

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2

En génie mécanique

Option : comportement et mise en forme des matériaux

THEME :

Influence du murrissement sur l'évolution des caractéristiques de résistance, de ductilité et structurales de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression

Proposé et dirigé par :

Mr. A.HAKEM

Réalisé par :

Mr. Ilyes BOUKELLA

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la patience de réaliser travail.

J'adresse mes remerciements à mon promoteur monsieur Hakem d'avoir accepté de diriger ce travail, et de m'avoir beaucoup aidé et soutenu jusqu'à la fin.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner et juger mon travail.

Je tiens aussi à remercier le personnel du laboratoire du département mécanique et le personnel du Hall Technologie Oued Aissi.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin trouvent ici, mes remerciements les plus vifs et ma profonde reconnaissance

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma famille, mes proches et tous mes amis.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Première partie : recherche bibliographique.

CHAPITRE I.1 : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1 Aluminium.....	3
I.1.2 Principales propriétés de l'aluminium.....	3
I.1.2.1 Propriétés mécaniques.....	3
I.1.2.2 Propriétés physiques	4
I.1.2.3 Propriétés thermiques.....	4
I.1.2.4 Propriétés électriques.....	5
I.1.2.5 Propriétés magnétiques.....	5
I.1.2.6 Propriétés optiques.....	6
I.1.2.7 Propriétés chimiques et de surfaces.....	6
I.1.2.9 Résistance à la corrosion.....	6
I.1.3 Les applications de l'aluminium.....	7
I.1.4 Désignation des alliages d'aluminium.....	8
I.1.4.1 Alliages moulés.....	8
a) Désignation de la composition.....	8
b) Etats métallurgiques.....	9
I.1.4.2 Alliages corroyés.....	10
a) Désignation de la composition.....	10
I.1.5 Différents types d'alliages d'aluminium.....	12
I.1.5.1 Alliages corroyés.....	12
I.1.5.2 Alliages de fonderie.....	12
I.1.5.3 Série 10000 (Aluminium pur).....	12
I.1.5.4 Série 20000 (alliage de cuivre).....	12
I.1.5.5 Série 30000 (alliage de manganèse).....	13

I.1.5.6 série 50000 (alliage d'aluminium magnésium).....	13
I.1.5.7 Série 60000 (alliage de Mg-Si).....	13
I.1.5.8 Série 70000 (alliage de Zn).....	13
I.1.5.9 série 40000 (alliage de silicium).....	13
I.1.5.9.a Alliages AS sans cuivre.....	13
I.1.5.9.b Alliages AS avec cuivre.....	14
I.1.6 Applications.....	16
I.1.7 Techniques de forge.....	16
I.1.7.1 Laminage.....	16
I.1.7.2 Frittage.....	17

CHAPITRE I.2 : ELABORATION DE L'ALLIAGE Al-Si

I.2.1 Elaboration des alliages Al-Si.....	18
I.2.2. Composition chimique de l'alliage Al Si 12.....	18
I.2.3. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION.....	19
I.2.4. LA FUSION.....	19
I.2.4.1 – Température.....	19
I.2.4.2 - Gaz et oxydation.....	20
I.2.5. AFFINAGE.....	20
I.2.5.1. Procédés d'affinage dans le cas de la coulée en sable.....	20
I.2.5.1.1. Double affinage.....	20
I.2.5.1.2 - Affinage au sodium (sans poudre de PACZ).....	20
I.2.5.1.3 - Affinage à la poudre PACZ DK.....	21
I.2.5.2 - Contrôle de l'affinage.....	21
I.2.5.3 - Procédés d'affinage dans le cas de la coulée en coquille.....	21
I.2.6. DEGAZAGE.....	22
I.2.7. Le moulage.....	22
I.2.7.a. Moulage en sable.....	23
I.2.7.b. Moulage en coquille par gravité.....	24
I.2.8. Moulage sous pression.....	25
I.2.8.1. Composition d'une machine à souler sous pression.....	25
I.2.8.2. Les paramètres essentiels pouvant exercer une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression.....	25

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

I.3.1. Introduction.....	27
I.3.2. Buts et rôle des traitements thermiques.....	27
I.3.3. Cycle thermique.....	27
I.3.4. Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	28
I.3.4.a. Les traitements d'homogénéisation.....	28
I.3.4.b. Traitement d'adoucissement.....	29
I.3.4.c. Les traitements de trempe structurale.....	29
I.3.4.d. Stabilisation.....	29
I.3.4.f. Etape de mise en solution.....	29
I.3.4.g. Etape de refroidissement(ou trempe).....	30
I.3.4.h Maturation.....	30
I.3.5. Types de fours.....	30
I.3.5.a. Fours à sole.....	30
I.3.5 .b. Fours à bain de sels.....	30
I.3.5 .c. Fours électriques.....	31
I.3.6. Diffusion.....	31
I.3.6.1.Généralités sur la diffusion à l'état solide.....	31
I.3.6 .2. Définition de la diffusion.....	31
I.3.6 .3. Mécanismes de diffusion.....	32
I.3.6 .3.a. Mécanisme lacunaire.....	32
I.3.6 .3.b. Mécanisme interstitiel.....	33
I.3.6 .4. La microstructure.....	34
I.3.6 .4. a. Note préliminaire.....	34
I.3.6 .4.b. La macrographie.....	35
I.3.6 .4.c. La micrographie.....	35
I.3.6 .5. Microscopie optique.....	35
I.3.6 .5.a. Le microscope électronique à balayage.....	36
I.3.6 .5.b. La microscopie électronique en transmission.....	37
I.3.6 .6. Paramètres microstructuraux.....	39

CHAPITRE I.4 : ESSAIS MECANIQUES

I.4.1. Introduction.....	42
I.4.2. Traction.....	42
.4.2.a Description de l'essai (euro-norme 10002).....	42
I.4.2.b. Les éprouvettes.....	43
I.4.2.c. Diagramme de traction.....	43
I.4.3. Caractéristiques classiques de l'essai.....	44
I.4.3.a. Module d'élasticité.....	44
I.4.3.b. La résistance à la traction σ_m	44
I.4.3.c. Limite apparente d'élasticité.....	44

I.4.3.d. Limite à la rupture.....	45
I.4.3.d. L'allongement à la rupture A.....	45
I.4.3.f. Coefficient de Striction.....	45
I.4.3.g. Allongement à la striction.....	45
I.4.4. Essai de dureté.....	45
I.4.4.a. Dureté Brinell.....	46
I.4.4.b. Dureté Vickers.....	46
I.4.4.c. Dureté Rockwell.....	47
I.4.5. Essai de résilience.....	47
I.4.5.1 Introduction.....	47
I.4.5.2. Le mouton pendule (ou mouton de Charpy).....	48
I.4.5. Essai de la microdureté.....	49

Chapitre I.5 : defaults cristallins

I.5.1. Introduction.....	50
I.5.2. Classification.....	50
I.5.2.a. Défauts ponctuels.....	50
I.5.2.b. Défauts linéaires.....	51
I.5.2.c. Défauts planaires.....	55
I.5.2.d. Défauts volumiques.....	56

Deuxième partie : Expérimentation.

CHAPITRE II.1. APPAREILLAGE

II.1.1. INTRODUCTION.....	58
II.1.2. APPAREILLAGE DE LA COULEE SOUS PRESSION.....	58
II.1.2.1. Matière première.....	58
II.1.2.2 - Chargement des fours.....	59
II.1.2.2.1 - Dispositif de chargement.....	59
II.1.2.2.2 – Construction.....	59
II.1.2.2.3 – Avantages.....	60

II.1.2.3 - Four de fusion.....	60
II.1.2.4 - Fours de maintien.....	61
II.1.2.5 - Poche de coulée.....	61
II.1.2.6 - Machine à coulée sous pression.....	62
II.1.2.7 - Moule en coquille.....	63
II.1.3 - MACHINES D'USINAGE.....	63
II.1.4 – EPROUVETTES ET ECHANTILLONS.....	65
II.1.5 – FOUR ET ETUVE D DES TRAITEMENTS THERMIQUES.....	65
II.1.6 – MACHINES D'ESSAIS MECANQUES.....	66
II.1.7 – POLISSAGE.....	68
II.1.8 – MICROSCOPES.....	69
II.1.8.1 – Le microscope optique.....	69
II.1.8.2 – Microscope électronique a balayage (MEB).....	70

CHAPITRE II.2 - METHODE EXPERIMENTALE ET ELABORATION

II.2.1 - MATERIAU ETUDIE.....	71
II.2.2 - ELABORATION DE L'AlSi12Cu.....	71
II.2.2.1 - La composition chimique de l'AlSi12Cu suivant la Norme AF.A57.702.....	71
II.2.2.2 - Four de fusion.....	71
II.2.2.3 - Chargement du four de fusion.....	72
II.2.2.4 - Moulage en coquille sous pression.....	72
II.2.2.5 - Fonderie sous pression d'aluminium.....	73
II.2.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES.....	73
II.2.3.1 - Conditions pour qu'un alliage puisse subir un traitement thermique.....	74
II.2.3.2 - Différentes phases du traitement thermique.....	74
II.2.3.3 - Chauffage et maintien.....	74
II.2.3.4 - La trempe.....	74
II.2.3.5 - Durcissement structurel.....	75
a) La maturation.....	75
b) Le revenu.....	75
c) Cycle thermique de l'alliage AlSi12Cu.....	75
II.2.4 - ESSAIS MECANQUES.....	76
II.2.4.1 - Essai de traction.....	76
II.2.4.1.1 - Forme et dimension des éprouvettes.....	77
II.2.4.1.2 - Différentes étapes de l'essai de traction.....	77
II.2.4.2 - Essai de résilience.....	77
II.2.4.3 - Essai de dureté.....	78

II.2.4.4 - Essai de la microdureté.....	79
II.2.5 - EXAMENS MICROGRAPHIQUES.....	79
II.2.5.1 - Préparation des surfaces.....	80
II.2.5.2 - Attaque chimique.....	80
II.2.6 – MICROSCOPIE.....	81
II.2.6.1 - Microscope optique.....	81
II.2.6.2 - Microscope à balayage (MEB).....	81

Troisième partie : Résultats et discussion.

III.1 – INTRODUCTION.....	82
III.2 - EFFETS DU MODE D'ELABORATION ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ESSAI DE TRACTION.....	83
III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION.....	84
III.3.1 - Courbes moyennes de la coulée sous pression.....	84
III.3.2 - Influence du temps de maturation sur la traction, la dureté, la micro dureté et la résilience de l'alliage de fonderie AlSi12Cu coulé sous pression.....	89
III.3.2.1 - Caractéristiques de résistance.....	89
III.3.2.2 - Caractéristiques de ductilité.....	94
III.4 - MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE EUTECTIQUE AlSi12Cu COULE SOUS PRESSION.....	97
III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIE.....	101
III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON Les traitements thermiques.....	102
III.7 – CONCLUSION.....	102

Conclusion générale

Liste des tableaux

Tableau I.1.1 principales caractéristiques de l'aluminium.....	4
Tableau I.1.2 : Symboles chimiques et AFNOR des éléments d'alliages.....	8
Tableau I.1.3 : désignation des états métallurgiques.....	9
Tableau I.1.4 : quelques groupes d'alliages d'aluminium.....	11
Tableau I.2.1 : Composition chimique de l'alliage Al Si 12.....	19
Tableau I.4.1 : Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux.....	44
Tableau II.1.1 - Caractéristiques de la machine IDRA série OL-380.S.....	62
Tableau II.2.1 - Composition chimique de L'A-S12U suivant la norme NF A57-702.....	71
Tableau II.2.2 - Composition pondérale du réactif.....	80

Liste des figures

Figure I.1.1 : La corrosion selon le degré pH.....	7
Figure I.1.2 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	8
Figure I.1.3 : Procédé de laminage.....	16
Figure I.1.4 : Procédé de frittage.....	17
Figure I.2.1 : Composition chimique de l'alliage Al Si 12.....	18
Figure I.2.2 : Moulage en sable.....	24
Figure I.2.3 : Moulage en coquille par gravité.....	25
Figure I.3.1 : Cycle thermique.....	28
Figure I.3.2 : Corrélation entre sauts successifs pour un mécanisme lacunaire.....	33
Figure I.3.3 : Corrélation entre sauts successifs pour un mécanisme interstitiel indirect.....	34
Figure I.3.4 : Microscope optique.....	36
Figure I.3.5 : Microscope électronique à balayage.....	37
Figure I.3.6 : Schéma d'un microscope électronique de transmission.....	39
Figure I.3.7 : Matière polycristalline et joints de grain.....	40
Figure I.3.8 : montrant les précipités cohérents(a) et incohérents(b).....	41
Figure I.4.1 : Machine de traction.....	42
Figure I.4.2 : Exemple d'une éprouvette de traction.....	43
Figure I.4.3 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.....	44
Figure I.4.4 : Schéma d'un mouton pendule et vue de dessus de l'éprouvette avant choc.....	48
Figure I.5.1 : Exemples de défauts ponctuels simples.....	51
Figure I.5.2 : Dislocation de type « coin ».....	51
Figure I.5.3 : Formation d'une dislocation coin.....	52

Figure I.5.4: Formation d'une dislocation vis.....	53
Figure I.5.5: Exemple de dislocation mixte.....	54
Figure I.5.6: Détermination du vecteur de Burgers.....	55
Figure I.5.7: Représentation schématique de l'arrangement des atomes.....	56
Figure I.5.8: Création de pore par condensation de lacunes.....	57
Figure I.5.9. Pores facettés qui se sont formés lors de l'oxydation du métal.....	57
Figure II.1.1. Lingots d'aluminium neufs.....	59
Figure II.1.2. Retours de fonderie.....	59
Figure II.1.3. Dispositif de chargement de four.....	60
Figure II.1.4 - Four de fusion STRIKO série MH.....	61
Figure II.1.5 - Four de fusion.....	61
Figure II.1.6 - Four de maintien.....	62
Figure II.1.7 - Poche de coulée.....	62
Figure II.1.8 - Machine de moulage sous pression, IDRA série OL-380 S.....	63
Figure II.1.9 - Moule en coquille.....	63
Figure II.1.10 - Scie mécanique de type ALMOSMA3.....	64
Figure II.1.11 - fraiseuse verticale FV1,5 ALMO.....	64
Figure II.1.12 - Tour universel de type SN 40 SN 50C.....	64
Figure II.1.13 – Meule.....	65
Figure II.1.14 – éprouvette de traction.....	65
Figure II.1.15 - éprouvette de résilience V.....	65
Figure II.1.16 – échantillon de dureté de μ dureté.....	65
Figure II.1.17 - échantillon de μ structure.....	65
Figure II.1.18 - Four de trempe.....	66
Figure II.1.19 - Etuve utilisée.....	66
Figure II.1.20 - Machine de traction.....	67
Figure II.1.21 - Eprouvettes de traction.....	67
Figure II.1.22 - Pendule de Charpy.....	67
Figure II.1.23 – Duromètre.....	68
Figure II.1.24 – Microduromètre.....	68
Figure II.1.25 – polisseuses.....	69
Figure II.1.26 - microscope optique.....	70
Figure II.1.27 - Microscope électronique à balayage (MEB).....	70
Figure II.2.2 - Eprouvette coulée en coquille normalisée (EI).....	77

Figure II.2.3 - Echantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique.....	79
Fig.III.1. Courbes de traction (contrainte – déformation) de l'alliage AlSi12Cu coulé sous Pression.....	88
Fig.III.2. a - graphe et b - histogramme de la contrainte moyenne maximale.....	90
Fig.III.3. a - graphe et b - histogramme de la contrainte moyenne d'élasticité.....	91
Fig.III.4. a - graphe et b - histogramme de la contrainte moyenne de rupture.....	91
Fig.III.5. a - graphe et b - histogramme de la dureté Brinell.....	92
Fig.III.6. a - graphe et b - histogramme de la microdureté de la zone grise.....	92
Fig.III.7. a - graphe et b - histogramme de la microdureté de la zone blanche.....	93
Fig.III.8. a - graphe et b - histogramme de comparaison des micros duretés Vickers.....	93
Fig.III.9. a - graphe et b - histogramme du module d'Young moyen.....	94
Fig.III.10. a - graphe et b - histogramme de l'allongement moyen.....	95
Fig.III.11. a - graphe et b - histogramme du coefficient moyen de striction.....	95
Fig.III.12. a - graphe et b - histogramme de l'allongement moyen de striction.....	96
Fig.III.13. a - graphe et b - histogramme de la résilience moyenne.....	97
Fig.III.14. Structures micrographiques de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu.....	98
Fig.III.15. Microstructures obtenues au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu.....	99
Fig.III.16. Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu.....	99
Fig.III.17. Faciès de rupture en résilience obtenus au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu.....	100

INTRODUCTION GENERALE :

L'industrie de l'aluminium s'est engagée depuis de longues années dans la voie de la création, puis de l'harmonisation, de normes générales d'aluminium et de normes d'application, en effet, le besoin grandissant de l'utilisation de l'aluminium et ses alliages s'explique par l'importance de leurs propriétés physiques, chimiques en général et mécaniques en particulier et leur légèreté, par conséquent, leur production a connu en quelques années, entre 1950 et 1970, une croissance prodigieuse les mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux derrière le fer.

Les alliages d'aluminium silicium, en plus de leur légèreté qui réduit, d'une part le poids des structures et d'autre part la réduction de la consommation du carburant des engins roulants, possèdent une excellente coulabilité et une bonne résistance à la corrosion et à la traction, ils sont utilisés comme accessoires dans plusieurs réalisations (pistons moteurs, carters, appareillages électriques...)

Dans notre travail on s'est intéressé, d'une part à l'élaboration pratique de l'AlSi12Cu qui se fait par coulée sous pression et d'autre part on a étudié l'influence de la maturation sur l'évolution des caractéristiques de résistance, de ductilité et structurales de cet alliage de fonderie, en considérant 15 états qui sont : brut de coulée, trempé, maturation 0h, maturation 2h, maturation 4h, maturation 6h, maturation 8h, maturation 10h, maturation 12h, maturation 14h, maturation 16h, maturation 18h, maturation 20h, maturation 22h et en dernier maturation 24h.

Ce travail comprend une introduction générale et trois parties.

La première partie : réservée à la recherche bibliographique.

La deuxième partie : consacrée à décrire le travail expérimental et l'équipement utilisé.

La troisième partie : consiste à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus suivie de leur interprétation et discussion.

A la fin on termine notre travail par une conclusion générale.

PREMIERE PARTIE

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I.1_ Aluminium et ses alliages.....3-17

Chapitre I.2_ Elaboration de l'AlSi12Cu..18-26

Chapitre I.3_ traitements thermiques,.....27-41
microstructure et diffusion

Chapitre I.4_ Essais mécaniques.....42-49

Chapitre I.5_ Défauts cristallins.....50-57

CHAPITRE I.1 : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1.1 Aluminium : [1]

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13.

La présence d'aluminium dans l'environnement est naturelle et anthropique. L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. L'aluminium est l'élément métallique naturel le plus abondant de l'écorce terrestre dont il est le 3e élément constitutif le plus important, il représente environ 8%. Il n'y est présent que combiné avec l'oxygène, le silicium, le fluor ou autres éléments. On le trouve sous forme :

- d'alumine Al_2O_3 (corindon α Al_2O_3 , émeri, rubis, saphir, émeraude, etc.),
- hydratée (hydrargillite ou Gibbsite γ $\text{Al}(\text{OH})_3$, boehmite γ $\text{AlO}(\text{OH})$, diaspore α $\text{AlO}(\text{OH})$).

La bauxite qui constitue le principal minerai contient de 40 à 60% d'alumine (oxyde d'aluminium). De la famille des Latérites, la Bauxite est une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite, Boehmite, Diaspore), associés à des oxydes de fer et des impuretés (Silice, Calcite). Elle ressemble à de l'argile dure mais qui ne fait pas de pâte avec l'eau.

I.1.2 Principales propriétés de l'aluminium : [2]

I.1.2.1 Propriétés mécaniques :

L'aluminium est un métal ductile et très malléable d'une structure cristalline cubique à faces centrées de paramètre $a = 4.0412 \text{ \AA}$, le modèle à électrons libres de la liaison dans les métaux peut expliquer la malléabilité et la ductilité du métal, en effet il est malléable car ses liens métalliques sont non-directionnels, et ductile car les ions métalliques sont entourés par un nuage d'électrons ainsi une force d'attraction agit dans toutes les directions, quand un stress est appliqué au métal, les électrons de valence délocalisés, se déplaçant librement continuent d'exercer une attraction uniforme sur les ions positifs. Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagées.

Les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être modifiées avec l'addition d'autres métaux, notamment le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le lithium et le zinc, formant ainsi des alliages.

Il est possible d'augmenter les caractéristiques mécaniques, mais aussi de réduire significativement la ductilité de l'aluminium ainsi que de tous ses alliages, par déformation à froid appelée écrouissage.

L'écrouissage réduit également la conductivité électrique et la résistance à la corrosion des alliages, en revanche la charge de rupture et la dureté sont augmentées.

Voici un tableau montrant les principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium :

Allongement à la rupture	Module d'élasticité (Young) E	Coefficient de poisson	Capacité calorifique volumique	Limite élastique à la traction Re	Module de torsion	Limite de résistance à la rupture Rm
(%)	(Gpa)	(sans Dim)	(MJ/m ³ °K)	(MPa)	(GPA)	(MPa)
20 à 30	67.5	0.34	2.39	30	27	60 à 125

Tableau. I.1.1 principales caractéristiques de l'aluminium

I.1.2.2 Propriétés physiques :

L'aluminium est, après le magnésium, le métal le plus léger qui puisse être utilisé industriellement. Sa densité est environ le tiers de celle du cuivre ou de celle de l'acier. Son point de fusion relativement bas associé à une parfaite stabilité à toute température même à l'état fondu rend aisé la fusion de l'aluminium et seul l'argent, le cuivre et l'or possèdent une conduction thermique supérieure à celle de l'aluminium. Enfin sa haute conductibilité électrique et son absence de magnétisme le désignent au même titre que le cuivre.

L'aluminium est un métal dont la densité est faible (2,7), c'est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg/ m³ et la masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800 kg/ m³. La masse volumique est fortement influencée par la température et diffère suivant que l'aluminium est à l'état solide ou liquide, en revanche, sa masse volumique est faiblement influencée par la présence d'impuretés. La présence de certains éléments (ex: B, Si, Mg, Li) dans l'aluminium diminue la masse volumique alors que d'autres éléments (ex: Ti, Zn, Cr, Fe, Cu) augment la masse volumique de l'aluminium.

I.1.2.3 Propriétés thermiques :

Pour casser la liaison métallique de l'aluminium, il faut fournir une énergie qui est atteinte à température de fusion qui dépend de la pureté de l'aluminium. Celle-ci varie suivant les mesures de 657 à 660 °C :

- 657 °C pour un aluminium « commercial » ;
- 659 °C et 660 °C pour le métal dont le titre est de 99,99 %.

La valeur maintenant admise de l'enthalpie de fusion de l'aluminium (encore couramment appelée chaleur latente de fusion) est de : 397 J .g⁻¹

Même pour le métal très pur, la fusion commence toujours aux joints de grain car les liaisons au niveau des défauts sont moins énergétiques.

Lors de la fusion, l'aluminium (pur ou allié) subit une augmentation de volume d'un peu plus de 6,26% qui, à l'inverse, se traduit à la solidification par une contraction de volume dont il faut impérativement tenir compte lors du moulage de pièces en fonderie.

L'aluminium a une conductivité thermique très élevée environ 66 % de celle du cuivre, celle des alliages d'aluminium, étant plus faible car les électrons dans l'aluminium ont une grande mobilité de mouvement (électrons libres), donc la structure de l'aluminium permet une grande diffusion de l'énergie cinétique par chocs de particule et ainsi transmettre rapidement la chaleur, la valeur de la conductivité thermique de l'aluminium non allié est de 237 W.m⁻¹.K⁻¹.

I.1.2.4 Propriétés électriques :

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Cela est dû au fait que l'aluminium a une électronégativité de 1.61 < 2 donc possède des liaisons métalliques, donc il s'agit d'un conducteur par conséquent ses électrons de valence sont délocalisés, sont libres de se déplacer à travers le métal, et peuvent monter très facilement d'un niveau d'énergie à un autre dans la même bande d'énergie.

La conductivité électrique, inverse de la résistivité électrique, mesure l'aptitude d'un matériau à conduire l'électricité. Elle est généralement exprimée en pourcentage IACS (International Copper Annealed Standard) d'un échantillon standard de cuivre recuit dans des conditions normalisées.

La valeur de la conductivité électrique de l'aluminium recuit (état O), à 20 °C, généralement admise est de : $37,66 \cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ (64,94 % IACS)

Soit une résistivité de : $2,6545 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m} < 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{m} \Rightarrow$ conducteur.

I.1.2.5 Propriétés magnétiques :

Du fait de sa valence impaire et du peu d'électrons célibataires sur les derniers niveaux d'énergies, l'aluminium est paramagnétique. Il ne possède donc pas une aimantation spontanée

mais, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis.

Sa susceptibilité magnétique décroît avec la température.

I.1.2.6 Propriétés optiques :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage, ainsi que par un titre plus élevé, en effet, le pouvoir réflecteur dépend de l'état de la surface du métal. Une surface rugueuse perd beaucoup en pouvoir réflecteur.

I.1.2.7 Propriétés chimiques et de surfaces :

La tendance naturelle du métal est de retourner à son état stable d'oxyde, cette réaction inverse est la corrosion dont la réaction s'écrit : $\text{Al} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3/2 \text{H}_2 \uparrow$

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans des milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être difficiles.

Sa tenue à la corrosion dépend de différents paramètres tels que son état métallurgique (traitement qu'à subi le matériau), l'état de surface, des caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé c'est-à-dire selon l'humidité, la température, ou encore la présence d'agents agressifs et dépend aussi de la fréquence d'entretien.

I.1.2.9 Résistance à la corrosion :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé «alumine» qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène, l'air, l'eau. Il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage et même lors du soudage.

Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres. Sa stabilité physico-chimique dépend en particulier des caractéristiques du milieu.

La vitesse de dissolution du film d'oxyde dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et alcalin, elle est faible dans les milieux proches de la neutralité de pH 5 à 9, le film est donc particulièrement résistant dans ces milieux.

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, il faut aussi tenir compte de la nature de l'acide base, par exemple les acides chlorhydriques et sulfuriques attaquent fortement l'aluminium et la soude caustique et la potasse même à faible concentration attaquent l'aluminium.

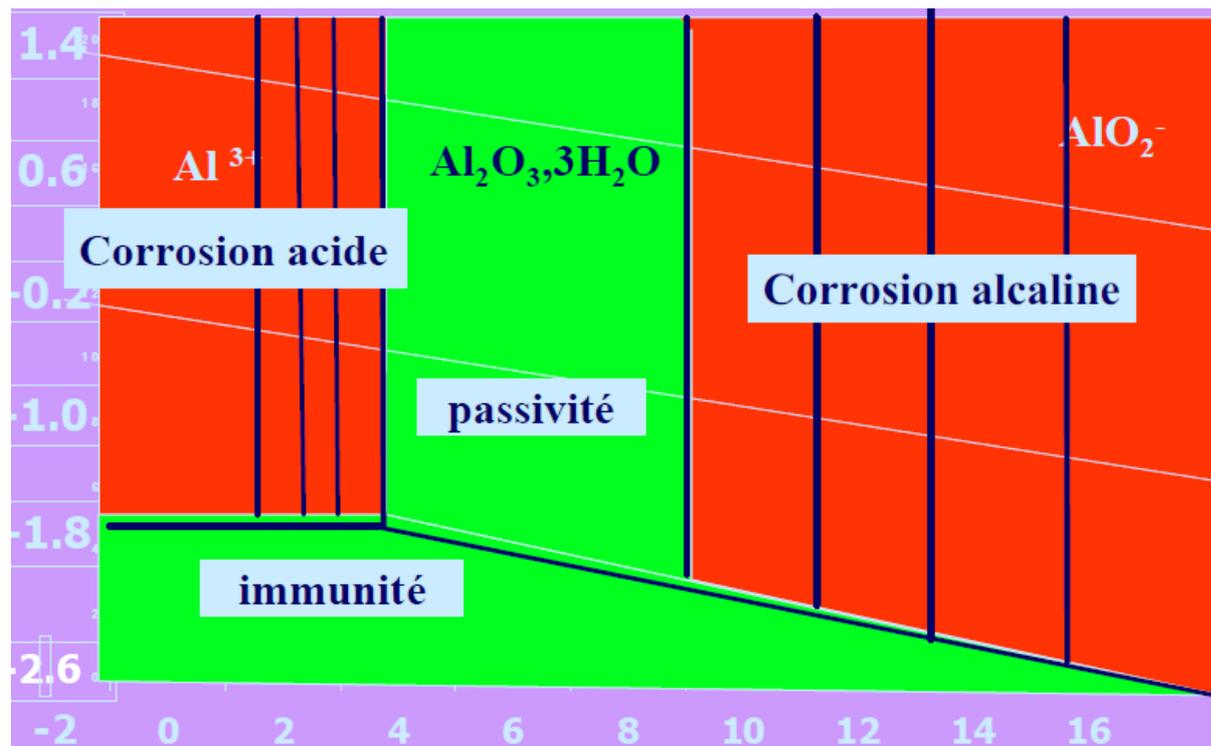


Figure I.1.1 La corrosion selon le degré pH

I.1.3 Les applications de l'aluminium : [2]

L'aluminium est malléable et ductile ce qui permet un usinage facile. Avec un point de fusion bas $660^\circ C$ contre $1500^\circ C$ pour le fer – il se prête facilement au moulage de petites pièces, de plus l'économie d'énergie faite lors de sa fabrication est considérable.

Depuis l'apparition de l'électrolyse en 1887 le coût de production de l'aluminium a chuté. Les secteurs des transports, de la construction, de l'emballage et de la vie quotidienne constituent les marchés les plus importants pour les produits en aluminium. Les autres utilisations concernent les équipements électriques, la mécanique, la chimie et la pharmacie.

I.1.4 Désignation des alliages d'aluminium : [3]

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

I.1.4.1 Alliages moulés :

La désignation de ces alliages d'aluminium est décrite de façon symbolique et numérique dans la norme NF EN 1780- 1, -2 et -3. La correspondance des éléments avec l'ancienne désignation AFNOR apparait dans le (tableau I.1.2).

Eléments D'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR	Eléments D'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR
Aluminium	Al	A	Nickel	Ni	N
Antimoine	Sb	R	Niobium	Nb	Nb
Azote	N	Az	Phosphore	P	P
Béryllium	Be	Be	Plomb	Pb	Pb
Bismuth	Bi	Bi	Sélénium	Se	Se
Bore	B	B	Silicium	Si	S
Cadium	Cd	Cd	Soufre	S	F
Chrome	Cr	C	Tantale	Ta	Ta
Cobalt	Co	K	Thorium	Th	Th
Cuivre	Cu	U	Titane	Ti	T
Etain	Sn	E	Tungstène	W	W
Fer	Fe	Fe	Vanadium	V	V
Magnésium	Mg	G	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Mn	M	Zirconium	Zr	Zr
Molybdène	Mo	D			

Tableau I.1.2 : Symboles chimiques et AFNOR des éléments d'alliages

a) Désignation de la composition :

▪ Partie commune aux désignations numériques et symboliques :

La désignation est composée successivement comme suit :

- Le préfixe EN suivi d'un espace ;
- La lettre A, qui présente l'aluminium ;
- La lettre C, qui représente les produits moulés (caste) ;
- Un tiret.

▪ **Désignation numérique :**

La première partie de la désignation (EN AC -) est suivie de cinq chiffres représentant la composition chimique : Les deux premiers chiffres indiquent le groupe d'alliages et les trois derniers chiffres indiquent la composition chimique.

Exemple : EN AC-42000 : est un alliage d'aluminium à 7% de silicium et des traces de magnésium.

▪ **Désignation symbolique :**

La première partie de la désignation (EN AC -) est suivie de symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivi de leurs teneurs massiques pris dans l'ordre décroissant.

Exemple : EN AC-ALSi7Mg.

Etats métallurgiques	Désignation	Observations
Brut de fabrication	F	Sans moyen de contrôle particulier
Recuit	O	Etat donnant la résistance mécanique la plus faible, cas : - O1 : recuit à haute température et refroidi lentement - O2 : soumis à un traitement thermomécanique - O3 : homogénéisé
Ecroui	H	Ecroui (déformation plastique du métal à une température et à une vitesse telles que le métal durcisse) sans traitement thermique supplémentaire
Mise en solution (trempe)	W	Trempe des alliages d'aluminium. Décrit un état instable, s'applique aux alliages qui vieillissent spontanément. La durée de maturation peut être spécifiée (W 2h).
Traité thermiquement	T	S'applique aux produits traités thermiquement pour obtenir un état stable autre que F, O ou H, avec ou sans écrouissage.

Tableau I.1.3 : désignation des états métallurgiques

b) Etats métallurgiques :

Les états métallurgiques ("ou de livraison") sont normalisés. Leur désignation est effectuée par une lettre (F, O, H, W ou T) suivie par un ou plusieurs chiffres.

