

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'Obtention du Diplôme Master en Génie mécanique

Option : **Science des matériaux**

Thème

Etude de la corrosion de l'alliage ALS10Mg en présence d'un champ magnétique de faible intensité

Proposé et dirigé par :

Mr : ZAZI. NACER

Co-promoteur :

Mr : KORICHI BELKACEM

Réalise par :

M^{lle} : Ouadouri Chafia

M^{lle} : Touati Ouahiba

Promotion 2016 /2017

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces années d'étude. Pour toute la puissance qu'il nous avoir donnée pour Réaliser ce modeste travail.

*Nous exprimons notre plus vif remerciement à notre promoteur Mr. **ZAZI NACER** de nous avoir guidé et accepté de diriger ce travail. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il nous a apportés...*

*Nos sincères remerciement à notre co-encadreure Mr. **KORICHI BELKACEM** qui nous avoir apporté une aide précieuse.*

Nous remerciement les plus vif s'adresse aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail et pour leur présence dans ce jury.

Nous tenons aussi à exprimer nos profonds remerciements aux membres du laboratoire ainsi que, toutes les personnes qui ont contribué de manière directe ou indirecte à la réalisation de ce travail.

Nos chaleureux remerciements vont également à a tous nos enseignants

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leurs soutiens et leurs encouragements.

*Je dédie ce travail
Aux deux êtres les plus précieux au monde
Mes très chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la
hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu
Les protège.
A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet, mon cher
mari : Youcef
A mon ange ENZO
A ma belle-famille KACEL
A mes chers frères : Mohand, Belaid, Ghillas
A tous mes voisins et amis.*

OUAHIBA

Je dédie ce travail à

A la femme la plus courageuse, sensible, généreuse, la plus belle à mes yeux, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère que j'aime

A ceux qui m'ont tout donné joie et bonheur, amour, mes chéries frères : Samir, Karim, Rabah et mes sœurs Nacera, Karima et son mari

A LA MEMOIRE DE MON PERE, Repose en paix

CHAFIA

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Aluminium et ses Alliages

I.I Généralités sur l'Aluminium	4
I.I.1.Introduction.....	4
I.I.2.Historique.....	4
I.I.3.Minerais.....	5
I.I.4.Fabrication de l'aluminium.....	5
I.I.4.1.production de l'alumine	5
I.I.4.2.Production d'Aluminium	6
I.I.5.La structure de l'Aluminium.....	8
I.I.6.Les atouts de l'aluminium.....	9
I.I.7.Propriétés de l'aluminium.....	10
I.I.7.1.Propriétés physico-chimiques.....	10
I.I.7.2.Propriétés mécaniques.....	11
I.I.7.3.Propriétés magnétiques.....	12
I.I.7.4.Propriétés optique.....	13
I.I.7.5.Propriétés électrique	14
I.I.8.Usinage	14
I.I.9.Soudage.....	14
I.I.10.La résistance à la corrosion.....	15
I.I.11.Utilisation de l'aluminium	15
I.2.Aluminium et ses alliages	16
I.2.1.Alliages de corroyage.....	16
I.2.1.1.désignation numérique.....	16

I.2.1.2.La désignation symbolique	17
I.2.2Alliages de moulage ou de fonderie	17
I.2.2.1.Désignation numérique à 4 chiffres	19
I.2.2.2.Désignation symbolique	19
I.2.3.Familles d'alliages d'aluminium silicium de fonderie	20
I.2.4.Traitements thermiques des alliages de fonderie	21
I.2.5.Structure des alliages d'aluminium de fonderie	23
I.2.6.Les principaux types d'alliages Al-Si de moulage et leurs applications.....	25
I.2.6.Les impuretés et leur influence	27
I.2.7.Effets des éléments d'addition	29

Chapitre II : Corrosion de l'Aluminium et ces alliages

II.1. Introduction	33
II.2. Définition de la corrosion	33
II.3.Les facteurs de la corrosion	33
II.3.1. Facteurs reliées au milieu de corrosion.....	34
II.3.2. Nature de la surface du substrat	34
II.3.3.Condition d'emploi	34
II.3.4. Indic du temps.....	34
II.4. Diagramme E-pH de l'aluminium	34
II.5. Réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium	35
II.5.1. Définition d'une électrode	37
II.6. Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium	37
II.7. L'état de polarisation des métaux	39
II.8. Courbes de polarisation	39
II.9.Resistance à la corrosion	39
II.10.Différents modes de corrosion de l'aluminium et ses alliages	40

II.10.1. Corrosion uniforme ou généralisée	40
II.10.2. Corrosion localisée.....	40
II.10.3. Corrosion par piqure	41
II.10.4. Corrosion galvanique.....	42
II.10.5. corrosion intergranulaire.....	44
II.10.6. Corrosion-érosion	45
II.10.7. Corrosion électrochimique	45
II.10.8. Corrosion feuilletant	45
II.10.9. Corrosion caverneuse	46
II.11. Potentiel de dissolution ou potentiel de corrosion.....	46
II.12. Action des chlorures sur l'aluminium et ses alliages.....	46

Chapitre III : Effet du champ magnétique sur la corrosion

III.1. Le magnétisme	48
III.1.1. Le champ magnétique.....	48
III.1.2. Unité et utile de mesure	49
III.2.3 La perméabilité magnétique	49
III.5.3. Principales lois fondamentales	51
III.3.2 Classification des milieux magnétiques.....	53
III.3.1. Le diamagnétisme.....	53
III.3.2. Le paramagnétisme.....	54
III.3.3. le ferromagnétisme.....	54
III.3.4. Antiferromagnétisme.....	55
III.4. Effets du champ magnétique sur les métaux	55
III.5. Les aimants.....	56
III.6. Matériaux magnétiques durs ou aimants permanents.....	56

III.7. Formation d'une couche d'oxyde	57
III.8. Effets du champ magnétique sur la corrosion	58
III.8.1. Effets du champ magnétique sur la cinétique de la corrosion..	58
III.8.1.1 Le transfert de charges.....	58
III.8.1.2 le transport de matière	58
III.8.1.3.l'adsorption à la surface.....	59

Chapitre IV :Techniques d'étude et conditions expérimentales

IV .1. Introduction.....	61
IV.2.Matériau étudié	61
IV.3.Milieus d'étude	61
IV.4. Techniques de caractérisation	61
IV.4.1.La cellule électrochimique	61
IV.4.1.1.1. L'électrode de travail (ET)	63
IV.4.1.1.2. L'électrode de référence (ER).....	64
IV.4.1.1.3. La contre électrode ou l'électrode auxiliaire(CE).....	64
IV.4.2. Préparation de la surface	65
IV.5.Techniques d'analyse, d'observation et de caractérisation de surface	66
IV.5.1. La microscopie optique	66
IV.5.2. La Microscopie électronique à balayage	66
IV.6. Essai de dureté	67
IV.6.1. Micro dureté Vickers (Hv)	68
IV.7 Méthode d'étude électrochimique.....	69
IV.7.1.Chronopotentiométrie.....	69
IV.7.2.Suivi du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion	70
IV.7.3.Loi de Nernst d'une réaction électrode	71
IV.7.4. La densité du courant, le potentiel de corrosion et résistance de polarisation	72

IV.7.5.les courbes de polarisations	75
IV.8. Dispositifs expérimentaux.....	76

Chapitre V : Résultats et Interprétation

V.1. Introduction	79
V.2. L'analyse microstructurales et morphologie de corrosion	79
V.2.1 L'analyse de la surface polie au microscope optique avant corrosion dans la solution de 0.3 % NaCl de l'alliage AS10G brut de coulée	79
V.2.2. Observation au microscope optique après le tracé de la courbe de polarisation en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité de l'alliage AS10G brut de coulée.....	81
V.2.4. Observation au microscope électronique à balayage de brut de coulée	84
V.3.Micro dureté de l'alliage AS10G brut de coulée après polissage	84
V.4.Cinétique de la corrosion de l'alliage AS10G dans une solution de 0,3% Na Cl	85
V.4.1 évolution du potentiel de la corrosion libre	85
V.4.1.1 Echantillon poli en absence du champ de faible intensité	85
V.4.1.2. Echantillon poli en présence du champ de faible intensité	86
V.4.2. Les courbes de polarisation	88
V.5.les paramètres électrochimiques.....	93
Conclusion générale.....	95
Références bibliographiques.....	

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Cuve d'électrolyse d'aluminium à anodes précuites.....	06
Figure I.2 : Production d'aluminium primaire.....	07
Figure I.3 : Structure cristallin de l'aluminium, (a) maille cubique à face centré, (b) projection de la maille.....	08
Figure I.4 : Susceptibilité magnétique del'aluminium.....	13
Figure I.5 : Schéma d'une dendrite.....	23
Figure I.6 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	25
Figure I.7 : Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition. Les pourcentages atomiques indiquent les limites de solubilité de l'élément.....	30

Chapitre II

Figure II.1 : Diagramme E-pH du système Al-H ₂ O 25°C (M. POURBAIX).....	35
Figure II.2 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium.....	37
Figure II.3 :Types de Corrosion (a) Corrosion localisée, (b) Corrosion uniforme d'un métal.....	40
Figure II.4 : Corrosion localisée dans un alliage Al-Mg.....	41
Figure II.5 : Mécanisme de la piqûration de l'aluminium.....	42
Figure II.6 : Corrosion galvanique.....	43
Figure II.7 : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer à 25°C.....	44
Figure II.7 : Corrosion intergranulaire.....	45

Chapitre III

Figure III 1 : Analogie courant électrique – courant particulaire.....	50
Figure III.2 : schéma montre le ruban place d'un champ magnétique.....	51
Figure III.3 : Champ magnétique d'un matériau diamagnétique.....	53
Figure III.4 : Champ magnétique d'un matériau ferromagnétique.....	55
Figure III.5 : Champ magnétique de l'aimant permanent.....	58

Chapitre IV

Figure IV.1 : Montage électrochimique utilisés.....	62
Figure IV.2 : Echantillons enrobé représente l'électrode de travail utilisée dans les essais électrochimiques.....	63
Figure IV.3 : L'aimant permanent utilisé lors des essais électrochimique.....	64
Figure IV.4 : Polisseuse utilisée.....	65
Figure IV.5 : Condition de l'essai de Vickers.....	68
Figure IV.6 : La diagonale de l'empreinte et l'image de l'empreinte.....	68
Figure IV.7 : Appareil de micro dureté.....	69
Figure IV.8 : Principales formes des courbes Potentiel-temps.....	71
Figure IV.9 : La courbe globale intensité-potentille	72
Figure IV.10 : La courbe $\log_{10} J = f(E)$ et droites de Tafel.....	73

Chapitre V

Figure V.1 : Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage de fonderie AIS10G poli.....	81
Figure V.2 : Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage AIS10G après le tracé de la courbe de polarisation en absence du champ magnétique.....	82
Figure V.3 : Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage AIS10G après le tracé de la courbe de polarisation en présence du champ magnétique.....	82
Figure V.4 : Micrographiques obtenu par microscopie optique d'un alliage AIS10G dans une solution de 0.3% NaCl en absence d'un champ manétique.....	82
Figure V.5 : Micrographiques obtenu par microscopie optique d'un alliage AIS10G dans une solution de 0.3% NaCl en présence d'un champ manétique.....	83
Figure V.6 : Microstructure de l'alliage AS10G obtenu par microscope électronique à balayage.....	84
Figure V.7 : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% Na Cl en présence du champ magnétique de faible intensité.....	86
Figure V.8 : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% Na Cl en absence du champ magnétique de faible intensité.....	87
Figure V.9 : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% NaCl comparaison entre le potentiel de corrosion libre en présence du champ (▲) et le potentiel libre de corrosion en absence du champ magnétique (◆).....	88

Figure V.10 : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique	89
Figure V.11 : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique : effet loupe dans la zone du courant nul.....	89
Figure V.12 : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique	90
Figure V.13 : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique : effet loupe dans la zone du courant nul.....	90
Figure V.14 : Comparaison des courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique	91
Figure V.15 : Comparaison des courbes de la polarisation $i=f(E)$ dans la zone de i proche du 0 pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique.....	91
Figure V.16 : Courbes de la polarisation ($\text{Log}(i)=f(E)$) pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique	92
Figure V.17 : Courbes de la polarisation ($\text{Log}(i)=f(E)$) pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique	92
Figure V.18 : Comparaison des courbes de la polarisation $\text{Log}(i) =f(E)$ pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique.....	93

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : propriétés physiques d'aluminium.....	10
Tableau I.2 : les principales caractéristiques mécanique de l'aluminium.....	11
Tableau I.3 : les principaux types d'alliage Al-Si.....	27
Tableau I.4 : influence des éléments d'addition sur les différentes propriétés.....	29

Chapitre II

Tableau II.1 : Les potentiels de certaines particules intermétalliques et phases.....	38
Tableau II.2 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur potentiel de corrosion.....	41
Tableau II.3 : différentes formes de la corrosion localisée.....	41

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Composition chimique de l'alliage AIS10G.....	61
Tableau IV.2 : le potentiel libre de quelques métaux dans une solution NaCl.....	70

Chapitre V

Tableau V.1 : micro dureté de l'alliage AS10G.....	85
Tableau V.2 : Paramètre électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'alliage AS10G après différent temps d'immersion dans la solution Na Cl à 0,3%.....	93

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'aluminium pur est un métal qui résiste bien à la corrosion. Au contact de l'air et de nombreux milieux oxydants, les surfaces d'aluminium se recouvrent naturellement d'un film d'oxyde ou d'hydroxyde d'alumine (Al_2O_3) qui représente une couche protectrice, chimiquement inerte et non conductrice. Très utilisé dans plusieurs domaines (en aéronautique ; automobile ; alimentation etc...) pour sa faible densité (2,7), sa résistance mécanique peut être améliorée par l'addition d'éléments d'alliage tels que le cuivre (Duralumins), le silicium, le magnésium, le zinc, le manganèse ou le lithium.

Le silicium est l'élément d'alliage le plus important dans les alliages d'aluminium. C'est d'ailleurs cet élément qui permet de différencier les alliages de fonderie de ceux de corroyage. La présence du silicium réduit le retrait des pièces en plus d'améliorer la fluidité des alliages, facilitant ainsi le moulage. Toutefois, il rend les alliages plus difficiles à usiner. Industriellement, les alliages Aluminium-Silicium sont les plus utilisés pour leurs propriétés de fonderie, leur aptitude au soudage, leur bonne stabilité dimensionnelle et leur faible température de fusion. Ils ont de plus une bonne résistance aux éraflures lors des périodes de faible lubrification du moteur.

L'électrochimie est une discipline dont on peut dire, elle étudie la relation entre transformations chimiques et passage d'un courant électrique circule entre les électrodes. Son domaine d'application est extrêmement vaste : production d'énergie électrique à partir de réactions chimiques (piles et accumulateurs), réalisation de réactions chimiques (électrochimie analytique), détermination de mécanismes et de cinétique réactionnelles (électrochimie organique, corrosion),...etc.

La corrosion électrochimique appelée aussi corrosion humide, elle se produit lorsqu'il y a hétérogénéité physique soit dans le métal ou l'alliage métallique constituées, par des zones écrouies situées à côté de zones bien recristallisées, ou chimiques qui correspondent à la présence d'impuretés, d'inclusions, de précipités etc..., dans la solution corrosive. La nature électrochimique de la corrosion est liée par essence à la structure atomique et électrique de la matière, elle est accélérée en présence d'humidité et des chlorures. Ces hétérogénéités

INTRODUCTION GENERALE

déterminent la formation à la surface du métal de microanodes et de microcathodes qui constituent des micropiles.

La méthode électrochimique permet d'obtenir un grand nombre de renseignements sur le comportement d'un métal plongé dans un réactif donné, en particulier en ce qui concerne son aptitude à la passivation et aussi sa tendance à la corrosion.

L'objectif de notre travail consiste à étudier le comportement électrochimique d'un alliage d'Aluminium silicium dans un milieu chlorure, en présence d'un champ magnétique, et l'influence de ce dernier sur la corrosion de cet alliage.

Le plan du présent travail est le suivant :

Dans la première partie, nous présentons une étude bibliographique comportant trois chapitres :

Le premier chapitre nous représente des recherches faites sur l'Aluminium et ces alliages et en particulier les alliages d'aluminium silicium de fonderie. Le deuxième chapitre sur la corrosion d'aluminium et de ces alliages. Le troisième chapitre sur l'effet du champ magnétique sur la corrosion.

La deuxième partie traite l'étape expérimentale à travers deux chapitres :

Le premier chapitre décrit les dispositifs expérimentaux et les conditions d'étude, pour les essais, et les mesures électrochimiques, ainsi que les méthodes d'observations microstructurales, sont également précisés.

Le deuxième chapitre est consacré à la représentation de tous nos résultats obtenus, ainsi que leurs interprétations.

Enfin, l'ensemble de ce travail se résume par une conclusion générale.

I.I Généralités sur l'aluminium :

L'aluminium est un des métaux les plus employés dans le monde. Il est présent dans plusieurs secteurs (l'automobile, le transport, l'emballage, architecture, la conservation des aliments...etc.) [1]. L'aluminium est un métal brillant, blanc-argent. Relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. Est un métal a longue durée de vie, flexible, imperméable et disposant des caractéristiques exceptionnelles comme légèreté, résistance mécanique, bonne conductibilité thermique et électrique.[3] Il est protégé contre l'oxydation, et il est à 100% recyclable. Il n'y est présent dans la nature que combiné avec l'oxygène, le silicium, le fluor ou autres éléments [2].

I.I.1.Historique :

L'aluminium a été préparé pour la première fois en 1827 par le scientifique allemand Friedrich Wöhler en traitant le chlorure d'aluminium par le potassium, celui-ci obtient des particules d'aluminium impur. En 1854, le chimiste français Henri Sainte Claire Deville obtient le métal en réduisant le chlorure d'aluminium par le sodium, en 1855, crée une usine expérimentale à grande échelle et expose l'aluminium pur.

En 1886, Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats-Unis découvrent, indépendamment que l'oxyde d'aluminium ou alumine se dissout dans la cryolite et peut être décomposé par électrolyse pour donner du métal brut en fusion. En 1887, le chimiste autrichien Karl Joseph Boyer fait breveter un procédé de transformation [2].

Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine, l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...etc. [4].

I.I.2.Minerais :

Bien que l'aluminium apparaisse sous la forme de silicate, le seul minerai utilisé est la bauxite, dont le nom provient du lieu-dit "Les Baux" dans le midi de France, de la famille des Latérites. La Bauxite est une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite, Boehmite, Diaspore), associés à des oxydes de fer (Fe_2O_3) et des

impuretés (Silice, Calcite). Elle ressemble à de l'argile dure mais qui ne fait pas de pâte avec l'eau [2].

I.I.3.Fabrication de l'aluminium :

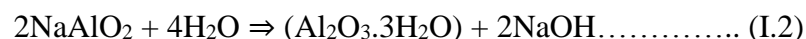
I.I.3.1.production de l'alumine :

La bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression de 30 à 40 bars et portée à la température 200 à 240°C, l'alumine contenue dans la bauxite se transforme en une solution d'aluminate de sodium selon la réaction suivante :



Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "boues rouges" sont retirés par décantation et filtration. Le fer précipite ainsi que le titanate de soude ; la silice précipite également sous forme de silico-aluminate de soude. Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium.

La solution d'aluminate de sodium obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30 m de haut dans lesquels on ajoute du trihydrate d'alumine pure très fine, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le trihydraté d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée.



L'alumine Al_2O_3 est déshydratée par chauffage à 1100°C en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche qui titre à 99%. La calcination est le dernier stade de la fabrication de l'alumine.

I.1.3.2. Production d'Aluminium :

Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Héroult", du nom de leurs inventeurs, l'américain Charles Martin Hall et le français Paul Héroult. Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite (Na_3AlF_6 , qui est un sel fondu, aluminofluorure de sodium). Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre 900 et 1000°C.

L'alumine ne fondrait qu'au-dessus de 2000°C si elle n'était pas en présence de cryolite et de fluorure de calcium. Le four servant à l'électrolyse est un four en acier revêtu de briques réfractaires dont la cuve est en charbon aggloméré constituant la cathode sur laquelle se dépose l'aluminium fondu et il y a un dégagement d'oxygène sur l'anode en coke de pétrole plus brai qui est oxydée.

Il faut compter l'équivalent de huit tonnes de charbon pour produire une tonne d'aluminium. Les cuves sont entièrement capotées afin de capter les gaz qui s'échappent du bain lors de l'électrolyse (ces gaz contiennent notamment du fluor) et de les envoyer vers un dispositif d'épuration où le fluor est récupéré par fixation sur de l'alumine. La combustion du carbone oblige à remplacer régulièrement les anodes.

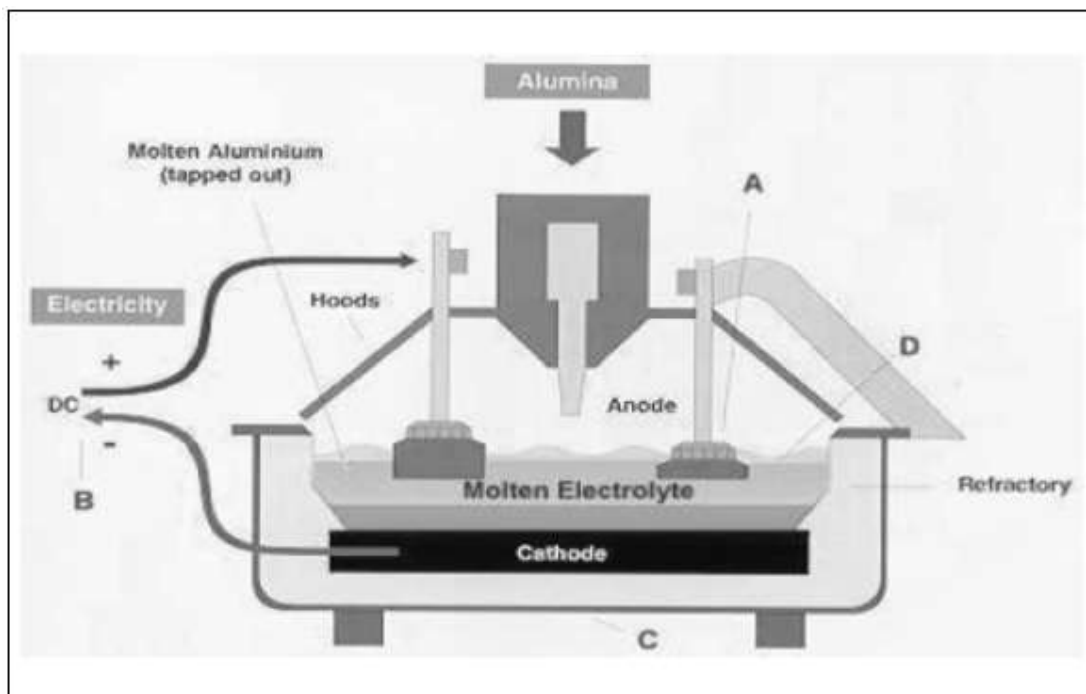


Figure I.1 : Cuve d'électrolyse d'aluminium à anodes précurées [2].

A : Anode en carbone usée

D : Cathode en carbone

C : Réfractaires et isolants silico-alumineux

À intervalles réguliers, l'aluminium en fusion est siphonné dans des poches de coulée ou creusets et transféré dans des fours d'attente à la fonderie. L'aluminium obtenu est pur à 99% et doit être raffiné pour éliminer les impuretés (fer, silicium, zinc, titane, cuivre,...). On emploie pour cela un procédé électrolytique proposé par Betts en 1905. L'aluminium obtenu est pur à 99,998%.

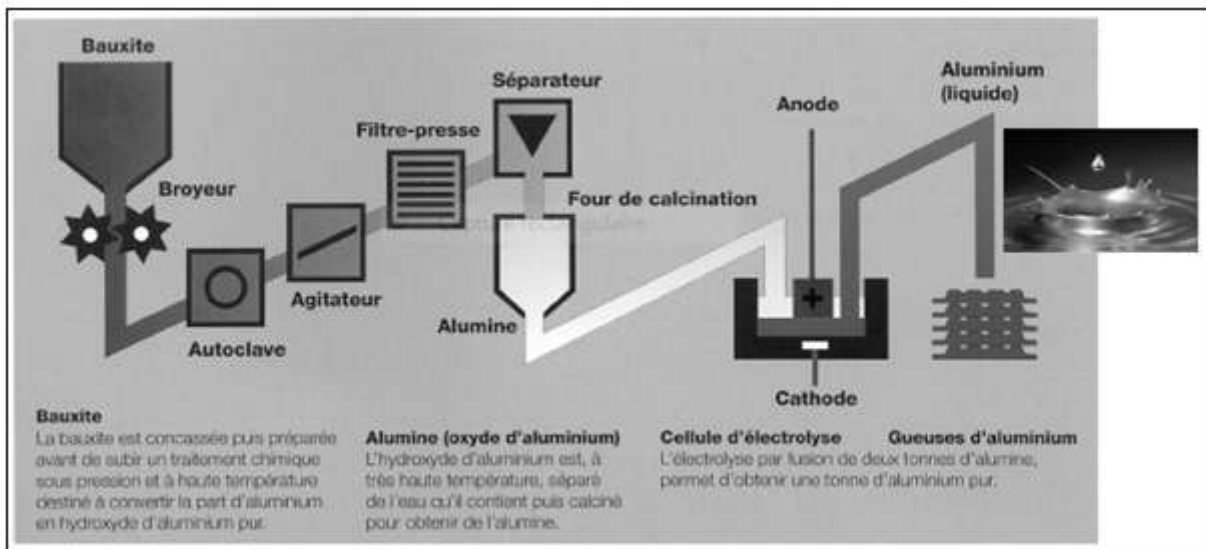


Figure. I.2 : Production d'aluminium primaire [2]

✓ **Le rendement de procédé :**

La production d'une tonne d'aluminium demande 2 tonnes d'alumine, chaque tonne d'alumine nécessitant 2,5 à 2,7t de minerai, il faut donc 5 à 5,4t de bauxite pour obtenir 1t d'aluminium, soit un rendement d'environ 20%.

I.1.5. La structure de l'Aluminium :

La structure de l'aluminium émane de celle du Cubique à Faces Centrées (compact). Le CFC correspond donc à la maille présentée en figure 3. (a) qui montre la structure perspective, De plus, pour simplifier la schématisation, cette maille peut être réalisée en projection afin de faciliter la lecture, et donc se « dessine » sous la forme d'un cube, représenté en figure 3. (b).

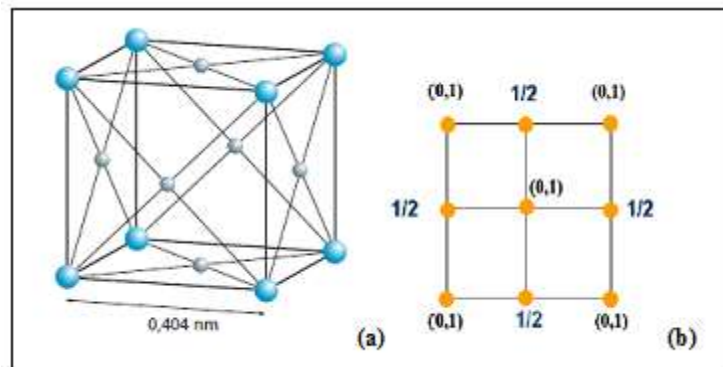


Figure. I.3 : Structure cristalline de l'aluminium, (a) maille cubique à face centrée [5], (b) projection de la maille [7].

