

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE
EN GÉNIE MÉCANIQUE

OPTION : GENIE DES MATERIAUX

THÈME :

**« *Caractérisation physico-chimique
d'un alliage d'aluminium Al-12%Si
utilisé à ELECTRO-INDUSTRIES
(E.I.AZAZGA) »***

PRÉSENTÉE PAR :
Mme : AZZOUG Naoual

PROPOSÉ PAR :
E.I.AZAZGA

DIRIGÉ PAR :
Mme.Ghalia.BENALIA-BAGUENANE

ENCADRÉ PAR :
Mr. M.BENACER

PROMOTION : 2019/2020

Dédicace :

A mes parents, mes sœurs et mon frère,

A mon mari et mes enfants alina, amayas et daris,

A ma grand-mère et mes cousins,

A ma belle-famille,

A mes collègues Fatiha ait kaid et Sabrina chouali.

Remerciements :

Je tiens d'abord à remercier dieu, le tout puissant, qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Mes remerciements très particuliers s'adressent à ma promotrice Madame BAGUENANE Ghalia pour la confiance qu'elle m'a accordé, son aide, ses conseils et son soutien.

Je remercie particulièrement Mr BENACER MOUHAND, mon encadreur à ELECTRO-INDUSTRIES, pour avoir accepté de me proposer ce sujet et m'orienter pour réaliser ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui me font l'honneur de juger ce travail.

Sans oublier ma gratitude à Mr BELABBAS Ferhat pour la générosité avec laquelle il m'a consacré son temps et pour toute l'aide qui m'a apporté.

Je souhait exprimer mes reconnaissances :

- A l'équipe de l'atelier d'usinage d'ELECTRO-INDUSTRIES
- A tout le personnel du laboratoire chimique de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES.

Je n'oublie pas de remercier mon mari YOUNSI Mourad pour son aide durant toutes ces années.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Présentation de l'entreprise.....	2
CHAPITRE I : Aluminium et ses alliages	
I Généralité sur l'aluminium et ses alliages.....	4
I.1 Historique.....	4
...	
I.2 Fabrication de l'aluminium	4
I.2.1 Production de l'alumine	4
I.2.2 Production de l'aluminium.....	4
I.3 Principales caractéristiques d'aluminium	4
I.3.1 Masse volumique	4
I.3.2 Résistance à la fatigue	5
I.3.3 Résistance à la corrosion	5
I.3.4 Mise en forme.....	6
I.3.5 Soudage.....	6
I.3.6 Conductibilité électrique	6
I.3.7 La ténacité	6
I.3.8 Module d'élasticité	6
I.3.9 Propriétés mécaniques	7
I.3.10 Propriétés physiques d'aluminium.....	7
I.4 Influence des éléments d'addition	8
I.5 L'aluminium et ses alliages	9
I.5.1 Alliages corroyés.....	9
I.5.2 Alliages de fonderie.....	10
II Corrosion d'aluminium et ses alliages.....	13
II.1 Généralité.....	13
II.1.1 Corrosion chimique (sèche)	14
II.1.2 Corrosion bactérienne.....	14
II.1.3 Corrosion électrochimique	14
II.1.4 Potentiel de corrosion libre	14
II.1.5 Les facteurs de la corrosion	15
II.2 Corrosion de l'aluminium et ses alliages	15
II.2.1 Les réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium.....	16
II.2.2 Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages.....	17
II.2.3 Formes de corrosion de l'aluminium	17
II.2.4 Protection de l'Aluminium et ses alliages	19
Chapitre II : procédures expérimentales	
I Appareillage.....	20
I.1 Polisseuses.....	20
I.2 Duromètre.....	20
I.3 Micro-duromètre.....	21
I.4 Microscope optique.....	22
I.5 Machine de traction.....	22
I.6 Spectromètre d'absorption atomique flamme	23
I.7 Le four de trempe	24

I.8	Four de revenu	24
I.9	Four à moufle.....	25
II	Préparation des échantillons.....	25
II.1	Polissage des échantillons.....	26
II.2	attaque chimique.....	26
II.3	Microscope optique	26
III	L'analyse chimique	26
III.1	Définition de la spectrométrie d'absorption atomique.....	26
III.2	dosage du silicium.....	28
IV	Etude de propriétés mécaniques de l'alliage.....	28
IV.1	Essai de traction.....	29
IV.2	Essai de dureté.....	34
IV.3	Essai de micro-dureté.....	35
IV.4	Les traitements thermiques	35
	Chapitre III : résultats et interprétations	
	Introduction.....	37
I	Alliage étudié.....	37
II	Résultat de l'analyse chimique.....	37
III	Métallographie des alliages étudiés.....	38
III.1	Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) avant traitement thermique.	38
III.2	Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) après traitement.....	44
IV	Essai de traction.....	51
V	Dureté.....	53
V.1	Avant traitement thermique.....	53
V.2	Après traitement thermique.....	53
VI	La micro-dureté.....	54
VI.1	Sans traitement thermique.....	54
VI.1	Vieillissement naturel.....	55
	Conclusion.....	56
	Références bibliographiques	
	Annexes	

Liste des figures

Chapitre I		
Figure 1	Courbe de Wöhler pour un alliage d'aluminium.....	5
Figure 2	Diagramme d'équilibre Al-Si.....	12
Figure 3	Corrosion par piqûre.....	18
Figure 4	Corrosion galvanique.....	19
Chapitre II		
Figure 5	Polisseuses.....	20
Figure 6	Duromètre WOLPERT DIA TESTOR RC.....	21
Figure 7	Micro-duromètre.....	21
Figure 8	Microscope optique.....	22
Figure 9	Machine de traction « CHENK-TREBEL ».....	22
Figure 10	Spectromètre d'absorption atomique flamme.....	23
Figure 11	Four à trempe.....	24
Figure 12	Four de revenu.....	24
Figure 13	Four à moufle.....	25
Figure 14	Illustration des processus d'émission et d'absorption.....	27
Figure 15	Géométrie des éprouvettes de traction.....	30
Figure 16	Allure des courbes de traction a-fragile b-ductile c-élastique non linéaire	30
Figure 17	Courbe de contrainte-déformation.....	31
Figure 18	Détermination de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% d'un alliage d'Aluminium.....	32
Figure 19	Eprouvette de traction selon la norme DIN 50 148.....	33
Figure 20	Diagramme de traitement thermique.....	35
Chapitre III		
Figure 21	Microstructure d'Al-Si12(Cu) Gx400.....	38
Figure 22	Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) EHAN 2 GX100.....	39
Figure 23	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) Gx40.....	39
Figure 24	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) EHAN 2 5Gx40.....	40
Figure 25	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) EHAN 3 Gx40.....	40
Figure 26	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) EHAN 4 Gx40.....	40
Figure 27	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) EHAN 1 GX100.....	41
Figure 28	Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu) ECHAN2 GX100.....	41
Figure 29	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN4 GX100.....	41
Figure 30	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 1 Gx200.....	42
Figure 31	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 2 Gx200.....	42
Figure 32	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 4 Gx200.....	42
Figure 33	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 2 Gx400.....	43
Figure 34	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 3 Gx400.....	43
Figure 35	Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 4 Gx400.....	43
Figure 36	L'alliage Al Si12(Cu) après trempe G40.....	44
Figure 37	L'alliage Al Si12(Cu) après trempe Gx100.....	44
Figure 38	L'alliage Al Si12(Cu) après trempe Gx200.....	44
Figure 39	L'alliage Al Si12(Cu) après trempe Gx400.....	44
Figure 40	L'alliage Al Si12(Cu) après trempe Gx200.....	45
Figure 41	Revenu à 100°C 3h Gx40.....	45
Figure 42	Revenu à 100°C 3h Gx100.....	46

Figure 43	Revenu à 100°C 3h Gx200.....	46
Figure 44	Revenu à 100°C 3h Gx200.....	46
Figure 45	Revenu à 100°C 3h Gx400.....	46
Figure 46	Revenu à 100°C 3h Gx200.....	47
Figure 47	Revenu à 200°C 3h Gx40.....	48
Figure 48	Revenu à 200°C 3h Gx100.....	48
Figure 49	Revenu à 200°C 3h Gx200.....	49
Figure 50	Revenu à 200°C 3h Gx400.....	49
Figure 51	Revenu à 150°C 3h Gx100.....	50
Figure 52	revenu à 150°C 3h Gx400.....	50
Figure 53	courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°02.....	51
Figure 54	courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n °03.....	51
Figure 55	courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°10.....	52
Figure 56	courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°11.....	52

Liste des tableaux

Chapitre I		
Tableau 1	Familles d'alliage d'aluminium (durcissement par écrouissage).....	10
Tableau 2	Familles d'alliage d'aluminium (durcissement structural)	10
Tableau 3	Qualité des alliages de fonderie.....	11
Tableau 4	Facteurs de la corrosion.....	15
Chapitre II		
Tableau 5	Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté.....	34
Chapitre III		
Tableau 6	Composition chimique de l'alliage AlSi12Cu(Fe).....	37
Tableau 7	Résultat de l'analyse chimique de l'alliage AlSi12Cu(Fe).....	37
Tableau 8	Résultats obtenus pour l'essai de dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe) avant traitement thermique.....	53
Tableau 9	Résultats obtenus pour l'essai de dureté d'AlSi12Cu1 (Fe) après traitement thermique.....	53
Tableau10	Résultats obtenus pour l'essai de micro dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe) sans traitement thermique.....	54
Tableau11	Résultats de l'essai de micro dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe).vieillessement naturel.....	55

Introduction générale

L'essor extraordinaire qu'a pris l'industrie de l'aluminium au cours du XXe siècle est lié à l'ensemble des caractéristiques positives de ce métal : malléabilité, légèreté, ductilité, résistance mécanique, résistance à la corrosion, conductibilité thermique et électrique etc.

L'aluminium et ses alliages ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches scientifiques, ils sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers. En effet l'aluminium et ces alliages trouvent leur utilisation dans divers secteurs d'activités telle que l'industrie aéronautique, automobile, le bâtiment, l'emballage.....

Les alliages Al-Si qui ont de bonnes propriétés de fonderie telle que la coulabilité ont l'avantage de pouvoir être utilisés dans tous les procédés de moulage connus. Compte tenu de leur température de fusion modérée et de leur bonne aptitude au moulage, c'est le choix le plus judicieux du couple alliage/procédé le mieux adapté, qui permet la réalisation des pièces moulées dans les meilleures conditions de qualité et rentabilité.

Ce travail a pour objectif la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'alliage d'aluminium de fonderie utilisé à l'électro-industrie.

Le mémoire comporte une partie bibliographique contient:

Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES

Puis le chapitre I: nous parlerons de l'aluminium et ses alliages, de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Les différents alliages de fonderie. Puis on traitera la corrosion d'aluminium et de ses alliages.

La deuxième partie est la partie expérimentale dans laquelle on détaillera les chapitres suivants :

Chapitre II : les méthodes expérimentales utilisées

Chapitre II : l'analyse des résultats, suivis de leur interprétation.

Et on va achever ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

Présentation de l'entreprise

Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE

L'entreprise a été créée sous sa la forme actuelle en janvier 1999, après la scission de l'entreprise mère ENEL (Entreprise National des industries Electrotechniques).

Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrication de moteurs électriques, alternateurs et transformateurs de distribution.

L'ELECTRO-INDUSTRIES est composée de deux (02) unités ; toutes situées sur un même site :

- Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT
- Unité de fabrication de Moteurs Electriques, Alternateurs et Prestation Techniques.

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES sont conformes aux recommandations de CEI (Commission électrotechnique internationale) et aux normes Allemandes DIN/VDE.

La production actuelle d'ELECTRO-INDUSTRIES est écoulee sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1,8 Milliards de Dinars.

La capacité de production de transformateurs d'ELECTRO-INDUSTRIES couvre les besoins du marché à 70% environ. Les ventes des moteurs représentent 30% environ de sa capacité de production. Il est à signaler que cette entreprise est le seule fabricant de ces produits en Algérie.

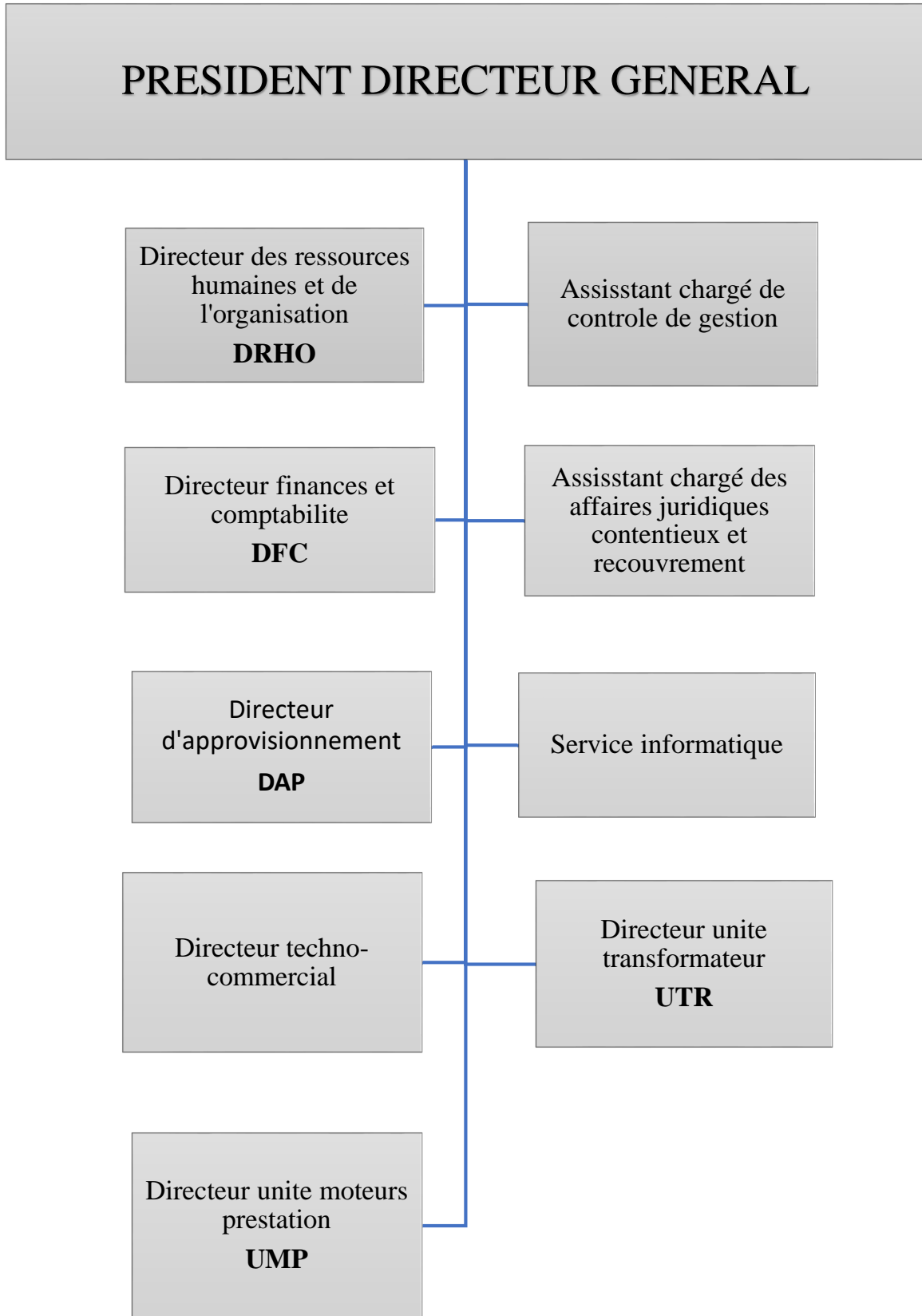
En matière de qualité ELECTRO-INDUSTRIES dispose de ses propres laboratoires d'essai et mesure, de ses produits ainsi pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication.

Les différentes valeurs d'essai et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôle.

Pour le système documentaire, l'entreprise utilise 252 normes internes en plus des normes DIN/VDE et CEI.

