabilité est très moyenne avec un minimum pour 10% de Zinc .La résistance à la corrosion , tout comme l'usinabilité est assez satisfaisante .

### 3-6 Le Nickel :

Très peu soluble dans l'aluminium , le nickel est utilisé comme affinant de structure .Il augmente la résistance à chaud .

### 3-7 Le titane :

Affinant très net de la structure des alliages bruts de coulée , il augmente les caractéristiques mécaniques .Il est utilisé , en liaison avec le bore , pour l'affinage des alliages hypérsilicés. [4]

#### 4- Désignation des alliages d'Aluminium :

Alliages	Série
Al Commercial pur	1000
Al-Cu et	
Al-Cu-Mg	2000
Al-Mn	
Al-Si-Mg et	
Al-Si-Cu	3000
Al-Si	4000
Al-Mg	5000
Al-Mg-Si	6000
Al-Zn	
Al-Zn-Mg et	
Al-Zn-Mg Cu	7000
Al et autres éléments	8000

# *Chapitre* **II**

*Alliages d'Aluminium comme matériaux*

*aéronautique*

## Alliages d'Aluminium :

### 1- Alliages Aluminium –Silicium : (Fonderie )

L'expérience montre que la coulabilité de ces alliages est meilleure et donc la facilité d'utilisation en fonderie augmente avec la teneur en silicium .

Les alliages les plus classiques auront une teneur en silicium voisine de 12 % , l'alliage le plus simple de ce type est l'Alpax A-S13 . Dans certains cas , où l'on recherche des propriétés particulières , on dépasse largement cette teneur en silicium .On améliore ainsi les caractéristiques de frottement notamment au contact des surfaces d'acier , nous citons les alliages du type A-S22U à 22 % de silicium et de cuivre utilisés pour la fabrication des pistons de moteur .

La résistance à la corrosion des alpax est excellente ; ils ont un coefficient de dilatation faible .Cette propriété est intéressante pour la fabrication des pistons car elle permet de réduire les jeux à froid et d'améliorer les rendements des moteurs à piston et à réaction .

## 2- Alliages Aluminium cuivre : ( haute résistance )

Des alliages à 4 % et 6 % de cuivre sont utilisés comme alliages de fonderie et de forge , on ajoute en général une petite quantité de magnésium .

**Alliages coulés** : A-U5GT donne après traitement :

$$R = 33 \text{ da N/mm}^2$$

$$E = 20 \text{ da N/mm}^2$$

$$A = 7\%$$

**Alliages forgés** : AU6T donne après traitement :

$$R = 40 \text{ da N/mm}^2$$

$$E = 25 \text{ da N/mm}^2$$

$$A = 8\%$$

La coulabilité des alliages aluminium cuivre est excellente dès que la teneur en cuivre atteint 4% , par contre la tenue à la corrosion est médiocre .

Ces alliages sont surtout utilisés pour les cellules d'avions ainsi que pour la confection des pistons et des aubes de compresseur .



### 3- Alliages Aluminium – Zinc : (très haute résistance )

Les alliages binaires aluminium- Zinc sont peu intéressants , seuls les alliages riches en aluminium et contenant au moins 10 % de Zinc et 2 % de magnésium sont à considérer .Les compositions les plus courantes contiennent de 5 à 8 % de Zinc et 2,5 à 3 % de magnésium auxquelles s'ajoutent en petite quantité de certains éléments d'alliage comme le cuivre et le chrome .

Ces alliages acquièrent leurs caractéristiques d'emploi par chauffage à 500° C, trempe à l'eau et revenu prolongé à 150°C.

Leurs propriétés mécaniques sont très intéressantes , on obtient après traitement sur un alliage laminé 8 % de Zinc et 3 % de magnésium :

$$R = 60 \text{ da N /mm}^2$$

$$E = 50 \text{ da N /mm}^2$$

$$A = 8\%$$

On voit que les alliages aluminium – Zinc - Magnésium sont les plus résistants des alliages légers connus actuellement .Malgré les propriétés remarquables , ces alliages ne peuvent être utilisés tels quels pour les raisons suivantes :

- Sensibilité excessive à la corrosion sous tension
- Rupture intergranulaire

On remédie à ces défauts de la manière suivante :

- En réduisant la teneur de Zinc
- En appliquant un Traitement Thermique Approprié
- En protégeant contre la corrosion
- En introduisant dans la composition des éléments comme le cuivre .

#### + Alliages Aluminium-Magnésium : **Duralinox (Résistance à la corrosion)**

Les alliages Aluminium- Magnésium (A-G) les plus employés contiennent 3 ou 7 % de magnésium . Ce sont les alliages A-G3 ; A-G5 ;A-G7 connus sous les noms commerciaux de Duralinox ou Alumag .

La présence du magnésium en quantité croissante augmente les caractéristiques mécaniques et améliore la résistance à la corrosion .

Exemple : **AG5 (5056)** à l'état recuit , on a :

$$R = 30 \text{ da N /mm}^2$$

$$E = 14 \text{ da N /mm}^2$$

$$A = 17\%$$

En Aéronautique , toutes les tuyauteries , raccords et carénages emboutis travaillant peu sont exécutés en Duralinox. [9]

# *Chapitre* **III**

*Phénomène de durcissement*

## Introduction

**E**n général , on n'utilise pas les métaux à l'état pur quand on recherche des propriétés mécaniques intéressantes par l'application de traitements mécaniques ou thermiques et par l'addition judicieuse d'éléments étrangers , on peut améliorer les propriétés mécaniques de base des métaux .

Toutes les méthodes de durcissement agissent de la même façon : elles rendent difficile , voire même impossible , le mouvement des dislocations dans le réseau cristallin .la limite d'Elasticité et la résistance à la traction d'un métal augmente si le mouvement des dislocations se fait plus difficilement dans le cristal en lui appliquant une contrainte .

La présence de défauts dans le cristal (atomes étrangers , précipités , seconde phase , joints de grains ou dislocation ) entraîne toujours , localement , une contrainte de déformation , c'est à dire de zones dont l'énergie est élevée. Pour se déplacer les dislocations doivent éviter ces zones ou les traverser , le mouvement des dislocations devient très difficile , voire impossible , car elles se retrouvent piégées par les défauts , ainsi on a une augmentation de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction et en général une diminution de la ductilité et de la ténacité .[5]

### 1- Durcissement par écrouissage :

Modification de l'état structural d'un métal ou alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire .

L'écrouissage provoque un durcissement rapide du métal (augmentation rapide de la résistance et surtout de la limite d'élasticité ) accompagné d'une diminution rapide de la ductilité .

### 2- Durcissement par affinement de la taille des grains :

Les métaux de structure C.C (cubique centré) , comme le fer et les aciers ont une limite d'Elasticité dont la valeur est inversement proportionnelle à la taille des grains , et qui est déterminée par la relation de **Hall – Petch** :

$$R_{e0.2} = \sigma_0 + K d^{1/2}$$

Où  $R_{e0.2}$  : est la limite d'élasticité conventionnelle

$\sigma_0$  :est la constante dont les dimensions sont celles d'une contrainte.

**K** : paramètre dépendant du matériau

**d** : taille moyenne des grains.

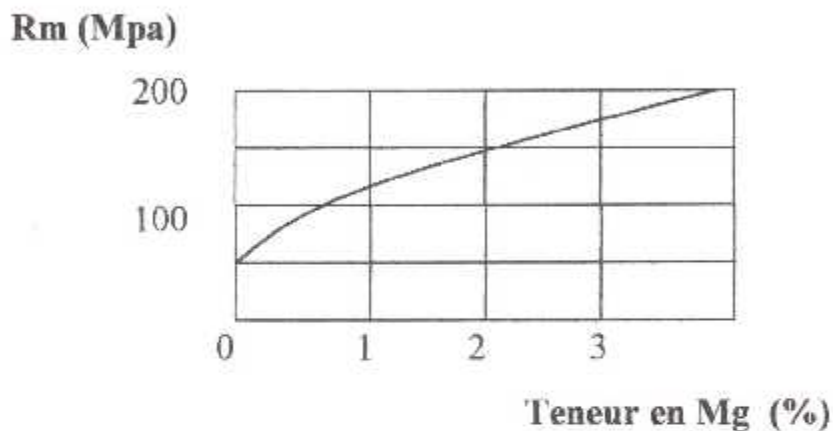
L'affinement de la taille des grains exerce une influence bénéfique sur la limite d'Elasticité et sur la résistance à la traction des aciers doux , sans pour autant diminuer leur ductilité ; par ailleurs , il améliore leur ténacité , en les rendant moins fragiles à basse température .

En ce qui concerne les métaux de structure C.F.C , la valeur de K est faible ; par conséquent , leurs propriétés mécaniques varient peu en fonction de la taille des grains .

### 3- Durcissement par solution solide :

Un alliage à des propriétés mécaniques supérieures à celles du solvant pur , même de faibles quantités de soluté peuvent exercer un effet important .

Ainsi, l'addition de 3% de magnésium dans l'aluminium multiplie par 3 la résistance à la traction de l'Aluminium (voir figure )



**Fig 3 : Durcissement par solution solide**

Les atomes en solution solide créent des distorsions qui engendrent un champ de contrainte dû à la différence de taille entre les atomes du soluté et les atomes du solvant .

Il y a interaction entre ce champ de contrainte et le champ associé aux dislocations , et la force nécessaire pour que se déplacent les dislocations augmente , car les atomes du soluté s'opposent au mouvement des dislocations .

Les atomes en solution solide d'insertion diffusent facilement dans la matrice , ils ont tendance à se loger autour des dislocations , ces dernières sont alors ancrées par les atomes interstitiels , et il leur devient très difficile , voire impossible de se déplacer.

#### + Durcissement structural :

On obtient le durcissement structural grâce à une série de chauffages et de refroidissement contrôlés, c'est à dire grâce à des traitements thermiques dont le but final est l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice. Les propriétés mécaniques des alliages ainsi traités dépendent de la répartition des précipités et de leur taille.

Lorsqu'on chauffe l'alliage à une température à laquelle tous les éléments d'addition sont dissous dans l'aluminium (entre 500 et 570°C), et ce pendant un temps suffisant pour que la dissolution soit complète, on obtient une solution solide homogène. Ce traitement s'appelle une mise en solution. On doit toujours effectuer une mise en solution à une température inférieure à la température du début de la fusion. Par ailleurs, lorsqu'on refroidit rapidement l'alliage à la température ambiante, sans laisser aux atomes des éléments d'addition le temps de diffuser, pour former des précipités  $\theta$ , on obtient une solution sursaturée. Un tel refroidissement s'appelle une trempe. On l'effectue le plus souvent en plongeant la pièce dans l'eau, dès sa sortie du four.

Cette solution sursaturée obtenue par trempe n'étant pas en équilibre, elle a toujours tendance à retourner vers l'équilibre, par précipitation des éléments d'addition sous forme de composés. Ce retour vers l'équilibre, très lent à la température ambiante, est plus rapide à une température plus élevée : c'est le vieillissement. Au cours de ce dernier, il y a modification des propriétés mécaniques. Dans un premier temps, la dureté augmente, atteint un maximum, puis diminue (voir figure 39); cela est dû à l'évolution de la taille des précipités et à leur nature, le précipité d'équilibre ne se forme pas en premier; il y a en effet d'abord formation des zones GP (Guinier - Preston), puis l'évolution de ce premier précipité vers la forme stable en passant par des formes intermédiaires métastables ( $\theta''$  et  $\theta'$ ). C'est aux zones G.P et aux précipités  $\theta''$  que correspondent les propriétés mécaniques les plus élevées.

Le traitement qui permet d'obtenir un durcissement structural comporte donc trois stades distincts :

- 1- Mise en solution à haute température ;
- 2- Trempe : baisse rapide de la température de mise en solution à la température ambiante , en vue d'obtenir une solution solide sursaturée ;
- 3- Vieillissement à une température inférieure à celle du solidus , en vue de favoriser un retour partiel vers les conditions d'équilibre et d'obtenir ainsi les propriétés mécaniques visées .[5]

Voir figure 14.