En effet, les sphères sont en contact selon les diagonales de face. Cependant, toutes les sphères ne sont pas entières dans la maille, elles sont toutes partagées entre plusieurs mailles. Les 8 particules aux sommets du cube sont partagées en 8 mailles et donc divisées par 8 et les 6 particules aux centres des faces appartiennent à 2 mailles, et sont donc divisées par 2. Ainsi, soit « n » le nombre de motif : $n = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$ sphères entières par maille. Pour une structure CFC, le lien entre le paramètre de maille et le rayon est : $a\sqrt{2} = 4r$.

La compacité : notée « C », correspond au taux d'occupation réel de l'espace dans la maille. Elle s'obtient en réalisant le rapport du volume occupé par les sphères et du volume total de la maille. L'aluminium étant un cristal métallique, il obtient ainsi une grande compacité. En utilisant le modèle des sphères dures pour représenter les particules, on obtient le calcul suivant :

$$C = n \times \frac{V_{\text{sphères}}}{V_{\text{total}}} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \pi \times r^3}{a^3} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \times \left(\frac{a}{4\sqrt{2}}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74$$

L'aluminium a une électronégativité de 1.61 et ne possède pas d'électrons localisés, en effet les électrons sont libres de leurs mouvements. La mobilité de ces électrons est à l'origine

des propriétés conductrices de ce matériau. C'est pour cela que ce métal possède des liaisons (interaction stabilisante entre deux particules) fortes appelés « liaisons métalliques ». La particularité de cette liaison est qu'elle est l'interaction de groupe entre les cations et un nuage d'électron libre. Ainsi cette liaison est non dirigée (les électrons ne se déplacent pas suivant un axe). De plus, la liaison métallique est caractérisée par une énergie de cohésion en moyenne plus faible que la liaison covalente ou ionique [7]

Les défauts microscopiques : il y a des défauts de fabrication ou de manipulation comme des rayures ou une macro-rugosité (ex : traces délaminage), et encore les défauts liés à la microstructure tels que les joints de grains intermétalliques. La surface occupée par de tels défauts est faible (0,2%), mais ses grains réduisent la résistance à la corrosion et la durée de vie des alliages. [5]

I.1.5. Les atouts de l'aluminium :

Le développement des applications de l'aluminium et ses alliages, la croissance régulière et soutenue de la consommation s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs.

La légèreté : L'aluminium est le plus léger de tous les métaux usuels. C'est le premier des atouts de l'aluminium au quel on pense spontanément, plusieurs domaines d'application tirent profit de légèreté.

La conductivité thermique : L'aluminium non allié à une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle de cuivre, le plus performant des métaux usuels

La conductivité électrique : Est de l'ordre deux tiers de celle de cuivre. L'aluminium ou alliage d'aluminium, sous forme de barres, de tubes, est très utilisé dans les postes de coaxions des réseaux aériens haute et moyen tension, dans les câbles téléphoniques, pour la protection contre les champs électrique ou magnétiques [7].

I.I.6. Propriétés de l'aluminium :**I.I.6.1. Propriétés physico-chimiques :**

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. Il est assez mou et malléable. C'est entre 100 et 150°C qu'il se laisse le mieux travailler, ce qui permet de confectionner avec facilité les pièces de profilés les plus variées et très compliquées.

L'aluminium est donc un des réducteurs les plus énergiques que l'on connaisse et cependant ce métal est pratiquement inaltérable à l'air; cela tient à ce qu'il se produit une oxydation superficielle qui recouvre le métal d'une pellicule d'alumine très adhérente, continue et imperméable, et le protège contre toute oxydation ultérieure. L'eau distillée, l'eau de pluie, 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'action sur l'aluminium de même que 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 [2].

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau (I.1) ci-dessus :

Tableau (I.1) : propriétés physiques d'aluminium [5].

Propriétés	unité	Valeur	Remarque
Numéro atomique		13	
Masse volumique	kg. m	2698	sous 1013 10 ⁻³ bar
Point de fusion	°C	660.45	sous 1030 10 ⁻³ bar
Point d'ébullition	°C	2056	à 927°C
Pression de vapeur	Pa	3.7 10 ⁻³	à 927°C
Energie interne massique u	J. kg ⁻¹	3.98.10 ³	
Capacité thermique massique Cp	J. kg ⁻¹ k ⁻¹	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	W. m ⁻¹ k ⁻¹	237	à 25°C
Coefficient de dilation linéique α _l	10 ⁻⁶ K ⁻¹	23.1	à 25°C
Résistance électrique	10 ⁻⁹ Ω. m	2.63	à 25°C
Susceptibilité magnétique k		0.6 .10 ⁻³	à 25°C
Module d'élasticité E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson ν		0.33	

I.1.6.2. Propriétés mécaniques :

L'aluminium est un métal très ductile car, il a une structure cubique à face centrée (CFC) qui possède de nombreuses directions de glissement du fait de sa symétrie. Cette structure cristallographique est une des plus favorables au passage des dislocations, contrairement à la structure hexagonale compacte du magnésium par exemple qui en fait un métal fragile.

La résistance à la rupture de l'aluminium pur est de l'ordre de 80 MPa 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.).

Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. Ainsi à basse température (grâce à leur structure cristalline (CFC)), les alliages d'aluminium ont une bonne ductilité.

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

Tableau (1.2) : les principales caractéristiques mécanique de l'aluminium [4]

	coulé	Limite recuit
Risatance de traction N/mm ²	70 à 100	70 à 90
Limite d'élasticite N/mm ²	30 à 40	30 à 40
Allangement %	15 à 25	40 à 30
Dureté Brinell	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité MPa	67500	67500

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, Pour améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium il est nécessaire d'introduire des hétérogénéités dans sa structure cristalline afin de stopper ou ralentir la propagation des défauts cristallins, les dislocations [5].

Les qualités mécaniques de l'aluminium sont fortement améliorées, lorsqu'il est possible de déformer le réseau cristallin par déformation à froid (laminage, extrusion, forgeage) ou bien par ajout d'éléments d'alliage (le cuivre, le manganèse et le magnésium pour se présenter

sous forme d'alliages légers) en solution solide qui permettent de déformer la structure cristalline de la matrice. Une autre possibilité est de créer des obstacles aux dislocations sous forme de précipités intermétalliques. Les composés intermétalliques sont plus riches en éléments d'alliage et impuretés que la matrice, qui est une solution solide contenant l'élément d'alliage majoritaire.

I.1.6.3. Propriétés magnétiques :

Du fait de sa valence impaire et du peu d'électrons célibataires sur les derniers niveaux d'énergies, l'aluminium est paramagnétique. Il ne possède donc pas une aimantation spontanée mais, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis. Sa susceptibilité magnétique décroît avec la température. La susceptibilité magnétique peut diminuer sous l'effet de l'écroutissage de l'ordre de 5 à 15 % avec une déformation de 50 %.

✓ Coefficient de Hall :

Du fait de la structure électronique de l'aluminium, le coefficient de Hall R_H est très dépendant du rapport B/ρ_0 (avec B le champ magnétique (en $W.m^{-2}$) et ρ_0 la résistivité électrique (en $\Omega.m$) à (0 K). Pour les champs magnétiques faibles ($B/\rho_0 < 100$), R_H est indépendante du champ magnétique et isotrope, cette dernière varie avec la température. Pour les champs élevés ($B/\rho_0 > 100$), R_H , tout en restant indépendante du champ magnétique, tend vers la valeur théorique de $-10,23 \times 10^{-2} mm^3 \cdot A^{-1} \cdot S^{-1}$, commune à tous les métaux.

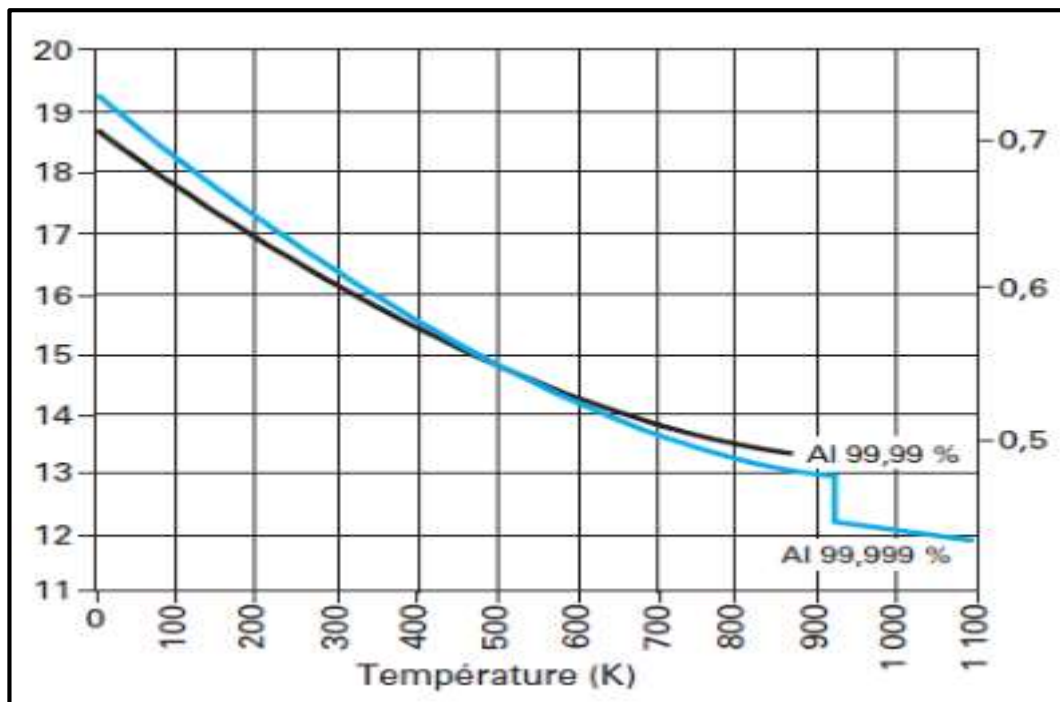


Figure. I.4 : Susceptibilité magnétique de l'Aluminium en fonction de la température [5]

I.1.6.4. Propriétés optique :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre du visible, il est de l'ordre de 85% à 90%. Il dépend de l'état de la surface du métal ainsi que l'illustre, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage. L'aluminium déposé sous vide une couche mince, de l'ordre de 0,1 μm , qui présente la réflectivité la plus élevée, supérieure à 90 % dans le spectre « visible », une surface rugueuse perd beaucoup en pouvoir réflecteur.

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium anodisé baisse de moins de 10 % pour une couche de 20 μm .

Le pouvoir réflecteur dépend du titre de l'aluminium non allié, c'est la raison pour laquelle les produits « grand brillant » sont en aluminium à 99,99 %.

Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

I.I.6.5. Propriétés électrique :

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

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

I.I.7. Usinage :

L'aluminium et ses alliages présentent une grande aptitude à se laisser travailler au moyen d'outils coupants. Toutefois il faut tenir compte des paramètres suivants :

- la légèreté de l'aluminium permet d'envisager des vitesses de rotation élevées du fait de la faiblesse des effets d'inertie.
- le serrage des pièces ne doit pas être trop important afin de ne pas déformer les pièces car le module d'élasticité est faible.
- la conductivité thermique élevée permet d'évacuer très rapidement la chaleur due à la coupe

I.I.8 Soudage :

Le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [6]. Les propriétés physiques de l'aluminium et de ses alliages ont des conséquences directes sur les moyens de soudage envisageables. Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine.

Il faut respecter quelques règles pour bien réussir le soudage :

- choisir un flux et un sens de courant approprié afin d'éliminer la couche d'alumine qui peut empêcher la formation d'un bain de fusion correct.

- utilisation d'un gaz protecteur (argon, hélium, ou mélange des deux), afin de protéger le métal d'une oxydation supplémentaire.

I.1.9. La résistance à la corrosion :

L'Aluminium est fortement oxydable, $E_{Al/Al^{3+}} = -1.6N/ENH$. La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente d'une couche d'oxyde qui se forme à la surface, appelé «alumine» qui le rend passif à l'environnement. Cette couche se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant tel que l'oxygène, l'eau, l'air (cette couche se reforme instantanément lorsque le métal est en contact avec son environnement). On peut rendre cette couche d'oxyde protectrice plus épaisse par anodisation. Il s'agit d'un traitement permettant d'obtenir une couche d' Al_2O_3 , poreuse ou dure, qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments [5].

Il n'y a pas de métal ou d'alliage universel du point de vue tenu à la corrosion. Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion.

I.2. Aluminium et ses alliages :

Bien que l'aluminium soit parfois utilisé tel quel, on lui ajoute généralement de petites quantités d'autres métaux pour obtenir des alliages aux propriétés particulières. L'aluminium produit est utilisé en grande partie (85 à 90 %) pour la fabrication d'alliages (Alpax, Duralumin). 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, par exemple :

- l'ajout du magnésium et du silicium à l'aluminium permet une amélioration de la résistance à la corrosion, ce qui en fait un matériau apprécié pour les portes et les cadres de fenêtres et pour les bateaux de plaisance,
- L'ajout de cuivre et de zinc à l'aluminium produit des alliages d'une résistance mécanique remarquable. L'ajout du chrome, du manganèse et du titane à l'aluminium modifie la dimension des grains du métal.

- Dans le domaine de l'architecture, qui exige des surfaces alliant esthétique et résistance à la corrosion, on emploie des alliages aluminium-magnésium-silicium [3]

On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium :

- les alliages de corroyage : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage
- les alliages de moulage : Produit obtenus par fonderie seulement.

I.2.1. Alliages de corroyage :

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont des alliages à base d'aluminium. Ils sont coulés en fonderie sous forme de plaque ou de billettes ensuite transformés par des techniques de forge (laminage, filage, matriçage, forgeage,.... etc.)

I.2.1.1. désignation numérique :

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre W qui représente les produits corroyés, suivie d'un tiret
- quatre chiffres représentant la composition chimique :

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important, il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium%. Selon cette désignation 8 familles d'alliages sont désignées par rapport à l'élément d'addition le plus important comme suit :

- 1xxx, sans élément, pour l'aluminium non allié, les alliages correspondent à différents niveaux de pureté, Fe et Si étant les principales impuretés de l'aluminium
- 2xxx Cu, pour les alliages Al-Cu, avec une sous-famille Al-Cu-Mg
- 3xxx Mn, pour les alliages Al-Mn
- 4xxx Si, pour les alliages Al-Si

- 5xxx Mg, pour les alliages Al-Mg
- 6xxx Mg + Si, pour les alliages Al-Mg-Si
- 7xxx Zn, pour les alliages Al-Zn-Mg, avec une sous-famille Al-Zn-Mg Cu ;
- 8xxx divers, pour les autres alliages.

Le deuxième chiffre, s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Le troisième et quatrième chiffre identifié un alliage spécifique dans la série. La seule exception de ce système est la série 1xxx (aluminium pur), ou les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimal au-dessus de 99%.

I.2.1.2. La désignation symbolique :

Elle est destinée à compléter la précédente. La désignation de l'aluminium non allié destiné au corroyage est constituée du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

I.2.2. Alliages de moulage ou de fonderie :

Les alliages de fonderie contiennent généralement une plus grande proportion d'éléments d'alliage que les alliages de corroyage. L'ajout des éléments d'alliages, tels le silicium, le magnésium ou le cuivre et ou zinc (se retrouvent soit en solution solide soit sous forme de précipités). Se fait en fonction de nombreux facteurs propres à la fonderie : la coulabilité, la fluidité, la résistance à la déchirure à chaud, l'étanchéité à la pression, le retrait de refroidissement.

Les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques avec une résistance élevée à la corrosion. Les alliages de fonderie sont obtenus de deux façons :

- soit à partir d'aluminium provenant directement des cuves d'électrolyse auquel on ajoute les éléments d'addition de l'alliage (alliages dits de première fusion).
- soit à partir de rebuts récupérés, assortis et purifiés. Ils sont dits de deuxième fusion et assurent pratiquement 50% de la production totale des pièces de fonderie

La technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volants.

Le moulage peut être en sable (manuel ou mécanique), moulage en coquilles (moule permanent) et moulage sous pression. En général la température de fusion du métal coulé doit- être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule. Le choix des procédés de moulage dépend du métal à couler.

Le moulage en sable : c'est le procédé Le plus ancien, consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Il convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Le moulage en coquille : Un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille. Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas (les alliages Al-Si).

Moulage sous pression : dans ce procédé le métal liquide est injecté dans le moule de la machine à mouler sous pression (30-100MPa). Ce procédé permet d'obtenir des pièces ayant une configuration très compliquée avec des dimensions très précises, ce qui permet de supprimer partiellement ou totalement l'opération d'usinage. A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en série. [6]

I.2.2.1. Désignation numérique à 4 chiffres :

Il n'y a pas de système international de désignation pour les alliages de fonderie comme il y en a un pour les alliages corroyés. À cet égard, la désignation généralement utilisée au Canada est la même qu'aux Etats-Unis. Cette nomenclature de quatre chiffres (1XX.X) ressemble à la nomenclature des alliages corroyés puisqu'il s'agit d'un regroupement des alliages selon le principal élément d'alliage.

Le premier chiffre : représente le groupe auquel l'alliage appartient. Ainsi, le «4» de la série 4000 indique que cet alliage fait partie de la famille dont le principal élément d'alliage est le silicium.

Les deuxième et troisième chiffres : dans la famille 1XX.X, les 2^e et 3^e chiffres indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99 %. Ainsi, l'alliage 1700, développé principalement pour la fabrication de rotors électriques de petits diamètres, contient au moins 99,70 % d'aluminium dans sa composition. Dans les autres familles, les 2^e et 3^e chiffres n'ont aucune signification particulière et servent seulement à identifier les différents alliages dans leur groupe.

Le quatrième chiffre : Pour toutes les familles d'alliages de fonderie, la décimale représente la forme de l'alliage. Le « 0 » indique qu'il s'agit d'une pièce coulée ; le « 1 » qu'il s'agit d'un lingot, mais dont les limites de composition chimique se rapprochent de la pièce coulée, donc probablement de métal recyclé. Finalement, le « 2 » indique qu'il s'agit d'alliage sous forme de lingot d'aluminium primaire.

I.2.2.2. Désignation symbolique :

En plus de l'aluminium non allié, il existe quatre grandes familles d'alliages d'aluminium de fonderie, qui sont fonction des éléments d'alliages ajoutés. Ceux-ci se retrouvent soit en solution solide soit sous forme de précipités. Ces familles sont les alliages au silicium, au cuivre, au magnésium et au zinc. On distinguera les additions principales déterminantes pour les propriétés du matériau et les additions secondaires, en plus faible quantité, qui a une action spécifique.

La désignation symbolique comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN fait référence à la normalisation européenne, suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium.

- la lettre C qui représente les produits moulés, suivie d'un tiret
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci.

Exemple : EN AC- AlSi10G : alliage d'aluminium à 10% de silicium avec des traces de magnésium.

I.2.3. Familles d'alliages d'aluminium silicium de fonderie :

- Alliages Al-Si (4xxx) :

- Alliages non traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.
- Fluidité excellente permettant la réalisation de pièces à configuration compliquée.
- Alliages courants 4230 - 4430.
- Résistance à la rupture typique comprise entre 117 et 172 MPA.

L'alliage B4130 est reconnu pour sa très bonne coulabilité et son excellente soudabilité lequel provient de sa composition eutectique et à son point de fusion peu élevé (570 °C). Cet alliage combine une ténacité modérée, un bon coefficient d'allongement et une bonne résistance à la corrosion. Il est particulièrement recommandé pour des pièces moulées résistantes à la fatigue, aux formes compliquées, avec des surfaces minces et étanches.

- Alliages Al-Si + Cu ou Mg :

- Alliages traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.
- Fluidité excellente, résistance élevée ; quelques alliages avec une résistance à la fatigue élevée.
- Applications typiques pour pièces d'automobiles (pistons, pompes) et pièces électriques.
- Résistance à la rupture typique comprise entre 131 et 275 MPA.

Les alliages de la série 3xxx sont les plus utilisés, car ils permettent beaucoup de flexibilité attribuable à leur haute teneur en silicium, qui confère aux alliages de cette série

une bonne fluidité. De plus, ces alliages répondent bien aux traitements thermiques, ce qui offre plusieurs options au niveau des propriétés mécaniques.

I.2.4. Traitements thermiques des alliages de fonderie :

La composition de l'alliage seule n'est pas suffisante pour conférer au matériau les propriétés mécaniques requises pour les applications industrielles, c'est pourquoi on a recours à des traitements thermiques, qui, selon les cas, produisent un adoucissement ou un durcissement, ainsi que des changements de comportement vis-à-vis de la résistance à la corrosion, de la fatigue, du fluage, de l'allongement.

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

- 1. les traitements dits d'homogénéisation ou mise en solution** permettant de mettre en solution solide certains éléments d'alliage et d'obtenir une composition chimique uniforme, ceci à une température juste inférieure à celle de fusion de l'eutectique (sinon on crée des défauts appelés brûlures), sont généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés. Ils sont consistant à maintenir à une température assez élevée (le plus souvent entre 450 et 610°C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h) les plaques ou billettes coulées, afin de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus.
- 2. les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration**, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ;
- 3. les traitements de trempe structurale comprenant :**

La trempe structurale (ou par précipitation) qui consiste à prendre un alliage en équilibre à une température donnée et à le refroidir le plus rapidement possible en évitant tout changement de phase. Un traitement de revenu suit généralement la trempe si on vise un vieillissement artificiel. Ce traitement comprend

❖ Un traitement de mise en solution :

La mise en solution des alliages d'aluminium a pour caractère remarquable d'avoir une cinétique à peu près indépendante de la température. D'une façon générale, la température de mise en solution optimale dépend surtout de la composition chimique de l'alliage, mais il est souvent nécessaire de traiter un peu au-dessous de cette température si la présence de ségrégations est à craindre, car les ségrégations tendent à abaisser la température de brûlure.

❖ Un traitement de trempe :**• Vitesse critique de trempe :**

Après la mise en solution, l'alliage doit être refroidi assez énergiquement pour que la solution reste sursaturée à la température ambiante. En fait, dans les alliages d'aluminium, il faut, pour que les caractéristiques mécaniques soient optimales, que la concentration de la solution solide soit sensiblement la même qu'à la température de mise en solution, ce qui n'implique pas nécessairement que le refroidissement soit très rapide. C'est là qu'intervient la notion de vitesse critique de trempe qui peut être considérée comme la vitesse de refroidissement minimale qui permette d'obtenir à la température ambiante la solution solide sursaturée.

• une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement :

La précipitation par revenu (ou stabilisation), ou l'on porte le métal à une température appropriée pendant un temps suffisant pour qu'un état d'équilibre puisse être atteint. En pratique, on laisse la culasse quelques heures entre 200 et 300°C. Le but est de produire une relaxation des contraintes internes résiduelles dues au choc thermique de la trempe et de permettre la formation de phases durcissantes par précipitation [5].

I.2.5. Structure des alliages d'aluminium de fonderie

Cette structure comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypo eutectiques), des eutectiques plus ou moins complexes (binaires, ternaires) et des constituants intermétalliques. Dans le système Al-Si, les cristaux solides d'aluminium se forment sur les parois du moule (plus froides que le cœur) et croissent vers l'intérieur. Leur composition en Si est inférieure à celle du liquide qui les entoure car la solubilité de Si dans Al décroît avec la température. Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température de solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion). Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche. Mais si un germe du cristal en croissance parvient à traverser cette couche de liquide en surfusion, il se retrouve dans un milieu non enrichi en silicium et peut se solidifier, ce qui est thermodynamiquement favorable.

Cette protubérance est instable et croît rapidement, ce qui explique que les cristaux d'aluminium se développent non pas sous forme de sphères ou d'aiguilles mais sous forme

d'arborescences appelées dendrites (Figure I.5) dont les bras secondaires sont espacés de quelques dizaines de micromètres, cette distance est appelée espacement des bras de dendrite.

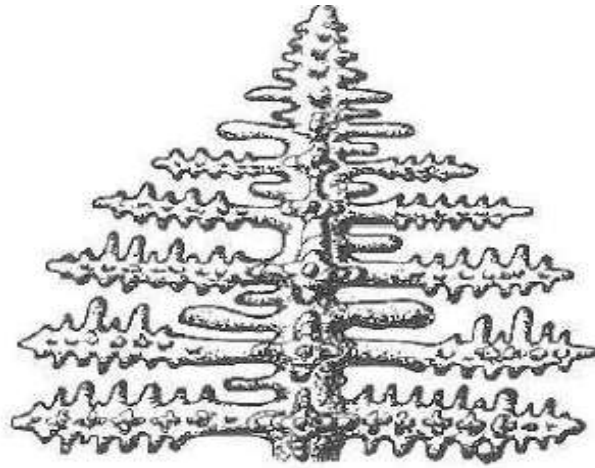


Figure. I.5 : Schéma d'une dendrite [8]

La taille des grains dans les alliages d'aluminium de fonderie est généralement millimétrique et donc bien supérieure à la taille d'une dendrite. L'eutectique se solidifie alors entre les bras de dendrite, dans une zone riche en silicium rejeté à l'avant du front de solidification (silicium en large excès dans cette zone)

❖ **Alliage Al-Si :**

Industriellement, les alliages Al-Si sont les plus utilisés pour leurs propriétés de fonderie, leur aptitude au soudage, leur bonne stabilité dimensionnelle et leur faible température de fusion, ils sont de plus une bonne résistance aux éraflures lors des périodes de faible lubrification du moteur (démarrage à froid).

Ces alliages portent le nom de "silumines", lesquels s'apparentent quant à leur composition à un alliage eutectique, leur coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses.

Ils sont destinés à la coulée sous pression. Sur le diagramme d'équilibre Al-Si (figure I.6), on peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux mixtes riches en aluminium α et se termine par la cristallisation de l'eutectique $\alpha + \beta$ (Si) et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments.

La phase (Si) est présente en se déposant d'abord sous forme de gros cristaux aciculaires (en forme d'aiguilles), qui jouent le rôle d'entailles internes dans la solution solide α plastique, les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles. Plus près de l'alliage eutectique, se trouvent le plus souvent les cristaux primaires de silicium, c'est à dire, il y a accumulation (excès) de cristaux de silicium, qui ne sont pas fondus et lors de la recristallisation, ils agissent comme germes cristallins pour la cristallisation du silicium.

Donc avec l'augmentation du chauffage du bain métallique ainsi que l'augmentation de la vitesse de refroidissement, on obtient une solidification normale de l'eutectique, c'est à dire une cristallisation couplé $\alpha + (\text{Si})$ est atteinte. Une telle cristallisation est obtenue aussi par le traitement du bain métallique en ajoutant des inoculant tels que le sodium.