L'entreprise a procédé à la mise en place de son système qualité en 2002 et a été certifiée par QMI Canada (Organisme de certification qualité) le 24/07/2004, ISO 9001 version 2000.

Organigramme de l'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA AZAZGA



CHAPITRE I

Généralité sur l'aluminium

I. Généralité sur l'aluminium et ses alliages

I.1 Historique

L'aluminium prend naissance au XIX siècle, considéré comme métal semi précieux vu que le premier procédé d'obtention de l'aluminium est coûteux. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA). [1]

Depuis, l'aluminium a connu un développement très important et devenu aujourd'hui le principal métal non ferreux industriel.

I. 2 Fabrication de l'aluminium

Pour obtenir de l'aluminium, on part d'un minerai la bauxite dont on extrait par un procédé chimique un oxyde d'aluminium l'alumine.

I.2.1 Production de l'alumine

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine qui représente une matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. [1]

I.2.2 Production de l'aluminium

L'aluminium est obtenu par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite. [1]

I.3 Principales caractéristiques d'aluminium

I.3.1 Masse volumique

La masse volumique de l'aluminium est de **2700 kg/m³**. L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

I.3.2 Résistance à la fatigue

La courbe de WÖHLER ne présente pas de coude marqué et l'asymptote horizontale n'est atteinte que vers 108 cycles. En général, le coefficient d'endurance est de l'ordre de 0.5 pour les alliages non trempant, 0.25-0.35 pour les alliages trempant.



Figure1 : Courbe de Wöhler pour un alliage d'aluminium. [2]

I.3.3 Résistance à la corrosion

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale... milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être sévères. La tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

- le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface.
- les caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé : humidité, température, présence d'agents agressifs.
- les conditions de services prévues.
- Le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives.

- La durée de vie espérée, la fréquence d'entretien. Il n'y a pas de métal ou d'alliage universel du point de vue de sa tenue à la corrosion. Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion.

I.3.4 Mise en forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse ce qui permet une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'érouissage $n = 0.2$ à 0.3), facile à emboutir.

I.3.5 Soudage

Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine. Les procédés sont donc des procédés sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceaux d'électrons). Mais s'il n'y a pas de difficulté pour les alliages non trempant, par contre des problèmes peuvent exister pour les alliages trempant ayant une vitesse de trempe élevée (série 2000 ou Al-Cu).

I.3.6 Conductibilité électrique

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

I.3.7 La ténacité

La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures. Celle –ci est bonne pour l'aluminium et ses alliages.

I.3.8 Module d'élasticité

Le module d'élasticité de l'aluminium pur est égal à 66,6 GPa et augmente en présence d'impuretés et d'éléments d'addition. D'un point de vue commercial, il est admis pour 69GPa. Dans le cas d'alliages, ce module est compris entre 69 et 72 GPa. Il augmente sensiblement de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18%. Le module de torsion est de 25 GPa pour l'aluminium pur ; il est de 26 GPa pour l'aluminium commercial. [1]

Les Caractéristiques mécaniques de traction varient en fonction de :

- Conditions de transformation et de moulage
- Sensibilité à la trempe

I.3.9 Propriétés mécaniques

L'aluminium pur à 99,5%, possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. [1] :

$$R_{p0,2} = 10 - 20 \text{ MPa}$$

$$R_m = 70 - 80 \text{ MPa}$$

$$A\% = 50 - 60$$

$$E = 65000 - 70000 \text{ MPa} \text{ et } \nu = 0,36$$

I.3.10 Propriétés physiques d'aluminium

Les propriétés physiques de l'aluminium sont les suivantes :

Numéro atomique $z=13$, masse atomique $M= 26,97 \text{ g /mole}$

Point de fusion : $T=660^\circ\text{C}$.

Structure cristalline : CFC ($a= 0,404\text{nm}$ à 20°C).

Coefficient de dilatation :

$$\alpha=23,8.10^{-6}\text{K}^{-1}(\text{de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 100^\circ\text{C})$$

$$\alpha=25,4.10^{-6}\text{K}^{-1}(\text{de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 300^\circ\text{C})$$

$$\alpha=28,7.10^{-6}\text{K}^{-1}(\text{de } 20^\circ\text{C} \text{ à } 600^\circ\text{C})$$

La conductivité électrique de l'aluminium est égale à 65% de celle du cuivre.

La conductivité thermique à 20°C $\lambda=217,6\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La Résistivité électrique à 20°C est $2,63\mu\Omega.\text{cm}$.

Capacité thermique massique à 20°C : $c =950\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$. [2]

I.4 Influence des éléments d'addition

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles. Afin d'améliorer ces propriétés, on ajoute les éléments d'addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co etc. L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique.

Le Fer : forme avec l'aluminium une structure en aiguille qui diminue l'allongement. Au taux de 1% c'est un composant secondaire qui améliore les caractéristiques à chaud.

Le Magnésium : très oxydable, le magnésium donne des duretés élevées et baisse l'allongement.

Le Manganèse : rend l'alliage moins fragile pour des teneurs en fer inférieur à 0,55%. Son effet correctif est optimal pour les teneurs comprises entre 0,1 et 0,2 %.

Le Titane : permet d'obtenir une structure fine mais au-delà de 0,4% il forme un composé dur qui diminue l'usinabilité.

Le cuivre : diminue la résistance chimique.

Le zinc le plomb et la Nickel : diminuent les propriétés mécaniques au-dessus des tolérances.

Le cobalt et le manganèse : combat l'action néfaste du fer.

Le silicium : donne une bonne coulabilité pour l'alliage de fonderie sa teneur est de 10.5 à 13.5%. Ces avantages sont :

- Il améliore nettement la coulabilité ;
- Il diminue la criquabilité et la retassure ;
- Il abaisse le coefficient de dilatation ;

D'une manière générale les alliages aluminium-silicium présentent les meilleures propriétés de fonderie parmi les différents alliages d'aluminium.

Ces inconvénients sont :

- La faible solubilité du silicium dans l'aluminium et le phénomène de précipitation font que le silicium de l'eutectique forme des cristaux polyédriques importants qui rendent l'alliage fragile et difficilement usinable.

Pour cette raison, tous les alliages ayant une teneur en silicium supérieur à 15% doivent subir un traitement de modification.

I.5 L'aluminium et ses alliages

Bien que la plupart des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'aluminium des solutions solides, les alliages d'aluminium sont en fait basés sur quelques systèmes seulement :

- Aluminium-Cuivre ;
- Aluminium-Manganèse ;
- Aluminium-Magnésium ;
- Aluminium-Silicium ;
- Aluminium-Zinc.

Suivant le mode de transformation des alliages, on distingue :

I.5.1 Alliages corroyés

En métallurgie, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts par la gamme de fabrication que par certaines propriétés. On cite : les alliages à durcissement structural et les alliages sans durcissement structural.

a- Alliage durcissement par écrouissage

L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique de la dureté et par perte de ductilité.

b- Alliage durcissement structural :

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Durcissement par écrouissage

Tableau 1: Familles d'alliage d'aluminium (durcissement par écrouissage) [4]

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5-1,5	Manganèse- Cuivre
5000	Magnésium	0,5- 5	Magnésium- Chrome
8000	Fer et Silicium	Si : 0.3-1 Fe : 0,6-2	Nickel

Durcissement structural

Tableau 2: Familles d'alliage d'aluminium (durcissement structural) [4]

Famille	Éléments d'alliages	% en masse	Additions possibles
6000	Magnésium et Silicium	Mg : 0,5- 1,5 Si : 0,5- 1,5	Silicium- magnésium- manganèse
2000	Cuivre	2- 6	
7000	Zinc- Magnésium	Zn : 5- 7 Mg : 1- 2	Cuivre

I.5.2 Alliages de fonderie

On distingue les alliages de première fusion, élaborés à partir de l'aluminium primaire issu de l'électrolyse et de seconde fusion (appelé aussi alliages d'affinage). Ils sont élaborés par refusions des déchets récupérés. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces d'automobile.

➤ Qualités recherchées

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie (Tableau 3).

Tableau3: Qualité des alliages de fonderie [5]

Observation	Qualité
Aptitude du métal liquide a bien remplir l’empreinte	Coulabilité
Fissuration à chaud causée par le retrait du métal	Absence de formation de criques
Due au retrait qui accompagne la solidification	Bonne répartition de la porosité
Permettent d’employer des moules métalliques réutilisables dans lesquels on coule le métal soit par gravite soit par pression	Température de fusion relativement basse

➤ **Alliages de fonderie Al-Si**

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

Il existe plusieurs procédés de moulage. Le choix de l’un d’eux et souvent dicté par trois facteurs suivant :

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

Les alliages de moulage qui régissent notre étude sont de la famille Aluminium-silicium (AlSi12) série 4000 et qui sont très loin les plus utilisés. Ils présentent une composition eutectique.

Ils se coulent aussi bien dans des moules en sable que dans des coquilles par gravite ou sous pression. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent de leur composition chimique, du mode d’élaboration et de coulée ainsi que des traitements thermiques ou mécaniques. [2]

➤ **Diagramme d’équilibre Al-Si :**

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

- Le pourcentage maximum de silicium soluble dans l’aluminium à l’état solide est de 1.65% à la température $T_e=577^\circ\text{C}$ donne par le pont A.
- Le pourcentage maximum de l’aluminium soluble dans le silicium à l’état solide est de 97% à la température $T_e= 577^\circ\text{C}$, représenté par le point F.

- Deux solutions solides α et β respectivement riche en aluminium et en silicium.
- La droite AB : le solvus.
- **Le liquidus** : constitués de deux courbes CE et ED avec un point eutectique E défini par une température de 577°C .
- **Le solidus** : constitue de trois droites CA, AEF droite horizontale représentant l'eutectique et FD.
- $0\% < \text{Si} < 1.65\%$ solution solide α riche en aluminium.
- $1.65\% \leq \text{Si} \leq 10.5\%$ alliages de composition hypo-eutectique.
- $11\% \leq \text{Si} \leq 13.5\%$ alliages de composition eutectique.
- $14\% \leq \text{Si} \leq 97\%$ alliages de composition hyper-eutectique.

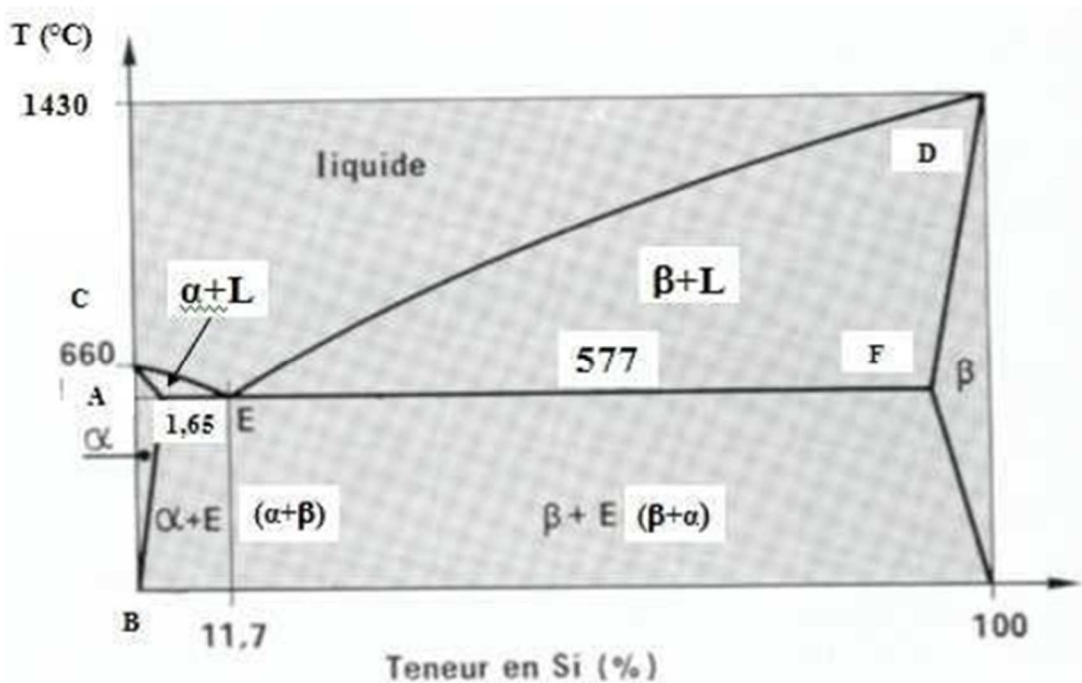


Figure2: diagramme d'équilibre Al-Si.[3]

II. corrosion d'aluminium et ses alliages

II.1 généralité

La corrosion est un phénomène connu depuis la découverte des métaux. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (liquides ou gazeux). Donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif (liquide ou gazeux). Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne. La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux y compris l'aluminium et ses alliages.

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche). - Corrosion électrochimique (humide). - Corrosion biochimique (bactérienne) - Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

II.1.1 Corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse.



Où X est un produit de corrosion le plus souvent solide.

Le gaz considéré est souvent l'oxygène mais il faut aussi tenir compte d'autres gaz tels que: SO₂, Cl₂, Br₂ ou H₂S.

En présence d'un environnement sec contenant de l'oxygène et essentiellement à haute température, le métal, instable, tend à revenir sous sa forme oxydée stable. [7]

II.1.2 Corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobiques qui se développent dans les eaux contenant des sulfates. Elles consomment donc ces sulfates et les rejettent sous la forme réduite de sulfure, H₂S. La pollution locale du milieu

corrosif en H₂S et son effet connu sur la corrosion, suffisent à expliquer les dommages provoqués par les bactéries. [5]

II.1.3 Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est essentiellement l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes. Elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique). Elle nécessite la présence d'un réducteur ; H₂O, H₂... Sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut se produire. [5]

II.1.4 Potentiel de corrosion libre

Est le potentiel que prend un métal ou un alliage métallique donné par rapport un électrolyte donné. Il est dépendant des conditions expérimentales et peut être mesurée par rapport à une électrode de référence. [6]

II.1.5 Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre (04) groupes principaux, tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaques ;
- Facteurs métallurgiques ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi ;
- Facteurs dépendant du temps ;

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau 4 : Facteurs de la corrosion [7]

Facteurs définissant les modes d'attaque	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Additions d'inhibiteurs -Température -Pression	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration -Impureté -Traitements thermiques -Traitements mécaniques -Additions Protectrices	-Etat de surface -Forme des pièces -Sollicitations mécaniques -Emploi d'inhibiteurs -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Température -Modification des revêtements protecteurs

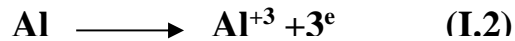
II.2 Corrosion de l'aluminium et ses alliages

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium sont sujets au phénomène de corrosion par piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue corrosion, voire de la corrosion généralisée. Au contact de l'atmosphère, l'aluminium résiste très bien aux atmosphères rurales et marines et correctement à l'atmosphère industrielle, dans des proportions dépendant du ou des polluants. L'aluminium est protégé par le zinc et le magnésium mais il est corrodé par le plomb, l'étain, l'acier, les métaux cuivreux et précieux, le graphite. Dans ces derniers cas, il y a lieu de prévoir des protections spécifiques afin d'éviter le phénomène corrosion galvanique.

L'aluminium est connu comme étant un métal résistant à la corrosion. Cependant, il peut arriver par fois que l'aluminium se corrode. Il existe des conditions qui rendent possible l'apparition de corrosion sur les pièces en aluminium. Il est alors primordial de connaître les types de corrosion et leurs mécanismes de propagation afin de prévenir les dommages dus à la corrosion.

