

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



DEPARTEMENT GENIE DE LA CONSTRUCTION

Mémoire de Fin d'Etude

MASTER

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Elaboration de l'alliage AlSi10MgZn,
par l'ajout du Zinc a l'alliage AlSi10Mg
et caractérisation de la corrosion, de la
microstructure et de la dureté**

Présenté par **OUAZAR Rachid**

Dirigé par **Pr ZAZI.N**

Mémoire soutenu le 01/04/2021 devant le jury composé de :

M r. SALHI
Professeur, UMMTO, Président

M r. FILALI
Professeur, UMMTO, Examineur

M r. ZAZI.N
Professeur, UMMTO, Encadreur

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant pour m'avoir attribué la capacité de comprendre et d'analyser des problèmes, pour m'avoir prédestiné à étudier et d'arriver là où je suis aujourd'hui.

Mes remerciements vont au professeur **ZAZI Nacer** qui m'a proposé ce thème, qui a dirigé et qui a participé activement à mon encadrement tout au long de ce travail et qui m'a guidé pour atteindre mes objectifs tracés, ainsi que les doctorants

et co-promoteur **HADJ ALI Youcef et BEN ABDESSELAM Djedjiga** pour m'avoir aussi aidé lors de la réalisation de mes expériences et de m'avoir orienté du mieux qu'ils pouvaient.

Je tiens aussi à remercier les ingénieurs du laboratoire SDM **M^{me} Yakoubi Milyada épouse SETBEL** et **Mr SETBEL IDIR** d'avoir mis à ma disposition tout le matériel nécessaire pour mon étude.

Je remercie tous les membres de jury pour avoir accepté de lire mon travail, de le juger et de débattre sur son contenu.

Je remercie tous les auteurs de mes références bibliographiques pour le lôt d'informations que j'ai pu acquérir, les personnes qu'on oublie souvent de remercier mais qui nous facilite chaque jour notre existence.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect,
d'amour et de reconnaissance à :*

*Mes propres parents qui m'ont fournis toutes les
conditions pour ma réussite*

*A mon cher frère Ouali, à mes cousins et cousines
et à tous mes amis et exceptionnellement à Nany,
Chabane, Djamel, Massi, Mehdi et Dihia.*

*Comme je dédie ce travail à mes éducateurs et à
tous ce qui m'ont guidé à réaliser ce travail et
qui m'ont aidé durant mes études.*

Tableau I : 1 caractéristique mécanique de l'aluminium	4
Tableau I. 2 Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium	11
Tableau I : 3 familles d'alliages d'aluminium	13
Tableau I : 4 Famille d'alliages d'aluminium corroyés	14
Tableau I : 5 groupes de l'alliage d'aluminium.....	15
Tableau I : 6 désignation des états métallurgiques des produits corroyés.....	16
Tableau I : 7 Famille d'alliages d'aluminium moulé	17
Tableau I : 8 le tableau indique les renseignements complémentaires.....	18
Tableau II 1Série galvanique des métaux exposés à l'eau	33
Tableau III. 1 Composition chimique (AS10Mg/AS10MgZn5)	47
Tableau VI. 1 : Résistances de polarisation et potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn après une heure de corrosion	67
Tableau IV. 2 : Résistances de polarisation et potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn après cinq jours de corrosion	68
Tableau IV.3 dureté Brinell de l'alliage AlSi10Mg.....	72
Tableau IV.5 microdureté Vickers de l'alliage AlSi10Mg.....	72
Tableau IV.6 microdureté Vickers de l'alliage AlSi10MgZn.....	73

Figure I. 1 : La structure de l'aluminium en perspective.....	3
Figure I. 2 Courbe de traction de l'aluminium	4
Figure I. 3 : interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement)	7
Figure I. 4 : Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisailables	8
Figure I. 5 : Représentation schématisée de trois types de précipitation. a : précipité cohérent b : précipité semi cohérent c : précipité incohérent.	
Figure II 1 Corrosion chimique	27
Figure II 2 Corrosion généralisée	29
Figure II 3. Corrosion localisée dans un alliage d'aluminium	30
Figure II 4 propagation autocatalytique d'une piqure	31
Figure II 5 : corrosion galvanique	32
Figure II 6 : Corrosion caverneuse	34
Figure II 7 : corrosion érosion	34
Figure II 8 : corrosion filiforme	35
Figure II 9 : Corrosion inter granulaire de l'alliage 5083	36
Figure II 10 : Corrosion inter granulaire des alliages aluminium-Magnésium sensibles	36
Figure II 11 : Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium non sensibles.....	36
Figure II 12 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage A-Mg.....	37
Figure II 13 : Photomicrographie MEB d'un alliage 2024 T351 développant de la corrosion Feuilletante	38
Figure III. 1: Four électrique a chambre horizontale	48
Figure III. 2 : creuset utilisé pour la fusion du mélange.....	48
Figure III. 3 : balance électronique	48
Figure III. 4 : Duromètre	49
Figure III. 5 : principe de l'essai de dureté brinell	50
Figure III.6 : Principe de l'essai Vickers.....	51
Figure III.7 : Microduromètre de marque ZWICK	52