# *Chapitre* **IV**

*Phénomène de solidification*

## 1- Phénomène de solidification :

**D**u point de vue thermodynamique, la solidification est la transformation de l'état liquide à l'état solide, c'est donc un changement de phase qui apparaît lorsque la température décroît et atteint une valeur pour laquelle la phase liquide devient instable, donnant naissance à une ou plusieurs phases solides formant ainsi le nouvel état d'équilibre. [7]

Le phénomène de solidification passe obligatoirement par deux étapes essentielles qui sont :

- Germination
- La croissance

### 1-1 Germination :

La solidification d'un métal débute par la formation des germes qui sont appelés centres de cristallisation et se poursuit avec leur développement et l'augmentation de leur nombre.

Il y a deux types de germination :

- Germination homogène : c'est un groupement d'atomes possédant la configuration de la nouvelle phase et qui peuvent se développer au cours de la transformation, cette germination apparaît dans un système, structurellement, énergétiquement, chimiquement homogène.
- Germination Hétérogène : c'est une germination qui a lieu au voisinage d'une imperfection (inclusion, dislocation, joint de grains, parois ...).

#### 1-1-1 Théorie classique de la germination :

Cette théorie repose sur l'évaluation de la stabilité et des possibilités de croissance d'un germe de la nouvelle phase en fonction de la dimension de ce germe.

Supposant le germe sphérique et de rayon " $r$ ", on a :

L'enthalpie libre volumique :

$$\Delta G_v = 4/3\pi r^3 (G_B - G_A)$$

Avec  $(G_B - G_A)$  : Enthalpie libre volumique /Unité de volume

**B** : nouvelle phase

**A** : phase initiale

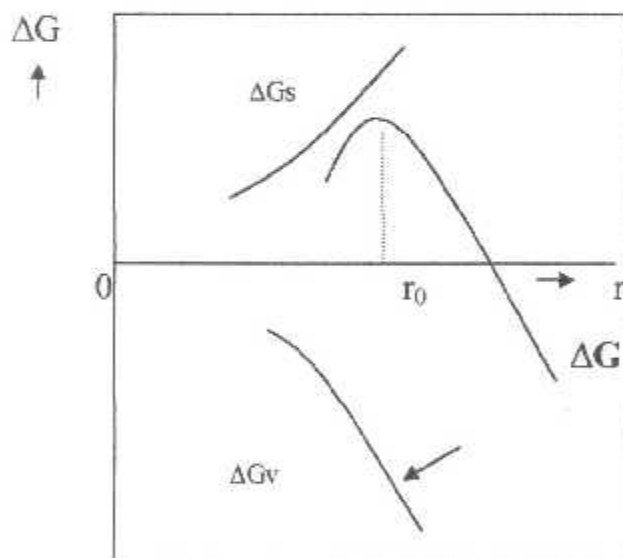
L'enthalpie libre de surface :

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \cdot \sigma$$

$\sigma$  : Enthalpie libre de surface de l'interface A/B /unité de surface

La variation globale d'Enthalpie libre liée à la formation du germe s'écrit donc :

$$\Delta G = 4/3 \pi r^3 (G_B - G_A) + 4\pi r^2 \cdot \sigma$$



**Fig 4** : variations schématiques de  $\Delta G$  accompagnant la formation d'un germe d'une nouvelle phase

Si on observe la figure, elle représente un maximum pour une valeur  $r_0$  de  $r$  donnée par la relation :

$$d(\Delta G)/dr = 4\pi r^2 (G_B - G_A) + 8\pi r\sigma = 0$$

Ce qui conduit à :

$$r_0 = -2 \sigma / G_B - G_A = -2\sigma / \Delta G (A \rightarrow B) \dots (1)$$

Or :  $\Delta G (A \rightarrow B)$  dépend de la température autrement dit, La valeur  $r_0$  dépend aussi de la température.

Si  $r < r_0$

On a  $d\Delta G / dr > 0 \Rightarrow$  si  $r$  augmente on a un accroissement de  $\Delta G$  du système, ce qui est un événement hautement improbable.

Au contraire, pour  $r > r_0$

On a  $d\Delta G / dr < 0$  ce qui signifie que lorsque  $r$  augmente  $\Rightarrow \Delta G$  diminue, c'est à dire un accroissement de la stabilité. En résumé, si l'on considère à une température donnée une population de germes de rayons quelconques. Ceux dont le rayon est inférieur à  $r_0$  tendront à disparaître, tandis que seuls ceux dont le rayon est supérieur à  $r_0$  se développeront.

L'enthalpie libre  $\Delta G$  de la transformation, supposée accomplie à une température  $T$ , peut s'écrire :

$$\Delta G_{(A \rightarrow B)} = (H_B - H_A) - T (S_B - S_A)$$

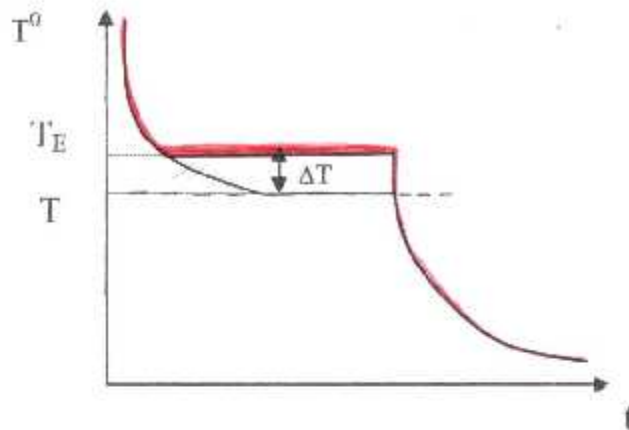
Si l'on tient compte du fait qu'à la température d'équilibre  $T_E$  :

$$\Delta G_{(A \rightarrow B)} = 0, \text{ on a : } S_B - S_A = (H_B - H_A) / T_E,$$

et on supposant  $\Delta S$  et  $\Delta H$  indépendants de la température, ce qui est acceptable tant que  $T$  reste proche de  $T_E$ , on aboutit à la relation :

$$\Delta G_{(A \rightarrow B)} = \Delta H - T \Delta H / T_E = \Delta H (T_E - T) / T_E = \Delta H \cdot \Delta T / T_E \dots\dots(2)$$

$\Delta T \rightarrow$  **Surfusion** : Etant l'écart de la température du système par rapport à la température d'équilibre.

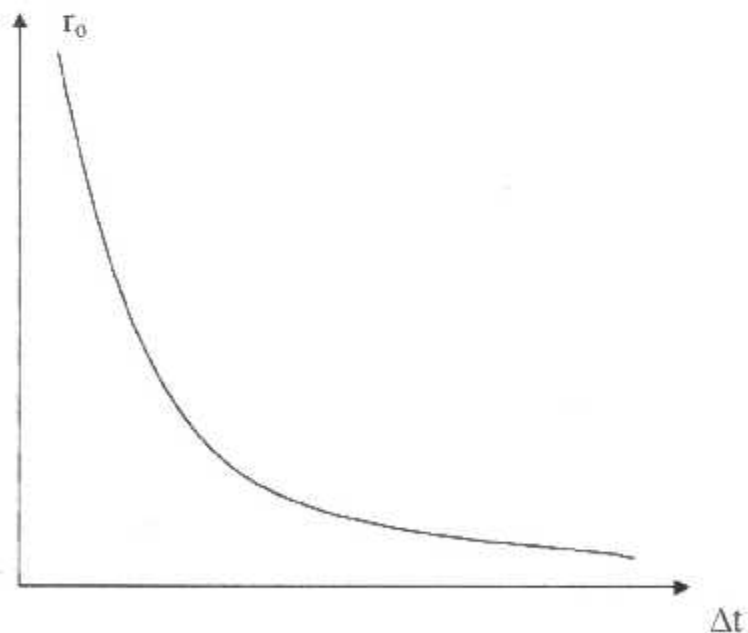


**Fig 5 : Surfusion**

Si l'on porte (2) à (1), il vient :

$$r_0 = -2\sigma / \Delta G_{(A \rightarrow B)} = -2\sigma \cdot T_E / \Delta H \cdot \Delta T$$

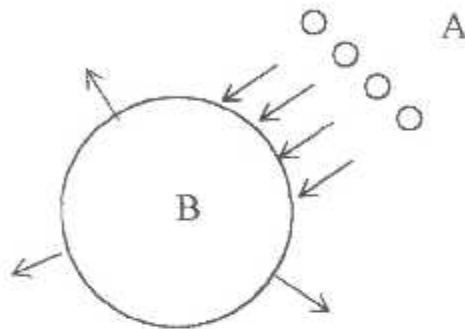
En supposant  $\sigma$  indépendant de  $T$ , la variation de  $r_0$  en fonction de  $\Delta T$  est hyperbolique .



**Fig 6 : Croissance du germe**

### 1-2 Croissance :

La croissance est l'étape suivante à la germination , elle est proportionnelle à la vitesse d'évacuation de la chaleur ,La taille du germe étant supérieure à la taille critique , le rend stable et apte à se développer et l'augmentation de ses dimensions entraîne la diminution de l'énergie libre du système .



**Fig 7 : Accumulation des atomes sur l'interface d'un germe en croissance**

La vitesse de déplacement de l'interface est la vitesse d'accumulation des atomes sur la surface du cristal B

La relation de la vitesse est la suivante :

$$V = \lambda P N_S \gamma A_* (e^{-G(A-B/KT)} - e^{-G(B-A/KT)})$$

Avec  $\lambda$  : Volume d'un atome

**B** : Nouvelle phase (solide)

**A** : Phase liquide

**P** : Probabilité pour qu'une vibration ait lieu dans la bonne direction

**A\*** : Coefficient d'accommodation de B

$\gamma$  : Fréquence de vibration

$N_S$  : nombre d'atome par unité de surface

$e^{-G(A-B/KT)}$  : Facteur énergétique

## 2- Structure générale de solidification :

Une pièce brute de solidification présente en général trois zones distinctes dont la formation dépend des conditions de refroidissement : une zone de peau, une zone colonnaire et une zone équiaxe .

### 2-1 Zone de peau :

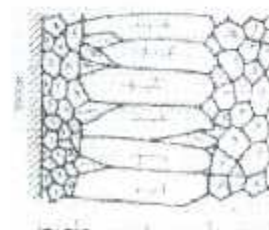
Quand le métal en fusion entre en contact avec un moule dont la température est de loin inférieure à celle du liquidus, il est brusquement refroidi, et la germination s'y fait rapidement. Il se forme alors dans le métal un réseau de nombreux cristaux dendritiques orientés au hasard .

### 2-2 Zone colonnaire :

Une fois la zone de peau formée le gradient de température dans le liquide diminue. La croissance dendritique des grains se poursuit, mais ceux dont les dendrites ont un axe parallèle au flux de chaleur croissent plus rapidement que les autres ; dans la zone colonnaire, les grains ont tous la même orientation et la même section.

### 2-3 Zone équiaxe :

En fin de solidification, l'évolution de la zone colonnaire est limitée par la germination de nombreux cristaux au sein du liquide restant, qui est totalement en surfusion, cette germination est hétérogène. Dans cette zone, les grains sont orientés au hasard, d'où le qualificatif d'équiaxe . [5]



**Fig 8 : a) structures de Solidification**

**b) différentes zones**

### 3- Défauts dus à la solidification :

#### 3-1 Ségrégation :

Ce défaut résulte tout à la fois de l'hétérogénéité de la composition chimique d'un alliage et d'une accumulation des impuretés en différentes parties de la pièce.