Le premier chiffre indique un cycle de traitements thermiques ou mécaniques (écrouissage...), les chiffres suivants précisent les variantes possibles du cycle. Mêmes remarques dans le cas des pièces moulées. Normes : NF EN 515 ; NF EN 1173...

I.1.4.2 Alliages corroyés :

a) Désignation de la composition :

a.1. Partie commune aux désignations numériques et symboliques :

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

- Le préfixe EN suivi d'un espace ;
- La lettre A qui représente l'aluminium ;
- La lettre W qui représente les produits corroyés (Wrought) ;
- Un tiret.

a.2 Désignation numérique (NF EN 573-1) :

La première partie de la désignation (EN AW) est suivie de quatre chiffres représentant les compositions chimiques et si nécessaire, une lettre identifiant une variante nationale attribuée par ordre alphabétique.

La signification des quatre chiffres est la suivante :

- Le premier chiffre indique le groupe d'alliages selon le **tableau I.1.4** (les chiffres de 0 à 9 sont réservés à l'usinage privé des réducteurs).
- Pour le groupe 1 : les deux derniers chiffres indiquent le pourcentage minimal au-delà de 99.00%, et le deuxième chiffre indique des modifications dans les limites d'impuretés ou dans les éléments (zéro correspond à des limites d'impuretés naturelles).
- Pour les groupes 2 à 8 : les deux derniers chiffres servent seulement à identifier l'alliage, tandis que le deuxième chiffre indique les modifications de l'alliage (zéro correspond à l'alliage original)

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium (teneur ≥ 99.00)
2	Aluminium-cuivre
3	Aluminium-manganèse
4	Aluminium-silicium
5	Aluminium-magnésium
6	Aluminium-magnésium-silicium
7	Aluminium-zinc
8	Autres alliages d'aluminium

Tableau I.1.4 : quelques groupes d'alliages d'aluminium

Exemple : EN AW -2024 est un alliage d'aluminium à 4% de cuivre et 1.5% de magnésium

a.3 Désignation symbolique (NF EN 57362) :

Elle est destinée à compléter la désignation numérique définie précédemment.

Elle utilise les symboles chimiques et est placée entre crochets après la désignation à quatre chiffres. Les désignations de l'aluminium non allié destiné au corroyage sont constituées du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

Exemple : EN AW-1199[Al 99.99], EN AW- 1070[Al 99.7].

Si un élément est ajouté en faible quantité à l'aluminium non allié, le symbole correspondant à cet élément sera ajouté sans espace après le pourcentage de pureté.

Exemple : EN AW- 1100[Al 99.00 Cu]

Pour les alliages d'aluminium corroyés, la désignation est constituée du symbole (Al) suivi d'un espace et des symboles des éléments d'addition principaux. Ces symboles sont ensuite suivis par des nombres exprimant la teneur de ces éléments.

Ils sont ordonnés par teneurs décroissantes (ou par ordre alphabétique en cas de teneurs identiques) et sont limités à quatre.

Exemple : EN AW- 6061[Al Mg 1 Si Cu], En AW-2011[Al Cu 5 Pb Bi]

I.1.5 Différents types d'alliages d'aluminium : [4]

I.1.5.1 Alliages corroyés :

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont des alliages à base d'aluminium destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de forge (laminage, filage, matriçage, forge...)

I.1.5.2 Alliages de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, destinés à être transformés par des techniques de fonderie. On les appelle souvent 'alliages légers' du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie.

I.1.5.3 Série 10000 (Aluminium pur) :

Cette série ne peut pas être traitée thermiquement. La résistance à la traction varie de 69 à 186 N/mm². Elle a une excellente résistance à la traction dans un large domaine de température, cette série est souvent désignée comme aluminium pur (minimum 99.00% Al), ces alliages sont soudables mais ont un faible intervalle de fusion de sorte que des procédures de soudage acceptables demandent quelque attention. Comme ces alliages ont des propriétés mécaniques relativement faibles, ils sont rarement utilisés dans les constructions, ils sont cependant utilisés en raison de leur résistance élevée à la corrosion et leur bonne conductibilité électrique.

Ces alliages sont soudés avec un métal d'apport en aluminium pur ou de la série 40000 (alliage de silicium)

I.1.5.4 Série 20000 (alliage de cuivre) :

Ces alliages peuvent être traités thermiquement, leur résistance à la traction varie de 186 à 427 N/mm². Ce sont des alliages d'aluminium-cuivre (0.7-6.8%) à résistance élevée, souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale, certains de ces alliages sont considérés comme non soudables (fissuration à chaud et sensibilité à la corrosion sous tension). D'autres peuvent être soudés avec des procédés de soudages à l'arc quand on suit une procédure de soudage correcte, comme métal d'apport on utilise la série 20000 ou la série 40000 en fonction de l'application, certains alliages non soudables sont soudés avec succès avec le procédé Ftriction Stir.

I.1.5.5 Série 30000 (alliage de manganèse) :

Ce sont des alliages d'aluminium-manganèse (0.05-1.8%Mn), leur résistance maximale à la traction est de 110 à 283 N/mm². Ce sont des alliages ayant une résistance modérée avec une bonne résistance à la corrosion et une bonne capacité de mise en œuvre et pouvant être utilisés à haute température (casserolles, poêles, échangeurs de chaleur...), ils peuvent être soudés avec un métal d'apport de la série 40000 et 50000 en fonction de la composition et de l'application.

I.1.5.6 série 50000 (alliage d'aluminium magnésium) :

Ce sont des alliages d'aluminium-magnésium (0,2 à 6.2% Mg) ayant une résistance à la traction de 125 à 352 N/mm². Ils ne sont pas susceptibles de durcissement par traitement thermique et ont la résistance la plus élevée de ce groupe.

I.1.5.7 Série 60000 (alliage de Mg-Si) :

Les alliages de cette série sont susceptibles de durcissement par traitement thermique, leur résistance à la traction varie de 125 à 400 N/mm².

I.1.5.8 Série 70000 (alliage de Zn) :

Ce sont des alliages d'aluminium-zinc (0,8-12% Zn) susceptibles de durcissement par traitement thermique avec une résistance variant de 220 à 605 N/mm², ils appartiennent aux alliages d'aluminium ayant la résistance la plus élevée.

I.1.5.9 série 40000 (alliage de silicium) :

Les alliages aluminium-silicium sont les plus appropriés à la réalisation des pièces de fonderie. De nombreuses nuances existent, souvent avec adjonction de magnésium et de titane. Certains alliages de cette série contiennent aussi du cuivre, ce qui permet d'associer les propriétés du silicium et du cuivre, et d'obtenir ainsi des alliages ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et une très bonne aptitude à l'usinage tout en évitant le principal défaut des AU (série 20000), à savoir le risque de criques.

I.1.5.9.a Alliages AS sans cuivre :

L'AS10G (série des 43000) a été pendant très longtemps l'alliage de prédilection des fondeurs du fait de sa forte teneur en silicium lui donnant d'excellentes aptitudes à la coulée. Il est encore utilisé pour la réalisation de pièces comportant des parties fines comme des ailettes de refroidissement, mais ses caractéristiques mécaniques sont moyennes. :(1) La série des

43000 est composée de plusieurs alliages à 10% de silicium, qui se distinguent par des fourchettes plus ou moins serrées sur certains constituants. Le tableau ci-dessous indique les concentrations maxi pour les constituants concernés. Les alliages 43000, 43100 et 43300 sont des alliages de première fusion, les 43200 et 43400 des alliages de deuxième fusion (élaborés à partir d'aluminium recyclé). L'AS7G03 (42100) et 'AS7G06' (42200), qui diffèrent seulement au niveau de la teneur en magnésium, sont aujourd'hui les alliages les plus utilisés en fonderie sable et coquille, par gravité. Leur coulabilité est bonne, en particulier dans le cas de moulage au sable à prise chimique, et leurs caractéristiques mécaniques sont également très bonnes grâce à leur teneur en magnésium. Ces alliages peuvent être utilisés avec ou sans oxydation anodique. Ils sont utilisés en aéronautique et dans l'industrie, pour la réalisation de nombreuses pièces techniques. Dans cette catégorie, on peut citer aussi 'AS2GT' (41000) qui est un des alliages dans lequel la teneur en aluminium est la plus forte (environ 97%).

I.1.5.9.b Alliages AS avec cuivre :

L'AS5U3G (45100) est un alliage très utilisé en automobile pour les prototypes. Il allie coulabilité, usinabilité et caractéristiques mécaniques adaptées à ce type de pièces.

L'AS9U3(Fe) (46000) est un alliage principalement utilisé en automobile pour la série. Cet alliage est utilisé principalement en fonderie sous pression (95 %) pour les pièces automobiles (bloc moteur, carter embrayage, couvre culasse, carter d'huile, pièces diverses, ...). Il est aussi utilisé accessoirement pour la fabrication de certaines culasses en moulage gravité. Il présente les avantages suivants :

- Faible coût (alliage de 2ème fusion) par rapport aux alliages de première fusion (AS7G par exemple)
- Grande disponibilité aussi bien à l'état de lingot que sous forme liquide (poche calorifugée)
- Facilité de transformation
- Bonne tenue à chaud et bonne usinabilité (teneur en cuivre élevé) Par contre, du fait de sa teneur en fer élevée qui est le principal inconvénient des alliages de deuxième fusion (0,9 % environ), il présente des caractéristiques mécaniques statiques (allongement) réduites. Sa tenue en fatigue, due à la microstructure relativement fine de la peau de pièce en fonderie sous pression, est cependant intéressante. Au niveau international, l'AS9U3(Fe) a pour équivalent l'A380 (USA) et l'ADC10 (Jap). On peut citer aussi 'AS12UN' (48000) qui ne contient qu'environ 84% d'aluminium ou même 'AS22UNK' (sans désignation numérique) qui en contient moins de 75%

Effet du cuivre sur l'alliage Al-Si : [5]

Le cuivre contribue fortement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages et améliore considérablement les aptitudes à l'usinage des pièces réalisées y compris dans le cas où elles ne sont pas traitées thermiquement. A l'inverse, le cuivre est défavorable à la tenue à la corrosion de la pièce. Une protection de surface (peinture, anodisation) est souvent nécessaire. De plus, les alliages aluminium-cuivre, dans lesquels la teneur en silicium est très faible, sont assez facilement sujets à la crique (amorce de rupture) si le refroidissement des fonderies est mal contrôlé, ou bien lors du traitement thermique si certaines précautions ne sont pas prises (éviter que les pièces se touchent entre elles, notamment). Les AU (série 20000) sont des alliages délicats en fonderie, mais très appréciés des usineurs, lorsque les fonderies sont bien réalisées. Les pièces réalisées dans cette série d'alliage sont très souvent des pièces soumises à des contraintes mécaniques importantes et, de ce fait, font presque toujours l'objet d'un traitement thermique.

Effet du silicium sur l'alliage Al-Si : [5]

Le silicium est présent dans la majorité des alliages pour fonderie. Sa principale caractéristique est d'améliorer la coulabilité du métal et, par conséquent, de limiter les risques de criques. Par le passé, les alliages à fort pourcentage de silicium étaient les préférés de fondeurs, mais le moulage en sable à prise chimique a permis d'obtenir la majeure partie des pièces avec des teneurs en silicium plus faibles. Aujourd'hui, on choisira de préférence des alliages à fort pourcentage de silicium pour obtenir des pièces aux formes complexes et fines comme, par exemple, des carcasses de générateur comportant de nombreuses ailettes de refroidissement. En revanche, le silicium diminue l'usinabilité de la pièce et rend plus difficile le traitement anodique de décoration.

Diagramme d'équilibre de l'alliage Al-Si : [5]

Outil du métallurgiste, le diagramme de phase est une source de renseignements sur un métal ou un alliage. Il s'agit d'une représentation des lignes de transformation (température en fonction du pourcentage d'élément), qui permet de connaître les quantités et d'analyser les phases en présence et les températures de changement de phase. Cependant, le diagramme de phase n'est valable que pour des conditions proches de l'équilibre, (refroidissement ou chauffage suffisamment lent). Le diagramme aluminium-silicium (figure I.1), est relativement simple: il comporte un point eutectique (577C, 11,7% de silicium en masse) et deux phases solides distinctes α (silicium en solution dans l'aluminium) et silicium primaire.

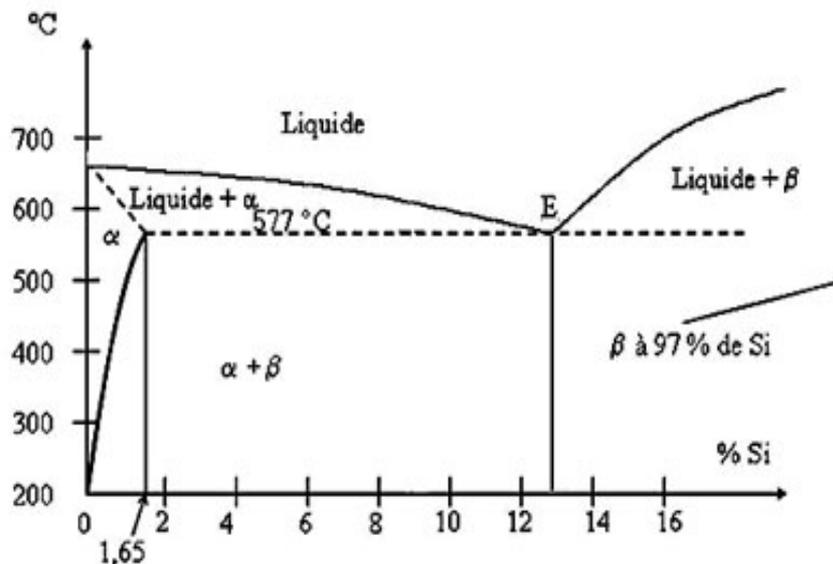


Figure I.1.2 : diagramme d'équilibre Al-Si

La faible solubilité du Si dans l'aluminium et le phénomène de surfusion ne font que le Si de l'eutectique forme des cristaux polyédriques importants qui rendent l'alliage fragile et difficilement usinable, pour cette raison, tous les alliages Al-Si hypo-eutectiques doivent subir un traitement de modification. Le traitement de modification a pour but d'obtenir un eutectique Al-Si plus fin avec une meilleure répartition entre les deux phases eutectiques, pour cela, on traite le bain de fusion avec du sodium (Na), du strontium (Sr) ou encore de l'antimoine (Sb) avant la coulée. Le traitement d'affinage a pour but d'augmenter le nombre de sites de cristallisation de la phase pro-eutectique, il consiste à ajouter des éléments affinant au bain de fusion comme le titane ou le bore pour les hypo-eutectiques ou du phosphore pour les hyper-eutectiques.

Ces deux traitements ont pour effet d'augmenter la résistance mécanique et A% de l'alliage solide.

I.1.6 Applications : Automobile, aviation, appareillages électriques, chimie.

I.1.7 Techniques de forge : [6]

I.1.7.1 Laminage :

Le laminage de l'aluminium est un procédé de transformation par passage du métal entre deux cylindres (laminoir) lisses ou cannelés, tournant en sens inverse. En raison de ce mouvement de rotation et de la compression générée par les cylindres, il se produit une réduction en continu de l'épaisseur initiale par déformation plastique du métal.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau. Il permet également la production de barres profilées. (Voir figure I.2)

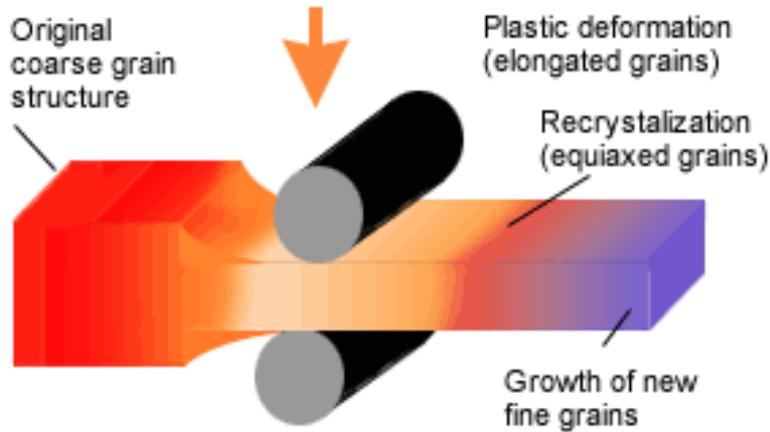


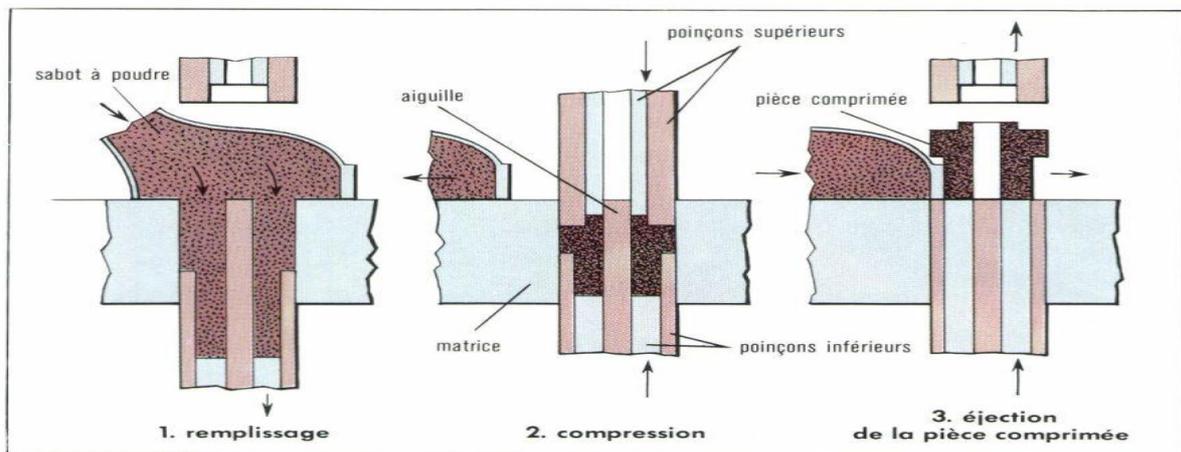
Figure I.1.3 : Procédé de laminage

I.1.7.2 Frittage :

Contrairement aux procédés de la métallurgie classique, qui font toujours intervenir la solidification d'un métal fondu, le frittage part d'une poudre métallique. Vers 1908 apparition des premières pièces autolubrifiantes, puis en 1935 fabrication des premières pièces mécaniques pour l'automobile.

La métallurgie des poudres, ou frittage, permet d'obtenir des pièces d'une grande précision géométrique, de quelques grammes à plusieurs kilos, et pouvant résister à des efforts mécaniques importants.

Le frittage est particulièrement adapté aux moyennes et très grandes séries.



Principe de l'agglomération des poudres métalliques.

Figure I.1.4 : Procédé de frittage

CHAPITRE I.2 : ELABORATION DE L'ALLIAGE Al-Si

I.2.1 Elaboration des alliages Al-Si :

L'élaboration est l'opération de reconstitution des alliages au moyen de la fusion total des éléments métalliques à mettre en œuvre, pour cela, il est nécessaire de cibler le type d'alliage à élaborer pour mener ses études et suivre de ce fait toutes les étapes de préparation de la charge à fusionner.

L'Al Si 12 présente deux qualités dominantes qui sont :

- Une excellente coulabilité qui permet de l'employer pour des pièces minces ou ayant des formes compliquées.
- Une bonne résistance aux agressions atmosphériques qui permet de l'employer à long terme à l'extérieur sans nuire à sa qualité, il est utilisé dans les domaines suivants :

- Pièces pour le bâtiment (fenêtres...)
- Pièces de carrosseries d'automobile ;
- Moules et banches pour béton ;
- Pièces pour l'industrie électrique (flasques et stators de moteur...)

I.2.2. Composition chimique de l'alliage Al Si 12 :

La composition chimique est représentée par des lettres mettant en tête la lettre <A> qui désigne l'aluminium suivi du principal métal d'addition et son pourcentage

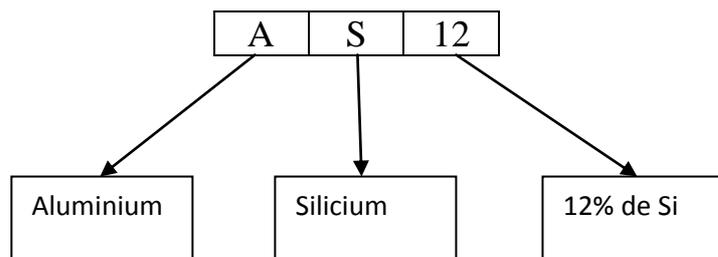


Figure I.2.1 : Composition chimique de l'alliage Al Si 12

Eléments	Al	Si	Mn	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Sn	Ti	Zn
% max	Reste	13.5	0.55	0.15	0.65	0.10	0.10	0.10	-	0.20	0.15
% min		10.5	-	0.10	0.55	-	-	-	-	0.15	-

Tableau I.2.1 : Composition chimique de l'alliage Al Si 12

I.2.3. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION :

➤ Silicium

Cet élément à une teneur voisine de l'eutectique Al-Si donne toutes ses propriétés :

- très bonne coulabilité,
- pas de risque de criques,
- faible coefficient de dilatation 20×10^{-6} ($0 \div 100$) °C,
- faible retrait de fonderie : 11‰,
- bonne résistance aux chocs,
- bonne aptitude à l'étanchéité,
- bonne aptitude à la soudabilité,
- bonne résistance à l'action des agents atmosphériques, par contre cette teneur a tendance à provoquer dans les pièces moulées, des retassures internes.

➤ Fer

La teneur en fer doit être inférieure à 0,8%, au-delà de 0,8% de fer, il y a formation dans l'alliage d'un constituant lamellaire qui diminue considérablement les caractéristiques mécaniques, en particulier l'allongement et la charge à la rupture. Par contre, une teneur en fer proche du maximum tend à diminuer les retassures internes.

Précautions :

- éviter l'emploi de creusets en fonte,
- poteyer soigneusement tous les outils de fusion et de coulée (cuillères pour coulée en coquille).

I.2.4. LA FUSION :

Il est recommandé d'adopter la même proportion de jets dans toutes les charges.

Règles de fusion :

I.2.4.1 – Température :

Le maintien prolongé à l'état liquide et la surchauffe favorisent l'oxydation et l'absorption de gaz : ils tendent à donner à l'alliage un grain grossier, il faut donc :

- Fondre en un temps minimum,

- Contrôler la température à l'aide d'un pyromètre régulièrement étalonné.

I.2.4.2 - Gaz et oxydation :

Gaz et oxydes sont cause de défauts altérant la santé des pièces, il faut donc :

- Eviter toutes traces d'humidité,
- Utiliser des lingots ou des déchets propres,
- Décraiser seulement quand cela est nécessaire,
- Réduire au maximum la hauteur de la chute du métal lors de tous transvasements.

I.2.5. AFFINAGE :

- C'est l'affinage qui confère à l'alliage toutes ses propriétés ; il sera donc fait dans des conditions précises : de température, de temps et de proportion des produits affinant.

- Le métal affiné doit être coulé dans un temps strictement limité, sinon l'effet de l'affinage disparaît.
- Les transvasements de métal affiné détruisent partiellement l'effet de l'affinage.

Les produits employés pour cet affinage sont :

- Le sodium métallique ;
- Les mélanges de sels de sodium sous forme de poudres.

I.2.5.1. Procédés d'affinage dans le cas de la coulée en sable :

On décrit ici trois procédés qui s'appliquent uniquement à l'AS12U, le premier procédé est le plus adapté vu qu'il est pratique et sûr.

I.2.5.1.1. Double affinage :

- Dans le four de fusion, une fois le métal complètement fondu (vers 650°C), décaiser le bain et le recouvrir avec 0,6% (du poids total de la charge) de poudre de PACZ DK.
- Une fois le métal est sorti du four soit par la sortie du creuset du four (cas du creuset amovible) ou par transvasement du métal dans un creuset chauffé au rouge (car d'un four de fusion basculant), dans ce dernier cas, il est utile avant transvasement d'enfoncer plusieurs fois la couche de poudre au fond du métal au moyen d'une cloche à trous.
- On introduit dans le métal sorti du four le sodium entre (740 ÷ 780) °C. Le poids du sodium est entre (0,06 ÷ 0,07)% du poids total du métal fondu.
- Attendre cinq minutes au minimum.
- Couler généralement entre (700 ÷ 730) °C. Le temps entre l'introduction du sodium et la coulée ne doit pas dépasser dix à douze minutes (cette règle est impérative).

I.2.5.1.2 - Affinage au sodium (sans poudre de PACZ)

Ce procédé ne diffère du précédent affinage que par la suppression de poudre de PACZ, l'introduction du sodium restant la même. Ce procédé est moins sûr que le précédent et présente plus de dangers de piqûres.

I.2.5.1.3 - Affinage à la poudre PACZ DK

- Protéger le métal, une fois fondu, par un peu de poudre PACZ DK (0,2 ÷ 0,5)% ;
- Suivant la température de coulée des pièces, la température du métal sera portée à (780 ÷ 820)°C ;
- Sortir le métal du four et décrasser ;
- Répandre sur la surface du bain 1 à 2% du poids total du métal de poudre PACZ DK afin de retarder le refroidissement du creuset.
- Laisser la poudre en contact avec le métal pendant (10 ÷ 15) minutes, puis enfoncer légèrement en surface, au moyen d'un écremoir poteyé et chaud ;
- Décrasser soigneusement ; détacher les croûtes de flux qui adhèrent aux parois du creuset.

I.2.5.2 - Contrôle de l'affinage

Le contrôle est fait rapidement et simplement ; il suffit de couler un barreau éprouvette en coquille, et faire un examen du métal lors du refroidissement et la cassure de l'éprouvette nous renseigne sur l'efficacité de l'affinage.

➤ **Un alliage AlSi12U bien affiné présente**

- Une peau d'oxyde épaisse,
- Une surface liquide bleutée après décrassage,
- Une cassure soyeuse, mate à grain très fin,
- Le barreau supporte une déformation importante par choc.

➤ **Un alliage AlSi12U sous affiné présente**

- Une peau d'oxyde peu épaisse,
- Une surface liquide faiblement bleutée,
- Une cassure brillante à grains grossiers,
- Des difficultés d'usinage.

➤ **Un alliage AlSi12U sur affiné présente**

- Une peau d'oxyde très épaisse,
- Une cassure présentant des piqûres.

I.2.5.3 - Procédés d'affinage dans le cas de la coulée en coquille**1^{er} Procédé**

Dans le four on répand sur le métal, après écrémage, $(0,5 \div 1)\%$ de poudre PACZ DK ou BTK ; ou bout de quelques minutes on écarte le flux pour puiser avec la cuillère de coulée ; on renouvelle l'affinage toutes les $(30 \div 45)$ mn.

2^{eme} Procédé

Dans le four on garde la masse en fusion sous une couche de poudre PACZ DK ou BTK. Toutes les demi heures environ, la couche est enlevée et remplacée, les quantités de poudre utilisées à la première introduction $(0,2 \div 0,4)\%$; à chacune des suivantes $(0,1 \div 0,2)\%$

3^{eme} Procédé

On introduit, toutes les trente minutes environ, $(0,01 \div 0,02)\%$ de sodium (ces doses sont doublées pour la première introduction).

I.2.6. DEGAZAGE

Si l'AlSi12U est affiné à la poudre PACZ, et si en fin de fusion on a recouvert le bain avec un peu de poudre PACZ, il ne nécessite pas l'emploi de flux de dégazage.

Toutefois, si un traitement auxiliaire doit être fait, il sera fait avant l'affinage.

D'autre part, le traitement de dégazage par des flux chlorés risque de diminuer l'action des sels d'affinage, il faut alors dans ce cas maintenir le métal au repos, avant l'affinage pendant $(20 \div 30)$ mn

I.2.7. Le moulage : [19]

Le moulage consiste à verser un métal liquide qui s'écoule par gravité ou sous pression dans un moule dans lequel il se solidifie en prenant la forme de l'empreinte réalisée dans la cavité du moule.

Les étapes du moulage semblent simples :

- Fondre le métal
- Le verser dans le moule
- Le laisser refroidir

➤ Possibilités et avantages du moulage

- Permet de réaliser des pièces de formes complexes
- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures

- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie
- On peut réaliser des pièces de très grande dimension
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries.

➤ **Inconvénients du moulage**

Les inconvénients dépendent des procédés de moulage :

- Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)
- Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés (ex : moulage en sable)
- Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion
- Problèmes environnementaux (fumées...)

I.2.7.a. Moulage en sable :

Le matériau est coulé dans un moule en sable. Le moule sera détruit après la fabrication de chaque pièce, il faut donc refaire un moule pour chaque pièce. Le moule est fabriqué en au moins deux parties. Chaque partie ayant une empreinte donnant la moitié des formes de la pièce. Pour chaque partie du moule on utilise donc un modèle (en métal, bois ou autre matériau) qui enfoncé dans le sable va laisser son empreinte dans la partie du moule. Le modèle est ensuite extrait du moule avant que les deux parties du moule soient assemblées.

Lorsque la pièce a des formes intérieures qui empêchent toute extraction du modèle, on insère entre les deux parties du moule un noyau en sable qui devra être maintenu dans le moule, puis détruit après démoulage de la pièce. Ce noyau est donc fabriqué de la même manière que chacune des parties du moule en tassant du sable dans un modèle en deux parties ayant les formes de la pièce.

➤ **Avantages du procédé :**

- Possibilité de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé (acier, fonte).
- Possibilité de mouler des pièces de (très) grande taille (Moulage de carters de machines)
- Procédé rentable pour les petites et moyennes séries (quelques dizaines à quelques milliers de pièces)

➤ **Inconvénients du procédé :**

- Surfaces obtenues peu précises ($\pm 0,5$ mm) Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles

-Procédé peu rentable pour les grandes séries.

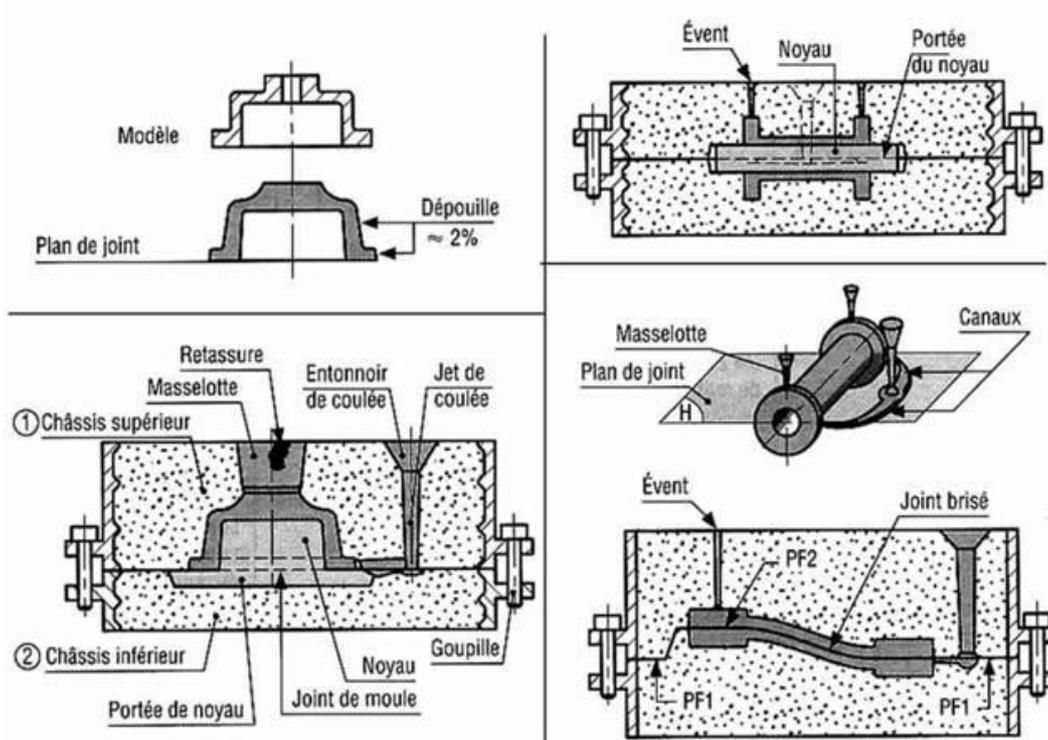


Figure I.2.2 : moulage en sable

I.2.7.b. Moulage en coquille par gravité :

Le matériau est coulé dans un moule métallique. Le principe est donc le même que pour le moulage en sable, mais on utilise le même moule pour toute une série de pièces. On peut également pour les formes intérieures utiliser un noyau en sable.

Avantages du procédé :

- Procédé plus rentable pour les moyennes et grandes séries.
- Précision meilleure que pour le moulage en sable ($\pm 0,3$ mm). Cependant cela nécessite quand même un usinage des surfaces fonctionnelles de la pièce.