II.2.1 Les réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium

Les réactions fondamentales électrochimiques de la corrosion de l'aluminium en milieu aqueux ont fait l'objet de plusieurs études. L'oxydation de l'Aluminium dans l'eau a lieu suivant la réaction :



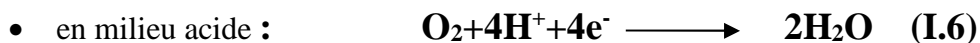
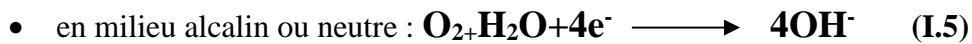
Tandis que sur les sites cathodiques deux réactions sont possibles. En effet dans les milieux aqueux habituels dont le pH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère), il s'agit d'une part de la réaction d'échange de proton selon [7] :



Où les ions H^+ proviennent de la dissociation de l'eau selon l'équilibre :

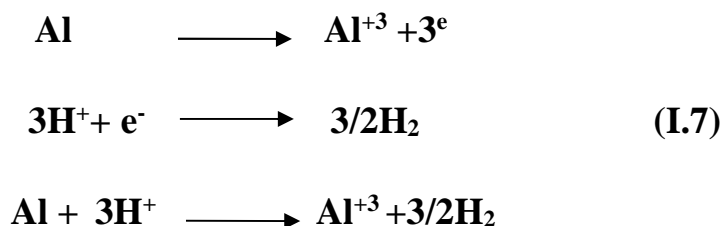


Et la réaction réduction du dioxygène dissous d'autre part:



A 20°C, sous pression atmosphérique, la solubilité d' O_2 dans l'eau est de 43,4 mg/Kg, elle diminue avec l'augmentation de la température (elle n'est plus que de 30.8 mg/Kg à 40°C et 13,8 mg/Kg à 80°C) [8].

Globalement, la corrosion de l'aluminium en milieu aqueux est la somme de deux réactions électrochimiques d'oxydation et de réduction :



Ou bien :



La corrosion de l'aluminium se traduit par la formation de l'hydroxyde Al(OH)_3 , qui est insoluble dans l'eau et précipite sous forme d'un gèle blanc qu'on observe sur les piqures sous forme de flocons gélatineux blancs. Pour 27g d'aluminium corrodé, le volume d'hydrogène dégagé est de 33.6 litres [7].

II.2.2 Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages

La mesure du potentiel de l'aluminium est faite sur une surface toujours recouverte d'un film d'oxyde naturel Al_2O_3 . Elle est partagée très inégalement en trois types : les pores (0.5%) de la surface totale, qui sont anodiques, le film barrière qui est cathodique, et les zones de film plus épais qui sont neutre. Tous les paramètres qui modifient les propriétés de la couche d'oxyde modifient plus ou moins le potentiel de dissolution de l'aluminium. Les résultats de mesures dépendent des conditions expérimentales : nature de la solution, nature de l'alliage, état de surface du métal.

II.2.3 Formes de corrosion de l'aluminium

La corrosion d'aluminium peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu : corrosion généralisé ou uniforme, corrosion par piqures, corrosion sous contrainte..., la prédominance d'une forme de corrosion dépendra d'un certain nombre de facteurs inhérents au métal, au milieu et aux conditions d'emploi. Il y'a pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages

A. Corrosion généralisée (uniforme)

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement). [8]

B. Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûre se développe dans tous les milieux naturels, sous forme de la corrosion électrochimique. La corrosion électrochimique est la combinaison d'une action chimique et d'une action électrique. Elle se déclare dans les liquides conducteurs d'électricité, tels que l'eau douce, l'eau de mer, l'air humide, les bases, les acides etc....

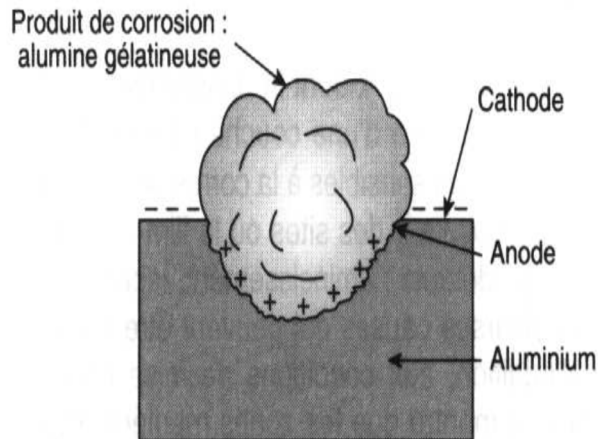


Figure 3 : Corrosion par piqûre

C. Corrosion galvanique

Lorsque deux métaux différents sont en contact électrique dans un milieu corrosif, ils forment une pile qui produit du courant en consommant le métal le plus électro-négatif qui constitue l'anode. L'aluminium est anodique par rapport à la plupart des métaux (à l'exception du zinc et du magnésium). L'aluminium sera donc souvent la victime des assemblages mixtes en contact avec de l'eau ou un liquide qui constituera l'électrolyte de la pile. En fait, la vitesse d'attaque de l'aluminium dépend [7] :

- de la différence de potentiel entre les deux métaux en présence ;
- de la résistance électrique entre les deux métaux ;
- du rapport des surfaces cathode et anode ;
- du milieu corrosif et plus particulièrement de sa conductivité : l'eau de mer, de très faible résistivité (quelques ohms / cm²) est particulièrement agressive à cet égard.

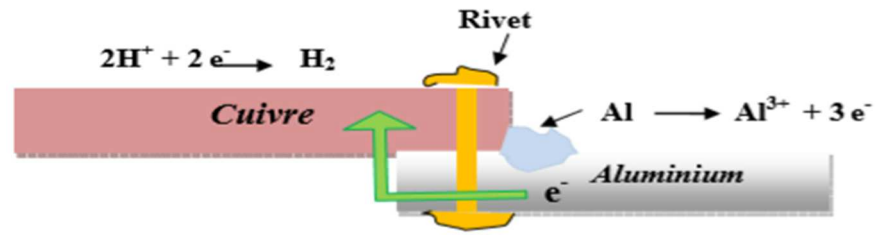


Figure 4 : corrosion galvanique

II.2.4 protection de l'Aluminium et ses alliages

Pour remédier à l'attaque que subit l'aluminium ou ses alliages, on a recours à plusieurs procédés visant cet effet comme :

- Anodisation,
- Revêtements,
- Prévention par études des formes adaptées des pièces,
- Prévention par affinage lors du choix du matériau.
- Protection anodique ;
- Protection cathodique. [2]

Chapitre II

Procédures expérimentales

I. Appareillage

Les différents dispositifs utilisés dans ce travail sont :

I.1 Polisseuses

Il s'agit de deux polisseuses, du laboratoire SDM du département génie mécanique.

Une à deux disques de types « Struers » alimentée sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W munie d'un dispositif d'arrosage, la deuxième à un seul disque (polisseuse de finition) de même type, alimentée sous la même tension mais de puissance de 432W.



Figure 5 : polisseuses

I.2 Duromètre

C'est un duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC, constitué de deux parties, la première est la partie d'essai, elle nous permet d'effectuer les trois types d'essai : Rockwell, Vickers et Brinell. Il est muni d'un sélectionneur de charges et d'un plateau ou table sur laquelle les éprouvettes sont posées. La seconde partie, nous permet de mesurer l'empreinte des billes et des pyramides à un grossissement de 70 ou 140 fois sur l'écran de verre dépoli, ce duromètre est alimenté sous une tension de 220V et d'une fréquence de 50Hz.



Figure 6 : duromètre WOLPERT DIA

I.3 Micro-duromètre

C'est un duromètre de type CHIMADZU, il est utilisé dans le laboratoire métallurgie de L'UNIEM, il nous permet d'effectuer des essais de dureté dans des zones bien précise. L'échantillon est posé sur un plateau et est observé au microscope optique dont le grossissement atteint les 400fois, une fois la zone est détectée, on appui sur le touche S (Start) la lentille se déplace, cédant la place au pénétrateur de type Vickers ou Cnoop. En sélectionnant la charge appliquée sur un écran numérique, le diamètre de l'empreinte, nous obtenons la valeur de la dureté. Ce micro-duromètre est alimenté sous une tension de 220V et d'une fréquence de 50Hz.



Figure 7: micro-duromètre SHIMADZU

I.4 Microscope optique

Pour pouvoir observer la microstructure des alliages étudiés après leur polissage et attaque chimique, nous avons utilisé un microscope optique universel de type ZEISS alimenté sous une tension de 220V, avec une fréquence de 50Hz et une puissance de 100W, muni d'une caméra liée à un ordinateur ce qui nous permet d'obtenir un pouvoir de résolution allant de 50 à 500 fois. Il est utilisé dans le laboratoire SDM de département Génie Mécanique.



Figure 8: microscope

I.5 Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type « **CHENK-TREBEL** », alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge maximale de 100KN. Elle est utilisée dans le laboratoire central physique chimique à l'électro-industrie.



Figure 9: machine de traction « **CHENK-TREBEL** »

I.6 Spectromètre d'absorption atomique flamme

Il sert à déterminer la composition chimique des matériaux et alliages, à l'aide d'une flamme alimentée d'un mélange de gaz (air et acétylène). Il se trouve dans le laboratoire central physique- chimique de l'électro- industries.

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose de :

- source,
- lampe à cathode creuse,
- brûleur
- nébuliseur,
- d'un monochromateur
- détecteur relié à un amplificateur
- dispositif d'acquisition.



Figure 10 : spectromètre d'absorption atomique flamme

I.7 Le four de trempe

Il permet de procéder à la trempe. Alimenté sous une tension de 380V, à résistance électrique, a une puissance de 7 KW et peut aller jusqu'à 700°C. Son isolation est assurée par la laine d'alumine. Il est utilisé da le laboratoire SDM de département Génie Mécanique.



Figure 11 : four à trempe

I.8 Four de revenu

Four à résistance électrique, dont la puissance est de 11 KW et peut aller jusqu'à 1200°C. Il est équipé d'un thermocouple et d'une turbine pour convection forcée. Son isolation est



Figure 12 : four de revenu

réalisée par la laine d'alumine pour le rendre plus léger. Il est utilisé da le laboratoire SDM de département Génie Mécanique.

I.9 Four à moufle

Est un appareil de laboratoire visant à réaliser les opérations de calcination. Sa température maximum est de 1100 °C ou 1200 °C. Le Chauffage est effectué par les deux côtés GRACE à des plaques chauffantes en céramique, son Isolation est en matière fibreuse classée non cancérigène. Il se trouve dans le laboratoire central physique- chimique de l'électro- industries.



Figure 13 : four à moufle

II. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été découpé à l'aide de la robot-fil directement à partir des couvercles de boîte à bornes, de forme carré $l= 30\text{mm}$. Ensuite polis mécaniquement afin de rendre la face de l'échantillon plane et brillante, (jusqu'à obtention de l'effet miroir), de façon à obtenir le minimum de rayure susceptible de gêner l'examen métallographique.

II.1 Polissage des échantillons

Les échantillons ont subi un polissage mécanique en utilisant des papiers EMRI de granulométrie décroissante 600, 800, 1000, 1200, 2000 et 4000; placés sur un disque rotatif de polisseuses avec arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement. Et la finition a été effectuée en utilisant le feutre imbibé d'une suspension abrasif l'alumine. Afin d'éliminer les rayures produites par le papier abrasif on a effectué une rotation de 90° à chaque fois qu'on change de papier abrasif.

II.2 Attaque chimique

Pour révéler sa structure nous avons utilisé le réactif de KELLER dont la composition volumétrique est comme suit : Pour 100ml :

- 47% acide nitrique (HNO_3),
- 50% acide chlorhydrique (HCl),
- 3% d'acide fluorhydrique (HF).

L'attaque a été chronométrés, elle est de l'ordre de 10 secondes, puis les échantillons ont été lavés sous un jet d'eau et séchés à l'aide d'un séchoir.

II.3 Microscope optique

Les surfaces préparées selon le procédé décrit précédemment sont ensuite observés au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer l'état de la microstructure des différents échantillons. Le microscope est relié à un ordinateur, ce qui nous a permis de prendre des photos dans différentes échelles.

III. L'analyse chimique

Nous avons préalablement la composition chimique des deux alliages mais nous avons choisi de la vérifier, pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser l'analyse chimique par absorption atomique, et la méthode dosage du silicium.

III.1 Définition de la spectrométrie d'absorption atomique

La spectrométrie d'absorption atomique (AAS) est une technique décrite pour la 1ère fois par Walsh (1955). AAS étudie les absorptions de lumière par l'atome libre. C'est une des principales techniques mettant en jeu la spectroscopie atomique dans le domaine UV-visible

utilisée en analyse chimique. Elle permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques (métaux et non-métaux). Les applications sont nombreuses étant donné qu'on atteint couramment des concentrations inférieures au mg/L (ppm).

➤ Principe

L'absorption atomique de flamme est une méthode qui permet de doser essentiellement les métaux en solution. Cette méthode d'analyse élémentaire impose que la mesure soit faite à partir d'un analyte (élément à doser) transformé à l'état d'atomes libres. L'échantillon est porté à une température de 2000 à 3000 degrés pour que les combinaisons chimiques dans lesquelles les éléments sont engagés soient détruites. La spectrométrie d'absorption atomique est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie de l'atome. Celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre : $\Delta E = h\nu$ où h est la constante de Planck et ν est la fréquence du photon absorbé. [9]

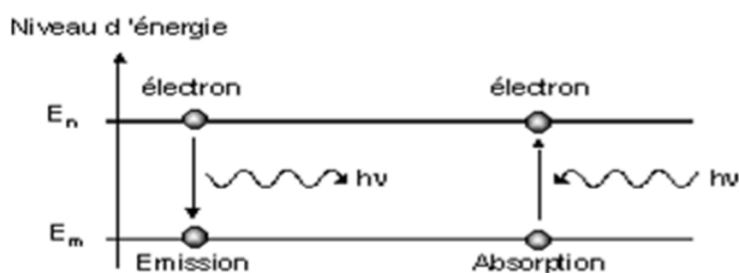


Figure 14: Illustration des processus d'émission et d'absorption [9]

Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant selon la loi de distribution de Boltzmann, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments à doser.

L'analyse par absorption atomique utilise la loi de Beer- Lambert. S'il y a plusieurs éléments à doser, on réalise cette manipulation pour chaque élément de l'échantillon en se plaçant à une longueur d'onde fixée. Il faut donc à chaque manipulation choisir une source adaptée pour éclairer l'élément que l'on cherche à exciter.

III.2 dosage du silicium

Cette méthode est valable pour le dosage du silicium en toutes teneurs dans les alliages d'aluminium.

➤ Principe

- Libération du silicium libre par dissolution acide et insolubilisation de la silice en milieu perchlorique.
- Filtration, calcination et pesée de la somme $\text{SiO}_2 + \text{Si}$.
Volatilisation de la silice par l'acide fluorhydrique, calcination et pesée du résidu constitué par Si.

➤ Le calcul

On prend Un échantillon de Al-Si prise d'essai=1.0003g, le mettre dans un creuset (son poids vide P=30.2691g) le tout dans le four à 800°C jusqu'à calcination. On a pesé

P1=30.3972g (P du creuset + poids échantillon)

Puis P1+HF à 800°C on obtient P2=30.3760g

Formule de calcul :

$P1 - P2 = \text{SiO}_2$ sachant que $\text{SiO}_2 \times 0.47 = \text{Si}$

$P2 - P = \text{Si}$

Donc A.N

$P1 - P2 = \text{SiO}_2 = 0.0212 \text{ g} \longrightarrow 0.0212 \times 0.47 = 0.9964 = \text{Si}$

$P2 - P = 0.1069$ (B)

$P1 - P2 = 0.9964$ (A)

$$\%Si = \frac{A + B}{\text{prise d'essai}} \times 100$$

$$\%Si = \frac{0.1069 + 0.9964}{1.0003} \times 100 = 11.68\%$$

IV. Etude de propriétés mécaniques de l'alliage

L'ingénieur mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Elles sont tout d'abord indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme.

Par essais mécaniques, on entend les différents essais tels que la résistance, la ténacité, la dureté, la traction, la résilience...

IV.1 Essai de traction

Il s'agit de l'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux ; limite d'élasticité, charge à la rupture, allongement à la rupture. Il consiste à réaliser dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uniaxial de traction et à enregistrer les caractéristiques mécaniques.

