

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAAMRI DE TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



Mémoire de master

Option : génie des matériaux

**Thème : étude de l'effet de la concentration de NaCl et de recuit sur la
corrosion des alliages AS13 et AS10G de fonderie**

Réalisé par :

- Sahi Mélissa
- Ben zid Lisa

Devant le jury composé de :

- Mr : Iloul. CH.....président
- Mr : Zazi. N.....encadreur
- Mr : Hadj Ali. Y.....examineur
- Mr : Korichi. B.....Co encadreur

Promotion : 2024

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous qui me sont chers sans citer de noms

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Mon marie

Ma sœur

Mes frères

Et mes amis ainsi que toute ma famille

Mélissa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous qui me sont chers sans citer de noms

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Ma sœur

Mon frère

Et mes amis ainsi que toute ma famille

Lisa

REMERCIEMENTS

En premier je remercie dieu pour m'avoir donné la patience

Et le courage durant ces années de mémoire. Dieu merci.

Je tiens a remercié mon promoteur Mr N. ZAZI d'avoir bien voulu

Me proposer le sujet et ensuite encadrer mon travail en m'apportant

L'orientation et l'aide nécessaire.

On tient aussi à remercier notre Co-promoteur Mr. B. KORICHI qui nous a aidé et soutenu durant notre travail.

Je remercie les enseignants de département Génie Mécanique

En particulier ceux de la spécialité génie des Matériaux

Je n'oublie pas de remercie ma famille, mes amis et tous mes

Collègues d'université mouloud Maamri de Tizi Ouzou en général et mes collègues

De la promotion GDM 2024 en particulier et je remercie tous ceux

Qui m'ont soutenu moralement.

Sommaire :

Chapitre I :aluminium est ses alliage

I.Historique :.....	16
I.1 L'aluminium :	16
I.2 La fabrication d'alumine :	17
I.3 Principales caractéristiques d'aluminium :.....	17
I.4 L'outillage d'une fonderie d'aluminium :.....	18
I.5 Principales Propriétés de l'aluminium :.....	18
I.5.1 Propriétés physico – chimiques de l'aluminium :.....	18
I.5.2 Propriétés mécaniques :.....	18
I.5.3 Mise en forme de l'aluminium :	19
I.6 Alliages d'aluminium :	19
I.7 Désignation des alliages d'aluminium :.....	20
I.8 Différents types Alliages d'Aluminium :	20
I.8.1 Les alliages d'aluminium de corroyage :.....	21
I.8.2 Les alliages de moulage :	21
I.9 Les Alliages Fonderie :	22
I.10 Principales Utilisations de l'aluminium :.....	23
I.10 Avantages et Inconvénients de l'Aluminium :.....	24
I.10.1 Avantages :	24
I.10.2 Inconvénients de l'aluminium :	25
II. Les alliages d'aluminium de fonderie AL-SI	25
II. 1 Introduction :	25
II.2 Alliage aluminium silicium :	26
I.3 : Les alliages d'aluminium de fonderie.....	27
II.3 Principaux effet de silicium dans un alliage Sont le suivant :	27
II.4 Désignation :.....	27
II.4.1 Désignation européenne :.....	27
II.4.2 Désignation américaine :	28
II.5 Alliages Normalisés :.....	29
II.5.1 Alliages Al Cu :	30
II.5.2 Alliages AL Si MgTi :	30
II.5.3Alliages AlSi7Mg	30
II.5.4 Alliages AlSi10Mg :.....	31
II.5.5 Alliages AlSi :	31

II.5.6 AlSi5Cu :	32
II.5.7 Alliages AlSi9Cu :	32
II.5.8 Alliages AlSi(Cu) :	32
II.5.9 Alliages AlSiCuNiMg :	33
II.5.10 Alliages AlMg :	33
II.5.11 Alliages AlZnMg :	33
II.6 Alliages Non Normalisés :	33
II.6.1 Alliages Autotrepants :	34
II.6.2 Alliages à Très Haute Résistance Mécanique :	34
II.6.3 Alliages Ductiles pour Moulage Sous Pression :	34
II.6.4 Alliages Aluminium-Manganèse :	35
II.7 Effets des Eléments D'Addition :	35
II.7.1 Silicium Si :	35
III. Types de traitements appliqués aux alliages d'aluminium :	36
III.1 Traitements thermiques des alliages d'aluminium :	36
a. Trempe et vieillissement :	36
b. Vieillissement des alliages trempés :	37
c. Recuit des alliages d'aluminium :	37
III.2 Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium :	38
A. Durcissement par écrouissage :	39
B. Recristallisation :	39
chapitr II:corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie	
I. Corrosion de l'aluminium et ses alliages :	43
II.1 Définition de la corrosion :	43
II.2 Classification de la corrosion :	43
II.2.1 La corrosion sèche :	43
II.2.2 La corrosion humide :	43
II.3 Les différents modes de corrosion :	43
II.4 Corrosion de l'aluminium :	43
II.5 Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages :	45
II.5.1 Diagramme potentiel - pH (Pour Baix) :	45
II.6 Type de corrosions électrochimique de l'aluminium :	46
II.6.1 La corrosion uniforme :	46
II.6.2 La corrosion galvanique :	46
II.6.3 La corrosion caverneuse :	47

II.6.4 La corrosion par piqûres :	47
II.6.4 La corrosion inter granulaire :	48
II.6.5 La corrosion sélective :	48
II.6.6 La corrosion-érosion :	48
II.6.7 La corrosion sous contrainte :	48
II.7 Moyens de protection :	49
II.7.1 Protection par revêtements :	49
II.7.2 Revêtements métalliques :	50
II.7.3 Revêtements non métalliques :	50
II.8 Protection électrochimique :	52
II.8.1 La protection cathodique :	52
II.8.2 La protection anodique :	53
II.9 Corrosion des alliages aluminium silicium de fonderie :	53
II.9.1 Effets éléments chimique en impureté et en addition sur la corrosion :	54
II.9.2 Effet de la microstructure :	54
II.9.3 Effet des pores :	55
chapitre III: Matériau et Technique Expérimentales	
III. Matériau et Technique Expérimentales :	57
III.1.1 Alliage étudié :	57
III.2 Techniques d'analyse et de caractérisation de surface :	58
III.2.1 La microscopie optique :	58
III.3 Caractérisation électrochimique :	59
III.3.1 Cellule électrochimique :	59
III.3.1.1 électrode de référence :	59
III.3.1.2 contre électrode :	59
III.4 Courbes de polarisation :	59
III.5 Conditions expérimentales :	60
III.5.1 Préparation des échantillons pour les essais de corrosion :	60
III.5.2 Enrobage :	60
III.5.3 Polissages :	60
III.5.4 Attaque chimique :	61
III.5.5 Observation au microscope optique :	61
III.6 Traitements thermiques appliqués :	61
III.7 Préparation de la solution pour l'immersion :	62
III.8 La dureté :	62

III.8.1 La dureté Brinell :.....	63
III.8.2 Calcul de la dureté brinell :.....	63
III.9 Mesures électrochimiques :.....	63
III.10 Test d'immersion pendant 5 jours :.....	64
chapitre IV: résultats et discussion	
IV .1 Résultats de l'étude de la sensibilité à la corrosion :	66
IV .1.1 de l'alliage AS13 de fonderie	66
IV .1.1.1 comparaison des courbes du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'alliage AS13 de fonderie :	66
IV .1.1.2 L'alliage AS10G de fonderie :.....	71
IV .1.1.2 .1 Comparaison des courbes du potentiel de la corrosion libre (OCP) de l'alliage As10G de fonderie :	71
IV .1.1.2 .2 Comparaison des courbes de polarisation de l'alliage AS10G de fonderie :.....	73
IV .1.3 Test de polarisation après cinq jours d'immersion dans une solution de NaCl de 3% en poids :.....	76
IV .1.4 Résistance de polarisation.....	78
IV .1.4.1 Résistance de polarisation de l'alliage AS13 en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après 1 heure de corrosion	79
IV .1.4.2 Résistance de polarisation de l'alliage AS10G en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl :.....	79
IV .1.4.3 Résistance de polarisation de l'alliage AS13 en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après cinq jours de corrosion :	79
IV .1.4.4 Résistance de polarisation de l'alliage AS10G en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après cinq jours de corrosion :	80
IV.2 Résultats de l'étude de la morphologie des alliages AS13 et AS10G de fonderie avant et après corrosion :	80
IV.3 la dureté des différents échantillons des alliages AS13 et AS10G de fonderie :.....	84
Conclusion générale	87

Liste des figures :

Figure I.1: poudre d'aluminium.....	16
Figure I.2: procédés de fabrication de l'aluminium	17
Figure I.3: les type d'alliage d'aluminium : (a) alliage de fonderie , (b) alliage de corroyage	22
Figure I.4: les alliage de fonderie.....	23
Figure I.5: diagramme d'équilibre Al-Si.....	41
Figure II.1: diagramme E-pH Al-H ₂ O à 25C°°(M. POURBAIX)	46
Figure II.2: corrosion galvanique.....	47
Figure II.3: corrosion par piqure et corrosion par caverneuse	47
Figure II.4: corrosion inter granulaire	48
Figure II.5: corrosion sous contrainte	49
Figure II.6: effets des principaux éléments d'alliage sur le potentiel de corrosion de l'aluminium dans la solution NaCl	54
Figure III.1: microscope optique	58
Figure III.2: polisseuse	61
Figure III.3: four.....	62
Figure III.4: Duromètre utilisé.....	62
Figure III.5: principe de l'essai de dureté brinell.....	63
Figure III.6: potentiostat /galvano stat Autolabe.....	64
Figure IV.1: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans les deux solutions 0.3 et 3% NaCl en poids durant 1 heure d'immersion	66
Figure IV.2: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans deux solution 0.3 et 3% NaCl en poids et de l'alliage recuit à différentes température (200, 300 et 400)C° durant 1 heure d'immersion.....	67
Figure IV.3 : Evolution de L'OCP de l'alliage AlSi 13 dans la solution 3% Nacl en poids et de l'alliage recuits à différents température (200, 300 et 400) C° durant 1 heure d'immerssion..	66
Figure IV.4 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids et de l'alliage recuit à différent température (200, 300 et 400) °C durant 1heure d'immersion.....	67
Figure IV.5: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 dans les deux solution 0,3% et 3% NaCl après 1heure d'immersion et de l'alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1heure d'immersion.....	68
Figure IV.6: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 0,3 % NaCl après 1heure d'immersion.....	68

Figure IV.7: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion ...	69
Figure IV.8 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans les deux solutions 0,3 % et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion ...	69
Figure IV.9 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans les deux solutions 03% et 3% NaCl en poids durant 1heure d'immersion	72
Figure IV.10 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 0,3% NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1heure d'immersion	72
Figure IV.12: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 3 % NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion	73
Figure IV.13: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G dans les deux solution 0,3% et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion.....	74
Figure IV.14: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons du même alliage traités thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 0,3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion	75
Figure IV.15: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion	75
Figure IV.16 : Courbes de polarisation de l'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans les deux solutions 0,3 % et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion.	76
Figure IV.17: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C, dans une solution de 3 % NaCl en poids, après cinq jours d'immersion	77
Figure IV.18: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400 °C) dans une solution de 3 % NaCl en poids après 5 jours d'immersion	77
Figure IV.19 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 dans la solution 3% NaCl après une heure et 5 jours d'immersion....	76
Figure IV.20: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G dans la solution 3% NaCl en poids après une heure et 5 jours d'immersion.....	77
Figure IV.21 : Microstructure de l'alliage AS13 sans attaque.....	79
Figure IV.22 : Microstructure de l'alliage AS10G sans attaque	80

Figure IV.23 : Microstructure de l'alliage AS13 avec attaque.....	80
Figure IV.24 : Microstructure de l'alliage AS10G avec attaque.....	81
Figure : IV.25 : Echantillons recuit de l'alliage AS13 après attaque	81
Figure : IV.26 : Echantillons recuit de l'alliage AS10G après attaque	82
Figure : IV.27 : Echantillons recuit et non recuit de l'alliage AS13 après une heure d'immersion	82
Figure : IV.28 : Echantillons recuit et non recuit de l'alliage AS10G après une heure d'immersion	83
Figure : IV.29 : Echantillons recuit de l'alliage AS13 après cinq jours d'immersion.....	83
Figure : IV.30 : Echantillons recuit de l'alliage AS10G après cinq jours d'immersion	83
Figure : IV.31 : duretés de AS13 (Bleu) et AS10G (Rouge) de fonderie sans et avec recuits.....	83

Liste des tableaux :

Tableau 1 : séries principales des alliages d'aluminium.....	20
Tableau 2: type de revêtement	49
Tableau 3: la composition chimique de AS10G	57
Tableau 4: la composition chimique de AS13	57
Tableau 5 : les valeurs d'E _{corr} et R _p de l'échantillon de l'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C après 1 heure d'immersion dans les solutions 0,3 % et 3%NaCl	79
Tableau 6: les valeurs d'E _{corr} et R _p de l'échantillon de l'alliage AS10G et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C après 1 heure d'immersion dans les solutions 0,3 % et 3%NaCl	79
Tableau 7: les valeurs de potentiel de corrosion et de résistance de polarisation de l'alliage AS13 après 5 jours d'immersion dans la solution 3%NaCl.....	80
Tableau 8: les valeurs de potentiel de corrosion et de résistance de polarisation de l'alliage AS10G après 5 jours d'immersion dans la solution 3%NaCl	80

Introduction générale

Les alliages d'aluminium de fonderie sont des métaux légers, et occupent une place importante dans l'industrie automobile et aéronautique en raison de ses propriétés exceptionnelles. Les alliages aluminium sont imposés grâce à sa leur combinaison unique de légèreté, de conductivité électrique et thermique, et de leurs résistances à la corrosion.

Les alliages d'aluminium sont également très ductiles et malléables, ce qui permet de le transformer facilement en divers produits finis. De plus, leurs capacités à former une couche d'oxyde protectrice naturelle les rend intrinsèquement résistant à la corrosion dans de nombreux milieux corrosifs.

Les alliages de fonderie, en particulier ceux contenant du silicium, sont parmi les plus utilisés. Les alliages d'aluminium-silicium, connus sous le nom de silumins, sont connus pour leur excellente coulabilité, leur faible retrait à la solidification, et leur résistance à l'usure. Ces caractéristiques en font un choix privilégié pour la fabrication de pièces moulées complexes et précises.

Les silumins contiennent typiquement entre 5 % et 23 % de silicium. Le silicium améliore la fluidité de l'aluminium fondu, facilitant ainsi le processus de moulage et permettant la production de pièces avec des détails fins et des tolérances strictes. Ces alliages sont largement utilisés dans l'industrie automobile, pour des composants tels que les blocs moteurs, les culasses, et les carters de transmission, ainsi que dans l'industrie aéronautique et d'autres secteurs de haute technologie.

Malgré leurs nombreuses qualités, les alliages d'aluminium sont sujets à la corrosion, un phénomène naturel qui peut compromettre la durabilité et la performance des matériaux. La corrosion est principalement due à des réactions électrochimiques avec l'environnement, résultant en la formation d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sur la surface des alliages d'aluminium sur la surface du métal. Cette couche d'oxyde est généralement protectrice, empêchant la progression de la corrosion.

Les alliages d'aluminium-silicium, bien que présentant de bonnes propriétés mécaniques et une excellente coulabilité, ne sont pas exempts de problèmes de corrosion. Dans des environnements agressifs, tels que les milieux marins ou industriels riches en chlorures, ces alliages peuvent subir des formes de corrosion localisée, comme la corrosion par piqûres et la corrosion inter granulaire.

Introduction générale

La corrosion dans ces alliages est souvent influencée par la formation d'autres phases, qui peuvent amorcer la corrosion localisée galvanique.

Pour améliorer la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium-silicium, plusieurs stratégies peuvent être employées. Parmi elles, le traitement thermique, l'ajout d'éléments d'alliage supplémentaires (comme le magnésium ou le zinc), et l'application de revêtements protecteurs sont couramment utilisés. Le traitement thermique peut homogénéiser la microstructure de l'alliage, réduisant ainsi les hétérogénéités électrochimiques. Les revêtements protecteurs, tels que les anodisations ou les revêtements organiques, créent des barrières physiques qui empêchent les agents corrosifs d'atteindre la surface métallique.

L'objectif de notre travail est de voir comment évolue la corrosion des alliages AS13 et AS10G de fonderie et recuit à différentes températures, et de comparer les résultats des tests des deux alliages dans deux solutions de concentration de 0.3 et 3% NaCl en poids, pour évaluer l'effet de la concentration en NaCl et de la composition chimique sur le comportement à la corrosion.

Cette étude comporte une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale :

Le premier chapitre nous présentant une recherche bibliographique sur l'aluminium et ses alliages.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons la corrosion des alliages d'aluminium.

Le troisième chapitre décrit les techniques expérimentales utilisées pour réaliser ce travail.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus et leurs discussions.

Enfin, une conclusion générale permet de résumer le travail de ce mémoire

Chapitre I : aluminium et ses alliages

Chapitre 1 : aluminium et ses alliages

Chapitre I : aluminium et ses alliages

I. Historique :

En 1825, Hans Christian Oersted obtient l'aluminium à l'état de corps simple, sous forme de poudre grise avec une très grande quantité d'impuretés, En 1827, Friedrich Wöhler obtient cette même poudre grise d'aluminium contenant cependant moins d'impuretés.

Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte- Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu, à l'état fondu, par un procédé mis en application en 1859.

L'aluminium a connu en un peu plus de cent ans une croissance prodigieuse, le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux, derrière le fer. Le premier alliage d'aluminium fut inventé par Alfred Wilms, chimiste allemand, en 1908.

Cet alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium fut exploité par les usines de Düren et fut baptisé l'aluminium de Düren, le « Duralumin ». C'est un alliage à « durcissement structural » par traitement thermique, phénomène découvert par Conrad Claessens en 1905.

Le second alliage d'aluminium fut découvert en 1920 par le hongrois Aladar Pacz, émigré aux Etats-Unis ; c'est un alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium, baptisé l'« Alpac », alliage dévolu au moulage et autrefois appelé en France l'A-S13[1].



Figure I.1: poudre d'aluminium

I.1 L'aluminium :

L'aluminium est un élément métallique, l'un des métaux les plus abondants dans la croûte terrestre. Il appartient au troisième groupe de la classification de Mendeleïev, juste après le silicium et l'oxygène. Son numéro atomique est 13, sa masse volumique est de $2,7 \text{ g/cm}^3$, et sa masse atomique est de $26,98 \text{ g/mol}$. Sa structure cristalline est de type cubique à faces centrées. L'aluminium fond à 660 °C . C'est un bon conducteur d'électricité et de chaleur, et il

Chapitre I : aluminium et ses alliages

résiste bien à la corrosion grâce à la fine couche d'oxyde de structure amorphe couvrant sa surface extérieure [3].

I.2 La fabrication d'alumine :

L'alumine, matière intermédiaire indispensable à la fabrication de l'aluminium, est principalement extraite de la bauxite. Le taux de bauxite varie de 40 à 60%. Un mélange d'oxyde d'aluminium hydraté, de silice et d'oxyde de fer [4].

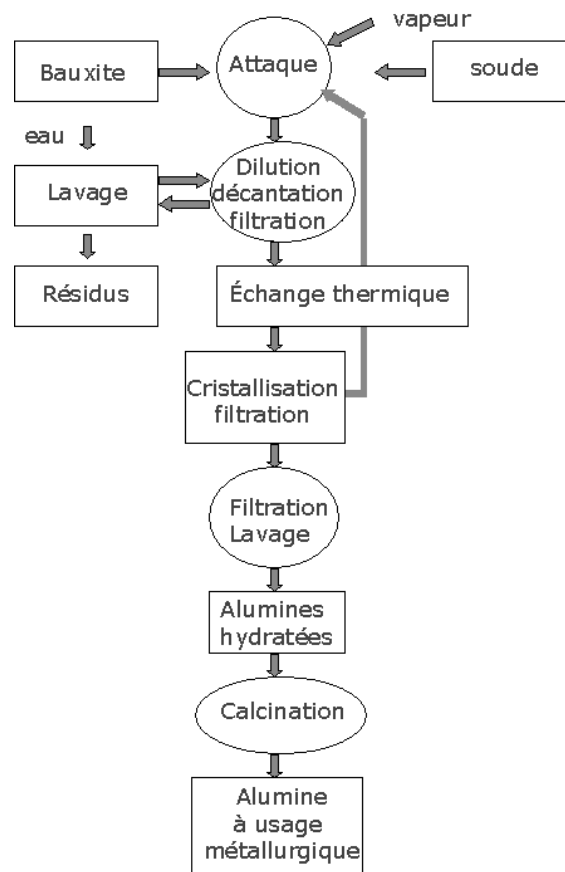


Figure I.2: procédés de fabrication de l'aluminium

I.3 Principales caractéristiques d'aluminium :

La production d'aluminium ne représente qu'environ 2 % de celle des aciers en termes de tonnage. Toutefois, ce métal et ses alliages se classent en deuxième position dans l'emploi des matériaux en métal. L'aluminium occupe cette position grâce à un ensemble de caractéristiques qui en font un matériau exceptionnel. L'aluminium et ses composants jouent toujours un rôle essentiel dans divers secteurs de l'industrie. Son utilisation augmente chaque jour en raison de ses caractéristiques spécifiques [4].