Figure III. 8 : enrobage des échantillons pendant et après démoulage	53
Figure III.9 : Polisseuse type (STRUERS)	53
Figure III.10 : microscope optique HUND (WETZLAR)	55
Figure III. 11 : Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl	56
Figure III.12 : Potensioestat de marque AUTOLAB.....	57
Figure III.13 : dispositif utilisée pour la polarisation dans une solution de NaCl.....	57
Figure III.14 : dispositif de mesure corrosion a courant imposé	58
Figure. IV.1 Microstructure de l'alliage AlSi10Mg	60
Figure.IV. 2 porosités observées sur l'alliage AlSi10Mg	61
Figure. IV.3 microstructure de l'alliage AlSi10MgZn.....	61
Figure. IV.4 : Porosités observées l'alliage AlSi10MgZn	61
Figure.IV.5 : Potentiel de corrosion libre durant la première heure de corrosion : bleu AlSi10MgZn, Rouge AlSi10Mg	64
Figure.IV.6 : Potentiel de corrosion libre durant 5 jours de corrosion : bleu AlSi10MgZn, Rouge AlSi10Mg.....	64
Figure.IV.7 Morphologie de corrosion après 5 jours de corrosion AlSi10Mg (images a et b),AlSi10MgZn (images c et d)	65
Figure.IV.8: Courbes de polarisation ($i = f(E)$) des deux alliages après 1 heure de corrosion dans une solution de 3% de NaCl, Al Si10Mg (violet), AlSiMgZn (vert) ...	66
Figure.IV. 9: Courbes de polarisation $i = f(E)$ des deux alliages, après cinq jours de corrosion dans une solution de 3% de NaCl, Al Si10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir)	67
Figure.IV.10 Courbes de polarisation ($\text{Log}(i) = f(E)$) des deux alliages, alliage AlSi10Mg (violet) et alliage AlSi10MgZn (vert), après 1h d'immersion dans une solution de 3% de NaCl.....	69
Figure.IV.11 Courbes de polarisation ($i = f(E)$) des deux alliages, alliage AlSi10Mg (rouge) et alliage AlSi10MgZn (noir), après 5 jours de corrosion dans une solution de 3% de NaCl.....	70

Figure.IV.12 Courbes de polarisation des l'alliages AlSi10Mg (violet) et AlSi10MgZn (vert) après 1h de corrosion, et AlSi10Mg (rouge) et AlSi10MgZn (noir) après 5 jours de corrosion.....	70
Figure.IV.13 Courbe du courant de corrosion libre sous une tension imposé de 1.5 volt, AlSi10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir).....	71
Figure. IV. 14 Courbe du potentiel de corrosion libre sous une tension imposé, AlSi10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir).....	72

Sommaire

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

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Introduction.....	2
-------------------	---