La déformation est mesurée au moyen d'un extensomètre attaché à l'éprouvette, les résultats de cet essai est la contrainte nominale : $\sigma = \frac{F}{S_0}$ en fonction de la déformation nominale $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ ce qui est résumé dans une courbe de traction. [4]

➤ Eprouvettes

Les éprouvettes pour les quelle la longueur initiale entre repères est reliée à l'aire de la section initiale selon la relation $L_0 = k\sqrt{S_0}$ sont dites proportionnelles ($k=5,65$ avec $L_0 \geq 20$ mm) si l'aire de la section droite est trop faible pour répondre à la condition $L_0 \geq 20$ mm on peut utiliser une valeur de k supérieure ($k=11,3$ de préférence). Dans le cas d'éprouvettes non proportionnelles, la longueur initiale entre repères L_0 est prise indépendamment de la valeur de S_0 nous prenons la norme NF EN 10002 pour illustrer des dimensions d'éprouvettes à section circulaire et à section rectangulaire [2]

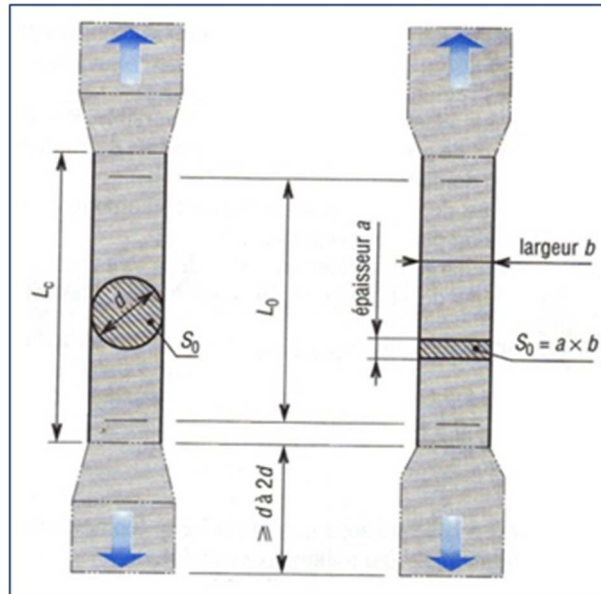


Figure 15: géométrie des éprouvettes de traction [3]

La figure qui suit représente trois types de courbes qui correspondent à trois comportements possibles des matériaux : fragile, ductile et élastique non linéaire :

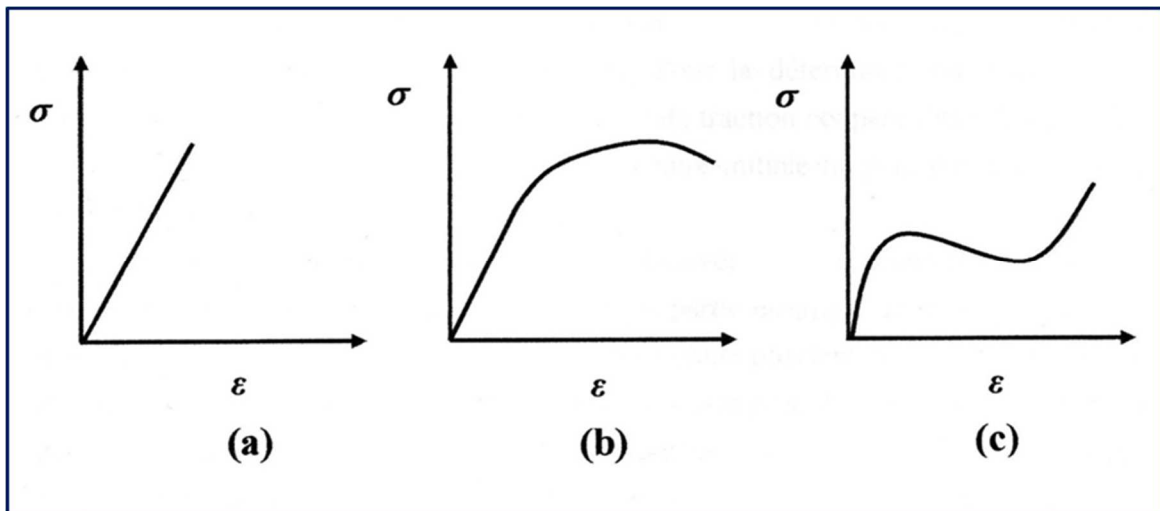


Figure 16: allure des courbes de traction a-fragile b-ductile c-élastique non linéaire [4]

Interprétation de la courbe de traction

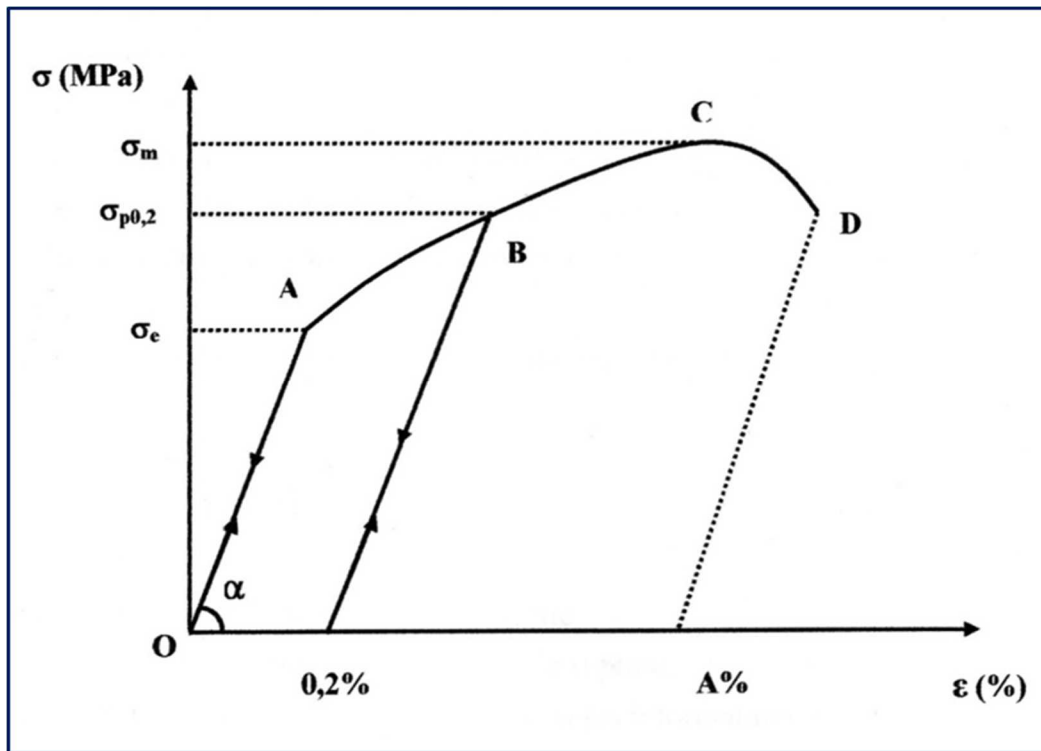


Figure 17: courbe de contrainte-déformation [3]

Partie OA: allongement linéaire, réversible, l'allongement est proportionnel à la charge ;

Au-delà de A: déformation plastique permanente plus déformation élastique ;

Partie AC: allongement élastique en plus de l'allongement plastique réparti ;

Partie CD: apparition et progression d'une striction (diminution de la section localisée).

Dans les matériaux ductiles le coefficient de striction est donné par la relation suivante :

$$Z = \frac{S_o \times S_f}{S_o} \times 100$$

Avec :

S_0 : Section initiale de l'éprouvette.

S_f : Section finale de la surface à la rupture.

On peut tirer aussi de la courbe de traction les informations suivantes :

Le module de Young E:

La pente de la partie linéaire de la courbe de traction correspond au module de Young E avec

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

➤ Limite d'élasticité

L'exploitation de la courbe de traction nous permet de distinguer entre la limite d'élasticité vraie R_e (ou limite de proportionnalité) et la limite d'élasticité conventionnelle $R_{e0,2}$.

La limite d'élasticité vraie R_e correspond à la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est où apparaît la première déformation plastique irréversible. La limite d'élasticité devrait donc comprendre sur la courbe, la contrainte à partir de laquelle il n'y a plus de proportionnalité entre contrainte et déformation. En pratique, même si sa définition est simple, une telle limite de proportionnalité est très difficile à apprécier, car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive ; la limite de proportionnalité dépend donc de la précision que l'on a sur la mesure de l'allongement. On lève toute ambiguïté en définissant une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2%, notée $R_{e0,2}$.

$R_{e0,2}$ est la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à 0,2%, la construction graphique permettant la mesure de $R_{e0,2}$ apparaît sur la figure suivante :-à-dire au moment.

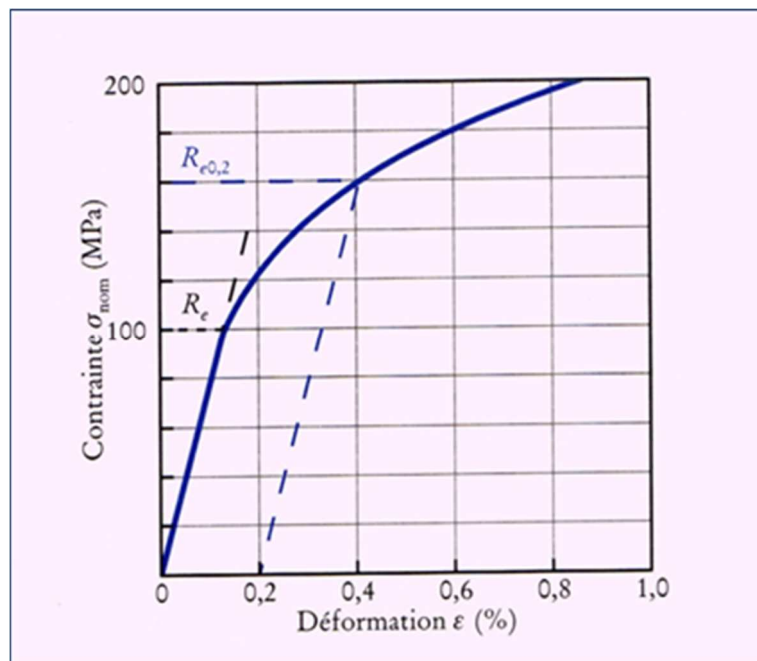


Figure 18: détermination de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% d'un alliage d'Aluminium [4]

➤ **Résistance à la traction**

Elle est calculée comme le rapport de l'effort maximal de traction F_m à la section initiale S_0 de l'éprouvette.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

➤ **Allongement après rupture**

L'allongement après rupture représente la différence de longueur L de l'éprouvette reconstituée après rupture et la longueur initiale L_0 rapportée à la longueur initiale.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

➤ **Préparation des éprouvettes de l'essai de traction**

Les éprouvettes ont été sollicitées par un effort de traction continu et croissant jusqu'à la rupture. Suite aux difficultés rencontrées durant la réalisation des éprouvettes, dues en particulier à la présence excessive de porosités, nous n'avons pas pu réaliser un grand nombre. Les éprouvettes ont été prélevées directement à partir des couvercles de boîte à bornes, nous avons d'abord fraisé la surface à l'aide d'une fraiseuse universelle :

Nous les avons ensuite découpée à l'aide de la robot-fil. La forme des éprouvettes utilisées lors de l'essai de traction (selon la norme DIN 50 148) est représentée dans la figure suivante :

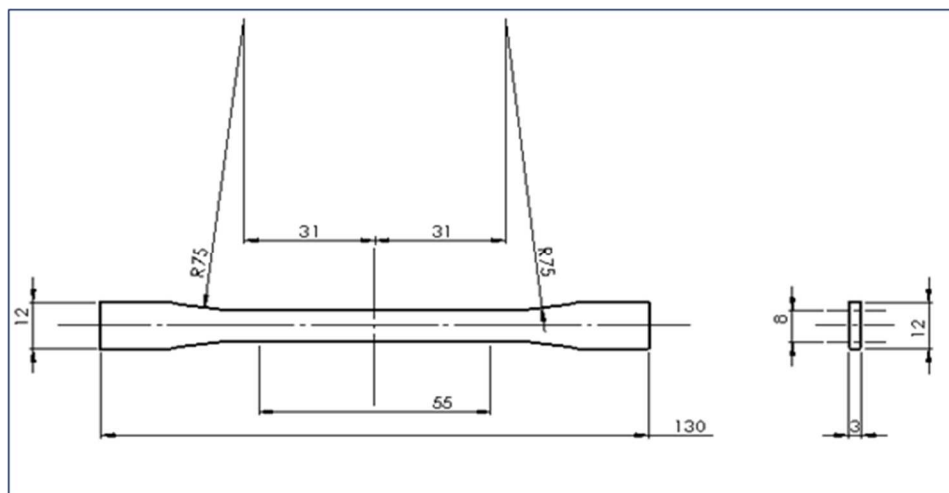


Figure 19 : éprouvette de traction selon la norme DIN 50 148

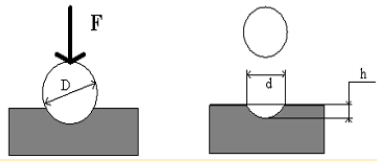
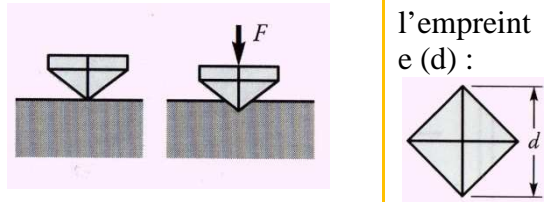
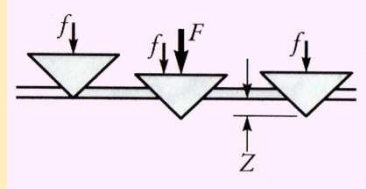
IV.2 Essai de dureté

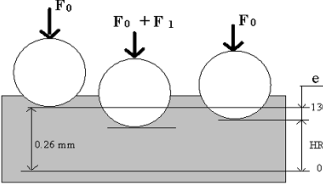
La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière met en jeu une série de facteurs dont les principaux sont : les déformations élastiques et plastiques, le frottement entre le pénétrateur et le matériau, la géométrie du pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui est appliquée. Le tableau 2 résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de dureté utilisées : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et Rockwell B (HRC et HRB)

Pour cet essai nous avons choisi l'essai Brinell (selon la norme DIN 50 351) ayant pour paramètres d'essai :

Le pénétrateur à bille de 2,5mm de diamètre, la charge d'essai étant de 60 Kgf, le temps de maintien est de 30 secondes, le temps de l'application de la charge est de 10 secondes. Les échantillons utilisés pour cet essai ont été pris de forme prismatique d'épaisseurs 3 à 4mm.

Tableau 5 : caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté [4] [2]

Méthodes d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètres mesurés	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure ($\leq 10mm$ de diamètre)	250 à 3000K gf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramides de diamant à base carrée ; angle entre les faces opposées 136°	5 à 100 Kgf		Diagonale de l'empreinte (d) :	$HV = \frac{1,854F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant au sommet de diamètre 120°	Pré charge f de 10Kgf ; F=150 Kgf		Profondeur de l'empreinte Z	$HRC = f(Z)$

Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59mm de diamètre)	Pré charge f de 10Kgf ; $F=100$ Kgf		Profondeur de l'empreinte e	$HRB = f(e)$
-------------------	----------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	--------------

IV.3 Essai de micro-dureté

Pour cet essai, nous avons choisi le pénétrateur de type Vickers ayant pour paramètres d'essai:

Un pénétrateur de forme pyramidale en diamant, la charge étant de 50g (HV 0,05 sur l'appareil), le temps de l'application de la charge est de 20 secondes.