Inconvénients du procédé :

- Réservé aux matériaux dont le point de fusion est inférieur à 900°C (alliages de cuivre d'aluminium ou de zinc...)
- Le prix du moule exclu ce procédé pour les petites séries.

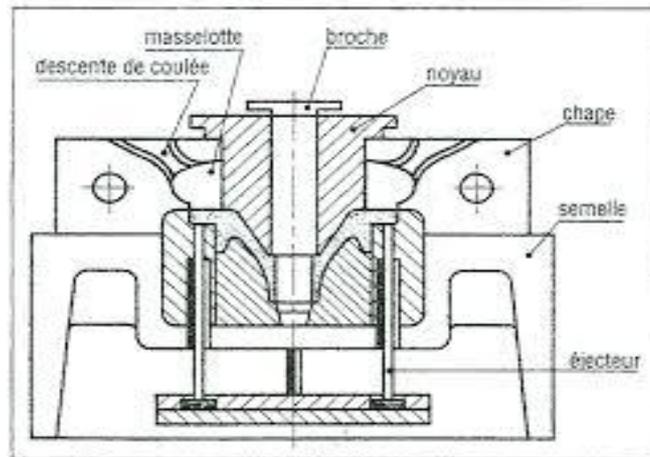


Figure I.2.3 : moulage en coquille par gravité

I.2.8. Moulage sous pression :

Dans ce procédé le métal liquide est injecté dans le moule de la machine à mouler sous pression (30 à 100 MPa). Ce procédé permet d'obtenir des pièces ayant une configuration très compliquée avec des dimensions très précises, ce qui permet de supprimer partiellement ou totalement l'opération d'usinage.

A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en grandes séries.

Les machines comprennent toujours un dispositif de fermeture et d'ouverture du moule avec serrage énergétique au moment de l'injection du métal sous pression. Le moule comprend deux blocs (chapes), l'un fixé sur le bâti de la machine et sur lequel l'empreinte doit être minimum et l'autre est monté sur le chariot mobile de la machine à mouler et comportant la majeure partie de l'empreinte, ainsi que les éjecteurs servant à éjecter la pièce moulée.

I.2.8.1. Composition d'une machine à souler sous pression :

- un mécanisme assurant la fermeture et l'ouverture d'un moule en deux parties ;
- un système d'injection assurant le remplissage des empreintes ;
- un dispositif d'éjection des pièces ;
- un système de transmission de l'énergie qui assure le cycle : fermeture, injection, ouverture et éjection.

I.2.8.2. Les paramètres essentiels pouvant exercer une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression sont :

- La température de coulée du métal liquide ;
- Le réglage de la machine ;
- La durée du cycle d'injection ;
- La pression d'injection ;
- Le volume du dosage ;
- La température du moule.

Les avantages principaux du procédé :

- Excellente précision dimensionnelle ;
- Très bons états de surface ;
- Réduction des opérations d'usinage ;
- Cadences élevées avec automatisation complète ;
- Utilisation presque exclusive d'alliages de recyclage à cout réduit.

Les limitations du procédé :

- Difficile de réaliser des formes intérieures complexes par noyautage ;
- Difficile de réaliser des traitements thermiques de durcissement structural complets.

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

I.3.1. Introduction :

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières. Il peut s'y ajouter simultanément des traitements mécaniques (traitements thermomécaniques) ou des traitements chimiques (traitements thermochimiques). On rencontre également des traitements thermiques au cours du refroidissement d'une pièce moulée après solidification et pendant des opérations de mise en forme par déformation plastique, par frittage ou par soudage, etc., quand des transformations structurales, sous l'influence des variations de température au cours de ces opérations, s'ajoutent à celles que ces procédés peuvent eux-mêmes provoquer.

I.3.2. Buts et rôle des traitements thermiques : [7]

Le but des traitements thermiques est de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables, soit pour sa mise en forme, soit pour son utilisation :

- conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie ;
- Augmenter la dureté et la résistance mécanique ;
- Augmenter la malléabilité ;
- Facilité de mise en forme ;
- Changement de la microstructure de la pièce ;
- Affiner les grains et homogénéiser la structure.

I.3.3. Cycle thermique : [7]

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose des étapes suivantes : (voir la **figure I.3.1**)

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC3).

- BC : Maintient à une température définie.

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

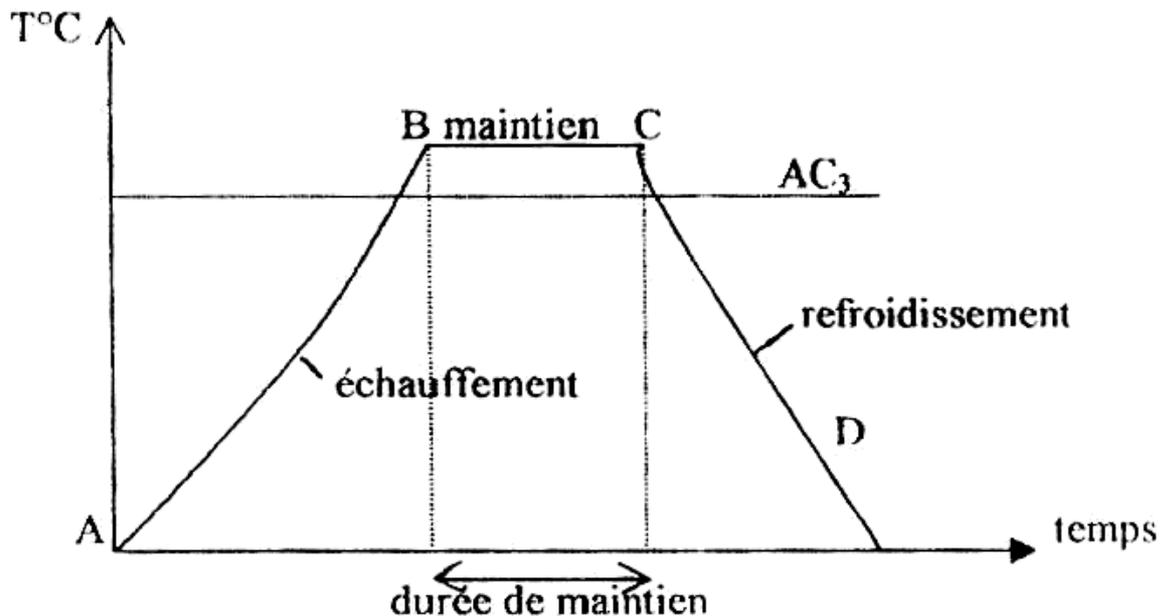


Figure I.3.1 : cycle thermique

I.3.4. Traitements thermiques des alliages d'aluminium :

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois principaux :

I.3.4.a. Les traitements d'homogénéisation : [4]

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits de fonderie ou corroyés, et destinés plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, forgeage, laminage...).

Ils consistent en général à des maintiens de 6h à 48h à des températures allant de 450 °C à 610 °C, qui ont pour but de dissoudre les phases intermétalliques et de réaliser une homogénéisation de la solution solide.

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

I.3.4.b. Traitement d'adoucissement : [4]

L'objectif est de conférer à un alliage donné écroui la plus faible limite d'élasticité tout en lui rendant ses propriétés et meilleures capacités de déformation.

On peut le faire en procédant par l'une de ces trois possibilités :

- **Restauration** : adoucissement partiel par réchauffage à température modérée (250°C) permettant une réorganisation des dislocations

- **Recristallisation** : adoucissement complet par chauffage à température plus élevée permettant la formation de nouveaux grains

- **Coalescence** : durcissement structural par grossissement de précipités résultant de dissolution à haute température de fines particules.

I.3.4.c. Les traitements de trempe structurale : [8]

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

I.3.4.d. Stabilisation : [8]

Elimination des contraintes résiduelles par relaxation thermique à des températures de l'ordre de 120 à 140 °C.

I.3.4.f. Etape de mise en solution : [8]

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

Les pièces sont portées à une température déterminée en fonction de la nuance d'alliage d'aluminium (environ 540°C). Comme son nom l'indique, cette étape permet de mettre en solution les différents constituants solubles dans la solution solide.

I.3.4.g. Etape de refroidissement(ou trempe) : [8]

Les pièces sont plongées rapidement dans un bac d'eau thermo-régulé. Le temps de transfert et la température de l'eau sont des éléments importants pour une bonne maîtrise du processus : le refroidissement doit être suffisamment rapide pour maintenir la solution solide en sursaturation.

Il est possible d'incorporer un polymère dans l'eau afin de réduire la vitesse de refroidissement et ainsi, diminuer le risque de fissuration ou de déformation.

I.3.4.h Maturation : [9]

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel (évolution spontanée à la température ordinaire de la solution solide sursaturée).

Pour certains alliages, cette évolution est le moyen normal d'obtention du durcissement structural.

Dans quelques cas, la température de maturation peut être légèrement supérieure à la température ordinaire afin d'accélérer l'évolution, après cette évolution l'alliage est à l'état muri.

I.3.5. Types de fours : [9]

I.3.5.a. Fours à sole :

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

I.3.5 .b. Fours à bain de sels :

Ils présentent les avantages suivants :

- rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent ;

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation ;
- Absence de dénaturation du métal : le bain qui peut être choisi neutre, oxydant ou réducteur, protège la pièce de tout contact avec l'oxygène de l'air.

I.3.5 .c. Fours électriques :

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

I.3.6. Diffusion : [10]

I.3.6.1. Généralités sur la diffusion à l'état solide:

Les phénomènes de diffusion à l'état solide correspondent à des sauts effectués par les atomes dans les défauts du cristal, sous l'effet de l'agitation thermique.

Alors que les vitesses de migration des atomes dans les gaz ou dans les liquides sont pratiquement visibles à l'échelle macroscopique, il est rare sur un métal de voir, à la température ambiante, l'évolution de ses propriétés par suite d'un phénomène de diffusion. Ce n'est qu'à haute température, entre $T_f/2$ et T_f , T_f étant la température de fusion, que le transport des atomes prend de l'importance à grande distance dans le réseau cristallin. La diffusion est un phénomène important, qui est à la base de tous les traitements thermiques industriels conditionnant les propriétés structurales des matériaux en service.

Les bases théoriques des phénomènes de diffusion ont été établies par Fick (1855) : elles expriment, au même titre qu'un flux de chaleur ou qu'une densité de courant électrique, un flux d'atomes dans une direction donnée du cristal. On est amené ainsi à définir une grandeur physique importante, appelée le coefficient de diffusion. Ce coefficient intervient dans deux lois fondamentales, appelées lois de Fick.

I.3.6 .2. Définition de la diffusion :

La diffusion est un déplacement aléatoire d'atomes ou de lacunes dans le réseau cristallin (migration), provoqué par l'agitation thermique, dont la longueur est au moins égale à une

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

distance interatomique. Les phénomènes de diffusion régissent la cinétique de nombreux processus métallurgiques tels que :

- la solidification,
- l'homogénéisation par recuit des alliages,
- les transformations de phases (à l'exception des transformations martensitiques),
- la précipitation,
- la restauration,
- la recristallisation.

On peut envisager plusieurs modes de diffusion :

- la diffusion en volume qui se fait à travers le cristal,
- la diffusion intergranulaire, le long des joints et sous-joints de grains,
- la diffusion dans les dislocations,
- la diffusion à la surface du matériau,
- la diffusion à la surface des fissures.

Généralement, c'est la diffusion en volume qui est prépondérante et pour cette étude, nous nous limiterons à ce cas.

I.3.6 .3. Mécanismes de diffusion : [10]

I.3.6 .3.a. Mécanisme lacunaire :

Si un site n'est pas occupé, un atome proche voisin peut sauter sur ce site, faisant apparaître une lacune au site qu'il vient de quitter. Il y a conservation du nombre de lacunes : on parle de migration de la lacune et/ou de migration de l'atome, mais les comportements ne sont pas identiques. Dans un cristal formé d'un élément pur, à tout moment la lacune peut sauter vers n'importe lequel des sites premiers voisins : ses sauts successifs sont bien indépendants les uns des autres. Par contre, il n'en est pas de même pour un atome repéré : soit un isotope des atomes du cristal (autodiffusion du traceur A^* dans A), soit un atome chimiquement différent (hétérodiffusion à dilution infinie de B dans A). Plaçons-nous dans le cas de l'autodiffusion.

Soit un premier saut de l'atome repéré situé en A vers le site lacunaire B . Après ce saut (Fig. 12.2), l'atome situé en B , se trouve voisin de la lacune en A : un second saut BA est possible, avec une probabilité supérieure à celle qui résulterait d'une distribution aléatoire : dans le calcul du parcours, nous avons deux sauts sans déplacement net. Bien entendu d'autres éventualités sont possibles. La lacune sise en A peut sauter vers n'importe lequel des

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

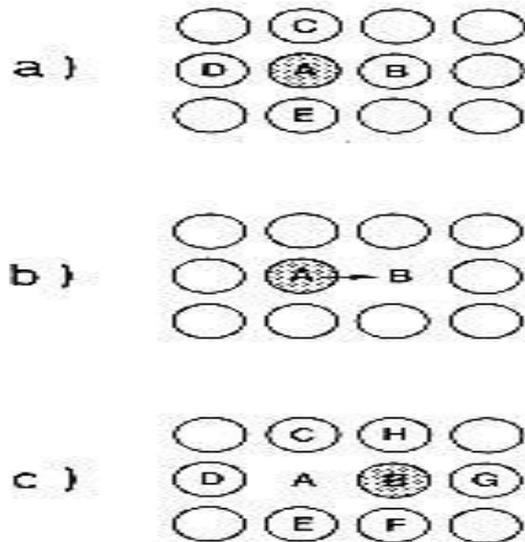


Fig. I.3.2: Corrélation entre sauts successifs pour un mécanisme lacunaire

I.3.6 .3.b. Mécanisme interstitiel :

Un atome interstitiel sautant de site interstitiel en site interstitielle est un défaut ponctuel dont les sauts successifs ne sont pas corrélés. C’est le mécanisme interstitiel direct. Il est typique des atomes qui se trouvent normalement en solution solide interstitiel («interstitiel chimiques»).

Une variante de ce mécanisme est possible, si l’atome repéré peut se trouver en position substitutionnelle et interstitielle : c’est le mécanisme interstitiel indirect (ou « interstitialcy »). Supposons cet atome positionné en un site de substitution (Fig. 12.3). Il ne pourra sauter que si un interstitiel arrive en position voisine — et le chasse de son site, le mettant ainsi lui-même en position interstitielle. Notre atome repéré pourra ensuite sauter vers n’importe quel site substitutionnel voisin, créant de ce fait un défaut interstitiel. A ce stade, la configuration ressemble au cas du mécanisme lacunaire, puisqu’un défaut ponctuel (un interstitiel) est voisin de l’atome repéré ; le saut inverse de l’interstitiel ramène la configuration au stade précédent :

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

atome repéré en position interstitielle ; ces deux sauts sont « corrélés ». Mais l'effet de corrélation s'arrête là, car une fois l'atome repéré en position interstitielle, il n'y a plus dans la configuration mémoire du saut précédent, et tous les sauts possibles sont équiprobables. Les effets de corrélation sont limités aux paires de sauts : « insertion → substitution → insertion » — alors que dans le mécanisme lacunaire tous les sauts successifs sont corrélés de proche en proche.

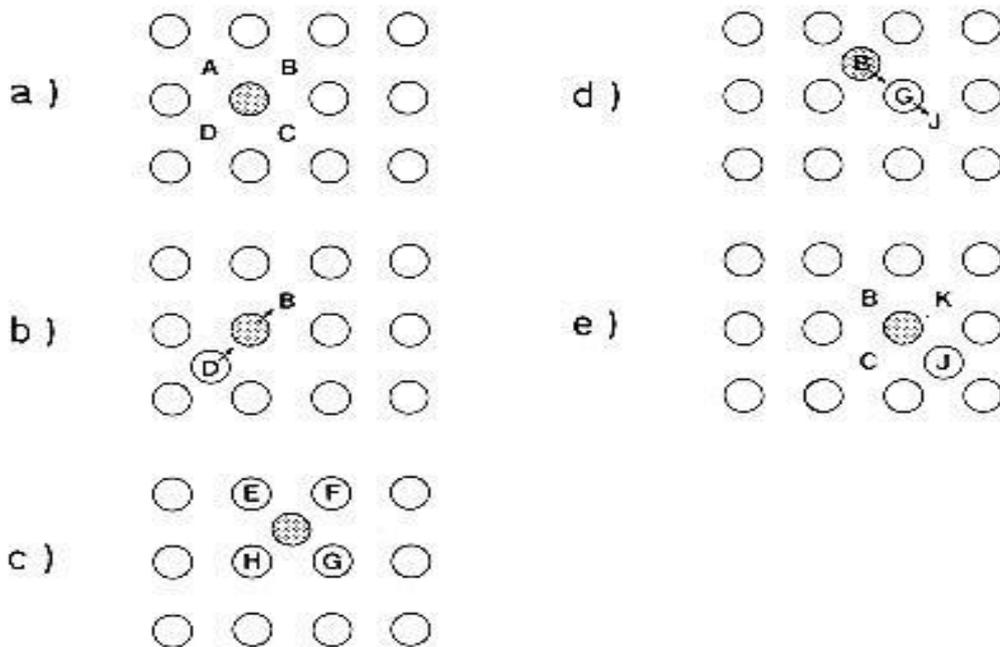


Fig. I.3.3 : Corrélation entre sauts successifs pour un mécanisme interstitiel indirect

I.3.6 .4. La microstructure :

I.3.6 .4. a. Note préliminaire : [11]

Comme l'indique leur étymologie, les microstructures sont constituées d'un ensemble d'éléments organisés à l'échelle microscopique et qui contrôle les propriétés d'un grand nombre de matériaux. Leur observation et leur caractérisation nécessitent donc l'utilisation de techniques microscopiques. Le pouvoir séparateur d'une radiation électromagnétique est fixé par sa longueur d'onde. La limite de résolution du microscope optique est de l'ordre du μm . Le pouvoir séparateur des microscopes électroniques, qui utilisent des faisceaux d'électrons d'énergie élevée ($\lambda=0,005 \text{ nm}$), est de l'ordre de grandeur des rayons atomiques, c'est-à-dire

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

inferieur au nm. La méthode la plus utilisée pour étudier la structure des solides à l'échelle de l'atome est la microscopie électronique. Il existe d'autres techniques pour l'observation de la microstructure.

La métallographie est la discipline qui étudie la structure cristalline des métaux et des alliages et les relations entre cette structure et les propriétés physiques des métaux. Les principaux utilisés en métallographie sont le microscope et le générateur de rayons X.

L'observation au microscope- par exemple- d'échantillons convenablement préparés, permet de déterminer la taille, la structure et l'orientation des cristaux du métal. Grâce à de telles observations, les métallurgistes peuvent fréquemment identifier un métal ou un alliage, découvrir d'éventuelles impuretés et vérifier l'efficacité des traitements de trempe et de recuit.

I.3.6 .4.b. La macrographie : [12]

C'est la partie de la métallographie qui utilise, dans son examen, des outils d'observation de faibles grossissements ne dépassant pas les 5 à 10 fois tels l'œil nu, loupe.

I.3.6 .4.c. La micrographie : [12]

La micrographie est la technique qui utilise des instruments de forts grossissements allant de 25 et 1500 fois pour les microscopes optiques et jusqu'à $5 \cdot 10^5$ fois pour les microscopes électroniques à balayage. Ces deux techniques ont presque les mêmes étapes et les mêmes applications.

I.3.6 .5. Microscopie optique : [4]

En science des matériaux, ceux dont la microstructure est le plus souvent observée sont les matériaux métalliques, céramiques et les matériaux opaques ; l'examen et l'étude de leur microstructure doit se faire par réflexion de la lumière sur une surface préparée à cet effet, appelée coupe métallographique.

Le pouvoir de résolution du microscope optique est limité par la longueur d'onde de la lumière utilisée. Il est de l'ordre de $0.2 \mu\text{m}$, c'est-à-dire que le grossissement de cet appareil ne dépasse guère 1500 fois

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

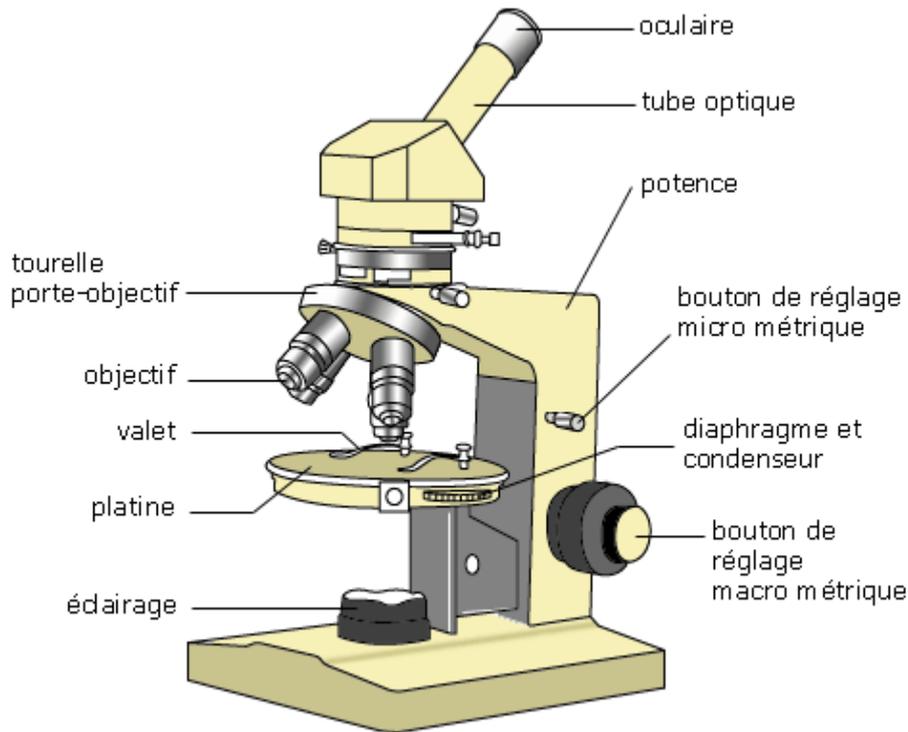


Fig. I.3.4 : Microscope optique

I.3.6 .5. Microscope électronique :

Le microscope électronique permet d'étudier en détail la structure fine d'un métal.

L'une des plus grandes réalisations dans ce domaine est l'observation directe des défauts des structures cristallines.

I.3.6 .5.a. Le microscope électronique à balayage : [13]

Il permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (x500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ. Le MEB conventionnel fonctionne dans un vide ordinaire (10^{-5} à 10^{-6} mbar); les échantillons peuvent être massifs, de dimension allant de quelques $1\mu\text{m}$ (particules) à une dizaine de cm de diamètre, voire plus (prélèvements industriels). Ils doivent supporter le vide sans le polluer et être conducteurs. La préparation est en général simple. Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental ou low vacuum) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbar, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons humides ou gras (ech. biologiques), d'isolants sans métallisation préalable (céramiques, métaux corrodés), voire en présence de liquide. Equipé de détecteurs appropriés, le MEB permet de faire entre autres de la microanalyse X, analyse élémentaire locale.

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

➤ Fonctionnement simplifié :

L'image MEB est une image reconstituée : une sonde, le faisceau d'électrons, balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone un signal induit par cette sonde pour en former une image, cartographie de l'intensité de ce signal.

Le MEB est constitué d'une source d'électrons qu'un jeu de lentilles "condenseur" focalise sur un diaphragme. Une deuxième lentille "objectif" refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin (<15 à 200 \AA).

Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon. Ceci forme la sonde.

Sous l'impact du faisceau d'électrons, il y a essentiellement :

- rétrodiffusion d'électrons du faisceau incident avec plus ou moins de perte d'énergie;
- émission d'électrons secondaires de faible énergie, provenant des couches externes des atomes de l'échantillon
- émission de rayons X, avec les électrons Auger;
- émission de photons UV-visible,
- écoulement d'un courant vers la masse.

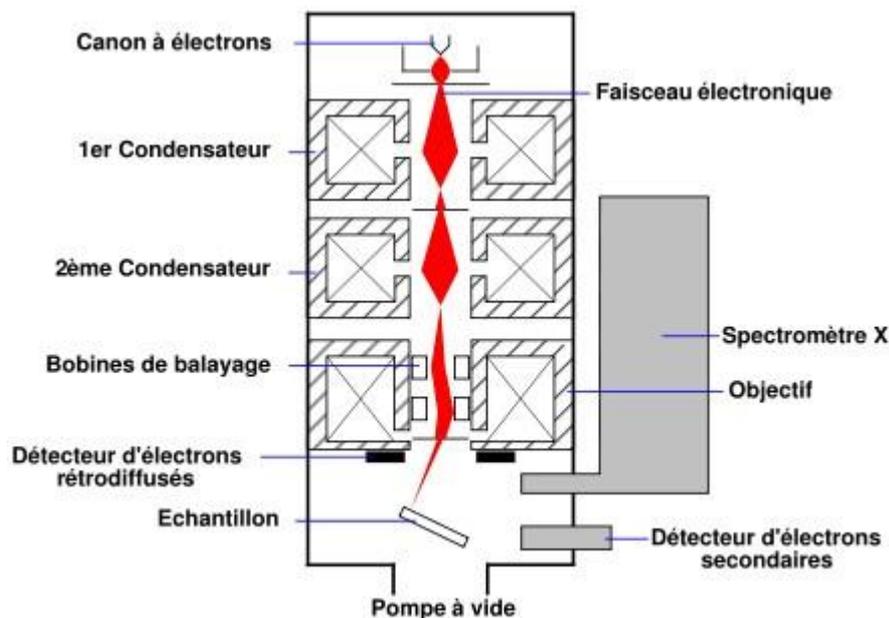


Fig. I.3.5 : Microscope électronique à balayage

I.3.6 .5.b. La microscopie électronique en transmission : [14]

(MET, en anglais TEM pour *Transmission Electron Microscopy*) est une technique de microscopie où un faisceau d'électrons est « transmis » à travers un échantillon très mince. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image, dont la résolution peut atteindre $0,08$ nanomètre. Les images obtenues ne sont généralement pas

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

explicites, et doivent être interprétées à l'aide d'un support théorique. L'intérêt principal de ce microscope est de pouvoir combiner cette grande résolution avec les informations de l'espace de Fourier, c'est-à-dire la diffraction. Il est aussi possible d'étudier la composition chimique de l'échantillon en étudiant le rayonnement X provoqué par le faisceau électronique. Contrairement aux microscopes optiques, la résolution n'est pas limitée par la longueur d'onde des électrons, mais par les aberrations dues aux lentilles magnétiques.

Le principe du microscope électronique en transmission a été mis au point en 1931 par Max Knoll et Ernst Ruska. Ce dernier a d'ailleurs reçu le prix Nobel de physique en 1986 pour cette invention.

Elle consiste à placer un échantillon suffisamment mince sous un faisceau d'électrons, et à utiliser un système de lentilles magnétiques pour projeter l'image électronique de l'échantillon sur un écran phosphorescent qui la transforme en image optique. Pour les échantillons cristallins, un autre mode d'utilisation consiste à visualiser le cliché de diffraction de l'échantillon.

Les applications de la microscopie électronique couvrent un très vaste domaine, de l'observation d'échantillons biologiques, comme le noyau des cellules à l'analyse d'échantillons industriels dans la métallurgie ou l'industrie des semi-conducteurs.

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

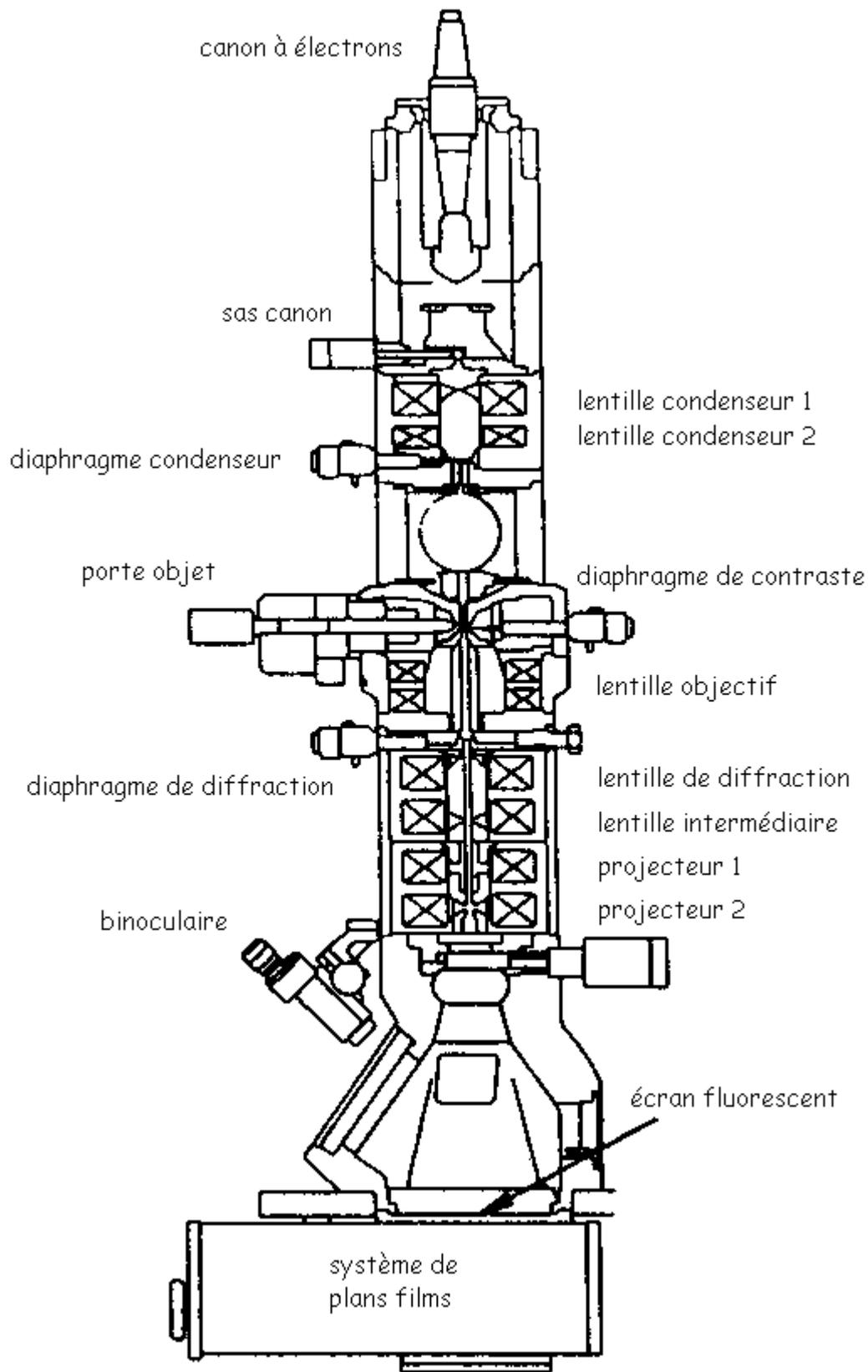


Fig. I.3.6 : Schéma d'un microscope électronique de transmission.

I.3.6 .6. Paramètres microstructuraux : [15]

Joints de grain :

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

Dans la plupart des cas, la matière cristalline est composée de plusieurs cristaux. Il existe quelques exemples notoires de monocristaux, comme par exemples certains cristaux géologiques, dont les gemmes et pierres précieuses, et des réalisations technologiques comme par exemple les aubes de turbine pour les moteurs d'avions de chasse, les semi-conducteurs pour l'électronique (germanium) ou les monocristaux d'étude, utilisés en recherche métallurgique ou pour caractériser de nouvelles molécules pharmaceutiques.

Mais dans le cas général, la matière est composée de plusieurs cristaux accolés, qui ont une orientation différente ; on dit qu'elle est «polycristalline». L'interface entre deux cristaux s'appelle un «joint de grain»

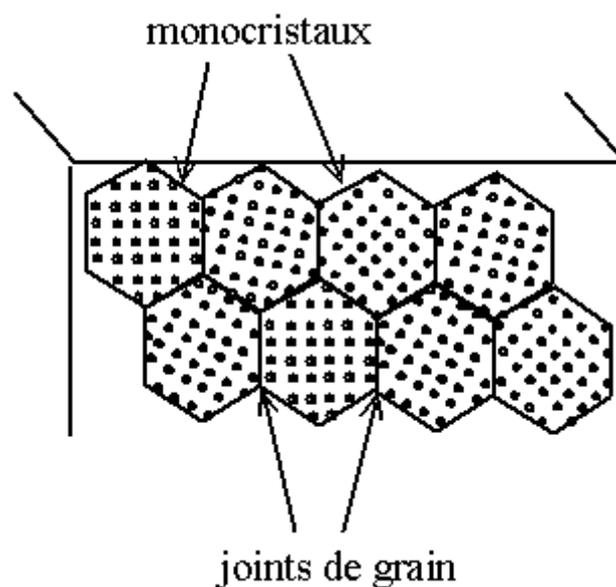


Fig. I.3.7 : Matière polycristalline et joints de grain.