I- L'aluminium	2
-----------------------------	---

1- Fabrication de l'aluminium	2
-------------------------------------	---

2- Extraction de la Bauxite	2
-----------------------------------	---

3- Extraction de l'alumine	2
----------------------------------	---

4- Obtention de l'aluminium	2
-----------------------------------	---

5- Propriété de l'aluminium	3
-----------------------------------	---

5-1-structure de l'aluminium	3
------------------------------------	---

5-2- Propriétés mécaniques.....	3
---------------------------------	---

6-traitement thermiques :	5
---------------------------------	---

6-1 TREMPE	5
------------------	---

6-2 vieillissement :	6
----------------------------	---

6-3 recuit	6
------------------	---

6-3-1 recuit d'homogénéisation	6
--------------------------------------	---

6-3-2 : Recuit de recristallisation :	6
---	---

6-3-3 recuit d'adoucissement.....	6
-----------------------------------	---

7 -Durcissement dans les alliages d'aluminium.....	6
--	---

7-1-Mécanisme de durcissement dans les alliages d'aluminium :	7
---	---

II-Alliages d'aluminium	13
--------------------------------------	----

1-Désignation des alliages d'aluminium :	13
--	----

1-1 Les alliages de corroyage.	13
-------------------------------------	----

1-2 Les alliages de moulage.....	14
1-3 Désignation des alliages corroyés.....	14
1-3-1 Désignation numérique (norme européenne EN485-2).....	14
1-3-2 Désignation symbolique (norme européenne).....	15
1-3-3 Désignation des états métallurgiques des produits corroyés.....	16
1-4. Désignation des alliages de moulage.....	16
1-4-1. Désignation symbolique (Norme européenne).....	17
1-4-2 Désignation numérique (Norme européenne)	17
1-4-3 Renseignements complémentaires	18
1-4-4 Anciennes normes de désignation	19
1-5 Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages :	20
1-5-1.Transport aéronautique :	20
1-5-2.Transport automobile :	20
1-5-3.Transport maritime :	20
1-5-4.Transport ferroviaire :	21
1-5-5. Bâtiments et travaux publics :	21
1-5-6. Emballage :	21
1-5-7.Industrie mécanique et ingénierie :	21
1-5-8.Transport d'énergie :	22
1-5-9.Sports et loisirs :	22
Référence bibliographique chapitre I	23

chapitre II : La corrosion de l'aluminium et ses alliages

Introduction :.....	25
1- Définition de la corrosion :.....	25
2- Impact économique de la corrosion :	25
3- Processus de corrosion	26
4- Classification de la corrosion	27
4-1- La corrosion chimique :.....	27
4-2- La corrosion bactérienne :.....	27
4-3- La corrosion électrochimique.....	27
5- Les formes de corrosion des alliages d'aluminium :.....	28
5-1 la corrosion généralisée (uniforme) :.....	28
5-2- La corrosion localisé :	28
5-2-1 La corrosion par piqûres :.....	29
5-2-2 La corrosion galvanique :.....	31
5-2-3- Corrosion caverneuse :.....	33
5-2-4- Corrosion érosion.....	34
5-2-5 La corrosion filiforme :	35
5-2-6- La corrosion inter granulaire :.....	35
5-2-6- La corrosion sous contrainte :.....	37
5-2-7- Corrosion feuilletante (exfoliante) :.....	37
6- Facteurs de la corrosion :	38
6-1- Le milieu :	38
6-2- Le métal :.....	39
6-3- Facteurs liés aux conditions d'emploi :.....	40

7-	Rôle de film d'oxyde :	40
8-	Comportement de l'aluminium en solution aqueuse :	40
8-1-	Formation de cation d'aluminium :	41
8-2-	Réduction d'ions hydrogène (H^+) :	41
8-3-	Réduction de l'oxygène O_2 :	41
9-	Potentiel de corrosion libre (OCP):	41
10-	Courbe de polarisation :	42
10-1-	La résistance de polarisation :	42
10-2-	Le potentiel de corrosion :	42
10-3-	La densité du courant de corrosion :	42
11-	Protection de l'aluminium et ses alliages :	43
	Référence Bibliographique Chapitre II	44

Chapitre III : Les procédures et techniques expérimentales

1-	Introduction	46
2-	Organigramme :	46
3-	Alliage étudié :	47
4-	Méthode d'élaboration :	47
5-	Essais de dureté :	49
5-1	Principe de l'essai de BRINELL.....	50
5-2	Calcul de la dureté BRINELL.....	50
6-	Mesure de MICRODURETE VICKERS	51
7-	Enrobage des échantillons :	52
7-1	méthodes d'enrobage :	52
8-	Préparation pour micrographie :	53

8-1	préparation des échantillons	53
8-2	Attaque chimique :.....	54
8-3	Examen aumicroscope optique :.....	54
9-	Mesure du potentiel de corrosion libre: (Chronopotentiométrie) :	55
10-	Tracé des courbes de polarisation :	56
11-	Chronopotentiometrie sous une tension imposée de 1.5 volt:.....	58

Chapitre IV : Résultats et interpretations

1-	Microstructure avant corrosion des alliges AlSi10Mg et AlSi10MgZn :.....	59
2-	Evolution du potentiel de corrosion libre des alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn :	61
3 -	Morphologie de corrosion après cinq jours d’immersion :.....	64
4-	Courbes de polarisation des deux alliages :.....	64
5-	Effet de la tension imposée de 1.5V sur le courant et le potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn :	70
6.	Résultats de Dureté Brinell :.....	71
7.	Résultats de la microdureté HV :.....	72
Conclusion générale.....		73

Introduction générale

Il y a cent cinquante ans, on ne connaissait pas l'aluminium en métal. Aujourd'hui, le monde utilise trente mille millions de tonnes d'aluminium par an dans plusieurs domaines (alimentaires, automobiles, aérospatiales, bâtiment, médecine...etc.)