IV.4 Les traitements thermiques

Ces traitements, destinés aux alliages Al-Si contenant de magnésium ou de cuivre, consiste essentiellement en la mise en solution à une température avoisinant à les 500°C pendant des durée 08h à 10h, et le revenu a des températures comprise entre 150°C et 220°C. [1]

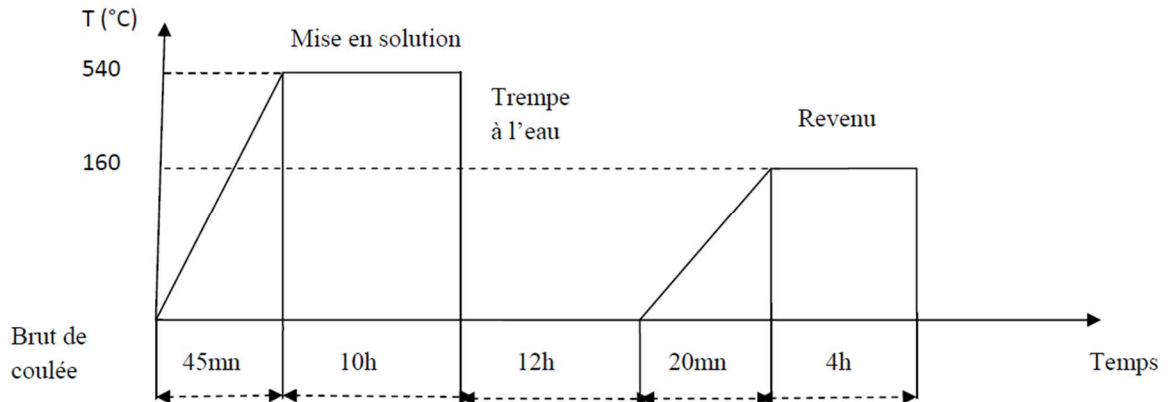


Figure 20 : Diagramme de traitement thermique

A. Mise en solution

Nous chauffons et maintenons ensuite les pièces à une température adaptée à l'alliage pendant une période déterminée pour mettre en solution les différents éléments soluble de façon homogène.

B. Trempe

Nous réalisons un refroidissement rapide des pièces par immersion dans une cuve d'eau thermorégulée. Cette étape est critique: en conséquence, nous maîtrisons le temps de la plongée et aussi la température de l'eau de trempe afin de maintenir la solution solide en sursaturation. En complément, nous enregistrons les paramètres pour réaliser la traçabilité de vos produits.

C. Vieillissement naturel (maturation) ou artificiel (revenu)

Juste après la trempe (état de trempe fraîche), l'alliage est dans un état très malléable pendant une courte durée. Au cours de cette période, nous procédons alors à des opérations de remise en conformité géométrique (redressage) de la pièce. Le durcissement structural (formation de précipités) intervient ensuite. Soit à température ambiante pendant une longue période (c'est à dire plusieurs jours), nous réalisons ainsi un vieillissement naturel.

Soit dans un four à température et temps contrôlés, nous procédons alors à un vieillissement artificiel, celui-ci ne dure donc que quelques heures.

Pour ce travail on a chauffé les échantillons jusqu'à la température 550°C, suivis d'un maintien de 3h puis refroidissement à l'eau.

Après on a effectué un revenu :

1^{er} échantillon : à 200°C pendant 3h

2^{eme} échantillon : à 150°C pendant 3h

3^{eme} échantillon : à 100°C pendant 3h.

4^{eme} échantillon : maturation

Chapitre III

Résultats et interprétations

Introduction

Les alliages d'aluminium de la famille Al-Si, en plus des 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 moules à géométries complexes. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter l'alliage que nous avons étudié et sa composition chimique.

I. Alliage étudié

Alliage AlSi12Cu1(Fe) est alliage un eutectique, donc aux propriétés de fonderie excellentes, aux caractéristiques mécaniques élevées, utilise principalement pour la coulée sous pression des pièces minces diverses. Cet alliage est celui utilise habituellement par l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES avec des additions de Cuivre, Nickel et Magnésium. La composition chimique donnée par le fournisseur est la suivante :

Tableau 6: Composition chimique de l'alliage AlSi12Cu1(Fe)

Désignation	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	autre	Aluminium
EN AC-Al Si12Cu1 (Fe)	10.5 à 13.5	0.6 à 1.1	0.7 à 1.2	0.55	0.35	0.10	0.30	0.55	0.20	0.10	0.15 à 0.20	0.25	Reste

II. Résultat de l'analyse chimique

Une analyse par absorption atomique a ensuite été faite, mais pour seulement les éléments à faible teneurs. Pour le Silicium, on a utilisé la méthode du dosage du Silicium.

Tableau 7 : Résultat de l'analyse chimique de l'alliage AlSi12Cu1(Fe)

Désignation	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb
EN AC-Al Si12Cu1 (Fe)	11.68	1.329	1.06	0.201	0.237	0.10	0.30

L'analyse chimique faite par l'absorption atomique, nous révèle que le taux de Fer et de Cuivre dépasse le taux de ces derniers donné par le fournisseur (Tableau 5).

Comme cela a été vu précédemment, chacun de ces éléments avec des taux bien définis, apporte une caractéristique spécifique à l'alliage. Mais, leur excès entraîne une diminution des caractéristiques mécaniques de cet alliage.

III. Métallographie des alliages étudiés

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques, car toute étude passe par l'analyse des constituants micrographique qui donne aux matériaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de vie d'un matériau sont concernées : mise au point, utilisation, détérioration...

Grâce aux différents microscopes et caméras vidéo, c'est rendu possible de visualiser avec une grande précision tous les types de surfaces avec plusieurs grossissements. Et, avec une bonne connaissance de la physique des solides et des diagrammes de phases des matériaux, une analyse logique et cohérente peut être menée, et de nombreux paramètres tels que la vitesse de refroidissement, la grosseur des grains, l'homogénéité, la présence d'impuretés... peuvent être visualisés.

III.1 Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) avant Traitement Thermique

Les figures ci-dessous montrent la microstructure typique des Al-Si, qui présentent une solidification de type dendritique. En fait le Silicium se solidifie en premier sous forme de dendrites et emprisonne le liquide riche en Aluminium entre les bras de ces dendrites.

Nous avons pu distinguer une solution solide (α -Al) avec des gros grains dendrites et une zone sombre formée de fines lamelles est le composé eutectique.

Par ailleurs, d'autres constituants sont visibles sur les microstructures comme les particules intermétalliques, les oxydes et la porosité. Et ceux -ci fragilisent le matériau.

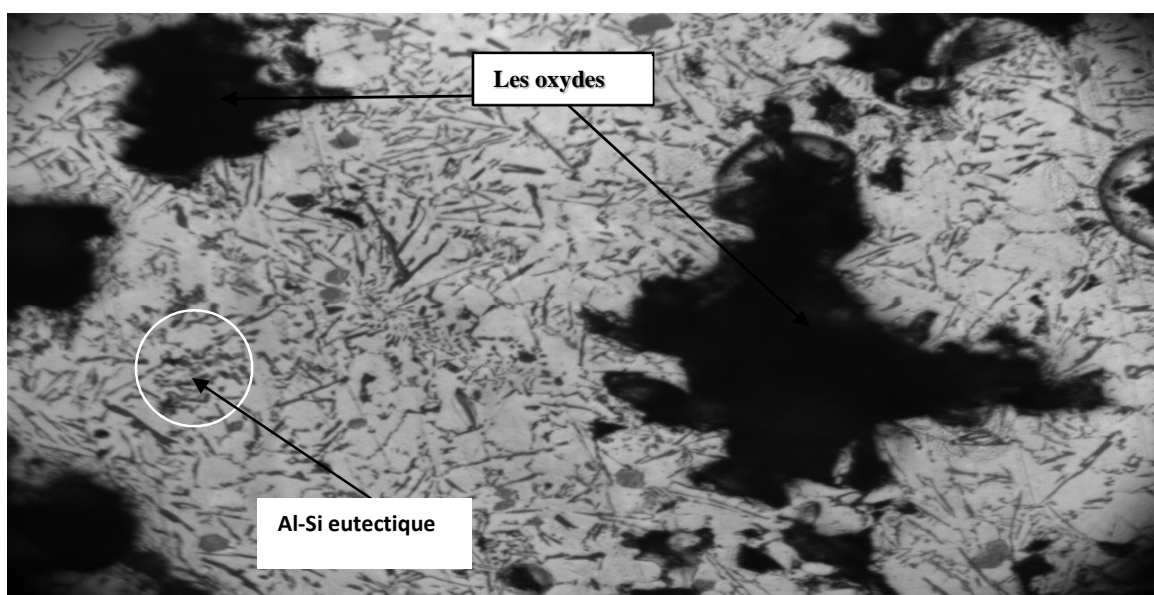


Figure 21: microstructure d'Al-Si12(Cu)

Gx400

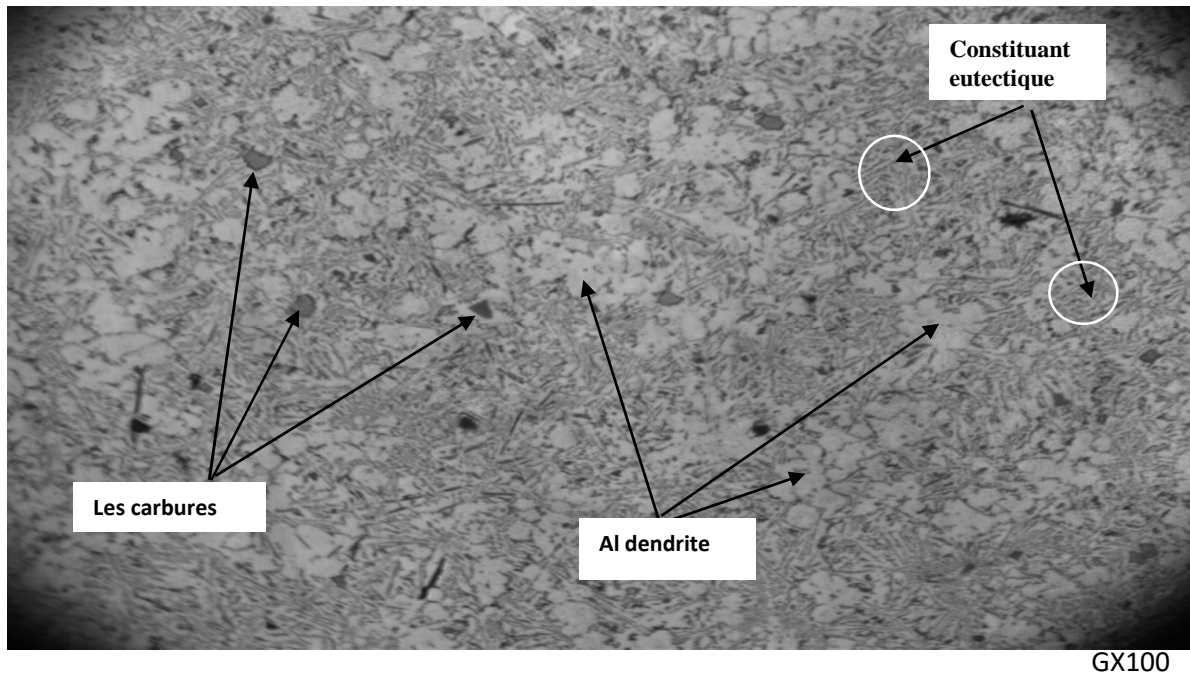


Figure 22 : Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) ECHAN 2

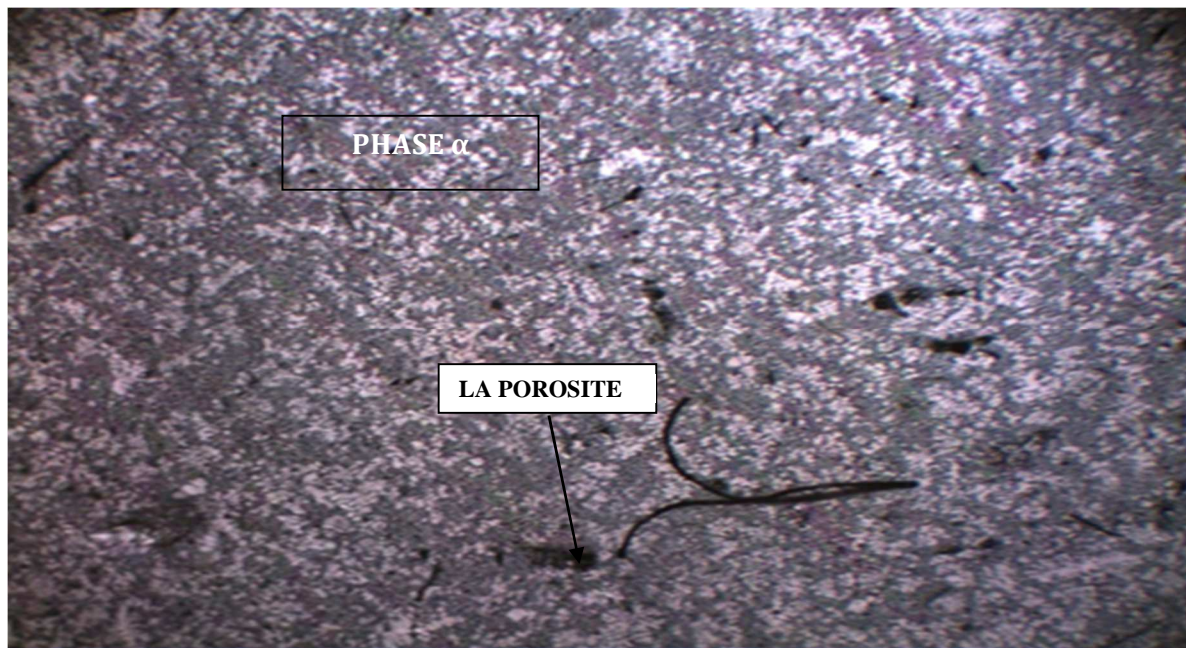
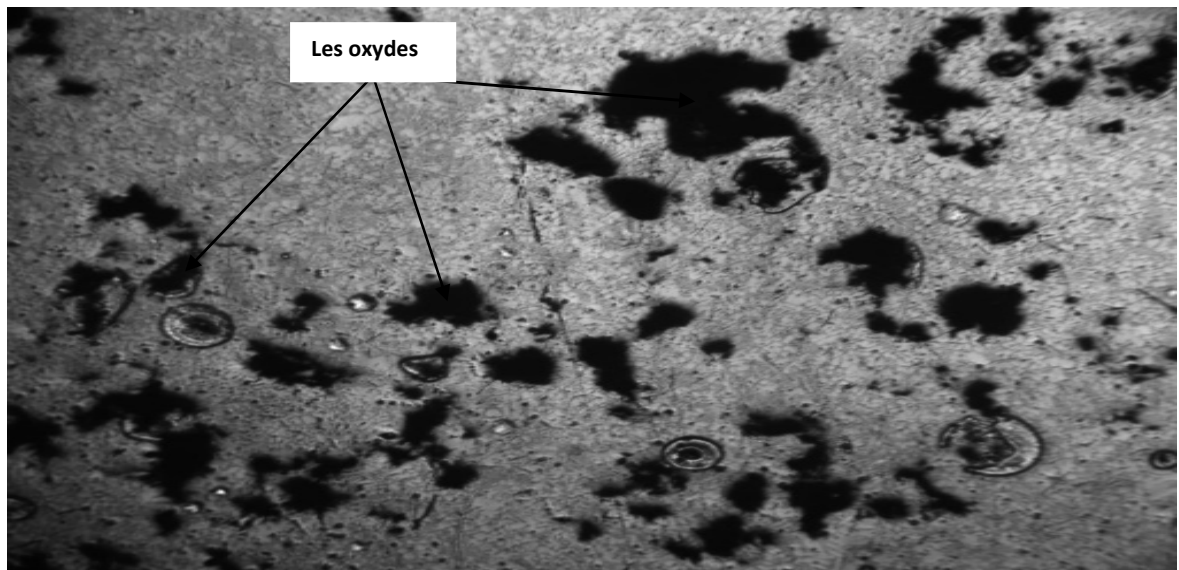


Figure 23 : Microstructure de l'alliage Al-Si12(Cu)

Grossissement 40 :