Les précipités : [9]

Ce sont des particules de seconde phase, de composition chimique différente de la matrice et se forment par réactions entre métal de base et un ou plusieurs de ses éléments d'alliage ou entre ses éléments d'alliage eux même. Les précipités peuvent être classés en trois types selon le degré de cohérence cristallographique qu'ils présentent avec la matrice dans laquelle ils sont inclus.

➤ Précipités cohérents

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice, les réseaux cristallins de la matrice et du précipité sont semblables, seul diffère légèrement les paramètres des deux réseaux. Ceci génère des distorsions élastiques à l'interface précipité-matrice. Voir figure (a)

➤ Précipités semi-cohérents

CHAPITRE I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES, MICROSTRUCTURE ET DIFFUSION

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice seulement selon certains plans et il n'y a aucune continuité selon les autres plans ; la semi-cohérence est parfois obtenue grâce à la présence de dislocations coin le long de l'interface.

➤ Les précipités incohérents

Ont un réseau cristallin trop différent de celui de la matrice. Pour qu'il existe une continuité entre les deux réseaux l'interface matrice-précipité est semblable à un joint de grain quelconque. Voir **Fig. I.3.8**

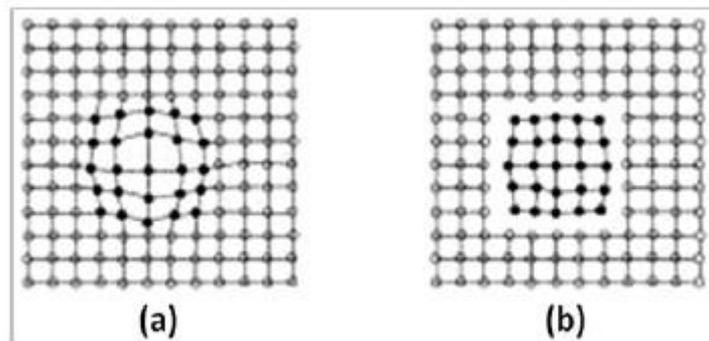


Fig. I.3.8 : montrant les précipités cohérents(a) et incohérents(b)

Les inclusions : [9]

Sont des saletés qui proviennent de l'élaboration du métal à l'état liquide, ce sont le plus souvent des oxydes, des sulfures ou des silicates. Ces inclusions sont des particules étrangères solides, liquides ou gazeuses.

CHAPITRE I.4 : ESSAIS MECANIQUES

I.4.1. Introduction : [16]

Les essais mécaniques ont pour but de fournir les données nécessaires pour appréhender le comportement mécanique des matériaux, notamment dans le cas des procédés de mise en forme (laminage, filage, extrusion...), mais aussi de formage et d'assemblage. La connaissance des propriétés mécaniques conduit également au bon dimensionnement des structures, à la détermination des limites de rupture. Le calcul numérique est devenu d'un apport considérable dans l'interprétation et la compréhension des résultats des essais mécaniques. Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

I.4.2. Traction : [17]

I.4.2.a Description de l'essai (euro-norme 10002) :

Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données.



Fig. I.4.1 : Machine de traction

I.4.2.b. Les éprouvettes :

Les éprouvettes de traction sont normalisées ($\varnothing \square 4\text{mm}$ ou $e \square 3\text{mm} \dots$).

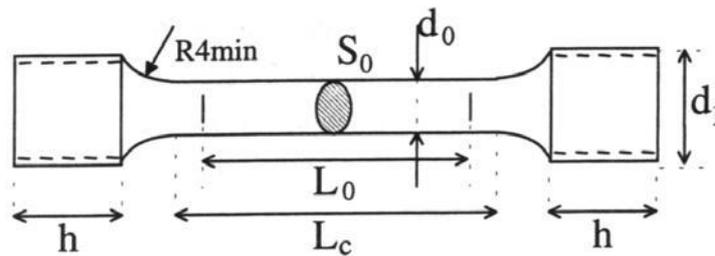


Fig. I.4.2 : Exemple d'une éprouvette de traction

$d_0 = \varnothing$ partie calibrée

$d_1 = \varnothing$ des têtes filetées

$L_0 =$ longueur entre repère $= 5d_0$

$L_C =$ longueur calibrée

$h =$ longueur des têtes

I.4.2.c. Diagramme de traction :

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = F/S_0$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. Ils sont obtenus en divisant la force ou l'allongement par la section, respectivement la longueur instantanée. Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. La figure 2 illustre l'allure que peut avoir les courbes de traction de différents matériaux.

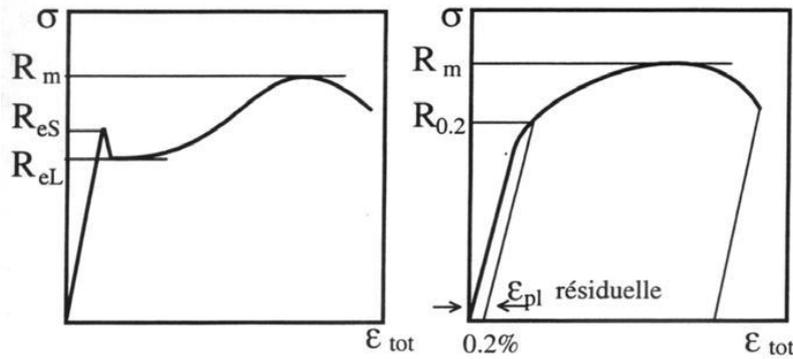


Fig. I.4.3 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.

I.4.3. Caractéristiques classiques de l'essai :

I.4.3.a. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité ou module de Young est défini comme la pente de la partie droite partant de l'origine du diagramme. Sa détermination par un essai de traction nécessite impérativement un extensomètre de bonne précision car la rigidité finie, même de la machine la plus robuste, est susceptible de modifier cette pente. Lorsque l'éprouvette n'est pas proprement alignée, la première partie de la courbe est arrondie. Dans la pratique il n'est d'ailleurs pas facile de commencer les mesures exactement à la force 0, car la fixation rigide d'une éprouvette qui résiste à plusieurs tonnes ne va pas sans effort. Le (Tableau I.4.1) rassemble les valeurs typiques du module d'élasticité pour différents alliages et métaux purs. Comme le module d'élasticité est principalement fonction des forces interatomiques, on constate que celui-ci est relativement peu sensible aux éléments d'alliage, au traitement thermique ou à l'écrouissage.

Matériaux	Module d'élasticité (GPa)
Acier Carbone	210
Fer	211
Alliage de cuivre	124
Cuivre	130
Alliage d'aluminium	72
Aluminium	70

Tableau I.4.1: Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux

I.4.3.b. La résistance à la traction σ_m :

C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(\Delta L)$ divisée par la section initiale (= maximum de la contrainte nominale) $\sigma_m = F_m/S_0$ (MPa)

σ_m : charge maximale

I.4.3.c. Limite apparente d'élasticité :

$\sigma_e = F_e/S_0$ (MPa)

F_e : charge à la limite apparente d'élasticité en Newton.

S_0 : section initiale en millimètre carré

I.4.3.d. Limite à la rupture

$$\sigma_r = F_r / S_0 \text{ (MPa)}$$

F_r : charge à la rupture en Newton.

I.4.3.d. L'allongement à la rupture A :

C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %. En raison de la localisation de la déformation, la majeure partie de l'allongement ne provient que d'une fraction de la longueur L_0 . La valeur de A est donc d'autant plus petite que l'éprouvette est longue. C'est pour cette raison que l'on doit mentionner le rapport L_0/d_0 avec la valeur de l'allongement. $A = 100 \cdot (L_u - L_0) / L_0$

L_u : longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture

L_0 : longueur de l'éprouvette initiale

I.4.3.f. Coefficient de Striction :

$$Z\% = (S_0 - S_u / S_0) \cdot 100$$

I.4.3.g. Allongement à la striction :

$$Z_u = (S_0 - S_u / S_u) \cdot 100$$

I.4.4. Essai de dureté :

La dureté est une mesure de la résistance à la déformation d'un matériau. La valeur exprimée par un nombre sans dimension est reliée directement ou indirectement dans les essais les plus fréquents à la plus ou moins grande facilité d'enfoncer un pénétrateur à la surface du corps étudié. L'intérêt réside dans la facilité et le caractère peu destructif de l'essai qui renseigne sur l'état d'un métal à l'état final ou lors des procédés de production (notamment à l'étape des traitements thermiques). Elle peut dans certains cas être mise en relation avec les caractéristiques de traction. Une autre utilisation pratique importante concerne les soudures.

Les différents facteurs des essais par pénétration :

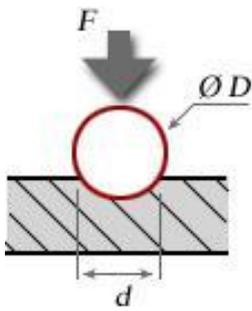
- Type de pénétrateur (forme et dimensions),
- Valeur de la force d'essai appliquée,
- Dimension choisie pour caractériser l'empreinte obtenue.

Mesure de la surface :

La dureté est donnée en mégapascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm^2).

I.4.4.a. Dureté Brinell :

L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre (D). La pression est maintenue pendant 15 à 30s selon le métal.



On applique une charge (F) de 500 ou 3000 kgf.

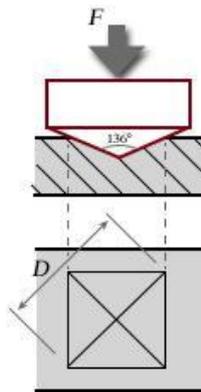
On mesure le diamètre (d) de l'empreinte en millimètres.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

On doit l'essai Brinell à l'ingénieur métallurgiste suédois Johan Brinell (1849 - 1925). Il s'applique aux métaux "peu durs". La norme Brinell de dureté a été éditée dès 1924.

I.4.4.b. Dureté Vickers :

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre.



Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un identeur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

La dureté Vickers (**HV**) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

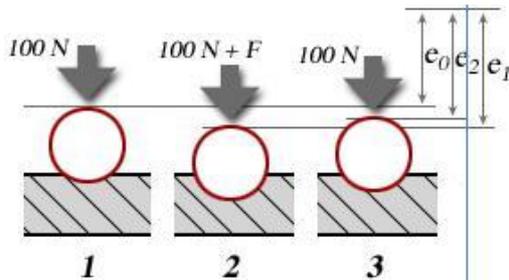
$$HV = \frac{1,854 F}{D^2}$$

Où F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres. La profondeur de pénétration H est $H = D / 7$. Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges. La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de microdureté, en 1969.

I.4.4.c. Dureté Rockwell :

Essai Rockwell : mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (**HRB**) ou d'un cône de diamant de 120°, dureté Rockwell C (**HRC**).

La norme de dureté Rockwell date de 1932.



L'essai consiste à appliquer une précharge de 100 N sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur e_0 . On applique une force supplémentaire F , pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur e_1 . On supprime la force F , le cône reste enfoncé d'une profondeur e_2 .

Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

➤ **ROCKWELL C**

$$HRC = 500(100 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique (\varnothing 0,2 mm).

La charge F est de 1400 N (150 kgf).

➤ **ROCKWELL B**

$$HRB = 500(130 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre.

La charge F est de 900 N (100 kgf).

I.4.5. Essai de résilience :**I.4.5.1 Introduction :**

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture. Bien que la résistance à la rupture se mesure traditionnellement, avec un essai de traction classique. Dans l'essai de traction la déformation est graduellement imposée à l'éprouvette. La matière a ainsi assez de temps pour réagir et s'adapter au changement. Dans la pratique, une pièce est souvent soumise à des chocs brutaux. Pour cette situation, les valeurs observées dans un essai de résilience ne donnent pas toujours satisfaction et peuvent même être trompeuses. De nombreux accidents spectaculaires survenus surtout à l'époque où l'on n'avait pas suffisamment reconnu cette différence, en témoignent (à la fin 19^{ème} et au début 20^{ème} siècle).

Le problème se pose surtout avec les matériaux fragiles et les matériaux qui contiennent des retassures, des inclusions ou des fissures. Ces défauts provoquent un effet d'entaille, modifient localement les contraintes et entraînent surtout une triaxialité des contraintes. Des métaux initialement ductiles peuvent aussi se fragiliser en raison :

- d'une exposition prolongée à des températures élevées (grossissement des grains, précipitation sur les joints ou précipitation des phases fragiles)
- de l'absorption de gaz (surtout H_2 , O_2)
- d'une attaque corrosive le long des joints de grains
- d'une accumulation des dégâts d'irradiation

I.4.5.2. Le mouton pendule (ou mouton de Charpy) :

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (Fig. 1). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ mgh_0 , h étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 . L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors

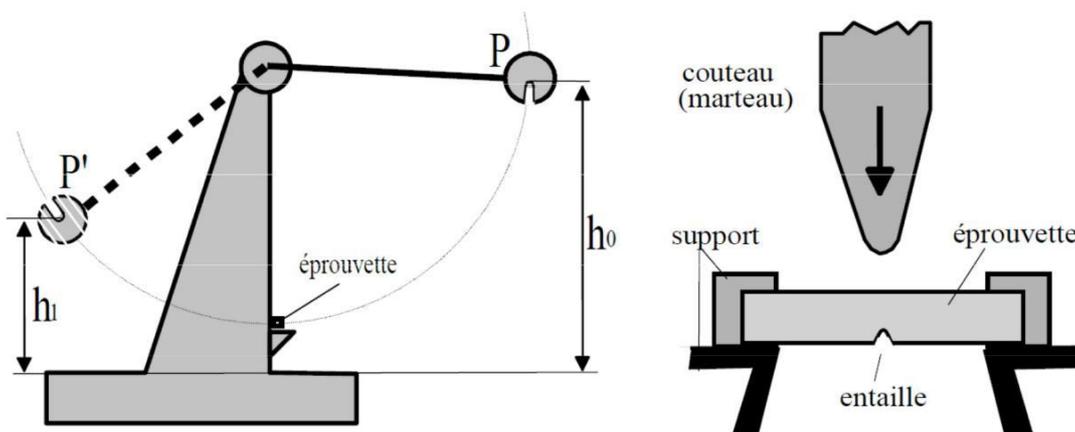


Fig. I.4.4 : Schéma d'un mouton pendule et vue de dessus de l'éprouvette avant choc

Comme l'énergie cinétique emportée par les débris après la rupture est négligeable, c'est l'énergie de rupture que l'on indique comme résultat de l'essai de résilience. De plus il faut absolument mentionner le type d'échantillon normé qu'on a utilisé pour sa détermination. Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U. Ils ont une entaille en forme de V ou U pour fixer l'endroit de la fissure. L'énergie de rupture est finalement indiquée en J (Joule), précédée par les lettres *KV* ou *KU* suivant la formule $K_{cv} = W/S$. Pour désigner qu'il s'agit d'une énergie de rupture (*K*, de l'allemand: Kerbschlagzähigkeit) mesurée avec une éprouvette ayant une entaille en forme de V ou U.

Pour obtenir la résilience a_K on divisera encore cette valeur par la section de l'échantillon à l'endroit de la fissure. L'unité habituelle pour exprimer la résilience a_K est le J/cm^2 tandis que l'énergie de rupture *KV* est indiquée en J. Comme la valeur a_K ne présente aucun avantage sur l'indication de l'énergie de rupture, on indique aujourd'hui uniquement l'énergie de rupture *K* (souvent directement appelée résilience).

I.4.5. Essai de la microdureté :

Cette méthode permet de se libérer de la dispersion et de l'imprécision des déterminations des duretés des matériaux rencontrées avec les mesures classiques de dureté. Elle a le même principe de la méthode statique, mais avec une charge appliquée à l'indenteur inférieur à (1kg), et la taille de l'empreinte laissée par la pointe sur la surface peut varier de quelques centaines de micromètres. Elle permet de résoudre de nombreux problèmes tels que: la mesure de la dureté des couches minces, évaluation de l'érouissage local, exploration d'alliages à phases multiples.

Des phénomènes influençant les mesures des microduretés nécessitent certaines précautions opératoires tels que :

- L'empreinte doit être suffisamment nette pour permettre une lecture précise, ce qui exige un bon état de surface de la pièce testée.
- La légère croissance de dureté jusqu'à la charge de 1kg, montre la nécessité de spécifier la charge sous laquelle la mesure a été faite pour obtenir des résultats comparables.
- Prendre en considération la charge maximale à appliquer de manière que la dureté du métal support n'intervienne pas dans les mesures.

Chapitre I.5 : defaults cristallins

I.5.1. Introduction :

L'état cristallin a été toujours considéré comme un empilement parfait d'atomes régulièrement répartis selon un système propre au matériau considéré. Les cristaux sont en réalité imparfaits et présentent des défauts locaux.

Cristal idéal + défauts \longrightarrow Cristal réel

I.5.2. Classification : [18]

Les défauts correspondent aux régions microscopiques d'un cristal dans lesquelles un atome est entouré de proches voisins situés en des positions différentes de celles observées dans un cristal parfait. Traditionnellement, les défauts sont répartis en quatre catégories suivant leur dimensionnalité. Les paragraphes suivants passent en revue les défauts ponctuels (0D), linéaires (1D), planaires (2D), et volumiques (3D). Ces défauts peuvent être classés d'un point de vue géométrique en :

- défauts ponctuels
- défauts étendus :
 - linéaires (Dislocation)
 - bidimensionnels : glissements, macles, empilements, joints de grains

I.5.2.a. Défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels se traduisent par une perturbation de l'ordre cristallin sur des dimensions limitées à une maille cristallographique typiquement :

- Les lacunes correspondent à un vide laissé dans la structure sur un site normalement occupé par un atome [Figure I.5.1.a].
- Les atomes interstitiels sont des atomes en surnombre dans une structure ou bien des impuretés placés sur des sites normalement vides [Figure I.5.1.b].
- Dans le cas où un atome occupe un site normalement occupé par un atome de nature chimique différente, on parle d'impureté substitutionnelle [Figure I.5.1.c]

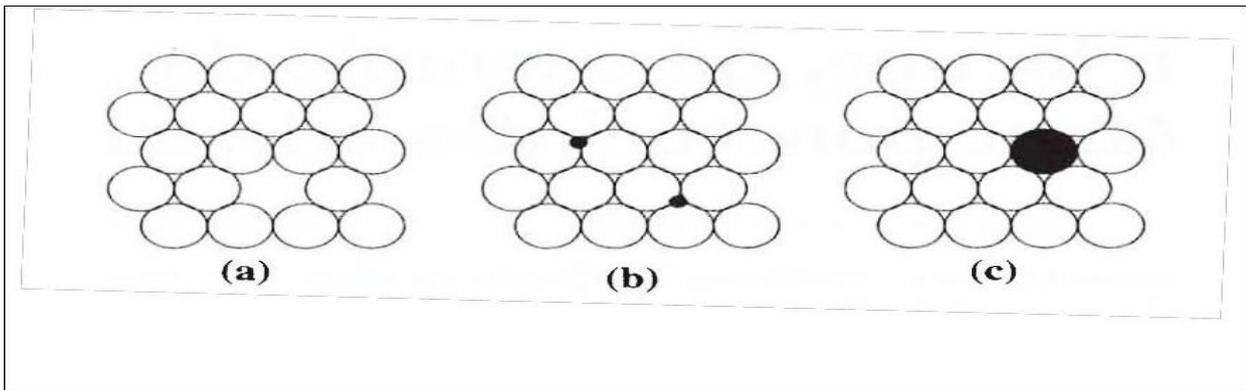


Figure I.5.1 : Exemples de défauts ponctuels simples. (a) Lacune. (b) Atome en position interstitielle. (c) Atome en position substitutionnelle

I.5.2.b. Défauts linéaires :

Les défauts linéaires observés dans les cristaux sont appelés dislocations (**Figure I.5.2**). Les dislocations sont obtenues par le glissement b d'une partie du cristal le long d'un plan. La ligne de dislocation proprement dite correspond à la ligne du plan de glissement séparant la partie du cristal qui a glissé de celle qui est restée immobile. Le vecteur de glissement b est appelé vecteur de Burgers de la dislocation.

On distingue les dislocations coin, pour lesquelles b est perpendiculaire à la ligne de dislocation, et les dislocations vis, pour lesquelles b est parallèle à la ligne de dislocation. Les autres dislocations sont dites mixtes.

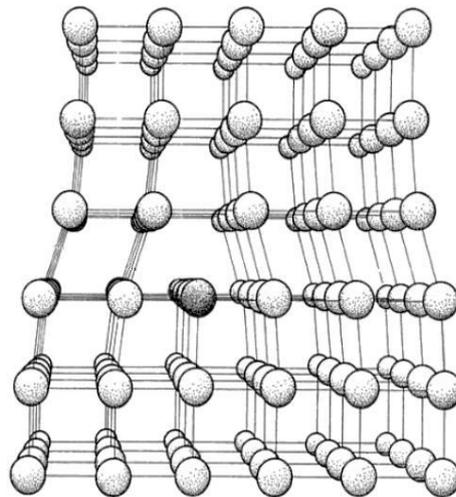


Figure I.5.2: Dislocation de type « coin ». La moitié inférieure du cristal comporte un demi-plan atomique supplémentaire. Le bord supérieur de ce demi-plan constitue la ligne de dislocation. Les atomes situés sur cette ligne n'ont pas le même nombre d'atomes premiers voisins que les autres atomes au sein du cristal. La dislocation induit par ailleurs un important champ de déplacement des atomes dans son environnement proche

➤ **Formation d'une dislocation de type « coin »**

La **Figure I.5.3** montre la formation d'une dislocation de type coin par le glissement b d'une partie d'un cristal cubique simple le long d'un plan (ABCD). La ligne de dislocation coin (PO) s'étend à l'infini dans le plan de glissement, dans une direction perpendiculaire à la direction de glissement b .

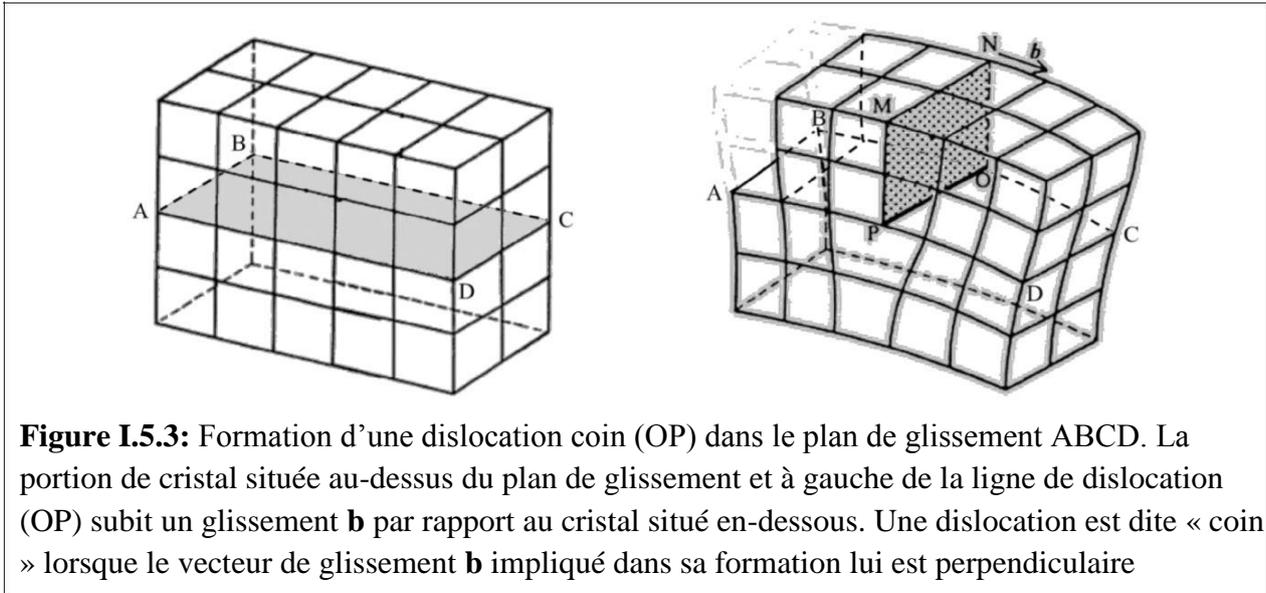


Figure I.5.3: Formation d'une dislocation coin (OP) dans le plan de glissement ABCD. La portion de cristal située au-dessus du plan de glissement et à gauche de la ligne de dislocation (OP) subit un glissement b par rapport au cristal situé en-dessous. Une dislocation est dite « coin » lorsque le vecteur de glissement b impliqué dans sa formation lui est perpendiculaire

La dislocation coin peut également être décrite comme faisant suite à l'insertion d'un demi-plan supplémentaire après écartement de deux plans atomiques adjacents. La ligne de dislocation coïncide avec l'extrémité de ce demi-plan supplémentaire.

Les atomes situés sur une ligne de dislocation coin n'ont pas le nombre de voisins attendu dans une structure sans défauts. Dans les régions très proches de la ligne de dislocation, les atomes ont un environnement similaire à celui d'un cristal parfait, mais ils sont déplacés par rapport à leurs positions d'équilibre. Du côté du demi-plan supplémentaire par rapport au plan de glissement, les distances interatomiques observées entre les atomes sont plus petites que la distance attendue à l'équilibre : la zone correspondante est dite en compression. Du côté opposé au demi-plan supplémentaire, les distances interatomiques sont à l'inverse plus grandes que la distance attendue à l'équilibre : la zone est alors dite en traction. La présence d'une dislocation augmente donc l'énergie interne du cristal, d'une quantité qui dépend de la nature des liaisons chimiques.

➤ **Formation d'une dislocation de type « vis »**

La **Figure I.5.4** montre la formation d'une dislocation de type vis par le glissement b d'une partie d'un cristal cubique simple le long d'un plan (ABCD). La ligne de dislocation vis (PO)

marque la limite entre la région du cristal qui a glissé et celle qui n'a pas glissé. Celle-ci s'étend à l'infini dans le plan de glissement, dans une direction parallèle à la direction de glissement b .

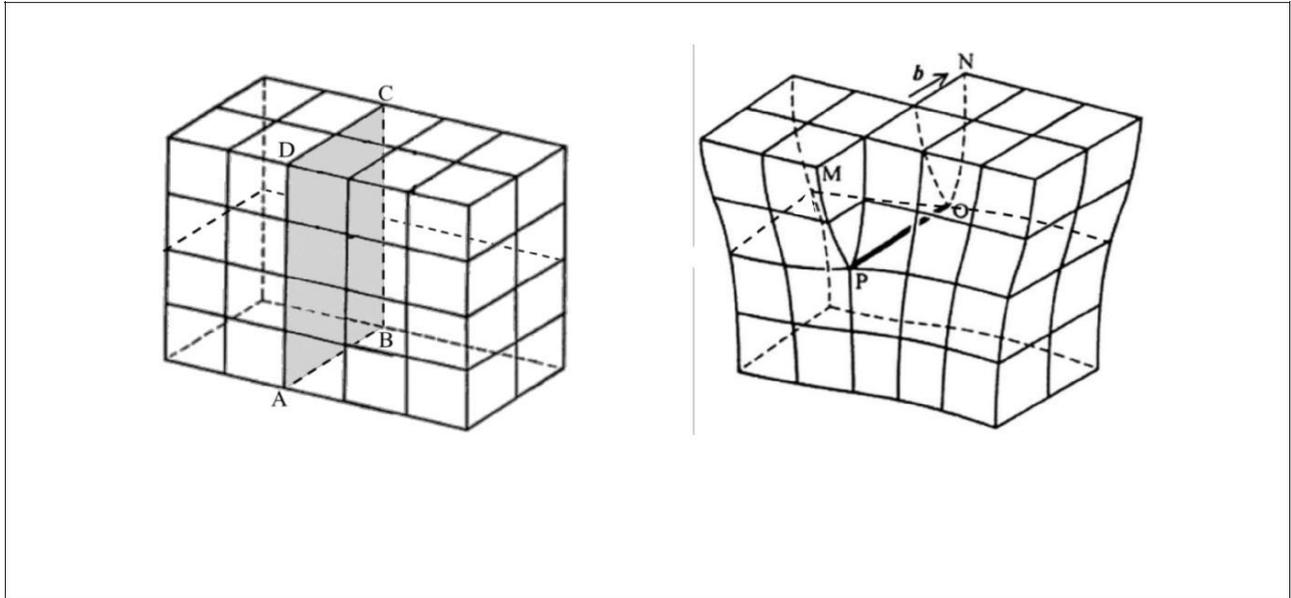


Figure I.5.4: Formation d'une dislocation vis (OP) dans le plan de glissement ABCD. La portion de cristal située à droite du plan de glissement et au-dessus de la ligne de dislocation (OP) subit un glissement b par rapport au cristal situé en-dessous

On peut également se représenter une dislocation vis en imaginant que l'on fait une coupure plane à travers le cristal, et que l'on fait glisser l'un des bords obtenus par rapport à l'autre d'une distance interatomique. La ligne de dislocation vis correspond alors au fond de la coupure. Une dislocation vis transforme les plans successifs d'atomes en surfaces hélicoïdales, d'où son nom.

➤ **Dislocations mixtes :**

Une dislocation n'est en général pas rectiligne. La Figure 5 présente une ligne de dislocation courbe VC , séparant les parties d'un cristal restées immobiles et celles qui ont subi le glissement b sur le plan défini par les points V , M et C . La portion de l'arc VC , perpendiculaire à b , autour du point C , a un caractère de dislocation coin. La portion de la dislocation parallèle à b , autour du point V , est de type vis. La portion restante de l'arc VC , constitue une portion de dislocation de type mixte.

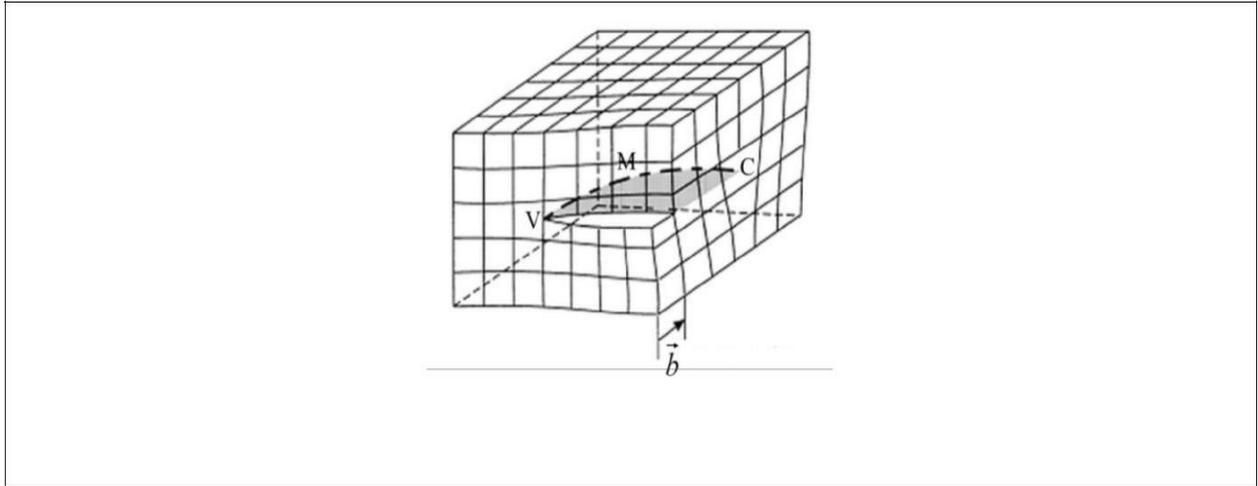


Figure I.5.5: Exemple de dislocation mixte.

➤ **Vecteur de Burgers :**

Le vecteur de Burgers d'une dislocation correspond au vecteur de glissement b appliqué pour former celle-ci.

Il est possible de déterminer le vecteur de Burgers d'une dislocation en comparant les circuits de Burgers construits autour de la dislocation et dans la partie du cristal exempte de défauts. La méthode est la suivante (**Figure I.5.6**) :

- Choix d'une orientation de la ligne de dislocation L .
- Construction d'un circuit fermé autour de la dislocation, orienté suivant la règle du tire-bouchon. Le circuit est construit à partir des vecteurs t_i' assimilables aux vecteurs du réseau cristallin t_i , aux petites déformations près de ce réseau autour de la dislocation.

Le circuit commençant au nœud D (pour « départ ») et finit au nœud F (pour « fin »).

Les nœuds D et F sont confondus.

- Construction du même circuit dans le cristal parfait à partir des vecteurs de translation t_i , partant d'un nœud D et aboutissant à un nœud F . Les nœuds F et D sont cette fois-ci différents.
- Le vecteur de Burgers correspond au défaut de fermeture du circuit DF , dans le cristal parfait : $b \square DF$.