Chapitre I : aluminium et ses alliages

I.4 L'outillage d'une fonderie d'aluminium :

Les différents outillages de fonderie aluminium :

- La matière première.
- Le four de fusion.
- La louche
- Le moule
- L'enduit (blanche, noire) [4].

I.5 Principales propriétés de l'aluminium

I.5.1 Propriétés physico – chimiques de l'aluminium :

L'aluminium est un élément du groupe III dans le tableau périodique. Son numéro atomique est $Z = 13$. Il possède une structure cubique à faces centrées avec un paramètre de maille $a = 4,0412 \text{ \AA}$. L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. C'est un métal blanc brillant, de densité $2,7 \text{ g/cm}^3$, fondant à $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est assez mou et malléable. C'est entre 100 et $150 \text{ }^\circ\text{C}$ qu'il se travaille le mieux, ce qui permet de confectionner avec facilité des pièces de profilés variées et très complexes.

L'aluminium est pratiquement inaltérable à l'air car il est recouvert d'une fine couche protectrice d'alumine. L'eau distillée, l'eau de pluie, et la vapeur d'eau n'ont aucune action sensible sur l'aluminium. En revanche, l'eau de mer l'attaque. Les acides ont peu d'effet sur l'aluminium, tout comme l'eau oxygénée. Par contre, la soude en solution, le carbonate de soude, le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium l'attaquent fortement [5].

I.5.2 Propriétés mécaniques :

La résistance à la rupture de l'aluminium est de l'ordre de 80 MPa pour l'aluminium ordinaire et de 60 MPa pour l'aluminium extra pur. La dureté de l'aluminium est accrue par la présence d'impuretés (cuivre, nickel, argent, phosphore, etc.).

Le défaut de l'aluminium est donc sa faible résistance mécanique, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour la réalisation d'éléments porteurs dans la construction. Cependant, les qualités mécaniques de l'aluminium sont fortement améliorées lorsqu'on lui ajoute du cuivre, du manganèse et du magnésium pour se présenter sous forme d'alliages légers.

Chapitre I : aluminium et ses alliages

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire [5].

I.5.3 Mise en forme de l'aluminium :

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°C. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Ce matériau peut être mis en forme soit par corroyage ou soit par fonderie.

On peut lui faire subir :

- A froid : laminage, filage, pliage, ...
- A chaud : moulage, soudage, usinage, et le laminage.

I.6 Alliages d'aluminium :

L'aluminium à l'état pur présente des faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments d'addition pour utiliser l'aluminium sous forme d'alliages. Certains éléments d'alliage augmentent la résistance mécanique ou la résistance à la corrosion. D'autres améliorent l'aptitude à l'usinage, la malléabilité, la soudabilité et la résistance aux températures élevées.

Deux grandes familles :

- Les Aluminiums corroyés, obtenus par déformation plastique (Laminage...)
- Les Aluminiums pour la fonderie.

Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempant [5].

Chapitre I : aluminium et ses alliages

I.7 Désignation des alliages d'aluminium :

Tableau 1 : séries principales des alliages d'aluminium

Série	Désignation	Principaux éléments d'alliages	Les principales phases
1000	1xxx	Aluminium pur à 99%	
2000	2xxx	Aluminium et cuivre (Al-Cu)	Al_2Cu , Al_2CuMg
3000	3xxx	Aluminium et manganèse (Al-Mn)	Al_6Mn
4000	4xxx	Aluminium et silicium (Al- Si)	
5000	5xxx	Aluminium et magnésium (Al-Mg)	Al_3Mg
6000	6xxx	Aluminium, magnésium et silicium (Al-Mg-Si)	Mg_2Si
7000	7xxx	Aluminium, zinc et magnésium (Al-Zn-Mg)	$MgZn_2$
8000	8xxx	Aluminium et autres (Al- Li), (Al-Fe-Si)	

I.8 Différents types d'alliages d'Aluminium :

En raison de ses faibles propriétés mécaniques, l'aluminium pur ne peut pas être utilisé pour construire des structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments supplémentaires à l'aluminium sous forme d'alliages doit être utilisé, certains éléments d'alliage améliorent la

Chapitre I : aluminium et ses alliages

résistance mécanique ou la résistance à la corrosion, certains améliorent l'usinabilité, la formabilité, la soudabilité et la résistance aux hautes températures.

Deux grandes familles se présentent :

- 1- Alliages corroyés : coulés en fonderie sous forme de plaque ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits (tôles, profilés...) par laminage ou par filage.
- 2- Utilisés pour la fabrication de pièces par la coulée du métal liquide dans des moules en sables ou en coquille [6].

I.8.1 Les alliages d'aluminium de corroyage :

Cette famille-là plus populaire comprend les barres, les profilés, les tôles, les plaques et les bandes de tous les produits laminés courants. Produits de filature et d'étirage fils. Forgeage ou produits destinés au forgeage, etc.

Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications :

- Résistance mécanique ;
- Ductilité ;
- Résistance à la propagation des fissures ;
- Résistance à la fatigue (efforts alternés) ;
- Résistance aux multiples formes de corrosion ;
- Conductibilité électrique [7].

I.8.2 Les alliages de moulage :

Obtenus par fonderie seulement, on trouve :

- **Les alliages Al-Si** : ce sont numériquement et industriellement les plus importants

Parmi les alliages moulés.

Exemple : Al-Si 13 : alpax : bonne coulabilité, utilisé pour la fabrication de blocs et carters de Moteur et de boîte de vitesse, appareillage électrique, cycle, bâtiment.

- **Alliages Al-Cu** : Ces alliages présentent :
 - Une aptitude au moulage variable mais assez médiocre
 - Une résistance à la corrosion insuffisante en milieu agressif marin
 - Une bonne usinabilité

Chapitre I : aluminium et ses alliages

Exemple : Al-Cu5MgTi : caractéristiques mécaniques les plus élevées (statique, endurance, Fatigue). Utilisation : aéronautique, armement, véhicules divers

- **Alliages Al-Zn**

Alliages autotremnants.

- **Alliages Al-Mg :**

- Usinage facile
- Bonne aptitude à l'anodisation
- Bel aspect après polissage
- Excellente tenue à la corrosion atmosphérique ou marine

- **Alliages Al-Mn :**

Température de début de fusion élevée

- **Alliages Al-Si :**

Utilisé pour les coussinets et pièces de frottements

- **Autres éléments d'alliage :**

Titane, Lithium : L'addition de lithium diminue la densité et augmente le module d'élasticité et la résistance mécanique des alliages d'aluminium. Le titane est ajouté à l'aluminium principalement comme affineur du grain.

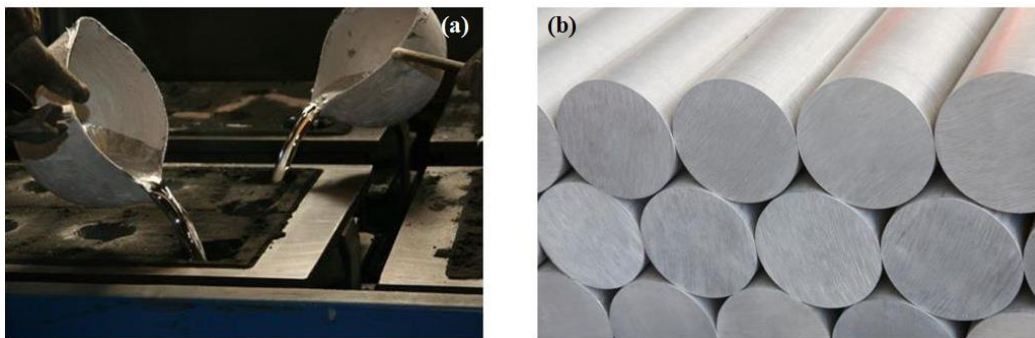


Figure I.3: les types d'alliage d'aluminium : (a) alliage de fonderie , (b) alliage de corroyage

I.9 Les Alliages de fonderie :

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage en sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire. Inconvénient : grand retrait au moulage (3,5 à 8,5% en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce. Beaucoup des alliages usuels contiennent suffisamment de silicium pour entraîner une réaction eutectique,

Chapitre I : aluminium et ses alliages

ce qui donne aux alliages un bas point de fusion, une bonne fluidité et une bonne mouillabilité. Le moulage en moule métallique ("en coquille", sous pression...) amène un refroidissement plus rapide que les autres procédés (sable...), ce qui provoque un affinage du grain et une amélioration des propriétés mécaniques. Les additions de bore et de titane provoquent également un affinage du grain. Le cuivre, le magnésium et le zinc engendrent ou favorisent le phénomène de maturation.



Figure I.4: les alliages de fonderie

I.10 Principales utilisations de l'aluminium :

L'aluminium est un matériau inestimable pour l'emballage, en raison de son innocuité, de son herméticité et de sa capacité à bloquer les rayons ultraviolets. Il est largement employé dans la fabrication de profilés laminés tels que des cornières, des profils en U, en T, ainsi que des tuyauteries de sections rondes ou rectangulaires

- 1- Sa légèreté permet d'alléger les structures,
- 2- La rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des réalisations techniques performantes pour longtemps : profilés à coupure thermique, fenêtres ou menuiseries durablement étanches, garantissant une parfaite isolation thermique et acoustique, intégration aux façades de châssis de panneau solaires pour la production d'électricité renouvelable, etc.
- 3- Sa résistance à la corrosion réduit les travaux de maintenance et étend la durée de vie des constructions,
- 4- Ininflammable, non toxique au contact, non émetteur de poussière ni de vapeur,

L'aluminium dans le bâtiment est un matériau sain et sûr. L'aluminium est 100% recyclable. Dans les secteurs du bâtiment et du transport, le taux d'aluminium récupéré et

Chapitre I : aluminium et ses alliages

recyclé atteint 95%. Du point de vue du développement durable, le recyclage de l'aluminium représente donc des avantages décisifs.

- Il permet une importante économie de ressource,
- Il n'utilise que 5% de l'énergie nécessaire à la production primaire, - il émet 95% de gaz à effet de serre en moins [8].

I.10 Avantages et inconvénients de l'aluminium :

I.10.1 Avantages :

L'aluminium est un matériau extraordinaire en raison de ses nombreux avantages, sa longue durée de vie, son entretien minimal et sa contribution à l'efficacité énergétique.

- **Sa rigidité** : Est supérieure à celle de l'acier en raison de sa section transversale plus élevée et de son profil plus avantageux que celui de l'acier.
- **Durable** : L'aluminium est très résistant à la corrosion et peut faire le travail avec un minimum d'entretien. Cependant, une sélection appropriée des alliages et des méthodes d'assemblage est essentielle pour assurer une durabilité maximale.
- **Résistance à la corrosion** : Une couche d'oxyde solide (Al_2O_3) se forme naturellement à la surface de l'aluminium au contact de l'air. Cette passivation naturelle agit comme une barrière entre l'atmosphère et l'Aluminium, protégeant l'alliage d'Aluminium de la corrosion.
- **Malléable** : L'aluminium est un matériau facile à manipuler. L'avantage des fonderies réside dans son point de fusion relativement bas. En outre, l'aluminium présente une dureté élevée. Cela rend le métal facilement accessible au laminage, au forgeage, à l'extrusion et à tous les autres types de déformation par déformation plastique.
- **Conductivité** : L'aluminium offre une conductivité électrique et thermique remarquable. En raison de sa conductivité/densité, l'aluminium est employé dans les fils haute tension. L'aluminium est également largement utilisé dans les systèmes de récupération de chaleur comme les échangeurs de chaleur des climatiseurs, les radiateurs de voiture, etc.
- **Recyclage** : L'aluminium est l'un des matériaux les plus recyclés. Près de 75 % de l'aluminium produit dans le monde est encore utilisé aujourd'hui depuis le début de la production industrielle. L'Aluminium peut être recyclé indéfiniment dans

Chapitre I : aluminium et ses alliages

une véritable boucle fermée. Le recyclage de l'aluminium est relativement facile et utilise 95 % moins d'énergie que le processus d'électrolyse. L'économie de l'aluminium contribue également à son statut de l'un des métaux les plus recyclés au monde [9].

- **Soudage :** Le processus de soudage est facile grâce à la présence d'une couche de protection en oxyde d'aluminium.

Le processus de soudage de l'aluminium dépend de la présence de gaz protecteur celui-ci peut se faire par les procédés (TIG, MIG) ou en utilisant un faisceau d'électrons. Toutefois, si les alliages non trempés ne présentent pas aucun problème, il est possible que des problèmes surviennent avec les alliages à taux de trempe élevé (série 2000 ou Al-Cu).

Il est possible que la corrosion par exfoliation survienne même après le soudage des alliages de séries 7000 et des alliages Al-Zn.

I.10.2 Inconvénients de l'aluminium :

- **L'aluminium est un matériau peu résistant aux chocs :**

Évidemment, l'aluminium est un métal solide, mais lorsqu'il est fin, il est moins résistant, ce qui implique qu'il ne peut pas résister aux coups et aux chocs sans se déformer ni s'enfoncer. Toutefois, l'épaisseur de l'aluminium augmente sa durabilité. En cas d'impossibilité de cette solution, il est nécessaire de l'associer à un métal plus robuste.

- **Une matière à un coût plus élevé :**

Selon les éléments que vous construisez avec de l'aluminium, vous devrez prévoir un budget 3 à 10 fois plus élevé que n'importe quel autre matériau, car l'aluminium est plus coûteux que le bois et beaucoup plus coûteux que le PVC. [10]

II. Les alliages d'aluminium de fonderie AL-SI

II. 1 Introduction :

Les alliages de silicium avec l'aluminium étaient déjà connus par Sainte-Claire Deville et par Wöhler, mais leur application industrielle a été améliorée grâce à l'utilisation de sels alcalins, améliorant ainsi sensiblement leurs propriétés mécaniques. Les alliages proches de l'eutectique ont alors été employés dans la fonderie des métaux légers. La structure des alliages aluminium-silicium est simple : deux faibles solutions solides du côté de l'aluminium et du silicium, et des mélanges formant des eutectiques. Seules les propriétés mécaniques des

Chapitre I : aluminium et ses alliages

alliages, surtout au voisinage de l'eutectique, ont été soigneusement étudiées, alors que l'étude des autres propriétés physiques, en fonction de la composition, a été négligée, à l'exception de l'analyse thermique. [11]

Les alliages aluminium-silicium sont les plus appropriés pour la réalisation des pièces de fonderie. De nombreuses nuances existent souvent avec l'ajout de magnésium et de titane. Les alliages d'aluminium de fonderie appartiennent, selon la classification de l'Aluminium Association, à la série 3xx.x pour les alliages Al-Si additionnés de cuivre ou de magnésium, et à la série 4xx.x pour les alliages Al-Si. La teneur en silicium de ces alliages se situe autour de la composition eutectique à 12,6 % en poids de Si et reste généralement comprise entre 5 et 23 % en poids. L'ajout de silicium à la matrice de l'aluminium permet d'augmenter la fluidité du liquide, d'abaisser la température de fusion, et de réduire la contraction qui intervient lors de la solidification. Toutes ces propriétés concourent à donner aux alliages Al-Si les qualités recherchées pour les procédés de fonderie. [13]

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 [12]

II.2 Alliage aluminium silicium :

Les alliages au silicium sont les plus couramment utilisés dans le domaine du moulage, il en existe différentes versions qui représentent environ 70% du poids des pièces moulées. Leurs caractéristiques mécaniques varient en fonction de leur composition et du mode de coulée, qu'ils soient en sable, en coquille ou sous pression. Il existe de nombreux domaines d'application : appareils domestiques : bruleurs, bras de suspension automobile, blocs moteurs et culasses, radiateurs de chauffage central en. Les alliages de fonderie contenant du silicium, du magnésium et du zinc présentent une résistance à la corrosion exceptionnelle, contrairement aux alliages contenant des quantités importantes de cuivre (au moins 2 à 3%) qui présentent une résistance à la corrosion médiocre. Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium sont influencées par la composition chimique de ces substances, ainsi que le processus d'élaboration et les traitements thermiques réalisés effectués [14].

Chapitre I : aluminium et ses alliages



Figure I.5 : Les alliages d'aluminium de fonderie

II.3 Principaux effet de silicium dans un alliage

- Réduction sensible de dilatation thermique par le silicium ;
- Diminution légère de susceptibilité magnétique et de paramètre de maille par le silicium ;
- Amélioration de la coulabilité ;
- Pauvre usinabilité en raison de dureté de silicium [15].

II.4 Désignation :

II.4.1 Désignation européenne :

Les normes EN 1780-1, 1780-2 et 1780-3 englobent les règles de désignation correspondantes. Elles contrôlent l'existence simultanée de deux systèmes, l'un numérique et l'autre fondé sur les symboles chimiques des composants. Les normes EN 1706 sont applicables aux pièces moulées et EN 1676 sont applicables aux lingots pour récupération en aluminium allié. [8]

La désignation est composée successivement des éléments suivants :

- Le préfixe EN suivi d'un espace.
- La lettre A qui représente l'aluminium.
- Une lettre qui représente la forme du produit :

Chapitre I : aluminium et ses alliages

- B pour les lingots pour refusions en aluminium non allié ou allié
- C pour les pièces moulées,
- M pour l'alliage mère,
- W pour les fils machine...etc.

Pour la désignation numérique, cinq chiffres représentent les éléments de composition De l'alliage.

- Le premier chiffre indique l'élément principal de l'alliage :
 - Cuivre 2XXX
 - Magnésium 5XXX
 - Silicium 4XXX
 - Zinc 7XXX
- Le second des cinq chiffres indique le groupe d'alliage (exemple Al Si7Mg,
 - Al Si10Mg...etc.),
 - Le 3eme chiffre est arbitraire,
 - Le 4e chiffre est généralement 0
 - Le 5eme également sauf pour les alliages pour applications aérospatiales.

Pour la désignation chimique, l'alliage est désigné par le symbole Al suivi d'un espace, du ou des symboles chimiques des éléments d'alliages suivis de leur Teneur nominale, ordonnés de façon décroissante [5].

II.4.2 Désignation américaine :

C'est une désignation numérique à trois chiffres plus un quatrième après la virgule.

- Le premier désigne le groupe d'alliages. Le groupe 1xx, x désigne l'Al pur, et les autres groupes (2xx, x a 8xx, x) correspondent aux différentes familles d'alliages d'aluminium de fonderie.

Chaque chiffre représente l'élément d'alliage qui est present en plus grande teneur (Ex : 2xx, x pour les alliages à base de cuivre).

Chapitre I : aluminium et ses alliages

- Le 2eme et le 3 eme chiffre servent à indiquer spécifiquement l'alliage sauf dans le cas de la série 1xx, x ou ils indiquent la pureté.
- Le chiffre après la virgule indique l'état de l'alliage, par exemple 0 pour une pièce moulée et 1 pour un lingot
- Procédés de moulage les abréviations suivantes sont utilisées pour désigner les différents procédés de moulage
 - S : moulage au sable
 - K : moulage en coquille
 - D : moulage sous pression
 - L : moulage de précision (cire perdue)

Traitement thermique

Les conditions de traitement thermique sont désignées de la manière suivante :

- F : brut de fonderie
- O : recuit
- T1 : refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel
- (Maturation)
- T4 : mise en solution et vieillissement naturel (maturation)
- T5 : refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel Ou sur revenu
- T6 : mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximal
- T64 : mise en solution et sous-vieillissement artificiel (sous revenu)
- T7 : mise en solution et sur-vieillissement artificiel (sur-revenu)

Exemple de dénomination complète EN 1706 AC-42000KT6 (numérique) EN 1706ACAlSi7MgKT6 (chimique) Désigne un alliage d'aluminium 42000 pour pièce moulée, coulé en coquille avec traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximal [4].

II.5 Alliages Normalisés :

Onze groupes alliages différents sont identifiés par la norme européenne EN 1706, Les alliages sont classés dans chaque groupe en fonction de leur tonnage de pièces. Confectionnées

Chapitre I : aluminium et ses alliages

en Europe. La norme EN 1706 définit les spécifications des compositions chimiques pour tous les alliages [6].

II.5.1 Alliages Al Cu :

Les alliages de fonderie sont durcis par le cuivre, surtout après un traitement thermique complet T6. Grâce à la présence de magnésium, il est possible de traiter le T4 en combinant la résistance à la traction et l'allongement, ce qui favorise l'allongement. Le cuivre présente des avantages en termes d'usinabilité et de résistance à la chaleur, mais des inconvénients en termes de résistance à la corrosion. Après le traitement thermique T4 pour l'alliage Al Cu4MgTi et T6 pour l'alliage Al Cu4Ti, les deux alliages de ce groupe présentent les caractéristiques mécaniques les plus élevées parmi les alliages normalisés, tant en termes de stabilité que d'endurance ou de résistance. Cependant, leur solidité est faible et restreint leur utilisation aux pièces peu complexes et très sollicitées [6].