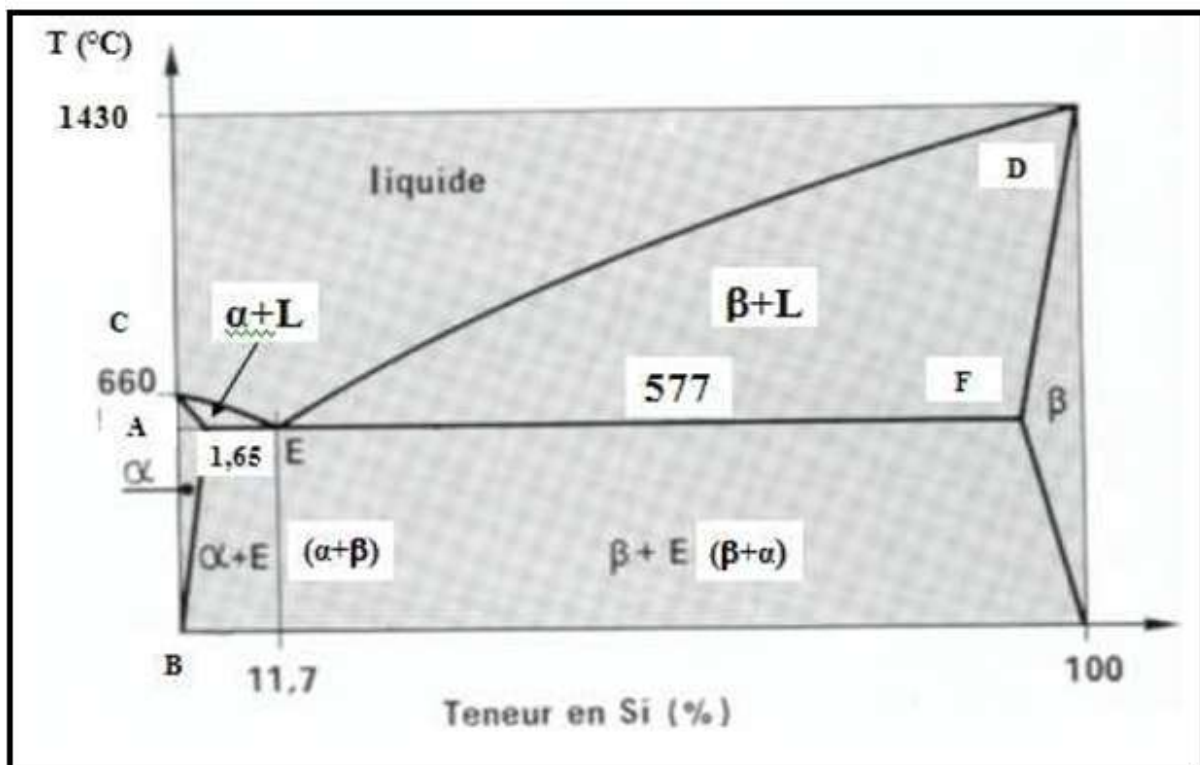


Figure I.6 : Diagramme d'équilibre Al-Si [8]

I.2.6. Les principaux types d'alliages Al-Si de moulage et leurs applications :

Les alliages Al-Si, ce sont numériquement et industriellement les plus importants parmi les alliages moulés.

- **Al-Si 13 : AS12UNG** dans lesquels la forte teneur en silicium conduit à une excellente coulabilité, une faible dilatation thermique et une bonne résistance à l'usure (pistons),

utilisé pour la fabrication de blocs et carters de moteur et de boîte de vitesse, appareillage électrique, cycle, bâtiment.

- **Al-Si2MgTi** : apte à l'oxydation anodique et à la décoration. Pièces de quincaillerie du bâtiment.
- **Al-Si7Mg** : peut être traité thermiquement, bonnes propriétés pour la coulée en sable et en coquille. Bonne stabilité dimensionnelle et résistance à la corrosion. Applications : automobile (roues, bras de suspension, traverses, pivots, étriers, corps de vérins), aéronautique (carters, boîtes d'engrenages, prises d'air mobiles), armement
- **Al-Si5Cu3** : alliage sans traitements thermiques, utilisation très générale lorsqu'il n'y a pas de contraintes particulières Applications : culasses, collecteurs d'admission, carters, tubulures, pièces mécaniques à utilisation courante
- **Al-Si5Cu3Mg** : utilisé après traitement thermique, bien adapté à la coulée en coquille de pièces à haute résistance mécanique.
- **Al-Si7Cu3Mg** : utilisé sans traitement. Utilisé pour les culasses de moteurs à essence
- **Al-Si9Cu3** : destinés à une utilisation générale, traitables thermiquement et faciles à couler surtout utilisé pour des pièces moulées sous pression (blocs moteurs – carters-boîtiers de direction- pièces mécaniques complexes)
- **Al-Si10CuMg et Al-Si12CuNiMg** : qui ont des propriétés intermédiaires entre AS7G et AS13 (culasses, collecteurs, cache culbuteriez, tube de pont, carters, anneaux de synchronisation de boîte de vitesse...)
- **Al-Si18CuNiMg, Al-Si20Cu, Al-Si22CuNiCo, Al-Si25CuNiMg** : alliages hyper siliciés, faible coefficient de dilatation, bonnes propriétés de frottement à chaud, bonne tenue mécanique à chaud. Utilisé pour la fabrication des pistons de moteurs essences deux temps et diesels. [4]

Le tableau ci-dessous montre quelques propriétés des alliages de moulage (AlSi10, AlSi12, AlSi15) :

Tableau (I.3) : les principaux types d'alliage Al-Si [8].

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0.2 (Kp/mm ²)	Résistance Traction R (Kp/mm ²)	Allongement rupture (%)	HB (Kp/mm ²)	Résist flexion alternée Kp/mm ²
Poids spécifique : 2.65 Kg/dm ³							
G-AlSi12	Si:11,0 à 13,5	Fe : 0,6	8 à 9 (7)	17 à 22 (16)	8 à 4 (2)	50 à 60 (45)	5,5 à 6,5
G-AlSi12g	Mn : 0 à 0,5	Ti : 0,15	9 à 10 (8)	18 à 22 (16)	10 à 6 (5)	50 à 60 (50)	8,5 à 10
GK-AlSi12	Al : reste	Zn : 0,10	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	7 à 3 (2)	55 à 70 (50)	7 à 8
GK-AlSi12g	SiFe > 0,4	Cu : 0,05	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	10 à 6 (4)	50 à 60 (50)	9 à 10
	→ Mn > 0,25	Mg : 0,05					
Poids spécifique : 2.65 Kg/dm ³							
G-AlSi10Mg	Si: 9,0 à 11,0		9 à 11 (8)	18 à 24 (17)	5 à 2 (2)	55 à 65 (55)	6,5 à 7,5
G-AlSi10Mga	Mg : 0,2 à 0,4	Fe : 0,6	17 à 26 (17)	22 à 20 (20)	4 à 1 (1)	80 à 110 (75)	9 à 11
GK-AlSi10Mg	Mn : 0 à 0,5	Ti : 0,15	11 à 15 (10)	20 à 26 (18)	4 à 1 (1)	65 à 85 (60)	8 à 10
GK-AlSi10Mga	Al : reste	Zn : 0,10	20 à 28 (18)	24 à 32 (22)	4 à 1 (1)	85 à 115 (80)	10 à 11
	SiFe > 0,4	Cu : 0,05					
	→ Mn > 0,25						
Poids spécifique : 2.70 Kg/dm ³							
G-AlSi15Mg	Si: 4,5 à 6,0		10 à 13 (9)	14 à 18 (13)	3 à 1 (0,5)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
G-AlSi15Mgka	Mg : 0,5 à 0,8	Fe : 0,5	15 à 18 (12)	18 à 25 (14)	5 à 2 (1)	70 à 85 (70)	7 à 7,5
G-AlSi15Mga	Mn : 0 à 0,5	Zn : 0,10	22 à 29 (16)	24 à 30 (17)	2 à 0,5 (0,5)	80 à 110 (80)	7 à 7,5
GK-AlSi15Mg	Ti : 0 à 0,20	Cu : 0,05	12 à 16 (10)	16 à 20 (14)	4 à 1,5 (1)	90 à 75 (60)	7 à 7,5
GK-AlSi15Mgka	Al : reste		16 à 19 (13)	21 à 27 (17)	6 à 2 (1)	70 à 90 (70)	8 à 8,5
GK-AlSi15Mga	SiFe > 0,4		24 à 29 (18)	26 à 30 (19)	3 à 1 (0,5)	90 à 110 (90)	8 à 8,5
	→ Mn > 0,25						

I.2.6. Les impuretés et leur influence :

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement ou non, les diverses propriétés du matériau. On trouve principalement comme impuretés :

Le fer : c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles qui peuvent faciliter l'amorçage d'une fissure par décohésion lors d'une sollicitation mécanique. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques et diminue l'étanchéité de la culasse.

Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée à moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits à haute pureté ;

- Le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets ;
- Le nickel améliore légèrement les propriétés à chaud mais coûte cher ;
- Le plomb au-delà de 0.05% il neutralise la modification au strontium et diminue les propriétés mécaniques de l'alliage ;
- L'étain abaisse les caractéristiques mécaniques, augmente la porosité, améliore très peu la coulabilité ;
- Le phosphore est un poison pour les alliages hypo-eutectiques car il constitue un site de germination du silicium, par contre, ce sera un élément affinant pour les alliages hyper eutectiques (hyper-silices). En effet dans ces alliages, ce sont les plaquettes de Si qui germent en premier et il n'y a donc pas de dendrites d'aluminium
- L'antimoine permet de piéger le phosphore mais n'est pas compatible avec le Strontium

Les éléments que l'on ajoute volontairement pour leurs propriétés bénéfiques sont indiqués ci-dessous.

Le titane : c'est une impureté de l'aluminium, mais il permet d'affiner la dendrite de solution solide riche en aluminium : c'est un affinant.

L'opération d'affinage consiste à ajouter dans l'alliage liquide des germes de cristallisation comme TiB₂ en grand nombre afin d'augmenter le nombre de grains de l'alliage pour diminuer la taille de dendrite et augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la durée de vie en fatigue. Au-delà de 0.4%, il se forme TiAl₃ qui diminue l'usinabilité mais améliore encore l'affinage. Ainsi les auteurs rapportent que l'alliage Al-Ti (le titane étant souvent titré à 5%) gagne en efficacité d'affinage s'il est laminé et/ou traité thermiquement car le nombre de particules servant de site de germination se trouve décuplé.

Le sodium ou le strontium : modifient la structure de l'eutectique naturellement lamellaire en eutectique globulaire, ce qui permet de diminuer le risque de retassures, de faciliter l'usinage et d'augmenter les caractéristiques mécaniques

Le calcium : prolonge le temps de modification par le sodium.

Le scandium : il améliore les propriétés mécaniques et les aptitudes au soudage.

I.2.7. Effets des éléments d'addition (Sur les différentes propriétés) :

Tableau (I.4) : influence des éléments d'addition sur les différentes propriétés [9]

Propriétés	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Charge de rupture	++	+	+	++	+	+	+			--
Limite élastique	++	+	--	+	--					
Dureté	++		--	--	+			+	+	
Résistance à la chaleur	++		++		+				+	
Soudabilité	--	++	+	--	--		+	+		+
Usinage	++	--	+	+	+		++	+	++	+
Module d'élasticité	+	++	--	+	+	++		+	--	
Moulage	+	++	--	+			+	--	--	
Ductilité	--	--	+				+		--	
Corrosion	--	+	++	+				-	--	++
Aptitude à l'anodisation	--	+	++	+				--		

++ **Recommandé**+ **bon**- **médiocre**-- **A éviter**

L'addition d'éléments d'alliage modifie ainsi fortement le potentiel de corrosion dans le sens anodique ou cathodique. Pour chacun, les principales variations sont fonction de la teneur de l'élément dans l'alliage (Figure I.7).

La tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal. La formation de particules intermétalliques ou la ségrégation de secondes phases dans l'alliage matriciel ou autour des fibres (cas du silicium) sont responsables, soit d'une dégradation accélérée de l'aluminium, soit, au contraire, d'un ralentissement de la cinétique de corrosion du matériau. [8]

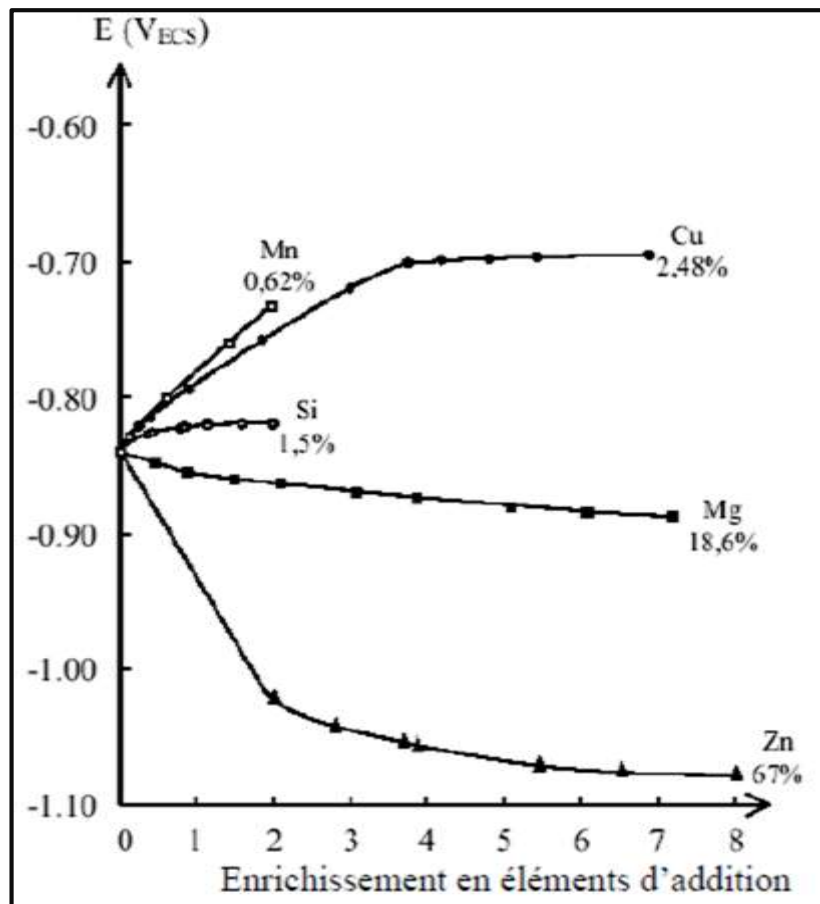


Figure I.7 : Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition. Les pourcentages atomiques indiquent les limites de solubilité de l'élément [9]

Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques il peut être retenu d'une manière générale que les éléments Cr, Mg, Mn apportent un effet bénéfique, tandis que les éléments Cu, Fe, Ni, Sn, Pb, Co sont néfastes.

Dans notre cas les éléments d'addition ajoutée au matériau de base sont composés principalement de deux ajouts, le silicium en forte proportion (10%), et le magnésium en faible proportion (0.17-0.35%).

Le silicium a pour effets : d'amélioration de la coulabilité qui conduit à une excellente aptitude au remplissage de la mole et d'obtenir des pièces de forme très compliquée à des parois minces. , de réduire la criquabilité et l'aptitude à la retassure, de diminuer le coefficient de dilatation. D'une manière générale les alliages aluminium-silicium sont les alliages qui présentent les meilleures propriétés de fonderie

Influence Du magnésium : la coulabilité est médiocre du fait de la forte oxydabilité du magnésium, l'aptitude à la retassure la contraction volumique peut modifiée par le magnésium, mais celui-ci augmente la tangence à la microporosité, la criquabilite diminue à la forte teneur en magnésium. [9]

II.1. Introduction :

La corrosion est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs paramètres, dépendant du milieu ou du métal. Les cas de corrosion sont parfois difficiles à expliquer parce que la cause de la corrosion n'a pas été identifiée ou que les bases théoriques ne permettent pas toujours d'apporter une réponse satisfaisante. La plupart des cas de corrosion de l'aluminium en générale sont dus à des dispositions constructives défavorables telles que des zones de rétention d'humidité, des soudures mal faites, des contacts mal gérés avec d'autres métaux, la présence de plusieurs phases ayant des potentiels différents, une hétérogénéité à la surface... etc.

II.2. Définition de la corrosion :

De manière générale, la corrosion est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement conduisant à une modification des propriétés du métal, une dégradation significative de la fonction du métal en raison du contact avec un environnement. La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et ses propriétés. [10].

Le phénomène de corrosion est dû à des réactions d'oxydoréduction :



Où Ox et Redu sont respectivement l'oxydant et le réducteur. Les phénomènes de corrosion sont importants lorsque le métal est placé au contact d'une solution aqueuse. Cette corrosion humide est dans la plupart des cas de nature électrochimique.

II.3. Les facteurs de la corrosion :

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs, généralement en relation les uns avec les autres de manière complexe pouvant réagir avec un effet de synergie. [7]

II.3.1. Facteurs reliés au milieu de corrosion :

Concentration en éléments chimiques du milieu ;

- Teneur en oxygène dans le milieu corrosif ;

- PH du milieu
- Température du milieu corrosif ;
- Impuretés dans le milieu corrosif ;
- Particules solides dans le milieu corrosif.

II.3.2. Nature de la surface du substrat :

- Composition du métal ou de l'alliage à la surface
- Procédé d'élaborations qui influe sur les valeurs des contraintes résiduelles à la surface
- Traitement thermique qui influe aussi sur les valeurs des contraintes résiduelles à la surface
- Les traitements de surfaces

II.3.3. Condition d'emploi :

- Etats de surface
- Moyens de protection
- Forme des pièces
- Procédés d'assemblage

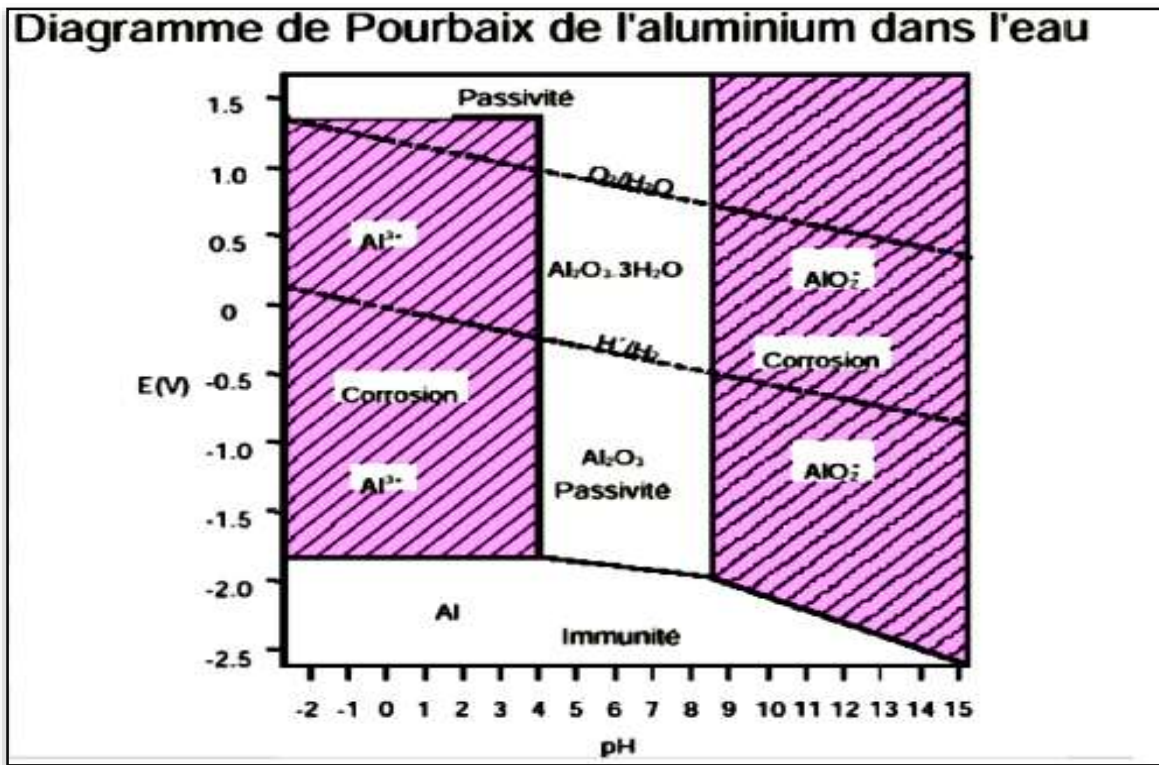
II.3.4. Indic du temps :

II.4. Diagramme E-pH de l'aluminium :

Les diagrammes E-pH sont constitués de plusieurs domaines, trois états possibles :

- **Corrosion** : la concentration d'atomes dissous $c > 10^{-6}$ M (c'est la concentration partir de laquelle on peut considérer qu'il y a corrosion du métal, soit 0.027 mg/l pour l'aluminium) [11].
- **Passivation** : si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble.
- **Immunité** : $c < 10^{-6}$ M.

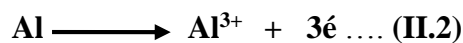
Le diagramme E-pH de l'aluminium (**Fig. II.1**) illustre bien la propriété amphotère du métal : il est attaqué en milieu acide et alcalin.



Figure(II.1) : Diagramme E-pH du système Al-H₂O 25°C (M. POURBAIX) [11].

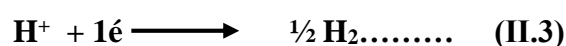
II.5. Réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium :

En milieu aqueux la réaction d'oxydation de l'aluminium sur les sites anodiques [8].

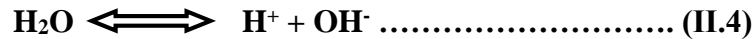


Tandis que sur les sites cathodiques deux réactions sont possibles. En effet dans les milieux aqueux habituels dont le pH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère), il s'agit d'une part de la réaction d'échange de proton ou bien de réaction de réduction selon :

a) Dans le cas d'un milieu aqueux acide exempt d'oxygène :



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



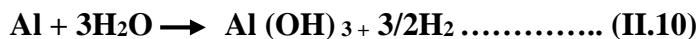
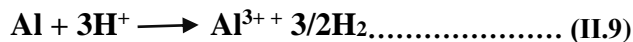
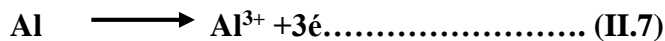
b) Dans le cas d'un milieu aqueux basique ou neutre contenant de l'oxygène la réaction de réduction dans le milieu contenant de l'oxygène est donnée comme suit :



c) Dans le cas d'un milieu aqueux acide contenant de l'oxygène la réaction de réduction dans le milieu acide contenant de l'oxygène est donnée comme suit :



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



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

II.5.1. Définition d'une électrode :

Une électrode représente un métal ou un alliage métallique en contact avec un milieu corrosif relié à un conducteur électronique [12].

II.6. Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium :

Le comportement de dissolution électrochimique de l'alliage est souvent attribué à l'aluminium [12]. Cependant la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal.

La formation de particules intermétalliques ou la ségrégation de secondes phases dans l'alliage matriciel ou autour des fibres (cas du silicium) sont responsables, soit d'une dégradation accélérée de l'aluminium, soit, au contraire, d'un ralentissement de la cinétique de corrosion du matériau, ceci dépend du potentiel des phases en formation après l'addition des autres éléments. Ainsi la (Fig. II.2) présente schématiquement la baisse de la résistance à la corrosion de l'alliage de l'aluminium dans un milieu de chlorures en fonction de la série.

Toutefois il est à noter que cet effet défavorable s'accompagne de propriétés mécaniques accrues [13].

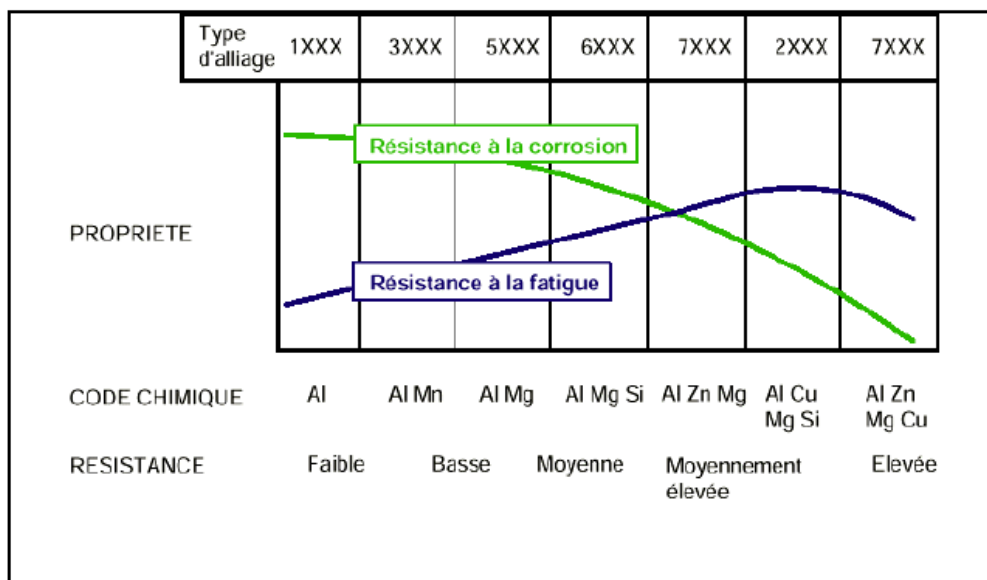


Figure II.2 Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium [14]

Depuis de nombreuses études ont porté sur l'influence de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés, notamment de corrosion de l'aluminium.

Tableau II.1. Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur potentiel de corrosion

	Particule intermétallique / Seconde phase	E_{CORR} (mV _{ECS})
particules cathodiques	Si	-170
	Al ₃ Ni	-430
	Al ₂ Cu	-440
	Al ₃ Fe	-470
	Al ₆ Mn	-760
	Al	-840
particules anodiques	Al ₂ CuMg	-910
	MgZn ₂	-960
	Al ₃ Mg ₂	-1150
	Mg ₂ Si	-1190
	Al ₃ Mg ₅	-1240

Les alliages au magnésium ont une excellente tenue à la corrosion marine. Ils sont utilisés pour la fabrication de la carcasse de navire [15]. Le manganèse (série 3000) a pour effet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion [16]. Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques il peut être retenu d'une manière générale.

Les éléments d'alliages existent sous deux formes dans l'aluminium :

- En solution solide, suivant leur solubilité dans le métal.
- En précipités intermétalliques avec les autres éléments présents dans le métal.

Dans ce dernier cas les particules intermétalliques ont un comportement plus ou moins noble par rapport à l'aluminium, selon leur composition.

La corrosion des alliages d'aluminium est fortement liée aux potentiels de corrosion de ces composés, car ils sont une source de micro galvanisme (micro piles) et influent sur la formation de piqûres dans l'aluminium (attaque localisée) [17].

II.7. L'état de polarisation des métaux :

Lorsqu'un métal est immergé dans une solution, un courant se développe entre ses sites anodiques et cathodiques.

Le phénomène de polarisation du métal, fait en sorte que les potentiels des deux sites (E_a et E_c), au départ bien distincts, sont polarisés vers un même potentiel E_{corr} lorsque la corrosion se produit et que le courant i_{corr} s'est développé.

Le phénomène de polarisation se produit aussi entre deux métaux caractérisés par des Potentiels différents.

Dans ce cas, lorsque les deux métaux sont mis en contact dans un milieu conducteur, ils s'approchent d'un même potentiel. Si la cathode est facilement polarisée pour se rapprocher du potentiel de l'anode, alors la corrosion à l'anode est mineure (polarisation contrôlée par la cathode). Dans le cas contraire où la polarisation de la cathode est plus difficile, alors l'anode se corrode davantage (polarisation contrôlée par l'anode) [18].

II.8. Courbes de polarisation :

La courbe de polarisation est la courbe de variation de la densité du courant en fonction du potentiel imposé à partir des valeurs inférieure au potentiel de corrosion jusqu'à des valeurs supérieur au potentiel de corrosion. Cette courbe permet de déterminer le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation.

II.9. Résistance à la corrosion :

La résistance de polarisation est égale à l'inverse de la pente à la courbe de polarisation $i = f(E)$, au voisinage du potentiel de corrosion. [19]

$$R_p = \Delta E / \Delta I \dots \dots \dots (II.11)$$

II.10. Différents modes de corrosion de l'aluminium et ses alliages :

Il existe plusieurs formes de corrosion de l'aluminium plus au moins visibles.