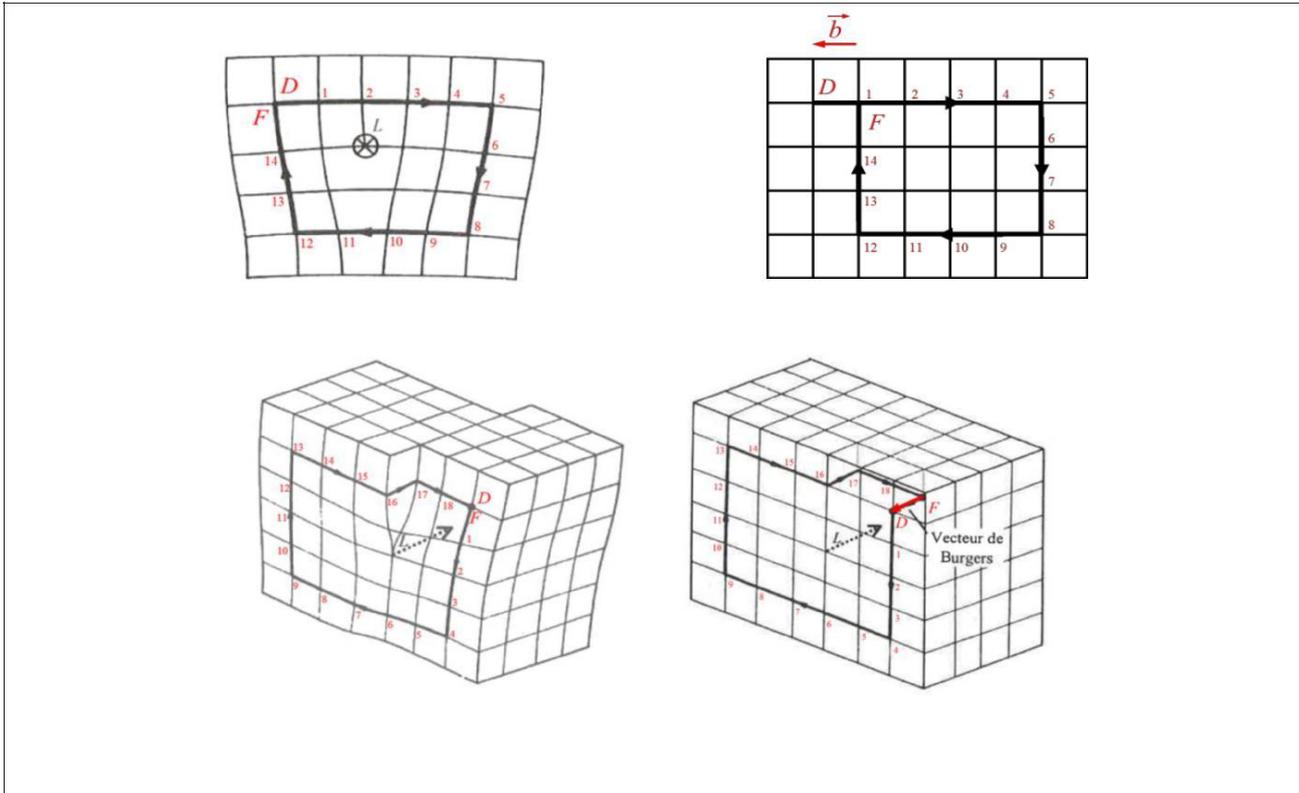


Figure I.5.6: Détermination du vecteur de Burgers d'une dislocation coin (a) et d'une dislocation vis (b).

I.5.2.c. Défauts planaires :

Un défaut planaire correspond à une région perturbée du cristal dont le volume est comparable à celui d'un plan d'atomes. Des exemples de défauts planaires sont les surfaces libres qui limitent un échantillon cristallin réel ou les joints de grains, surfaces frontières entre les cristallites constituant les échantillons polycristallins [Figure I.5.7.a]. Les défauts d'empilement sont également courants dans les structures compactes formées par les métaux [Figure I.5.7.b].

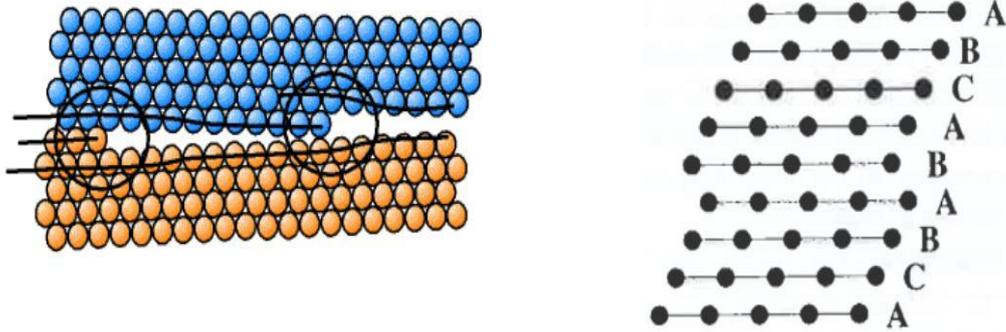


Figure I.5.7: (a) Représentation schématique de l'arrangement des atomes au niveau d'un joint de grain dans un échantillon polycristallin. Le joint de grain, zone située entre deux cristallites adjacents, est un défaut qui correspond à la fois à une discontinuité d'orientation cristalline et à une zone dans laquelle les positions relatives des atomes ne correspondent pas aux positions d'équilibre minimisant le potentiel d'interaction.

(b) Défaut d'empilement produit par l'absence d'un plan C dans la séquence ...ABC ABC A... constituant une structure cubique compacte.

I.5.2.d. Défauts volumiques :

Les défauts volumiques les plus courants sont les précipités, formés par l'inclusion d'une phase cristalline au sein d'une autre.

Les pores : ce sont des «bulles» dans la matière.

Cela peut être des bulles de vide, obtenues par condensation de lacunes : si le cristal contient de nombreuses lacunes, celles-ci diffusent et se regroupent pour former une cavité vide. La présence de nombreuses lacunes peut être due à :

- la température : plus la température est élevée, plus les atomes vont pouvoir bouger et laisser des espaces vides ;
- la diffusion lacunaire : si la matière diffuse d'un côté, les lacunes diffusent en sens inverse et viennent s'accumuler (effet Kirkendall) ;
- l'irradiation : l'irradiation par des photons de haute énergie (rayons X ou γ) ou par des particules accélérées (électrons, neutrons...) peut déloger des atomes de leur position et créer des lacunes.

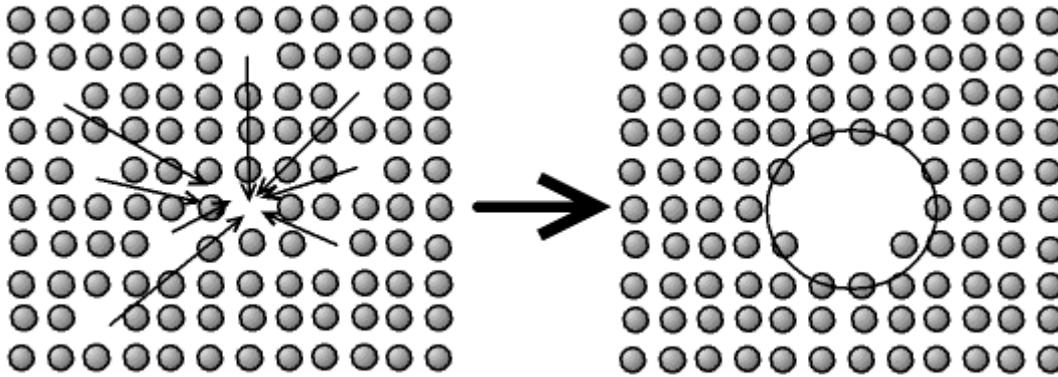


Figure I.5.8: Création de pore par condensation de lacunes

Ces bulles peuvent également contenir du gaz :

- soit il s'agit d'une lacune vide, dans laquelle arrive du gaz ; ce gaz peut être dissout dans le cristal, des atomes interstitiels ou en substitution se recombinaient dans le pore (cas de l'hydrogène dans l'acier, bulles d'oxygène dans certains oxydes) ;
- le gaz peut venir par une fissure qui se crée entre le pore et la surface du solide ;
- il peut également s'agir de gaz formé à partir des atomes du cristal par un rayonnement ionisant (cas du gonflement des combustibles nucléaires).

Les parois de ces bulles répondent aux mêmes lois que les surfaces libres ; pour diminuer l'énergie de surface, on en général a des parois planes suivant des plans denses du cristal. On dit que les pores sont «facettés».

De même que les défauts ponctuels, les pores ont tendance à se former aux interfaces (joints de grain, interface entre deux phases différentes).

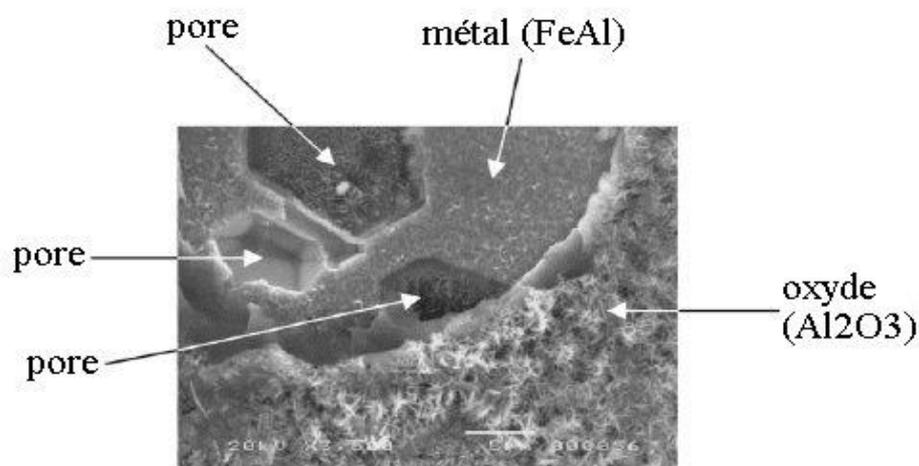


Figure I.5.9: Pores facettés qui se sont formés lors de l'oxydation du métal, à l'intersection métal (Fe-Al)/oxyde (Al_2O_3)

CHAPITRE II.1 - APPAREILLAGE

II.1.1 - INTRODUCTION

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes, appareils et techniques expérimentales utilisées.

- Nous avons procédé à l'élaboration de l'alliage de fonderie AlSi12Cu coulé sous pression au niveau à la division fonderie Azazga de l'entreprise Electro – Industries « EI » de Fréha.

Notre alliage est obtenu par injection à l'aide d'une presse destinée à la coulée sous pression de l'aluminium et de ses alliages.

Le dimensionnement des éprouvettes de traction et des échantillons de l'alliage AlSi12Cu a été réalisé au Hall de technologie de l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

- Les essais de traction, de résilience, de dureté, de microdureté, ainsi que les examens microscopiques ont été réalisés au niveau du laboratoire de mécanique et de Hasnaoua I de l'université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou (U.M.O.T.O).

Les différents dispositifs utilisés dans notre travail sont:

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents appareils utilisés au cours de l'étude expérimentale, tandis que la seconde est relative au matériau et aux modes opératoires mis en œuvre lors des essais réalisés dans le cadre de ce mémoire.

II.1.2 - APPAREILLAGE DE LA COULEE SOUS PRESSION

Les différents dispositifs utilisés dans l'entreprise « EI » concernant l'élaboration AlSi12U pour notre étude sont :

II.1.2.1 - Matière première: Lingots neufs, retours de fonderie



Figure II.1.1 - Lingots d'aluminium neufs



Figure II.1.2 - Retours de fonderie

II.1.2.2 - Chargement des fours

Les fours sont chargés de métaux par en haut, après chauffage, par l'ouverture de chargement.

Le chargeur est doté de fauche qui reçoivent les chariots de chargement mobiles et permettent de soulever et de faire culbuter ces chariots de chargements par la porte supérieure et avant basculement de la charge lors du chargement de matériaux en lingots, poser sur la passerelle de fusion, une couche de lingots ou de matériaux recyclés pour protéger la chemise du four

En cas d'utilisation de produits lourds ou à arêtes vives, faire particulièrement attention de ne pas endommager le revêtement du four.

L'ouverture de chargement ne doit en aucun cas être exagérément remplie (risque d'étouffement de la flamme du brûleur et de détériorations de l'appareil de chargement).

Avant de procéder à un nouveau chargement, la trémie de la zone d'entrée du chariot de chargement doit être débarrassée de tous résidus du produit chargé sous peine d'endommager le chargeur.

II.1.2.2.1 - Dispositif de chargement

Le dispositif de chargement est spécialement étudié pour le chargement automatique des fours de fusion mais peut être modifié pour s'adapter à toutes autres utilisations. Ils peuvent transporter soit des lingots soit des retours et jets de fonderie. Leur utilisation réduit de beaucoup les temps de chargement. La charge suivante peut être préparée pendant une fusion.

II.1.2.2.2 - Construction

Le système de levage est entièrement enfermé dans des montants en acier. Les chaînes de levage et les roues de commandes sont protégées (pas de possibilité de blocage). À la construction peuvent être prévus soit un container adapté, soit des fourches qui pourront

prendre vos propres containers.

II.1.2.2.3 - Avantages

- Main-d'œuvre réduite grâce au chargement automatique.
- Meilleure utilisation des moyens par réduction du temps de chargement.
- Grande flexibilité d'utilisation.
- Construction robuste et fiable.
- Installation simple à entretenir, pas de fondations nécessaires.

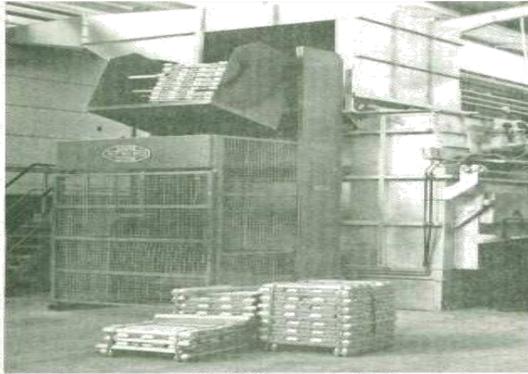


Figure II.1.3 - dispositif de chargement de four.

Données techniques

Force de levage :	50 à 1250 Kg.
Vitesse de levage :	environ de 8 cm / sec.
Hauteur de levage :	de 1 à 12m.
Angle de basculement :	environ de 45°.

II.1.2.3 - Four de fusion

Le four STIKO type MH est un four à sol combiné pour la fusion et le maintien,

La partie fusion séparée de celle de maintien, chacune possède son brûleur propre,

L'accès à chacune des parties est assuré par une porte qui permet le décrassage ou toute autre opération,

Le four est garni de briques à haute teneur en alumine dont la composition varie d'une partie à l'autre,

Les brûleurs « 2 » sont à gaz naturel, la régulation est semi ou entièrement automatique et commandée par un thermocouple,

Capacité: 1 tonne, Nombre de creuset est deux « 2 ».

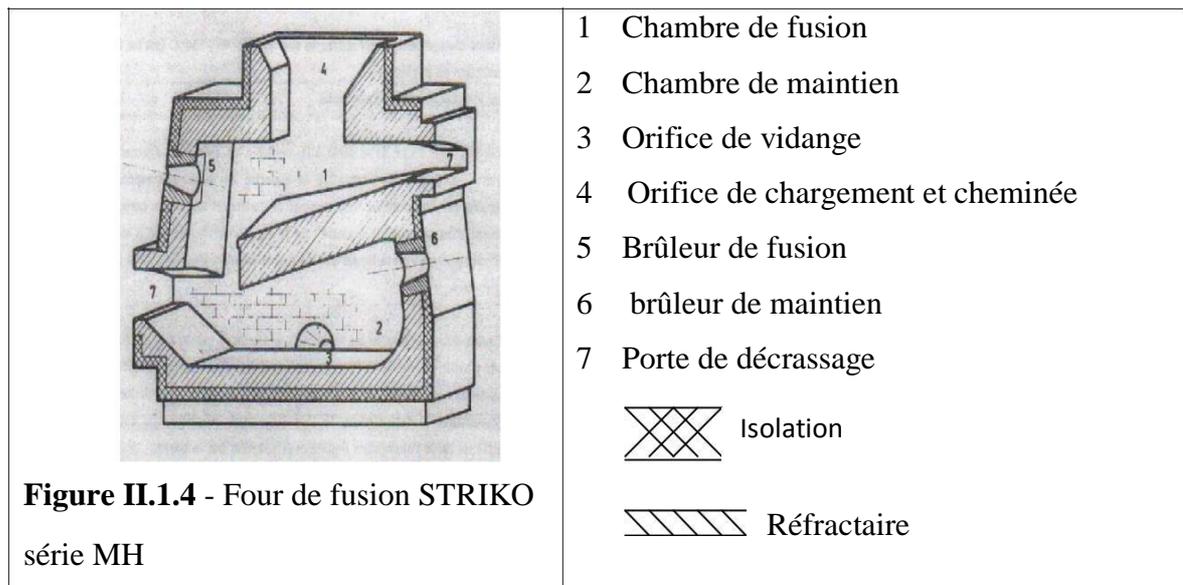


Figure II.1.5 - Four de fusion.

II.1.2.4 - Fours de maintien

Le secteur de l'atelier Unité de fonderie dispose de six fours :

- Deux fours de maintien pour l'aluminium pur,
- Quatre fours de maintien pour les alliages d'aluminium (Alpax) ;
- La charge de chacun de ces fours est : 500kg ;
- Température de four de maintien:

■ Aluminium pur : température de coulée est: $T^{\circ} = 780^{\circ}\text{C}$;

■ Alliage d'aluminium AlSi12U (Alpax) : $T^{\circ} = 720^{\circ}\text{C}$.

II.1.2.5 - Poche de coulée

Il y a deux poches de coulée.

Charge : 500 kg.



Figure II.1.6 - Four de maintien



Figure II.1.7 - Poche de coulée

II.1.2.6 - Machine à coulée sous pression

Il y a six postes d'injection :

- Deux pour l'injection d'aluminium pur,
- Quatre pour l'injection des alliages d'aluminium.

Caractéristiques de la machine « IDRA » série OL –380.S :

La machine IDRA est une machine de moulage sous pression à chambre froide, qui a pour caractéristiques suivantes voir tableau ci-dessous :

Modèle	Unité	OL – 380.S
Puissance de fermeture.	MPa	380
Puissance maxi d'injection.	MPa	45
Puissance d'extraction centrale.	MPa	16
Epaisseur maxi des moules.	mm	700
Epaisseur mini des moules	mm	250
Course du plateau mobile.	mm	475
Dimension des plateaux (L*H).	mm ²	120
Distance entre colonnes (L*H).	mm ²	940*940
Puissance moteur pompe.	Kw	555*555
Poids maxi de la pièce en aluminium.	g	18,5
Surface maxi de moulage avec pression sur le métal 400 bars.	cm ²	5,2
Poids de la machine.	Tonne	16
Encombrement (long* larg* haut).	mm ³	6600*1770*2370.

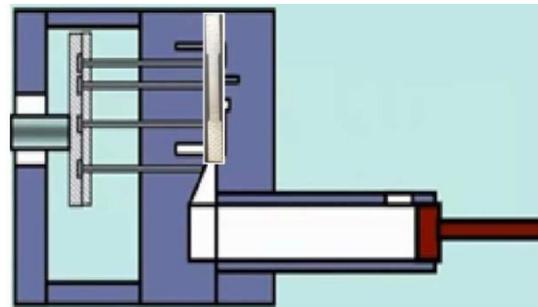
Tableau II.1.1 - Caractéristiques de la machine IDRA série OL-380.S



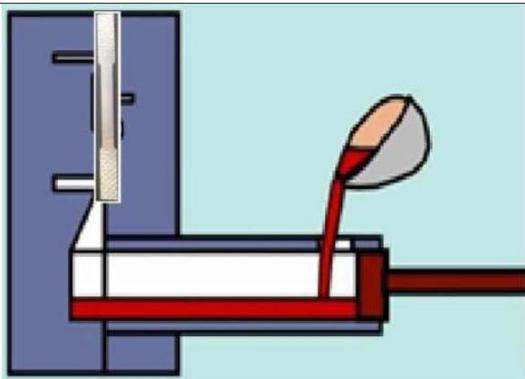
Figure II.1.8 - Machine de moulage sous pression, IDRA série OL-380 S

II.1.2.7 - Moule en coquille :

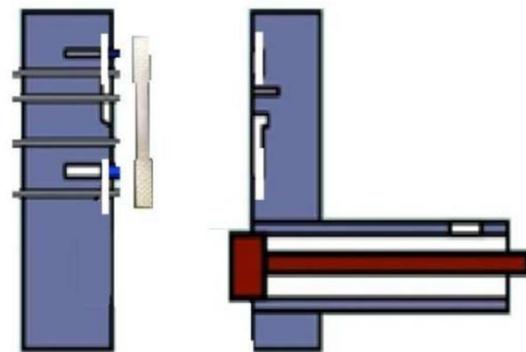
Il est composé de deux châssis qui sont Assemblés et un système de coulée qui est composé d'un chenal masselotte et Système d'attaque.



a – Moule fermé



b – Remplissage du conteneur



c – Ejection de l'éprouvette

Figure II.1.9 - Moule en coquille

II.1.3 - MACHINES D'USINAGE



Figure II.1.10 - Scie mécanique de type ALMOSMA3

Le découpage

le découpage des échantillons de dureté, de microdureté et de la microstructure a été effectué à l'aide d'une scie mécanique ayant les propriétés suivantes :

Tension $T=380V$,

Puissance $P=1,5KW$,

Poids = 600Kg



Figure II.1.11 - fraiseuse verticale FV1,5 ALMO

La fraiseuse

l'usinage des éprouvettes et des échantillons a été réalisé sur une fraiseuse verticale FV1,5 ALMO et un Tour universel au niveau du hall de technologie situé à Oued-Aissi.

Tension de service 380V,

Puissance totale 5KW,

Poids 1520Kg.



Figure II.1.12 - Tour universel de type SN 40 SN 50C

Tour universel

Tension $T=380V$

Puissance $P=6,6Kw$

Poids = 1620Kg.

Fréquence $f=50Hz$



Figure II.1.13 - Meule

La meule

La meule est utilisée pour enlever les bavures des éprouvettes et des échantillons provenant de l'usinage et du moulage.

II.1.4 – EPROUVETTES ET ECHANTILLONS

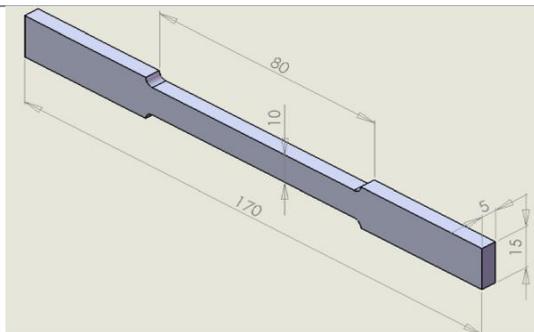


Figure II.1.14 – éprouvette de traction

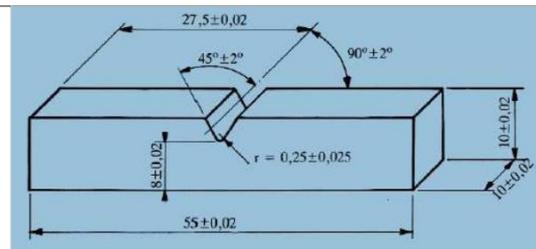


Figure II.1.15 - éprouvette de résilience

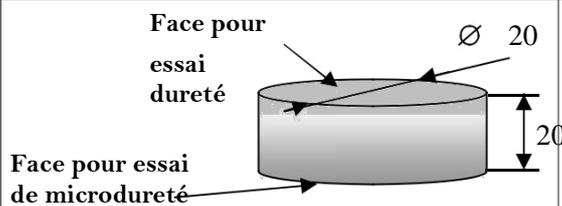


Figure II.1.16 – échantillon de dureté et de µdureté

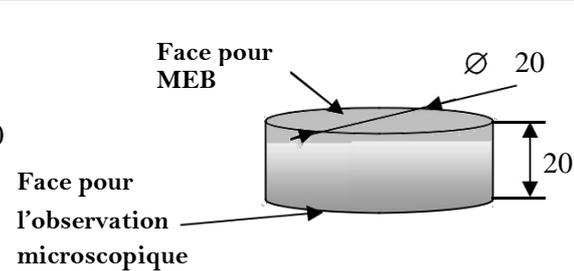


Figure II.1.17 - échantillon de µstructure

II.1.5 – FOUR ET E TUVE DES TRAITEMENTS THERMIQUES

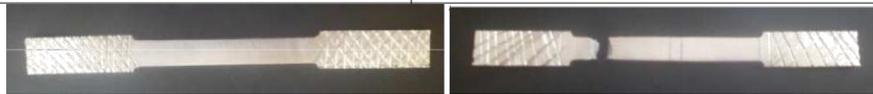
	<p>tension de 380V et de puissance 11KW allant jusqu'à 1200°C en température de chauffage, construit en tôle et profilés robustes, il est isolé avec de la laine d'alumine pour le rendre plus léger et isolé thermiquement.</p> <p>Ses dimensions sont :</p> <p>Largeur utile : 300 mm, hauteur utile : 250 mm, profondeur utile 400 mm</p> <p>Un contact électrique coupe le circuit de résistance dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique</p>
<p>Figure II.1.18 - Four de trempe C'est un four à moufle a une résistance électrique alimentée sous une</p>	
 <p>Figure II.1.19 - Etuve utilisée. Nos traitements de vieillissement ont été réalisés dans une étuve de type MEMMERT alimentée par un courant de 380Volts.</p>	<p>Elle est composée essentiellement de :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Afficheur du temps (maintien). 2. Indicateur du mode de fonctionnement. 3. Indicateur de température de consigne (recommandée). 4. Indicateur de régime de la ventilation. 5. Indicateur de la température d'intervention du dispositif de sécurité. <p>L'étuve est dotée d'une ventilation naturelle par convection à thermosiphon. Le brassage d'air s'effectue par une turbine installée à l'intérieur sur la paroi du fond de l'appareil.</p>

II.1.6 – MACHINES D'ESSAIS MECANIQUES



Figure II.1.20 - Machine de traction

Machine de traction: la machine de traction utilisée est de type IBERTEST alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge maximale de 400 KN dotée d'un microordinateur qui a pour utilité de suivre l'évolution des essais et de les sauvegarder pour ne pas perdre les résultats des essais effectués.



a – avant rupture

b – après rupture

Figure II.1.21 - Eprouvettes de traction

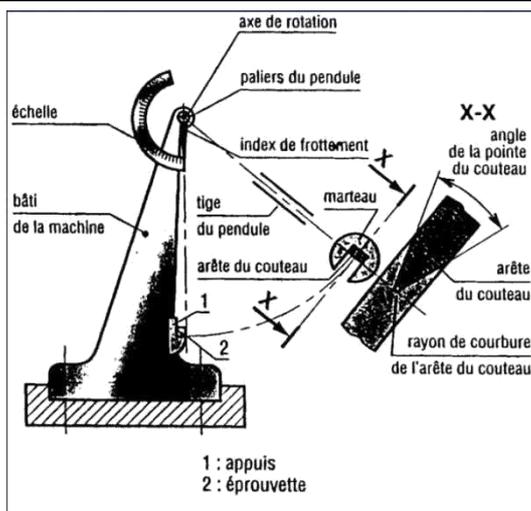


Figure II.1.22 - Pendule de Charpy
Essai de résilience

Principe de l'essai: Il consiste à rompre, d'un seul coup de mouton

pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

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

Machine d'essai: Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O . Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours voisin à l'arête de couteau du pendule.



Figure II.1.23 - Duromètre

L'essai de dureté a été réalisé sur à un duromètre muni d'une bille de diamètre 2,5mm, d'un sélectionneur de charge de 15 kgf, une table sur laquelle on pose l'échantillon et d'un cadran permettant la mesure du diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur. Il possède les caractéristiques suivantes :

Tension $T=220V$,
Fréquence $f=50\text{ Hz}$.



Figure II.1.24 – Microduromètre

L'essai de microdureté a été réalisé sur un microduromètre muni d'un pénétrateur en diamant en forme pyramidale, d'angle au sommet de 136° , d'un sélectionneur de charge de 50 g, une table sur laquelle on pose l'éprouvette. Ce dernier affiche automatiquement le diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur ainsi que sa microdureté correspondante. Il possède les caractéristiques suivantes :

Tension $T=220V$,
Fréquence $f = 50\text{Hz}$.

II.1.7 – POLISSAGE

II.1.6 : Examens microscopiques

Pour procéder à l'observation des différentes structures de surface, on prépare les échantillons traités thermiquement et brut de coulé avec les différents procédés de

polissages et leurs attaquer chimiquement avec le réactif qui convient, et pour cela on utilise des polisseuses pour effectuer les opérations de polissage, un bon réactif pour réaliser l'attaque chimique, un microscope optique pour réaliser l'observation microscopique, un microscope électronique à balayage (MET) observer les détails de la surface.

II.1.6.1 : Les polisseuses

Pour obtenir une surface plane et une qualité de surface miroir. Cette opération de polissage est effectuée à l'aide de deux polisseuses:

- La première a deux disques de type : (STRUERS) alimentée sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W munie d'un dispositif d'arrosage
- La deuxième a un seul disque de même type alimentée sous la même tension mais de puissance de 432W utilisée pour réaliser les polissages de finition



a) polisseuse de finition



b) polisseuse à deux disques

Figure II.1.25 – polisseuses

Attaque chimique

L'attaque a pour but de relever les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'alliage utilisé, après le polissage de finition. On rince notre échantillon et on le sèche puis ensuite on le soumet à une attaque chimique qui consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif pendant un temps convenable à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on le sèche à l'aide d'un séchoir.

II.1.8 – MICROSCOPES

II.1.8.1 – Le microscope optique

C'est un microscope optique universel de marque ZEISS XL30 alimenté sous une tension de 220 V, avec une fréquence de 50Hz et une puissance de 100W, Muni d'un appareil photo automatique ayant un pouvoir de résolution allant 50 à 400 fois.

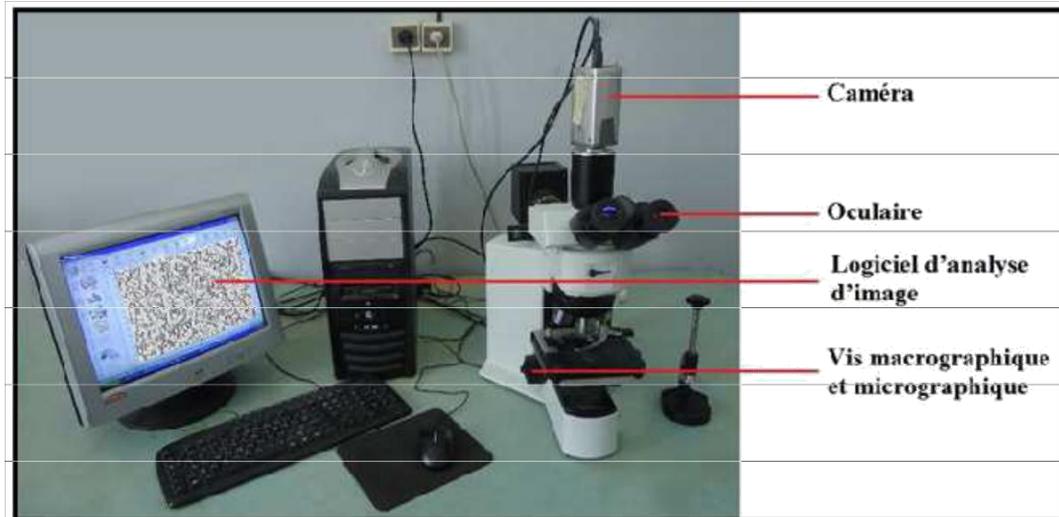


Figure II.1.26 - microscope optique

II.1.8.2 – Microscope électronique à balayage (MEB)

c'est un microscope un microscope environnemental de type ASEM XL30 de marque Philips équipé d'un EDAX pour microanalyse X par dispersion d'énergie (EDS).



Figure II.1.27 - Microscope électronique à balayage (MEB)

CHAPITRE II.2 - METHODE EXPERIMENTALE ET ELABORATION

II.2.1 - MATERIAU ETUDIE

Dans toutes nos expériences, nous avons utilisé l'alliage de fonderie AlSi12Cu, contenant 12 % de silicium en pourcentage massique, une quantité de cuivre inférieure à 1 % (en masse). Cet alliage de fonderie à traitement thermique est de type 47100 (AlSi12Cu).

Cet alliage est obtenu par la coulée en coquille sous pression.

Le moulage sous pression est un procédé de coulée mécanique, qui permet la production rationnelle des pièces en grande série. Il a l'avantage d'être précis et convient aux pièces de faibles tolérances et de surface lisse.

Le moulage sous pression se fait par l'injection.

Les moules utilisés en moulage sous pression sont des moules métalliques à utilisation répétés, le même moule permet d'obtenir plusieurs pièces.

Les principaux avantages sont :

Rigidité de l'empreinte,

Coûts d'usinage plus faible,

Réalisation des pièces ayant un meilleur état de surface, des caractéristiques mécaniques de l'alliage plus élevées.

II.2.2 - ELABORATION DE L'AlSi12Cu

L'AlSi12Cu donne des résultats surs, reproductibles et conformes à la norme.