On distingue :

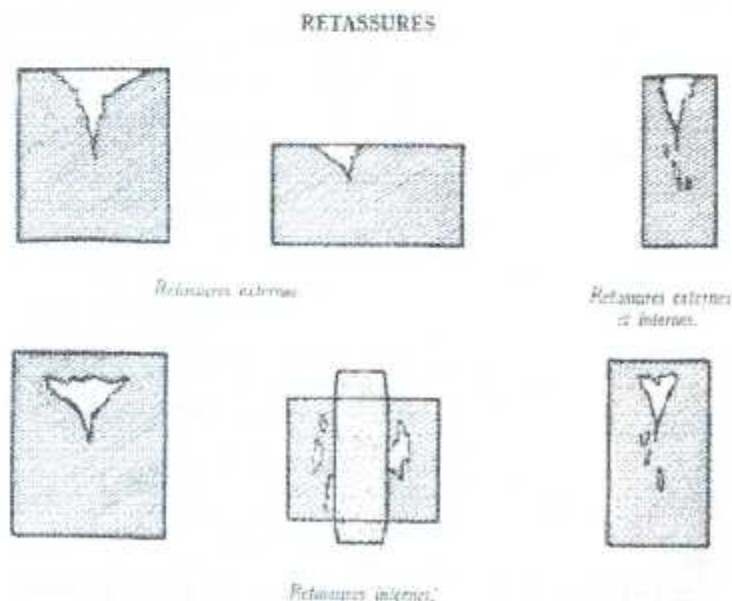
- Ségrégation mineure : c'est une hétérogénéité interne de la composition des cristaux.
- Ségrégation majeure : c'est l'hétérogénéité chimique suivant les zones du lingot.

#### 3-2 Retrait :

c'est la diminution de volume du métal lors de la solidification .

##### 3-2-1 Retassures :

La retassure, soit une cavité, apparente ou invisible, soit un groupe de cavités provoquées par la contraction du métal coulé dans l'empreinte considérée.

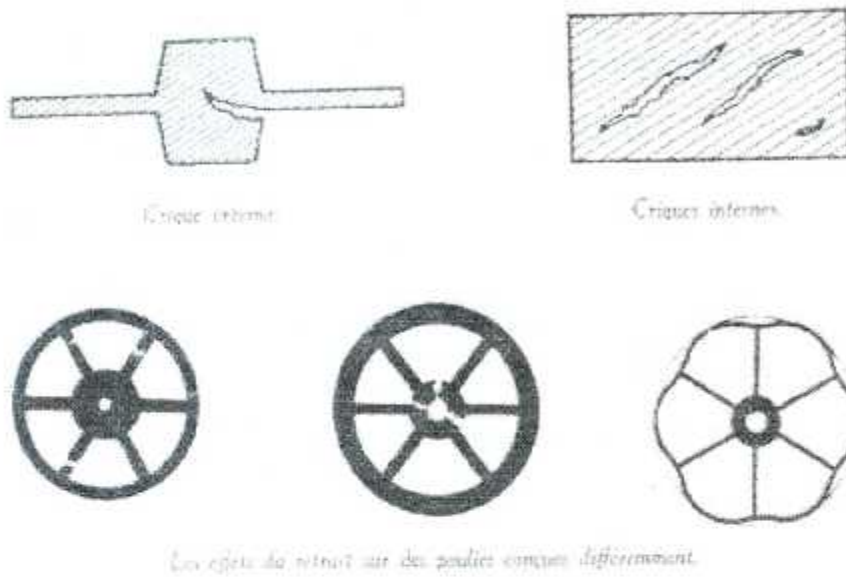


**Fig 9 : Les retassures**



### 3-2-2 Criques :

Ces défauts se produisent en surface ou à l'intérieur. Ils sont caractérisés par des fissurations peu profondes cheminant le long des grains de métal. Elles sont dues à une gêne de retrait linéaire .[4]



**Fig 10 : criques**

*Partie*

*Expérimentale*

# Chapitre V

## *Techniques Expérimentales*

## Introduction

Notre travail consiste à étudier l'influence de la substitution du Magnésium par le Manganèse et le Silicium sur le durcissement des duraliminax (alliages du type Al-Mg).

Les échantillons d'alliages faisant l'objet de notre étude ont été élaborés, traités thermiquement et caractérisés par les essais de dureté VICKERS et microscopie optique.

les étapes de ce travail se sont déroulées en majeure partie à l'institut d'Aéronautique essentiellement au niveau du :

- Laboratoire de Micro fonderie
- Laboratoire de Métallographie
- Laboratoire de Résistance des matériaux

Et en partie à l'institut de Chimie.

1- Elaboration des matériaux :1-1 Matériaux Elaborés :

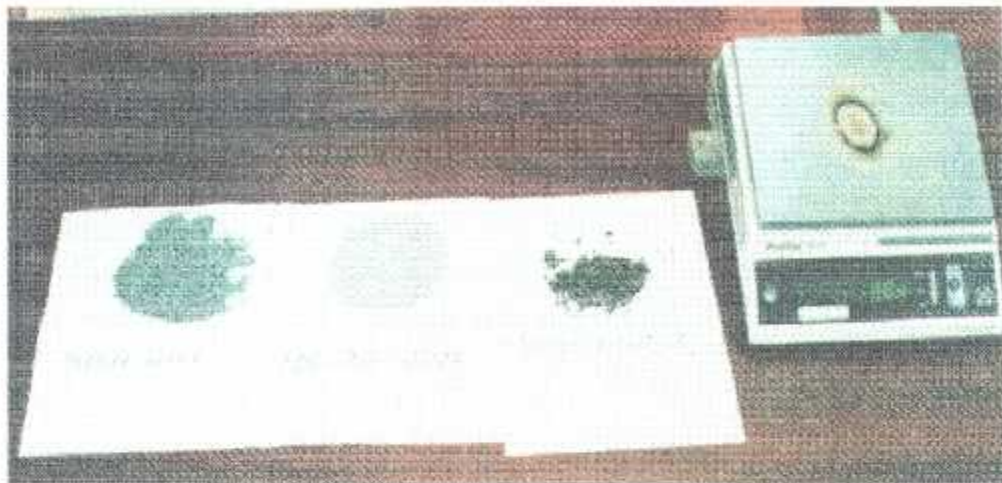
Les échantillons élaborés possèdent les compositions en éléments d'additions comme suit :

Eléments d'addition Alliages	% Mg	% Mn	% Si
AG1	1%	-	-
AG2	2%	-	-
AG3	3%	-	-
AG4	4%	-	-
AG5	5%	-	-
AG2M1	2%	1%	-
AG3M1	3%	1%	-
AG5M1	5%	1%	-
AG1S0,6	1%	-	0,6%
AG1S0,9	1%	-	0,9%

## 1-2 Matériels et produits:

### 1-2-1 Produits :

- Lingot d'Aluminium pur (99,9%)
- Magnésium pur (98%) en poudre
- Manganèse pur (99,9%) en poudre
- Silicium à 10% de Fer, en poudre
- Produits de poteyage et d'affinage



**Fig 11 : Eléments d'addition**

### 1-2-2 Matériels :

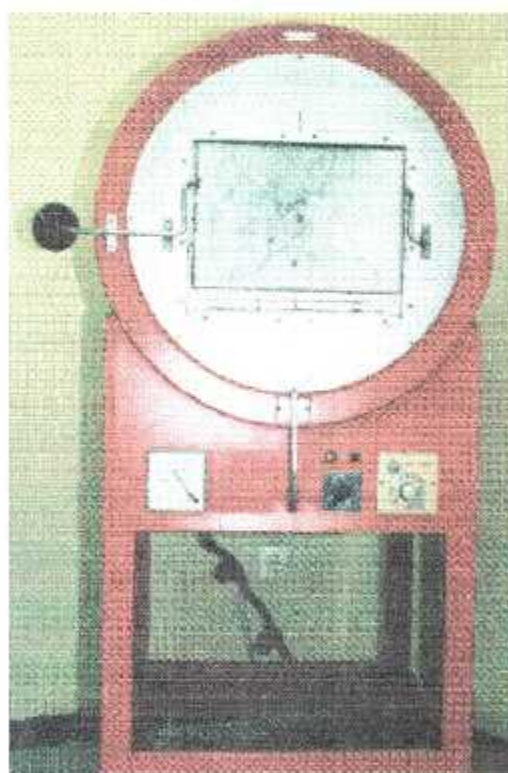
- Four à induction (atteint 1300°C)      figure 12 a)
- Creusets en acier dur                      figure 12 b)
- Moule en coquille                            figure 13
- Tronçonneuse
- Enrobeuse                                      figure 17
- Appareil de polissage                      figure 18
- Microscope                                    figure 20
- Duromètre                                      figure 16

### 1-3 Techniques opératoires :

L'élaboration est une opération difficile à réaliser, car plusieurs paramètres influent sur le bon déroulement de cette opération, laissant ainsi un impact direct sur le produit final.

**1-3-1 Le potevage** : se sont les enduits dont on recouvre les parois des moules et creuset ainsi que le louchet, qui sont en contact avec le métal liquide pour éviter les risques de diffusion des atomes de Fer dans le bain de fusion, ce qui pourrait altérer les propriétés de l'alliage .

**1-3-2 La fusion** : cette étape permet le changement de phase de l'alliage d'un état solide à l'état liquide.



**Fig 12 :**      a) Four à induction

b) Alliage en fusion

**1-3-3 Temps de maintien** : le temps de maintien est le temps nécessaire à la stabilité de la température et aussi le temps nécessaire pour une bonne diffusion des éléments d'additions.

1-3-4 L'Affinage : l'affinant est un produit favorisant la germination hétérogène et contribue à l'affinement des grains.

Dans nos expériences, l'affinant utilisé est le COVERAL.

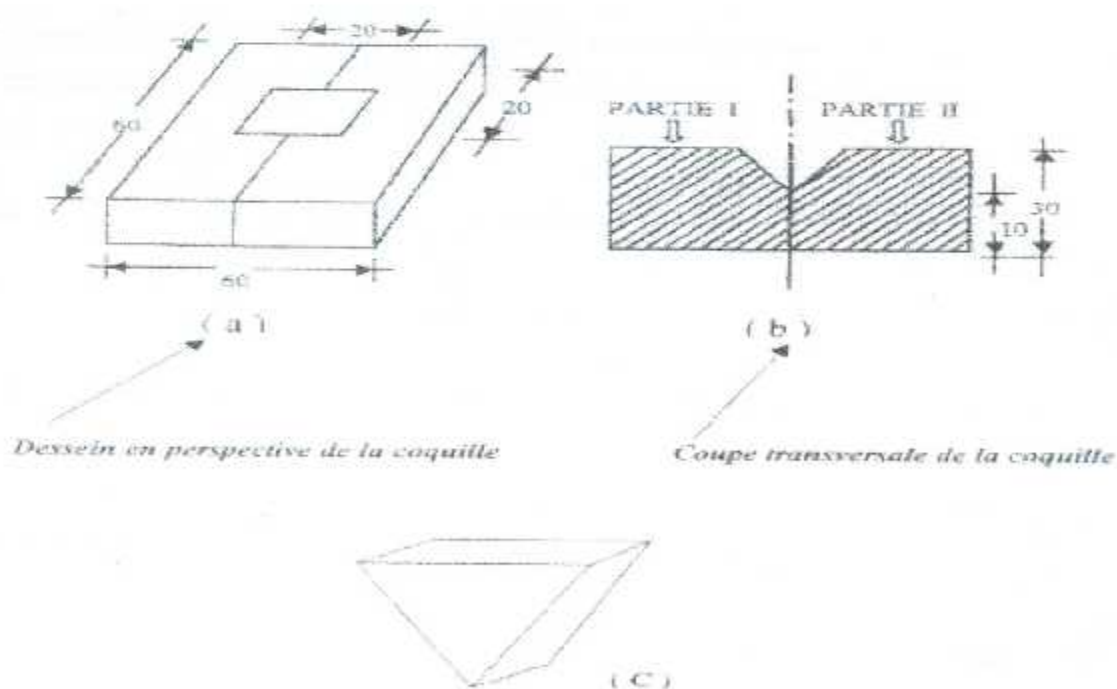
1-3-5 La coulée en coquille par gravité : le moule métallique est réalisé généralement en fonte, il est constitué d'au moins deux parties métalliques dont l'assemblage, reproduisant les formes extérieures de la pièce, permet le moulage, la coulée et le démoulage de la pièce.