II.10.1. Corrosion uniforme ou généralisée :

C'est la forme la plus classique. Elle se manifeste avec la même vitesse et se traduit par une dissolution uniforme due à une réaction chimique ou électrochimique sur toute la surface du métal. Les surfaces anodiques et cathodiques se déplacent en contact. Elle se traduit par une diminution d'épaisseur par unité de temps ou par perte en poids, par unité de surface.

II.10.2. Corrosion localisée :

La corrosion localisée découle toujours de la corrosion uniforme, par couplage galvanique entre les zones hétérogènes. Il suffit alors d'une petite anode et d'une grande cathode pour générer des vitesses de pénétration locales très importantes. Ces hétérogénéités locales peuvent être préexistantes dans le métal ou dans le milieu corrosif. Contrairement à la corrosion uniforme [20], on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques (**Fig. II.3**). Ce type de corrosion ne peut être mesuré par la perte de poids ou de la diminution de l'épaisseur. Pour se faire on doit réaliser des observations métallographiques, et des mesures électrochimiques.

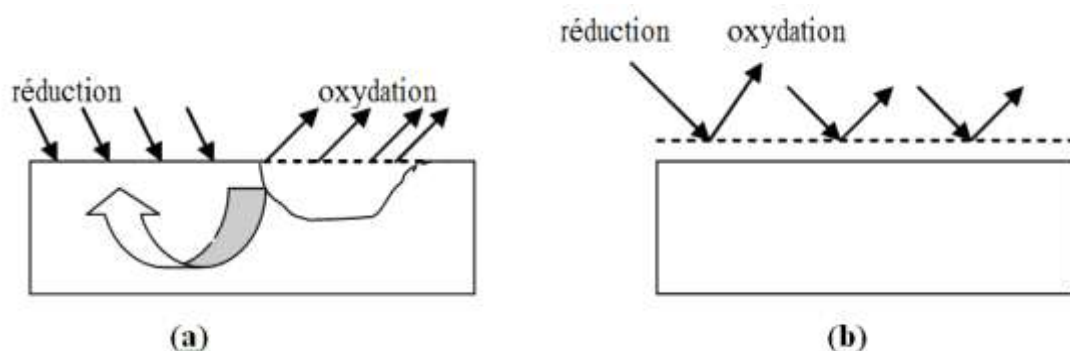


Figure. (II.3) Types de Corrosion (a) Corrosion localisée et (b) Corrosion uniforme d'un métal [20]

Nous distinguons plusieurs types de corrosion localisée que nous pouvons schématiser comme suit :

Corrosion localisée	
Macroscopique	Microscopique
<p>Corrosion galvanique</p> <p>Corrosion par piqûres</p> <p>Corrosion-érosion</p> <p>Corrosion cavitation</p> <p>Corrosion par crevasse</p> <p>Corrosion filiforme</p> <p>Frottement-corrosion</p>	<p>Corrosion inter cristalline</p> <p>Corrosion sélective</p> <p>Corrosion sous contrainte</p> <p>Corrosion sous fatigue</p> <p>Fragilisation par l'hydrogène</p>

Tableau II.2. Les différentes formes de la corrosion localisée

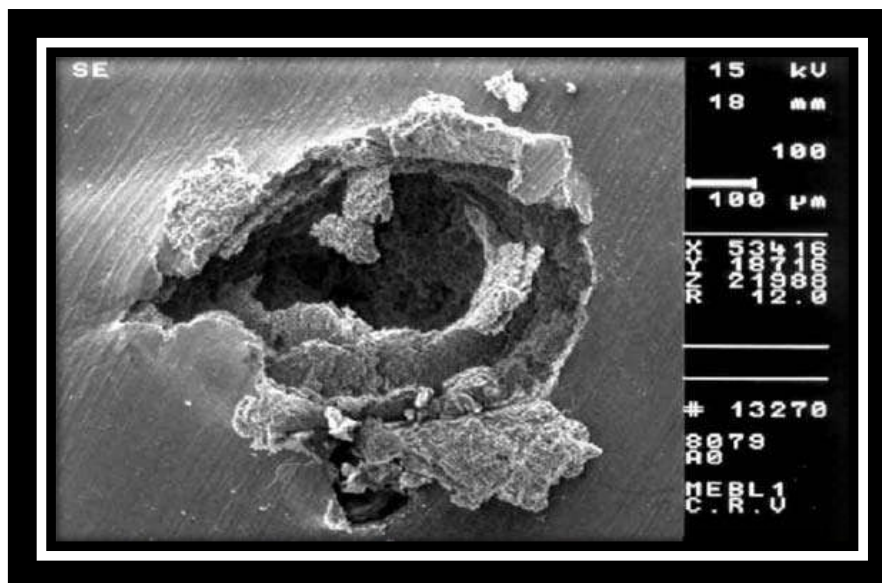


Figure II.4. Corrosion localisée dans un alliage Al-Mg (21)

II.10.3. Corrosion par piqure :

La corrosion par piqûres désigne une attaque locale d'une surface passive. L'aluminium est sensible à la corrosion par piqûres, elle se développe sur des sites où le film d'oxyde naturel présente des défauts qui peuvent être dus aux procédés de mise en forme ou aux éléments d'addition.

Dans les milieux aqueux, dont le pH est voisin de la neutralité (eaux de distribution, eau de mer), le mécanisme de la propagation des piqûres est de nature électrochimique. [21]

Il est important de connaître la vitesse d'approfondissement des piqûres, dès qu'elles sont initiées. L'alumine hydratée est insoluble, une fois formée, elle reste accrochée sur le métal. La vitesse de corrosion par piqûres décroît rapidement dans la plupart des milieux.

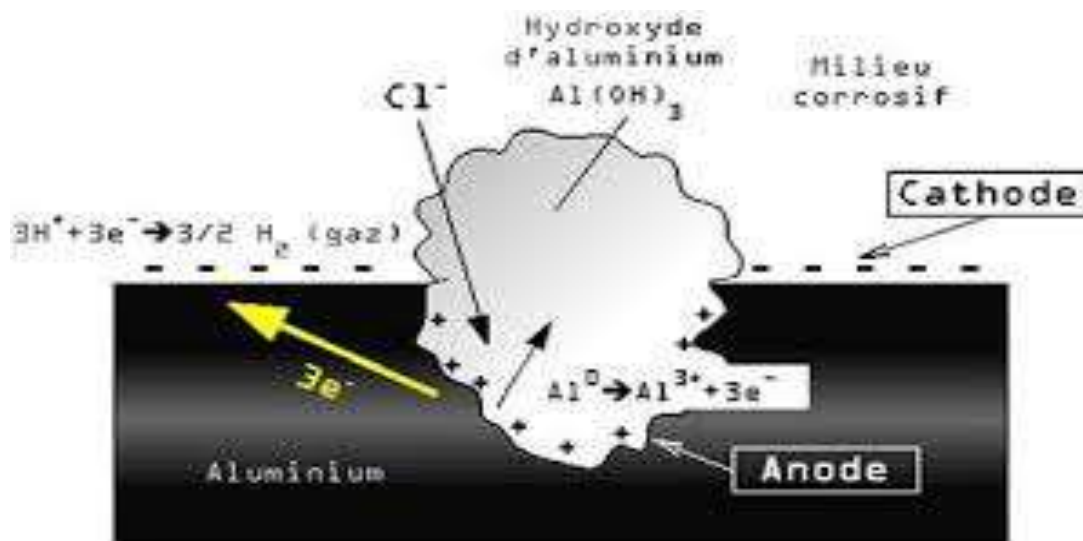


Figure. II. 5 Mécanisme de la piqûration de l'aluminium [22]

II.10.4. Corrosion galvanique :

La corrosion galvanique provoque la dissolution accélérée de l'élément le moins noble du couple, par polarisation anodique de ce dernier. La zone affectée par la corrosion galvanique est souvent plus brillante que le reste de la surface. Lorsque l'on met deux métaux différents en contact, il se produit un phénomène de pile électrique :

- un des métaux sert de support à une décomposition de l'eau grâce à l'apport d'électrons (électrolyse) ; il « pompe des électrons » pour pouvoir réaliser cette réaction ;
- l'autre métal s'oxyde pour pouvoir fournir ces électrons.

Et une corrosion localisée se produit chaque fois que deux métaux ou alliages ayant une différence de potentiel d'au moins 50 mV se retrouvent en contact direct et avec un électrolyte corrosif. Le moins noble des deux métaux ou alliages fera office d'anode pendant la réaction de corrosion.

Dans les exemples, l'aluminium est le moins noble des deux métaux, et par conséquent, il deviendra l'anode et se corrode.

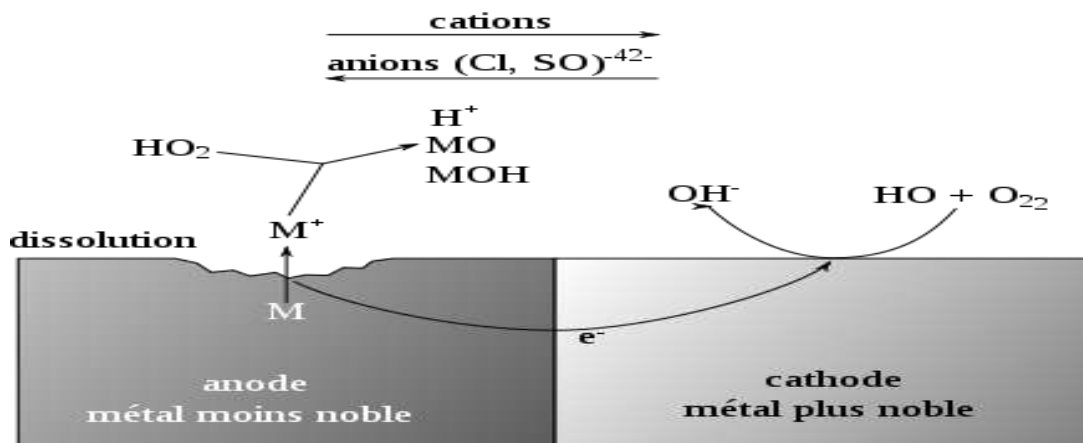


Figure II.6 : Corrosion galvanique [23]

Le potentiel de corrosion permet de prévoir lequel des deux métaux, en cas de contact, dans un milieu aqueux sera attaqué :

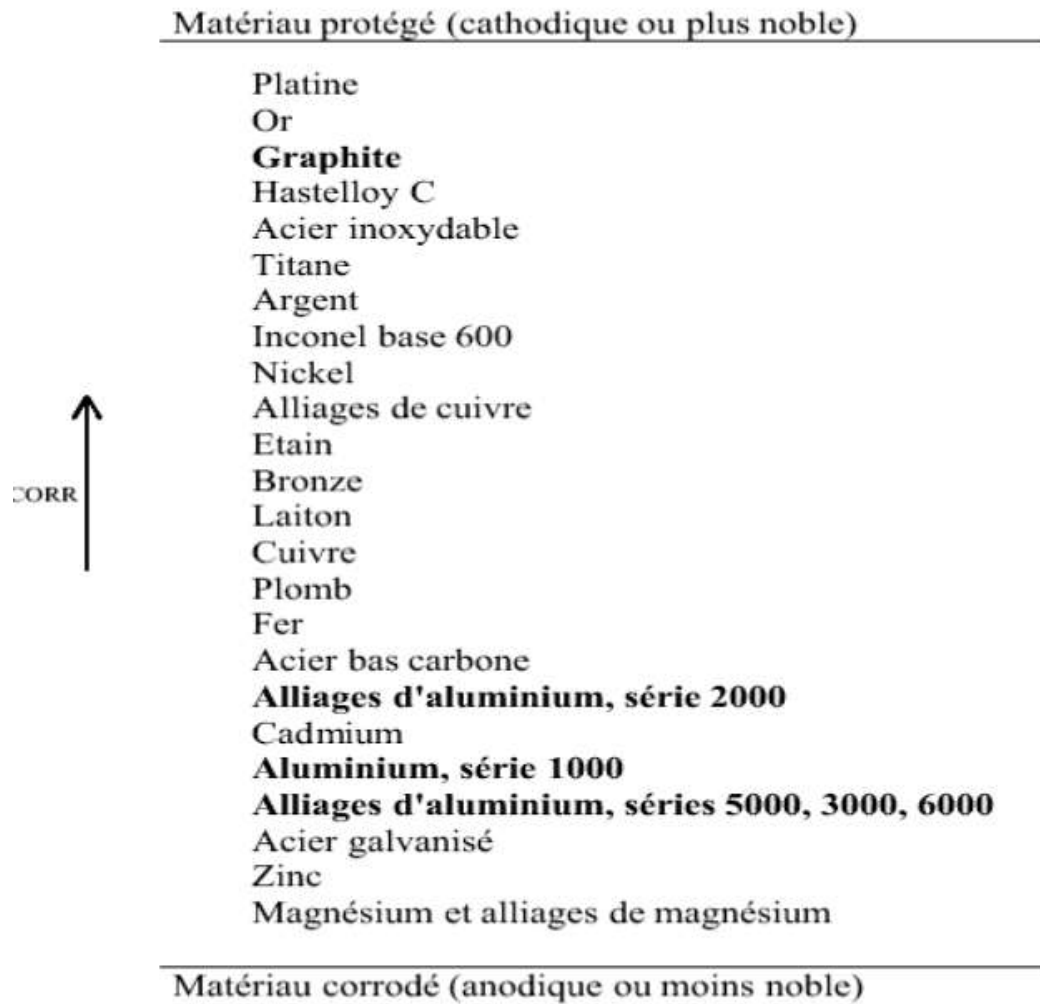


Figure II.7 : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer à 25°C (21)

II.10.5. corrosion intergranulaire :

La corrosion intergranulaire est une forme de corrosion localisée qui se propage selon les joints de grains du matériau. La profondeur de l'attaque peut être très importante et dégrader rapidement le cœur du matériau. Cela a pour conséquences de diminuer fortement les propriétés mécaniques du matériau et favoriser la croissance de fissures qui peuvent engendrer, dans le pire des cas, une rupture de la pièce en conditions de service.

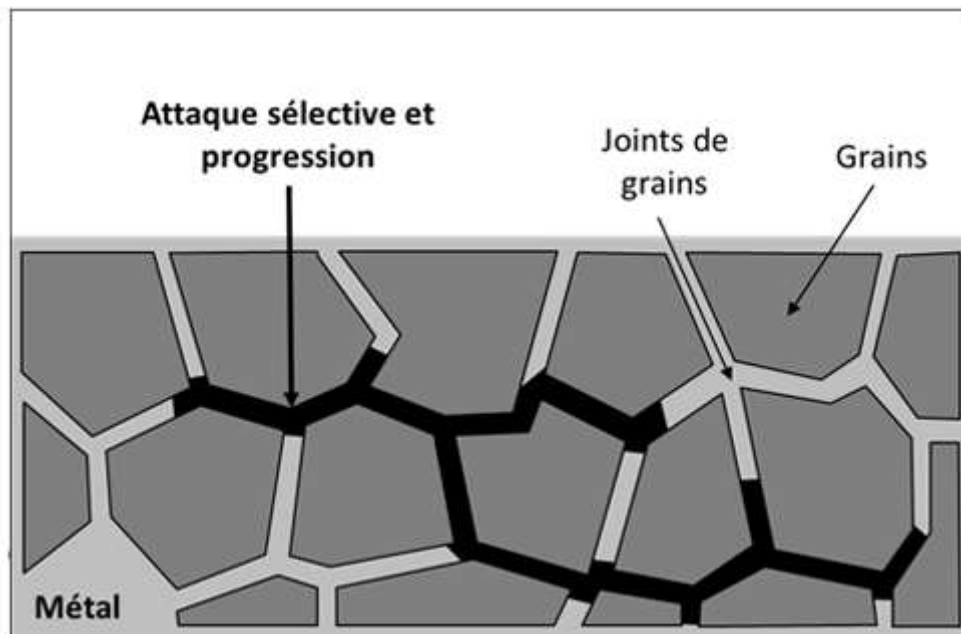


Figure II.8 : Corrosion intergranulaire (24)

II.10.6. Corrosion-érosion :

Dans un même matériau, la turbulence créée par l'écoulement rapide d'un liquide peut engendrer une corrosion localisée (action à la fois mécanique et électrochimique).

L'érosion –corrosion affecte l'ensemble des métaux et des alliages, particulièrement les métaux de faible dureté.

II.10.7. Corrosion électrochimique :

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu qui l'entoure (ou les deux). Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal et si ce matériau se trouve dans un milieu électrolytique, il y aura formation des piles qui vont débiter dans la masse métallique, car elles sont en court-circuit. Les zones anodiques sont corrodées et disparaissent.

II.10.8. Corrosion feuilletant :

La corrosion feuilletant des alliages d'aluminium est une corrosion intergranulaire. Elle se manifeste par une attaque des joints des grains très plats des feuilletés.

II.10.9. Corrosion caverneuse :

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûre, est due à la formation d'une pile à aération différentielle entre un milieu confiné (appelé « crevasse » ou « caverne ») et la solution extérieure.

II.11. Potentiel de dissolution ou potentiel de corrosion :

C'est le potentiel que prend un métal par rapport un électrolyte quelconque. Le potentiel n'est plus caractéristique du métal il dépend des conditions expérimentales : nature, concentration, température de l'électrolyte. il y a modification progressive de la couche externe.

II.12. Action des chlorures sur l'aluminium et ses alliages :

L'aluminium et ses alliages sont de tous les métaux usuels ceux qui résistent le mieux en milieu salé. Parmi ces milieux les chlorures, de part de son abondance naturelle et l'utilisation qui en est faite, le plus important est le chlorure de sodium Na Cl.

Chapitre III : Effet du champ magnétique sur la corrosion

Ce chapitre rend compte l'influence du champ magnétique sur le comportement des métaux de façon générale ainsi que la corrosion.

Le magnétisme est défini comme étant la propriété qu'a un corps d'attirer le fer ou l'acier et généralement quand on parle de magnétisme, nous parlons d'aimants [25].

Le champ magnétique a un effet évident sur l'évolution de la vitesse d'oxydation des différents métaux et alliages. Il modifié l'oxydation de la surface des métaux [31].

III.1. Le magnétisme :

III.1.1. Le champ magnétique :

C'est une région de l'espace où une aiguille magnétique est soumise à une force magnétique, en un point est caractérisé par son vecteur \vec{B} appelé (champ d'induction magnétique). Celui-ci est composé de deux pôles minimum soit un pôle nord et un pôle sud. Le départ des lignes de force s'effectue toujours du pôle nord vers le pôle sud. Pôle nord : émissif donc pôle positif (+), Pôle sud : réceptif donc pôle négatif (-).

Le champ magnétique est composé de lignes de force qui traversent l'aimant permanent de part en part suivant l'axe des pôles pour se refermer à l'extérieur de l'aimant et que l'on nomme « les lignes de champs ». Celles-ci sont orientées du nord vers le sud à l'extérieur de l'aimant, elles forment des courbes fermées et non interrompues.

Lorsqu'un appareil électrique est en fonctionnement, c'est-à-dire lorsque le courant passe dans le câble d'alimentation, il existe à la fois un champ électrique et champ magnétique induit. L'induction magnétique est liée au passage du courant (c'est-à-dire le mouvement des électrons) à travers le fil électrique. Le champ magnétique B traduisant la capacité d'un objet magnétique à créer un effort. [25-28-31]

III.1.2. Unité de mesure :

Dans le système international (S.I.) l'unité légale fondamentale de mesure du champ magnétique (l'induction magnétique) est le Tesla (symbole T), à l'aide d'un ensemble formé de la sonde et du millivoltmètre constitue un tesla-mètre.

La sonde elle-même est constituée d'un petit parallélépipède formé d'un semi-conducteur parcouru par un courant. Lorsque la sonde est "plongée" dans un champ magnétique, il apparaît entre deux de ces faces une faible tension qui est mesurée par un millivoltmètre. Le millivoltmètre est gradué directement en teslas. Une autre unité parfois utilisée est le Gauss (G). Un Gauss équivaut à 100 μ T. [31]

III.2.3 La perméabilité magnétique :

La perméabilité magnétique μ d'un matériau est définie comme le rapport entre la norme de l'induction magnétique (B) et celle du champ magnétique (H) appliqué au matériau, elle s'exprime en henry (H.m⁻¹). Donc sous l'effet d'un champ magnétique extérieur H, il se crée dans les matériaux un champ d'induction magnétique B [29] :

$$B = \mu_r * \mu_0 * H \quad \dots [III.1]$$

Avec : B : champ d'induction, s'exprime on Tesla

μ₀ : perméabilité du vide (H.m⁻¹)

H : intensité du champ magnétique (H.m⁻¹)

Pour caractériser le comportement magnétique d'un matériau, on utilise souvent la perméabilité relative μ_r. D'où μ est la perméabilité absolue (H.m⁻¹) et μ₀ est la perméabilité du vide (H.m⁻¹) .on définit :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \dots\dots\dots [III.2]$$

Avec : μ₀ = 4π × 10⁻⁷ H.m⁻¹ [III.3]

Quelques valeurs usuelles de la perméabilité relative :

Matière	Perméabilité relative μ_r
Fer doux	10 000
Fer-Silicium	20 000
Fer-Nickel	90 000

En général, les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques présentent des valeurs de perméabilité relative proche de 1. La perméabilité absolue des matériaux diamagnétiques et paramagnétiques est donc pratiquement égale à celle du vide, c'est-à-dire $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

De manière similaire, en magnétisme, on introduit la magnétisation notée M caractérisant la nature de l'objet magnétique.

Les phénomènes magnétiques sont à l'origine de l'interaction de charges en mouvement donc à un effet physique lié à l'existence de charges en mouvement. Le champ magnétique peut être créé par des moments magnétiques dans un matériau, l'existence de ces moments magnétiques est liée :

- Au mouvement des particules élémentaires : moment magnétique orbital.
- Au spin de ces particules : moment magnétique de spin.

Pour un matériau quelconque, isolé, les moments magnétiques qui le composent peuvent prendre une orientation aléatoire, mais trouvent en réalité une configuration stable dépendante de l'énergie interne du matériau, en fonction de la structure électronique du matériau et des excitations magnétiques externes.

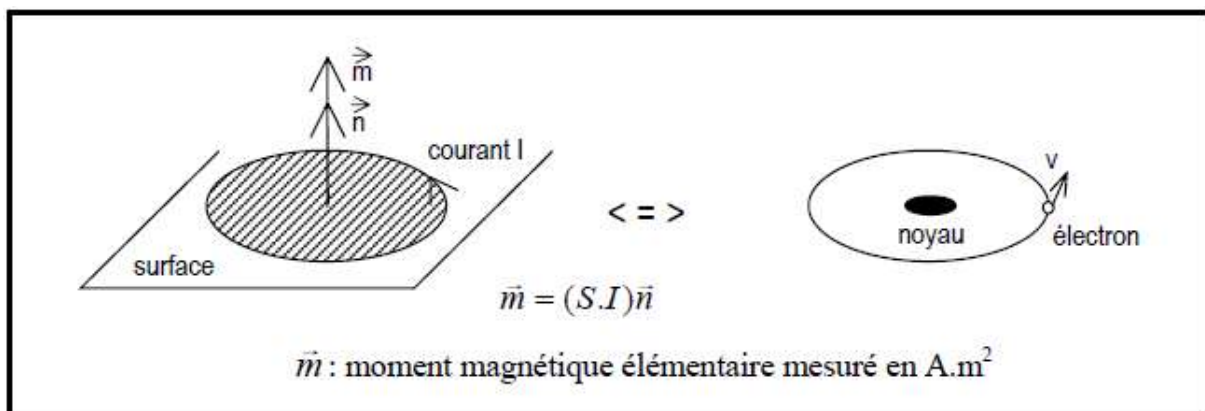


Figure III.1 : Analogie courant électrique – courant particulaire [31]

Schématiquement, lorsqu'un système macroscopique est soumis à un champ magnétique, les champs M et H , sont liés par un coefficient de susceptibilité magnétique relatif χ (un nombre positif ou négatif sans dimension) tel que :

$$M = \chi H \dots\dots\dots [III.4]$$

Ceci implique la relation suivante :

$$B = \mu_r (H + M) = \mu_r (H + \chi_r H) = \mu_r H (1 + \chi_r) \text{ et } \mu_r = (1 + \chi) \dots\dots\dots [III.5]$$

La nature magnétique d'un matériau est dictée par cette valeur χ [26]

III.5.3. Principales lois fondamentales :

➤ **Loi de Laplace :**

Dans un circuit (C) filiforme parcouru par un courant continu d'intensité I et placé dans un champ magnétique \vec{B} extérieur. Un élément de longueur $d\vec{l}$ du circuit (C), contenant dq charges mobiles, est soumis à une force $d\vec{F}$ (dite de Laplace) d'où :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \text{ ou } \vec{v} dq = I \vec{v} dt = I d\vec{l} \dots\dots\dots [III.6]$$

➤ **Effet de Hall :**

Soit un ruban (plaquette) métallique plat de forme parallélépipédique de longueur a , de largeur b et d'épaisseur d . Ce ruban est placé dans un champ magnétique \vec{B} permanent et uniforme, perpendiculaire aux grandes faces comme le montre dans la Figure (III.2).

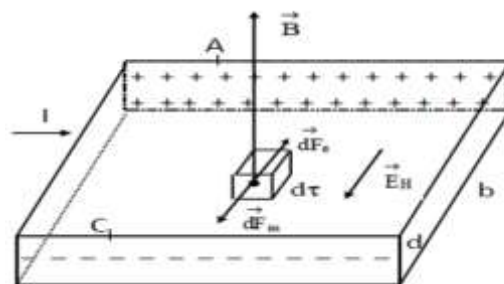


Figure III.2 : schéma montre le ruban place d'un champ magnétique [28]

Le ruban est traversé suivant son épaisseur par un courant d'intensité I . Le courant I est dû au mouvement des électrons libres, de vitesse \vec{v} . En présence du champ magnétique, ces électrons sont soumis à une force magnétique $d\vec{F}_m$, normale à \vec{v} , qui est à l'origine d'une accumulation d'électrons sur la face avant du ruban. L'accumulation d'électrons sur la face avant et l'excès de charges positives sur la face arrière sont à l'origine d'une différence de potentiel entre les deux faces du ruban et un champ électrique \vec{E}_H appelé champ de Hall.

D'où :
$$E_H = \vec{v} \wedge \vec{B} \dots\dots\dots [III.7]$$

Ce champ exerce sur les électrons libres du volume $d\tau$.

Le régime permanent est atteint lorsque : $d\vec{F}e = d\vec{F}m = \vec{0} \dots\dots\dots [III.8]$

La différence de potentiel U_H appelée tension de Hall sera donnée par :

$$U_H = -\frac{IB}{d} R_H \dots\dots\dots [III.9]$$

D'où : $R_H = \frac{1}{nq}$ constante de Hall. (n : étant le nombre d'électrons contenus dans $d\tau$)

La valeur du champ magnétique B étant connu, les mesures de la d.d.p U_H et de l'intensité du courant I permettent de déterminer la densité des porteurs et la nature des charges. Dans le cas où les charges mobiles sont des électrons $R_H < 0$ et $U_H > 0$ [25] .

➤ **Loi d'Ampère :**

Ampère est le premier à penser et à démontrer que le champ magnétique est créé par le courant électrique et non l'inverse. Le théorème d'Ampère nous permet de calculer le champ magnétique créée par une distribution de courants, il s'écrit sous sa forme discrète :

$$\sum B\ell = \mu_0 \sum I \dots\dots\dots [III.10]$$

forme intégrale
$$\oint B d\ell = \mu_0 \iint \vec{j} \vec{n} dS \dots\dots\dots [III.11]$$

D'où : I : intensité totale

- \vec{B} : vecteur champ magnétique
- \vec{j} : vecteur distribution volumique du courant
- \vec{n} : vecteur normal à la surface considérée
- \vec{dS} : élément de surface
- $d\ell$: élément de longueur

Le flux magnétique Φ est l'ensemble des lignes de champ produites par un aimant ou un électroaimant., s'exprime en webers [Wb].