II.2.2.1 - La composition chimique de l'AlSi12Cu suivant la Norme AF.A57.702

La composition ci-dessous correspond aux tolérances de composition dans les pièces coulées en coquille sous pression.

Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Ni(%)	Zn(%)	Pb(%)	Sn(%)	Ti(%)
10,5÷13,5	0,8	1,0	0,05÷0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,2 0	0,10	0,20

Tableau II.2.1 - Composition chimique de L'A-S12U suivant la norme NF A57-702

Un alliage entrant dans ces tolérances et de composition convenablement élaboré.

II.2.2.2 - Four de fusion

Le four de fusion est composé d'une chambre de fusion, d'une chambre de maintien, d'un orifice de vidange, d'un orifice de chargement et de cheminée, d'un brûleur de fusion, d'un brûleur de maintien, d'une porte de décrassage, d'une isolation et d'un réfractaire. Le four de fusion dont la charge est de 1000 Kg, ce dernier est chauffé par l'intermédiaire de deux brûleurs à gaz. Le métal ainsi préparé dans le four est ensuite versé dans une poche de coulée de 500 Kg qu'on achemine à l'aide d'un palan vers le four de maintien correspondant.

II.2.2.3 - Chargement du four de fusion :

D'abord on chauffe le creuset qui est en graphite pour éviter l'humidité et procéder à sa calcination. La charge totale du four est composée de 50 % (soient 500 Kg) de lingot neuf et de 50 % de retour (soient 500 Kg), au fond du creuset, on place les petites pièces (retour de fonderie) pour faciliter la fusion, puis on ajoute progressivement et au milieu on ajoute des lingots de l'AlSi12Cu qui sont déjà préchauffés.

Après l'échauffement du métal à environ 500 °C, on met un pourcentage d'AlCu10% (soient 10 Kg de AlCu10) pour l'amélioration des caractéristiques de l'alliage et en dernier les grandes pièces du retour de fonderie. Une fois le four est plein, on dégaze à l'aide d'un dégazer coveral 701 (Cov, tablettes à 200 g), qui sert aussi comme un désoxydant, il est additionné à une température $T = (680 - 720)$ °C; à la fin de la fusion, on décrasse et on couvre le bain avec le coveral 55 pour éviter les oxydations en contact avec l'air.

II.2.2.4 - Moulage en coquille sous pression

Une fois la température de fusion est atteinte selon le besoin du Fondateur, dans notre cas 720 °C, le métal est transvasé dans la poche de coulée qui est déjà préchauffée, elle est de (500 Kg). Par la suite on ajoute le coveral (32D) qui est le Sodium pour l'affinage du grain et diminuer la densité des grains.

On observe des grains d'impuretés qui montent à la surface d'où il fallait décrasser le métal à l'aide d'une louche poteyée, pour enlever les impuretés à la surface, enfin la température de coulée est contrôlée à l'aide d'un pyromètre dans le Four qui est répétée régulièrement.

A l'aide d'un palan, on achemine la poche de coulée pleine de métal liquide qu'on verse dans le four de maintien correspondant. Une louche automatique prélève le métal au-dessous du niveau du bain pour éviter d'introduire des peaux d'oxydes et de transférer le métal rapidement sans à coups vers le conteneur en l'ayant dosé avec précision, le piston d'injection

pousse le métal jusqu'à l'entrée de l'empreinte et vient boucher l'orifice de coulée de la coquille montée sur une presse à injection de l'aluminium coulé sous pression.

La coquille est un moule métallique, le moule de l'éprouvette est composé de deux parties, il comprend un système de coulé incorporé dans ces deux parties.

Le moule est à chaque coulée protégé par une couche poteyée avec le Dycote 39, ce qui permet de donner un meilleur plan de pièce et maintenu à une température maximale de 300 °C, afin que le métal puisse remplir toute l'empreinte et ne crique pas.

II.2.2.5 - Fonderie sous pression d'aluminium

Dans une machine d'injection d'aluminium sous pression, l'alliage préalablement fondu est injecté rapidement par un piston dans un moule métallique. Le refroidissement s'effectue en quelques secondes par échange thermique avec les parois du moule alors que le piston maintient une certaine pression.

L'injection d'aluminium sous pression permet d'obtenir des pièces de dimensions précises, très proches des côtes finies, minimisant ainsi les usinages nécessaires. L'outillage pouvant comporter plusieurs empreintes il est possible de produire rapidement de grande quantité de pièces.

Malgré une usure régulière du moule du fait de l'injection répétée de matière sous pression et à haute température, l'injection d'aluminium sous pression permet d'obtenir des pièces aux formes complexes à des coûts faibles.

Ce procédé est particulièrement bien adapté à la production de pièces primaires pour l'automobile, l'électroménager, ainsi que les installations électriques et électroniques.

L'utilisation des alliages d'aluminium permet des gains de poids et un recyclage quasi infini de la matière première, sans déchet.

II.2.3 - TRAITEMENTS THERMIQUES

Un traitement thermique est une opération (ou une succession d'opérations) au cours de laquelle la température varie tout en gardant le métal à l'état solide.

L'alliage AlSi12Cu peut subir un traitement thermique, c'est le cas le plus général, lorsque l'on cherche de bonnes caractéristiques mécaniques.

Les traitements thermiques sont des opérations qui comportent des cycles thermiques chauffage et refroidissement contrôlés et effectués pour :

Résistivité.

Corrosion sous tension.

Corrosion inter granulaire.

Améliorer la stabilité dimensionnelle des pièces.

II.2.3.1 - Conditions pour qu'un alliage puisse subir un traitement thermique

L'alliage doit contenir des éléments de composition permettant le durcissement structurelle ce sont :

Le Magnésium.

Le Zinc.

Le Cuivre.

Ces éléments se combinent avec les éléments principaux de l'alliage.

II.2.3.2 - Différentes phases du traitement thermique

On distingue quatre phases :

Chauffage de mise en solution avec homogénéisation pendant un temps déterminé à une température proche de la température de début de fusion de l'alliage.

Trempe.

Maturation.

Revenu.

II.2.3.3 - Chauffage et maintien

Les éprouvettes sont chauffées jusqu'à une température $T = 540 \pm 5$ °C, puis elles sont maintenues, pendant une durée de maintien de dix heures (10h) à une température constante $T = 540$ °C.

Dans les alliages du type AlSi12Cu, la température doit être choisie la plus proche possible de la température du début de fusion.

L'alliage étant toujours à l'état solide, les phénomènes de diffusion à l'état solide ne sont pas instantanés et il faut maintenir la pièce à cette température pendant un temps assez long (8 à 10 heures). Car durant le chauffage, la surface de la pièce s'échauffe plus vite que le cœur du métal. Dans notre cas on a utilisé un four à ventilation forcée, pour homogénéiser la température, qui est contrôlée régulièrement à l'aide d'un pyromètre.

II.2.3.4 - La trempe

Cette opération consiste à assurer par un refroidissement approprié le maintien à l'état de sursaturation de la solution solide. La trempe doit être suffisamment rapide (Max 12 secondes), pour éviter une précipitation grossière du composé défini (vitesse critique de

trempe), les éprouvettes ne sont jamais employées juste après la trempe en raison de leurs fragilité, d'où la nécessité de leurs subir un traitement de revenu.

II.2.3.5 - Durcissement structural

Peut se faire sous deux formes :

Maturation —————> à température ambiante

Revenu —————> température entre 150°C et 220°C.

a) La maturation

La maturation est le vieillissement naturel, qui se fait à l'air ambiant, pendant un certain temps.

b) Le revenu

Ce traitement est réalisé sur des éprouvettes ayant subi une trempe pour diminuer la fragilité due à la trempe en adoucissant et éliminant les contraintes internes, le revenu se fait pendant six heures (6h) à une température $T_R = 160$ °C.

Dans notre cas on prend un intervalle de maturation après trempe de :

Maturation 0h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 2h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 4h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 6h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 8h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 10h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 12h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 14h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 16h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 18h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 20h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 22h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression,

Maturation 24h+Revenu : 05 éprouvettes plus quatre échantillons coulés sous pression.

c) Cycle thermique de l'alliage AlSi12Cu

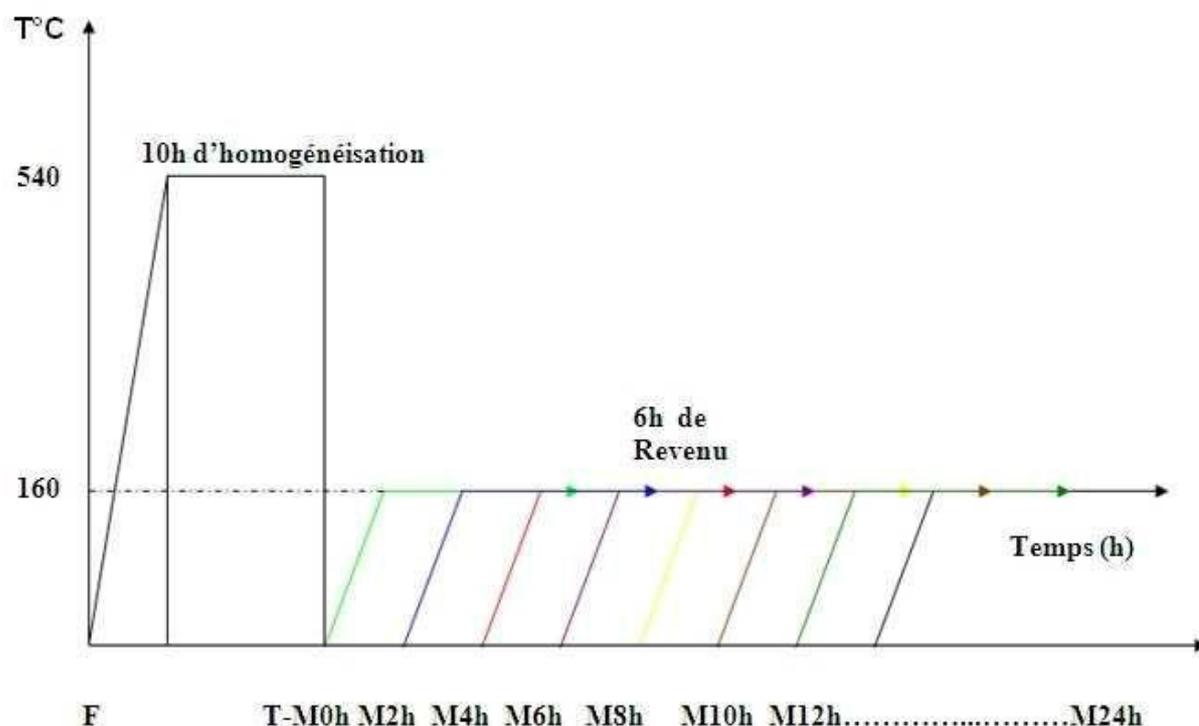


Figure II.2.1 - Cycle thermique de l'AlSi12Cu

II.2.4 - ESSAIS MECANIQUES

Nous avons fait quatre essais mécaniques : la traction, la résilience, la dureté et la microdureté.

II.2.4.1 - Essai de traction

Cet essai a pour but la caractérisation d'un matériau en traction, c'est-à-dire déterminer sa résistance à la traction. Les caractéristiques qu'on peut obtenir de cet essai sont

- σ^m - Contrainte maximale,
- σ^e - Contrainte d'élasticité.
- σ^r - Contrainte de rupture
- A% - allongement en pourcentage
- Z% - coefficient de striction,
- Zu% - allongement de striction,
- E - module d'Young.

Les éprouvettes sont solidement maintenues par leurs têtes à l'aide des deux mâchoires (mors) de la machine, dont l'une est fixe, l'autre libre en translation. Ces mâchoires en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de

l'éprouvette. Des appareils, adaptés à la mâchoire, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et la déformation correspondante.

II.2.4.1.1 - Forme et dimension des éprouvettes

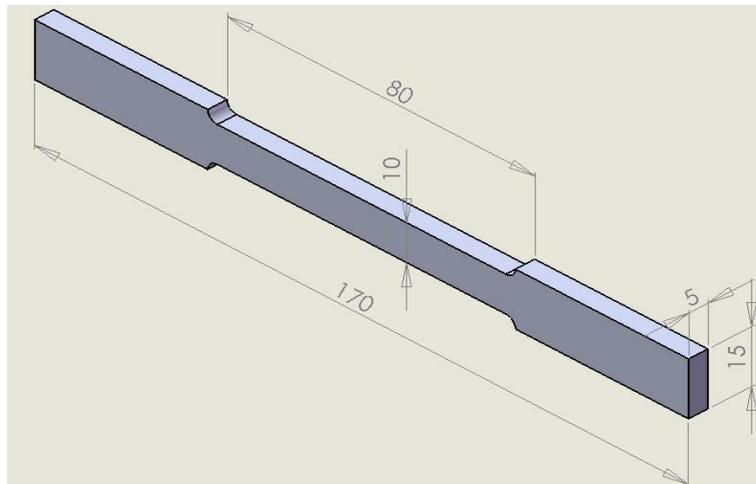


Figure II.2.2 - Eprouvette coulée en coquille normalisée (EI)

II.2.4.1.2 - Différentes étapes de l'essai de traction

Les éprouvettes sont numérotées de 1 à 5, on trace à l'intérieur de L_c la longueur L_0 , elles sont d'une largeur de 10 mm et d'une épaisseur de 5 mm.

On insère l'éprouvette entre les mâchoires ou mors d'amarrage de la machine, réglée au préalable.

La vitesse de traction répond aux prescriptions est de 2 mm/mn.

La charge de la limite élastique est relevée ainsi sur machine ou sur graphe, si la courbe représente un palier d'écoulement, sinon on détermine la limite conventionnelle à 0,2%. La variation de l'allongement est lue sur l'éprouvette après rupture en mettant bout à bout les deux parties.

II.2.4.2 - Essai de résilience

Un des moyens, le plus classique et le plus ancien, pour caractériser la fragilisation d'un matériau sous l'action d'un choc, est l'essai de résilience sur éprouvette en taillée

L'essai consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

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

$$K = \frac{W}{S}$$

K – coefficient de la résilience au choc, W - énergie absorbée par la rupture, S - section droite de l'entaille.

II.2.4.3 - Essai de dureté

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à contrôler. On exerce une charge constante, ensuite on mesure la dimension de l'empreinte. Plus l'empreinte est grande, plus le métal est mou ou doux.

La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface projetée de l'empreinte : $H = F/S$

Le pénétrateur est une bille en acier traité de différents diamètres $\Phi 2.5$ mm, $\Phi 5$ mm ou $\Phi 10$ mm, en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau.

$$HB = \frac{0,102 \times 2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

avec : F(N) - charge d'essai, D (mm) - diamètre de la bille, d (mm) - diamètre de l'empreinte.

Par ailleurs, la charge d'essai F peut être exprimée en fonction du diamètre de la bille suivant la relation :

$$F = K \times 9,81 \times D^2$$

Avec K - coefficient qui est fonction de la matière. En effet : K = 2,5 ; 5 ; 10 pour l'aluminium et ses alliages, K = 30 pour les aciers, K = 5 ; 10 ; 30 pour le cuivre et ses alliages.

Une éprouvette est prélevée sur la même longueur servant aux essais mécaniques, dans notre cas, un rond de $\Phi 28$ mm et de longueur de 15 mm est découpé avec une scie, puis dressé et poli au papier granulométrie. Cinq mesures sont ainsi réalisées sur l'appareil de dureté pour chaque état.

Dans ce travail, on a choisi l'essai Brinell. Le diamètre de la bille égal à 2,5mm, sous une charge de 15 kg. Après quelques secondes on mesure le diamètre de l'empreinte grâce à une règle, puis on lit la valeur de la dureté correspondante au diamètre.

La forme des échantillons utilisés lors des essais est indiquée par la Figure II.2.3

II.2.4.4 - Essai de la microdureté

Les échantillons utilisés pour la microdureté ont subis un enrobage à froid avec une résine et un durcisseur afin d'avoir deux surfaces parallèles pour faciliter l'observation de l'empreinte et éviter la déformation du pénétrateur.

La mesure est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un pénétrateur sous l'action d'une charge appliquée. Le rapport de la force appliquée F à la surface en cours S de l'empreinte donne la dureté. $H=F/S$

Nous avons utilisé un microduromètre Vickers équipé d'un écran pour permettre de positionner l'empreinte sur la phase désirée et par la suite mesurer le diamètre moyen des diagonales de l'empreinte, qui est nécessaire pour déterminer H_v . Les variations de microdureté avec les traitements thermiques peuvent-être déterminées à l'aide de la formule :

$H_v = 1854.4 P/d^2$ Où, P est la charge appliquée (gf) et d longueur moyenne des diagonales de l'empreinte (μm).

Dans notre cas les mesures de microdureté ont été effectuées sur microduromètre de type (LEITZ WETZLAR) à pénétration Vickers, une moyenne de trois mesures a été effectuée lors de chaque essai avec une charge de 0,05kg.

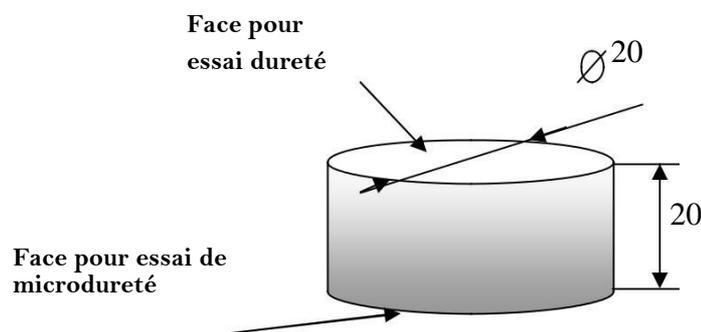


Figure II.2.3 - Echantillon pour l'essai de dureté et pour l'observation micrographique

II.2.5 - EXAMENS MICROGRAPHIQUES

II.2.5.1 - Préparation des surfaces

Les échantillons sont découpés des éprouvettes de traction, à l'aide d'une scie mécanique. Ces échantillons sont polis mécaniquement afin de rendre les deux faces de l'échantillon planes et brillantes de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. Le polissage comporte trois phases :

Dressage

Le dressage a pour but de créer une surface plate d'examen. Elle est faite sur papier EMERI de granulométries P120, P240 et P400, sur une polisseuse avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement.

Dégrossissage

Cette phase, qui est la plus délicate, permet d'arriver à une surface lisse ne contenant que de très fines rayures invisibles à l'œil nu qui disparaîtront dans la dernière phase. Les granulométries des papiers utilisés sont P600, P800, P1200 et P3000.

Finition

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

II.2.5.2 - Attaque chimique

Après polissage, les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler les joints de grains et différencier les constituants de l'alliage. En général l'attaque chimique peut agir de plusieurs façon ; Il peut dissoudre certains constituants qui perdront leur poli et ne réfléchissant plus la lumière, apparaîtront noir au microscope, il peut agir par dissolution préférentielle des grains, selon leur orientation cristalline, il peut colorer diversement certains constituants ; il peut produire un dépôt à la surface de certaines phases ; enfin il agit sur les joints entre les cristaux.

Nous avons utilisé un réactif dont la composition est donnée par le tableau suivant. L'attaque a été chronométrés, elle est de l'ordre de 15 secondes, puis les échantillons sont lavés sous un jet d'eau et séchés.

H ₂ O	NaOH	ZnCl ₂
100 ml	5g	1 g

Tableau II.2.2 - Composition pondérale du réactif

II.2.6 – MICROSCOPIE

II.2.6.1 - Microscope optique

Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé, on a pris des photos de différentes échelles.

II.2.6.2 - Microscope à balayage (MEB)

Pour une bonne résolution et des grossissements plus importants qu'en microscopie optique, on a eu recours au MEB. Ce dernier est à émission Thermoélectronique, équipé d'un système d'analyse permettant de faire une étude qualitative et quantitative des différentes phases intermétalliques. Nous avons pris l'initiative de prendre en considération les états suivants F, T, 0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 14h, 16h, 18h, 20h, 22h et 24h afin de faciliter l'interprétation des résultats. Pour chaque échantillon observé, on a pris des photos de différentes échelles.

INFLUENCE DU MURISSEMENT SUR L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE, DE DUCTILITE ET STRUCTURALE DE L'ALLIAGE POLYCRISTALLIN 47100 COULE SOUS PRESSION.

III.1 - INTRODUCTION

La présente étude a pour but de déterminer l'influence de la variation du temps de maturation des pièces métalliques destinées aux différentes réalisations de l'ENEL (Unité Moteurs de Fréha à Tizi-Ouzou) sur l'évolution du comportement et de l'endommagement en traction, la dureté Brinell, la micodureté, la résilience et la microstructure de l'alliage de fonderie de désignation chimique AlSi12Cu et numérique 47100 en considérant quinze états du matériau : brut de coulée noté : F, trempé noté: T et temps de maturation désignées respectivement M0h, M2h, M4h, M6h, M8h, M10h, M12h, M14h, M16h, M18h, M20h, M22h et M24h,; l'ajout de 12% de silicium qui donne d'excellentes aptitudes à la coulée et d'un pourcentage de cuivre ($\leq 1\% \text{Mg}$) à l'aluminium sont les principaux agents d'amélioration des caractéristiques mécaniques en plus des traitements thermiques spécifiques qui font apparaître des précipités de différents genres qui entravent le mouvement de dislocations.

En raison de nombreux avantages qu'ils présentent les alliages d'aluminium ont fait l'objet de plusieurs études approfondies concernant leurs propriétés physiques et chimiques en général et mécaniques en particulier, parmi ces alliages ceux de la famille Al-Si occupe une place particulière dans la fabrication et la réalisation de nombreuses pièces industrielles. Pouvant supporter de grandes charges mécaniques et possédant une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation, ils sont très utilisés comme accessoires dans plusieurs réalisations (culasses, bâtis, corps de pompe, poulies de commande, carcasses de boîtes à vitesse et d'avance...etc).

Les pièces élaborées à partir de ces alliages font partie des composants rentrant dans diverses réalisations de l'Electro-Industries de Fréha (Azazga).

Ces alliages en plus de leurs caractéristiques mécaniques élevées présentent de bonnes propriétés de fonderie, l'augmentation de la teneur en silicium se traduit par une bonne coulabilité et une excellente aptitude au remplissage du moule, qui est une caractéristique

importante pour le moulage des pièces de grandes dimensions ou pour le remplissage de moule à géométrie complexe.

Dans ma contribution je me suis intéressé à l'étude de l'influence du mode d'élaboration en coquille métallique par coulée sous pression que des traitements thermiques de modification de la microstructure par chauffage, mise en solution avec homogénéisation, de trempe structurale et du temps de maturation aux états brut de coulée, trempé et maturations 0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 14h, 16h, 18h, 20h, 22h et 24h par incrément de 2h sur les caractéristiques de résistances et de ductilité de l'alliage eutectique de désignation chimique *AlSi12Cu* (avec 12%Si et $Cu \leq 1\%$).

Pour chercher à augmenter plus les caractéristiques de résistances et obtenir essentiellement de grandes contraintes d'élasticité, de grands modules de rigidité avec de faibles déformations, le matériau de désignation numérique 47100 est soumis aux traitements spécifiques ci-dessus.

Par contre la caractérisation mécanique de cet alliage est obligatoire car elle sert essentiellement par la suite aux calculs de l'ingénieur de conception au niveau du bureau d'études pour le dimensionnement des pièces soumise aux différentes sollicitations extérieures ; pour cela quatre techniques sont utilisées ; à savoir : la traction pour identifier les différentes contraintes, la dureté Brinell HB et la microdureté pour le champ de contraintes, la résilience la résistance au choc et la microstructure pour identifier les différentes structures.

III.2 - EFFETS DU MODE D'ELABORATION ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ESSAI DE TRACTION

Les caractéristiques élastiques, plastiques et de striction des matériaux sont des paramètres très importants lors de la conception des éléments entrant dans diverses réalisations soumises à des efforts extérieurs en général et mécaniques en particulier. En effet, la limite élastique fixe le seuil admissible à ne pas dépasser pour éviter aux pièces réalisées de franchir le domaine de la déformation réversible (élastique) à celui de la déformation permanente (plastique); l'élongation et la charge à la rupture nous renseignent respectivement sur la limites de déformabilité des matériaux destinés à subir des modifications géométriques et l'estimation de la résistance du matériau au-delà de laquelle ce dernier amorce son entrée dans la phase de la rupture.

Toutes les courbes obtenues présentent presque une même allure qui se distingue par trois régions différentes :

Une grande partie élastique linéaire d'équation $\sigma_e = E\varepsilon_e$: cette partie peut être expliquée par le mouvement des atomes liés par des forces électrostatiques. Les atomes d'un cristal possèdent un éloignement naturel pour lequel toutes ces forces s'équilibrent. L'application d'une force faible extérieure perturbe cet équilibre et les atomes s'éloignent les uns des autres jusqu'à ce que les forces interatomiques proviennent à annuler la force appliquée. Lorsque la force est supprimée, les atomes reviennent à leur position initiale d'où la déformation réversible (élasticité)

Une petite partie Plastique de forme $\sigma = K\varepsilon^n$: avant que la déformation élastique n'ait atteint sa limite, apparaît une deuxième partie qui est la déformation plastique ; elle s'effectue principalement par un glissement d'une partie du cristal par rapport à l'autre suivant un nombre entier de distance inter réticulaires.

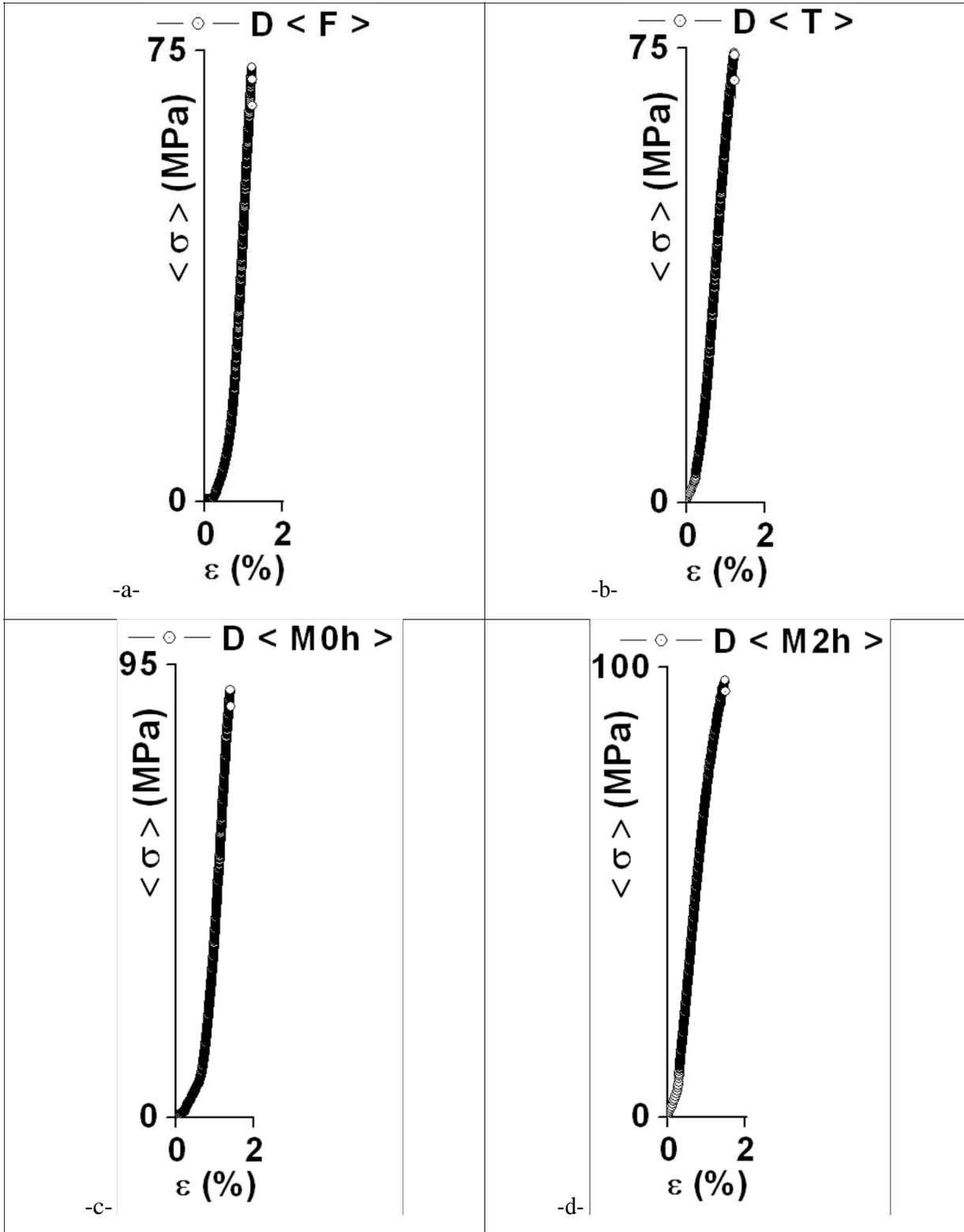
Ce glissement s'interprète par le mouvement des dislocations initiales mobiles ou créées lors de la déformation et leurs interactions avec divers obstacles présents dans le matériau.

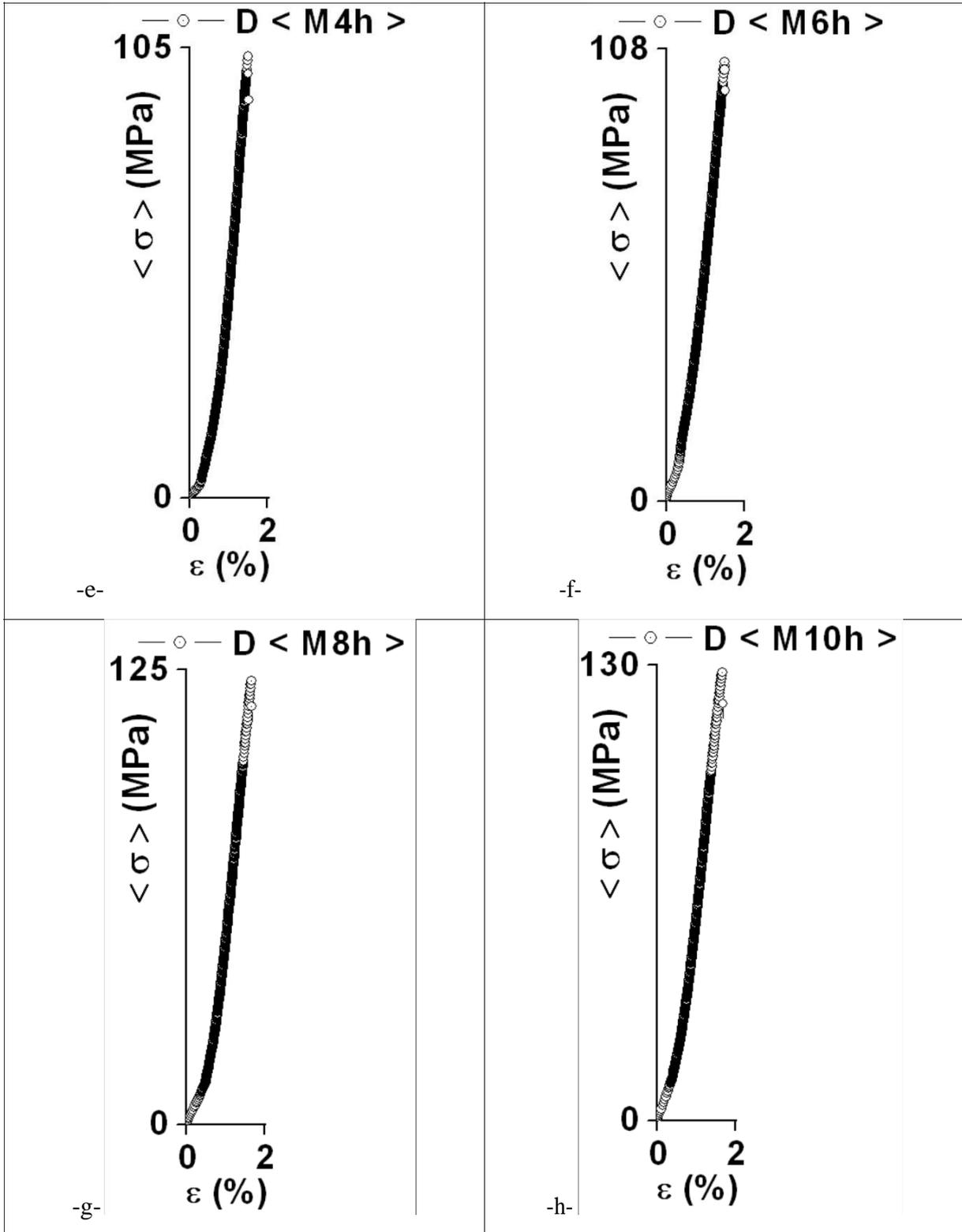
Et une rupture semi fragile : déterminée par la résilience K_{cv} ou K_{cu} et le coefficient de concentration de contraintes K_s . Elle passe par deux étapes, la première est la naissance des fissures et leur coalescence avec apparition de la striction et la seconde, leur propagation à travers toute la section de l'éprouvette.