**Fig 13 :**

**a) Coquille**

**b) Coulée en coquille**



*Dessain en perspective de la coquille*

*Coupe transversale de la coquille*

**c) Dimensions de la coquille**



### 1-4 Opération d'Elaboration :

Cette opération comporte plusieurs étapes :

1-Découpage du lingot d'Aluminium par une scie mécanique

2-Nétoyage des creusets, louche et coquille

3-Préparation des masses et des produits de base

- Pesage des masses des éléments d'addition
- Pesage des masses de base { Décrassant : 1% de la charge  
  { Affinant : 0,5 % de la charge

#### 1-4-1 Méthode de calcul des pourcentages d'éléments d'addition :

Pour ajouter à l'Aluminium les pourcentages de Magnésium, Manganèse et Silicium, on procède comme suit :

- Soit :
- $m$  : la masse de l'Aluminium dans le creuset
  - $x$  : le pourcentage des éléments d'addition

La masse ( $M$ ) recherchée de l'élément d'addition est donnée par la formule :

$$\begin{array}{ccc} (100-x) \text{ (g)} & \longrightarrow & x \text{ (g)} \\ m & \longrightarrow & M \end{array}$$

$$\mathbf{M = m.x / (100-x)}$$

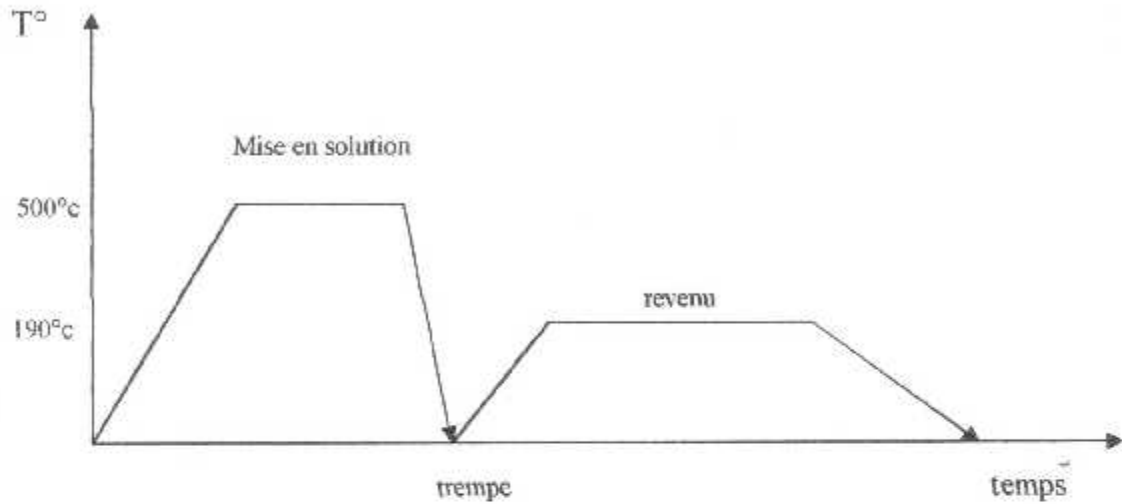
#### 1-4-2 Méthode Sandwich :

Cette méthode consiste essentiellement à emprisonner l'élément d'addition au milieu de l'Aluminium. Pour cela il faut verser la demi quantité de l'Aluminium dans un deuxième creuset, ajouter l'élément d'addition puis ajouter le reste de l'Aluminium et laisser le bain de fusion 5 minutes dans le four afin d'avoir une bonne diffusion des éléments d'addition.

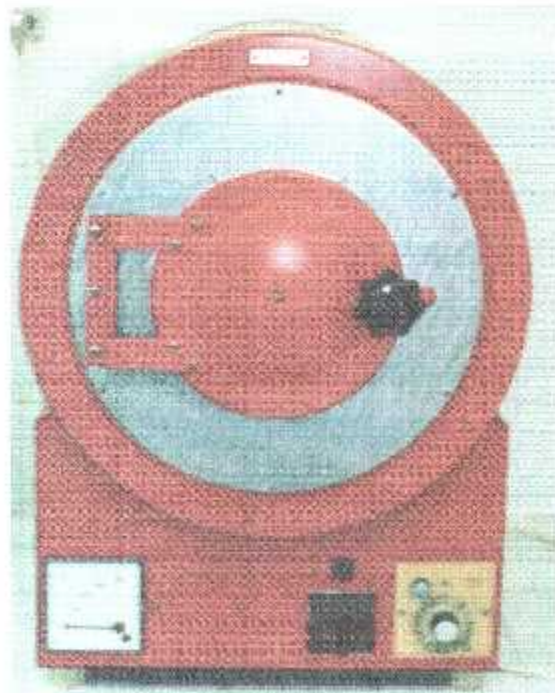
### 1-5 Traitement thermique :

Les échantillons qui ont subi un traitement thermique sont : AG3, AG2M1 et AG1S0,9.

Ces derniers sont soumis au cycle thermique suivant :



**Fig 14 : Cycle thermique**



**Fig 15 : Four à traitement thermique**

**1-5-1 Mise en solution** : La mise en solution des échantillons est effectuée à une température de 500°C pendant une durée de 1 heure.

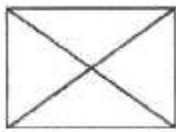
**1-5-2 Trempe** : La trempe est faite dans de l'eau (20°C). La durée entre la sortie du four et la trempe est très minime.

**1-5-3 Revenu** : Le revenu est effectué à la température de 190°C avec différentes durées de maintien. Le refroidissement après revenu est à l'air libre.

1-6 Essais mécaniques :1-6-1 Dureté :

On applique sur la surface du métal la pointe d'une pyramide en diamant à base carrée, et l'on mesure la surface de l'empreinte permanente qui en résulte.

La dureté VICKERS est égale au quotient de la charge exprimée en Kgf par la surface de l'empreinte exprimée en  $\text{mm}^2$ .

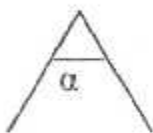


$$H_v = 2 P \sin(\alpha/2) / D^2 = 1,8544 P / D^2$$

P : Charge en Kgf

D : Diagonale de l'empreinte en mm

$\alpha$  : Angle d'ouverture de la pyramide



$$\alpha = 136^\circ$$



**Fig 16 : Duromètre**

## 1-7 Techniques métallographiques :

1-7-1 Principe : L'observation d'un échantillon poli et attaqué se fait au microscope métallographique ou électronique. La micrographie est surtout destinée à mettre en évidence les constituants d'un alliage.

### 1-7-2 Techniques :

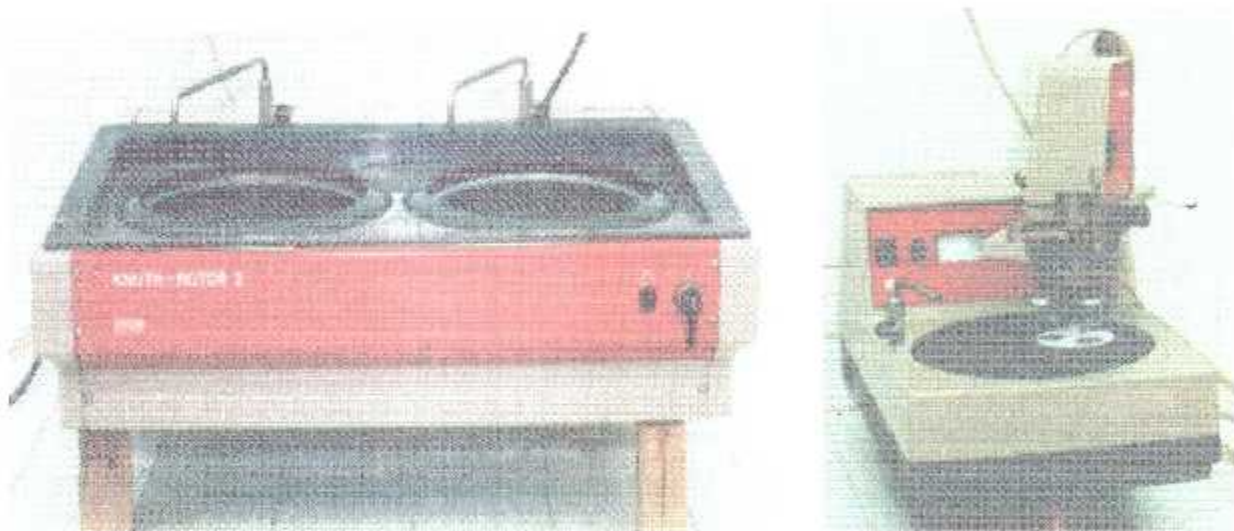
1-7-2-1 Enrobage : Comme les échantillons sont de petites dimensions, nous les avons enrobés dans une matière thermodurcissable (résine 5) qui leur sert de support et à fin que leur utilisation soit plus aisé.



**Fig 17 : Appareil d'Enrobage**

**1-7-2-2 Polissage** : La face de l'échantillon destinée à l'observation microscopique doit être polie dans un premier temps par des disques abrasifs constitués par des grains de carbure de silicium de différentes granulométrie (figure 18a).

Une étape suivante de finition consiste à faire soumettre l'échantillon à un polissage plus fin (état miroir) à l'aide d'une pâte diamantée ou aluminée étalée sur un disque en velours. Ce polissage s'effectue sur une polisseuse rotative (figure 18b).



**Fig 18 :**            a) Polisseuse

b) Polisseuse automatique

**1-7-2-3 Attaque** : Les réactifs chimiques employés sont très nombreux. Dans notre cas le réactif est une solution à plusieurs acides :

- 25 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O
- 15 cm<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>
- 45 cm<sup>3</sup> HCl (12N)
- 15 cm<sup>3</sup> HF (48%)

Après l'attaque, la pièce est abondamment lavée aux ultrasons puis séchée.



**Fig 19** : Appareil de nettoyage par ultrasons

#### 1-7-2-4 Observation :

**Microscope métallographique** : il est analogue à un microscope optique de biologie mais l'échantillon, opaque aux rayons lumineux, est éclairé par réflexion. Le microscope comporte une source lumineuse, des objectifs interchangeable, un oculaire d'observation, un oculaire photographique.

**Le grossissement** : rapport de la longueur de l'image observée à la longueur de l'objet correspondant.

Les grossissements utilisés dans notre cas vont de 50 à 1000.



**Fig 20** : Microscope métallographique

# *Chapitre* **VI**

*Résultats et interprétation*



### 1- Caractérisation macroscopique :

L'examen visuel des différents produits élaborés montre que l'aptitude du métal liquide à épouser les limites angulaires d'un moule métallique fait défaut dans les alliages Al-Mg.

Cet aspect, caractérisant la mauvaise coulabilité de ces derniers est nettement amélioré par l'addition du Silicium. Par ailleurs et avec l'ajout du Manganèse, bien que l'anéantissement du défaut de coulabilité soit absent, une légère réduction de ce dernier se confirme dans plusieurs échantillons coulés.

Dans notre étude les résultats ne sont pas très significatifs sur le plan quantitatif et des travaux ultérieurs dans ce sens s'avèrent très recommandés.



**Fig 21** : Etude de l'effet du Mn et Si sur la coulabilité de l'Al-Mg

## 2- Caractérisation microscopique :

### 2-1 Alliage Aluminium-Magnésium :

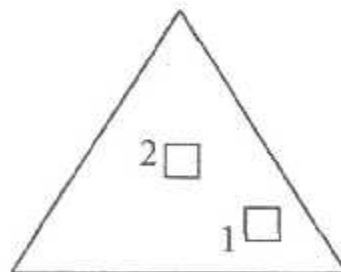
L'expérience nous a montré que si l'échantillon est soigneusement poli, puis attaqué 5 à 10 secondes par une solution à plusieurs acides, l'examen microscopique révélera aussi bien les différences de contrastes entre les grains et joints de grains que les détails à l'intérieur du grain lui-même.