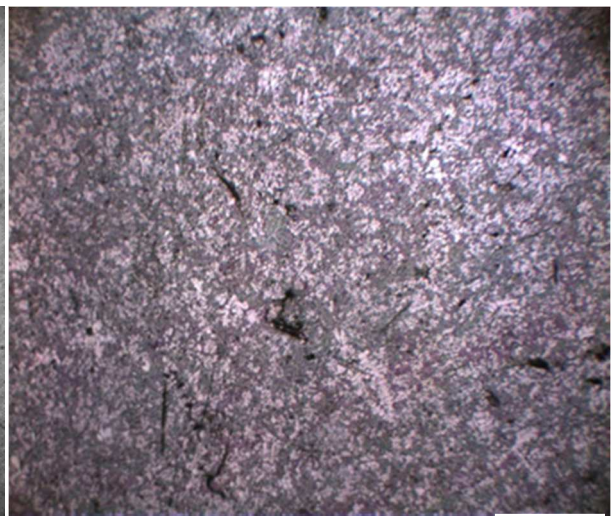
Gx40

Figure 24 : Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) ECHAN 2



Gx40

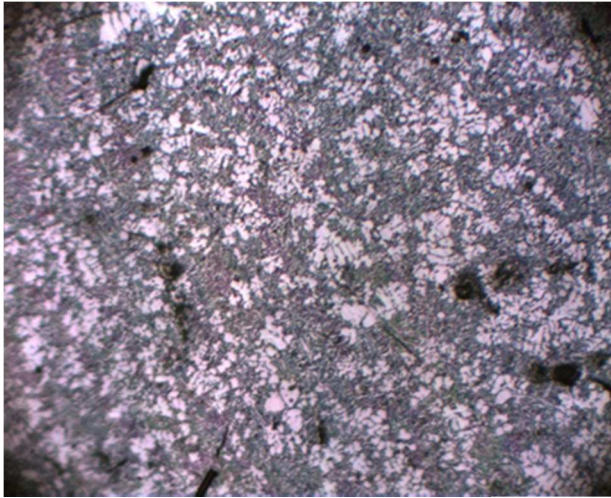
Figure 25 : Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) ECHAN 3



Gx40

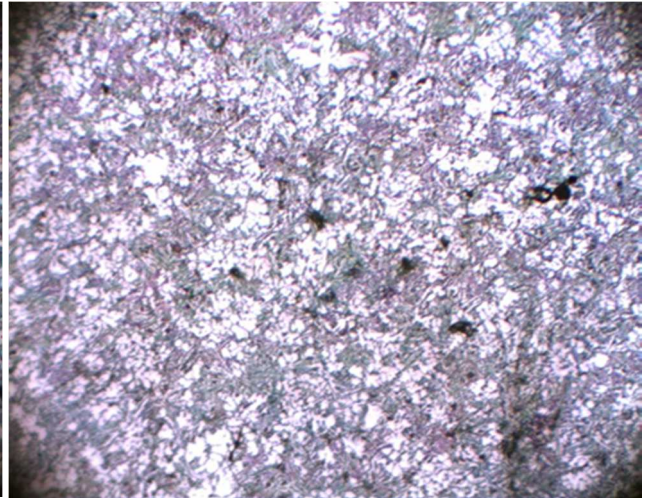
Figure 26 : Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 4

Grossissement 100 :



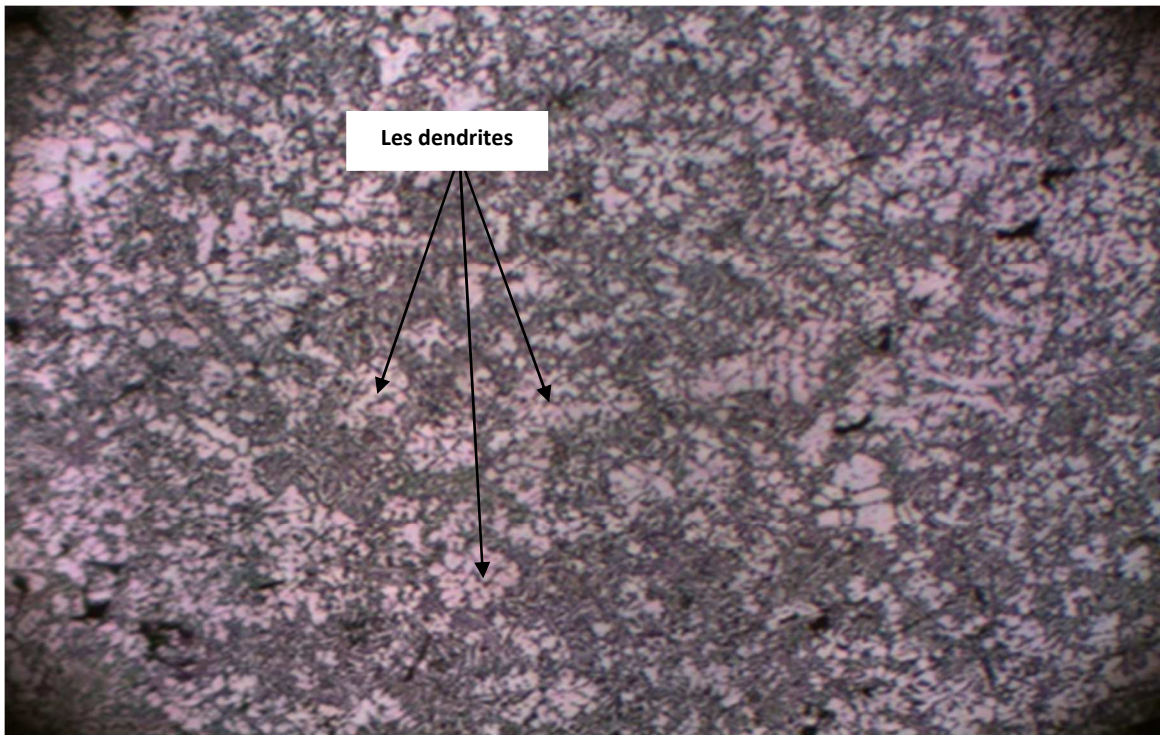
Gx100

Figure 27 : Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN1



Gx100

Figure 28: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN2



Gx100

Figure 29: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN4

Grossissement 200 :

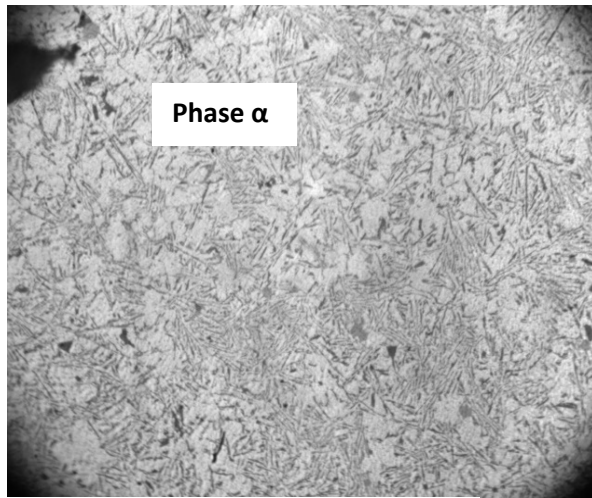


Figure 30: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 1

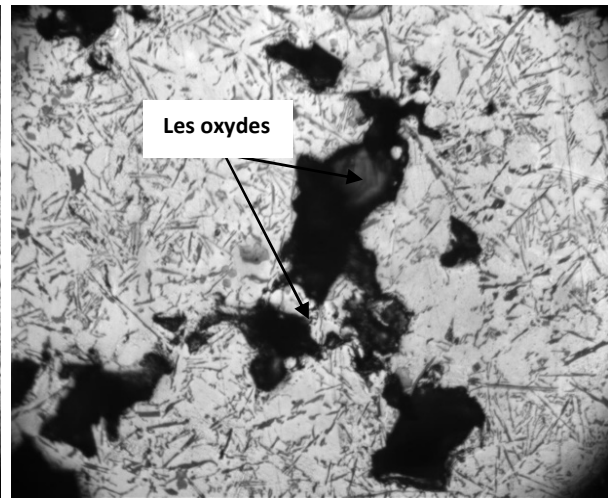


Figure 31 : Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 2

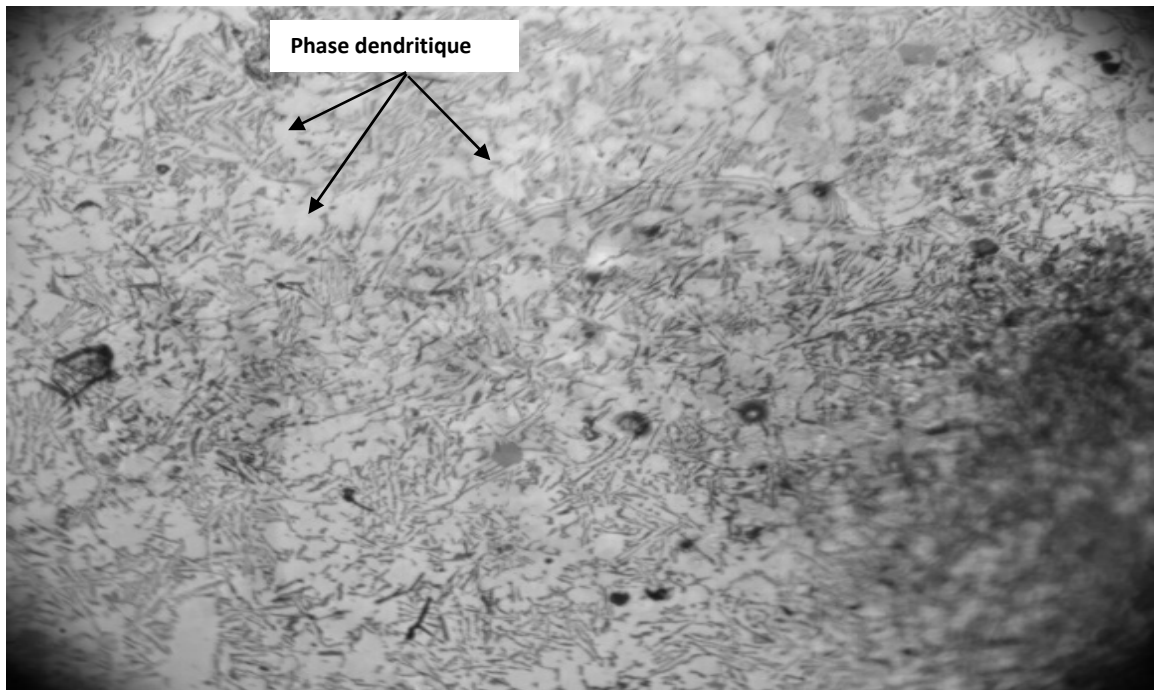


Figure 32 : Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 4

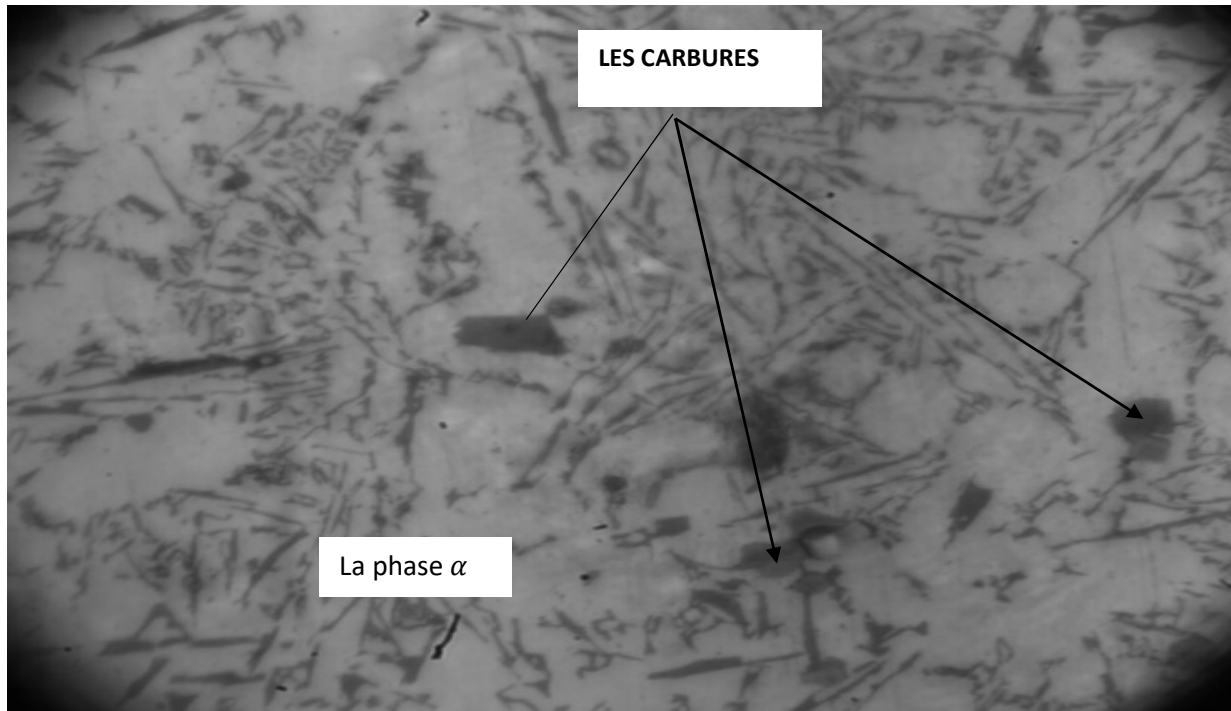


Figure 33: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 2

Gx400

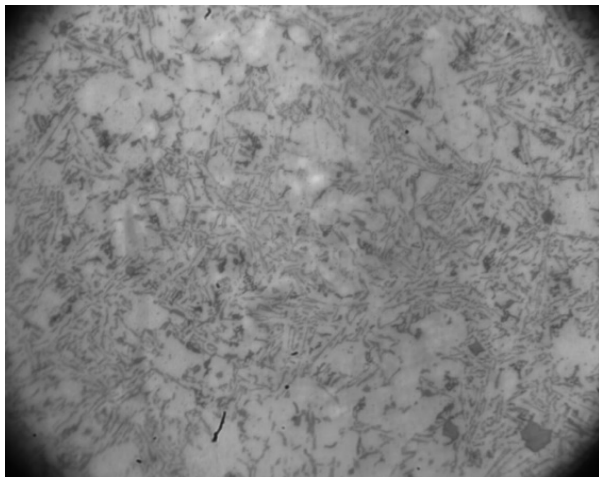


Figure 34: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 3

Gx400

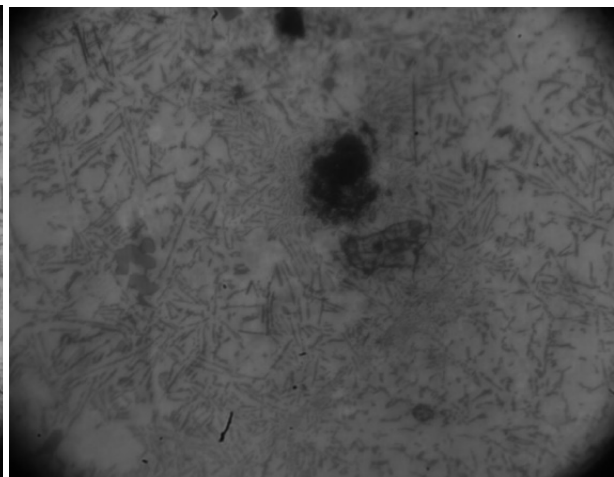
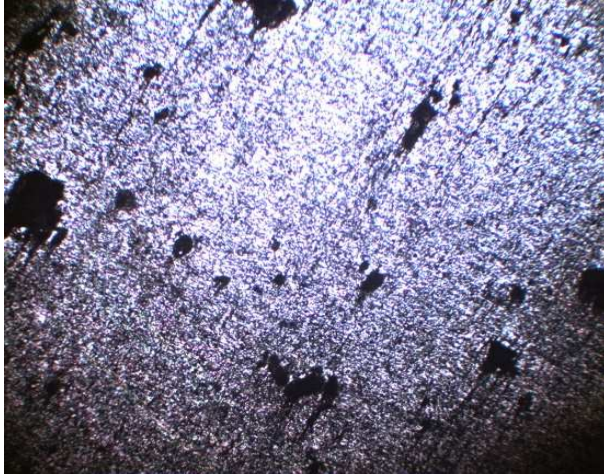