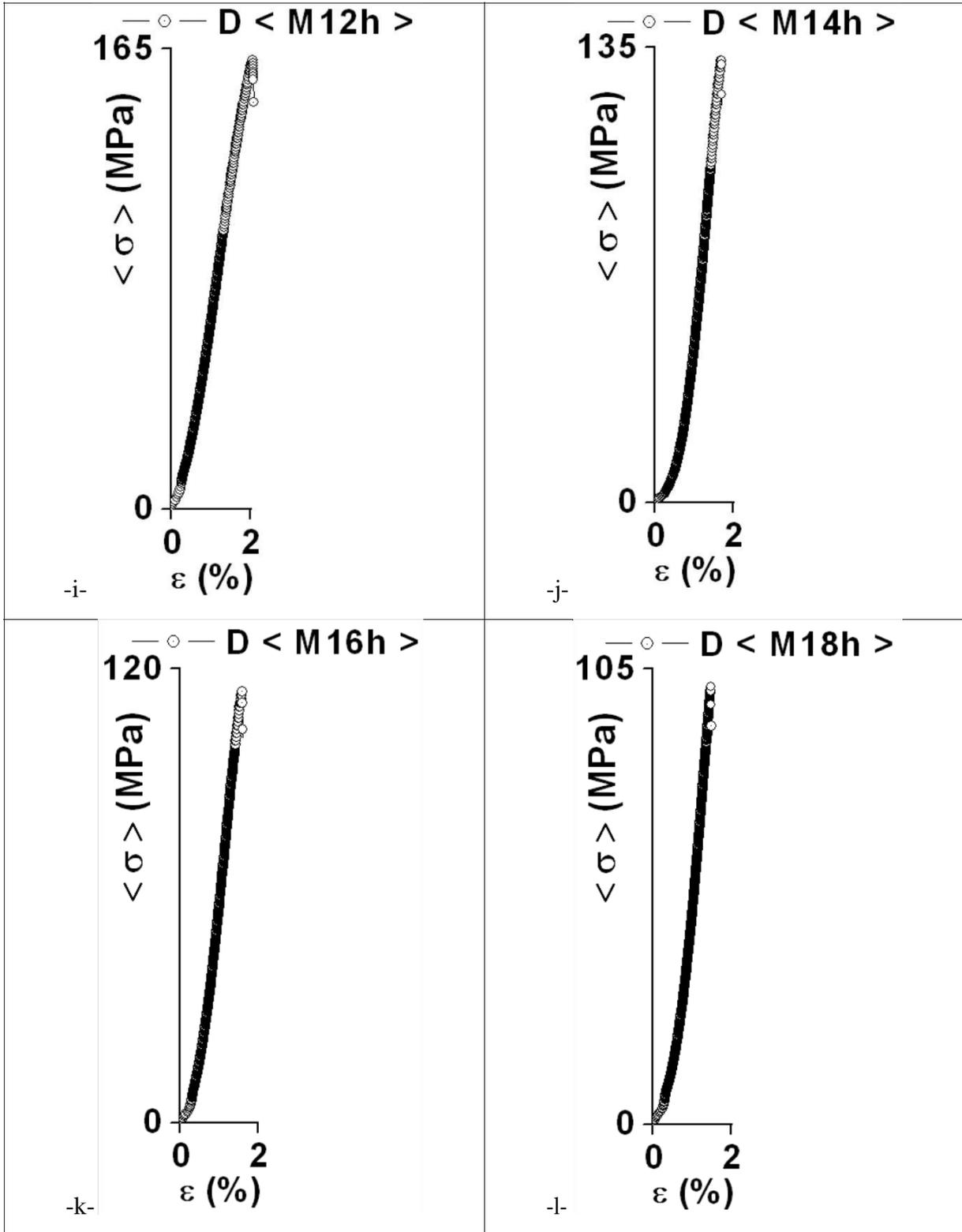
III.3 - RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

Les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de traction, de résilience, de micro dureté et de dureté de l'alliage AlSi12Cu sont représentées par les figures de 1 à 17 ci-dessous. Elles sont obtenues en moyennant une série de mesures de 5 éprouvettes identiques de cet alliage.

III.3.1 - Courbes moyennes de la coulée sous pression







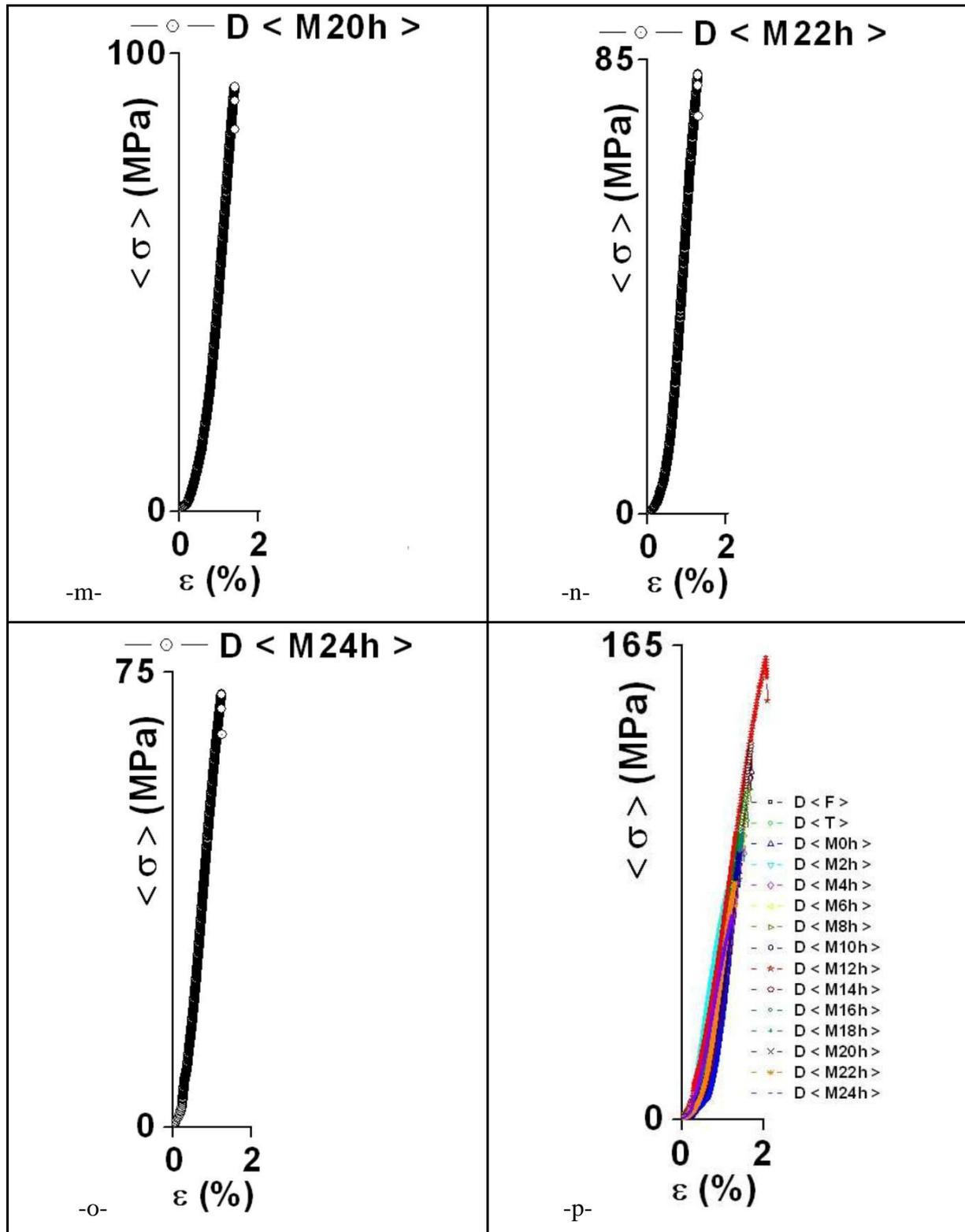


Fig.III.1 – Courbes de traction (contrainte – déformation) de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états : a - brut de coulée noté : <F>, b – trempé noté : <T> et maturés notés : c – <M0h>, d – <M2h>, e – <M4h>, f - <M6 h>, g – <M8h>, h – <M10h>, i - <M12h>, j - <M14h>, k – <M16h>, l – < M18h>, m – <M20h>, n – <M22h>, o – <M24h> et p – groupement des 15 états correspondants avec <σ> - Contrainte moyenne,

$\epsilon(\%)$ - déformation et D - coulée sous pression.

Les Figures.III.1- (a-b-c-d-e-f-g-h-i-j-k-l-m-n et o) représentent respectivement les courbes de traction moyennes (contraintes - déformations) de cinq éprouvettes de l'alliage AlSi12Cu coulées sous pression pour chaque état des quinze considérés qui sont: a - brut de coulée noté : < F >, b – trempé noté : < T > et maturés notés : c – < M0h >, d – < M2h >, e – < M4h >, f - < M6h >, g – < M8h >, h – < M10 h >, i - < M12h >, j - < M14h >, k – < M16h >, l – < M18h >, m – < M20h >, n – < M22 h > et o – < M24h >

On regroupe à chaque fois cinq éprouvettes de chaque état dans un même graphe afin de voir si les résultats sont proches et en suite on fait une courbe moyenne de chaque état.

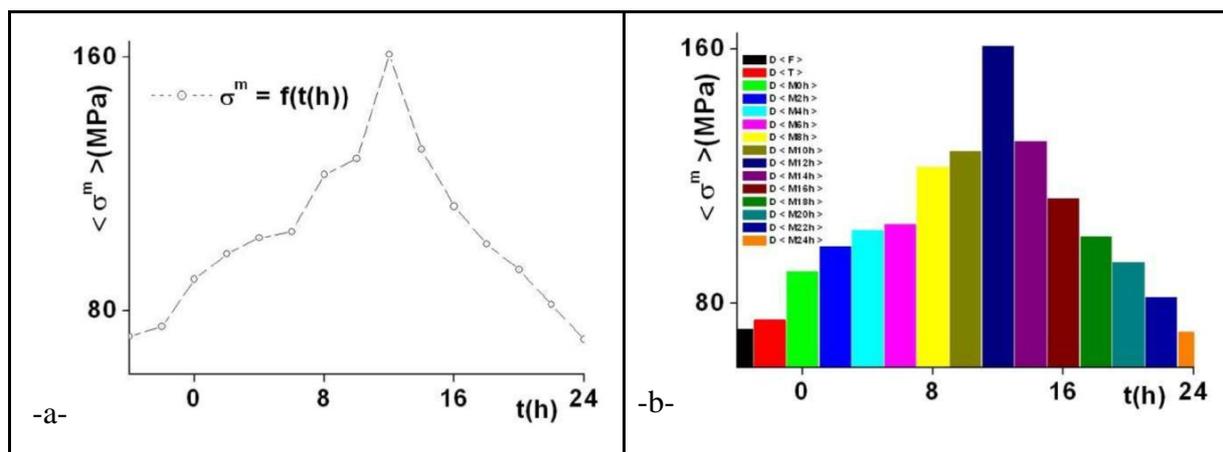
La Figure.III.1- (-p-) représente le groupement des courbes moyennes (contraintes - déformations) des quinze états du mode de coulée sous pression afin de déterminer le compromis de résistance.

L'étude des courbes précédemment citées nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de chaque état du mode de coulée sous pression.

Les figures (III.2 – III.13) représentent les différents résultats obtenus au cours de notre étude des différentes propriétés mécaniques de notre alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu.

III.3.2 - Influence du temps de maturation sur la traction, la dureté, la micro dureté et la résilience de l'alliage de fonderie AlSi12Cu coulé sous pression

III.3.2.1 - Caractéristiques de résistance



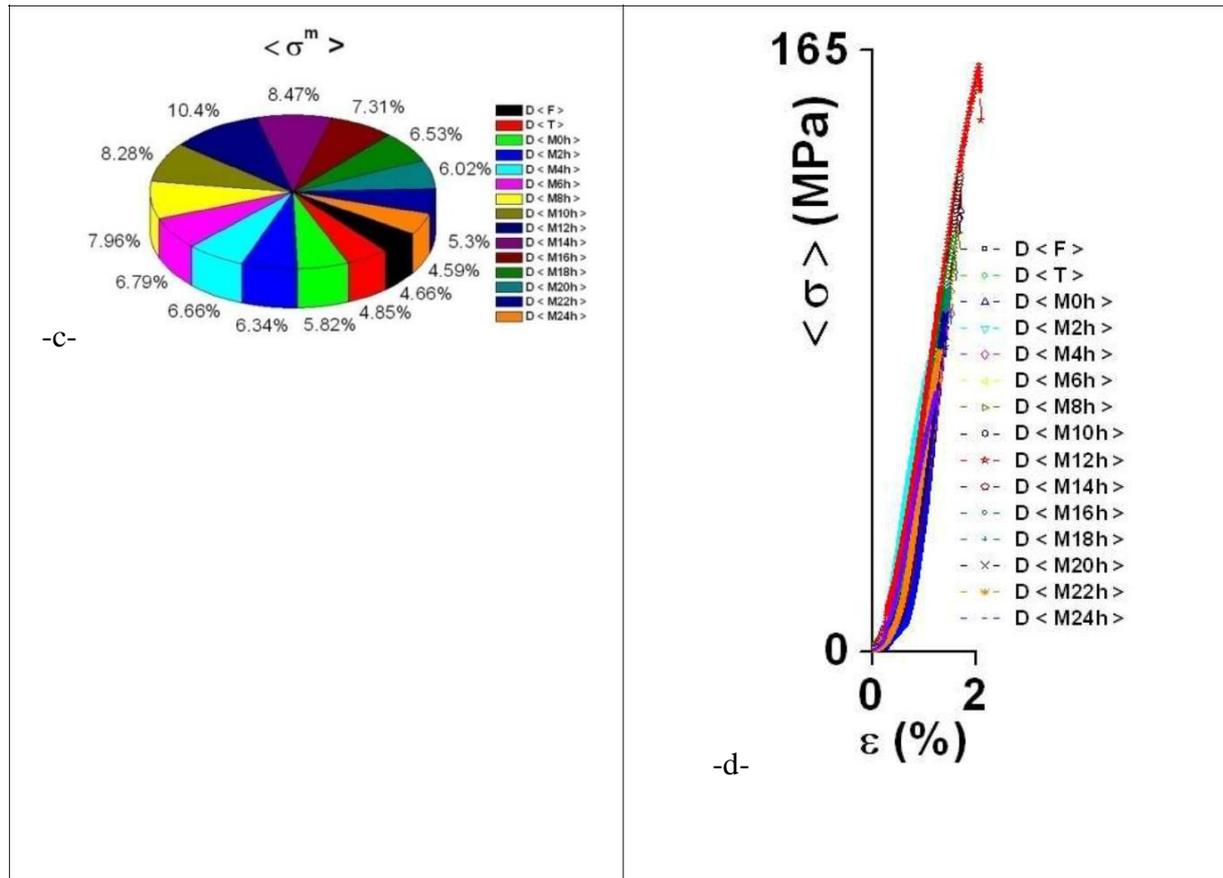
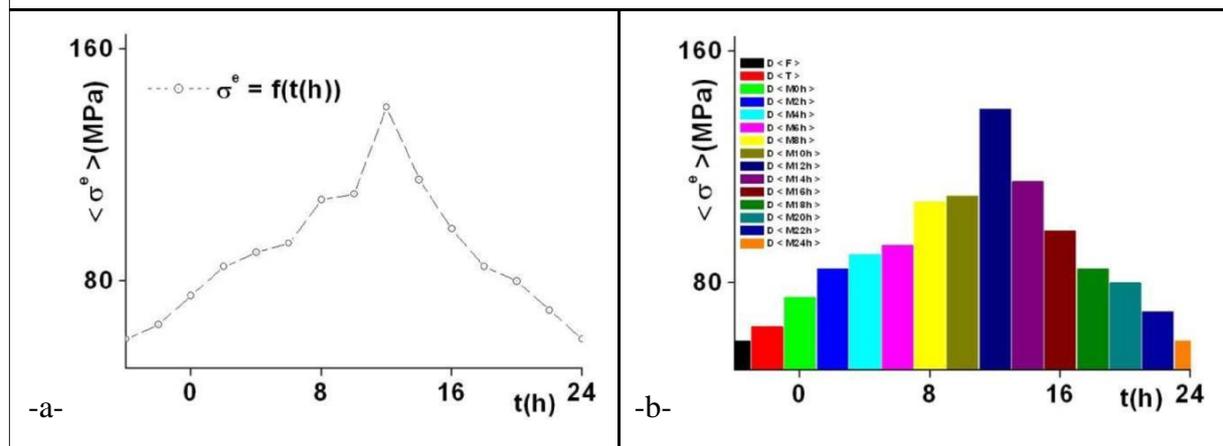
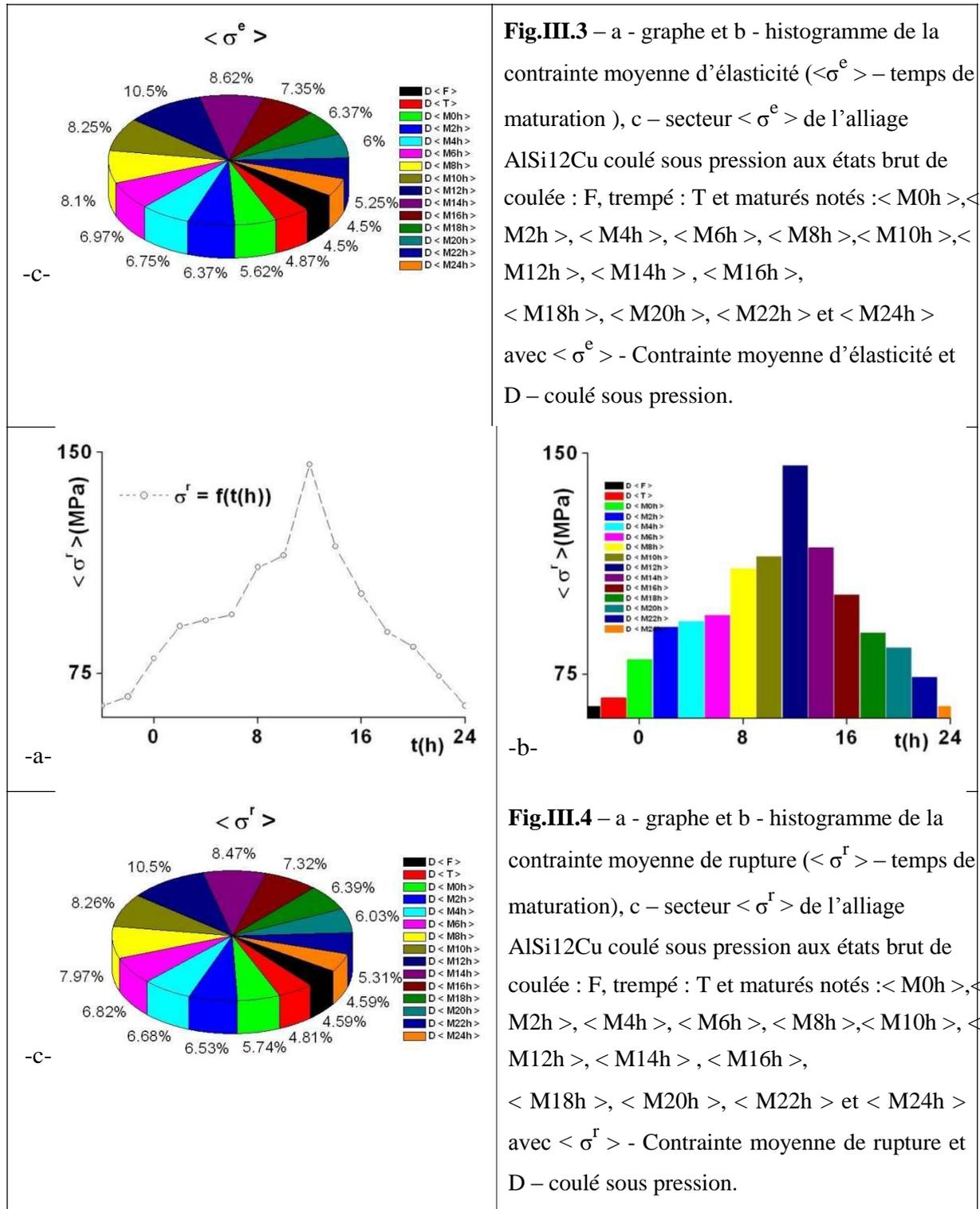


Fig.III.2 – a - graphe et b - histogramme de la contrainte moyenne maximale ($\langle \sigma^m \rangle$ – temps de maturation), c – secteur $\langle \sigma^m \rangle$, d – Groupement des 15 courbes de traction (contrainte – déformation) de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés : < M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec $\langle \sigma^m \rangle$ - Contrainte moyenne maximale, ϵ (%) - déformation et D – coulé sous pression.





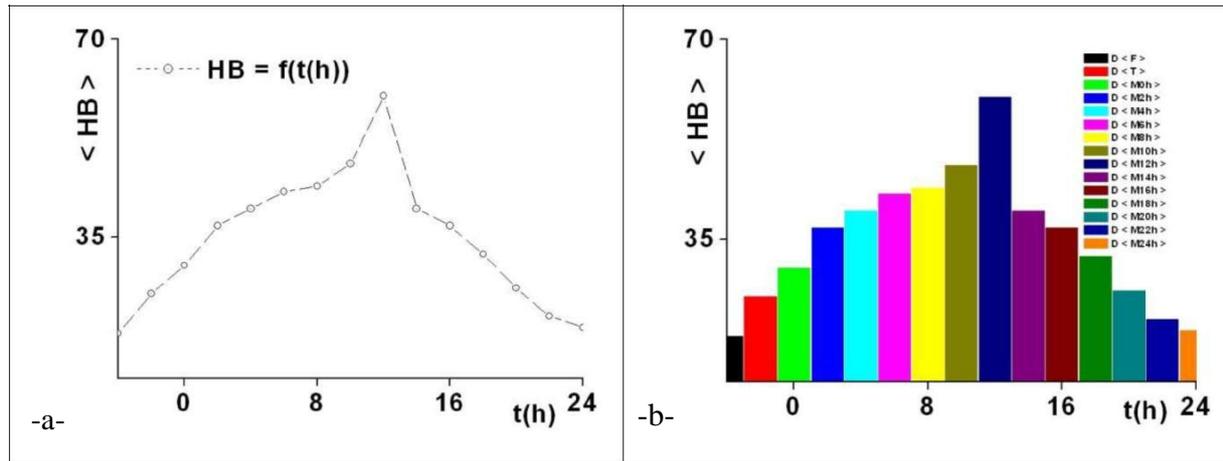


Fig.III.5 – a - graphe et b - histogramme de la dureté Brinell (HB – temps de maturation), c – secteur < HB > de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé :T et maturés notés :< M0h >,< M2h >, < M4h >,< M6h >,< M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec < HB > - dureté Brinell moyenne et D – coulé sous pression.

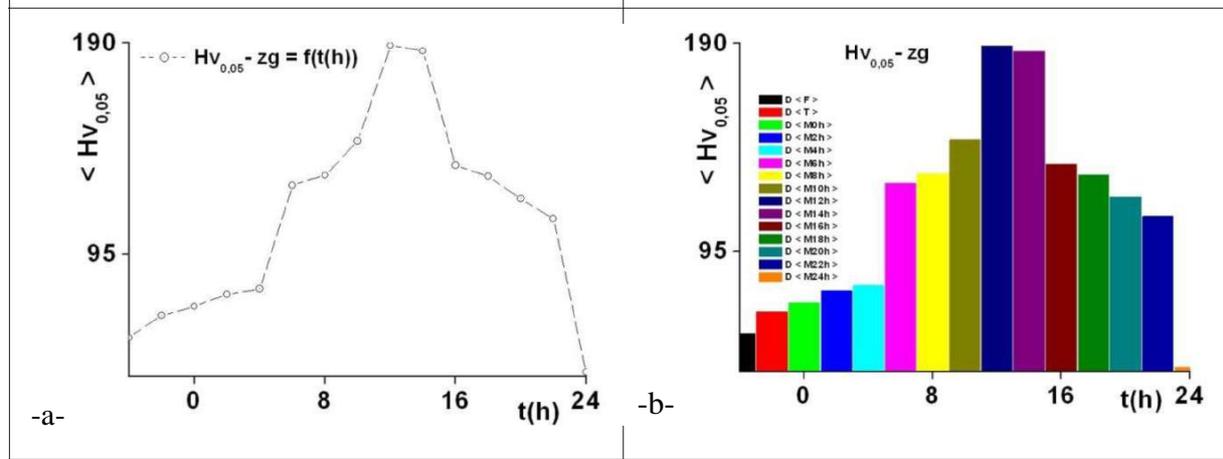
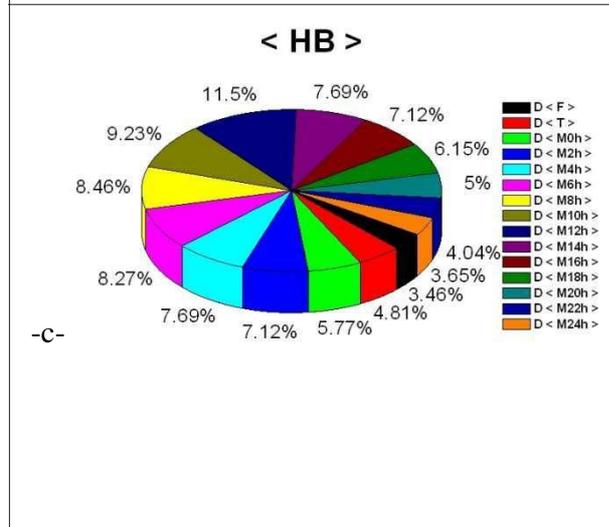
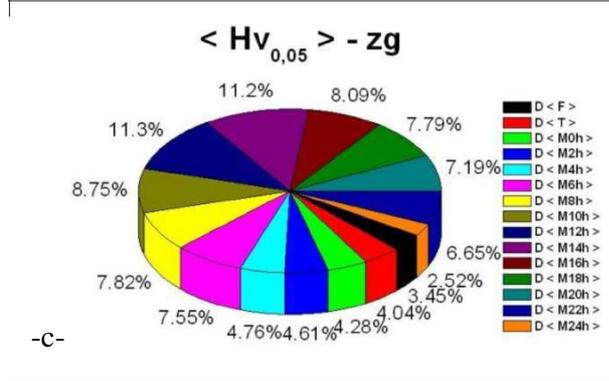


Fig.III.6 – a - graphe et b - histogramme de la microdureté de la zone grise (Hv_{0,05}-zg – temps de maturation), c – secteur < Hv_{0,05} >-zg de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés :< M0h >,< M2h >,< M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec < Hv_{0,05} >-zg - microdureté moyenne et D – coulé sous pression.



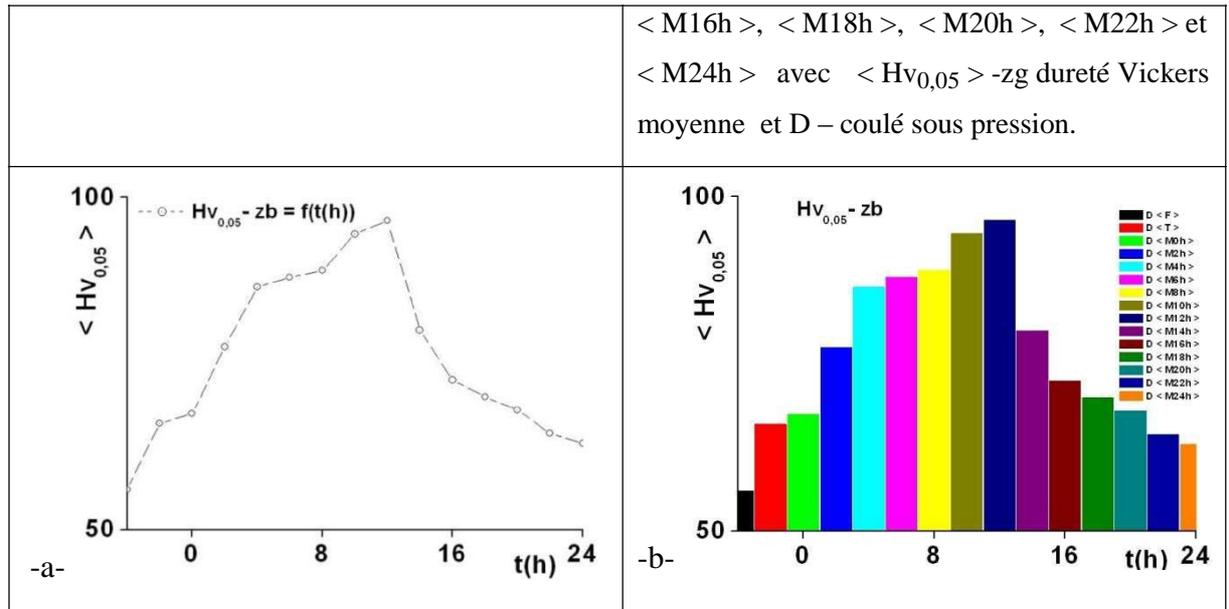


Fig.III.7 – a - graphe et b - histogramme de la microdureté de la zone blanche ($Hv_{0,05}$ -zb – temps de maturation), c – secteur $\langle Hv_{0,05} \rangle$ -zb de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés : <M0h>, <M2h>, <M4h>, <M6h>, <M8h>, <M10h>, <M12h>, <M14h>, <M16h>, <M18h>, <M20h>, <M22h> et <M24h> avec $\langle Hv_{0,05} \rangle$ -zb dureté Vickers moyenne et D – coulé sous pression.

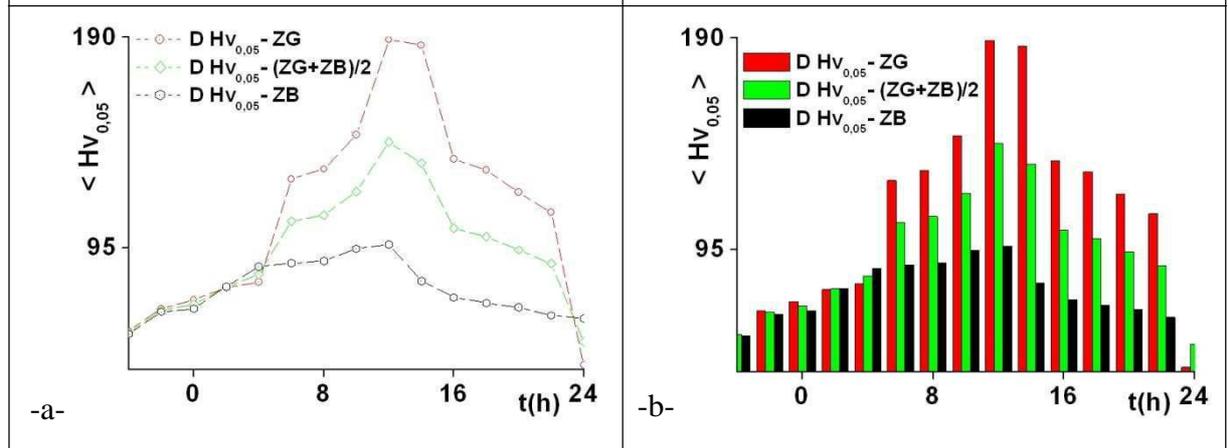


Fig.III.8 – a - graphe et b - histogramme de comparaison des micros duretés Vickers des zones noire notée : Zn, blanche notée : Zb et de leur moyenne notée $(Zb+Zn)/2$ ($\langle Hv_{0,05} \rangle$ - Zn, Zb et $(Zb+Zn)/2$ – temps de maturation) de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés : <M0h>, <M2h>, <M4h>, <M6h>, <M8h>, <M10h>,

< M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec D – coulé sous pression.