Au niveau macroscopique il est intéressant d'exprimer le flux du vecteur induction produit par le champ d'excitation [28] .

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{S} \dots\dots\dots [III.12]$$

- Si deux conducteurs parallèles parcouru par un courant de même sens s'exercent des forces qui tendent à rapprocher les conducteurs.
- Si deux conducteurs parallèles parcouru par un courant de sens contraire s'exercent des forces qui tendent à éloigner les conducteurs.[27]

III.3.2 Classification des milieux magnétiques :

La magnétisation nous permet de distinguer quatre comportements de matériaux, linéaires face à un champ magnétique externe.

III.3.1. Le diamagnétisme :

Dans ces matériaux La susceptibilité χ est faible ($\chi \approx -1$). Lorsqu'on introduit de la matière en un lieu où règne un champ magnétique, ce dernier agit sur l'ensemble du mouvement électronique par un phénomène d'induction magnétique. Cela produit un dipôle magnétique induit qui est proportionnel au champ appliqué et qui s'oppose à ce dernier. La diminution du champ magnétique provoqué par ce phénomène est très faible : l'effet relatif est de l'ordre de 10^{-5} (sauf pour les supraconducteurs) [30]. Un diamagnétique parfait offre une grande résistance au passage du champ magnétique. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans ces matériaux. La perméabilité est donc nulle.

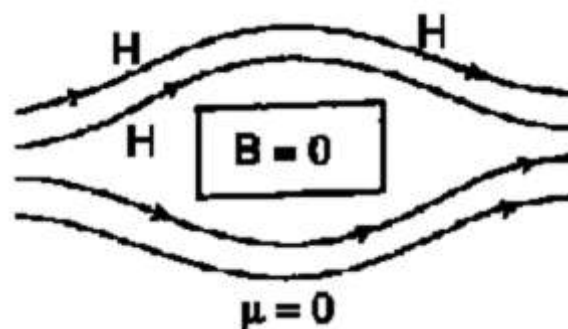


Figure III.3 : Champ magnétique d'un matériau diamagnétique [8]

Des courants induits se forment dans le matériau pour s'opposer au changement du champ magnétique externe. Ces courants internes sont produits par la rotation des électrons autour du noyau atomique. Tous les corps présentent un phénomène de diamagnétisme parce que son origine provient de la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur.

Ce phénomène est réversible puisque lorsque le champ extérieur disparaît, l'action

disparaît. Certains corps placés dans un état supraconducteur (basse température) sont dit diamagnétiques parfaits, ou ils sont offre une grande résistance au passage du champ magnétique [31].

III.3.2. Le paramagnétisme :

Dans les matériaux paramagnétiques, les moments magnétiques permanents s’alignent sous l’effet d’un champ magnétique. Le paramagnétisme est la tendance des dipôles magnétiques atomiques à s'aligner avec un champ magnétique externe.

Leur susceptibilité magnétique est de l’ordre de 10^{-3} à 10^{-5} , dans le cas du paramagnétisme, les moments dipolaires magnétiques sont sans interaction entre eux ; c'est ce qui fait que les effets du paramagnétisme, à l'échelle macroscopique, sont moins spectaculaires que dans le cas du ferromagnétisme.

Exemples paramagnétique : l'aluminium Al (métal), le calcium Ca (métal alcalino-terreux), l'oxygène liquide O₂ (non métal), le sodium Na (métal alcalin), le magnésium Mg (métal alcalino-terreux), le technétium Tc (métal de transition artificiel)...etc [30].

III.3.3. le ferromagnétisme :

Toute matière ferromagnétique est constituée d'aimants élémentaires (microscopiques). Le ferromagnétisme est la propriété de certains matériaux (tels que le fer, le cobalt, et le nickel) réagissant très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (les aimants) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur. Leur susceptibilité magnétique est de l’ordre de 10^2 .

Cette forme de magnétisme provient d’une interaction forte entre les spins voisins qui s’alignent pour être tous parallèles [8].

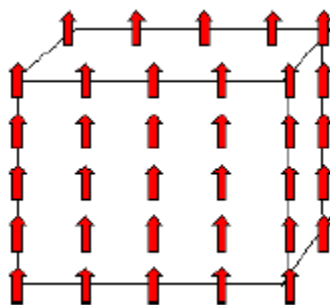


Figure III.4 : Champ magnétique d’un matériau ferromagnétique [8]

Si la matière est placée dans un champ magnétique tous les aimants élémentaires

s'orientent suivant la même direction et dans le même sens. A l'intérieur de la matière les pôles se neutralisent mutuellement.

III.3.4. Antiferromagnétisme:

L'antiferromagnétisme concerne des propriétés magnétiques de certains oxydes métalliques,. Lorsqu'on les soumet à un champ magnétique croissant, leur susceptibilité magnétique d'abord très faible et positive, du même ordre de grandeur que celle des corps paramagnétiques, commence par croître, passe par un maximum puis décroît selon une loi de Curie- Weiss (Loi de Curie-Weiss: à haute température, en fonction du matériau et l'agitation thermique conduit à une susceptibilité similaire à celle d'un paramagnétique). Ces propriétés sont attribuées à leurs moments magnétiques élémentaires formant deux sous-couches électroniques, de valeurs égales [30].

III.4. Effets du champ magnétique sur les métaux :

Le plus ancien des phénomènes magnétiques est l'attraction exercée sur le fer par un minerai naturel (oxyde de fer : $Fe_2 O_3$). L'effet d'un champ magnétique sur les matériaux non magnétiques est négligeable et considéré comme nul. C'est le comportement des (gaz, liquides, matières organiques ou minérales).

Les matériaux magnétiques doux prennent une forte aimantation propre, si sont plongés dans un champ magnétique faible mais, ne la conservent pas si cette excitation extérieure est supprimée. Ces métaux sont utilisés pour conduire et concentrer le champ magnétique dans la direction que l'on désire. De même, ils servent aussi de blindage ou de contre-pièce mais non d'isolant.

Matériaux magnétiques durs ou les aimants permanents, sont des matériaux fortement magnétiques [26]. On le voir par la suite :

III.5. Les aimants :

Les aimants sont des sources permanentes de champ magnétique. Ils sont constitués d'alliages à base de fer ou de certains oxydes de fer de cobalt ou de nickel. On désignant les aimants naturels : sont des oxydes de fer (magnétite), des matériaux magnétiques durs. Les aimants artificiels tel que ferrites durs (oxydes de fer/oxydes de cobalt), alliages du type Al Ni Co (Aluminium/ Nickel Cobalt), alnico (très connu sous la forme d'un fer à cheval).

Tout aimant possède deux pôles, pôle nord (N) et pôle sud (S), les pôles magnétiques de même nature se repoussent, ceux de natures différentes s'attirent. Le pôle nord possède une charge négative, le sud une charge positive.

Couper un aimant en deux revient à créer deux aimants plus petits avec leurs deux pôles. Les aimants sont donc des dipôles magnétiques, dont les pôles sont inséparables ; l'existence d'un monopole magnétique étant exclue jusqu'à preuve du contraire.

Le champ magnétique produit par l'aimant diminue au fur et mesure qu'on s'en éloigne. Les lignes de champ magnétiques d'un aimant sortent par son pôle Nord et rentre par son pôle Sud. Le champ est à peu près uniforme dans l'entrefer d'un aimant [26,30].

III.6. Matériaux magnétiques durs ou aimants permanents :

Ce sont des matériaux qui émettent un champ magnétique sans aide d'une source de puissance extérieure. Ces aimants, soumis à une excitation magnétique restent donc fortement magnétiques et résistent suffisamment à la démagnétisation. Un aimant permanent peut perdre son effet par une augmentation trop forte de la température. Si cette température n'excède pas la température de Curie, on pourra le remagnétiser plus tard à sa force originale Les matériaux les plus utilisés actuellement sont :

- ✓ Le Ferrite
- ✓ Le Néodyme Fer Bore (Terres rares)
- ✓ Le Samarium Cobalt (Terres rares)
- ✓ L'Alnico-Ticonal

Les aimants permanents peuvent être magnétisés de façon Isotrope (champ non orienté) ou Anisotrope (à champ magnétique orienté). On distingue les aimants permanents tels que le barreau aimanté, l'aimant en U, l'aiguille magnétique, et les aimants temporaires tels que les électroaimants.

Un aimant permanent peut perdre son effet par une augmentation trop forte de la température. Si cette température n'excède pas la température de Curie, on pourra le remagnétiser plus tard à sa force originale.

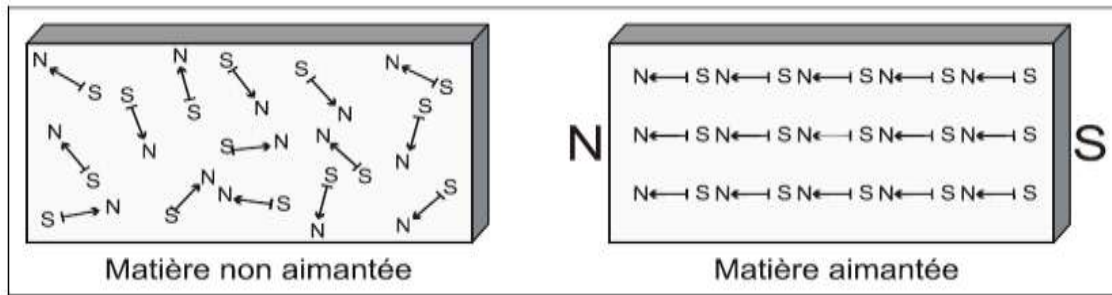


Figure III.5 : Champ magnétique de l’aimant permanent [28]

III.7. Formation d’une couche d’oxyde :

Ou cours d’oxydation des métaux, il se forme à la surface, un composé qui entraîne une perte effective et une détérioration des propriétés initiales du métal. L’altération se fait par le métal perdant des électrons ensuite devenant un ion positif qui a un potentiel électrique. Ces ions sont soit dissous dans l’électrolyte environnant, soit combinés avec des ions non-métalliques, l’oxygène de l’air dans la majorité des cas, en formant un dépôt surfacique. L’application du courant électrique et du champ magnétique peut modifier encore plus le processus de formation des oxydes.

De façon générale la formation d’une couche d’oxyde se fait en quatre étapes .En premier lieu, il y a adsorption chimique de l’oxygène à la surface du métal. Cette adsorption conduit à la formation de liaisons en général ioniques entre l’oxygène et les ions métalliques. Cette étape est favorisée par le fait que les liaisons métalliques des atomes à la surface ne sont pas saturées. Après une certaine période d’incubation, il y a germination de l’oxyde à la surface du métal, puis croissance latérale des germes, ce qui entraîne un recouvrement complet de la surface du métal par un film d’oxyde. La croissance du film d’oxyde se poursuit et modifie la cinétique de l’oxydation, puisque l’épaisseur de la couche d’oxyde sur la surface sépare le milieu gazeux et le métal [31,26].

III.8. Effets du champ magnétique sur la corrosion :

Le champ magnétique est un paramètre qui a un pouvoir d’orienter et d’homogénéiser certaines particules en mouvement ou non dans une direction dépendante de l’orientation du champ magnétique, de ce fait le champ magnétique peut agir et influencer le phénomène de corrosion en modifiant la cinétique et la morphologie de cette dernière.

III.8.1. Effets du champ magnétique sur la cinétique de la corrosion :

III.8.1.1 Le transfert de charges :

Le terme « transfert » (de charge) est réservé pour désigner les échanges d'électrons entre une électrode et un constituant de la solution [32]. Dans les métaux certains électrons appartenant aux couches électroniques extérieures sont "libres" et se déplacent dans toutes les directions. Les charges peuvent être de nature ionique dans les gaz ou les liquides (ce sont les ions eux même qui se déplacent), soit de nature électronique dans les solides [27].

III.8.1.2 le transport de matière :

Le terme « **transport** » (de masse ou de matière) s'applique au déplacement des molécules des constituants du milieu entre les électrodes et le cœur de la solution. Le champ magnétique oriente les atomes dans une direction privilégiée, d'où celui-ci influe surtout sur le transport de matière, le transport en solution se fait en trois modes :

a) *La convection* : C'est le déplacement de la matière due principalement à l'agitation mécanique et à l'agitation thermique. Elle concerne tous les constituants de la solution.

b) *La migration* : C'est le déplacement des espèces chargées électriquement sous l'effet du champ électrique régnant entre les électrodes. Ces dernières attirent les espèces de signe opposé. La migration concerne donc les ions de l'électrolyte et les espèces chargées générées par les réactions. Elle est (spécifique à l'électrochimie

c) *La diffusion* : Elle s'établit entre deux points de la solution dans lesquels les concentrations d'un composant donné sont différentes. Le composant diffuse de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée et tend à uniformiser la concentration du milieu. Ainsi, lorsqu'un substrat réagit par réaction électrochimique, sa concentration diminue à l'électrode. [32]

III.8.1.3.l'adsorption à la surface :

- *Adsorption physique* : Dans l'adsorption physique de substances gazeuses ou liquides sur la surface de certains solides, il n'y a pas d'échange d'électrons entre les molécules adsorbées et celles d'adsorbant, phénomène réversible (y a pas d'énergie d'activation). Elle est typiquement due à des forces d'attraction inter atomique de Van der Waals s'exerçant entre ces molécules qui font former la couche mono moléculaire (environ 0,3

nm d'épaisseur) ou poly moléculaire sur la surface des corps. Le champ magnétique active le processus d'adsorption des gaz paramagnétiques tel que l'oxygène.

- L'adsorption chimique : implique des liaisons fortes. Il y a échange d'électrons entre les espèces chimisorbées et la surface du substrat. En général, une couche d'atomes ou de molécules est adsorbée. Adsorption chimique de l'oxygène par une surface métallique est fortement activée par la présence d'un champ magnétique autour de la surface de contact [31].

IV .1 Introduction :

Nous présenterons dans ce chapitre tous les méthodes et les conditions expérimentales que nous avons effectuées, et nous décrivons les procédures de caractérisation mises en œuvre au cours de l'étude.

IV.2.Matériau étudié :

Le matériau utilisé dans cette étude est un alliage de fonderie Al10SMg, ou EN AC-4000. Sa composition chimique est donnée dans le tableau (IV-1), ci-dessous :

Alliage Eléments%	AlS10G
Al	88.435 à 88.865
Fe	≤0.065
Si	9.00 à 10.5
Cu	≤0.10
Mg	0.17 à 0.35
Mn	0.25 à 0.5
Ni	≤0.05
Zn	≤0.10
Sn	≤0.05
Pb	≤0.05
Ti	≤0.10
Co	≤0.20

Tableau VI-1 : Composition chimique de l'alliage AlS10G

IV.3.Milieus d'étude :

L'ensemble des mesures électrochimiques a été réalisé dans une solution corrosive contenant 0.3% en poids de Na Cl. Cette solution est préparé à partir d'eau distillée et de chlorure de sodium (Na Cl) pur à 99.99% de masse atomique 58.44 g/ mol.

En ajoutant 3g de Na Cl à 1000L d'eau distillée afin d'obtenir une solution 0,3 en poids Na Cl.

IV.4. Techniques de caractérisation :

IV.4.1La cellule électrochimique :

Le dispositif utilisé pour notre étude du comportement électrochimique l'alliage Al10SGen présence du champ magnétique, dans une solution de chlorure de sodium à pH

neutre est constitué d'une cellule d'essai en verre pyrex à double parois et d'un dispositif permettant les caractérisations électrochimiques. Les mesures électrochimiques ont été réalisées avec un montage à quatre électrodes. La cellule étant en contact direct avec l'air ambiant. Donc toutes les mesures ont été effectuées en milieu aérée à température ambiante. Le schéma global de l'installation utilisé est le suivant :

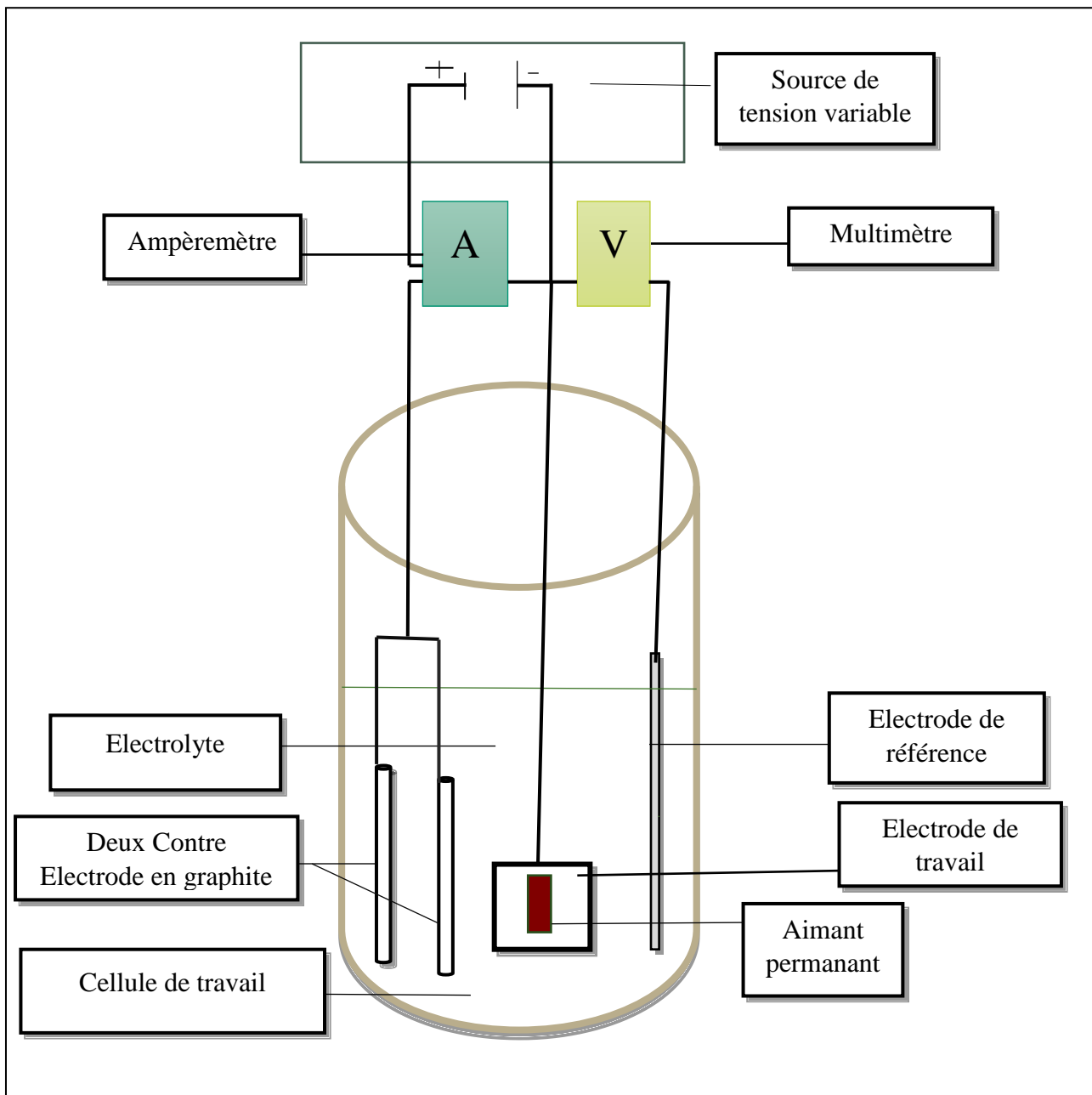


Figure (IV.1) : Montage de mesures électrochimique.

Nous allons présenter successivement les différentes électrodes utilisées : électrodes de travail (échantillon d'AlSi10Mg), 2 contre électrode (en graphite) et électrode de référence (Ag/AgCl).

IV.4.1.1.1 L'électrode de travail (ET) :

L'électrode de travail est constituée d'un assemblage du conducteur et du matériau à étudier l'alliage d'aluminium silicium Al10SG, possède une surface plane de 1 cm² qui doit être en contact avec la solution. Les électrodes ont été réalisées au laboratoire selon le protocole ci-dessous :

- On perce l'échantillon à l'aide d'une perceuse (le trou obtenu est de diamètre 1,5 mm à l'extrémité de tous les échantillons)
- On établit un contact de l'extrémité de l'échantillon où nous avons réalisé un trou avec l'une d'extrémité dénudée d'un fil électrique en cuivre, du manière à assurer le contact entre eux
- Pour l'aimant on le colle sur la face arrière de nos échantillons avant de réaliser l'enrobage (échantillons étudiées en présence du champ magnétique)
- On enrobe les échantillons dans une résine polymérisable pour faciliter le polissage mécanique (la surface de travail est la même surface sur tous les échantillons).

Avant chaque manipulation, les échantillons sont soigneusement rincés à l'eau distillée.

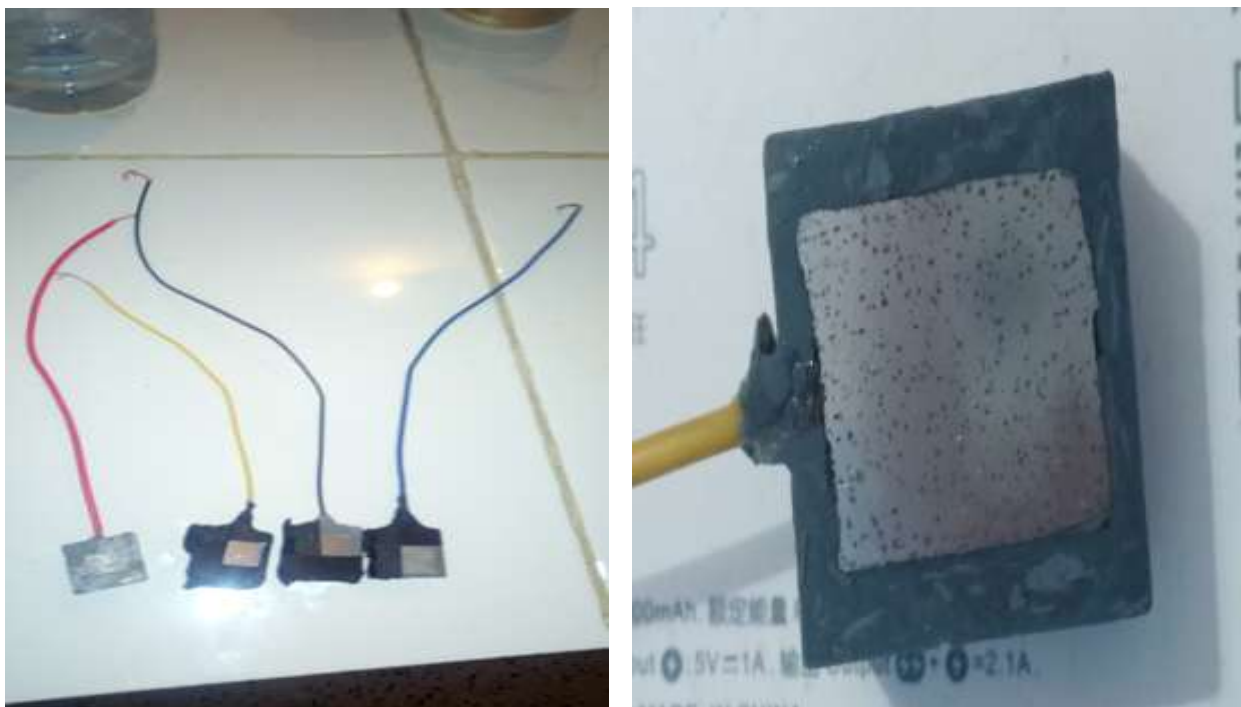


Figure IV.2 : Échantillons enrobés représentent l'électrode de travail utilisée dans les essais électrochimiques.

L'aimant utilisé est aimant permanent, sa de forme est parallélépipède possède une épaisseur de 4,87 mm, une longueur de 10,76 mm, et une largeur 6,77 mm

Les mesures de l'induction magnétique ont été effectuées à l'aide d'un Tesla-mètre qui donne des résultats dépend de la distance et la position la sonde qui doit être parallèle à surface (les lignes du champ magnétique), nous avons obtenue des inductions magnétique déferant d'une surface a une autre, ou la surface rectangulaire nous donne 63 à 70 mT, la surface carré 36 à 34 mT, la petite surface rectangulaire donne 3.8 à 4.5 mT.



Figure IV.3 : L'aimant permanent utilisé lors des essais électrochimique.

IV.4.1.1.2 L'électrode de référence (ER) :

Celle-ci permet de lire le potentiel de l'électrode de travail par rapport à l'électrode de référence, est doit être parallèle à la surface de l'électrode de travail. L'électrode de référence qui nous avons employée dans notre travail est l'électrode d'Ag/AgCl, dont le potentiel est $E^{\circ} = 197 \text{ mV}$ par rapport à l'électrode standard normale à hydrogène.

Pour le préparer nous avons immergé un fil d'argent pendant quelques secondes dans l'eau de javel riche en (ClO^-) jusqu'à ce que la couleur de sa surface devienne noire, cette couleur est un signe de la formation d'une couche d'AgCl à la surface du fil d'argent.

IV.4.1.1.3 La contre électrode ou l'électrode auxiliaire(CE) :

Deux cylindres pleins en graphite ces électrodes sont utilisés afin d'obtenir une bonne répartition des lignes de courant ainsi que une meilleure lecture, elle doit être disposée près de l'électrode de travail et parallèlement à cette dernière.

Avant chaque essai, on s'assure que toutes les électrodes sont immergées à la même profondeur.

Les mesures électrochimiques sont effectuées à l'aide :

- D'un Ampèremètre : qui permet de mesurer le courant entre l'électrode de travail et l'électrode de référence, l'unité de mesures ont fixé en mA.
- Multimètre : Consiste à faire mesuré en circuit ouvre le potentiel de l'électrode de travail, exprime en mV.

Un générateur de signaux (au potentiostat) : il permet de faire varier en fonction du temps le potentiel de l'indicateur par rapport au potentiel fixe de la référence

Pour tracer les courbes $i(E)$, au moment de la variation du potentiel $E(t)$ à l'aide d'un potentiostat, ont enregistré les valeurs de courant en fonction de ce potentiel.

IV.4.2.Préparation de la surface :

Nous avons fait une préparation de la surface des échantillons avant de réaliser l'examen micrographique, l'observation à la microscopie optique, microscopie électronique à balayage ont pour le but de mettre en évidence les constituants de la microstructure de l'échantillon. Par contre l'essai de micro dureté a pour de déterminer la micro dureté de l'alliage. Ces opérations nécessitent un polissage mécanique permettant l'obtention des surfaces planes et brillantes.

Pour ce polissage, nous avons utilisé une polisseuse à deux disques de types « STRUERS » Figure IV.4 alimentés sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W.



Figure IV.4 : Polisseuse utilisée

Les échantillons subissent un polissage en utilisant des papiers abrasifs dans l'ordre décroissant de granulométrie de plus en plus fin : 400, 600, 800, 1200, 4000 sous un jet continu d'eau. Pour assurer un bon polissage en prenant le soin de tourner l'échantillon de 90° afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent et pour donner l'aspect miroir aux échantillons l'opération est suivie d'un polissage de finition à l'aide d'un feutre d'alumine très fin. Après le polissage les échantillons sont lavés et séchés à l'air chaud.