II.5.2 Alliages Al Si MgTi :

Une teneur croissante en silicium favorise les propriétés de fonderie des alliages de la série 4xx.x. Elle augmente en particulier leur aptitude à la coulée de pièces minces et étanches, mais défavorise l'usinabilité et l'aptitude au traitement d'anodisation de décoration. Au-delà d'une teneur de 4%, la couche d'oxyde prend en effet un aspect grisâtre : les alliages ont alors une bonne aptitude au traitement d'anodisation de protection, mais non de décoration. L'alliage de ce groupe, Al Si2MgTi, possède une bonne aptitude à l'oxydation anodique de protection et de décoration à cause de sa faible teneur en silicium ;

Il a des propriétés de fonderie médiocres, mais conserve de bonnes propriétés mécaniques grâce à la présence de magnésium qui permet le traitement à l'état T6.

Il est principalement utilisé pour des pièces de quincaillerie de bâtiment [7].

II.5.3 Alliages AlSi7Mg :

Il s'agit d'alliages avec de bonnes caractéristiques mécaniques. La présence moyenne de silicium permet d'obtenir des propriétés de fonderie excellentes, tandis que la présence de magnésium permet des traitements thermiques. T6 ou T64. Des degrés de durcissement variables peuvent donc être obtenus, ce qui permet de réaliser des écarts intéressants entre la charge de rupture et la limite d'élasticité d'une partie, et l'allongement d'autre partie [9].

Les alliages Al Si7Mg0,3 et Al Si7Mg0,6 sont les deux alliages les plus couramment employés dans des applications où l'on recherche des propriétés mécaniques de ces alliages exceptionnels liées à des pièces de forme complexe. Parmi les pièces utilisées dans le domaine

Chapitre I : aluminium et ses alliages

de l'aéronautique, on peut citer les roues de voitures, les pièces de suspension, les culasses de moteurs turbo diesel très sollicitées, ...etc. [8].

II.5.4 Alliages AlSi10Mg :

La présence de silicium confère à cet alliage une structure similaire à celle de l'eutectique de cette famille et lui confère des propriétés de fonderie exceptionnelles. Le traitement thermique est rendu possible grâce au magnésium. Les caractéristiques mécaniques sont moyennes, ce qui permet à ces alliages d'être utilisés dans de nombreuses applications. Les cinq alliages de cette famille se distinguent par leurs niveaux d'impuretés : seul l'EN AC-Al Si9Mg est un alliage de première fusion, tandis que les quatre autres sont des alliages de seconde fusion.

Les alliages EN AC-Al Si10Mg(a), EN AC-Al Si10Mg(b) et l'EN AC-Al Si10Mg(Cu) ne diffèrent essentiellement que par leur teneur en cuivre, élément durcissant et néfaste pour la résistance à la corrosion des alliages, et sont utilisés pour le moulage en coquille ou basse pression de pièces diverses. La variante EN AC-Al Si9Mg est utilisée pour des applications où l'on recherche des propriétés mécaniques élevées après traitement thermique, mais peut être utilisée également sans traitement thermique pour la réalisation de pièces devant posséder une bonne ductilité. La variante EN AC-Al Si10Mg (Fe) est utilisée pour le moulage sous pression lorsqu'une bonne résistance des pièces à la corrosion, ou un usage alimentaire des pièces sont requis. [9]

II.5.5 Alliages AlSi :

Le système aluminium-silicium forme un eutectique pour une teneur en silicium de 12,6% en masse.

Les systèmes eutectiques possèdent en général d'excellentes propriétés de fonderie, et l'eutectique AlSi a été l'un des premiers alliages de fonderie à être utilisé industriellement.

Le traitement dit de « Modification » par le sodium, découvert par Aladag Paz en 1920[6], a permis d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de cet alliage par transformation de la structure naturellement aciculaire en structure fibreuse. Cela a contribué à l'essor des alliages de fonderie à cette époque. Les alliages de cette famille sont eutectiques ou voisins de l'eutectique. On réservera les alliages eutectiques EN AC-Al Si12(a) et EN AC-Al Si12(b) à la coulée de pièces en coquille minces et complexes à cause de leur très bonne aptitude au moulage, la première variante ayant une teneur en cuivre plus faible favorisant une bonne tenue à la corrosion. Les variantes hypo eutectiques sont d'usage plus général, et la nuance EN

Chapitre I : aluminium et ses alliages

AC-Al Si11 est très utilisée par exemple pour la réalisation de roues de voitures à l'état non traité thermiquement. Les nuances EN AC-Al Si12(Fe) et EN AC-Al Si9 sont utilisées en moulage sous pression, la dernière variante présentant des allongements importants à cause des impuretés en faible teneur. [8]

II.5.6 AlSi5Cu :

Les alliages tels que les alliages EN AC-AlSi6Cu4, EN AC-AlSi5Cu3Mg, EN ACAISi5Cu3Mn et EN AC-AlSi5Cu3 sont des alliages utilisés couramment pour la fabrication. De composants automobiles tels que les culasses ou les carters. Leur solidité est excellente, la présence de cuivre facilite l'usinage et augmente la résistance à la chaleur, tandis que le magnésium permet le traitement thermique lorsque l'on souhaite des propriétés mécaniques élevées, comme c'est le cas pour certaines culasses de moteurs. Diesel ou turbo Diesel.

L'alliage EN AC-AlSi5Cu1Mg est un alliage à caractéristiques mécaniques élevées à l'état T6, fréquemment employé dans la fabrication de pièces pour l'industrie aéronautique ou automobile (turbines de turbocompresseurs). [16]

II.5.7 Alliages AlSi9Cu :

Les alliages EN AC-Al Si9Cu3(Fe), EN AC-AlSi11Cu2(Fe) et EN ACAISi9Cu3(Fe)(Zn) sont presque exclusivement utilisés en moulage sous pression, à cause de leurs bonnes propriétés de fonderie associées au prix de revient intéressant lié au recyclage. Ce sont donc des alliages de 2nd fusion, où les teneurs en impuretés comme le fer ou le manganèse sont notables, et favorisent le non collage au moule de ces alliages sans trop abaisser les propriétés mécaniques à cause de la structure très fine due aux dites de refroidissement élevées du procédé.

Ces alliages couvrent plus de 90% du tonnage des pièces coulées sous pression, telles que carters cylindres, carters de boîtes de vitesses ou d'embrayage, corps de pompe à eau, semelles de fers à repasser, etc. L'alliage EN AC-AlSi8Cu3 est utilisé à la fois pour la sous-pression et pour le moulage en coquille pour des pièces d'usage général. Les alliages EN ACAISi7Cu3Mg, EN AC-AlSi9Cu1Mg et EN ACAISi7Cu2 sont d'usage également général, et sont utilisés comme la famille précédente pour le moulage en coquille ou basse pression de culasses ou de blocs, à l'état traité ou non selon les spécifications [5]

II.5.8 Alliages AlSi(Cu) :

Les alliages de cette famille sont des alliages eutectiques, donc à propriétés de fonderie excellentes. On réservera la nuance EN AC-Al Si12(Cu) pour la coulée par gravité de pièces

Chapitre I : aluminium et ses alliages

très minces et d'épaisseurs uniformes, et la nuance EN AC-Al Si12Cu1(Fe) pour la coulée sous pression de pièces minces diverses. [6]

II.5.9 Alliages AlSiCuNiMg :

La seule nuance normalisée de cette famille, l'Al Si12CuNiMg, est exclusivement réservée à la réalisation de pistons ou de cylindres à ailettes. C'est un alliage eutectique AlSi à propriétés de fonderie excellentes, avec des additions de cuivre, nickel et magnésium pour favoriser la tenue à chaud, typiquement 250 °C.

II.5.10 Alliages AlMg :

Ce sont des alliages ayant une très bonne tenue à la corrosion, notamment en atmosphère marine. Ils sont particulièrement aptes à l'oxydation anodique de décoration, et sont utilisés par exemple pour des pièces d'accastillage de bateaux ou pour la quincaillerie de bâtiment.

Ils ont malheureusement des propriétés de fonderie médiocres, et sont sensibles à l'oxydation à l'état liquide.

Les nuances EN AC-Al Mg5 et EN AC-Al Mg5(Si) peuvent être également utilisées pour des pièces où l'on recherche une tenue à chaud élevée, car les alliages AlMg sont les alliages d'aluminium moulés dont les propriétés à chaud sont les plus élevées au-dessus de 250 °C.

La nuance EN AC-Al Mg9 est utilisée pour le moulage sous pression, mais assez rarement. [17]

II.5.11 Alliages AlZnMg :

Cette nuance EN AC-Al Zn5Mg est dite autotrempeant, et acquiert par simple mûrissement à température ambiante des caractéristiques mécaniques qui se rapprochent de celles des alliages traités thermiquement. Elle présente un intérêt pour la construction moulée-soudée.

Mais sa mise en œuvre est délicate à cause de propriétés de fonderie médiocres, et en particulier la coulabilité, et ne convient pratiquement que pour la coulée en sable. [16]

II.6 Alliages non normalisés :

L'ensemble des alliages ne sont pas regroupés dans la norme européenne, et certains d'entre eux sont parfois employés en raison de leur intérêt spécifique.

Chapitre I : aluminium et ses alliages

II.6.1 Alliages autotrempants :

Ces alliages de la famille aluminium-zinc-silicium, comme par exemple l'Al Zn10Si8Mg, ont la particularité de présenter un durcissement structural par simple maturation à la température ambiante, avec des propriétés de fonderies rapprochant de celles des alliages Al-Si hypo eutectiques.

Les propriétés mécaniques de ces alliages se rapprochent, sans toutefois les atteindre, de celles des alliages traités thermiquement.

Les applications concernent des pièces à résistance mécanique moyenne, obtenues surtout par moulage en coquille (le moulage au sable de pièces épaisses conduit des allongements faibles), où les frais de transformation sont réduits par l'absence de traitement thermique et pour lesquelles on recherche une grande stabilité dimensionnelle. [7]

II.6.2 Alliages à très haute résistance mécanique :

Ce sont des alliages dérivés de l'Al Cu4MgTi, qui se caractérisent par leur très faible teneur en impuretés, notamment en fer et en silicium (< 0,02%), et par des additions de zinc, de manganèse ou d'argent.

Ils possèdent les propriétés mécaniques les plus élevées de tous les alliages d'aluminium moulés.

Ils doivent subir un traitement de sur-revenu (températures légèrement supérieures, de 5 °C à 10 °C, à celles pratiquées habituellement) pour les désensibiliser à la corrosion sous tension.

La mise en solution est également assez longue et réalisée par paliers.

Ces alliages sont coûteux, et trouvent leurs principales applications dans les industries aéronautiques ou spatiales.

Les principales nuances utilisées sont : Al Cu4Zn3Mg, Al Cu5MgMnTi et Al Cu5MgAgTi [7].

II.6.3 Alliages ductiles pour moulage sous pression :

Les nouvelles exigences des constructeurs automobiles en matière d'allègement ont fait apparaître, pour la réalisation de pièces de structures devant résister au crash, de nouvelles familles d'alliages ductiles et aptes au moulage sous pression. Ce sont des alliages à plus faibles teneurs en impuretés ou en éléments. En particulier, les teneurs en fer et en manganèse, éléments qui favorisent le non collage des alliages, mais diminuent leurs propriétés mécaniques, doivent faire durcissant que les alliages pour moulage sous pression classiques. L'objet d'une optimisation précise [9].

Chapitre I : aluminium et ses alliages

Les alliages Al Si11MgSr ou Al Si9MgSr à teneurs moyennes en fer et manganèse permettant d'obtenir un bon compromis collage au moule propriétés mécaniques, ainsi que les alliages Al Mg5Si2 sont parmi les nuances les plus utilisées [9].

II.6.4 Alliages aluminium-manganèse :

Les nuances utilisées sont l'Al Mn4 et l'Al Mn2Ni2. Ces alliages sont caractérisés par une température de début de fusion relativement élevée, de l'ordre de 658 °C par exemple pour l'alliage Al Mn4.

Ils sont donc peu fusibles et peuvent être utilisés comme grilles de brûleurs, chapeaux de brûleurs coulés En coquille ou sous pression. Leur coulabilité n'est pas très bonne, et ils présentent une certaine tendance la crique.

II.7 Effets des éléments d'addition :

II.7.1 Silicium Si :

L'effet du silicium dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des caractéristiques de fonderie. L'addition de silicium améliore la fluidité de façon spectaculaire, ainsi que la résistance à chaud. Les compositions les plus utilisées dans le processus de moulage de l'aluminium sont celles dans lesquelles le silicium joue un rôle majeur. Les alliages commerciaux couvrent les gammes hypo-eutectiques et hyper-eutectiques jusqu'à environ 30 % de Si. L'augmentation de la teneur en silicium améliore la fluidité, permettant ainsi le remplissage de parois minces et la reproduction de modèles plus complexes et détaillés. Les alliages aluminium-silicium sont généralement plus résistants à la fissuration pendant la solidification et présentent une excellente coulabilité. Le pourcentage de liquide dans l'intervalle de solidification est dicté par la composition initiale et par le degré de refroidissement [4]. Pour des processus de solidification plus rapides, tels que le moulage sous pression et la coulée en moule permanent, et pour des sections plus minces où une solidification plus rapide a lieu, la porosité due au retrait est fortement affectée par la température à laquelle l'alimentation en liquide des structures partiellement solidifiées cesse. L'alimentation pour minimiser la porosité de rétrécissement est d'autant meilleure que la fraction volumique solidifiée est augmentée à la température où l'alimentation en liquide. Pour cette raison, la teneur en silicium la plus désirable dans les alliages aluminium-silicium correspond à la vitesse de solidification caractéristique du processus. Pour les processus de taux de refroidissement lents tels que le moulage en plâtre, en investissement et en sable, la gamme préférée est de 5 à 7 % de Si, pour le moulage en moule permanent 7 à 9 %, et pour le

Chapitre I : aluminium et ses alliages

moulage sous pression de 8 à 12 %. Les bases de ces recommandations reposent sur la relation entre le taux de refroidissement, la fluidité et l'effet du pourcentage d'eutectique sur l'alimentation au fur et à mesure que la solidification progresse.

Le silicium se combine avec le magnésium pour former Mg_2Si dans les alliages traitables thermiquement. Il se combine également avec le fer et d'autres éléments pour former des phases insolubles complexes. Le silicium permet également de réduire l'effet du coefficient d'expansion thermique.

III. Types de traitements appliqués aux alliages d'aluminium :

III.1 Traitements thermiques des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium peuvent être traités thermiquement afin de garantir la solidité des alliages d'aluminium, on utilise la technique de trempe et de vieillissement.

En utilisant le recuit, on élimine toutes les structures hors d'équilibre et les défauts de structures causés par la déformation, ce qui altère la plasticité de l'alliage.

a. Trempe et vieillissement :

La diminution de la température entraîne une diminution de la solubilité dans l'aluminium de la plupart des composants, ce qui permet d'utiliser la trempe et le vieillissement pour renforcer les alliages.

• Trempe des alliages d'aluminium :

Les buts et les effets de la trempe structurale des alliages d'aluminium diffèrent complètement de la trempe martensitique des aciers. Le processus thermique de cette méthode implique :

- Le refroidissement jusqu'à atteindre la température de dissolution totale ou partielle des phases.
- Excès d'intermétalliques dans l'aluminium.
- La conservation de cette température.
- Il est nécessaire de refroidir de manière rapide (hypertrempe) jusqu'à la température ambiante afin d'obtenir un solide chargé.
- Le maintien isotherme ultérieur entraîne une rigidification de l'alliage. Il peut être effectué à la température ambiante (vieillissement naturel ou maturation) ou à une température plus élevée (vieillissement artificiel ou simplement vieillissement).

Chapitre I : aluminium et ses alliages

➤ Une fois que les alliages de forge ont été trempés, ils sont refroidis à l'eau froide et les moulages de forme sont soumis à une eau portée de 50 à 100 °C afin de supprimer les impuretés

➤ Les alliages de forge sont refroidis à l'eau froide après la trempe, tandis que les moulages de forme sont portés à une température de 50 à 100 °C afin d'éviter le gauchissement et la formation de fissures. Après la trempe, tous les alliages présentent une faible résistance.

b. Vieillessement des alliages trempés :

La trempe est suivie d'un processus de vieillissement qui consiste à maintenir l'alliage à l'état ambiant pendant quelques jours (maturation) ou à le maintenir à une température plus élevée pendant 10 à 24 heures (vieillessement artificiel ou par revenu). Le vieillissement entraîne la dégradation de la solution solide sursaturée, ce qui entraîne une rigidification de l'alliage.

La décomposition de la solution solide avec isolation de la phase en excès à ces températures n'est pas observée lors du vieillissement naturel (maturation à 20 °C) ou artificiel (durcissement par le revenu à basses températures, inférieures à 100 ou 150 °C).

c. Recuit des alliages d'aluminium :

• Recuit d'homogénéisation :

Les lingots avant le corroyage sont soumis à ce traitement afin de supprimer la ségrégation eutectique, ce qui entraîne la formation d'une solution solide inhomogène et le dépôt d'inclusions eutectiques fragiles hors d'équilibre telles que Al_2CuMg , Mg_2Si et $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ aux joints des grains et entre les branches des dendrites.

L'homogénéisation entraîne une uniformisation de la composition des cristallites de la solution solide, tandis que les combinaisons intermétalliques se déposent sous forme de fines inclusions secondaires réparties de manière homogène.

Cela entraîne une amélioration de la plasticité de l'alliage coulé, ce qui entraîne une augmentation du degré de corroyage lors du formage à chaud, une augmentation de la vitesse de filage et une réduction des déchets technologiques.

L'homogénéisation contribue à l'obtention d'une structure à grains fins dans les tôles recuites et diminue l'aptitude à la corrosion sous tension. Le cycle thermique de ce recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température élevée de 450 à 520 °C.
- Un maintien qui varie de 4 à 40 heures.

Chapitre I : aluminium et ses alliages

- Un refroidissement lent à l'air ou dans le four.

- **Recuit de recristallisation :**

Le processus de recuit de recristallisation implique de chauffer l'alliage déformé à des températures supérieures à celles de la recristallisation initiale.

Elle est utilisée afin de prévenir l'écroutissage et d'obtenir un grain fin.

Lorsque la déformation atteint 50 à 75 % dans la plupart des alliages d'aluminium, la température de début de recristallisation varie de 290 à 400 °C.

La température de recuit de recristallisation varie de 350 à 500 °C et peut être maintenue de 0,5 à 2,0 heures en fonction de la composition de l'alliage.

Une fois que les alliages non durcis sont recristallisés par traitement thermique, la vitesse de refroidissement est déterminée de manière arbitraire. Pour les alliages durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement allant jusqu'à 200 à 250 °C doit être inférieure ou égale à 30 °C/h. Le recuit comme opération intermédiaire est appliqué dans le travail à froid ou entre le corroyage à chaud et à froid.

Le recuit incomplet est une méthode utilisée pour obtenir des propriétés intermédiaires entre l'état écroui et recristallisé lors du recuit de recristallisation. Dans cette situation, il est nécessaire que la température de recuit soit inférieure à celle de la fin de recristallisation afin d'obtenir une structure polygonale ou partiellement recristallisée, qui écarte en partie l'écroutissage. Le recuit est généralement utilisé pour les alliages de forge et de laminage qui ne sont pas soumis au durcissement par trempe et au vieillissement.

- **Recuit d'adoucissement des alliages ayant subi la trempe et le vieillissement :**

Il est effectué à une température de 350 à 450 °C avec un séjour de 1 à 2 h. Ces températures assurent la décomposition complète de la solution solide sursaturée et la coalescence des phases qui durcissent. La vitesse de refroidissement ne doit pas dépasser 30 °C/h. Après le recuit, l'alliage possède une faible charge de rupture, une plasticité suffisante et une résistance élevée à la corrosion sous tension.

III.2 Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium :

Tous les métaux et alliages peuvent être traités par déformation plastique, dans le domaine de l'aluminium ce traitement est réservé pour certaines familles comme : 1000, 3000, 4000 partiellement, 5000, et 8000 [18].

Chapitre I : aluminium et ses alliages

A. Durcissement par écrouissage :

Afin de modifier les caractéristiques mécaniques de certains alliages d'aluminium sans traitement thermique, on les sollicite à la déformation plastique macroscopique (consolidation) ou microscopiques (écrouissage). L'écrouissage de l'aluminium ou d'un alliage d'aluminium a pour effet d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique (limite élastique et charge de rupture), avec en contrepartie une diminution de sa plasticité (allongement à la rupture, aptitude à la déformation).

B. Recristallisation :

Pour diminuer le nombre de défauts engendrés par l'écrouissage (état métastable), un traitement thermique à température suffisante doit être appliqué. La structure écrouie sera remplacée par une nouvelle structure à grains reformés. Ce type de traitement ne se produit qu'après une déformation minimale, dite "écrouissage critique", il est caractérisé par une résistance mécanique, dureté minimales et une plasticité maximale " état optimal pour réaliser des déformations ou mises en forme à froid importantes et difficiles"

Ces types de traitement concernent les alliages de :

Série 1000 (aluminiums purs) :

La pureté de cette série d'alliages est d'au moins 99 % Al. L'écrouissage améliore les propriétés mécaniques de l'état recuit qui sont faibles. Ils se prêtent facilement à la mise en forme par déformation plastique à froid, ils présentent une excellente résistance à la corrosion humide et marine. La grande conductibilité électrique de certains alliages de cette série permet de les utiliser comme conducteurs électriques. Ces alliages sont aussi recherchés pour les évaporateurs et de radiateurs vue leurs conductibilités thermiques élevée.