Figure 35: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) ECHAN 4

Gx400

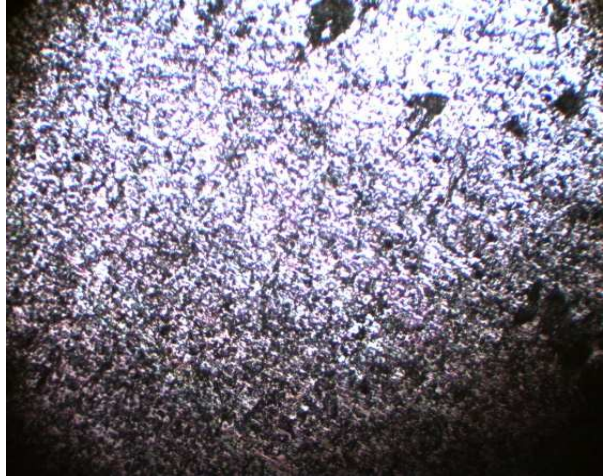
III.2 Microstructure de l'alliage Al Si12 (Cu) après traitement

➤ Apres trempe



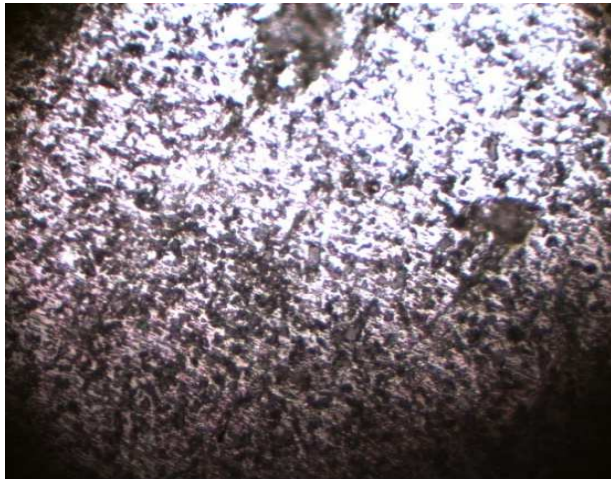
Gx40

Figure 36: l'alliage Al Si12(Cu) après trempe



Gx100

Figure 37: l'alliage AlSi12(Cu) après trempe



Gx200

Figure 38: l'alliage Al Si12(Cu) après trempe



Gx400

Figure 39: Microstructure de l'alliage Al Si12(Cu) après trempe



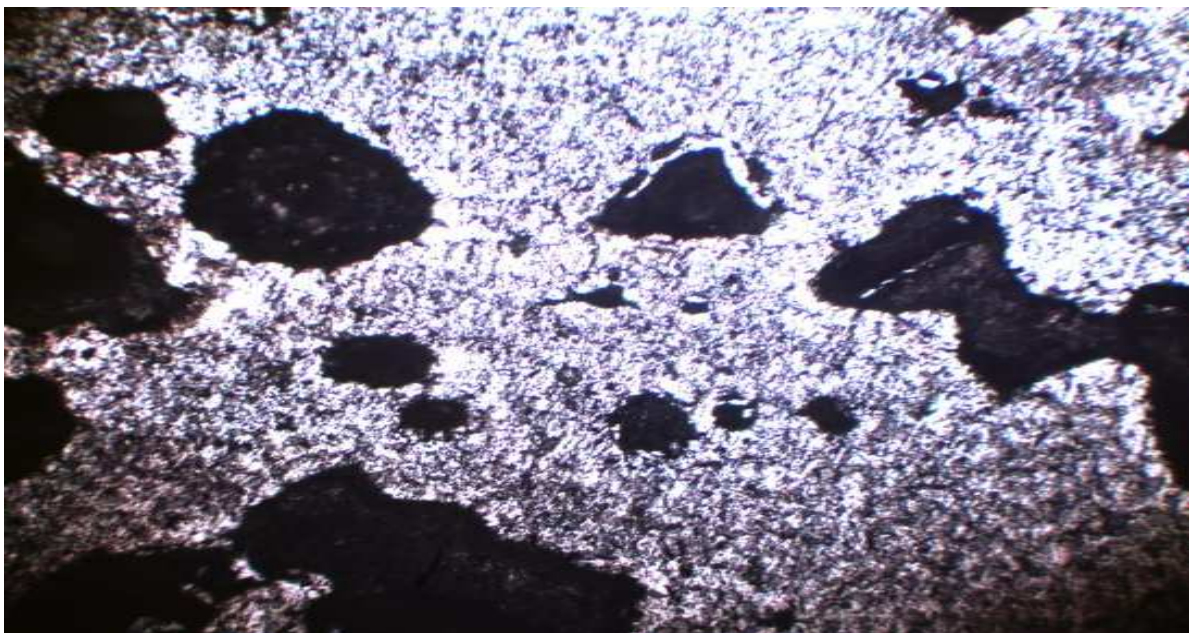
Gx200

Figure 40 : l'alliage Al Si12(Cu) après trempe

- **Observation micrographique après mise en solution et trempe**

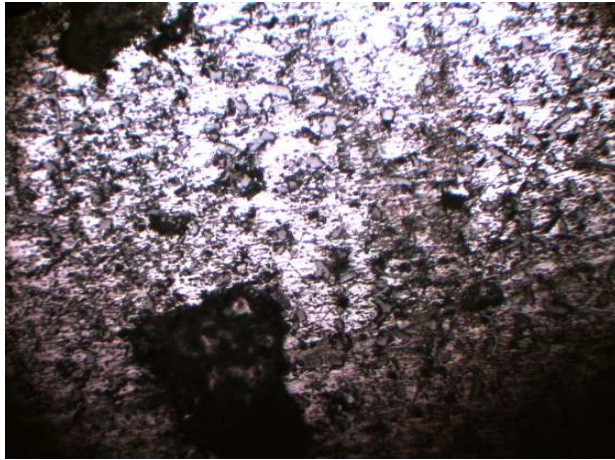
Les micrographies observées après traitement thermique de trempe homogénéisation à 550°C suivis d'un maintien de 3h montrent une homogénéisation de la composition et une sphéroïdisation des dendrites. Et on voit toujours des oxydes et de la porosité.