Ce métal est le plus employé après le fer. Utilisé surtout pour sa légèreté, sa bonne conductibilité électrique ou/et thermique, sa résistance à la corrosion. Combiné avec d'autres éléments, il offre des propriétés mécaniques intéressantes et compétitives à celles des alliages ferreux.

Les alliages d'aluminium destinés à la fonderie sont différents de ceux destinés au corroyage. La famille prédominante des alliages de fonderie est la famille aluminium silicium, ceci en raison des excellentes propriétés de fonderie que confère le silicium aux alliages d'aluminium.

La fonderie d'aluminium silicium a connu un développement remarquable dans l'industrie automobile, où son emploi a augmenté durant les trois dernières décennies, en raison de la recherche d'allègement et d'économie de carburant.

Notre travail s'intéresse, en premier lieu, à une élaboration d'un alliage d'aluminium contenant plus de zinc à partir de l'alliage AS10Mg par addition du zinc, en second lieu, à l'effet du zinc sur la morphologie et la cinétique de la corrosion de l'alliage élaboré en comparissant à l'alliage de base dans une solution de 3% NaCl.

Plusieurs expériences ont été réalisées, l'élaboration de l'alliage AlSi10MgZn, l'observation de la microstructure de l'alliage élaboré ainsi que l'alliage de base, la mesure du potentiel libre de corrosion, le tracé des courbes de polarisation, chronopotentiometrie sous tension imposé de 1.5V, la mesure de dureté Brinell et la mesure de microdureté Vickers.

Le mémoire présenté est constitué de quatre chapitres :

- Chapitre I : l'aluminium et ses alliages ;
- Chapitre II : Corrosion de l'aluminium et ses alliages ;
- Chapitre III : Procédures et techniques expérimentales ;
- Chapitre IV : Résultats et interprétations ; et d'une conclusion.

Chapitre I

Aluminium et ses

alliages

Introduction :

L'aluminium est l'élément chimique de numéros atomique 13 et de symbole Al. Ce dernier a été apparu pour la première fois lors d'une présentation de l'académie des sciences par le chimiste français sainte -claire Deville en 1854 sous forme de lingot. Ce lingot avait été obtenu par voie chimique.

En 1886 Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA) ont mis en place une invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium.

Suite à cette invention, le développement métallurgique s'est accéléré ce qui propulse l'utilisation de l'aluminium. A cet effet, l'aluminium devient en un siècle le deuxième métal le plus utilisé après l'acier.

I-L'aluminium :**1- Fabrication de l'aluminium**

L'aluminium est l'un des métaux les plus réponsus sur terre, se classant troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium.

L'aluminium est exclusivement extrait des bauxites car se sont des roches très riches en aluminium, d'ailleurs on retrouve 45% a 60% d'aluminium dans cette dernière. [1] [2]

2- Extraction de la Bauxite

Découverte en 1812 par Pierre Berthier, La **bauxite** est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium. [1] [2]

3- Extraction de l'alumine

L'extraction de l'alumine est un procédé chimique qui permet d'extraire l'oxyde d'aluminium appelé alumine contenu dans la bauxite. L'alumine est la principale matière première qui permettra la fabrication de l'aluminium métal par un procédé d'électrolyse. [1] [2]

4- Obtention de l'aluminium

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone.

L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). L'aluminium de la première fusion contient le fer

approximativement $\sim 0.05\%$ en poids à 655°C . D'ailleurs peu de produits sont élaborés à partir de l'aluminium de la première fusion, une grande quantité d'alliages de recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits, ceci augmente la teneur en fer des alliages d'aluminium. Les phases riches de fer représentent un site favorable pour les réactions cathodiques et de formation des piqûres. Le fer est plus noble que l'aluminium, sa présence dans une solution solide d'aluminium affecte la cinétique de la dissolution constituant un facteur significatif de la corrosion dans les alliages d'aluminium. Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite.[3]

5- Propriété de l'aluminium

5-1-Structure de l'aluminium

La structure cristalline de l'aluminium est cubique à face centrées (CFC).

Le CFC correspond donc à la maille présentée en (figure1) qui nous montre la structure en perspective.