Genkai Hourri et al ont montrés que la réduction de la taille de grain d'un aluminium série 1100 de 40 μm à 2 μm , par un écrouissage, permet l'amélioration des caractéristiques mécaniques, telles que la résistance mécanique et la limite d'élasticité ainsi que la résistance à la fatigue par le retard de la phase amorçage [19].

Série 5000 "Al-Mg" :

Série présente la meilleure combinaison de la résistance mécanique et à la corrosion. Elle est l'unique série d'alliage d'aluminium permettant la réduction de la taille de grain à l'échelle nanométrique, aussi qu'une excellente soudabilité pour un taux de moins de 3 % de Mg.

Chapitre I : aluminium et ses alliages

T. Hausöl et al, montrent que la création de UFG "ultrafin-grain " jusqu'à 80nm à partir de 10 µm de l'alliage d'aluminium série 5754 a influé énormément les propriétés mécaniques par une augmentation considérable de la dureté, la limite d'élasticité, la résistance mécanique et diminué remarquablement la ductilité. Cette dernière peut être récupérée par un court traitement thermique de 250 °C.

Série 4000 :

"Al-Si" La série Al-Si avec l'élément principal silicium offre une large gamme d'alliage, elle est la plus utilisée industriellement. Ces alliages ont une teneur en Si variant de 5 à 20 %. La très grande majorité de ces alliages présentent une composition eutectique ou hypo eutectique. La composition de l'eutectique est de 12.7 % de silicium (Fig. I. 5). Les alliages de ces séries font preuve d'une très bonne coulabilité et résistent bien à la corrosion. Le silicium présent dans le constituant eutectique a normalement une morphologie aciculaire. Cette série d'alliage peut être binaire avec le silicium et dans ce cas elle n'est pas trempant, ternaire avec le sodium ou le strontium cas permettant de modifier la morphologie structurale vers le fibreux et ternaire aussi avec l'addition de magnésium (de 0.3 à 1 %) aux alliages Al-Si permet d'améliorer considérablement leurs propriétés mécaniques. Les alliages Al-Si-Mg sont en effet durcis sables par précipitation contrôlée du composé Mg_2Si et de ses formes transitoires. Ils sont quaternaires avec l'addition du cuivre (de 3 à 5 %), la présence du cuivre améliore les propriétés mécaniques des alliages Al-Si. Dans ce cas, l'addition de magnésium améliore leur réponse aux traitements thermiques. Les alliages Al-Si-Cu eutectiques ont une bonne tenue à chaud et un faible coefficient de dilatation. Très utilisés pour la fabrication de pistons ou de culasses, dans les moteurs à combustion interne [20]et [21].

Chapitre I : aluminium et ses alliages

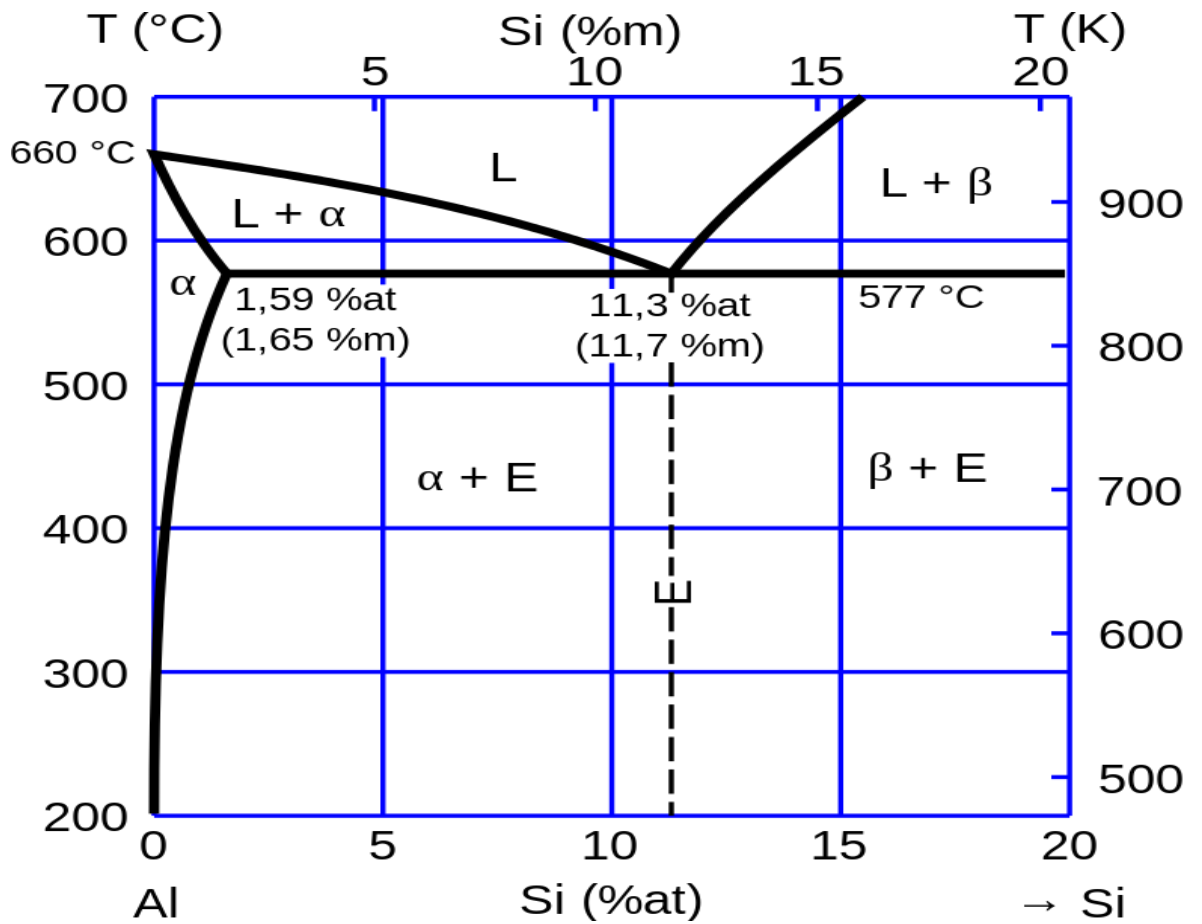


Figure I.5: diagramme d'équilibre Al-Si

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

Chapitre 2 : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

I. Corrosion de l'aluminium et ses alliages :

II.1 Définition de la corrosion :

La corrosion est définie comme une détérioration ou une dégradation des caractéristiques du métal ou de l'alliage, provoquée par des actions chimiques, électrochimiques ou biologiques [22], la corrosion peut être aussi définie comme le retour du matériau à son état de stabilité.

II.2 Classification de la corrosion :

La corrosion se développe dans les deux environnements naturels :

- Lorsque l'environnement est sec on parle de la corrosion sèche ou corrosion haute température.
- Lorsque l'environnement est humide on parle de la corrosion aqueuse ou humide.

II.2.1 La corrosion sèche :

La corrosion sèche ou haute température se produit lorsque les matériaux se dégradent en absence d'humidité. Cette corrosion apparait lorsque le matériau est en contact avec des gaz corrosifs à des températures élevées. Elle occupe une place cruciale dans les dispositifs qui fonctionnent à des températures élevées.

II.2.2 La corrosion humide :

On peut la voir dans le couple métal / électrolyte, comme la dégradation du matériau organique, les métaux, le béton armé, par exemples.

II.3 Les différents modes de corrosion :

Il existe plusieurs modes d'agressivité parmi lesquels on distingue :

- La corrosion chimique
- La corrosion électrochimique
- La corrosion biochimique (la bio-corrosion)
- La corrosion en présence d'une contrainte mécanique ou thermique.

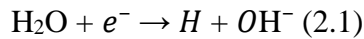
II.4 Corrosion de l'aluminium :

La résistance des alliages d'aluminium dans divers milieux corrosifs est obtenue grâce à la formation d'une couche d'oxyde d'alumine (Al_2O_3) à la surface. L'aluminium est stable seulement dans un environnement de pH allant de ($4 < \text{pH} < 9$). Le processus de corrosion de l'aluminium et de ses alliages est un phénomène naturel qui tend, dans certaines conditions, à

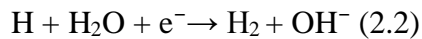
Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

revenir à son état stable (état d'énergie le plus bas), c'est-à-dire sous la forme de son oxyde, dans des solutions neutres repose sur la dissolution des atomes.

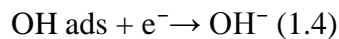
Tandis que sur les sites cathodiques deux réactions sont possibles. La réaction anodique correspond à la dissolution du métal et la contre réaction cathodique où la réduction des molécules d'eau ou de l'oxygène dissout, correspond à la fabrication des ions OH^- . Ces réactions sont basées sur le processus cathodique suivant :



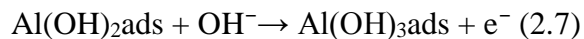
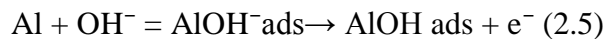
Où



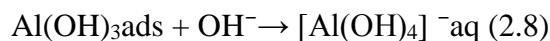
Dans les solutions naturellement aérées ou saturées en oxygène, la réaction cathodique aura lieu avec la réduction de l'oxygène selon les équations (1.3 et 1.4)



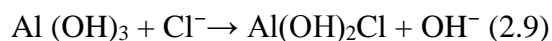
Les réactions anodiques ci-dessous auront lieu à la surface de l'électrode (2.5 – 2.7) :



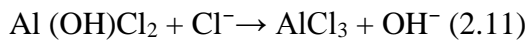
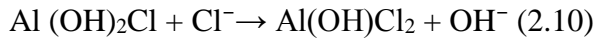
La formation de l'hydroxyde d'aluminium adsorbé Al(OH)_3 , ce dernier se transforme en $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dans le milieu neutre. Les ions OH^- vont induire la dissolution de l'aluminium avec la germination de l'aluminate $[\text{Al(OH)}_4]^-$ suivant la réaction (2.8) :



La présence des ions Cl^- dans la solution neutre induit la formation des composés transitoires $\text{Al(OH)}_2\text{Cl}$, Al(OH)Cl_2 et AlCl_3 suivant les réactions (2.9 – 2.11) :



Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie



II.5 Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages :

Le potentiel de l'aluminium est mesuré sur une surface qui est toujours recouverte d'un film d'oxyde naturel Al_2O_3 . On la divise de manière très inégale en trois catégories : 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 neutres. Toutes les variables qui affectent les caractéristiques de la couche d'oxyde. Le potentiel de dissolution de l'aluminium peut être modifié de manière variable. Les données de mesure varient en fonction des conditions expérimentales : type de solution, type d'alliage, état de surface du métal [23].

II.5.1 Diagramme potentiel - pH (Pourbaix) :

Le diagramme E-pH de l'aluminium figure I.1 illustre bien la propriété amphotère du métal : il est attaqué en milieu acide et en milieu alcalin. Le diagramme de POURBAIX de l'aluminium est constitué de 4 domaines correspondant à trois états possibles :

- Solubilité : $C > 10^{-6}$ M (ou corrosion : c'est la concentration à partir de laquelle on peut considérer qu'il y'a corrosion du métal, soit 0.027 mg/l pour l'aluminium) [23].
- Passivation : si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble.
- Immunité : $C < 10^{-6}$ M.

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

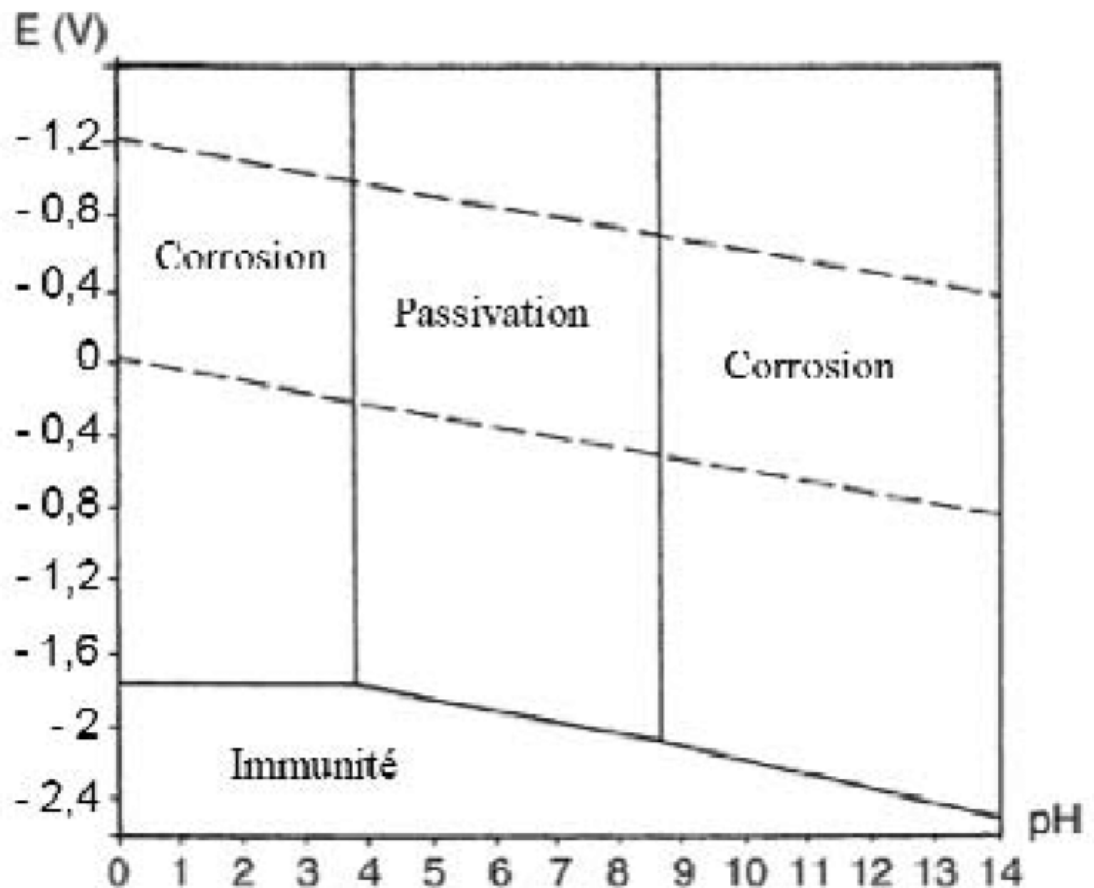


Figure II.1: diagramme E-pH Al-H₂O à 25°C°(M. POURBAIX) [24]

II.6 Type de corrosions électrochimique de l'aluminium :

Différentes formes de corrosion d'aluminium peuvent être observées à l'œil nu : corrosion généralisée ou uniforme, corrosion par piqûres, corrosion sous l'eau. La prédominance d'une forme de corrosion sera influencée par divers facteurs liés au métal, au milieu et aux conditions d'utilisation. Il n'existe pas de corrosion particulière pour l'aluminium et ses alliages [25].

II.6.1 La corrosion uniforme :

Il s'agit d'une diminution plus ou moins régulière de la matière sur toute la surface. Cette attaque se manifeste principalement chez les métaux exposés à des milieux acides [25].

II.6.2 La corrosion galvanique :

Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie [25].

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

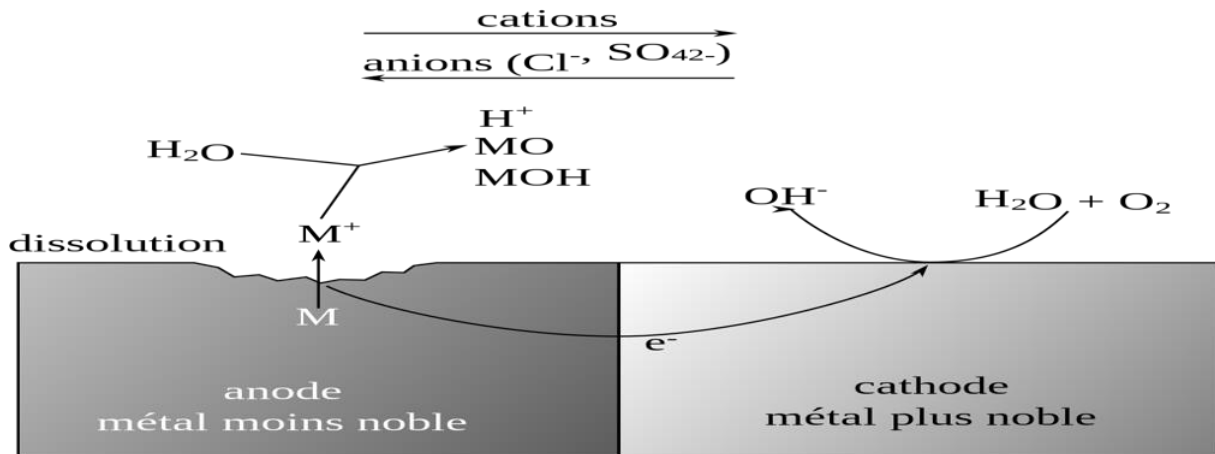


Figure II.2: corrosion galvanique

II.6.3 La corrosion caverneuse :

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [25].

II.6.4 La corrosion par piqûres :

Elle est produite en raison de certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre [25].

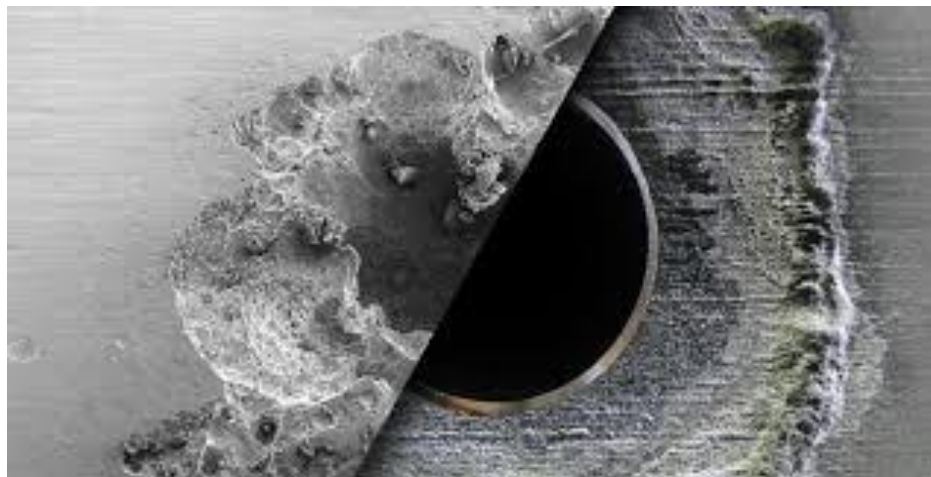


Figure II.3: corrosion par piqûre et corrosion par caverneuse

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

II.6.4 La corrosion inter granulaire :

C'est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique [25].

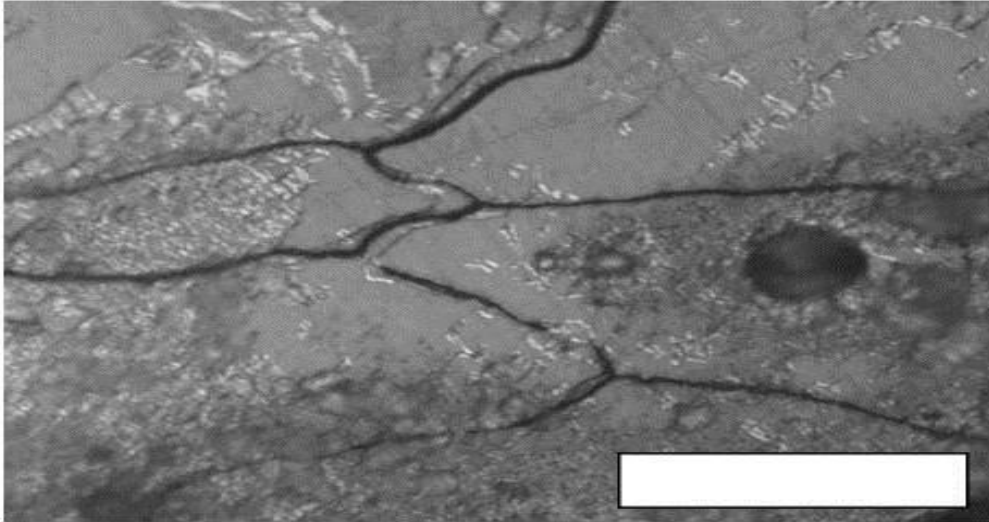


Figure II.4: corrosion inter granulaire

II.6.5 La corrosion sélective :

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [25].

II.6.6 La corrosion-érosion :

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide [25].

II.6.7 La corrosion sous contrainte :

C'est une fissuration du métal, qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique ou thermique et d'une réaction électrochimique [25]

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie



Figure II.5: corrosion sous contrainte

II.7 Moyens de protection :

Comme la corrosion est due à l'interaction de deux éléments, à savoir le métal ou l'alliage d'une pièce et la solution de l'autre pièce, il est envisageable de combattre ces effets en utilisant des mesures appropriées [26] :

- Protection par revêtements
- Protection électrochimique
- Protection par inhibiteurs de corrosion

II.7.1 Protection par revêtements :

La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif en utilisant des revêtements. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques (voir le tableau I.1) [27].