➤ **Après revenu**



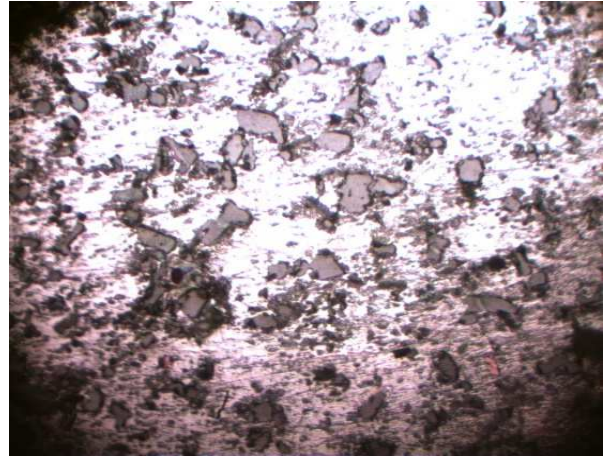
Gx40

Figure 41: revenu à 100°C 3h



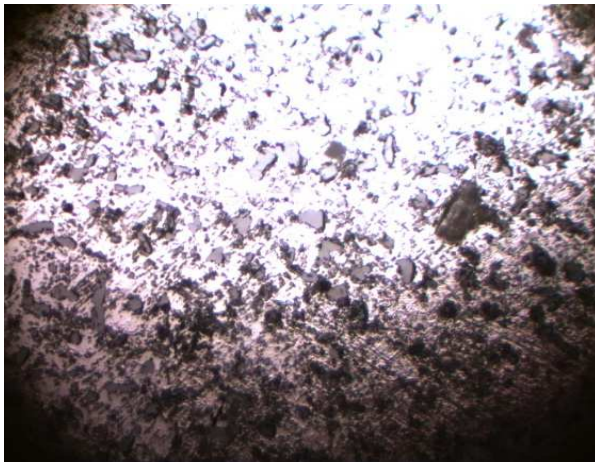
Gx100

Figure 42: revenu à 100°C 3h



Gx200

Figure 43: revenu à 100°C 3h



Gx200

Figure 44: revenu à 100°C 3h



Gx400

Figure 45: revenu à 100°C 3h



Figure 46: revenu à 100°C 3h

Gx200

• **Observation micrographique après revenu ou vieillissement artificiel**

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

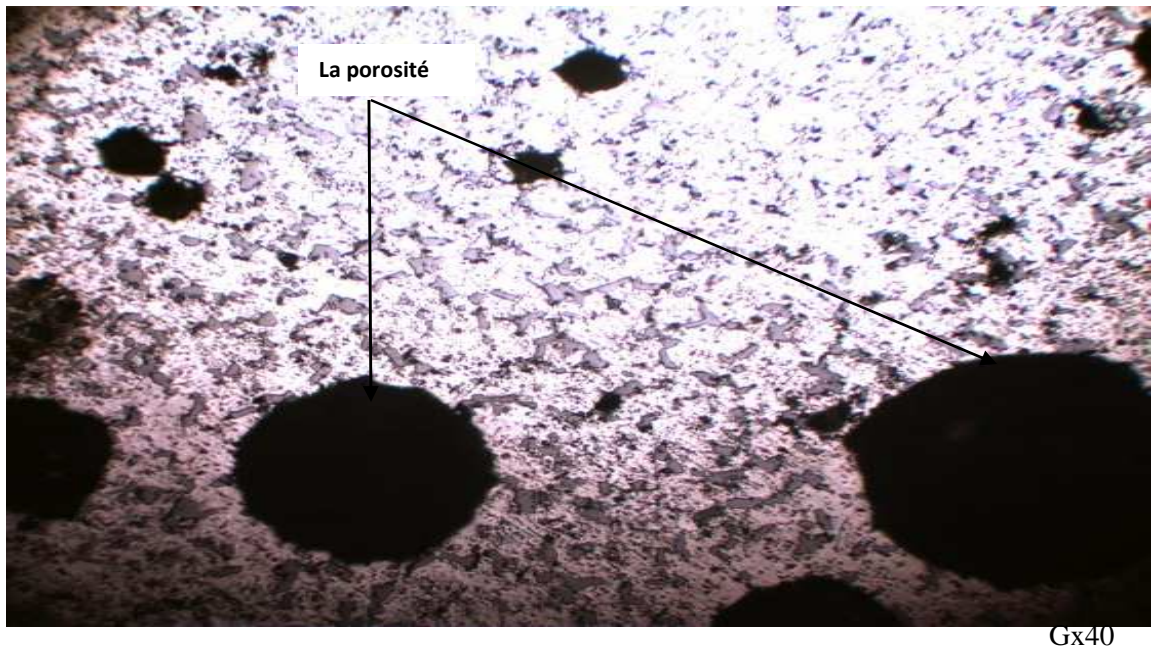


Figure 47: revenu à 200°C 3h

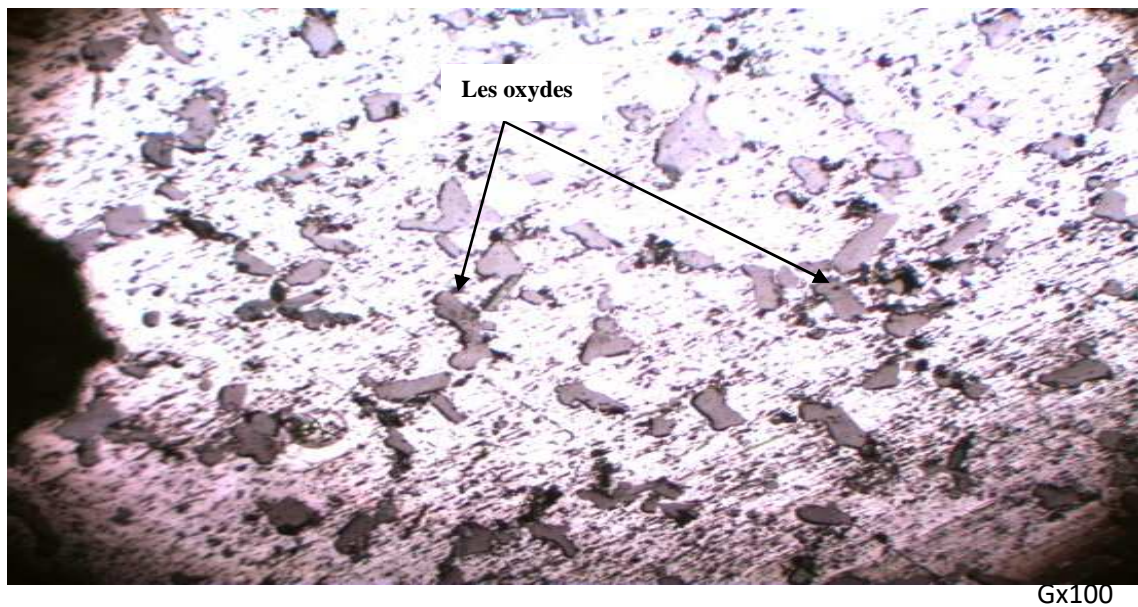


Figure 48: revenu à 200°C 3h



Gx200

Figure 49 : revenu à 200°C 3h



Gx400

Figure 50: Revenu à 200°C pendant 3h

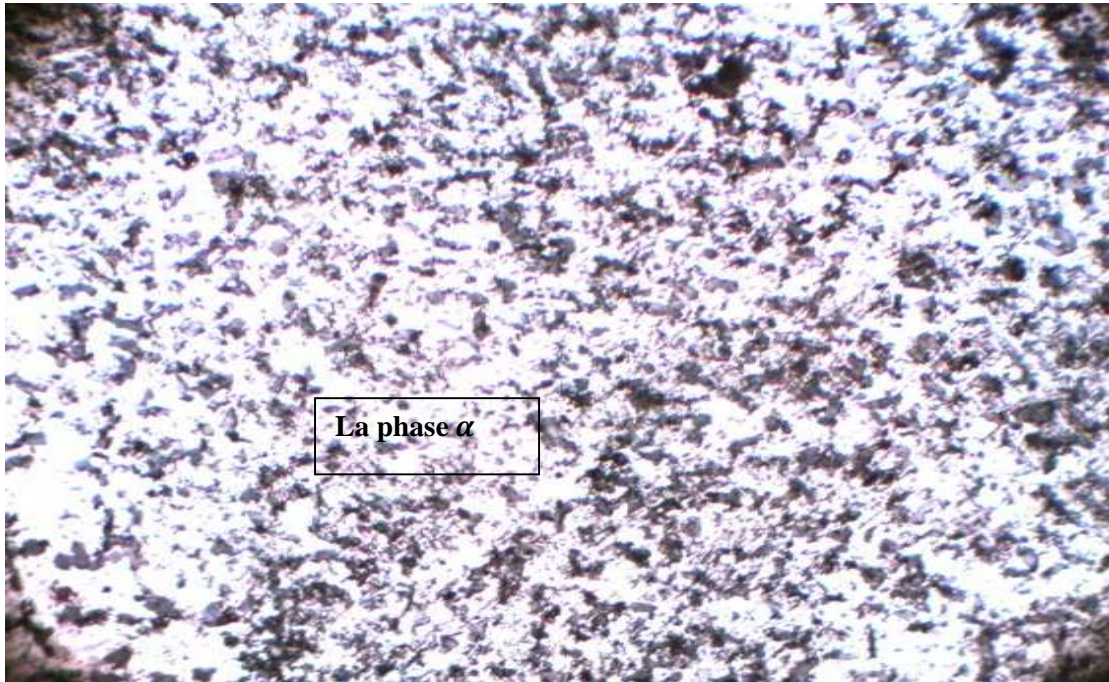


Figure 51 : revenu à 150°C 3h

Gx100

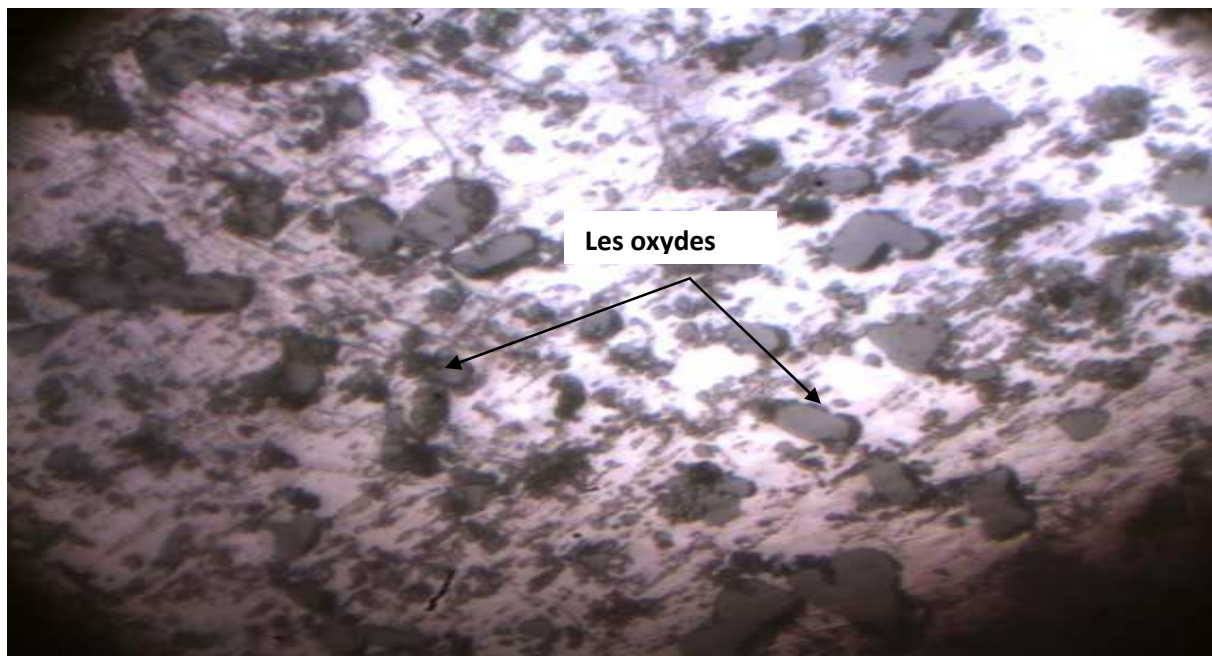


Figure 52: revenu à 150°C 3h

Gx400

IV. Essai de traction

Les figures ci-dessous représentent les courbes de traction

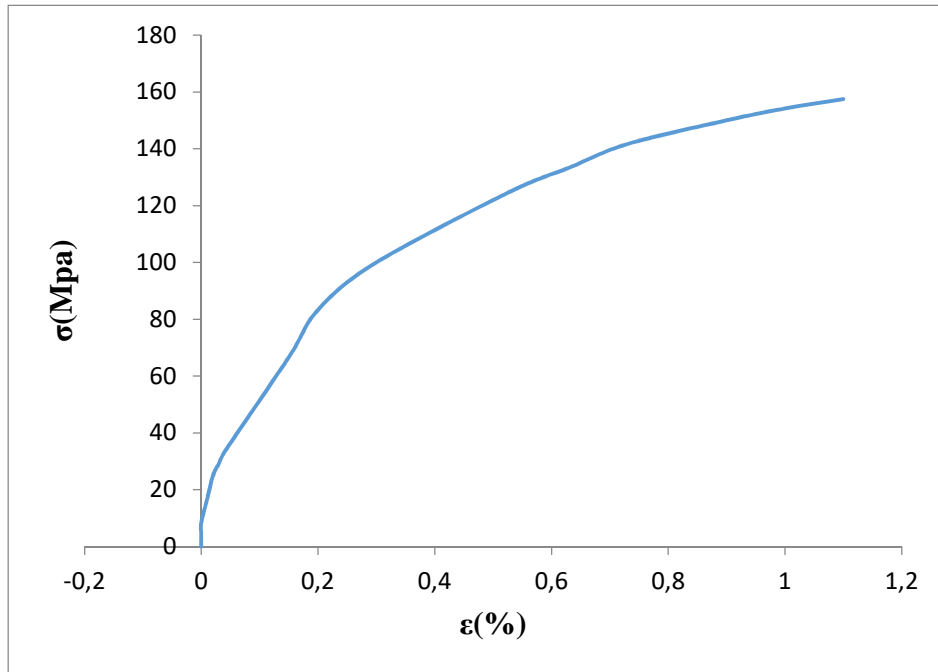


Figure 53: courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°02

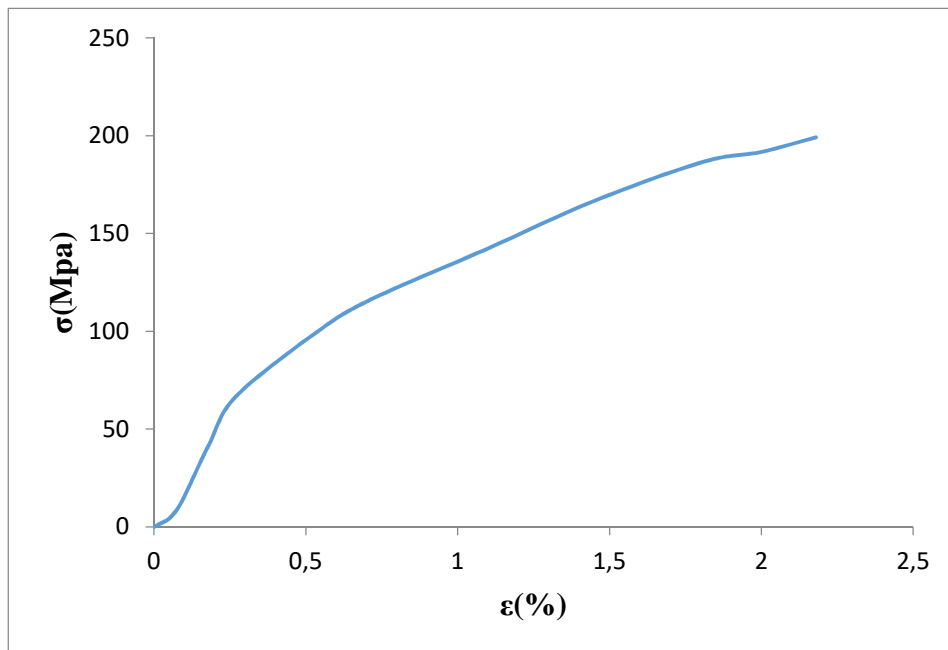


Figure 54: courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n °03

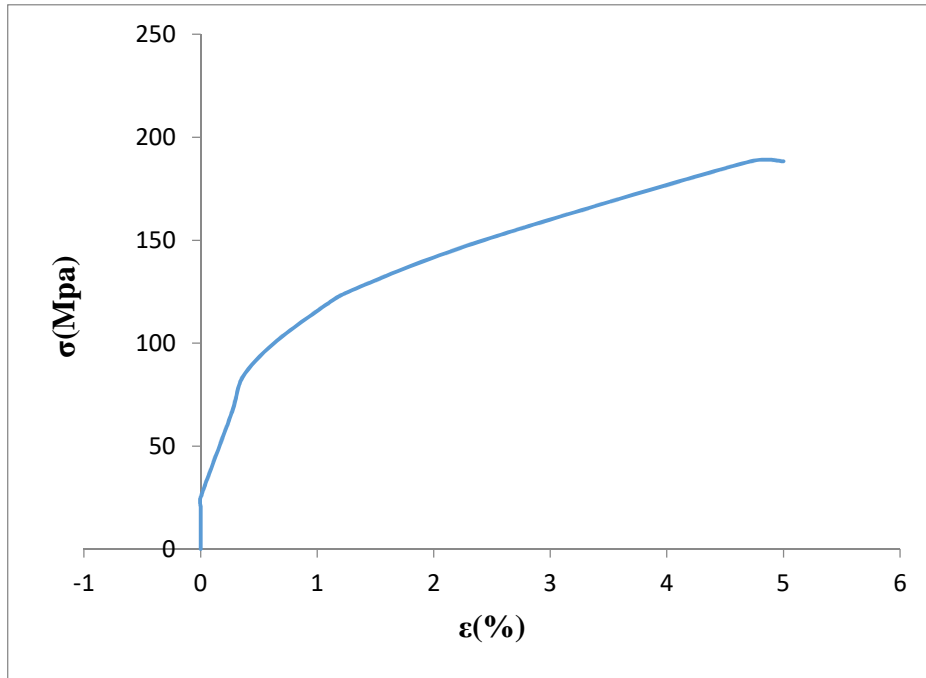


Figure 55: courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°10

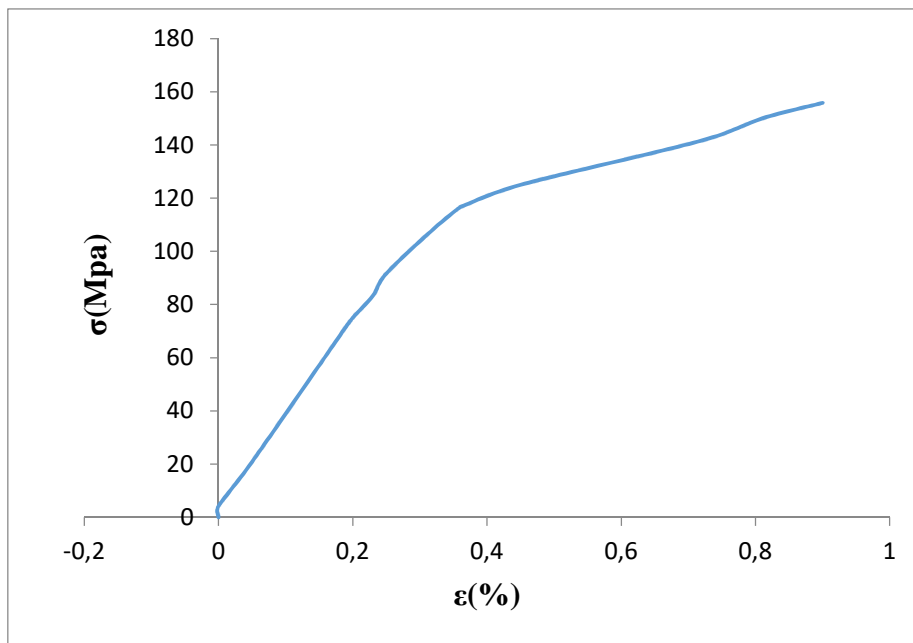


Figure 56: courbe de traction contrainte/déformation de l'éprouvette n°11

Par l'allure des courbes de traction obtenues, le comportement du matériau est ductile, mais la présence de plusieurs paramètres fragilise le matériau; la porosité excessivement présente, la composition chimique, le mode d'élaboration des pièces et les inclusions elles aussi fort présentes dans l'alliage.

V. La dureté

V.1 Avant traitement thermique

Tableau 8 : résultats obtenus pour l'essai de dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe) avant traitement

	d moyen (mm)	Dureté (HB)
ECH 1	0.98	76.43
ECH2	0.97	76.53
ECH3	0.98	76.43
ECH 4	0.96	76.53

V.2 Après traitement thermique

Tableau 9 : résultats obtenus pour l'essai de dureté d'AlSi12Cu1 (Fe) après traitement thermique

	d moyen (mm)	Dureté(HB)
ECHAN APRES TREMPE	0.91	85.10
REVENU 100° 3H	0.90	89.95
REVENU 150° 3H	0.90	89.95
REVENU 200° 3H	0.90	89.95
Vieillessement naturel	0.89	93.38

& On remarque une augmentation de la dureté de 76.53 HB à 85.10 HB (après trempe), et à 89.95 HB après revenu (à 100°, 150° et 200° vieillissement artificiel). Ce qui explique la création des précipités (durcissement structurel) qui empêchent les mouvements de dislocation. Donc on constate que globalement le traitement de revenu (vieillissement artificiel) augmente la dureté de l'alliage.

La plus grande dureté

VI. La micro-dureté

VI.1 Sans traitement thermique

Les essais de micro dureté effectués dans différentes zones de l'échantillon, nous ont donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

Tableau 10 : résultats obtenus pour l'essai de micro dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe).

d1	d2	HV0.5
129.52	130.03	55.0
141.33	136.92	47.8
136.92	137.18	49.3
137.18	135.87	49.7
134.06	138.61	49.8
132.32	130.17	53.8

VI.1 Vieillessement naturel

Tableau 11 : résultats de l'essai de micro dureté de l'alliage AlSi12Cu1(Fe).vieillessement naturel

d1	d2	HV0.5
121.68	118.48	64.2
108.78	110.24	77.3
109.91	106.57	79.1
108.78	110.24	77.3
106.53	108.35	80.3
110.24	112.88	74.4

On remarque que les résultats obtenus pour la micro dureté à beaucoup augmentée après le vieillissement naturel par rapport aux résultats obtenus pour la micro dureté des échantillons sans traitement thermique, on voit qu'elle est entre 45.8 et 55HV, tandis que elle est entre 64.2 et jusqu'à 80.3 HV au vieillissement naturel.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'alliage d'aluminium AlSi12Cu1(Fe) utilisé dans la fonderie de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES FREHA ZAZAGA.

Pour ce travail nous avons utilisés plusieurs techniques expérimentales essentiellement, l'analyse chimique, la microscopie optique, les traitements thermiques (trempe, vieillissement artificiel et vieillissement naturel), et des essais mécaniques tel que : l'essai de traction, la dureté et la micro dureté.

Les principaux résultats de la thèse peuvent se résumer de la manière suivante :

- Les microstructures observées sur les échantillons avant et après traitement thermique montre la répartition des phases existantes dans l'alliage et ont mis en évidence de nombreuses anomalies présentes dans cet l'alliage.
- Les courbes obtenues lors de l'essai de traction effectué ont décrit un matériau ductile mais fragilisé par la porosité.
- L'essai de dureté appliqué sur les échantillons traités et non traités nous a montré que la dureté augmente après traitement thermique.
- Les traitements thermiques entraine une modification de la microstructure ainsi de certaine propriétés mécaniques (la dureté, l'élasticité, la rigidité.....
- L'analyse chimique a complété le travail et a montré le taux élevé de divers éléments d'addition tel que le fer et le cuivre.

Perspectives

Cette étude intéressante mérite d'être étendue aux causes de la formation de la porosité et des oxydes, en se basant sur le mode d'élaboration de l'alliage d'aluminium de fonderie (Al-Si).

Références bibliographiques

[1] **Michel Colombie et coll.** « MATERIAUX METALLIQUES ; matériaux industriels » DUNOD 2000.

[2] **Vargel Christian.** « Le comportement de l'aluminium et ses alliages » ingénieur ENSEEG de l'INPG centre de recherche et de développement de Voreppe : Aluminium Pechiney BORDAS DUNOD TECHNIQUE PAEIS 1979

[3] **Jean Barralis, Gérard Maeder.** « Précis métallurgie ; élaboration, structures, propriétés, normalisation » Edition Nathan 1997

[4] **Jean-Paul Baïon Jean-Marie Dorlot.** « Des matériaux », troisième édition presses internationales polytechnique canada 2005

[5] **Asma Haddouche.** Mémoire de fin d'étude en Master Intitulé : « Caractérisation physico-chimique des alliages d'Aluminium utilisés comme matériau de revêtement mural » 2013-2014

[6] **S. Bensaada**-Cours de corrosion. Université de Biskra novembre 2019

[7] **C.Vargel**, « corrosion e l'aluminium », paris: DUNOD, 1999,501p.

[8] **Pr. P. Colon, Dr. B. Grosogeat-Balayre.** Campus odontologie.
Société Framophone des biomatériaux dentaires(SFBD).

[9] **Cours de Kacimi M.** Spectrométrie d'absorption atomique Université Frères Mentouri Constantine 1Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire Département Sciences Géologique.

Annexes