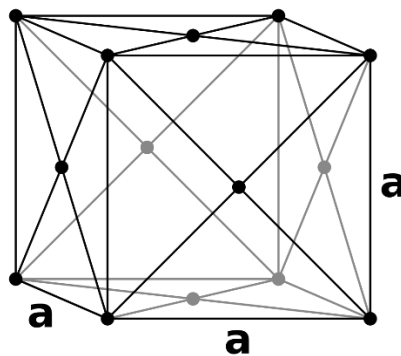


Figure I. 1 : La structure de l'aluminium en perspective.

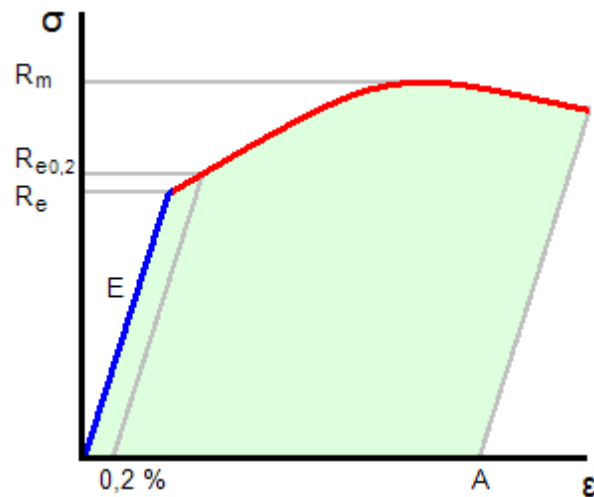
5-2- Propriétés mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium sont classées dans le tableau suivant :

Tableau I : 1 Caractéristiques mécaniques de l'aluminium.

Allongement a la rupture	%	20 a 30
Module d'élasticité (YOUNG) E	GPa	67.5
Coefficient de poisson	Sans dim	0.34
Capacite calorique volumique	MJ/M ³ K	2.39
Limite élastique a la traction	MPa	30
Module de torsion	Gpa	27
Limite de résistance à la rupture	MPa	60 a 125

La courbe de traction ci dessous nous montre les différentes caractéristiques mécaniques de l'aluminium :

**Figure I. 2 Courbe de traction de l'aluminium**

R_e : Limite d'élasticité: c'est la contrainte qui marque la fin du domaine élastique et le début du domaine plastique.

R_m : contrainte à la quelle est soumise le matériau au maximum de la charge c'est à dire avant que n'apparaisse la striction.

Re 0.2 : la résistance du matériau à un pourcentage spécifique de déformation (exp : 0.2%)

Ar (A%) : allongement après rupture: c'est la mesure exprimée en pourcentage de l'allongement plastique total obtenue. $Ar = A\% = (l - l_0) / l_0 \times 100$ [4].

➔ **Autres propriétés de l'aluminium :**

- Métal blanc de bel aspect décoratif
- Masse volumique faible 2.73 kg/dm³
- Température de fusion faible 658°C
- Bonne résistance à la corrosion, vis-à-vis des agents atmosphériques : formation d'une couche d'oxyde protectrice, L'ALUMINE
- Conductibilité thermique élevée : échange thermique
- Conductibilité électrique élevée : conducteur électrique
- toxique : industrie alimentaire
- Grande résistance au froid : sa résistance mécanique augmente jusqu'à -250°C

6-Traitement thermiques :

Dans l'industrie mécanique, on cherche souvent à améliorer ou modifier les caractéristiques mécaniques des matériaux et cela en ayant recours à des traitements thermiques qui se présentent comme suit :

6-1 TREMPE

La trempe d'un aluminium est totalement différente à une trempe martensitique des aciers au carbone et ce via le cycle suivant :

-Chauffage jusqu'à la température de la mise en solution des phases présentes en excès dans l'Aluminium.

-Maintien à cette même température.

-Refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante.

Suite à la trempe, on peut appliquer : un maintien isotherme (vieillissement naturel) ou à une température supérieure (vieillissement artificiel).

La trempe a pour objectif de figer la distribution des éléments d'addition ou des impuretés en solution, obtenus à la température de mise en solution, jusqu'à la température ambiante.

6-2 vieillissement :

Le procédé (trempe) est toujours suivie d'un vieillissement qui désigne un maintien d'une durée nécessaire à une température allant de la température ambiante jusqu'à 350°C.

vieillissement naturel : (maturation) et ce avec maintien à une température ambiante .par ailleurs on a la méthode de **vieillissement artificiel** avec un maintien a une température supérieure à la température ambiante.