Tableau 2: type de revêtement

Revêtements métalliques	Revêtements non métalliques	
	Organique	Inorganique
Chrome Aluminium Plomb Etain Cadmium Cuivre Nickel Argent	Peintures Vernis Laques Résine Graisses Cires	Couches de conversion Couches étrangères au substrat

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

II.7.2 Revêtements métalliques :

Les revêtements métalliques sont fréquemment utilisés afin de préserver l'acier, en particulier contre la corrosion atmosphérique. Ils peuvent également être utilisés sur d'autres substrats tels que le cuivre et le laiton. En plus de leurs propriétés anticorrosion, ils remplissent souvent une fonction importante. Fonction architecturale [28].

Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques :

A. Revêtements cathodiques :

Le revêtement est moins noble que le métal à protéger. Il en est de même avec un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier, par exemple. Si le revêtement est défectueux, la pile qui se forme peut entraîner une perforation rapide du métal de base, ce qui entraîne une détérioration locale et une oxydation. Agit en tant qu'anode.

B. Revêtements anodiques :

La qualité du substrat est supérieure à celle du revêtement, comme c'est le cas lors de la galvanisation (revêtement en zinc). Cette situation s'inverse, le dépôt agit comme une anode et se dégrade, tandis que le substrat (cathode) reste sécurisé. Dans cette situation, la durabilité du revêtement est En fonction de son épaisseur, il est fréquent que l'épaisseur du revêtement est important, cette situation représente une protection cathodique.

II.7.3 Revêtements non métalliques :

1- Revêtements organiques :

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et son environnement, ils se divisent en trois familles [28] :

➤ Les revêtements en bitume :

Ces revêtements sont utilisés pour la protection des structures enterrées en acier ou en fonte. Ils sont là, en général, ils se présentent sous la forme d'un revêtement épais (environ 5 mm), dont la plasticité diminue considérablement les risques de dommages mécaniques potentiels.

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

➤ Les revêtements polymériques :

Un large éventail de revêtements polymériques est disponible pour protéger les métaux contre les environnements agressifs :

- Les thermoplastes (PVC, propylène, etc.)
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques)
- Les thermodurcissables (époxydes, polyesters, etc.).

L'efficacité de la protection polymérique dépend de la résistance chimique intrinsèque dans le milieu et de l'absence de défauts de surface. Son épaisseur est de l'ordre de 100 à 500 μm , mais elle varie selon les cas.

➤ Les peintures et les vernis :

Les couches très minces (<100 μm) les distinguent, et leurs principaux composants sont [18] :

- Le matériau qui garantit la solidité du film et sa fixation au substrat
- Le produit qui facilite l'application de la peinture en tant que liquide
- Les pigments sont des substances qui sont ajoutées aux peintures afin de donner une teinte
- Les additifs et les charges ont différentes fonctions :
 - ✓ Les additifs modifient certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface ;
 - ✓ Les charges qui sont des substances bon marché, elles peuvent également améliorer certaines propriétés des films comme la résistance à l'abrasion. Les métaux peints comportent en général plusieurs couches, ils peuvent avoir :
 - Une couche d'accrochage fabriquée par phosphatation, c'est une couche de peinture primaire appliquée par électrophorèse (immersion de l'objet dans une émulsion de polymère en présence d'un champ électrique)
 - Une couche polymérique qui permet d'améliorer la résistance mécanique du revêtement
 - Une ou deux couches de finition appliquées au pistolet, suivi d'un recuit au four.

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

2- Revêtements inorganiques :

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques [28] :

➤ Les couches de conversion :

Elles sont distinguées selon leur procédé de fabrication, à savoir [28] :

- L'anodisation
- La phosphatation
- La chromisation.

➤ Les couches étrangères aux substrats :

Ce type de couches inclut les revêtements inorganiques non métalliques suivants [28]

- Les émaux
- Le ciment
- La céramique réfractaire.

II.8 Protection électrochimique :

Son objectif est d'intervenir de façon maîtrisée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se déroulent lors de la corrosion. Effectivement, cette approche implique de donner au métal un potentiel assez faible pour réduire considérablement la vitesse de corrosion, voire l'éliminer complètement. Deux types de protection sont identifiés [28] :

- La protection cathodique
- La protection anodique.

II.8.1 La protection cathodique :

Cela implique de réduire le potentiel (métal - milieu) afin de le ramener dans sa zone de protection ($E \leq E_{\text{port}}$). Il est essentiel de la maintenir pendant toute la durée du service.

Deux options sont généralement employées :

- La sécurité avec une anode sacrificielle
- La sécurité avec un courant imposé ou une tension imposée

➤ Protection par anode sacrificielle :

L'anode crée une pile électrochimique en protégeant la structure, ce qui joue un rôle essentiel. La cathode doit donc avoir un potentiel réversible supérieur à celui du métal que l'on souhaite conserver. La valeur de la force électromotrice (f.é.m.) requise est calculée en comparant le potentiel moyen du couple de

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

corrosion avec le potentiel propre d'une anode (plus négative) appelée sacrificielle.

➤ **Protection par courant imposé ou une tension imposée :**

Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la force électromotrice ou le courant en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces et des surfaces irrégulières (implique l'utilisation d'un redresseur) [28]

II.8.2 La protection anodique :

Cela implique d'augmenter la tension (métal – milieu) afin de la faire atteindre sa zone de passivation. Elle concerne les métaux qui peuvent être passivés, avec un potentiel de corrosion dans le domaine actif $E_{cor} < E_{passive}$. Dans cette situation, une polarisation anodique permet de déplacer le potentiel vers le domaine passif où la densité du courant passif est extrêmement faible. Par contre, afin d'atteindre l'état passif, il est nécessaire d'appliquer une densité de courant beaucoup plus élevée, car elle doit dépasser la densité de courant passif. Donc avant d'exercer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondante à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c.à.d. l'étendue du palier de passivité. La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium, et l'aluminium et ses alliages. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés [29].

II.9 Corrosion des alliages aluminium silicium de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie, sont ceux qui sont alliés avec du silicium et du magnésium et/ou du cuivre, ces alliages sont amplement utilisés dans l'industrie en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et leur bonne coulabilité. Ils représentent environ 90% de la production des pièces coulées en aluminium, une grande partie est destinée pour les véhicules industriels.

La corrosion de ces alliages dépend de leur composition chimique et leurs microstructures, ainsi que leurs porosités.

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

II.9.1 Effets éléments chimique en impureté et en addition sur la corrosion :

Les propriétés de résistance à la corrosion des alliages Al-Si sont influencées par la présence d'autres éléments chimique en impureté ou bien en addition. L'effet des principaux Éléments d'alliage sur le potentiel de corrosion de l'aluminium de haute pureté est illustré sur la Figure II.7 [30].

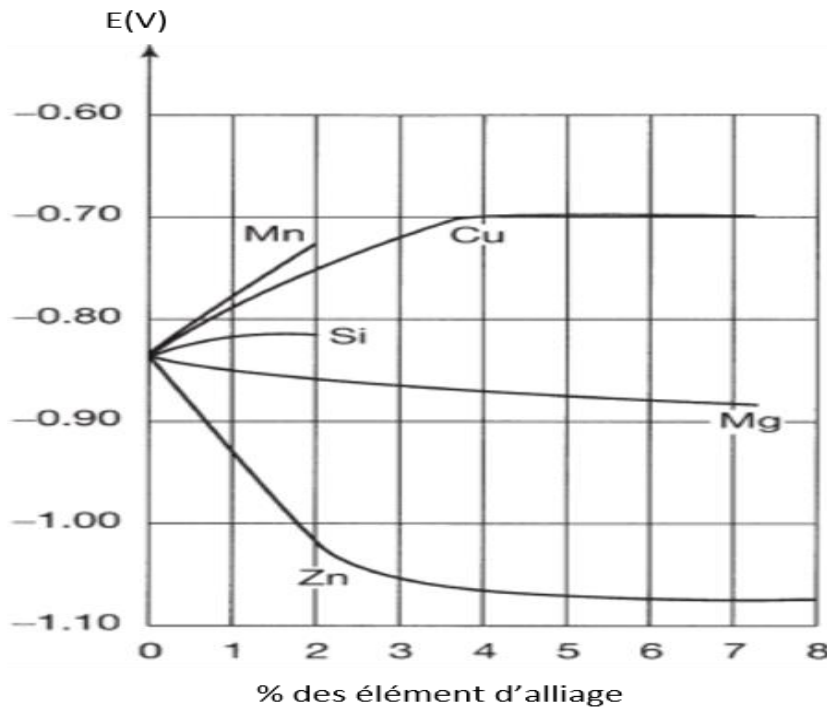


Figure II.6: effets des principaux éléments d'alliage sur le potentiel de corrosion de l'aluminium dans la solution NaCl [30].

II.9.2 Effet de la microstructure :

Les alliages d'aluminium Silicium sont constitués de la matrice en aluminium sous la forme dendritique, le silicium sous forme d'eutectique, et plusieurs autres phases intermétalliques. L'espacement entre les dendrites influe sur le courant de corrosion. Une structure dendritique grossière induit une résistance à la corrosion plus élevée qu'une structure dendritique fine et dépend de l'eutectique. La présence des particules intermétalliques favorise la corrosion localisée.

Chapitre II : corrosion des alliages d'aluminium silicium de fonderie

II.9.3 Effet des pores :

Les pores influencent la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium de fonderie. Les pores dans les métaux sont des macros, micros, ou nano "crevasses", ils sont des sites préférentiels pour la corrosion localisée dans le cas d'un environnement aéré induisant une aération différente à la surface.

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

Chapitre III : Matériaux et Technique Expérimentales

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

III. Matériau et Technique Expérimentales :

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'alliage étudié et sa composition chimique, ainsi que les techniques de préparation des échantillons. Ce chapitre présente toutes les techniques et méthodes utilisées pour caractériser les échantillons de l'alliage. L'étude sera structurée comme suit :

- Microscopie optique
- La dureté
- Cellule de mesure électrochimique
- Multimètre

Notre travail a été réalisé, principalement, au sein du Laboratoire de Mécanique Structure et énergétique à l'université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

III.1 Matériaux :

III.1.1 Alliage étudié :

Les matériaux choisis pour cette étude sont des alliages de AS13 et AS10G.

La composition chimique détaillée de ces alliages est exposée dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 3: la composition chimique de AS10G

Elément	Al	SI	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Sn	Autre
%	85.40	9.53	1.21	1.25	0.91	0.51	0.65	0.29	0.01415	0.25

Tableau 4: la composition chimique de AS13

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Autres
AS13	12.5	<0.27	<0.02	<0.04	<0.04	<0.04	<0.09	<0.09	<0.03
	à								chaque
	13.5								<0.10
									total

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

III.2 Techniques d'analyse et de caractérisation de surface :

III.2.1 La microscopie optique :

La microscopie optique (MO) est utilisée afin d'observer la composition en phase, la microstructure, la forme de corrosion qui s'est produite après immersion du matériau étudié, et la dimension des grains. Le principe du microscope métallographique repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques, et l'agrandissement des images par un jeu de lentilles, disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur, et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille et l'objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la caméra. L'étalonnage de mesure des dimensions réelles après agrandissement est effectué au moyen d'une réglette, fournie avec le microscope, la longueur de cette réglette est un mm, et elle constituée de 100 divisions. La figure montre le Principe du microscope utilisé.

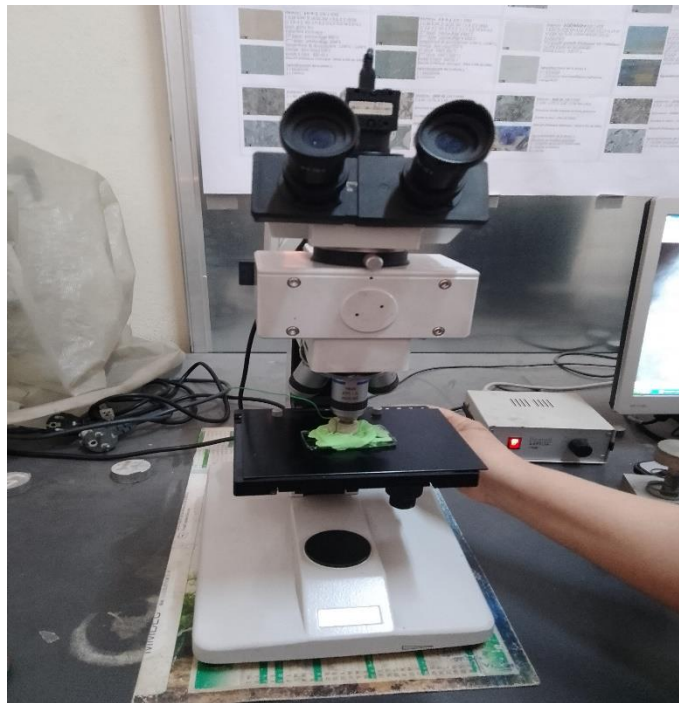


Figure III.1: microscope optique (hund WETZLAR)

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

III.3 Caractérisation électrochimique :

III.3.1 Cellule électrochimique :

Les essais électrochimiques ont été conduits dans une cellule électrochimique à trois électrodes. Électrode de travail (alliage étudié), électrode de référence (en graphite), contre électrode (Ag/AgCl)

III.3.1.1 électrode de référence :

L'électrode de référence choisie est une électrode en argent. Pour la préparer, on a immergé un fil d'argent dans l'eau de javel et on a rincé l'électrode avec de l'eau déminéralisée.

III.3.1.2 contre électrode :

Contre électrode utilisée est de graphite. Elle a été reliée à un fil conducteur en cuivre. Selon le sens de branchement du dispositif d'alimentation. Cette électrode a pour objectif d'améliorer la lisibilité de courant car il joue toujours un rôle symétrique de celui de l'électrode de travail.

V.3.1.3. Électrode de travail :

Constituée du matériau étudié, l'alliage AS10G et AS13 enrobée dans une résine polymérisable permettant de délimiter une section plane (surface étudiée) et facilitant le polissage mécanique aux papiers abrasif. La surface de l'électrode de travail, exposée à la solution,

III.4 Courbes de polarisation :

Les courbes de polarisation, également appelées courbe courant-tension, peuvent être obtenues par régulation galvano statique ou potentiostatique, bien que cette dernière soit la plus communément mise en œuvre. La technique consiste à imposer une variation linéaire de potentiel $E(t)$ entre l'électrode de travail et celle de référence, tout en enregistrant de l'évolution de la densité de courant $i(E)$ circulant entre l'électrode de travail et la contre électrode. En outre, on fait varier de façon linéaire le potentiel appliqué à l'électrode de travail, en partant du potentiel d'équilibre jusqu'à une borne anodique ou cathodique de potentiel, tout en enregistrant les valeurs de densité de courant correspondantes. L'allure des courbes renseigne sur les différentes réactions électrochimiques en jeu pour des potentiels donnés.

Après avoir introduit nos échantillons dans la cellule électrochimique, on attend la stabilisation du potentiel de corrosion libre, suite à quoi l'échantillon est polarisé. Le balayage en potentiel a été effectué de -0.7 à 1.2 V/ECS avec une vitesse de balayage en potentiel de 1 mV/s. Un nouvel échantillon a été utilisé pour chaque test. Le domaine de passivité n'apparaît

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

pas dans les courbes de polarisation d'aluminium. L'aluminium et ses alliages sont passivés instantanément au contact avec l'air.

III.5 Conditions expérimentales :

III.5.1 Préparation des échantillons pour les essais de corrosion :

L'analyse électrochimique est un paramètre crucial pour évaluer le comportement à la corrosion d'un matériau. Cette technique implique la mise en place d'un dispositif de mesure bien spécifique

Etape 1 : les échantillons de 1cm² ont été percés de l'extrémité à l'aide d'une perceuse avec une mèche d'un (1) mm de diamètre.

Etape 2 : un fil conducteur en cuivre deux (2) mm diamètre a été passé de à travers le trou percé dans l'étape 01, ensuite le fil a été plié et écrasé autour de l'échantillon pour assurer une bonne conduction électrique.

III.5.2 Enrobage :

- Déposé l'échantillon comportant le conducteur électrique dans un moule.
- Mélangé la résine et le durcisseur, dans un récipient propre et le remué.
- Une fois que le mélange est homogène, on le verse rapidement dans le moule contenant l'échantillon.
- Une fois la résine durcie, on ponce les surfaces pour éliminer les rugosités.

III.5.3 Polissages :

Nous avons effectué un polissage mécanique, qui consiste à enlever mécaniquement des micros peaux avec des papiers abrasifs à granulométrie décroissante ; 400, 800, 1000, 1200, 1500, 2000.

Afin d'éviter les rayures produites par le papier abrasif, nous effectuons une rotation de 90° à chaque changement de papier abrasif.

Nous avons réalisé à finition à l'aide d'un disque feutré monté sur une polisseuse et mouillé à l'aide d'une solution d'alumine (eau déminéralisé et poudre d'alumine), les grains d'alumine ayant un grand diamètre précipité durant la durant de repos de la solution, dans le cas de notre étude, la durée du repos de la solution est de 24 heures.

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale



Figure III.6: polisseuse(struers rotopol-31)

III.5.4 Attaque chimique :

L'attaque chimique à l'aide de Naoh (hydroxyde de sodium) est une méthode utilisée pour révéler la microstructure des alliages d'aluminium-silicium de fonderie.

III.5.5 Observation au microscope optique :

Les observations ont été faites avec un microscope optique HUND (WETZLAR). Pour procéder à l'observation des différents échantillons avant et après le polissage et l'attaque chimique, le microscope est muni d'une caméra permettant la transmission de l'image sur l'écran ordinateur et un logiciel d'acquisition et de traitement d'image PICED CORA.

III.6 Traitements thermiques appliqués :

Nous avons placé les échantillons AS13 et AS10 dans un four et les avons traités thermiquement à des températures de 200°C, 300°C et 400°C. Après le traitement thermique, nous avons refroidis les échantillons à l'air libre.

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale



Figure III.3: four

III.7 Préparation de la solution pour l'immersion :

On a utilisé deux solution 0.3% et 3% Na Cl :

- Nous avons mélangé dans une fiole 1 litre d'eau déminéralisée avec 3g de NaCl à haut pureté pour obtenir une solution de 0.3% en masse de NaCl.
- Nous avons mélangé dans une fiole 1 litre d'eau déminéralisée avec 30g de NaCl à haut pureté pour obtenir une solution de 3 % en masse de Na Cl.

III.8 La dureté :

La dureté d'un métal se réfère à sa résistance face à la pénétration d'un matériau plus dur. Différents tests de dureté sont utilisés, partageant un principe commun mais varient dans la forme du pénétrateur et la charge utilisée.

Dans notre étude nous allons déterminer la dureté Brinell



Figure III.7: Duromètre utilisé(hommel)

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

III.8.1 La dureté Brinell :

Essais de dureté brinell : consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier trempé de diamètre (D) sous une charge F. après suppression de la charge, on passe à la mesure de diamètre (d) de l'empreinte laissé sur la surface.

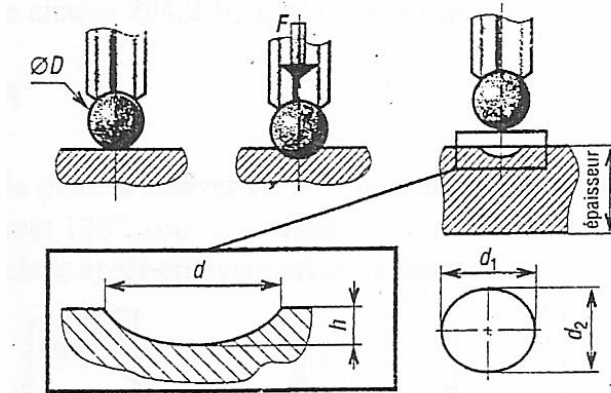


Figure III.8: principe de l'essai de dureté brinell

III.8.2 Calcul de la dureté brinell :

Le rapport entre la charge appliquée et la surface de l'empreinte détermine la valeur de la dureté brinell par la relation suivante $HB = F/S$ (F en Kg et s la surface de l'empreinte en mm^2)

-Mesure du diamètre (d) de l'empreinte :

L'empreinte est projetée au moyen d'un microscope, sur un écran poli ou son diamètre sera mesuré directement en vraie grandeur à l'aide d'une règle qui correspond à l'agrandissement du microscope. l'aire de cette empreinte dite : (calotte sphérique) est calculée par l'équation suivante : $S = \frac{\pi d}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ (mm^2)

D est le diamètre de la bille utilisée, d est le diamètre de l'empreinte.

III.9 Mesures électrochimiques :

Les mesures électrochimiques sont réalisées à l'aide d'un potentiostat/galvano stat AUTOLAB piloté par le logiciel Nova 1.7 qui offre la possibilité de réaliser diverses méthodes d'analyses électrochimiques.

Le montage expérimental pour le tracer des courbes de polarisation se compose d'une cellule à trois électrodes, comprenant une électrode de travail (l'alliage étudié), une contre électrode (En graphite), et une électrode de référence (Ag/Ag Cl).