Notre alliage est un alliage de fonderie plein de porosité et même, après le traitement mécanique subi par la surface des échantillons ce défaut de fonderie ne disparaît pas.

IV.5. Techniques d'analyse, d'observation et de caractérisation de surface :

Les techniques d'observation utilisées pour cette étude sont la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage. Bien sûr comme indique avant les échantillons traités aux observations ont préalablement subi un polissage mécanique.

IV.5.1 La microscopie optique (MO) :

La microscopie optique est utilisée afin, de déterminer la structure du matériau étudié, et de caractériser l'état de dégradation des échantillons après les essais électrochimique. Donc l'observation au microscope optique permet d'étudier les grains ainsi que les particules de seconde phase et de prendre des images microstructurales. Afin, de comprendre l'effet du champ magnétique sur la corrosion de notre alliage aluminium-silicium, des observations ont été réalisées avec des grossissements et à des endroits différents sur la surface des échantillons.

Principe de fonctionnement :

Le principe de microscopie optique fait à base d'une réflexion de la lumière par l'échantillon métallique. On dispose notre échantillon sur le porte échantillon, d'où une source lumineuse émet des rayons qui éclairent l'échantillon, grâce à un condenseur, pour donner une image et l'agrandissement de cette image effectué par une des lentilles disposées dans les objectifs à des grossissements 40, 100, 200, 400X et les oculaires, et à l'aide des vis micrométriques, ont déplacé l'échantillon sous l'objectif pour une observation généralisée de surface. Les variations de brillance dans l'image obtenue sont dues au fait que les différentes régions de la microstructure n'ont pas toutes le même pouvoir réfléchissant.

Un miroir semi-réfléchissant, permet de transformer l'image obtenue à une image finale sur l'oculaire et sur la caméra. Cette dernière est reliée à un ordinateur permettant la transmission de l'image qui s'affiche sur l'écran de l'ordinateur et un logiciel d'acquisition et de traitement d'image Piced Cora permettant d'enregistrer directement les micrographies.

L'étalonnage de mesure des dimensions réelles des micrographies avec les différents grossissements ont été effectué au moyen des réglettes.

IV.5.2. La Microscopie électronique à balayage (MEB) :

Le microscope électronique à balayage est un appareil d'observation et d'analyse qui nous fournit des données sur la morphologie et la composition chimique de notre alliage, Son avantage considérable par rapport à des microscopes optiques, permet d'observer des détails

et d'étudier la nature et la topographie des surfaces du matériau neuf ou corrodé. La marque de MEB utilisée est VEGA3 TESCAN, constitué des éléments suivants :

- Une colonne électronique, comprenant un canon à électrons, plusieurs lentilles électromagnétique « condenseur », un certain nombre de bobines électriques d'alignement et de réglage, et un dispositif de balayage électronique du faisceau .cette colonne est maintenue sous vide à un niveau minimum de 10^{-3} Pa.
- Une chambre « objet », ou est introduit l'échantillon
- Un ensemble de détecteurs, qui permet de recueillir toutes les émissions électroniques et électromagnétiques issues de la cible
- Un système de visualisation des images et d'exploitation des informations en provenance de l'échantillon.
- Un ensemble de pilotage et contrôlé informatique, généralement de type compatible PC, l'imagerie étant numérique

Le principe de fonctionnement :

Le principe de la microscopie électronique à balayage repose sur l'exploitation des signaux liés aux interactions entre les électrons primaires de fortes énergies et le matériau. Un faisceau d'électrons d'énergie E_0 frappe la surface du matériau à observer. Cette dernière, sous l'impact des électrons primaires, réagit en émettant différents types de signaux. Une détection synchrone entre le balayage du faisceau et les électrons émis par le matériau permet de reconstituer un signal observable sur un écran vidéo. Il en résulte que le contraste des images observées par MEB est un contraste d'émission d'électrons : pour un matériau conducteur, les parties claires sur l'image correspondent à des zones de fortes émissions et inversement pour les zones sombres. Dans le cas d'une image en électrons secondaires, une forte émission d'électrons est la conséquence combinée d'un effet de relief (contraste topographique), du numéro atomique moyen élevé possédant un grand nombre d'électrons périphériques (contraste chimique) ou d'un effet de conduction électronique (contraste de charge). Pour une image en électrons rétrodiffusés, le contraste est essentiellement d'ordre chimique.

IV.6.Essai de dureté :

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration et plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Il y a plusieurs types d'essais de dureté : essai Brinell, essai Rockwell, essai Shore et l'essai Vickers. Leur principe est le même ils ne diffèrent que par la forme de pénétrateur utilisé.

IV.6.1. Micro dureté Vickers (Hv) :

Dans notre essai les mesures de micro dureté ont été effectuées à l'aide d'un micro d'uromètre Vickers de types V-Tes ; est caractérisée par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge de 0,025 Kgf, durant 20 secondes. Le pénétrateur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136° . On fixe les paramètres d'essai d'où, la charge appliquée sur les échantillons est de 25g. sans chocs ni vibrations et maintenue à sa valeur finale pendant 20 secondes, dont les surfaces ont été préalablement polies. Ensuite, on choisit la phase à tester et on la ramène sur le point de la réglette. Lorsque l'indentation est lancée, l'objectif du microscope est retiré automatiquement et le pénétrateur vient s'enfoncer dans la zone choisie. En fin, le système remet le microscope et permet de visionner l'empreinte et de mesurer ses diagonales.

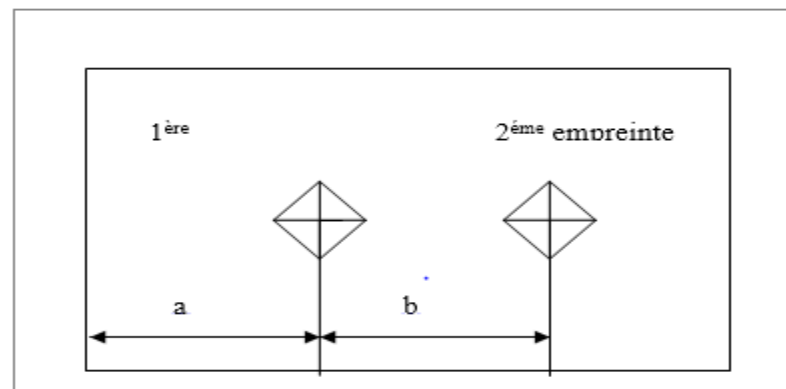


Figure.IV.5 : Condition de l'essai de Vickers.

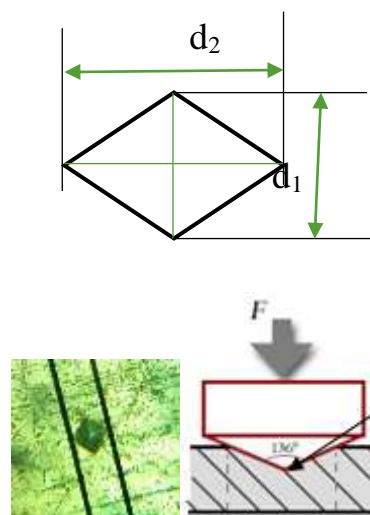


Figure IV.6 : La diagonale de l'empreinte et l'image de l'empreinte
La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide des formules suivantes :

On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 , on obtient la valeur de la diagonale en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 par la relation suivant: $d = \frac{d_1+d_2}{2}$ (iv.1)

La surface latérale S de l'empreinte peut s'exprimer en fonction de la diagonale de la base carrée de la pyramidale de l'empreinte après suppression de la charge :

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin(68^\circ)} \dots \dots \dots (iv.2)$$

En fin, nous avons utilisé le diamètre de la diagonale pour les mesure final de micro dreté d'où :

$$Hv = 0.1891 * \frac{F}{d^2} \dots \dots \dots (iv.3)$$



Figure IV.7 : Appareil de micro dreté

IV.7 Méthode d'étude électrochimique :

IV.7.1.Chronopotentiométrie :

La Chronopotentiométrie est une technique de mesure du potentiel libre (suivi du potentiel en circuit ouvert), consiste à mesurer le potentiel du matériau dans un électrolyte au cours du temps, on désignant :

- La chronopotentiométrie à courant nul : consiste à suivre l'évolution du potentiel libre de l'électrode de travail au cours du temps sans imposer le passage d'aucun courant. Le potentiel tend à se stabiliser vers une valeur notée E_{corr} .
- La chronopotentiométrie à courant non nul : consiste à suivre l'évolution du potentiel de l'électrode de travail au cours du temps en imposant le passage d'un courant. Le courant peut être fixé à une valeur imposée, dans ce cas il s'agit de

chronopotentiométrie galvano statique mais il peut aussi varier au cours du temps comme c'est le cas dans l'application particulière du suivi du potentiel de deux électrodes branchées en couplage galvanique [13,33]

IV.7.2. Suivi du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion :

Le potentiel libre plusieurs désignations, le potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon et, plus rarement appelée potentiel de repos. Il s'agit de la grandeur électrochimique la plus mesurable immédiatement. En outre c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié.

Le potentiel de corrosion est le potentiel que prend un alliage ou un métal par rapport à un électrolyte donné, mesuré par rapport une électrode de référence [36]. Il n'est pas caractéristique du métal et dépend des conditions expérimentales, en particulier de la nature, de la concentration, de la température, de l'agitation du réactif et également de l'état de surface du métal. Il permet d'avoir une idée sur le comportement de la surface en milieu corrosif (corrosion, formation d'une couche passive ...), et d'autre part, il permet de déterminer le temps nécessaire à l'obtention d'un régime stationnaire. Il indique aussi la tendance du métal à passer en solution. A titre d'exemple, nous donnons quelques valeurs des potentiels de différents métaux dans une solution aqueuse à 3 % 100 de NaCl de tableau ci-dessous [10].

Tableau (IV.2) : le potentiel libre de quelques métaux dans une solution NaCl

Matériau	Platine	Aluminium	Magnésium	Argent	Cuivre
E(v)	+0.30	-0.74	-1.63	-0.05	-0.18

Le suivi de potentiel de corrosion d'un alliage, on observe qu'il n'atteint pas immédiatement une valeur stationnaire. En effet, lors de l'immersion du métal dans la solution, celle-ci ne contient pas d'ions du métal et le potentiel stationnaire est long à atteindre. D'autre part, l'interface métal-solution peut être modifiée par formation ou destruction d'un film protecteur.

Les courbes potentiel-temps peuvent présenter différents aspects visibles sur la figure IV.2.

- La courbe (a) : le potentiel devient de plus en plus positif. Il y a passivation du métal par formation à sa surface d'un film protecteur.
- La courbe (b) : le potentiel devient plus négatif. Il y a attaqué continue du métal.
- La courbe (c) : le potentiel devient d'abord plus négatif puis tend vers des valeurs plus positives. Il y a attaqué suivie de passivation.

- La courbe (d) : le potentiel devient d'abord plus positif et stable pendant un certain temps puis se déplace vers des valeurs plus négatives. C'est le cas lorsque le métal est recouvert d'une couche protectrice au moment de l'immersion. La couche se développe pendant une durée plus ou moins longue puis est détruite.

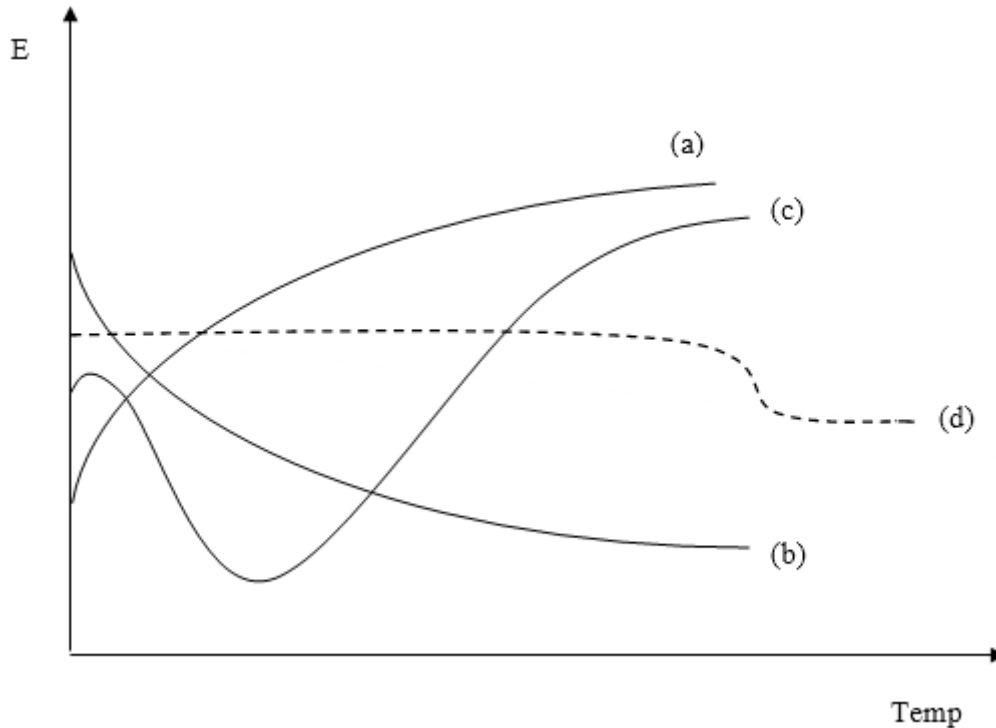
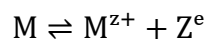


Figure IV.8 : Principales formes des courbes Potentiel-temps [10]

IV.7.3. Loi de Nernst d'une réaction électrode :

La relation de Nernst, nous permet de calculer le potentiel d'équilibre métal/solution. Soit M un métal en contact avec une solution. Toutefois, la présence d'ions positifs au voisinage de l'interface métal-solution ainsi que l'excès d'électrons correspondant à la surface du métal créent très rapidement une barrière de potentiel qui a tendance à inverser le phénomène de passage en solution. [30] Il se crée alors un équilibre dynamique que l'on peut schématiser par la réaction :



Cet équilibre correspond à un potentiel E représentant la différence de potentiel entre le métal M et la solution contenant les ions M^{Z+} . E est le potentiel réversible de la réaction d'électrode. Donc la formule de la relation de Nernst est la suivante pour l'équilibre électrochimique [35]

$$E = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln [M^{Z+}] \dots \dots \quad (\text{iv.4})$$

Avec : R : constante des gaz parfait (8,314 J. k⁻¹.mol⁻¹)

F : constante de Faraday ($F = 96500 \text{ C. mol}^{-1}$)

T : température de mesure (K)

Z : nombres d'électrons échangés.

E_0 : potentiel standard du couple.

$[M]$: l'activité des atomes métalliques dans le métal (égale par définition à 1).

$[M^{Z+}]$: la concentration en ions métalliques dans la solution.

IV.7.4. La densité du courant, le potentiel de corrosion et résistance de polarisation :

La densité du courant et le potentiel de corrosion :

Le calcul de la densité du courant et du potentiel de corrosion, I_{corr} et E_{corr} est effectué en extrapolant les droites de Tafel anodique et cathodique vers le potentiel E_{corr} [10], l'abscisse du point d'intersection pour lequel les intensités anodique et cathodique sont égales en valeur absolue figure (IV. 6), nous donne directement I_{corr} et E_{corr} .

Donc les courbes de polarisation intensité-potentiel permettent de déterminer avec précision les potentiels de corrosion de l'alliage à traiter [33].

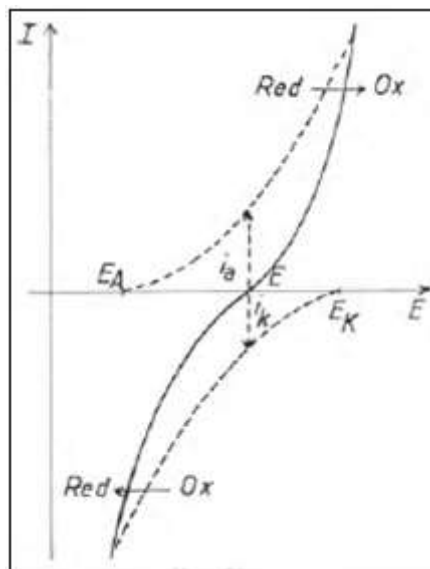


Figure (IV.9) : La courbe globale intensité-potentiel [10]

- **Droites de Tafel :**

Les courbes $\log=f(E)$ qui représentent la variation du logarithme de la densité de courant en fonction du potentiel présentent deux droites dites (droites de Tafel) comme sont montre sur la figure IV.

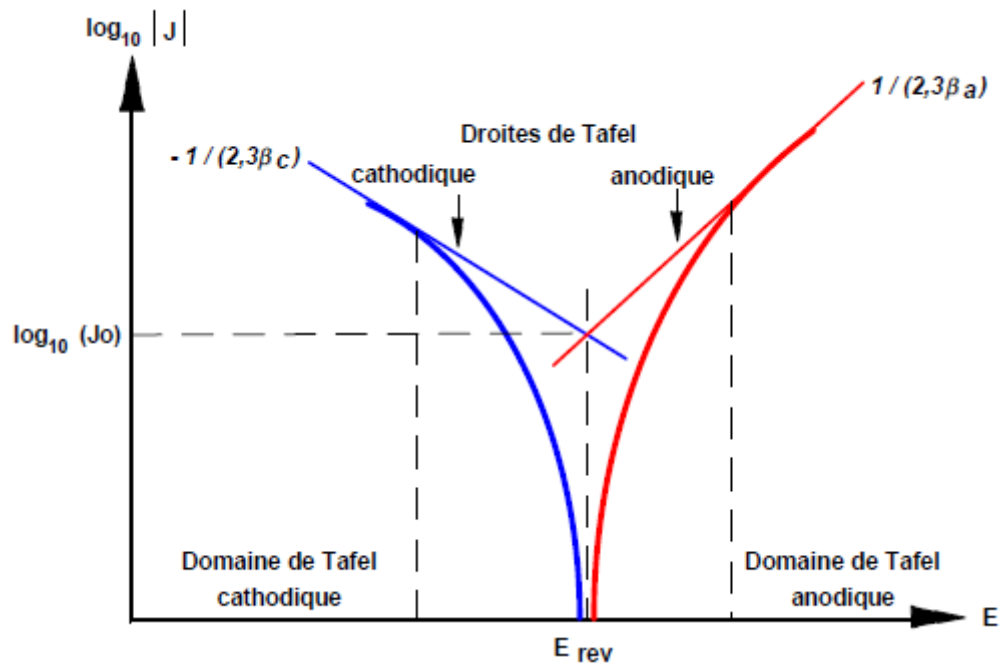


Figure IV.10 : La courbe $\log_{10} |J| = f(E)$ et droites de Tafel [10]

La densité de courant J_0 est la somme de la densité de courant partiel anodique J_a et de la densité de courant partiel cathodique J_c .

Par convention, la densité de courant anodique est positive ($J_a > 0$), et la densité de courant cathodique négative ($J_c < 0$).

Le tracé des droites de Tafel est effectué loin de l'équilibre, dans ce cas on peut écrire :

$$\eta_a = \beta_a \ln(J_a/J_0) \quad \text{Et} \quad \eta_c = -\beta_c \ln(J_c/J_0) \dots \dots \dots \text{(iv.5)}$$

Les coefficients de Tafel anodique et cathodique sont défini par :

$$\beta_a = \frac{RT}{azF} \quad \text{Et} \quad \beta_c = \frac{RT}{(1-a)zF} \dots \dots \dots \text{(iv.6)}$$

D'où : η : La surtension anodique et cathodique : $\eta = E - E_{corr}$ (V).

β_a : La pente de Tafel anodique (V/décade).

β_c : La pente de Tafel cathodique (V/décade).

J_c et J_a : La densité de courant de courant cathode, anode respectivement

J_0 : La densité de courant d'échange.

Soit encore pour la branche anodique :

$$\log_{10}(J_a) = \eta_a / (2,3\beta_a) + \log_{10}(J_0) \dots \dots \dots \text{(iv.7)}$$

Et pour la branche cathodique :

$$\log_{10}(J_c) = \eta_c / (2,3\beta_c) + \log_{10}(J_0) \dots \dots \dots \text{(iv.8)}$$

Les relations (iv.7) et (iv.8) sont les **droites de Tafel** anodique et cathodique qui décrivent les limites anodique et cathodique. L'intersection de ces droites correspond à $|J_a| =$

$|j_c|$, et à des surtensions η_a et η_c , nous obtenons l'intersection des droites de Tafel donnant I_{cor} et E_{cor} [2].

On peut déterminer la densité du courant de corrosion I_{cor} à partir de la relation suivante :

$$I_{cor} = \left[\frac{\beta_a \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \right] \left(\frac{\Delta i}{\Delta E} \right) \dots\dots\dots (iv.9)$$

La vitesse de corrosion exprimée en perte de matière sur une période donnée est alors calculées partir de I_{corr} selon :

$$V_{cor} = \frac{I_{cor} \cdot w_a \cdot t}{10 \cdot F} \quad (\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}) \dots\dots\dots (iv.10)$$

Avec : I_{cor} : la densité du courant de corrosion.

t : la durée de l'essai.

W_a : l'équivalent électrochimique du métal. [33]

F : constante de Faraday.

Le potentiel de piqûration :

A partir du potentiel en circuit ouvert E_{corr} , la densité du courant augmente fortement avec l'évolution du potentiel vers les valeurs anodiques jusqu'au potentiel de piqûre E_p , à ce moment la densité de courant devient stable mais, au-delà de cette valeur on assiste à une augmentation soudaine de la densité de courant donc, l'apparition d'une hystérésis positive indique l'existence de piqûres. Dans le domaine de passivation, la corrosion bien que fortement ralentie et le palier de passivation est délimité par le potentiel de piqûre (E_p). On définit la plage de passivation par la différence entre le potentiel de piqûration et le potentiel de corrosion ($E_p - E_{corr}$). Plus cette plage est large, plus l'alliage résiste mieux à la piqûration [36].

La résistance de polarisation :

Les mesures de la résistance de polarisation R_p est une technique peu, voire non « perturbatrice » de l'interface métal/milieu. Elle permet donc un suivi de l'évolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion de l'échantillon.

La résistance de polarisation est égale à l'inverse de la pente à la courbe de polarisation $I = f(E)$, au voisinage d' E_{cor} . L'unité de mesure est l' Ω / cm^2 . Elle est calculée par équation

suivante :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \dots\dots\dots (iv.11)$$

La résistance de polarisation est inversement proportionnelle au courant de corrosion, plus la valeur de la résistance de polarisation est élevée, plus l'intensité du courant de corrosion est faible [6], on a : $R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta\alpha*\beta c}{2,3(\beta\alpha+\beta c).I_{cor}}$ (iv. 12)

IV.7.5.les courbes de polarisations :

Technique de l'obtention :

Les courbes intensité-potential sont obtenues par les techniques potentiométriques ou voltampérométries à balayages cycliques de potentiel. Sont des techniques analytique, électrochimique moderne très utile qui permet d'obtenir des informations thermodynamique et cinétique sur des systèmes électrochimiques. Ces techniques consistent à imposer, entre l'électrode de travail et celle de référence, grâce au potentiostat, une variation de potentiel E (t), et pour chaque valeur du potentiel, on enregistre l'évolution de la densité de courant J (t) du système électrochimique considéré. Mais, ces techniques restent stationnaires toutefois insuffisantes pour caractériser des mécanismes complexe, elles doivent toujours être complétées par d'autres méthodes d'étude et ayant des cinétique caractéristique différentes comme la micrographie.

L'intérêt de cette technique réside dans le fait qu'elle permet de faire rapidement un grand nombre de mesures et de comparer entre elles les valeurs de l'intensité du courant de corrosion lorsqu'un facteur est modifié. De plus, l'état de surface de métal qui subit la polarisation il suffit de la ramené le polissage des échantillons et utilise à nouveau, et ce dernière est très exploite pendant notre travail.

Les courbes intensité-potential permet d'obtenir un grand nombre de renseignements sur le comportement d'un métal plongé dans un réactif donné, en particulier en ce qui concerne son aptitude à la passivation et aussi, la tendanced'un alliage à la corrosion localisée ou piqûration. Cependant, il importe de signaler que la forme et les caractéristiques des courbes sont très sensibles à un certain nombre de facteurs tels l'état de surface, l'état structural du métal, l'agitation du réactif, la présence des traces d'impuretés dans la solution, etc. Il en résulte qu'il est souvent difficile d'effectuer des expériences dans des conditions correspondant exactement à la réalité.

La forme des courbes intensité-potential peut être interprétée en étudiant la position relative des courbes élémentaires cathodique et anodique. Les branches anodique et cathodique des courbes de polarisation sont tracées en mode potentiostatique, après stabilisation au potentiel de corrosion. Si le métal est susceptible de se passiver, la courbe élémentaire anodique présente généralement un pic caractéristique [31, 32, 13,33].

Nous avons fait une grande exploitation de cette technique pour évaluer et étudier l'influence du champ magnétique sur le comportement électrochimique de notre alliage d'aluminium-silicium.

IV.8. Dispositifs expérimentaux :

Le comportement électrochimique de l'alliage Al10SG ou série 4xxx, en présence du champ magnétique a été étudié lorsqu'il est en contact avec la solution de NaCl à 0.3% en poids, et pendant cette étude ont fait base sur le suivi et la trace des courbes potentiel libre-potential-temps, et de polarisation, intensité de courant-potential et par les calculs des paramètres tel que le potentiel de corrosion (E_C), résistance de polarisation (R_P), et le potentiel de piquration (E_P).

➤ Les courbes de potentiel libre en fonction du temps :

Le potentiel libre (potentiel en circuit ouvert) de notre alliage d'aluminium silicium a été suivi en absence et en présence du champ magnétique. Les échantillons ont été immergés dans une solution à 0.3 M de NaCl et, le potentiel libre de ces échantillons a été suivi immédiatement à l'instant de l'immersion par rapport à une électrode de référence Ag/AgCl dont son potentiel est bien connu, pendant 24 heures (pour la première minute, chaque 05 secondes nous enregistrons une valeur de potentiel. Les dix minutes qui suivent, nous enregistrons une valeur chaque minute. Après les 11 minutes, nous enregistrons une valeur chaque 05 mn jusqu'à deux heures et vers la fin chaque nous enregistrons une heure chaque heure.

On a utilisé un millivoltmètre électronique dont la très haute impédance d'entrée limite à une valeur très faible l'intensité du courant débité par la pile.

➤ Les courbes de polarisation intensité-potential :

Le dispositif utilisé pour le tracé des courbes de polarisation intensité-potential est un dispositif classique à quatre électrodes, représenté par la figure (IV.2). Le circuit de mesure du potentiel imposé E , met directement en série l'électrode de travail et l'électrode de référence.

Les échantillons ont été immergés dans la solution de façon à leur permettre d'atteindre un potentiel stable en circuit ouvert (PCO) pour éviter le passage d'un courant électrique qui perturberait la valeur du potentiel en favorisant la polarisation du métal avant de commencer le balayage de potential.

En faisant varier de façon continue le potentiel appliqué à l'électrode de travail depuis le domaine cathodique (valeurs négatives du potential) jusqu'au domaine anodique (valeurs positive), la gamme de potential appliqué est de -1500mv à 1500mv, et à une vitesse de

balayage de $0.16\text{mV} / \text{s}^{-1}$. La variation de vitesse de balayage du potentiel est très importante, elle permet de mettre en évidence la cinétique des phénomènes qui se produisent à l'électrode.

Le sens de balayage a été renversé à partir de la valeur zéro volt, ce qui permet d'obtenir une information sur la réduction des composés formés lors de l'oxydation et, pour chaque valeur appliquée de potentiel, enregistre la valeur de la densité de courant correspondante. Ce que nous permet de tracer la courbe $I = f(E)$, et les courbes logarithmes décimal de la densité de courant, $\log(I)$ exprimé en A/cm^2 , en fonction du potentiel appliqué E .