6-3 recuit :

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé.

6-3-1 recuit d'homogénéisation

Pour un cycle thermique comportant un chauffage à température élevée (450°C a 520°C) ,on a un maintien de 4 heures a 40 heures et plus, puis un refroidissement lent ou dans le four dans lequel il a été traité.

La température de chauffage dépend des éléments d'alliage d'aluminium.

6-3-2 : Recuit de recristallisation :

Dans ce procédé on chauffe le métal travaillé jusqu'à une température égale à 0.4 Tf, et cela a pour but d'obtenir de nouveaux grains, la taille de ces derniers dépendent du temps de maintien pendant ce recuit

6-3-3 recuit d'adoucissement

Souvent appliqué sur des pièces trempées, afin d'abaisser la dureté leur usinage et leur mise en forme par déformation. Les températures varient selon l'alliage entre 350°C et 450°C et un temps de maintien de 1 heure à 2 heures.

7 -Durcissement dans les alliages d'aluminium

Le durcissement des alliages est optimal quand il y a des zones GP I et GP II c.-à-d. des précipités cohérents et ultramincés. Lorsque l'on parle de durcissement, on fait référence à l'accroissement de la limite élastique qui malheureusement est souvent accompagnée d'une perte de ductilité. Il est obtenu par l'ajout d'éléments qui modifient plus ou moins sa microstructure soit en entrant en solution solide de substitution, soit en formant des précipités

hors solutions solide, soit en permettant le durcissement structural. Les propriétés mécaniques d'un matériau sont liées à sa microstructure et précisément au mouvement facile ou difficile des dislocations. En effet, pour améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau, il faut créer des obstacles au mouvement des dislocations, c'est le type d'obstacle qui va définir le mécanisme de durcissement, dont on peut citer quelques-uns, Durcissement par addition des éléments d'alliages, Durcissement par déformation plastique (écrouissage), Durcissement par précipitation (durcissement structural). [5]

7-1-Mécanisme de durcissement dans les alliages d'aluminium :

Le durcissement par la solution solide que provoque la solution figée, immédiatement après la trempe, augmente avec la concentration de l'élément en solution. Néanmoins, avec les 4% de Cu dans l'Al, cet effet reste faible, et dans la suite ne sert pratiquement à rien car il disparaît avec la précipitation du Cu. Mais les petites particules qui se forment provoquent un autre mécanisme de durcissement.

- **Contournement des précipités**

Lorsque les particules sont plus dures que la matrice (solution solide résiduelle ou Al presque pur), les dislocations ne peuvent pas pénétrer les précipités. Elles sont obligées de les contourner (mécanisme d'Orowan fig. I.4).

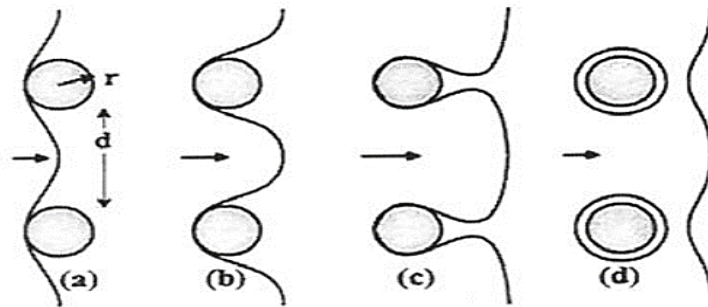


Figure I. 3 : interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement)

- **Cisaillement des précipités**

Les zones GP naissant au début de la précipitation sont encore très petites et leur cohérence avec le réseau de la matrice permet un glissement sans déviation, sur un seul plan cristallographique. Elles cèdent au cisaillement (fig. I.4) mais, leur résistance augmente avec leur taille et la progression de la transformation en particules tetragonales (θ'') et semi-cohérentes (θ'). Le durcissement s'accroît jusqu'à ce que le contournement devienne compétitif

et $\tau_c = \tau_p$. C'est dans cet état que le durcissement est optimal. En effet, le revenu prolongé provoque une coalescence des zones GP et θ' , et l'apparition d'autres phases avec des grains plus grossiers. Bien que cela fasse augmenter leur résistance, l'agrandissement de la séparation d facilite le contournement et adoucit le métal (survieillissement)[6].