Chapitre III : matériaux et technique expérimentale

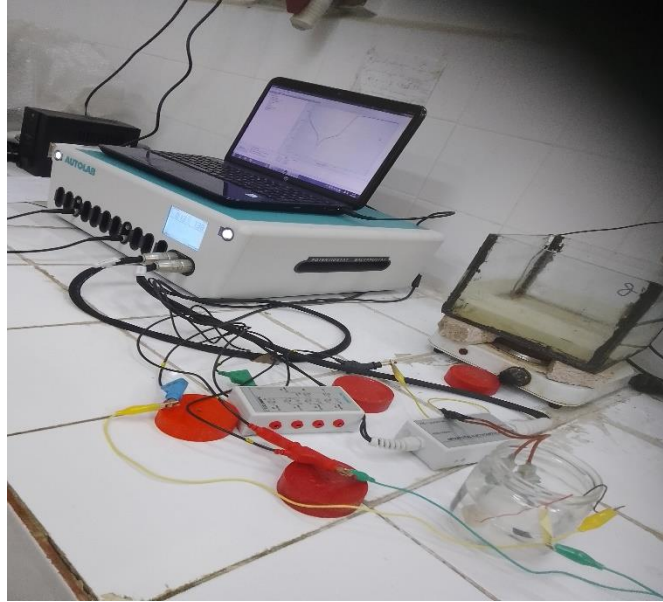


Figure III.6: un potentiostat /galvano stat Autolabe

III.10 Test d'immersion pendant 5 jours :

Nous avons immergé des échantillon AS13 et AS10G (brut de coulé, 200C° 300C° 400C°) à un test d'immersion dans une solution de 3% NaCl pendant 5 jours. Nous avons effectué les tests de polarisation après 1heure d'immersion et Cinq jours d'immersion et nous avons enregistré les valeurs du potentiel de corrosion libre durant les cinq jours

Chapitre IV : Résultats et discussion

Chapitre IV : résultats et discussion

IV .1 Résultats de l'étude de la sensibilité à la corrosion :

IV .1.1 de l'alliage AS13 de fonderie

IV .1.1.1 comparaison des courbes du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'alliage AS13 de fonderie :

La figure IV.1 montre l'évolution du potentiel de la corrosion libre (l'OCP) de l'alliage AlSi13 dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids durant 1 heure d'immersion. Nous observons sur cette figure que l'augmentation de la concentration de NaCl dans la solution augmente la sensibilité à la corrosion de l'alliage AS13, car le potentiel de la corrosion libre de cet alliage devient plus faible lorsque la concentration augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la concentration de NaCl induit l'augmentation des ions de Cl dans la solution. Sachant que chlore est un élément qui fragilise la couche d'oxyde d' Al_2O_3 qui se forme instantanément à la surface de l'aluminium, ainsi il y a formation d'une discontinuité de la couche d'oxyde à la surface qui permet aux éléments oxydant de pénétrer l'intérieur du métal et d'oxyder d'avantage l'aluminium.

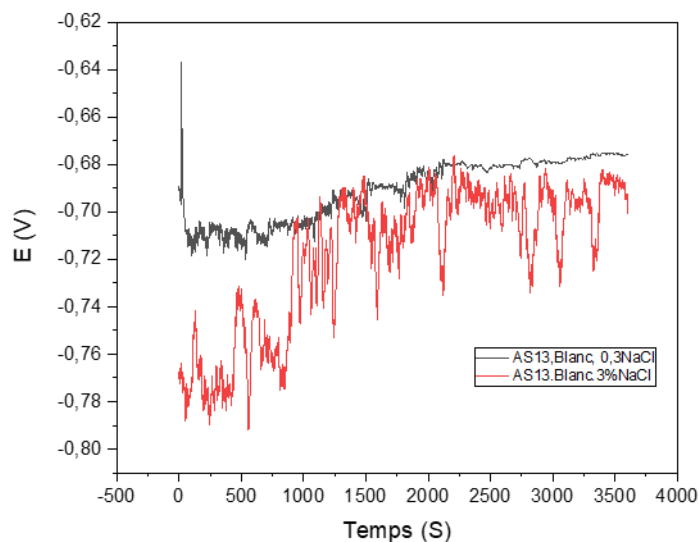


Figure IV.1 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans les deux solutions 0.3 et 3% NaCl en poids durant 1 heure d'immersion

La Figure IV.1 montre l'évolution du potentiel de la corrosion libre (OCP) de l'alliage AlSi13 dans la solution 0,3% NaCl en poids et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion. Cette figure montre que l'application d'un recuit à l'alliage AlSi13 préalablement à la mise en solution de 0.3% en

Chapitre IV : résultats et discussion

Le poids diminue la sensibilité à la corrosion de l'alliage AlSi13 durant les premières trente minutes, car le potentiel de corrosion d'alliage recuit est plus grand que celui de l'alliage non recuit. Au-delà de 30 minutes les échantillons recuits de l'alliage AlSi13 deviennent plus sensibles à la corrosion. L'échantillon recuit à 400°C est le moins sensible parmi les échantillons recuits. Une plus grande concentration de 3% de NaCl en poids à modifier complètement les courbes de potentiel de la corrosion libre. L'alliage AlSi13 recuit à 400°C est le plus noble depuis les premières secondes jusqu'à la fin de la première heure d'immersion, l'alliage recuit à 200°C devient aussi plus noble par rapport aux autres (Figure IV.3).

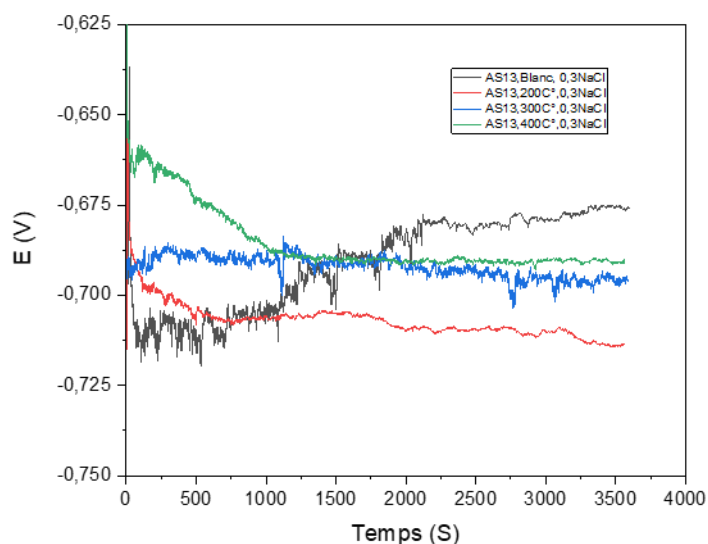


Figure IV.9: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans deux solutions 0.3 et 3% NaCl en poids et de l'alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400)C° durant 1 heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

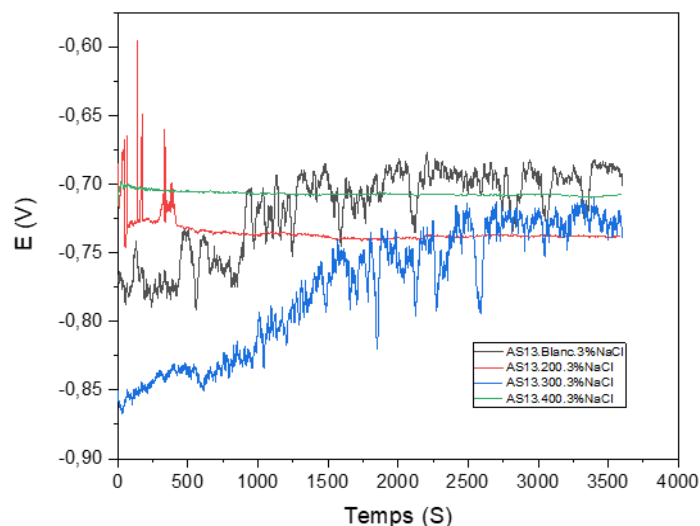


Figure IV. 3 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans la solution 3% NaCl en poids et de l'alliage recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion

La figure IV.4 montre bien que l'augmentation de la concentration de NaCl augmente la sensibilité à la corrosion de l'alliage AlSi13 de fonderie recuit ou non recuit, car le potentiel de la corrosion libre (OCP) des échantillons en immersion dans la solution de 0.3% NaCl en poids est le plus grand.

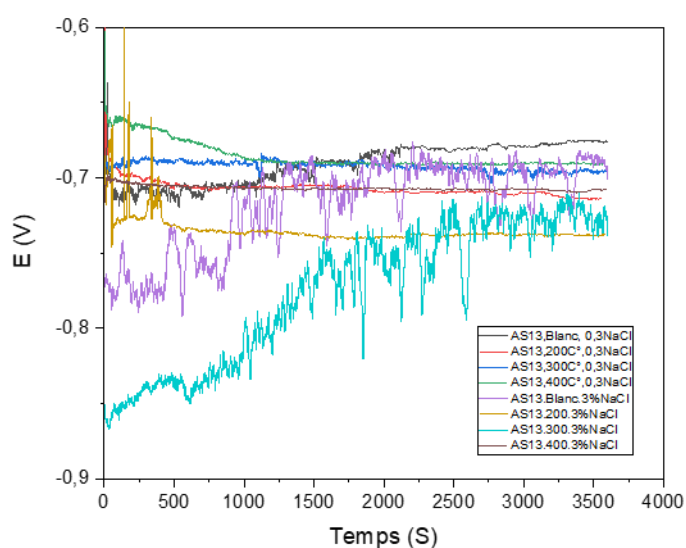


Figure IV.4 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi13 dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids et de l'alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

IV .1.1.1 .2 comparaison des courbes de polarisation de l'alliage AS13 de fonderie

:

La Figure IV.5, représentant les courbes de polarisation $\text{Log}(i) = f(E)$ pour l'alliage AlSi13 de fonderie non recuit pour deux solutions de NaCl de différentes concentrations, montre que l'augmentation de la concentration de NaCl induit diminution du potentiel de corrosion et l'augmentation de la sensibilité à la corrosion. La figure IV.6, représentant les courbes de polarisation $\text{Log}(i) = f(E)$ pour l'alliage AlSi13 de fonderie non recuit et recuit à différentes températures dans la solution de 0.3 % de NaCl en poids en poids, durant une heure d'immersion, cette figure montre que le potentiel de corrosion de l'alliage AlSi13 non recuit est le plus noble, et l'alliage à 300°C est le plus noble parmi les trois échantillons recuits, l'échantillon le moins noble et celui ayant subi un recuit à 400°C. Une concentration de 3% en poids montre que l'échantillon recuit à 300°C devient est le plus noble par contre ceux recuit à 400°C et à 200°C sont les moins nobles avec le même potentiel de corrosion (figure IV.7). La figure V.8 montre que l'échantillon recuit à 300°C dans la solution de 3% en poids de NaCl gagne de la noblesse.

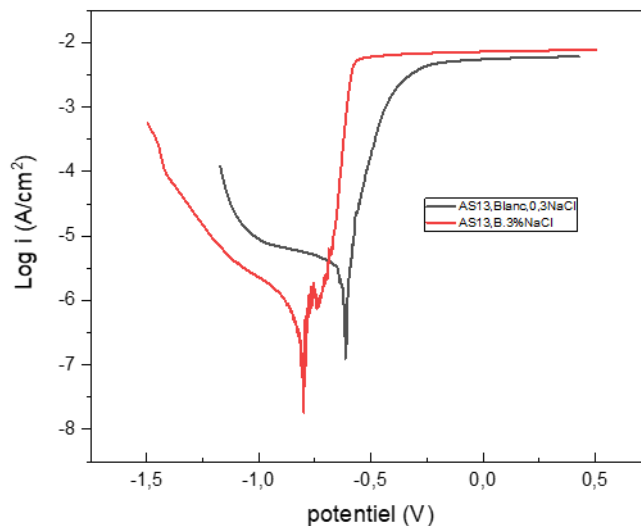


Figure IV.5: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl après 1 heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

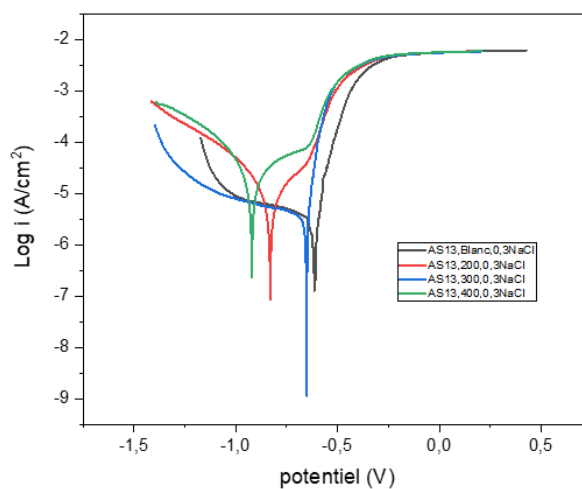


Figure IV.6: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 0,3 % NaCl après 1heure d'immersion

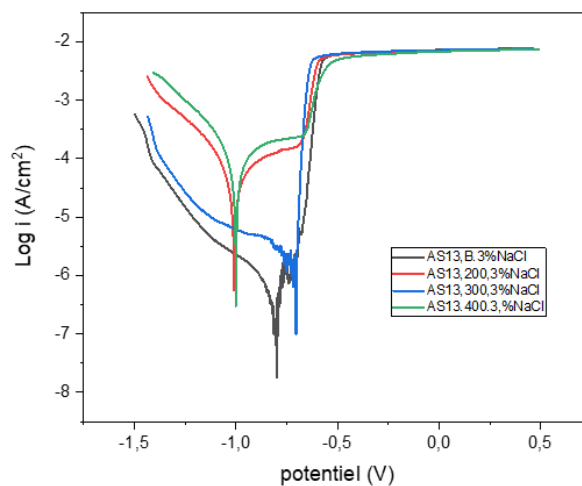


Figure IV.7: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

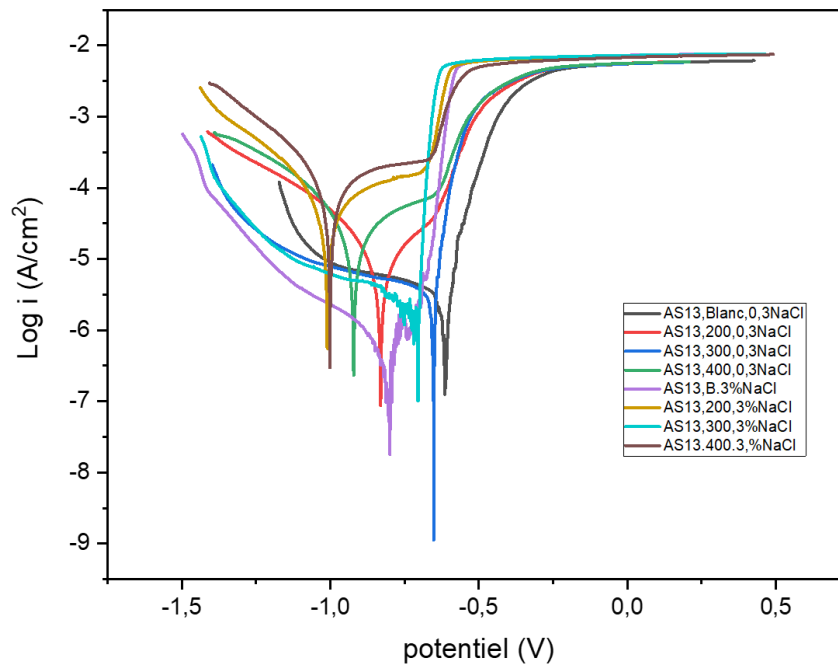


Figure IV.8 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans les deux solutions 0,3 % et 3% NaCl en poids après 1 heure d'immersion

IV .1.1.2 L'alliage AS10G de fonderie :

IV .1.1.2 .1 Comparaison des courbes du potentiel de la corrosion libre (OCP) de l'alliage AS10G de fonderie :

La figure IV.9 montre l'évolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G non recuit dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids, durant 1 heure d'immersion, cette figure montre que durant les 30 premières minutes l'alliage AlSi10G dans la solution de 3% en poids est le plus noble, par contre après 30 minutes jusqu'à une heure c'est l'alliage AlSi10G dans une solution de 0,3 qui est le plus noble. La Figure IV.10 représentant l'évolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 0,3% NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C, durant 1 heure d'immersion, montre que l'alliage AlSi10G recuit à 300°C est le plus noble et celui recuit à 400°C est le moins noble. La Figure IV.11 représentant l'évolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 3 % NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion, montre que l'échantillon recuit à 200°C et l'échantillon non recuit sont les plus nobles. La Figure IV.12 représentant l'évolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl

Chapitre IV : résultats et discussion

en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion, montre que l'échantillon recuit à 300°C dans la solution de 0.3% NaCl en poids est le plus noble.

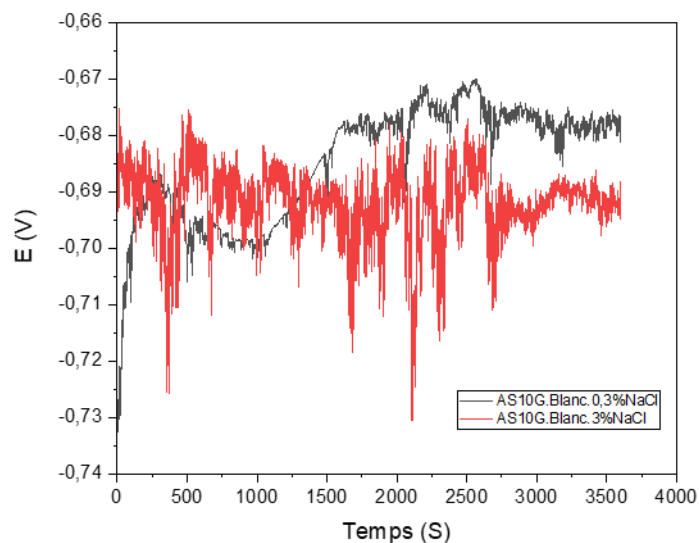


Figure IV.9 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids durant 1 heure d'immersion

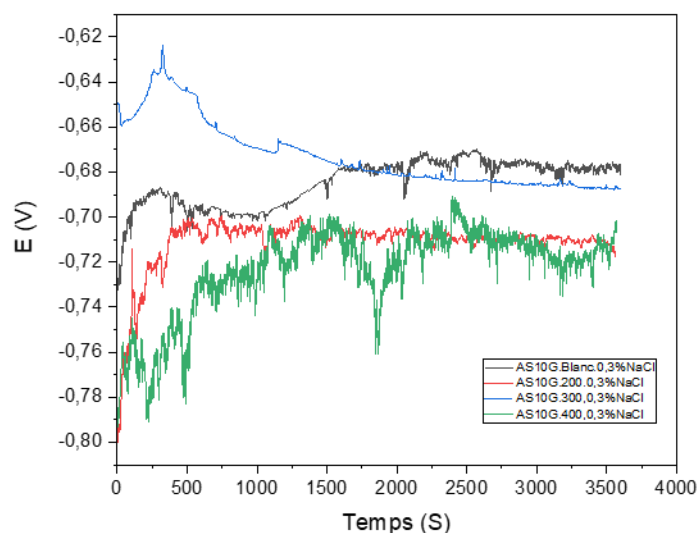


Figure IV.10 : Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 0,3% NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

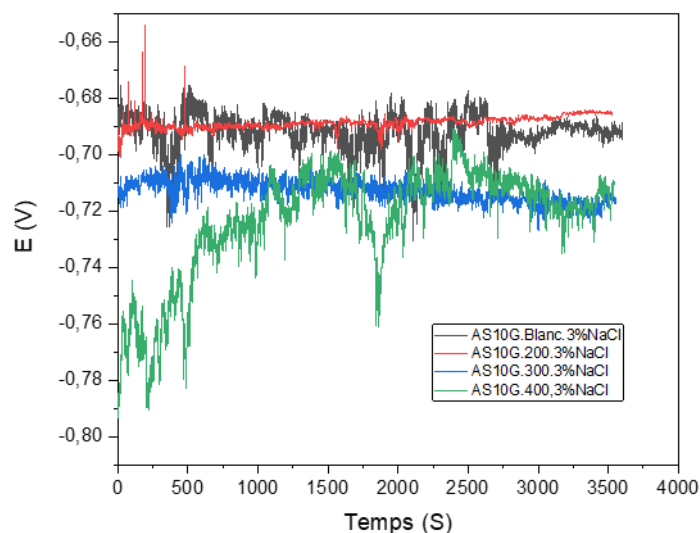


Figure IV.11: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans la solution 3 % NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion

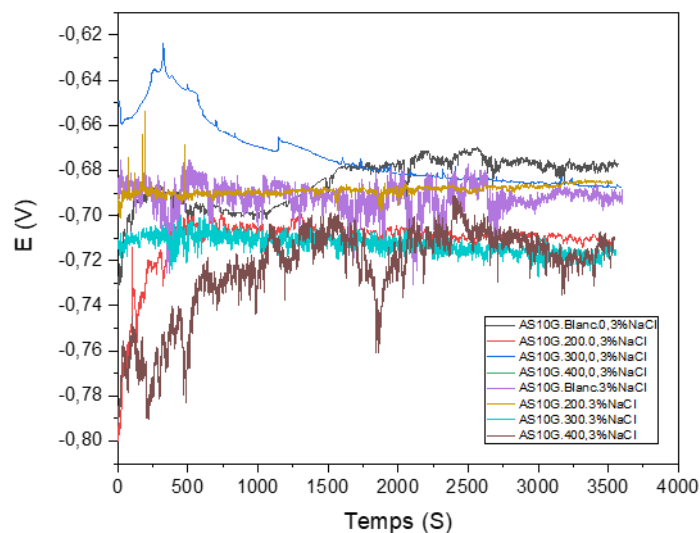


Figure IV.12: Evolution de l'OCP de l'alliage AlSi10G dans les deux solutions 0,3% et 3% NaCl en poids et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C durant 1 heure d'immersion

IV .1.1.2 .2 Comparaison des courbes de polarisation de l'alliage AS10G de fonderie :

La Figure IV.13 représentant les courbes polarisations de l'échantillon d'alliage AS10G, dans les deux solution 0,3% et 3% NaCl en poids, après 1 heure d'immersion, cette figure

Chapitre IV : résultats et discussion

montre que l'augmentation de la concentration de NaCl diminue le potentiel de corrosion. Figure IV.14 représentant les courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 0,3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion, montre que l'échantillon recuit à 400°C possède le potentiel de corrosion le plus grand et égal à celui de l'échantillon non recuit, l'échantillon recuit à 200°C possède le potentiel le moins élevé. La Figure IV.15 représentant les courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G, et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C, dans une solution de 3 % NaCl en poids après 1heure d'immersion, cette figure montre que l'échantillon recuit à 300°C est le plus noble car son potentiel de corrosion le plus élevé, tandis l'échantillon recuit à 200°C possède le potentiel le moins élevé. La Figure IV.16 représentant les courbes de polarisation de l'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400 °C) dans les deux solutions 0,3 % et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion. Cette figure montre que l'alliage non recuit en immersion dans une solution de 0.3% NaCl en poids et celui recuit à 300°C en immersion dans une solution de 3% NaCl en poids sont les plus nobles par contre l'échantillon AS10G recuit à 200°C est le moins noble car son potentiel de corrosion est le moins élevé.