Le phénomène de la micro ségrégation est particulièrement bien mis en évidence dans les alliages Al-Mg.

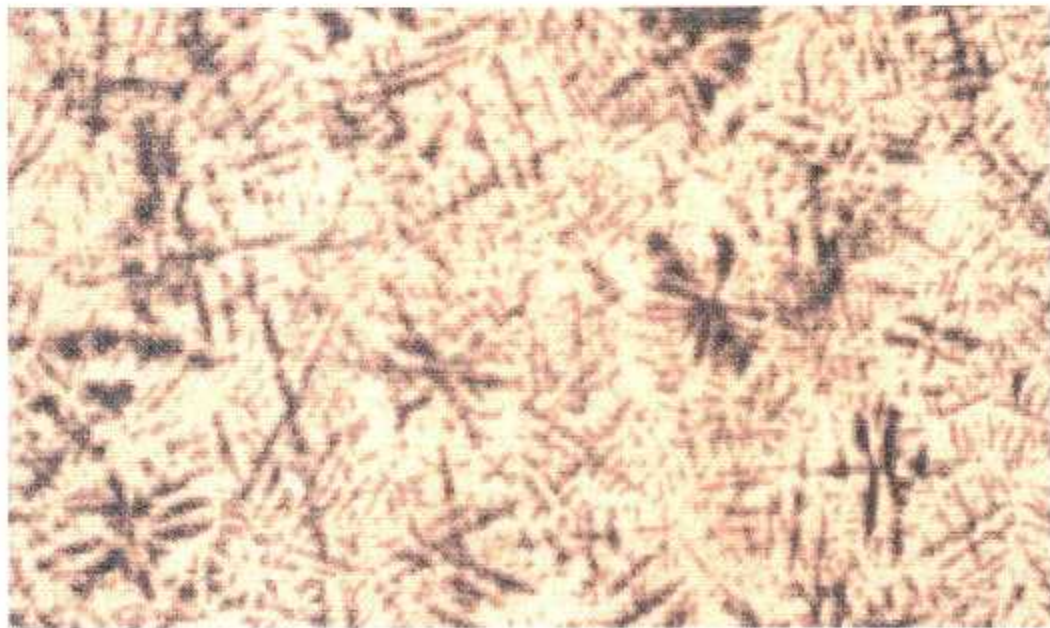
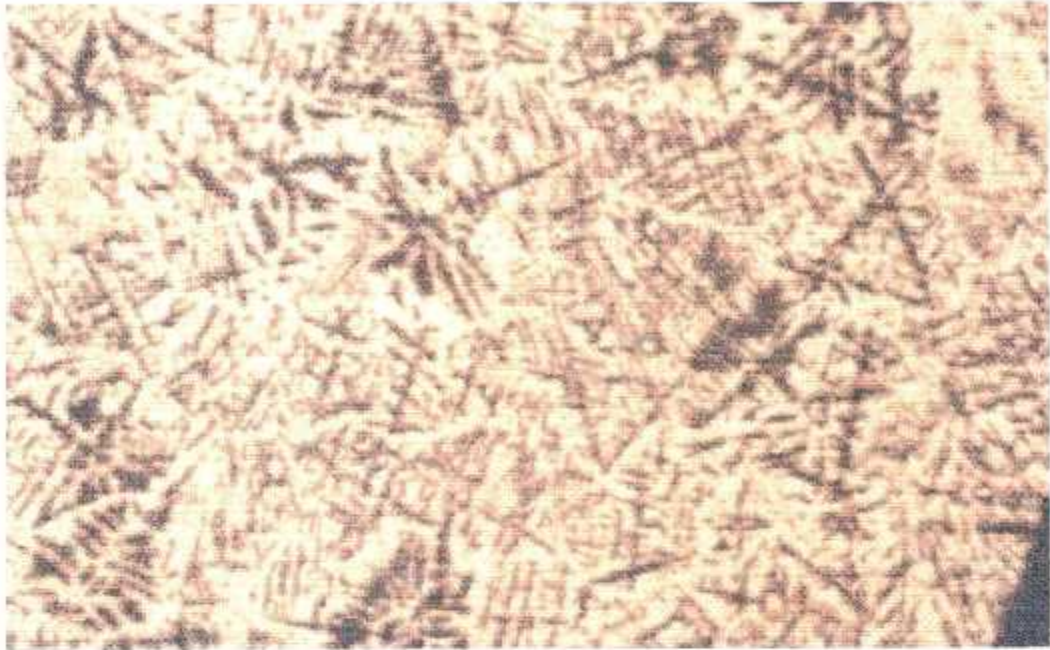
Ce phénomène se manifestant par une structure dendritique représente des irrégularités de composition qui résultent ici, d'une distribution inégale du Mg dans l'Aluminium (figure 23).

Il faut bien noter que la forme de la dendrite varie suivant que la section coupe cette dernière longitudinalement ou transversalement. En outre, le sens du refroidissement joue un rôle déterminant dans l'orientation de l'axe principal de la dendrite, en effet, ce dernier est celui de la direction d'extraction de la chaleur qui n'est autre que la direction [001]. [5]

Le schéma ci-dessous montre les positions de prises de micrographie 1 et 2 correspondant à la figure 31 sur la section plane de l'échantillon.



Dans le premier cas des dendrites apparaissent coupées longitudinalement et orientées préférentiellement vers le côté droit de l'échantillon, direction à laquelle l'extraction de la chaleur est plus accentuée (figure 22). Dans le second on remarque que des dendrites sont orientées perpendiculairement au plan de section.



**Fig 22 : Répartition des dendrites (x 50)**



Direction de l'axe de la dendrite



**Fig 23 : Position (1) -Dendrites -(x 200)**

Par ailleurs, au cours de notre observation des deux précédents microstructure, une problématique fût apparu et qui se résume comme suit :

Les dendrites sont de couleur brun insérées dans une matrice  $\alpha$  (claire) (figure 26), cette différence de teinture indique que la quantité du soluté Mg est plus prononcée dans les dendrites que dans les zones adjacentes ce qui est contraire au phénomène de micro ségrégation (les dendrites en se solidifiant les premiers repoussent le soluté dans les zones avoisinantes encore liquide).

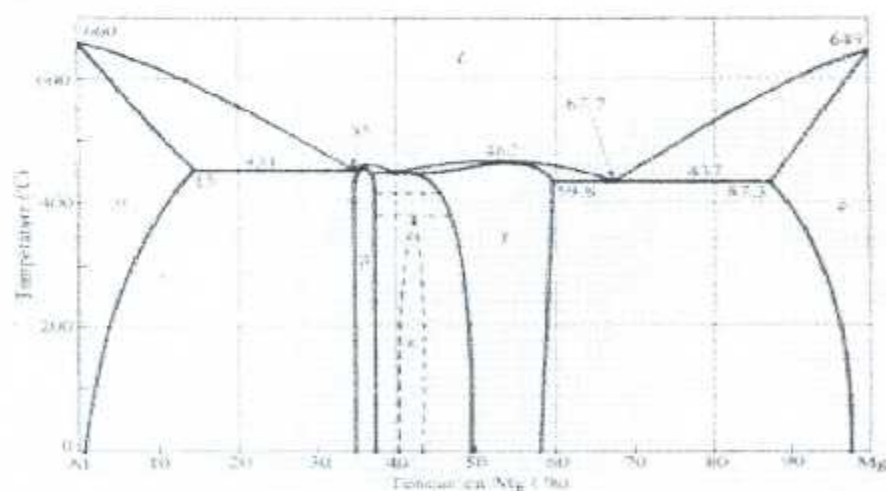
Une analyse globale de la structure nécessitant un fort grossissement nous révèle des indices importants.

La micrographie de la figure 25 montre que la région inférieure de l'échantillon (sommet A) en se solidifiant la première et à vitesse élevée repousse le soluté vers le haut en formant une région globalement riche en Mg.

L'examen à fort grossissement montre que les zones extérieures aux dendrites sont le siège d'une précipitation. Les précipités apparaissent sous forme de particules arrondies et noirâtre et se retrouvent beaucoup plus présentes sur les joints de grains qu'à l'intérieur du grain lui même (figure 26).

Cette précipitation préférentielle inter dendritique entraîne un appauvrissement en soluté de ces régions qui sont de ce fait plus clair.

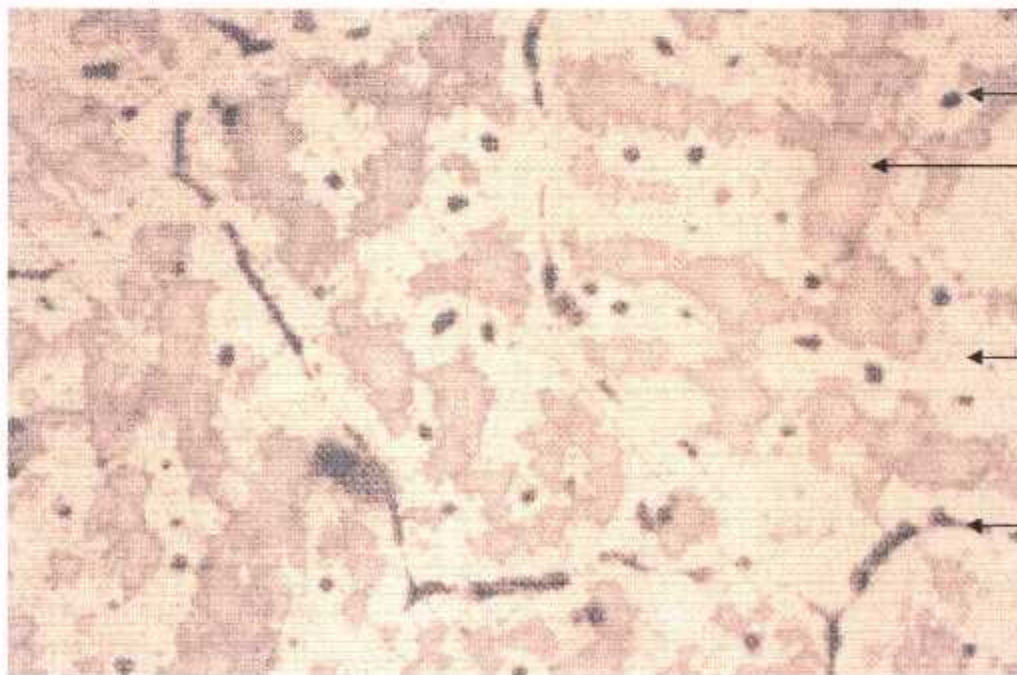
En fait, ces précipités et d'après le diagramme des phases ne peuvent être que des composés  $Mg_2Al_3$ .



**Fig 24 : Diagramme d'équilibre Al-Mg**



**Fig 25: Solidification dans la région inférieure (x 50)**



précipité

Axe dendritique

Matrice  $\alpha$

Joint de grain

**Fig 26 : Grains et joint de grain (x 500)**

**En conclusion :**

La micro ségrégation est un phénomène se produisant autour de la solidification c'est à dire entre la ligne des solidus et liquidus, alors que la précipitation se produit après solidification, autrement dit au-dessous du solidus.

## 2-2 Effet du Manganèse :

On remarque dans ce cas que la fréquence de modulation de la composition (l'alternance de zones sombres et claires) est plus élevée que celle de structures précédentes (figure 27).

La structure a tendance à s'homogénéiser et la ramification des branches dendritiques se fait en stries et remplit pleinement le grain.

D'autre part le Manganèse semble avoir un effet antagoniste à celui de l'élévation de la vitesse de refroidissement, en effet, la structure paraît semblable dans le cœur que les frontières de l'échantillon, autrement dit le Manganèse ralentit le pouvoir de germination par surfusion.