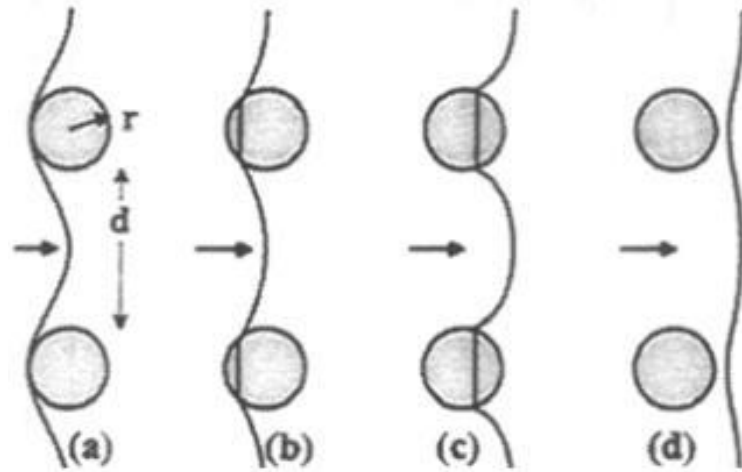


Figure I. 4 : Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisillable

7-1-1-Durcissement par écrouissage :

L'écrouissage est un durcissement du matériau suite à une déformation à froid, lors de celui-ci de nombreux défauts sont introduits en particulier une forte densité de dislocations, l'énergie interne du matériau écroui est supérieure à celle du matériau non écroui et l'écrouissage induit une nouvelle orientation préférentielle du matériau et une nouvelle texture [7].

Ce durcissement est celui qui provient de l'accumulation de dislocations pendant la déformation ou la transformation de phases [8].

7-1-2-Durcissement par précipitation :[5]

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique. On obtient le durcissement par précipitation (structural) grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés, c'est-à-dire grâce à des traitements thermiques dont le but final est l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice. Les propriétés mécaniques des alliages ainsi traités dépendent de la répartition des précipités et de leur taille. Les dislocations qui doivent franchir les précipités permettent la déformation macroscopique du matériau. Le type de franchissement est fonction de l'interface entre le précipité et la matrice :[5]

Dans le cas de précipités cohérents ou semi cohérents, ce qui est souvent le cas pour des précipités de petite taille, ils peuvent être cisailés. Le durcissement est obtenu à la fois par des effets élastiques et des effets chimiques.

Dans le cas de précipités incohérents ou de grande taille, il est plus favorable pour les dislocations de contourner les précipités. C'est le mécanisme d'Orowan. Le durcissement est ici fonction de la distance inter-précipitée. Il existe une transition entre les deux régimes qui correspond au pic de dureté obtenu pendant un recuit isotherme.

Le mécanisme de durcissement de l'alliage par précipitation entraîne la formation d'amas cohérents d'atomes de soluté, c'est-à-dire que les atomes de soluté rassemblés dans un amas doivent toujours avoir la même structure cristalline que la phase du solvant. Ceci crée alors beaucoup de distorsions, car les paramètres cristallins des précipités peuvent être légèrement différents de ceux de la matrice du métal. Conséquemment, la présence de ces particules de précipités procure une plus grande résistance en obstruant et en retardant le mouvement des dislocations.

7-1-2-1 Les types de précipités:

Il existe trois types de précipités. Ces types forment d'après la relation cristallographique des précipités avec la phase mère.

7-1-2-2 Précipités cohérents :

Ces précipités forment une interface cohérente avec la phase mère, c'est-à-dire que le plan d'atome constituant l'interface, indépendamment de la nature chimique de ces précipités, est commun avec les deux phases. Une condition nécessaire pour la cohérence est que deux cristaux possèdent des plans cristallographiques dans lesquels la configuration et l'espacement des atomes soient identique ou presque identiques (figure I.5.a).

7-1-2-3 Précipités semi cohérents :

Ce type de précipité constitue une interface entre les précipités et la matrice. Il constitue une région de cohérence totale, séparée par des réseaux de dislocation (figure I.5.b)[9].

7-1-2-4 Précipités incohérents :

Ces précipités forment une interface avec la matrice à travers laquelle il n'existe aucune continuité de réseau cristallin. La structure et la composition changent brusquement d'une phase à l'autre adjacente (figure I.5.c).