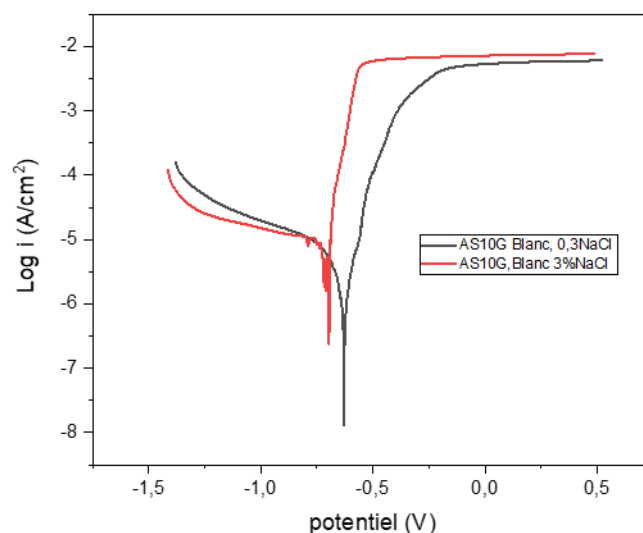


Figure IV.13 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G dans les deux solution 0,3% et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

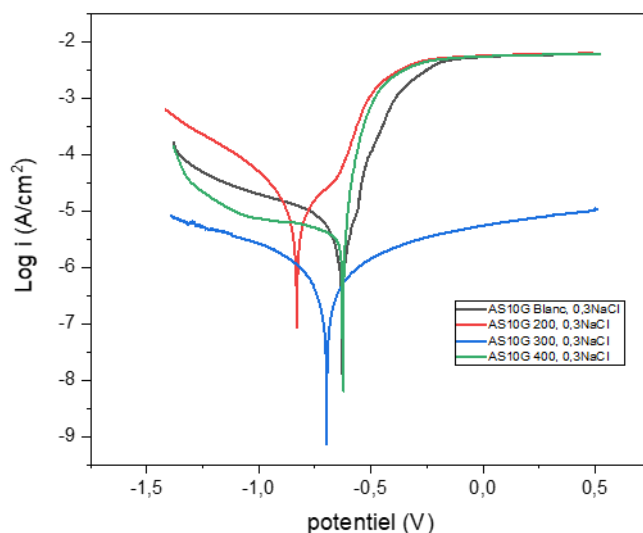


Figure IV.14: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 0,3 % NaCl en poids après 1 heure d'immersion

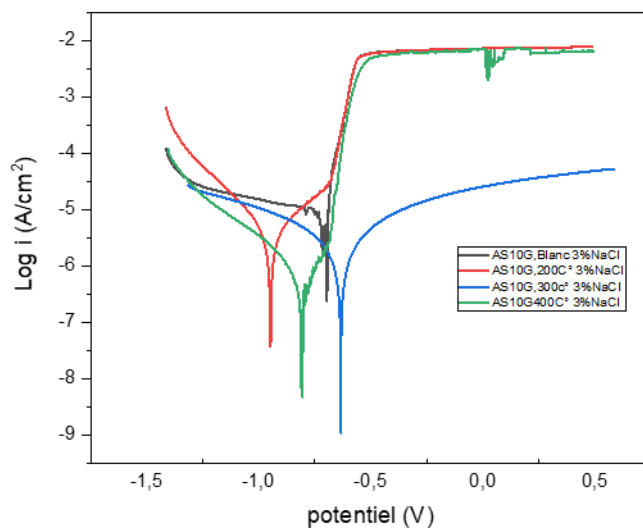


Figure IV.15: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 3 % NaCl en poids après 1 heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

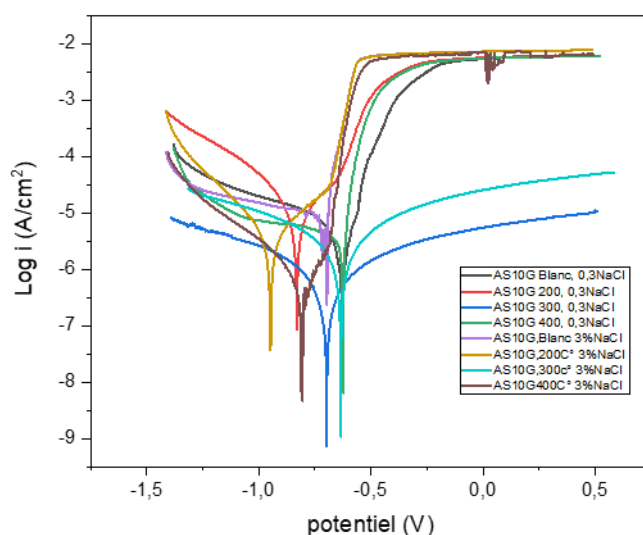


Figure IV.16 : Courbes de polarisation de l'alliage AS10G et des échantillons du même alliage recuit à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans les deux solutions 0,3 % et 3% NaCl en poids après 1heure d'immersion.

IV .1.3 Test de polarisation après cinq jours d'immersion dans une solution de NaCl de 3% en poids :

La figure IV.17 représentant les courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C, dans une solution de 3 % NaCl en poids, après cinq jours d'immersion, cette figure montre que l'échantillon recuit à 300°C est le plus noble, par contre l'échantillon non recuit est le moins noble. La figure IV.18 représentant les courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400 °C) dans une solution de 3 % NaCl en poids après cinq jours d'immersion, cette figure montre que l'échantillon recuit à 400°C est l'échantillon le plus noble, par contre l'échantillon recuit à 200°C est le moins noble. Les figures IV. (19-20) représentant les courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 dans la solution 3% NaCl après une heure et cinq 5 jours d'immersion, et l'échantillon AS10G dans la solution 3% NaCl après une heure et cinq 5 jours d'immersion respectivement, montrent que l'alliage AS13 devient noble après cinq jours par contre le potentiel de corrosion de l'alliage AS10G reste constant.

Les résultats de l'électrochimie présentés montrent qu'un recuit influe sur la sensibilité à la corrosion, car lors du recuit la microstructure des échantillons change (la taille des grains, la composition en phases ...etc.

Chapitre IV : résultats et discussion

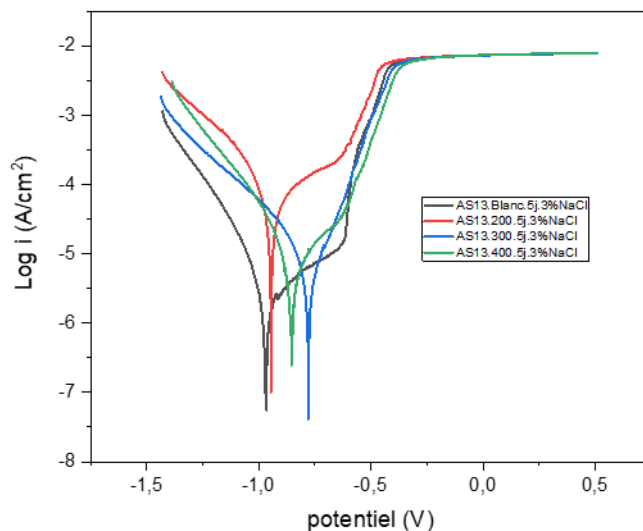


Figure IV.17: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C, dans une solution de 3 % NaCl en poids, après cinq jours d'immersion

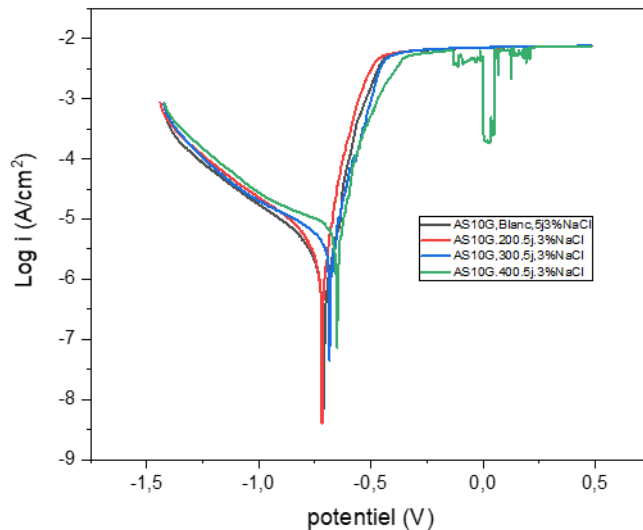


Figure IV.18 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G et des échantillons recuits à différentes températures (200, 300 et 400) °C dans une solution de 3 % NaCl en poids après 5 jours d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

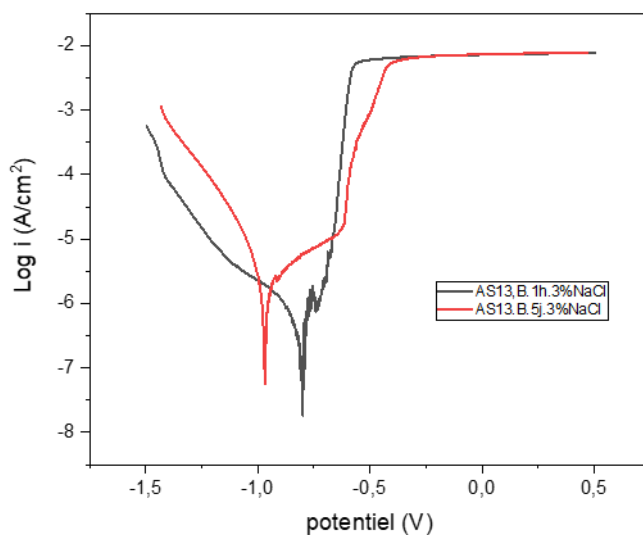


Figure IV.19 : Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS13 dans la solution 3% NaCl après une heure et 5 jours d'immersion

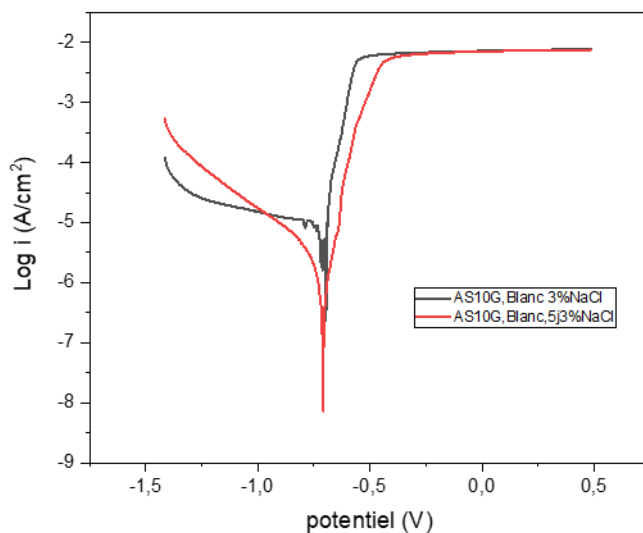


Figure IV.20: Courbes de polarisation de l'échantillon d'alliage AS10G dans la solution 3% NaCl en poids après une heure et 5 jours d'immersion

IV .1.4 Résistance de polarisation

Nous n'observons que la résistance de polarisation des différents échantillons changes en fonction de la température du recuit et de la concentration de NaCl.

Chapitre IV : résultats et discussion

IV .1.4.1 Résistance de polarisation de l'alliage AS13 en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après 1 heure de corrosion

Tableau 5 : les valeurs d' E_{corr} et R_p de l'échantillon de l'alliage AS13 et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400 °C) après 1 heure d'immersion dans les solutions 0,3 % et 3%NaCl

Alliage		AS13			
Température de traitement		Non traité	200C°	300C°	400C°
0,3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,614	-0,830	-0,652	-0,921
	$R_p(K\Omega)$	3,7	5,3	4,28	2,10
3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,802	-1,01	0,703	-1,008
	$R_p(K\Omega)$	3,65	0,95	0,67	0,492

IV .1.4.2 Résistance de polarisation de l'alliage AS10G en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl :

Tableau 6: les valeurs d' E_{corr} et R_p de l'échantillon de l'alliage AS10G et des échantillons du même alliage traité thermiquement par revenu à différentes températures (200, 300 et 400 °C) après 1 heure d'immersion dans les solutions 0,3 % et 3%NaCl

Alliage		AS10G			
Température de traitement		Non traité	200C°	300C°	400C°
0,3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,624	-0,812	-0,692	0,625
	$R_p(K\Omega)$	13,7	33,13	144 ,66	6,69
3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,695	0,948	-0,635	0,805
	$R_p(K\Omega)$	0,87	12,03	32,06	5,55

IV .1.4.3 Résistance de polarisation de l'alliage AS13 en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après cinq jours de corrosion :

Chapitre IV : résultats et discussion

Tableau 7: les valeurs de potentiel de corrosion et de résistance de polarisation de l'alliage AS13 après 5 jours d'immersion dans la solution 3%NaCl

Alliage		AS13			
Température de traitement		Non traité	200C°	300C°	400C°
3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,972	-0,94	0,776	-1,854
	$R_p(K\Omega)$	5,6	0,768	3,26	2,11

IV .1.4.4 Résistance de polarisation de l'alliage AS10G en fonction de la température du recuit et la concentration de NaCl après cinq jours de corrosion :

Tableau 8: les valeurs de potentiel de corrosion et de résistance de polarisation de l'alliage AS10G après 5 jours d'immersion dans la solution 3%NaCl

Alliage		AS10G			
Température de traitement		Non traité	200C°	300C°	400C°
3%NaCl	$E_{corr}(V)$	-0,972	-0,94	0,776	-1,854
	$R_p(K\Omega)$	5,6	0,768	3,26	2,11

IV.2 Résultats de l'étude de la morphologie des alliages AS13 et AS10G de fonderie avant et après corrosion :

La figure IV.21 représentant la microstructure de l'alliage AS13 n'ayant pas subi une attaque chimique, obtenue par microscopie optique, cette figure montre la présence des pores, et d'une structure dendritique représentant la phase mère, et de l'eutectique du silicium.

Figure IV.22 représentant la microstructure de l'alliage AS10G n'ayant pas subi une attaque chimique, obtenue par microscopie optique, cette figure montre la présence des pores, et d'une fine structure dendritique représentant la phase mère, et d'un fin l'eutectique du silicium. L'affinement de la structure dendritique est probablement dû à la présence du magnésium. Figure IV. (23-24) représentant les Echantillons des alliages AS13 et AS10G attaqué respectivement, confirme les résultats observés sur les figures IV. (21-22).