**Fig 27 : Structure homogène en présence du Manganèse (x 100)**

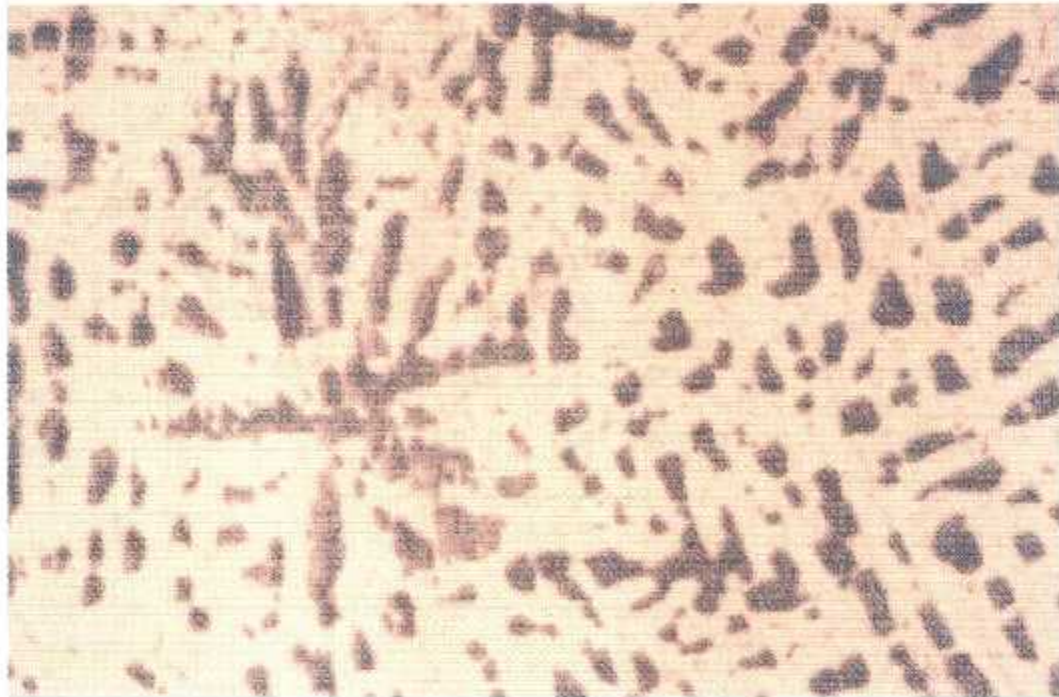


### 2-3 Effet du Silicium :

Nous assistons ici à la dégénérescence des dendrites (figure 28). Notre interprétation à ce phénomène est la suivante :

La présence du Silicium favorise la formation du précipité  $Mg_2Si$ . La quantité du Magnésium nécessaire à cette formation ne peut être récupérée uniquement dans la phase  $\alpha$  (déjà appauvrie par la formation du précipité  $Al_2Mg_3$ ) ;

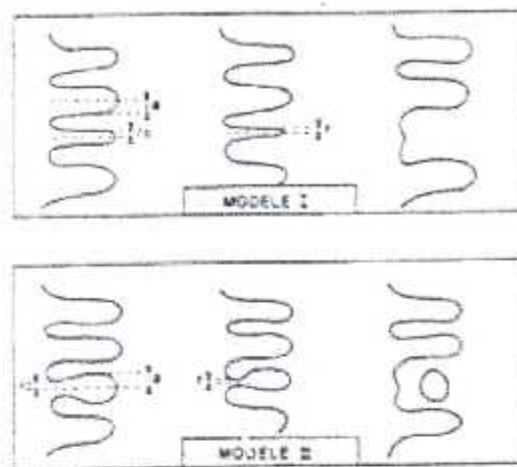
Pour cela un apport supplémentaire provient de la dendrite provoquant ainsi sa destruction.



**Fig 28 : Dégénérescence des dendrites avec l'ajout du Silicium (x 200)**

Pour ce qui est du mécanisme de fractionnement de la dendrite, plusieurs modèles sont proposés entre autre :

- La dissolution des branches les plus fines au profit des plus grosses.
- Le détachement de certaines branches minces par refusions du pédoncule qui les relie à l'axe primaire.

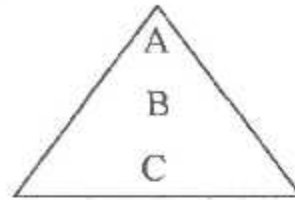


**Fig 29** : Détachement des branches dendritiques

### 3- Etude comparative du durcissement par effet des additions :

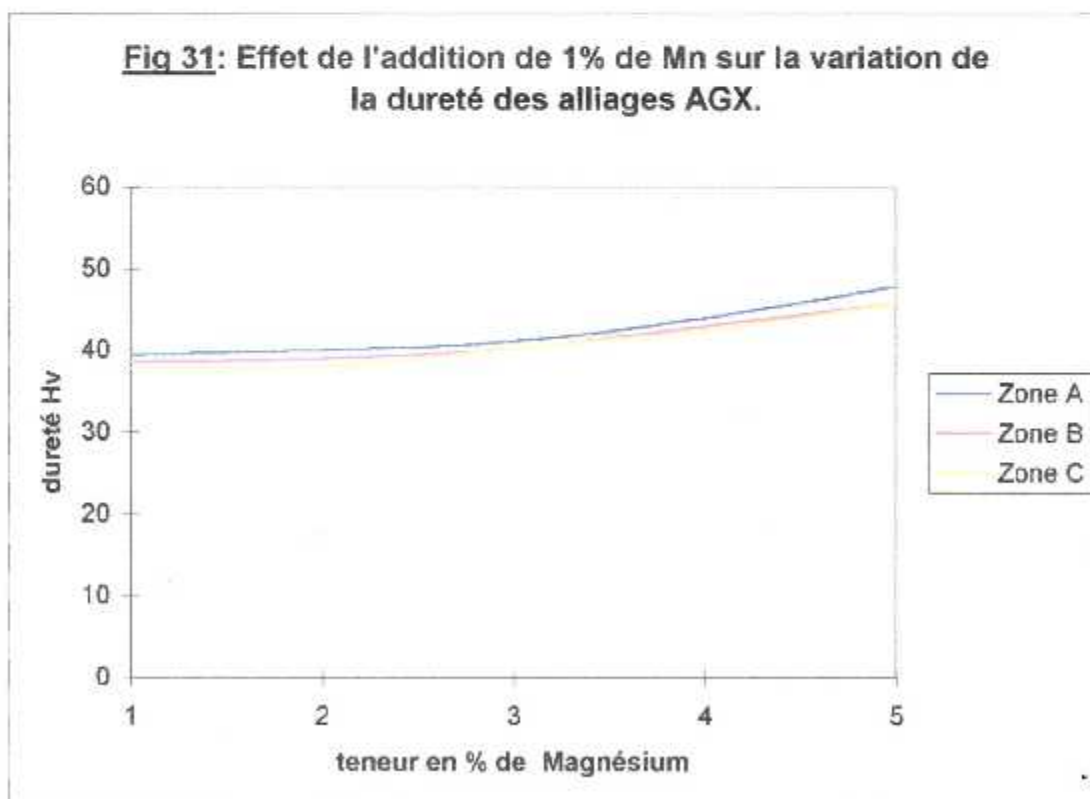
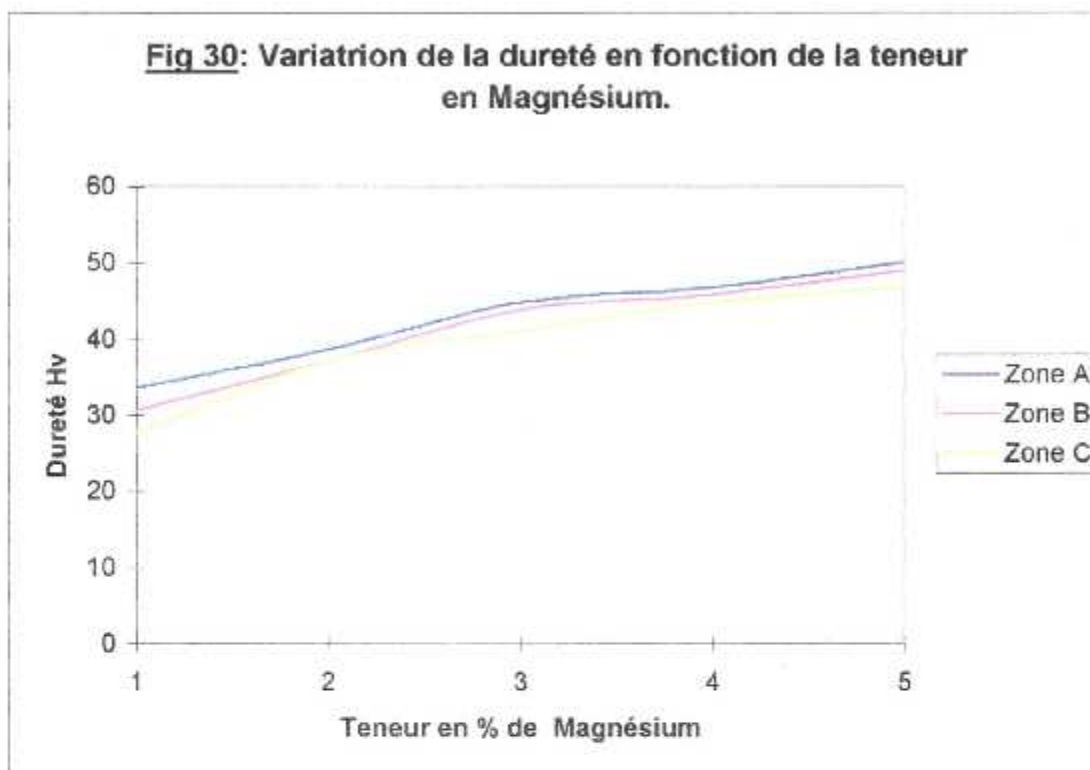
#### 3-1 Tableau des résultats :

Les résultats de dureté VICKERS obtenus dans les trois zones A, B et C sont dans le tableau suivant :

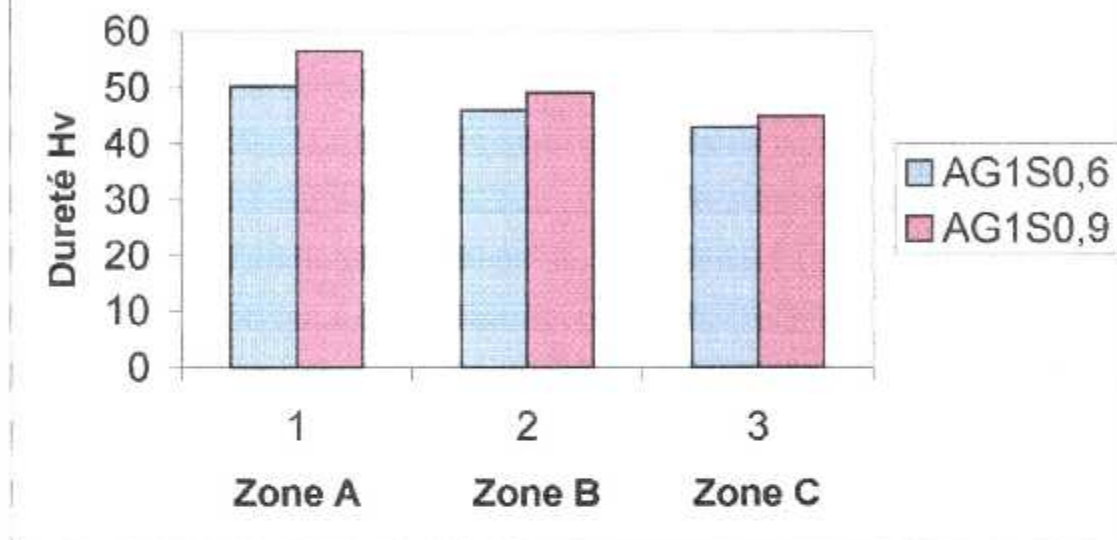


zones alliage	Zone A	Zone B	Zone C
Al pur	25,8	25,8	24,9
AG1	33,6	30,6	27,6
AG2	38,6	37,1	37,1
AG3	44,8	43,8	41,1
AG4	46,8	45,8	44,8
AG5	50,1	49,0	46,8
AG1M1	39,4	38,6	37,8
AG3M1	41,1	40,2	40,2
AG5M1	47,9	45,8	45,8
AG1S0,6	50,1	45,8	42,9
AG1S0,9	56,5	49,0	44,8

Tableau I

3-2 Courbes :

**Fig 32: Influence du Silicium sur le durcissement de l'alliage AG1.**



### 3-3 Interprétations :

#### 3-3-1 Effet du Magnésium :

L'ajout du magnésium influe nettement sur l'augmentation de la dureté (figure 30). En effet, les atomes de magnésium se trouvant en majeure partie dans la solution solide exercent un effet durcissant important par formation de distorsions dans le réseau cristallin dues à la différence de taille entre les atomes du solvant et du soluté.