Ces courbes nous permettant de suivre l'évolution du comportement électrochimique de notre alliage en présence du champ magnétique.

Après les essais d'immersion et de polarisation, des observations au microscope optique et au microscope électronique à balayage ont été réalisées pour la caractérisation de la microstructure de la surface d'aluminium et pour aider à la compréhension de comportement électrochimique de l'alliage aluminium-silicium en présence de champ magnétique et, les phénomènes intervenant à la corrosion de l'interface métal/solution.

V.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous décrivons les résultats obtenus concernant l'étude du comportement électrochimique et à la corrosion de l'alliage d'aluminium AS10G de fonderie contenant environ 10% de silicium en pourcentage massique, 1% environ de magnésium et quelques autres éléments avec un faible pourcentage massique. Ce comportement de l'alliage est étudié en présence et en absence d'un champ magnétique de faible intensité dans une solution de 0.3% NaCl. L'alliage étudié est un alliage obtenu par coulée en sable.

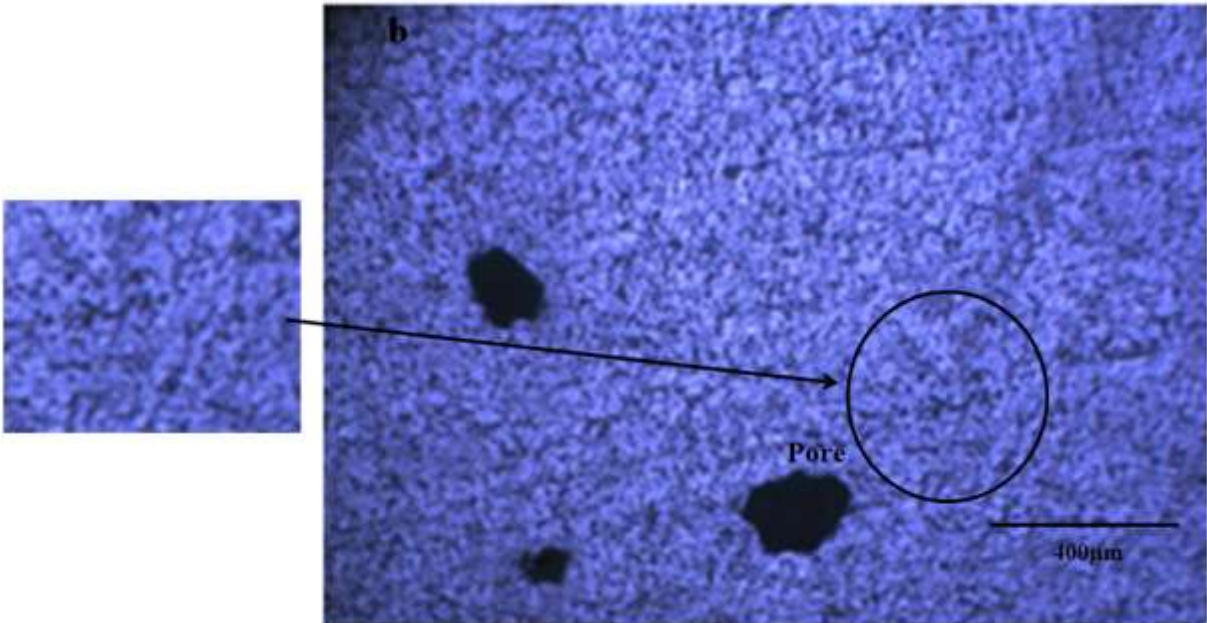
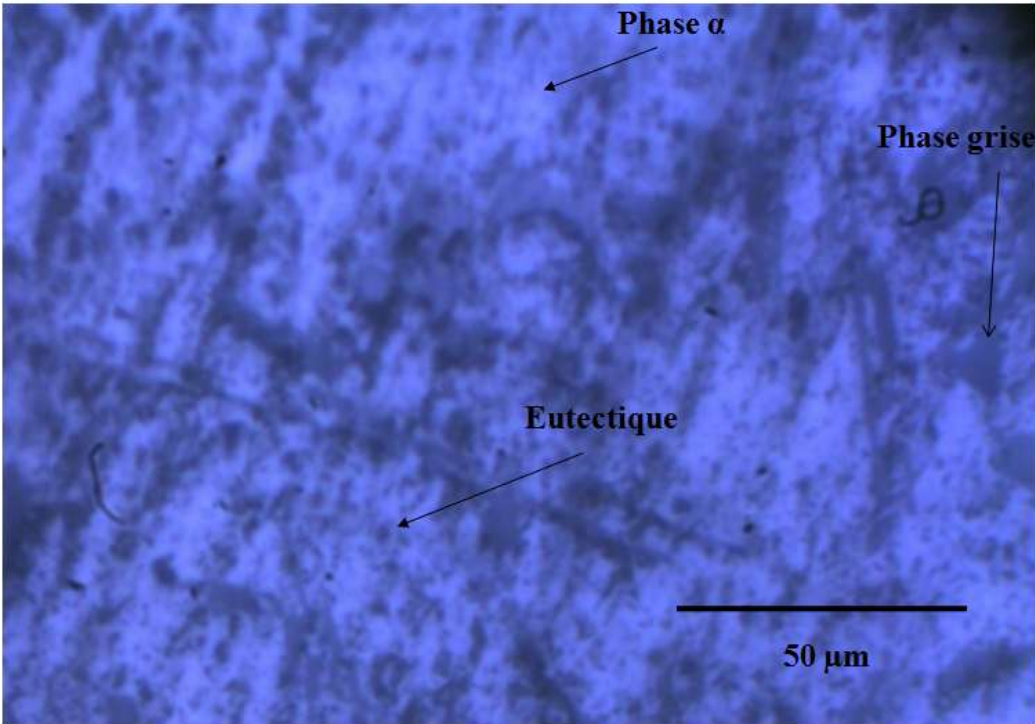
V.2.L'analyse microstructurales et morphologie de corrosion :

Nous avons procédé à l'analyse des échantillons en alliage AlSi10G par la méthode d'observation micrographique, cette méthode permet d'observer les différentes phases en présence et la forme des grains avant la corrosion et l'attaque chimique, et l'observation des produits de corrosion après attaque et après immersion dans une solution de 0.3% Na Cl. Observé l'effet du champ magnétique sur les produits de corrosion. Avant l'observation au microscope optique nos échantillon sont été enrobés à froid dans une résine sous forme de pate (pate ABRO) et polis mécaniquement jusqu'à l'obtention d'une surface miroir.

V.2.1 L'analyse de la surface polie au microscope optique avant corrosion dans la solution de 0.3%NaCl de l'alliage AS10G brut de coulée :

La Figure (V.1) représente les microstructures d'un échantillon de l'alliage étudié (AS10G) ayant subi un polissage mécanique. Cette figure montre des observations microstructurales sur de différentes plages de l'échantillon. Les Figure (V.1.a, b, c), montrent que l'alliage AlSi10G de fonderie est constitué de trois phases une phase claire et une phase sombre et une phase grise, ainsi que la présence de quelques pores. La phase claire qui est majoritaire représente la phase α constituée essentiellement de l'aluminium, la phase grise et qui est sous forme de script chinois est constituée de l'aluminium, le manganèse, le fer et le silicium. La phase sombre représente l'eutectique de l'aluminium et le silicium.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION



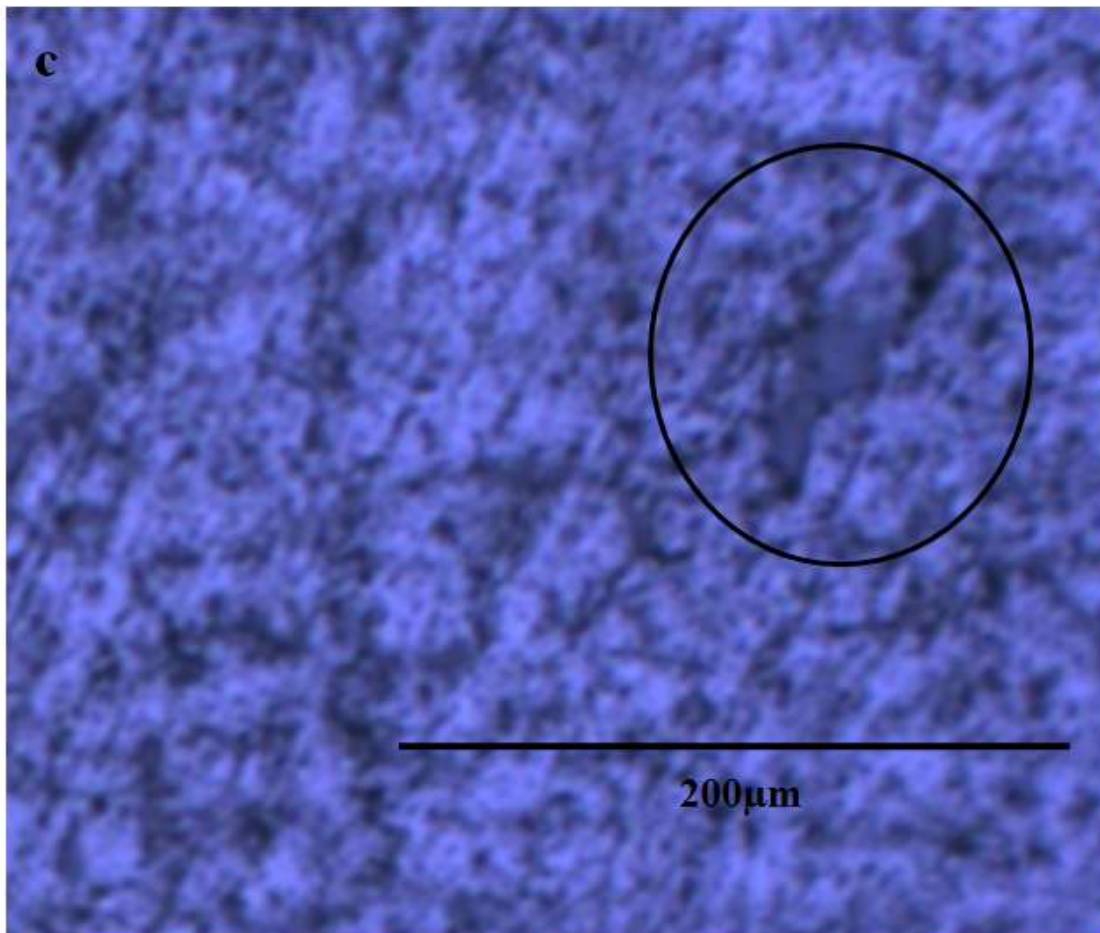


Figure (V.1) : Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage de fonderie AISI10G poli.

V.2.2. Observation au microscope optique après le tracé de la courbe de polarisation en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité de l'alliage AS10G brut de coulée :

En absence du champ on remarque que la surface de l'échantillon s'est corrodée légèrement pas profondément après le balayage du potentiel à partir de -1.5 V jusqu'à 1.5 V.

La couche d'oxyde présente à la surface de l'échantillon a résisté au balayage du potentiel (**Fig. V.2**).

Par contre en présence du champ magnétique, le balayage du potentiel à partir de -1.5 V jusqu'à 1.5 V provoque une corrosion plus importante à la surface des échantillons. Ceci-dit la présence d'un champ magnétique de faible intensité modifié la morphologie de corrosion de l'échantillon suite à un balayage de potentiel du domaine cathodique vers le domaine anodique (**Fig. V.3**).

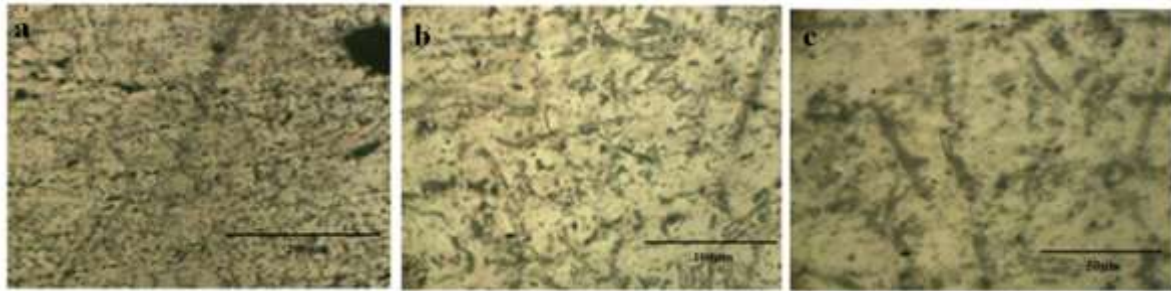


Figure (V.2) :Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage AIS10G après le tracé de la courbe de polarisation en absence du champ magnétique.

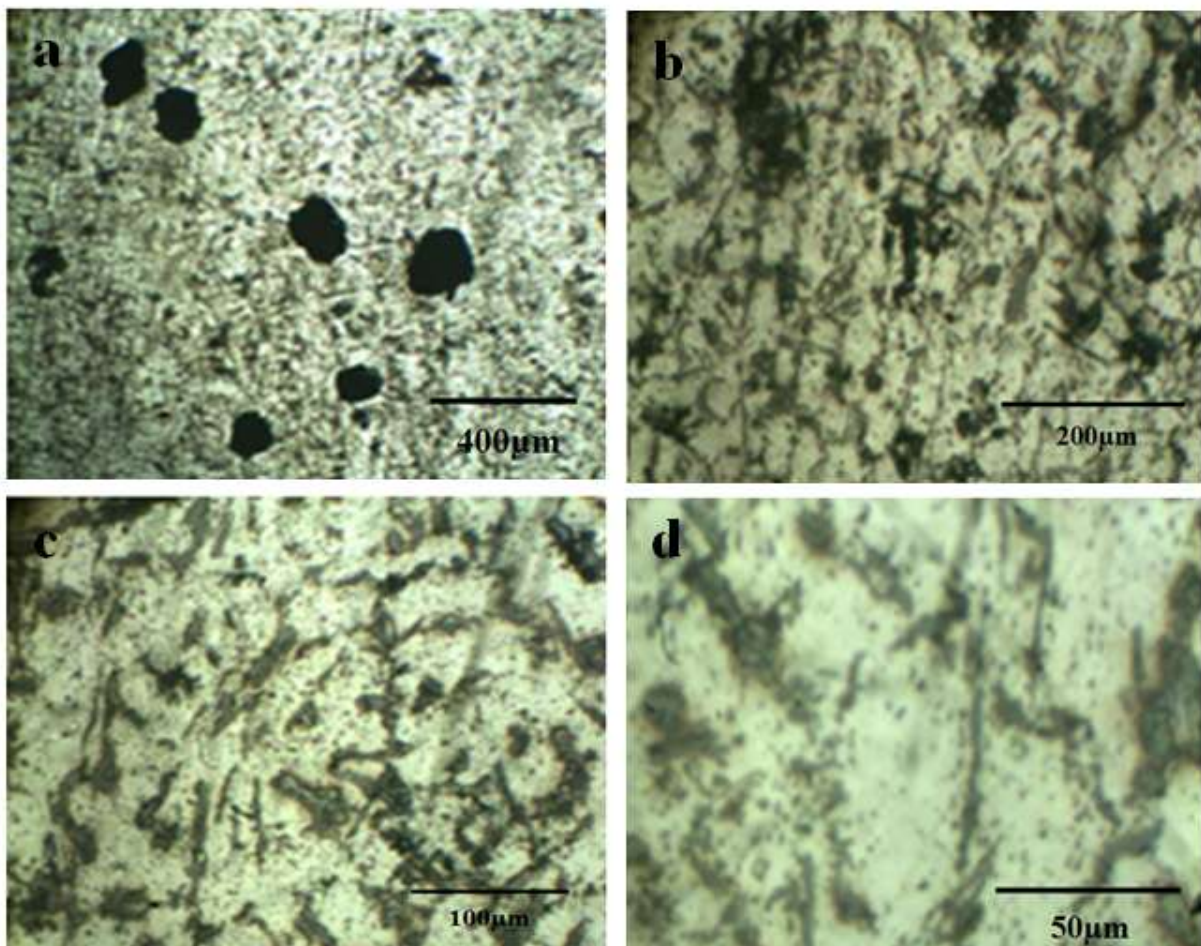


Figure (V.3) :Microstructures obtenues par microscope optique d'un alliage AIS10G après le tracé de la courbe de polarisation en presence du champ magnétique.

V.2.3. Observation au microscope optique après 24 heures d'immersion dans la solution de 0.3%NaCl en présence et en absence du champ magnétique de l'alliage AS10G brut de coulée :

Sur la (Fig. V.4) la corrosion observe sur la surface des échantillons est importante dans la plus part de la surface qui représente la matrice. La zone non corrodée sur cette surface représente une autre phase plus noble que la matrice.

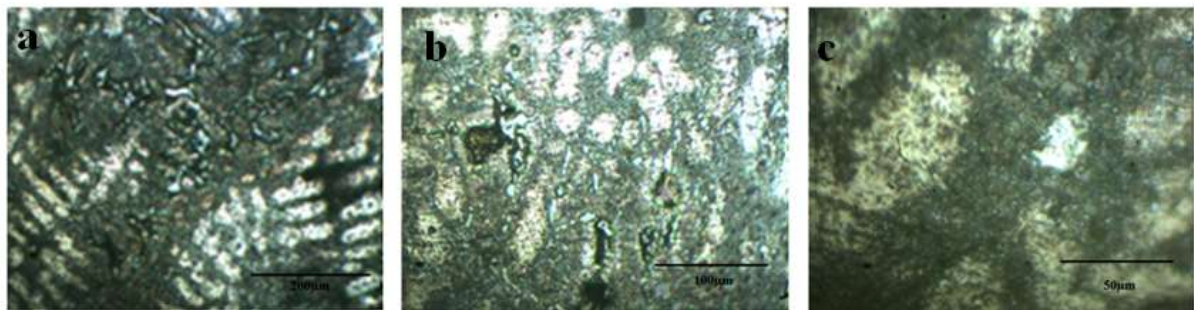


Figure (V.4) : Micrographiques obtenu par microscopie optique d'un alliage AIS10G dans une solution de 0.3% NaCl en absence d'un champ manétique.

L'observation de la morphologie de corrosion, après immersion dans la solution de 0.3% NaCl, en présence du champ magnétique, est représentée par la figure (Fig. V.5). Nous remarquons que la présence d'un champ magnétique provoque la corrosion des phases plus noble qui ont été épargnées en absence du champ magnétique.

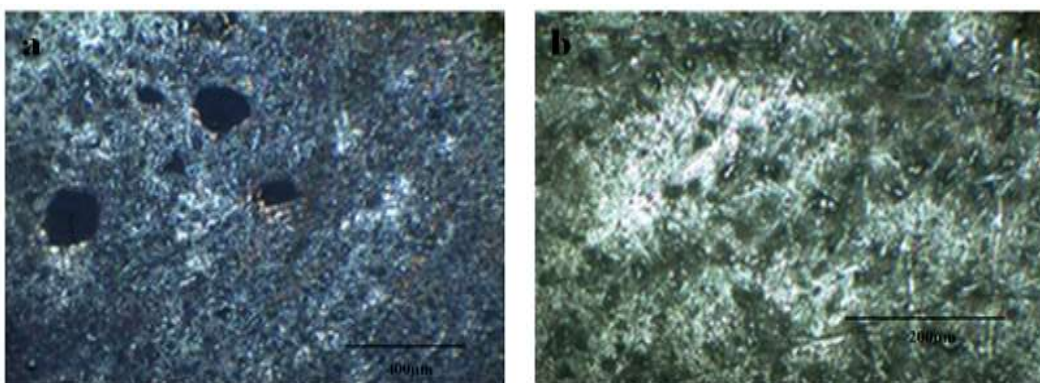


Figure (V.5) : Micrographiques obtenu par microscopie optique d'un alliage AIS10G dans une solution de 0.3% NaCl en présence d'un champ manétique.

V.2.4.Observation au microscope électronique à balayage de brut de coulée :

L'état de surface des échantillons d'aluminium-silicium avant corrosion, ont été observées par le microscope électronique à balayage (**Fig.V.6**). Cette figure nous a permis d'observer la matrice à base d'aluminium une phase blanche notée (A) et une phase grise notée (B). Les particules de la phase grise ont une dimension plus grande que celle des particules blanches, les deux types de particules sont distribués d'une façon homogène. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats obtenus par l'observation au microscope optique.

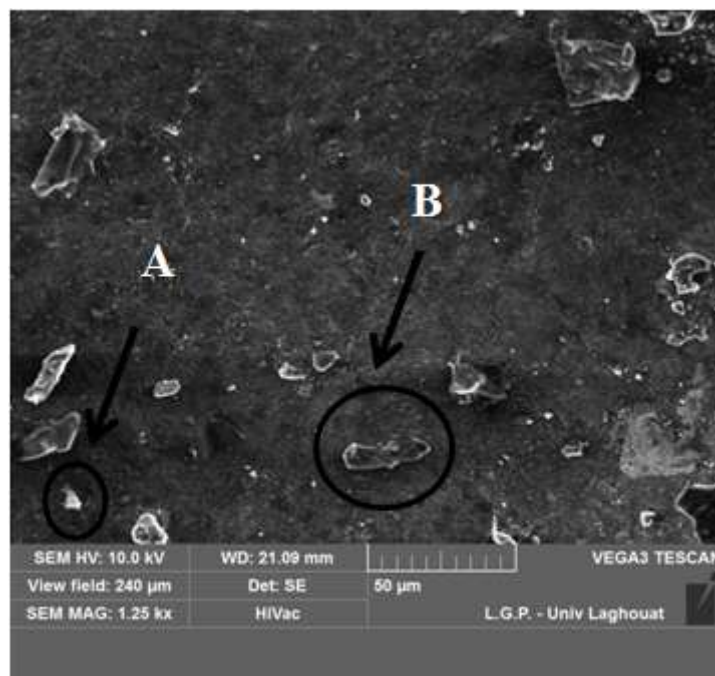


Figure (V.6) :Microstructure de l'alliage AS10G obtenu par microscope électronique à balayage

V.3.Micro dureté de l'alliage AS10G brut de coulée après polissage :

La micro dureté de l'alliage AS10G dans plusieurs endroits est représentée sur le Tableau (V.1), la micro dureté de cet alliage est d'environ 70 Hv dans la plus part des endroits sauf dans certains endroits où cette dernière est de l'ordre de 100 Hv. L'obtention de la valeur

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION

de 100 est due au fait que la dureté mesurée correspond probablement à la dureté des particules grises.

Tableau (V.1) : micro dureté de l'alliage AS10G dans différents positions

Le diamètre moyen (mm)	25.1	21.4	26.8	25.0	25.5	26.4	25.2
La micro dureté (Hv)	74	101	65	74	71	67	73
micro dureté moyenne (Hv)	75						

V.4. Cinétique de la corrosion de l'alliage AS10G dans une solution de 0,3% Na Cl :

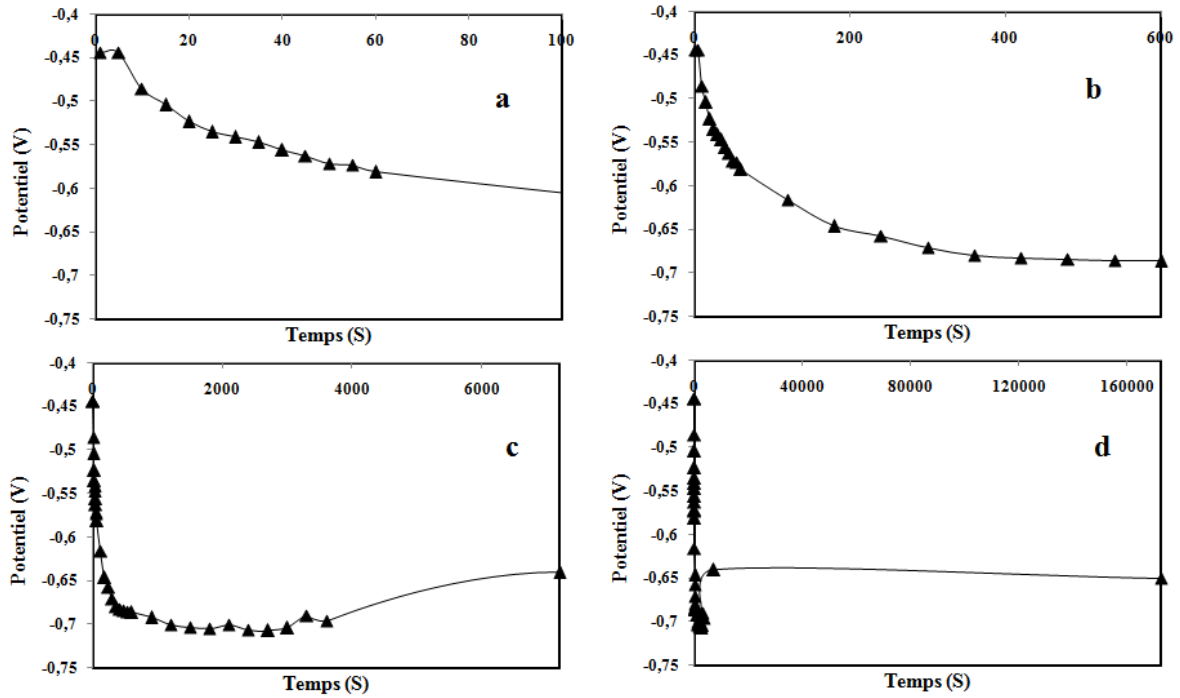
V.4.1 évolution du potentiel de la corrosion libre :

V.4.1.1 Echantillon poli en présence du champ de faible intensité :

L'essai du potentiel de la corrosion libre est le premier test susceptible d'évaluer la corrosion d'un matériau métallique en contact avec un électrolyte (une solution corrosive), le suivi de celui-ci de ce dernier nous renseigne sur l'évolution du phénomène de la corrosion et de la passivation. Pendant le suivi de potentielle, et au début de l'immersion, à la première minute, nous avons enregistré des mesures chaque 05 secondes et après, nous enregistrons une valeur chaque minute. Après les 11 minutes, nous enregistrons une valeur chaque 05 mn jusqu'à 1 heure, ceci nous a permis d'examiner le comportement électrochimique de notre alliage au début de la corrosion, par la suite nous avons enregistré une mesure chaque heure, pour voir l'évolution du potentiel de corrosion au cours du temps en absence et en présence du champ magnétique.