Chapitre IV : résultats et discussion

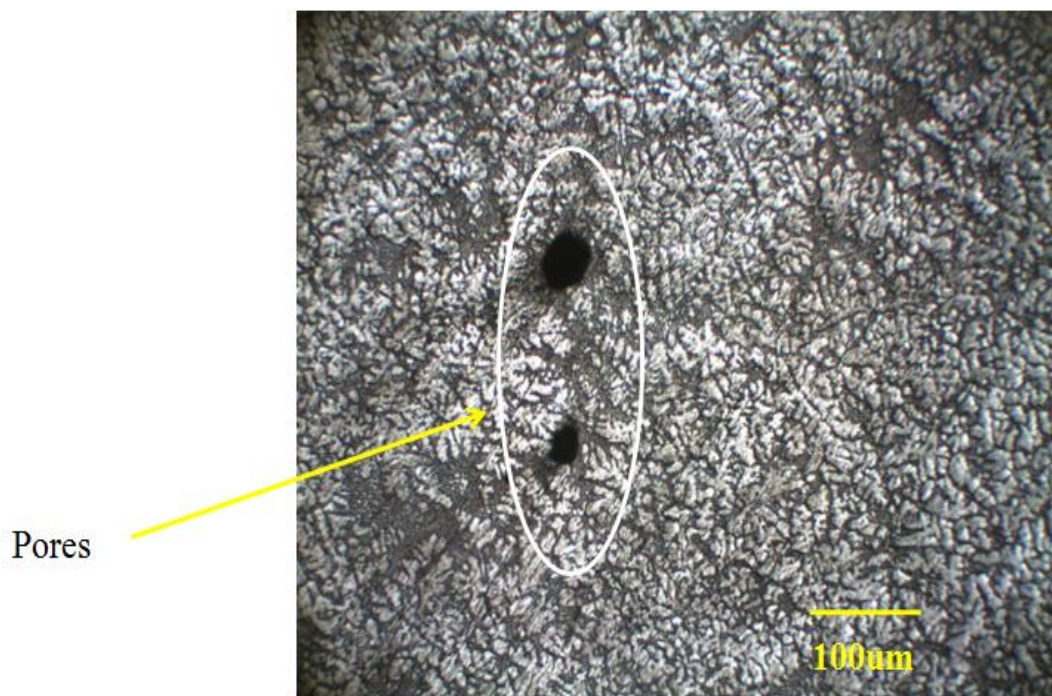


Figure IV.21 : Microstructure de l'alliage AS13 sans attaque

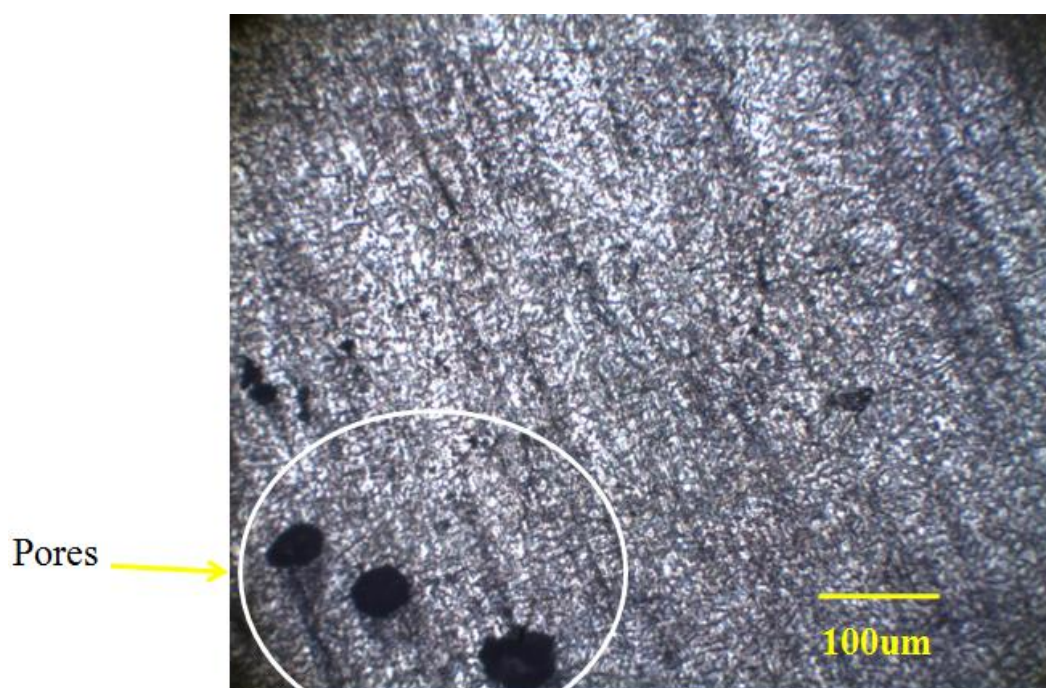


Figure IV.22 : Microstructure de l'alliage AS10G sans attaque

Chapitre IV : résultats et discussion

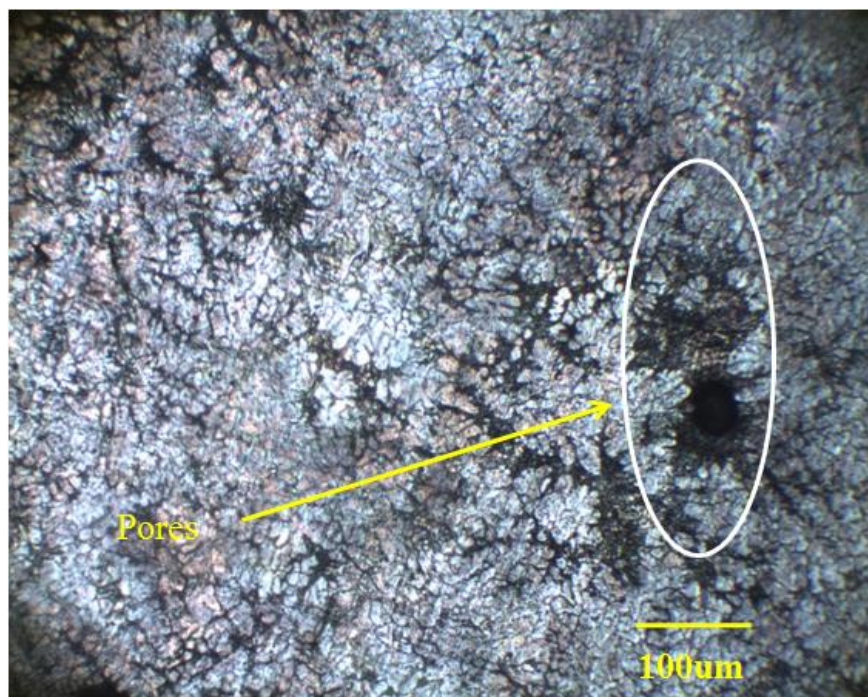


Figure IV. 23 : Microstructure de l'alliage AS13 avec attaque

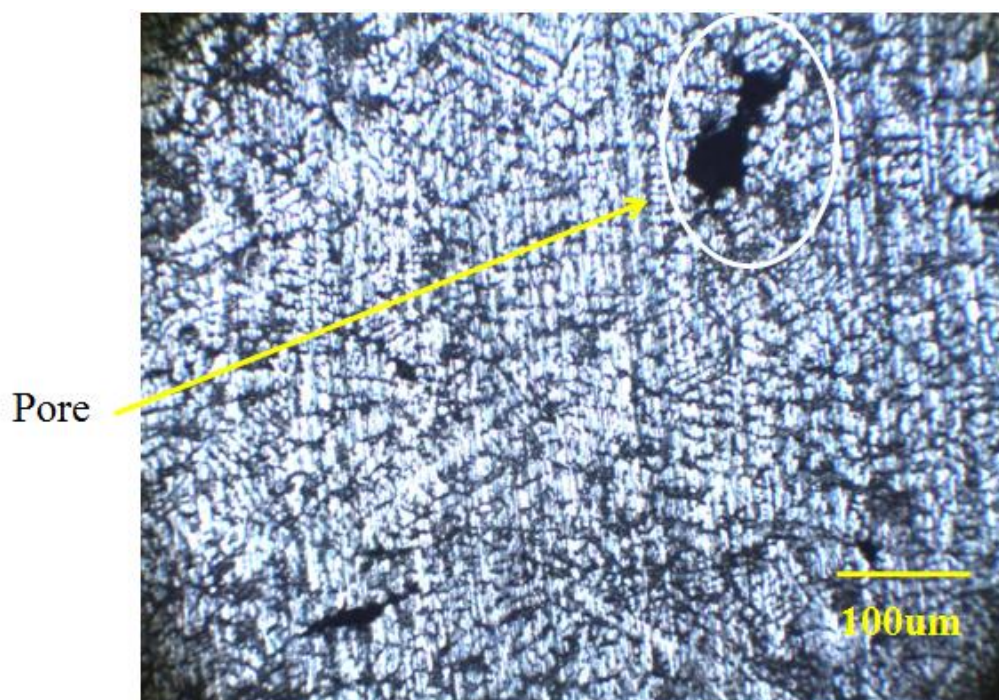


Figure IV.24 : Microstructure de l'alliage AS10G avec attaque

Chapitre IV : résultats et discussion

Les Figures IV. (25-26) représentant les microstructures les échantillons AS13 et AS10G ayant subi en plus un recuit respectivement, ces figures montrent que le recuit induit des modifications profondes des deux matériaux. La structure dendritique disparaît du volume des deux alliages, cette dernière est remplacée par une structure granulaire. La température du recuit contrôle la taille des grains.

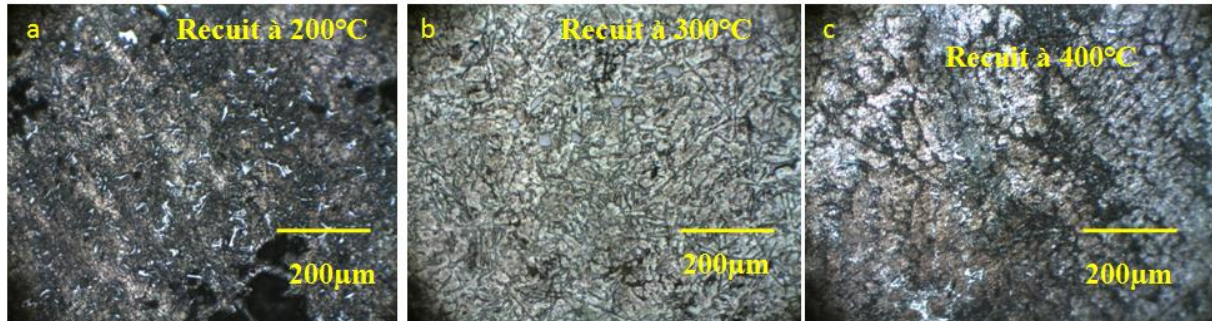


Figure IV.25 : Echantillons recuit de l'alliage AS13 après attaque

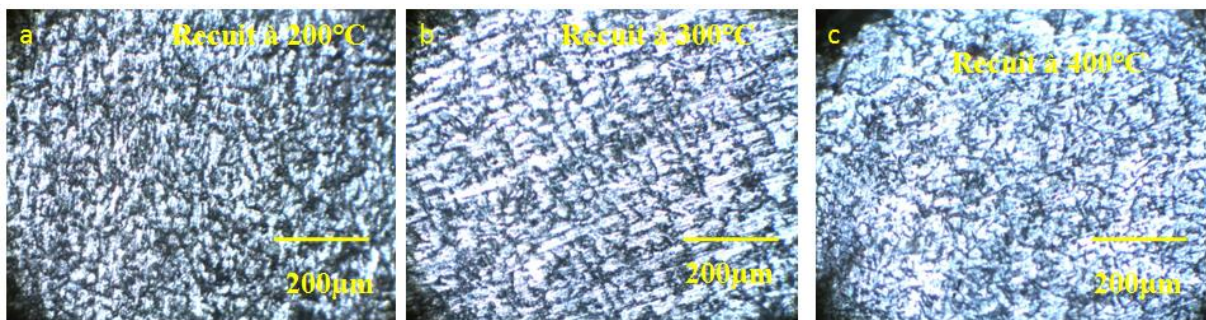


Figure IV.26 : Echantillons recuit de l'alliage AS10G après attaque

Figure IV. (27-28) représentant les échantillons recuit et non recuit des alliages AS13 et AS10G respectivement après une heure d'immersion, dans la solution de 3% NaCl. Ces figures montrent l'apparition d'un mélange de corrosion généralisée et localisée à la surface des échantillons recuits ainsi que sur la surface de l'échantillon non recuit AS10G. Sur la surface de l'échantillon non recuit de AS13 on observe une corrosion localisée entre les dendrites et l'eutectique du silicium.

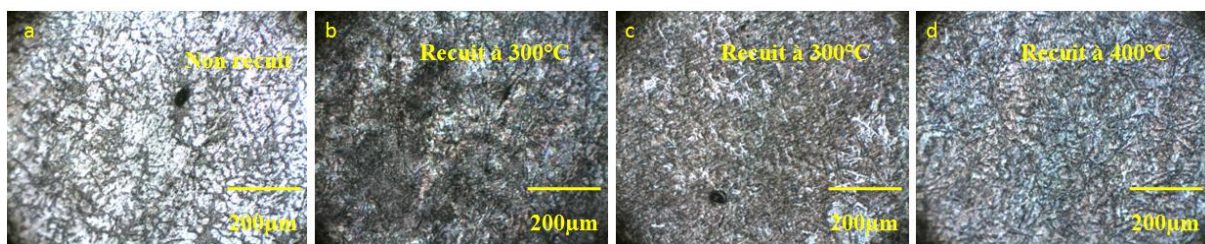


Figure IV.27 : Echantillons recuit et non recuit de l'alliage AS13 après une heure d'immersion

Chapitre IV : résultats et discussion

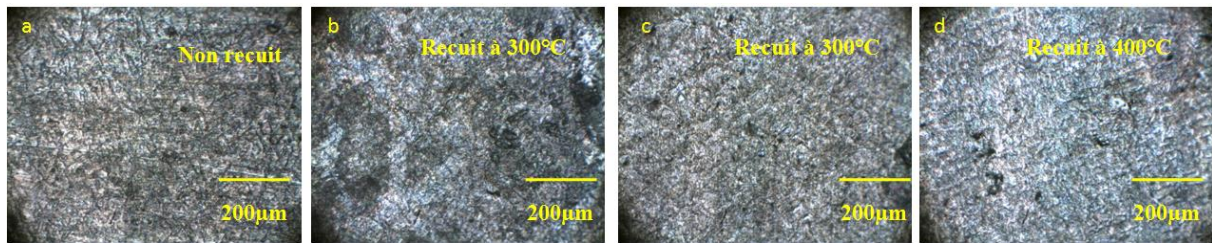


Figure IV.28 : Echantillons recuit et non recuit de l'alliage AS10G après une heure d'immersion

Figure IV. (29-30) représentant les échantillons recuit et non recuit des alliages AS13 et AS10G respectivement après une heure d'immersion, dans la solution de 3% NaCl. Ces figures montrent l'apparition d'un mélange d'une corrosion généralisée et d'une localisée marquées à la surface de tous échantillons recuits et non recuits.

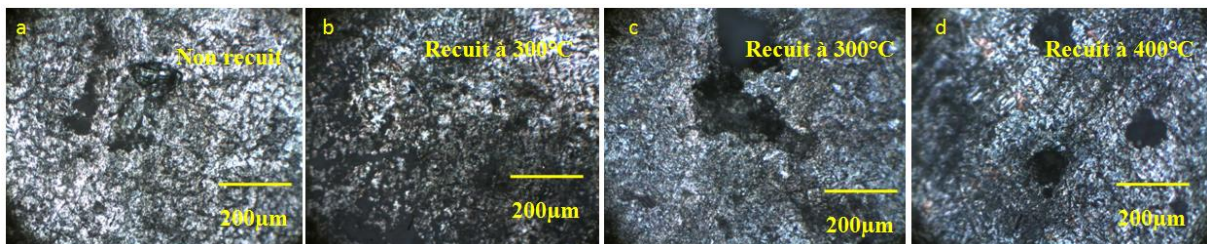


Figure IV.29 : Echantillons recuit de l'alliage AS13 après cinq jours d'immersion

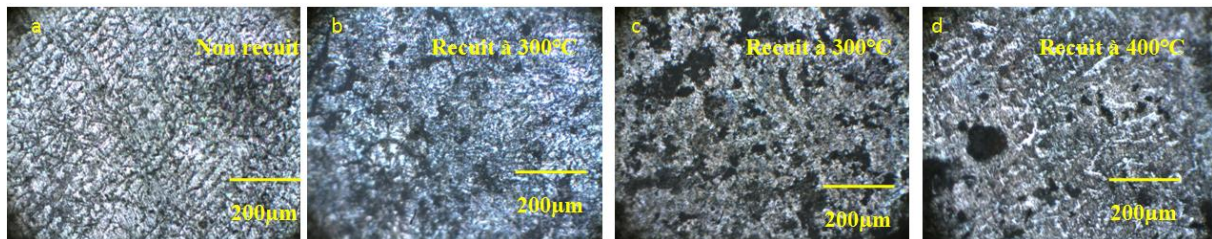


Figure IV.30 : Echantillons recuit de l'alliage AS10G après cinq jours d'immersion

IV.3 la dureté des différents échantillons des alliages AS13 et AS10G de fonderie :

La figure IV.31 montre les duretés des deux alliages non recuits et recuits AS13 et AS10G de fonderie. Cette figure montre que l'alliage AS10G non recuit est plus dur que l'alliage non recuit de l'alliage AS13. Mais après recuit l'alliage AS13 devient le plus dur. Un recuit à 300°C induit une grande dureté de l'alliage AS13. Ceci dit le recuit induit un changement profond de la structure de l'alliage AS13.

Chapitre IV : résultats et discussion

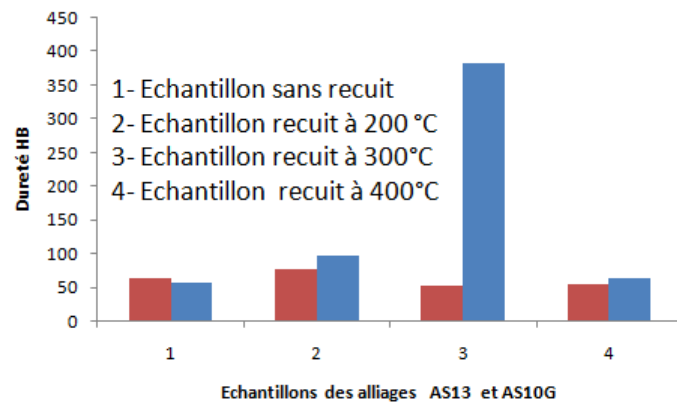


Figure IV.31 : duretés de AS13 (Bleu) et AS10G (Rouge) de fonderie sans et avec recuits

Conclusion général

Conclusion générale

Conclusion général

Conclusion Générale

Les résultats de cette étude nous ont permis de conclure ce qui suit :

- 1- Les deux alliages de fonderie sont constitués de dendrites, l'eutectique de silicium, et de pores.
- 2- La structure dendritique de l'alliage AS10G de fonderie est plus fine que celle de l'alliage AS13 de fonderie.
- 3- La corrosion généralisée n'apparaît pas après une heure d'immersion à la surface de l'alliage AS13 non recuit de fonderie.
- 4- Une solution plus concentrée de NaCl amplifie la sensibilité à la corrosion des deux alliages.
- 5- Le recuit modifie les propriétés mécaniques, sensibilise à la corrosion, et la microstructure des deux alliages.
- 6- La corrosion observée sur les deux alliages comporte les deux types de corrosion, à savoir la corrosion localisée et la corrosion généralisée.
- 7- Le potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion, et la résistance de polarisation, de l'alliage de fonderie AS13 est différent de celui de l'alliage AS10G.
- 8- Le recuit modifie le potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation.
- 9- L'alliage AS10G non recuit est plus dur que l'alliage non recuit de l'alliage AS13

RESUME

Dans ce travail nous avons étudié l'effet de la concentration de NaCl et du recuit aux températures (200°C, 300°C, 400°C), sur la corrosion des alliages AS13 et AS10G de fonderie, nous avons observé que le potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion, et la résistance à la corrosion change en fonction de la concentration de NaCl, et change avec l'application d'un recuit préalable. Le potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation change en fonction du temps d'immersion. La morphologie de corrosion dans la plus des situations est un mélange de corrosion généralisée et localisée.

Mots Clés : Corrosion, AS13, AS10G, Potentiel de la corrosion libre, potentiel de corrosion, polarisation, Dureté HB, Dendrites

ABSTRACT

In This Works we studied the effect of the concentration of NaCl and annealing at temperatures (200°C, 300°C, 400°C), on the corrosion of AS13 and AS10G foundry alloys, we observed that free corrosion potential, corrosion potential, and corrosion resistance change as a function of NaCl concentration, and change with the application of preannealing. The free corrosion potential, corrosion potential and polarization resistance change depending on the immersion time. The corrosion morphology in most situations is a mixture of generalized and localized corrosion.

Keywords: Corrosion, AS13, AS10G, Free corrosion potential, corrosion potential, polarization, HB hardness, Dendrites

Références bibliographiques :

- [1] Les alliages d'aluminium de fonderie Al-Si, université Saad Dahleb de Blida faculté de technologie département de mécanique, 2019/2020
- [2] Y. Aubadai ; « Etudes de la décomposition et de la précipitation dans des tôles des alliages Al-Mg-Si ». Thèse de doctorat, université Mentouri Constantine-Algérie.
- [3] M. IFIRES ; « Etude du comportement électrochimique de l'alliage AA6061 dans le milieu NaCl en présence d'inhibiteur de corrosion ». Mémoire de magister, université Saad Dahleb Blida –Algérie (2012).
- [4] Université Abderrahmane MIRA. Bejaïa. Faculté de Technologie. Département de Génie Mécanique. Année (2015.2016)
- [5] MICHAEL V. GLAZOFF VADIM S. ZOLOTOREVSKY, NIKOLAI A. BELOV,
Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., Oxford, 1st edition, 2007.
- [6] MICHAEL V. GLAZOFF VADIM S. ZOLOTOREVSKY, NIKOLAI A. BELOV: Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., Oxford, 1st edition, 2007.
- [7] <https://bricoleurpro.ouest-france.fr/dossier-723-Aluminium.html>
- [8] UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID Tlemcen, FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
- [9] <https://aluquebec.com/nos-actions/cycle-de-vie-et-economie-circulaire/>
- [10] <https://bricoleurpro.ouest-france.fr/dossier-723-Aluminium.html>
- [11] Sur les alliages Aluminium-Silicium par MM. BRONIEWSKI et SMIALOWSKI Revue de Métallurgie 1932_t29_nr11_s542
- [12] « Les alliages d'aluminium pour fonderie » [En ligne]
- [13] Bouayad A, Gerometta C, Radouani M, Saka A. J Adv Res Mech Eng 2010;1:226.
- [14] « les principaux alliages d'aluminium » [En ligne].

- [15] Aluminium : Properties and Physical Métallurgie, J. E. Hatch (éditeur), ASM, Ohio, U.S.A., 1984.
- [16] Aksenov.A.A. A Belov.N.A. A, Eskin.G : Multi component Phase Diagrammes
- [17] <http://www.world-aluminium.org/statistics>
- [18] V. Christian, Corrosion of Aluminum, Imprint Elsevier Science (2004)
- [19] H. Genki, T. Daisuke, Tsuji. Nobuhiro, Strain hardening and softening in ultrafine grained Al fabricated by ARB process, 15th International Conference on the Strength of Materials (ICSMA-15) IOP Publishing. Journal of Physics : Conférence Séries 240 (2010) 012114.
- [20] V. Castelhana, Probatoire : Etude des différentes techniques induisant le durcissement des alliages d'aluminium les plus courants, en particulier évolution des microstructures et des propriétés mécaniques. Conservatoire National Des Arts et Métiers. Centre Régional de Champagne-Ardenne. (2001).
- [21] F. George, V. Vander, Metallography and Microstructures, Volume 9 of the ASM Handbook, Copyright by ASM International (2004).
- [22] M. YAKOUBI; « Effete des petites deformations par compression Sur le comportement à la corrosion de l'alliage d'aluminium de fonderie Al 4%Cu ». Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Algérie (2015)
- [23] C. E. RAMOUL ; « Elaboration et caractérisation électrochimique des alliages d'aluminium de fonderie (solution aqueuse à 3.2%NaCl) ». Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba-Algérie (2013).
- [24] S. TIERCE « Etude de la corrosion des alliages d'aluminium brases constituant les échangeurs thermiques utilises dans les véhicules automobiles ». Thèse de doctorat Université de Toulouse-France (2006)
- [25] D. Land Olt, Traité des Matériaux, Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux, 1ère Edition, CH-1015 Lausanne 1993.
- [26] : H. Uhlig, Corrosion et Protection, DUNOD, Paris (France 1970).
- [27] J. Catonné, L. Lacour celle, les Revêtements Protecteurs dans l'Industrie, Principe - Applications – Choix, CAST LYON, 1977.

[28] A. Campa, Protection des Surfaces Métalliques Contre la Corrosion, Technologie Professionnelle pour les Mécaniciens, Tome 2, Paris, les Editions Foucher, 1971.

[29] C. Fiaud, Inhibiteurs de Corrosion, ε160, Technique de l'Ingénieur, 2000.

[30] Sandrine Payan, "Matériaux, Comportement à la corrosion galvanique de Renforcée, composites à matrice d'alliage d'aluminium Haut-module, par des fibres de carbone," BORDEAUX I, 2003.