La répartition de ces distorsions au sein de la structure constituant ainsi des obstacles au déplacement des dislocations (voir chapitre III).

#### 3-3-2 Effet du Manganèse :

La substitution d'une partie de magnésium par le manganèse entraîne une diminution de durcissement. On peut se rendre compte de cet effet, en comparant les valeurs obtenues pour les deux nuances AG4 et AG3M. Ceci s'explique par le fait que le manganèse possédant une faible solubilité en solution solide, se trouve en grande partie sous forme de précipité  $Al_6Mn$  ; La dispersion de ce dernier provoque un effet durcissant. Le magnésium, par contre possédant une limite de solubilité relativement supérieure à celle du manganèse, se localise dans la solution solide et produit un durcissement plus important.

D'autre part, on remarque que l'écart entre les duretés des trois zones A, B et C est très réduit ; Ce qui nous permet de dire que le manganèse exerce un effet antagoniste à celui de la vitesse de refroidissement.

Cet effet est traduit par une certaine homogénéisation structurale dans la micrographie (figure 27).

#### 3-3-3 Effet du Silicium :

L'accroissement de la dureté est très prononcée par l'addition du silicium (figure 32). La quantité de silicium dans l'alliage AGS0,6 est choisie de telle façon que le rapport  $Mg/Si$  serait pratiquement égal à 1,7 ; valeur correspondante au même rapport dans les précipités  $Mg_2Si$ , lesquels leur dispersion dans l'alliage empêche le déplacement des dislocations et provoque un durcissement.

L'addition du Silicium à des teneurs plus élevées (cas du AGS0,9) conduit à un durcissement secondaire par précipitation du Silicium en excès.

On remarque par ailleurs, que la vitesse de refroidissement possède une grande influence sur la dureté dans ces types d'alliages (écart des valeurs dans les zones A, B, et C).

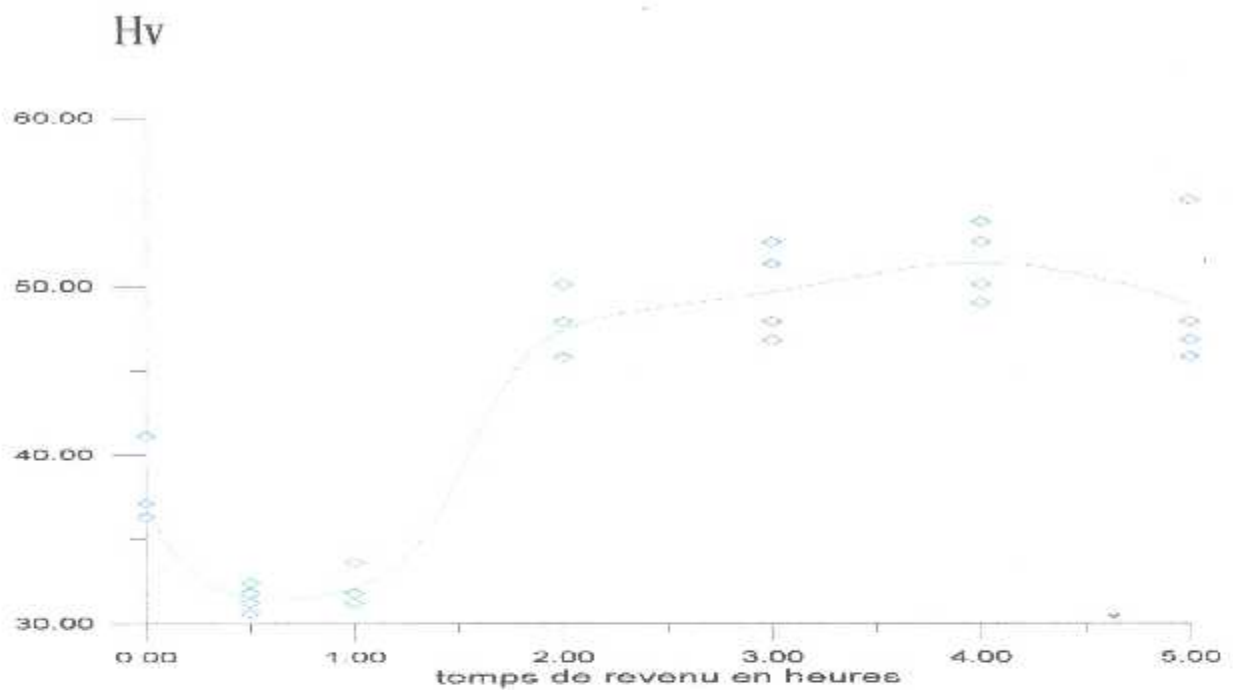
4- Influence du traitement thermique sur le durcissement :4-1 Tableau des résultats :

Les résultats de dureté obtenus après traitement thermique sont dans le tableau suivant :

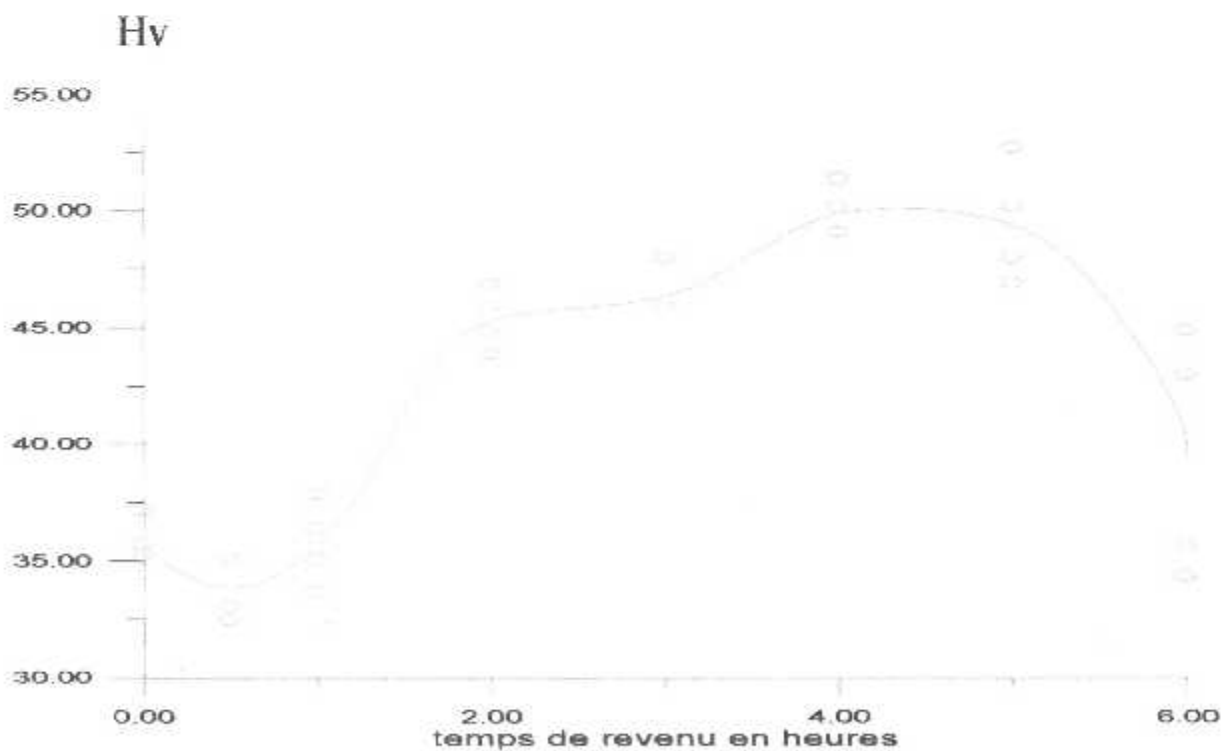
TT alliances	AG3		AG2 M1		AG1S0,9	
Mise en solution	36,3	37,7	37,1	35,67	43,8	47,87
	41,1		35,6		56,5	
	36,3		35,0		41,1	
	37,1		35,0		50,1	
Revenu 30 min	31,2	31,50	35,0	33,85	55,1	63,17
	31,8		33,0		75,7	
	30,6		35,0		59,4	
	32,4		32,4		62,5	
Revenu 1 heure	31,8	32,1	35,0	35,67	65,9	73,07
	31,2		37,8		85,1	
	33,6		33,6		67,7	
	31,8		36,3		73,6	
Revenu 2 heures	45,8	47,40	44,8	45,3	77,9	75,25
	47,9		45,8		69,6	
	45,8		46,8		75,7	
	50,1		43,8		77,9	
Revenu 3 heures	52,6	49,65	45,8	46,32	77,9	77,46
	51,3		45,8		80,2	
	46,8		47,9		71,5	
	47,9		45,8		80,2	
Revenu 4 heures	53,8	51,37	51,3	49,85	77,9	83,35
	50,1		49,0		82,6	
	52,6		49,0		85,1	
	49,0		50,1		87,8	
Revenu 5 heures	55,1	48,9	47,9	49,35	73,6	60,87
	46,8		52,6		55,1	
	45,8		46,8		59,7	
	47,9		50,1		55,1	
Revenu 6 heures			34,3	39,4	49,0	54,62
			35,6		56,5	
			44,8		56,5	
			42,9		56,5	