La figure (**Fig. V.7**) montre l'évolution du potentiel de corrosion d'un échantillon brut de coulée au cours des 172800 secondes, dans une solution de 0.3% Na Cl. A l'immersion le potentiel de corrosion est égal à -0.444 V (**Fig.V.7.a**), celui-ci diminue jusqu'à il atteint la valeur -0.769 V après 3300 secondes d'immersion, puis il augmente pour atteindre une valeur de -0.64 V après 7200 secondes d'immersion, à partir de ce moment le phénomène de passivation est atteint.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION

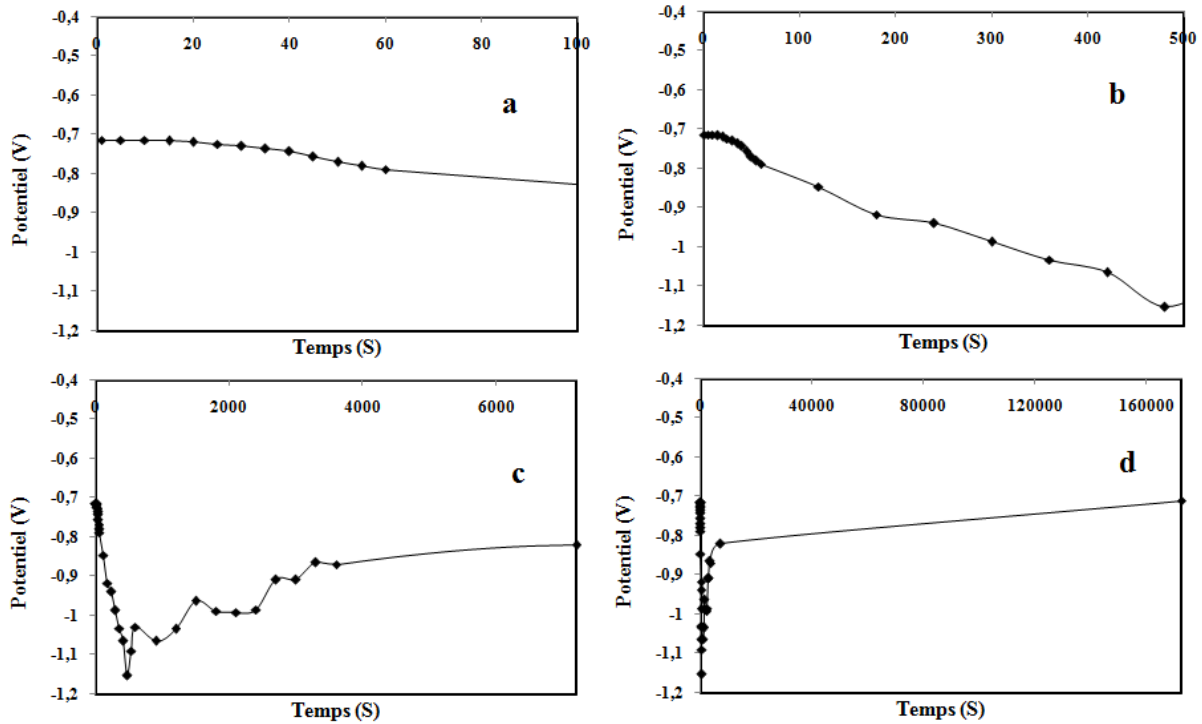


Figure(V.7) : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% Na Cl en présence du champ magnétique de faible intensité

V.4.1.2. Echantillon poli en absence du champ de faible intensité :

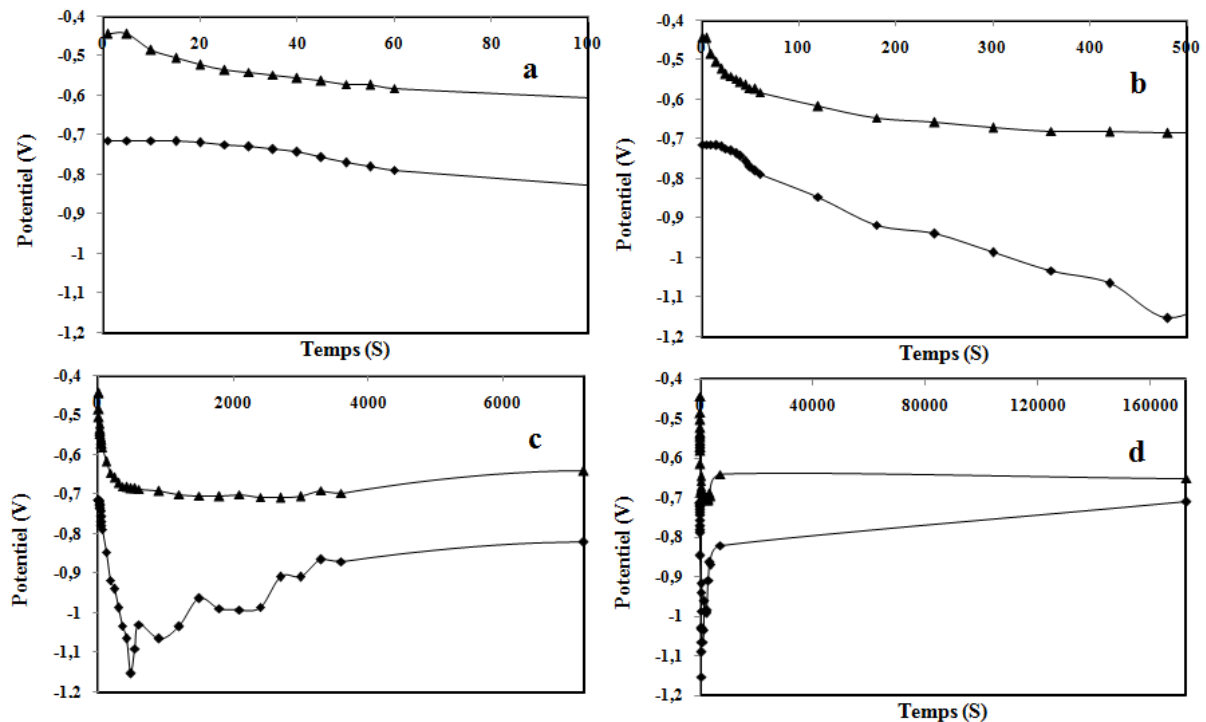
La Figure (V.8) représente la courbe du potentiel de corrosion libre, de l'alliage AS10G brut de coulée, dans une solution 0.3 % NaCl en absence du champ magnétique de faible intensité. A l'immersion la valeur du potentiel est égale à -0.713 V avec l'augmentation du temps de corrosion celle-ci diminue jusqu'à atteindre la valeur de -1.152 V après 500 secondes de corrosion. Et après celui-ci augmente pour atteindre la valeur de -0.82 après deux heures d'immersion (7200) seconde. Suite à ça le potentiel de corrosion libre se stabilise à une valeur d'environ 0.71 V et là le phénomène de passivation est atteint.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION



Figure(V.8) : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% NaCl en absence du champ magnétique de faible intensité

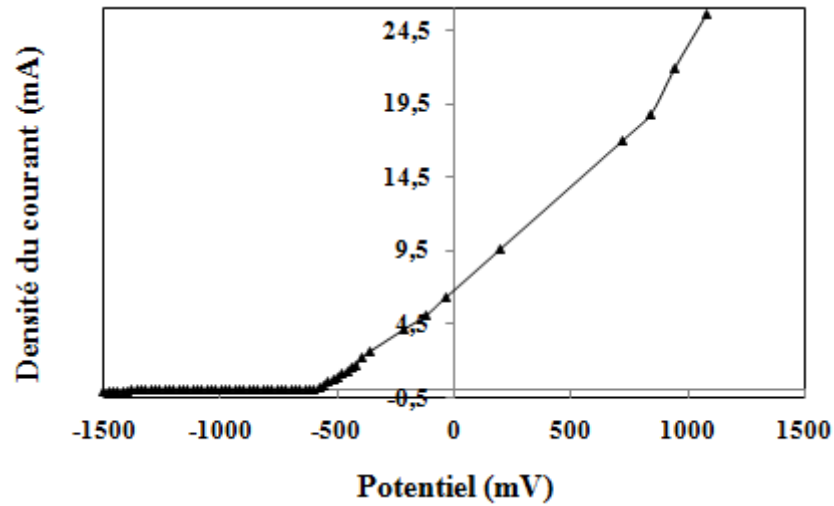
La comparaison du potentiel de corrosion libre dans une solution de 0.3% NaCl en absence d'un champ magnétique de faible intensité à celui en présence du champ magnétique montre que le potentiel de corrosion libre en absence du champ magnétique est toujours inférieur à celui en présence du champ magnétique. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le champ magnétique augmente le phénomène de convection au niveau de la double couche électronique à la surface de l'alliage.



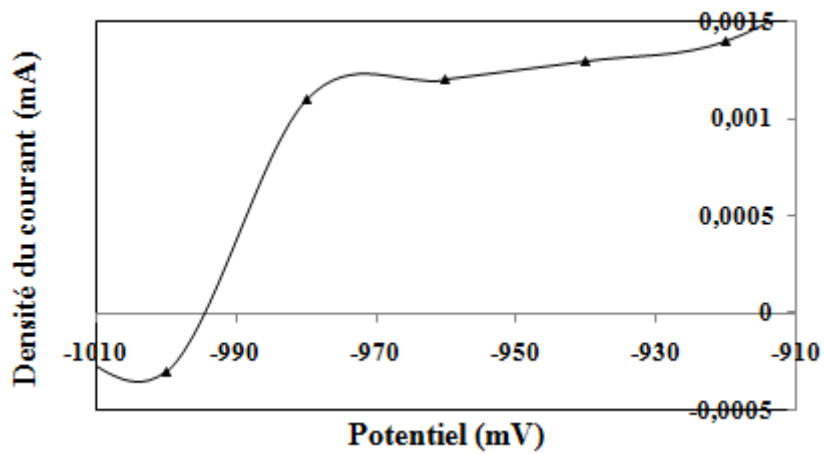
Figure(V.9) : Potentiel de la corrosion libre de l'échantillon poli dans une solution de 0.3% NaCl comparaison entre le potentiel de corrosion libre en présence du champ (▲) et le potentiel libre de corrosion en absence du champ magnétique (◆)

V.4.2. Les courbes de polarisation :

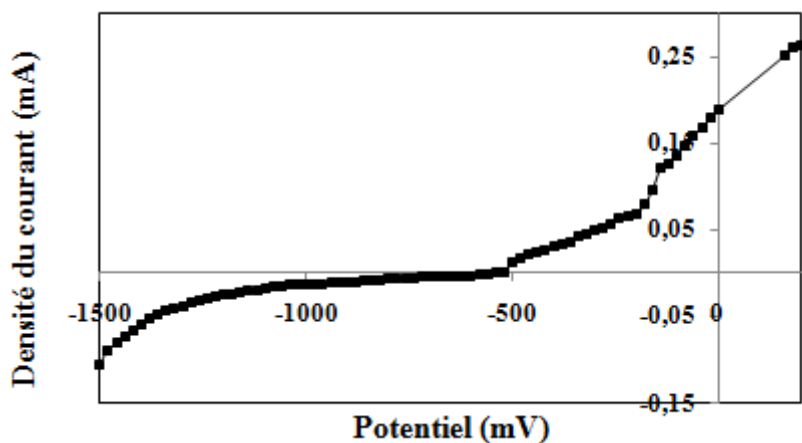
Les (Fig.V.10-13) représente la courbe de polarisation de l'alliage AS10G 1 heure après immersion dans une solution de 0.3% NaCl, sur cette courbe nous observons un domaine cathodique et un domaine anodique séparés par le potentiel de corrosion. Les premières figures (10 et 11) sont attribuées à l'alliage AS10G se corrodant en absence du champ magnétique, les deux autres courbes sont attribuées au cas où la corrosion se produit en présence d'un champ magnétique de faible intensité. Nous constatons que la cinétique de corrosion en présence du champ magnétique est différente de celle en absence du champ magnétique par le potentiel de corrosion, la résistance de polarisation (Tableau 2) et la différence dans l'étendu des domaines cathodique et anodique. Les courbes représentées par les (Fig. V. 11 et 13) montre l'effet loupe de la zone du passage du courant global par l'origine. Les figures (Fig.14et 15) montrent la différence entre la cinétique de corrosion en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité.



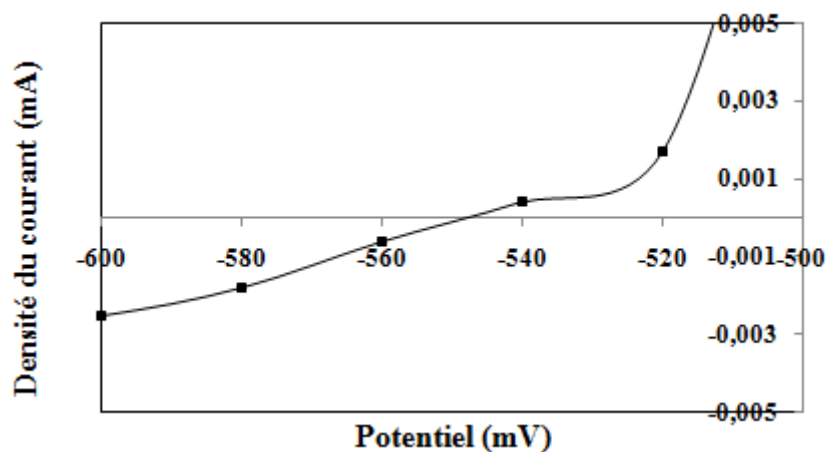
Figure(V.10) : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique



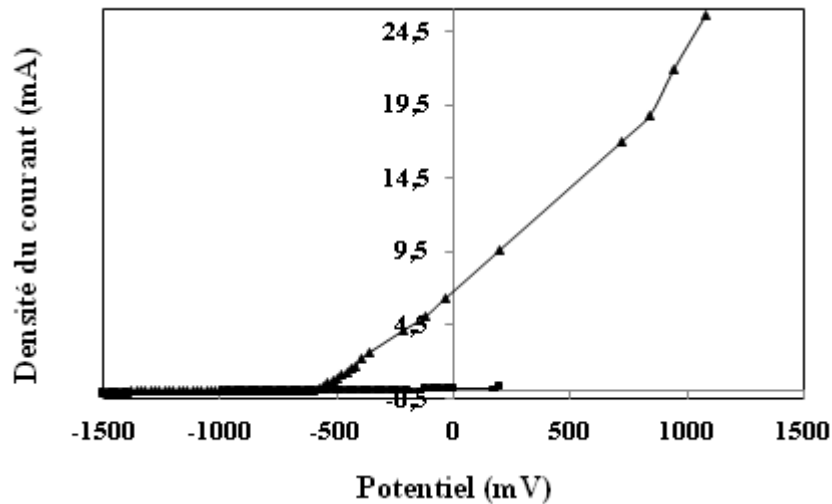
Figure(V.11) : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique : effet loupe dans la zone du courant nul



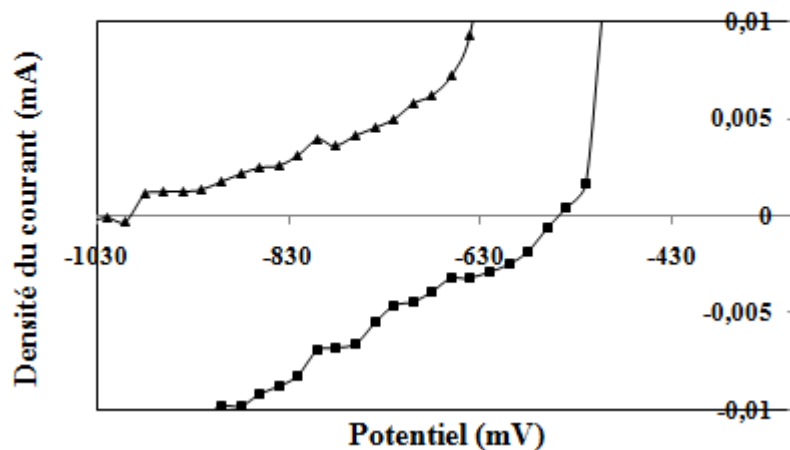
Figure(V.12) : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique



Figure(V.13) : Courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique : effet loupe dans la zone du courant nul



Figure(V.14) : Comparaison des courbes de la polarisation $i=f(E)$ pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique

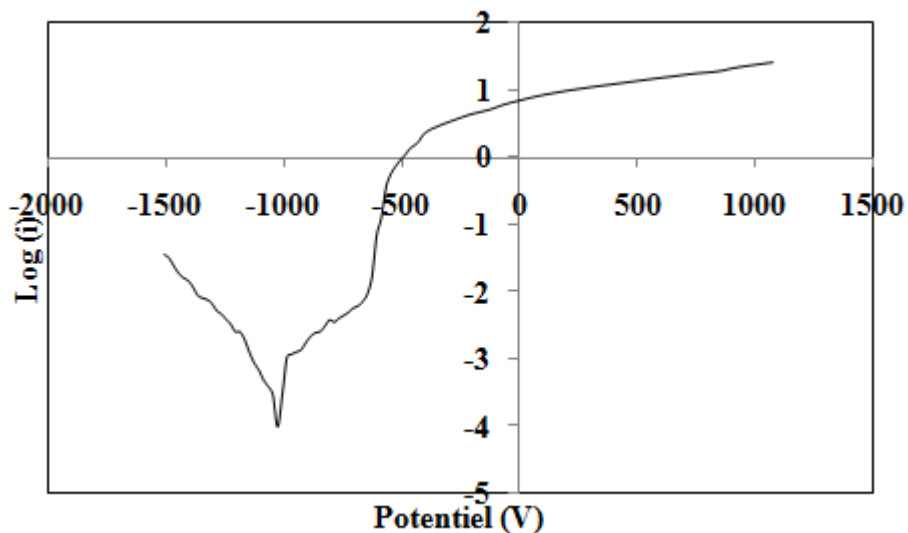


Figure(V.15) : Comparaison des courbes de la polarisation $i=f(E)$ dans la zone de i proche du 0 pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique

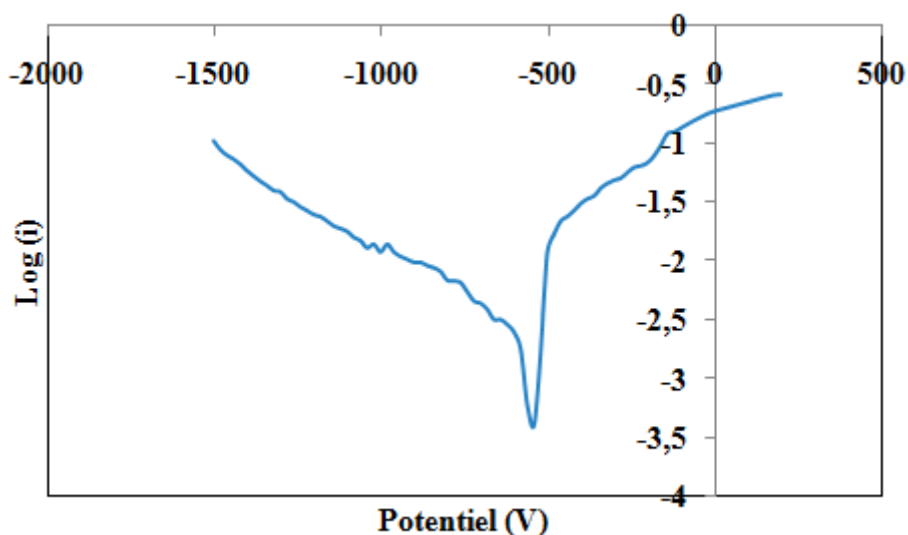
Les courbes représentées par les (Fig.15-18) montrent l'évolution du logarithme décimale de la densité de courant en fonction du potentiel au cours du balayage du potentiel, celles-ci montrent bien la position du potentiel de corrosion dans le cas de la corrosion en présence du champ magnétique et dans le cas de l'absence du champ magnétique.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION

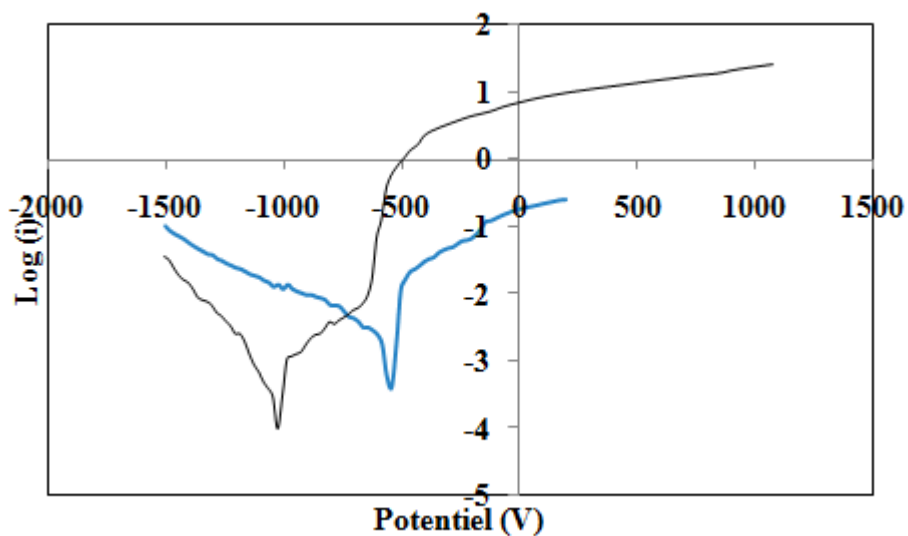
En conclusion la présence du champ magnétique fait augmenter le domaine cathodique, le potentiel de la corrosion et la résistance de la polarisation.



Figure(V.16) : Courbes de la polarisation ($\text{Log}(i)=f(E)$) pour l'échantillon poli en absence du champ magnétique



Figure(V.17) : Courbes de la polarisation ($\text{Log}(i)=f(E)$) pour l'échantillon poli en présence du champ magnétique



Figure(V.18) : Comparaison des courbes de la polarisation $\text{Log}(i) = f(E)$ pour l'échantillon poli en présence et en absence du champ magnétique

V.5.les paramètres électrochimiques :

Tableau (V.2) : Paramètre électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'alliage AS10G après différent temps d'immersion dans la solution Na Cl à 0,3%

Paramètre	E_{corr} (mV)	R_p (ohm)
Echantillon		
Echantillon poli sans champ magnétique	-995	1414 kOhms
Echantillon poli avec champ magnétique	-550	20 kOhms

CONCLUSION GENERALE

Les conclusions suivantes sont fondées sur les résultats obtenus dans le travail présenté sur l'étude de la corrosion de l'alliage d'aluminium AIS10G en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité :

- 1- La microstructure de l'alliage AIS10G à l'état brut de coulée est caractérisée par la présence de trois types de phases, la phase α , une fine phase blanche et une phase grise grossière.
- 2- La phase grise est présente sous forme de script chinois.
- 3- Nous avons observé la présence de pores dans l'alliage étudié.
- 4- La micro dureté de l'alliage AIS10G brut de coulée est de 75Hv.
- 5- Les échantillons corrodés en présence du champ magnétique montre une coloration sur toute la surface, de ce fait une couche protectrice couvrant toute la surface se forme.
- 6- L'étude de la cinétique de la corrosion par le biais du test de la corrosion libre et montre que le champ magnétique provoque une diminution du potentiel de corrosion libre.
- 7- L'étude de cinétique de corrosion par le biais du tracé des courbes i de E montre que le potentiel de corrosion, la résistance de polarisation augmente en présence du champ magnétique, et le domaine cathode augmente.

Références bibliographiques

- [1] Altenpoh/D, un regard à l'intérieure de l'aluminium, une introduction à la métallurgie et à la transformation de l'aluminium-ALUMINIUM VERLAG-Paris 1976
- [2] F.GHOMAR« Science des matériaux de construction» UAB.FACULITE SCIENCES DE L'INGENIEUR
- [3] Christian VARGEL. Comportement de l'aluminium et ses alliages. Dunod paris 1979
- [4] Lycée Raymond LEYMONY .l'Aluminium et ses alliages
- [5] Christian VARGEL. Technique de l'ingénieur. m4661«propriétés générale de l'aluminium et ses alliages»
- [6] Technologie professionnelle générale, A.CasteLA.Dupont, Édition Desfarges Paris Année 1980 MOULAGE
- [7] Christian VARGEL. " Corrosion de l'Aluminium" Ingénieur conseil en corrosion de l'aluminium. Paris 1999
- [8]Mr. RAMOUL Chems Eddine, mémoire Magister «élaboration et caractérisation électrochimique des alliages d'aluminium de fonderie »ANNABA
- [9]HAKEM AHMED THESE de Doctorat, «Etude du mode d'élaboration et de maturation sur les propriétés mécanique et la macrostructurale des alliages de fonderie Al-Si»
- [10] C.Vargel, corrosion de l'aluminium, paris : dunod, 1999, 501 p.isbn 2-100- 04191-6.
- [11] E.LUMINITA, Thèse Doctorat« Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium », Institut national des sciences appliquées, 2005.
- [12] ALIOUALI AZEDDINE, Thèse Doctorat, «Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux».
- [13] Tarik, E. Phénomènes de la corrosion, Première Ecole Maghrébine de Corrosion, Hammamet, 1990
- [14] Vargel, C. Corrosion de l'aluminium, Edition. Dunod, ISBN 2-10-00656966, 2002.

[15] G. Daun, J. Talbot. HAL. GENERALITES SUR LA CORROSION DES METAUX ET ALLIAGES .1971

[16] Loïc LACROIX, Thèse Doctorat, « mécanismes de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie à force atomique (AFM) couplée au mode kelvin (KFM) et des alliages modèles », Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.

[17] Jean-Louis, C., Métaux et Alliages Passivables, Règle de Choix et Emplois Types, Technique de l'Ingénieur, Vol. M 153-7, 1994.

[18] « Guide des solutions pratiques permettant de contrer la corrosion galvanique entre l'aluminium et l'acier dans le domaine du transport terrestre», Conseil national de recherches, Canada CNRC, Décembre 2010.

[19] F.MIOMANDE, S.SADKI, P.AUDEBERT. « Electrochimie des concepts aux applications ». DUNOD, Paris 2005.

[20] Lamoureux, J., Précis de Corrosion, Edition Beau Chemin, Canada, 1994.

[21] Rouïba h, K. Mémoire de Magistère, « Contribution à l'Etude du Comportement Electrochimique du Couple Galvanique Acier au Carbone/Anodes de Zinc dans l'Eau de Mer Naturelle » 2003.

[22] ZAZI NACER, Thèse doctorat «Influence du vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium Magnésium », Tizi-Ouzou, 2011.

[23] www.corrosion_galvanique_principe.com

[24] www.corrosion_intergranulaire.com

[25] Jilani LAMLOUMI, M. BEN BRAIEK Université Virtuelle de Tunis « Physique - électricité -Le champ magnétique »

[26] www.binder-magnetic.com « Transmissions magnétiques- Aimants »

[27] S.BOLAY, CFP-EMV, Introduction à l'Electromagnétisme, Notions / Grandeurs. 2011

[28] Gabriel Soriano. Sciences pour l'Ingénieur « Electromagnétisme »

[29] Frédéric MAZALEYRAT Introduction à la physique des matériaux électromagnétiques 2006

[30] Christian BOUVIER. Ecole Européenne de Francfort. « Physique- Champ Magnétique et Bobine »

[31]A. MEKROUD Thèse Doctorat « INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES METALLIQUES GLISSANTS ACIER XC 48/ACIER XC 48, LAITON/ACIER XC 48 ET ALUMINIUM/ACIER XC 48 »2008

[32] Jean-Pierre Pulicani THESE de DOCTORAT « ETUDE DU COMPORTEMENT ELECTROCHIMIQUE DE COMPOSES POLYFONCTIONNELS ET DE DERIVES COMPORTANT UN GROUPEMENT XANTHATE »

[33] F. KAHOUL.- Matériaux Métalliques - Electrochimie et Corrosion. «NOTION FONDAMENTALES ASPECTS ELECTROCHIMIQUES DE LA CORROSION »

[34] Christian. Amatore - Électrochimie -3^{ème} Edition. Dunod, Paris 2011

[35] Madjid IFIRES Mémoire de Magister «ETUDE DU COMPORTEMENT ELECTROCHIMIQUE DE L'ALLIAGE AA6061 DANS LE MILIEU Na Cl EN PRESENCE D'INHIBITEUR DE CORROSION »

[36] Nacira SASSANE. « Etude de l'efficacité des inhibiteurs inorganiques sur le comportement des joints soudés d'un alliage d'aluminium dans une solution saline à 3.2% NaCl »