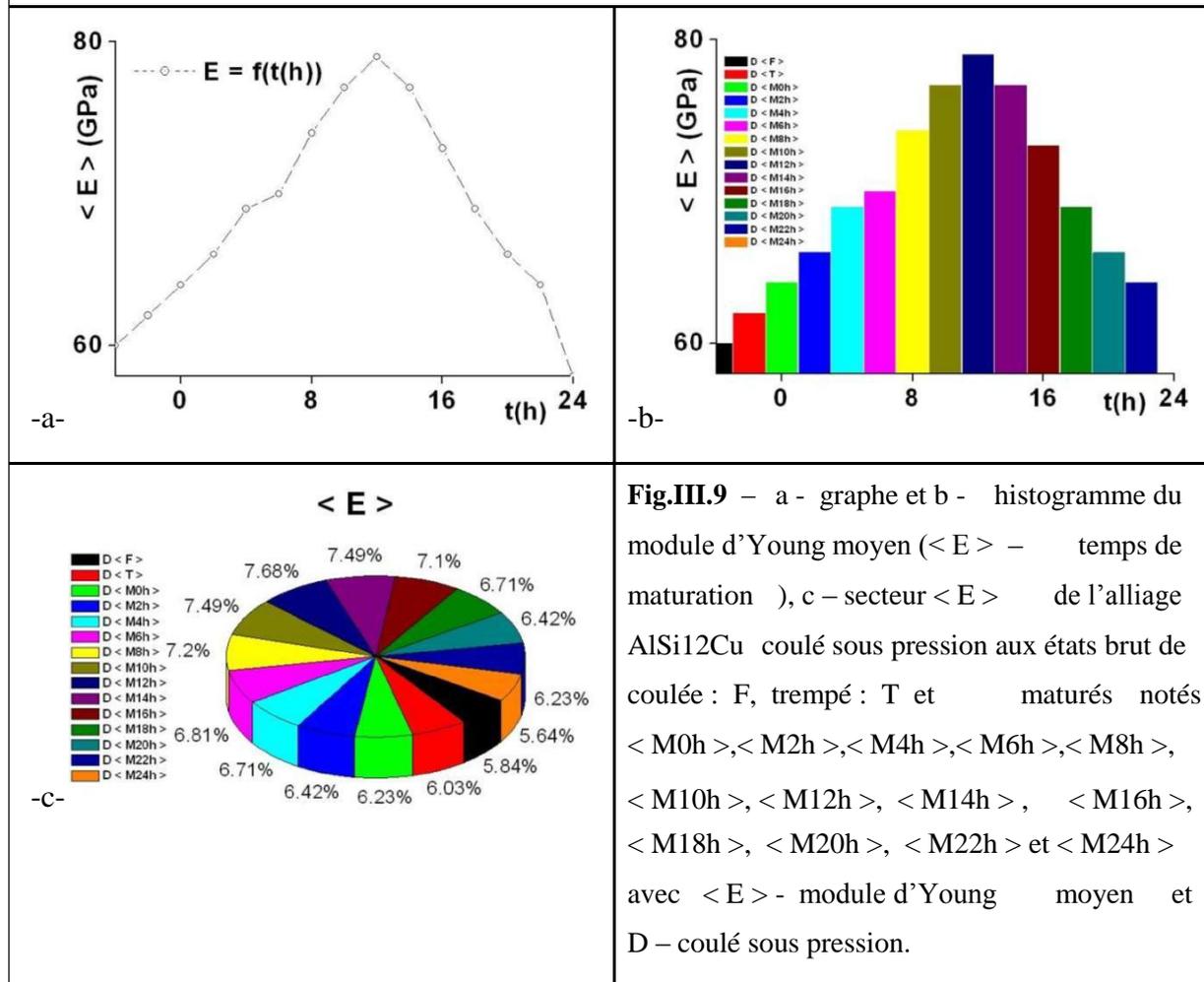
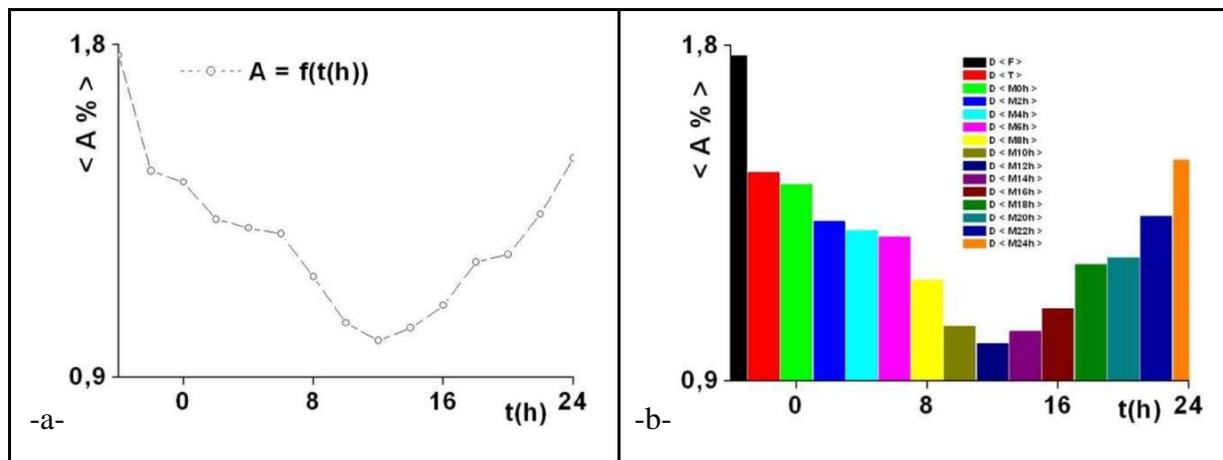


Fig.III.9 – a - graphe et b - histogramme du module d'Young moyen ($\langle E \rangle$ – temps de maturation), c – secteur $\langle E \rangle$ de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés : < M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec $\langle E \rangle$ - module d'Young moyen et D – coulé sous pression.

III.3.2.2 - Caractéristiques de ductilité



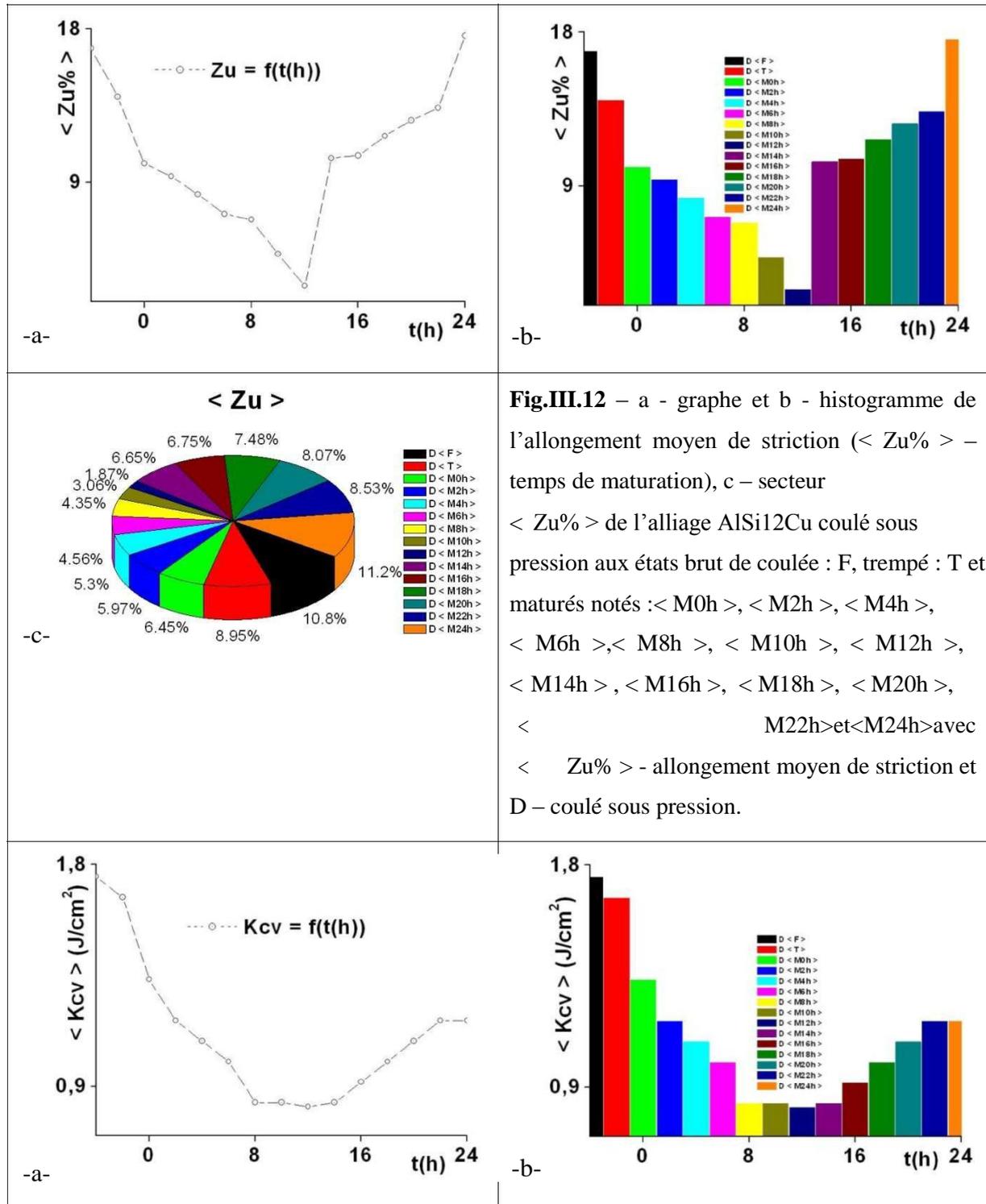


Fig.III.12 – a - graphe et b - histogramme de l’allongement moyen de striction ($\langle Zu\% \rangle$ – temps de maturation), c – secteur $\langle Zu \rangle$ de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée : F, trempé : T et maturés notés :$\langle M0h \rangle$, $\langle M2h \rangle$, $\langle M4h \rangle$, $\langle M6h \rangle$,$\langle M8h \rangle$, $\langle M10h \rangle$, $\langle M12h \rangle$, $\langle M14h \rangle$, $\langle M16h \rangle$, $\langle M18h \rangle$, $\langle M20h \rangle$, $\langle M22h \rangle$et$\langle M24h \rangle$avec $\langle Zu \rangle$ - allongement moyen de striction et D – coulé sous pression.

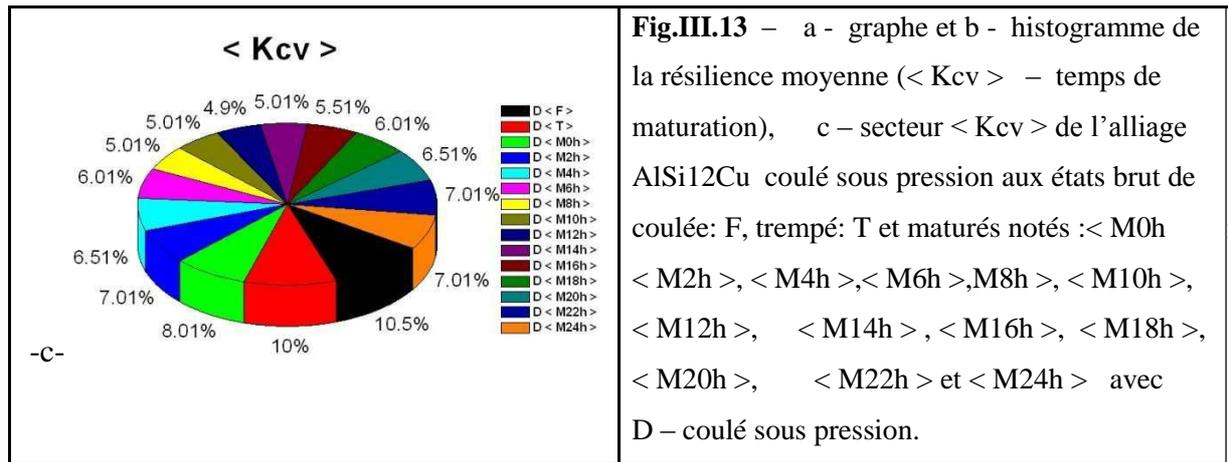
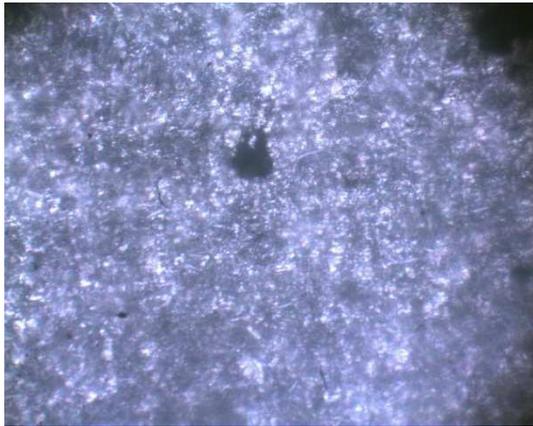


Fig.III.13 – a - graphe et b - histogramme de la résilience moyenne (< Kcv > – temps de maturation), c – secteur < Kcv > de l’alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états brut de coulée: F, trempé: T et maturés notés :< M0h >, < M2h >, < M4h >, < M6h >, < M8h >, < M10h >, < M12h >, < M14h >, < M16h >, < M18h >, < M20h >, < M22h > et < M24h > avec D – coulé sous pression.

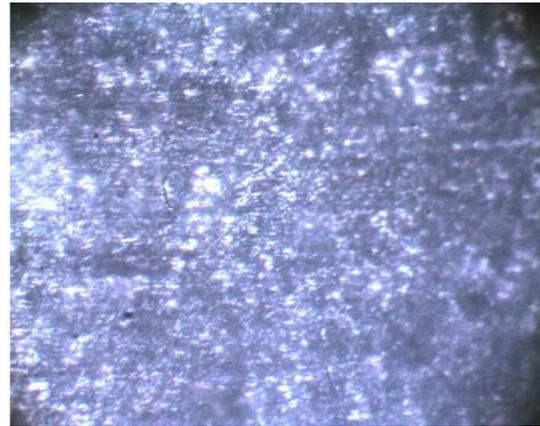
DISCUSSION

Dans ce type de moulage coulé sous pression, on observe la courbe moyenne de l’état D < M12h > est en dessus de toutes les courbes des autres états (Fig.III.1 – p) et (Fig.III.2 – d) et que les propriétés mécaniques de résistances extrinsèques qui sont la résistance maximale à la traction < σ^m >, la limite d’élasticité < σ^e >, la résistance à la rupture < σ^r >, la dureté < HB >, la micro dureté < $Hv_{0,05}$ > et le module d’Young < E > croissent respectivement d’une façon brutale de l’état brut de coulée : D < F > pour atteindre la valeur maximale à l’état D < M12h > pour décroître jusqu’à D < M24h > (Fig.III.2 – Fig.III.9) au détriment des propriétés mécaniques de ductilité extrinsèques qui sont < A% > - allongement en pourcentage, < Zu% > - allongement à la striction, < Z% > - coefficient de striction et < Kcv > – résilience qui décroissent d’une façon brutale respectivement de l’état brut de coulée : D < F > jusqu’à l’état D < M12h > pour enfin croître jusqu’à D < M24h > (Fig.III.10 – Fig.III.13).

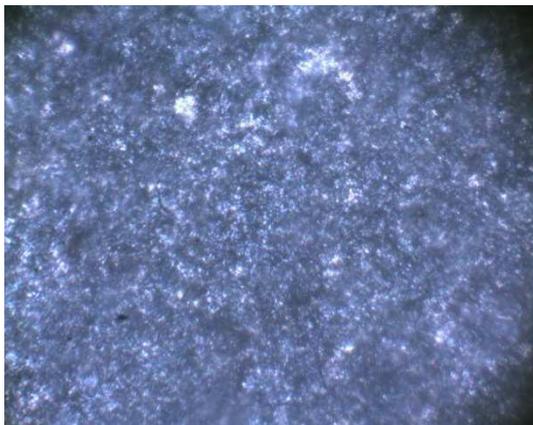
III.4 - MICROSTRUCTURE DE L’ALLIAGE EUTECTIQUE AlSi12Cu COULE SOUS PRESSION



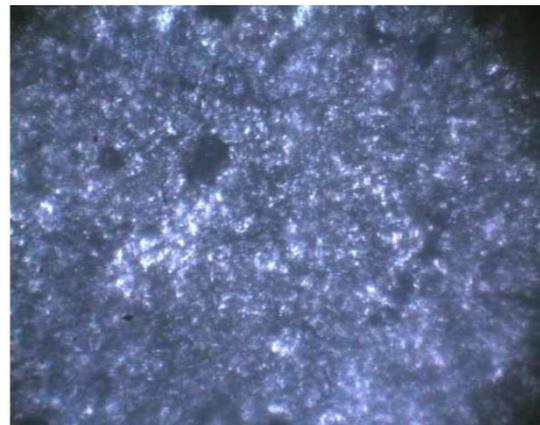
DFx100



DM0hx100

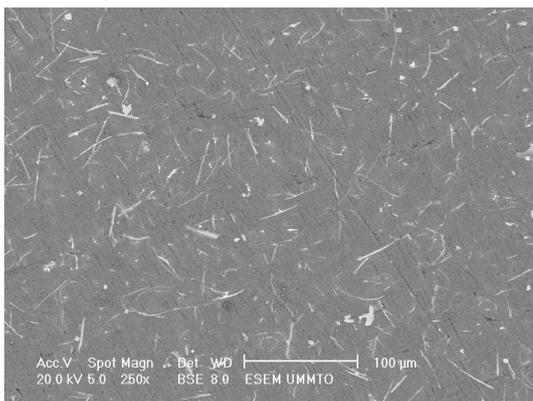


DM12hx100

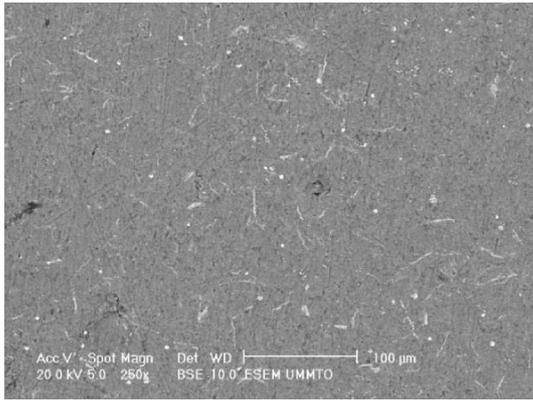


DM24hx100

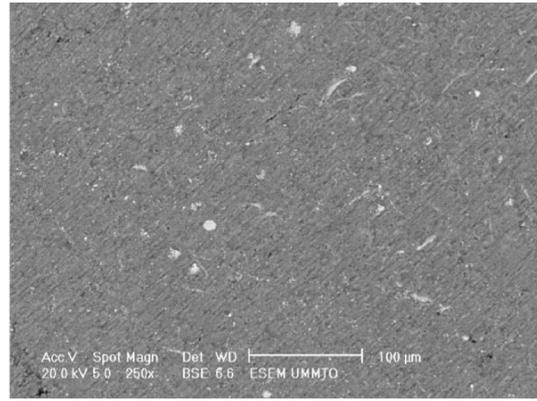
Fig.III.14 - Structures micrographiques de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu



DF

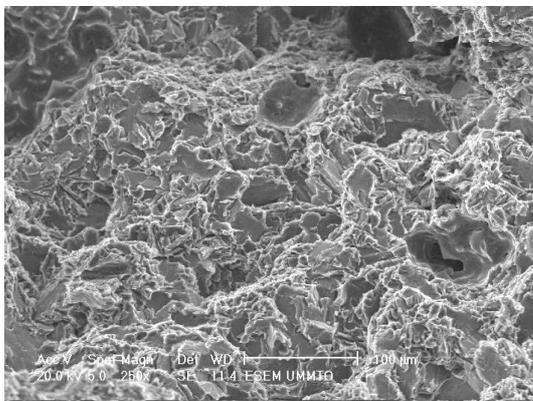


DM12h

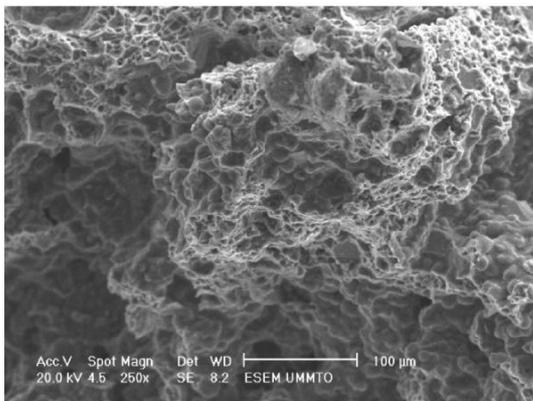


DM24h

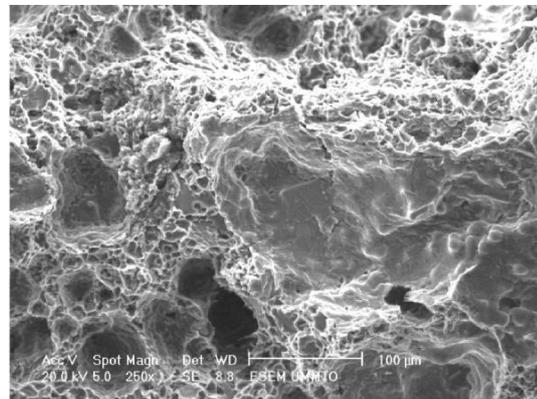
Fig.III.15 - Microstructures obtenues au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu



DF

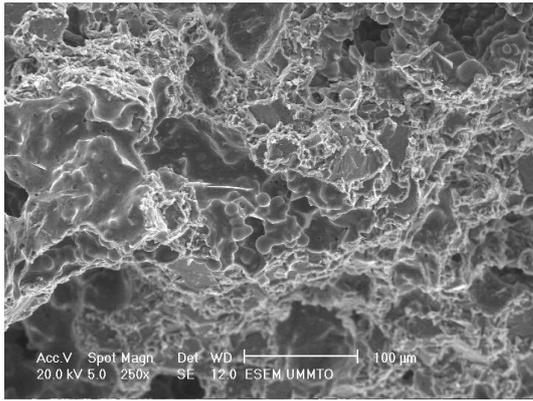


DM12h

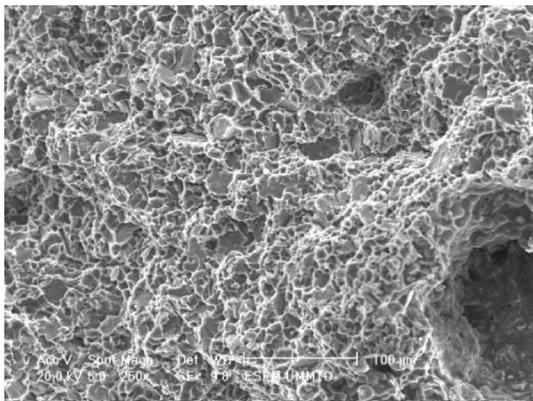


DM24h

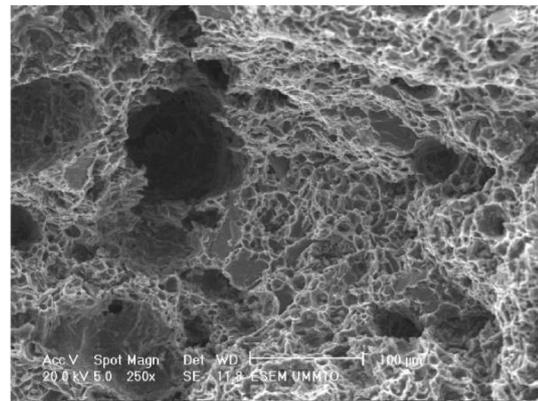
Fig.III.16 - Faciès de rupture en traction obtenus au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu



DF



DM12h



DM24h

Fig.III.17 - Faciès de rupture en résilience obtenus au MEB de l'alliage de fonderie coulé sous pression AlSi12Cu

- Les (Fig.III.1- a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o et p) courbes de traction et de comparaison (contrainte – déformation) moyennant une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états: a - brut de coulée noté : < F >, b – trempé noté : < T > et maturés notés : c – < M0h >, d – < M2h >, e – < M4h >, f - < M6h >, g – < M8h >, h – < M10h >, i - < M12h >, j - < M14h >, k – < M 16h >, l – < M18h >, m – < M20h >, n – < M22h >, o – < M24h > et p – groupement des 15 états de comparaison correspondants nous montrent

- que les déformations à rupture ainsi que les énergies de rupture sont faibles avec absence du domaine plastique hétérogène car l'endommagement s'est produit d'une manière brutale; de plus le tronçon de la courbe montrant le passage de la contrainte moyenne maximale $\langle \sigma^m \rangle$ à celle de la contrainte moyenne de rupture $\langle \sigma^r \rangle$ est une droite verticale : chute brutale de $\langle \sigma^m \rangle$ à $\langle \sigma^r \rangle$ avec - $\langle \epsilon^m \rangle = \langle \epsilon^r \rangle = \text{cste.}$ (Fig.III.1)

- Les allongements à la rupture : $A\% < 5\%$ (Fig.III.10)
- Les valeurs des coefficients de striction $Z < 0,1$ (Fig.III.11)

- La résilience K_{cv} est très faible (Fig.III.13)
- les faciès de rupture, respectivement de traction (Fig.III.16) et de résilience (Fig.III.17)

présentent un aspect brillant à grains.

Ces cinq critères et observations nous confirment que la rupture de notre alliage est sensiblement une rupture fragile.

Les quinze courbes moyennes (contrainte – déformation) (Fig.III.1) font apparaître deux domaines seulement : un grand domaine élastique et un autre plastique homogène très restreint ou l'endommagement instantané débute par une striction de l'éprouvette avec apparition et propagation brutale de la fissure sur un défaut.

Dans cas, on est en présence du mode de rupture probablement de type I avec chargement sévère et perpendiculaire au plan de la fissure

III.5 - METALLOGRAPHIE DE L'ALLIAGE ETUDIÉ

Dans les moules métalliques, la solidification se produit beaucoup plus rapidement. Il en résulte une structure plus fine Fig.III.14.15 (DF) . La grosseur du grain de métal exerce une action importante sur ses propriétés mécaniques. Ces propriétés, surtout sa ductilité et sa plasticité, sont plus prononcées lorsque le grain est petit. A l'état brut de coulée, l'alliage étudié AlSi12Cu renferme généralement des lamelles réparties d'une façon aléatoire et formées après solidification et dans lesquelles la distribution de la teneur en différents éléments d'aditions (Si, Cu) est non uniforme. Ceci conduit à la formation des hétérogénéités structurales et locales qui engendrent un champ de contraintes variant d'un point à un autre du matériau, dans ce dernier, on est en présence alors des régions difficilement et facilement déformables, par conséquent, lors des sollicitation mécaniques extérieures, la déformation apparaît en premier lieu dans les régions favorables au glissement des dislocations. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié, il faut gêner le mouvement des dislocations dans toute la masse du matériau en provoquant la formation de précipités finement dispersés (Al_2Cu , Si, Cu), pour cela nous avons fait subir à l'alliage un traitement thermique qui s'effectue en trois étapes. L'observation métallographique met en évidence dans l'alliage étudié aux états brut de coulée une répartition assez hétérogène des lamelles, par contre leurs répartitions dans la matrice aux états maturés et revenus sont homogènes. Lors de l'analyse des microstructures obtenues par la microscopie optique, nous avons remarqué que la taille des grains obtenue par l'état D < M12h > sont plus fins que celle obtenue aux autres états , ce qui explique les résultats obtenus lors de l'essai de traction et de dureté.

III.6 - ETUDE COMPARATIVE SELON Les traitements thermiques

Les (Fig.III.1 - a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o et p – Fig.III.2 - 13) montrent respectivement les courbes moyennes groupées de dépendance de la contrainte appliquée en fonction de la déformation, les graphes des résistances moyennes à la traction: $\langle \sigma^m \rangle$, $\langle \sigma^e \rangle$, et $\langle \sigma^f \rangle$, la dureté Brinell moyenne $\langle HB \rangle$, la micro dureté moyenne $\langle Hv_{0,05} \rangle$, le module d'Young moyen $\langle E \rangle$, l'allongement moyen en pourcent $\langle A\% \rangle$, le coefficient de striction moyen $\langle Z\% \rangle$, l'allongement à la striction moyen $\langle Zu\% \rangle$ et la résilience moyenne $\langle Kcv \rangle$ en fonction du temps de maturation de l'alliage AlSi12Cu coulé sous pression aux états : a - brut de coulée noté : $\langle F \rangle$, b – trempé noté : $\langle T \rangle$ et maturés notés : c – $\langle M0h \rangle$, d – $\langle M2h \rangle$, e – $\langle M4h \rangle$, f - $\langle M6h \rangle$, g – $\langle M8h \rangle$, h – $\langle M10h \rangle$, i - $\langle M12h \rangle$, j - $\langle M14h \rangle$, k – $\langle M16h \rangle$, l – $\langle M18h \rangle$, m – $\langle M20h \rangle$, n – $\langle M22h \rangle$, o – $\langle M24h \rangle$ et p. Pour le mode de coulée sous pression, on constate que les graphes des contraintes, de la dureté Brinell, de la micro dureté et du module d'Young en fonction du temps de maturation croissent de l'état brut de coulée, pour atteindre leurs maximums à M12h puis décroissent jusqu'à l'état M24h au détriment des allongements, de la striction et de la résilience. Il ressort que les valeurs de la résistance à la rupture, la résistance à la traction, la limite d'élasticité, la micro dureté et la dureté Brinell de l'alliage à l'état de maturation M12h sont supérieures à celles des autres états. L'analyse de ces résultats nous montre que le compromis est l'état M12h pour des pièces de résistance quel que soit l'état car le processus de vieillissement naturel s'est achevé au bout de 12h de maturation suivi d'un revenu complet à 160°C pendant 6h.

Pour les petites pièces de grande et moyenne série ainsi que pour des pièces de dimension grande de série unitaire présentant un très bon aspect respectivement d'une part pour des raisons de sécurité, d'autre part pour des raisons économiques, les pièces doivent être coulées sous pression suivi d'un traitement de maturation de 12h.

III.7 - CONCLUSION

L'analyse des résultats expérimentaux montrent que le meilleur compromis est la coulée sous pression suivi de la maturation de douze heures (12h) quels que soient les états considérés.

Afin de répondre aux exigences des constructeurs pour une utilisation rationnelle de ce matériau dans divers mécanismes soumis à des efforts mécaniques, il est préférable d'élaborer

les différentes pièces destinées à l'usage de différentes natures dans des coquilles métalliques coulées sous pression suivies d'une maturation de 12h pour les pièces de résistance. Donc l'AlSi12Cu est un alliage de fonderie à traitement thermique ayant une très bonne coulabilité.

Conclusion générale

Dans ce présent travail, on s'est intéressé à l'effet du mode d'élaboration et à celui du temps de maturation sur les caractéristiques de résistance, de ductilité et structurales de l'alliage AlSi12Cu.

Nous avons étudié les caractéristiques mécaniques de traction, de dureté, de micro dureté, de résilience et de microstructure de l'alliage 47100 pour différents états à savoir : état brut de coulée noté : F, état trempé noté : T, états maturés désignés : M0h, M2h, état M4h, état M 6h, M 8h, M10h, M 12h, M 14h, M16h, M18h, M20h, M 22h et M 24h.

Les résultats obtenus dans ce travail peuvent être résumés comme suit :

Les propriétés mécaniques de l'alliage élaboré par coulée sous pression suivi de la maturation de 12h sont bien meilleures que celles des autres états.

Le meilleur compromis parmi tous les états étudiés est la maturation de 12h.

Le revenu provoque la précipitation des éléments d'addition dans la matrice de l'aluminium, ce qui explique l'augmentation des caractéristiques de résistance par le cuivre et la bonne coulabilité par le silicium.

Références bibliographiques

- [1] <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/partie2/aluminium>
- [2] Projet Tutoré : Aluminium IUT Saint---Jérôme
- [3] MESSAOUDENNE Aldjia et AKLIL Dalia. Effets du mode d'élaboration et des traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques et la microstructure des alliages de fonderie AlSi10Mg et AlSi12Cu, UMMTO, 2008
- [4] ALLEK Rabah et BEN HOCINE Salah Eddine. Effet du mode d'élaboration et du temps de maturation sur les caractéristiques mécaniques et la microstructure d'un alliage de fonderie (43100), UMMTO, 2007.
- [5] http://www.comoria.com/246089/Alliages_d'aluminium_pour_fonderie.
- [6] [feuillard technique publié par le centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium.
- [7] <http://ftpforge.chez-alice.fr/Traitementthermique.pdf>
- [8] http://www.bodycote.com/~media/Files/B/Bodycote-Plc-V2/Attachments/News%20and%20Media/FR/FICHE_les_traitements_thermiques_des_alliages_aluminium%20Fev2013.pdf
- [9] LARABI Lynda et MEZIANI Samira, Effets de la température de recuit et de revenu sur les propriétés de traction et la microstructure de l'alliage eutectique Al Si 13, UMMTO.
- [10] http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM5ac1_1.html
- [11] <http://externe.emt.inrs.ca/users/pignolet/Mat-Course/Chap%209-10/Mat-Chap10.pdf>
- [12] <https://fr.scribd.com/document/45036024/Manipulation-1-Micrographie-Et-Macrographie>.
- [13] http://www.ipcms.unistra.fr/wp-content/uploads/2014/06/memento_meb_eds.pdf.
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Microscopie_%C3%A9lectronique_en_transmission
- [15] <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/defauts41.html>.
- [16] www.techniques-ingenieur.fr
- [17] http://lmm.epfl.ch/webdav/site/lmm/shared/TP_MX2-GM2/C%20Traction.pdf
- [18] hebergement.u-psud.fr/13papp/wp-content/.../03/08_Chapitre-VI.pdf
- [19] <http://chauvet.lajol.free.fr/tgmbtp/serie4/moulage/moulage.pdf>