Tableau II

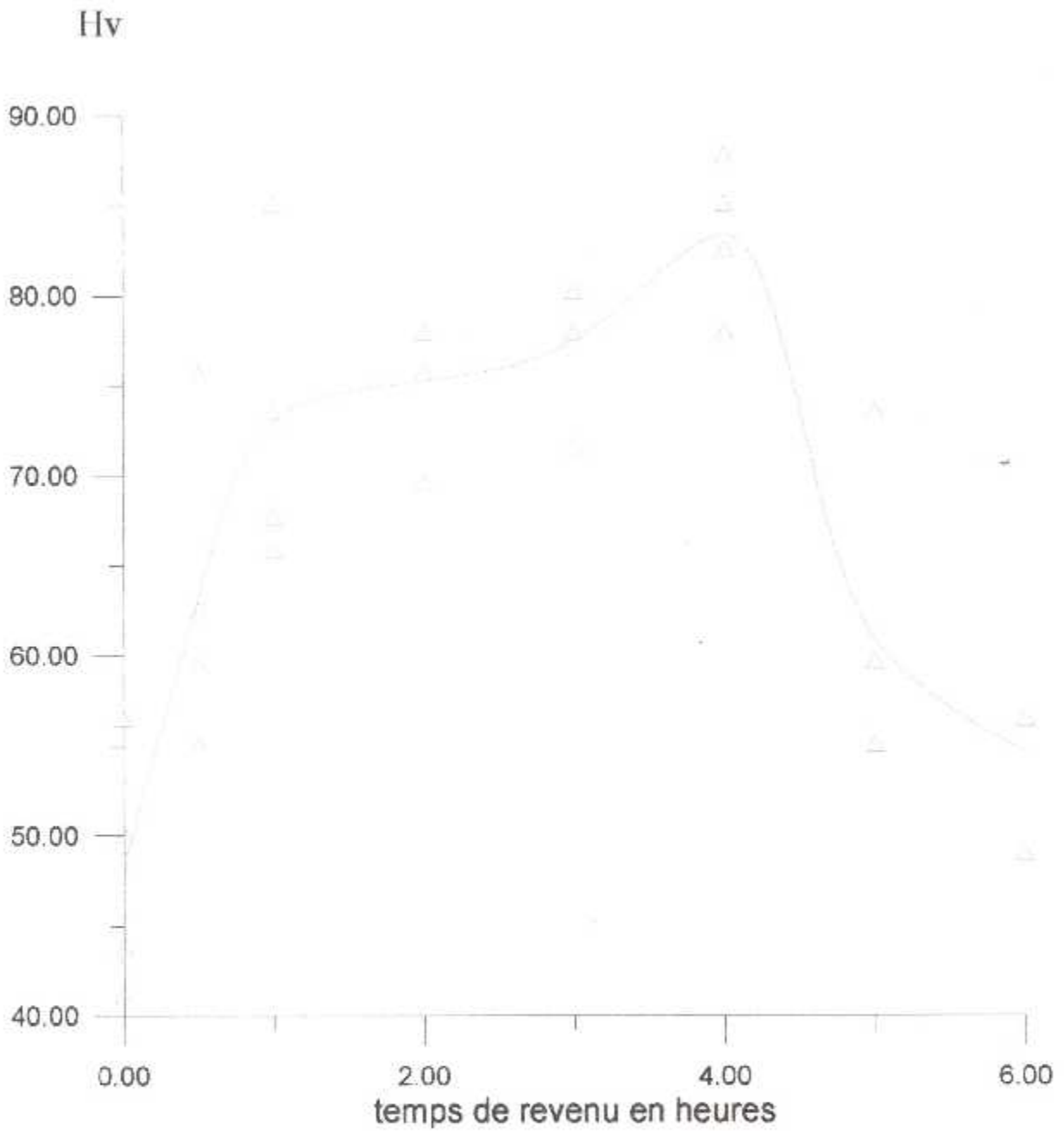


4-2 Courbes :

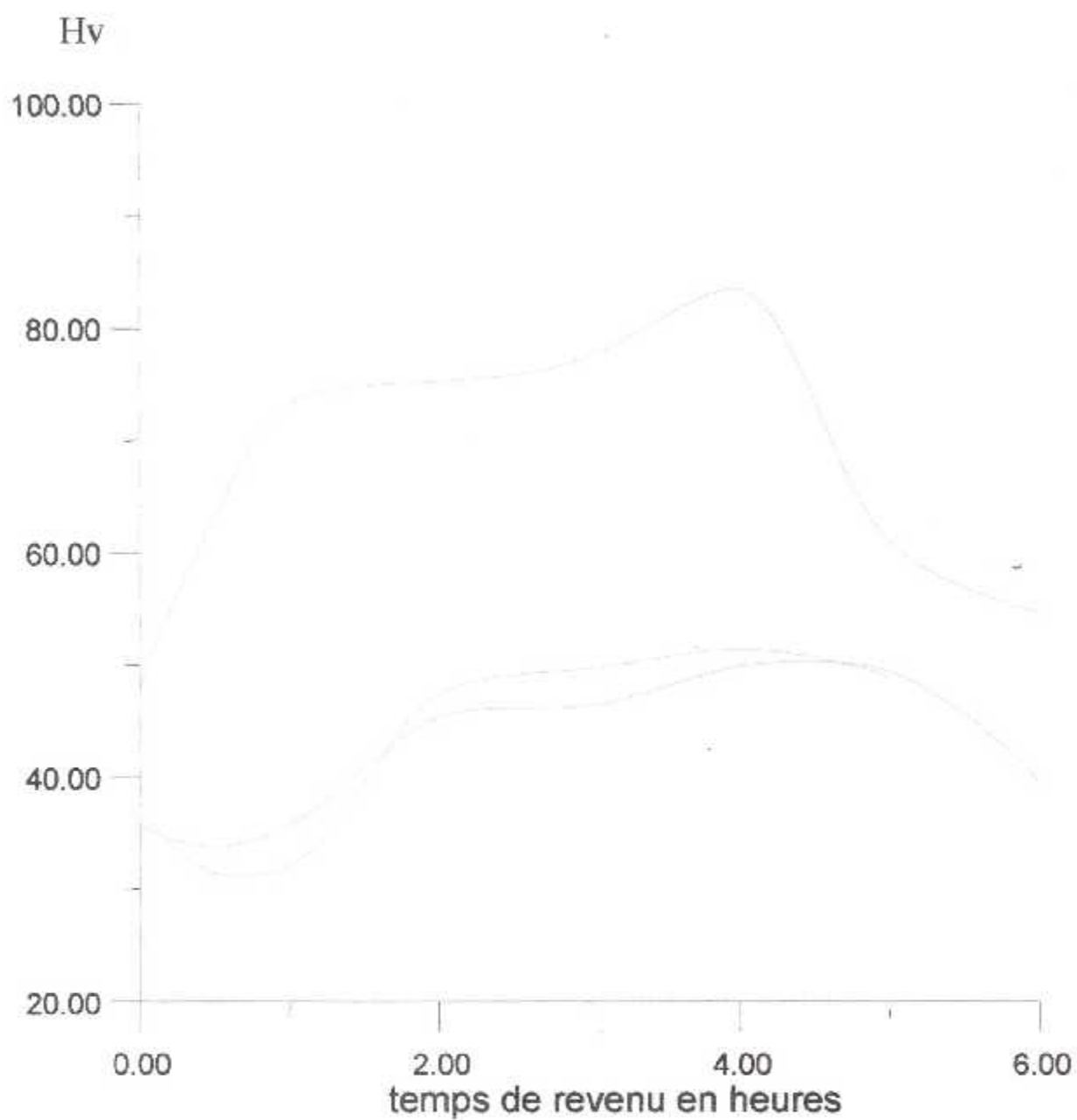
**Fig 33 :** Variation de la dureté de l'alliage AG3 par traitement thermique



**Fig 34 :** Variation de la dureté de l'alliage AG2M1 par traitement thermique



**Fig 35 : Variation de la dureté de l'alliage AG1S0,9 par traitement thermique**



**Fig 36 : Comparaison entre les variations de dureté des trois alliages**

### 4-3 Interprétations :

Les courbes représentées dans la figure (36) traduisent l'évolution du durcissement des trois alliages AG3, AG2M et AGS0,6.

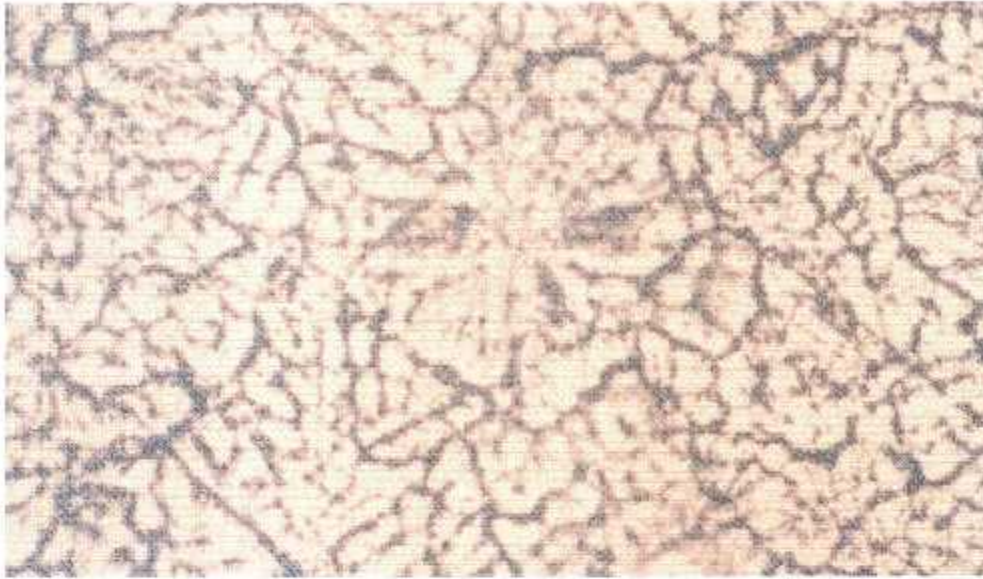
Nous constatons que l'addition du Silicium permet une bonne réponse des Duralinox au traitement thermique de durcissement structural. Ce durcissement est dû très probablement à l'apparition des phases intermédiaires du précipité  $Mg_2Si$ , une telle précipitation fine (ne pouvant être décelée que par microscopie électronique) augmente la résistance mécanique par rapport aux valeurs obtenues avec les précipitations grossières (Chapitre III).

Pour ce qui est des deux autres alliages, nous remarquons que leurs susceptibilité à répondre au traitement de durcissement est relativement faible ce qui ne leur permet pas d'être utilisés dans des applications nécessitant une résistance mécanique élevée. Ajoutons à cela que le durcissement par traitement thermique se fait presque toujours au détriment de la résistance à la corrosion.

Sur le plan structural et à l'échelle de la microscopie optique on peut remarquer un phénomène de fractionnement de dendrites dans l'alliage AG3 et AG2S0,9.



**Fig 37 : AG2S0,9 Fractionnement de dendrites (x 100)  
Après 6h de revenu**



**Fig 38 : AG3 Fractionnement de dendrites (x 100)**  
**Après 4h de revenu**

Ce phénomène nécessite particulièrement une étude ultérieure.

D'autre part, la structure de l'alliage AG2M1 après traitement thermique apparaît plus affinée.



**Fig 37 : AG2M1 Structure plus affinée après TT (x200)**  
**Après 4h de revenu**

*Conclusion*

*Générale*

## CONCLUSION

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail de recherche se résument comme suit :

- La coulabilité des duralinox est nettement améliorée par l'ajout du Silicium.
- La précipitation dans les alliages Al-Mg apparaît dans les zones adjacentes aux dendrites et contribue à l'appauvrissement de ces zones en soluté.
- Le Manganèse diminue l'effet du refroidissement sur la surfusion et même par conséquent à l'homogénéité structurale.
- L'addition du silicium au duralinox provoque la dégénérescence des dendrites et leur fonctionnement après traitement thermique.

D'autre part, il améliore le durcissement par effet de précipitation du Silicium et des phases transitoires du  $Mg_2Si$  au cours du traitement -thermique.

Du point de vue pratique, ce projet m'a permis de se familiariser avec les méthodes d'élaboration et de métallographie.

Enfin j'espère que ce travail sera un moyen efficace et un support utile pour les futurs étudiants et leur donnera le goût d'une discipline qui ne cesse de conditionner dans une large mesure le développement industriel en général et Aéronautique en particulier.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] Métaux usuels  
Métallurgie - Caractéristiques – emplois (A.ROST)
- [ 2 ] Métallurgie - collection :J.NIARD  
F.BOUJU Y.RENOUX
- [ 3 ] Métaux  
Compléments sur les métaux et alliages  
CH.APERT
- [ 4 ] Cours élémentaires de fonderie Tome (IX) (VIII)  
H.COSTE
- [ 5 ] Des matériaux  
Jean – Marie DORLOT , Jean –Paul BAÏLON, Jacques MASOUNAVE
- [ 6 ] Métallurgie générale
- [ 7 ]Thèse : Influence du Mg (0,5 ,1,2%)  
Sur les propriétés mécaniques de dureté des alliages Al-Si- Ces proposés  
dirigés par Mr E.SAOUDI  
Etudié par Mr Hichem MECHRI ,1999/2000
- [ 8 ]Thèse : Influence des éléments d'addition cuivre et Mg sur les alliages Al-Si  
(13 à 22% ) en fonction de la vitesse de solidification proposé et dirigé par  
Mr E.SAOUDI  
Présenté par Mr Sidahmed MOUNDJI **2000-2001**
- [ 9 ]Thèse : Matériaux aéronautiques et applications actuelles  
Proposé et dirigé par  
Mr BRGUEL Said  
Présenté par :  
Mr DJEBLILAREIDJ « MOHAMED »  
Et Mr : ZIOUANE Remzeddine Abdelkader 95/96