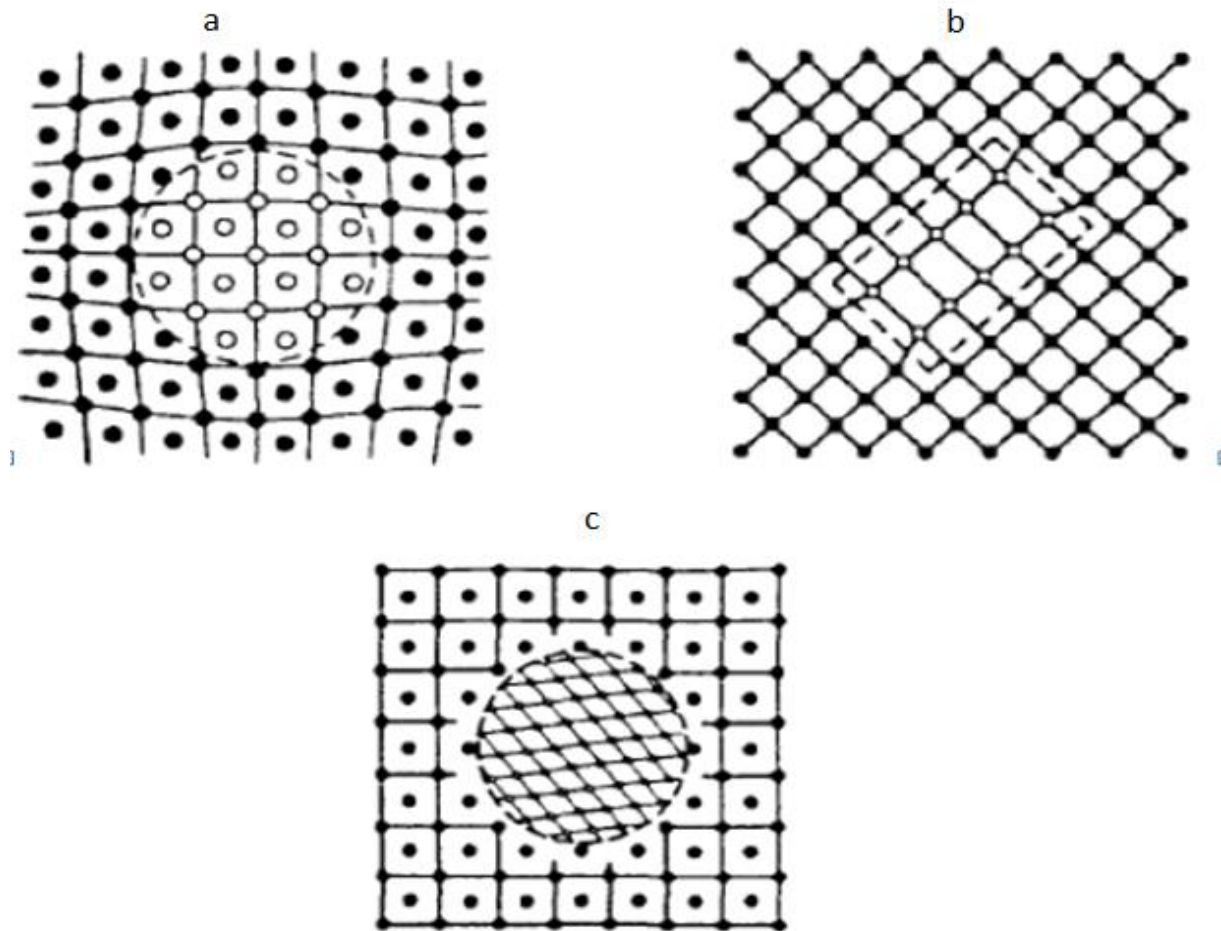


Figure I. 5 : Représentation schématique de trois types de précipitation. a : précipité cohérent b : précipité semi cohérent c : précipité incohérent.

➤ **Aspects métallurgiques.**

Pour obtenir le durcissement structural les trois phases ci-après sont nécessaires

- **Première phase: mise en solution**

Elle consiste en un maintien à une température suffisamment élevée afin de dissoudre, c'est dire mettre en solution solide, les éléments d'addition présents dans l'alliage en phases dispersées.

- **Deuxième phase: trempe**

Après sa mise en solution, l'alliage doit être refroidi suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide : c'est le traitement de trempe. Aussitôt après trempe, l'alliage est dit dans un état de « trempe fraîche », il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité.

- **Troisième phase: maturation – revenu**

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel. Le durcissement est stabilisé au bout d'un certain temps dépendant de la composition de l'alliage: en général quelques jours pour les alliages série 2000, d'une à quelques semaines pour les alliages série 6000, quelques mois pour les alliages série 7000.

Pendant les premières heures de la maturation, l'alliage peut être considéré dans l'état de trempe fraîche et présente alors une plasticité suffisante pour supporter des mises en forme importantes. Pour beaucoup d'alliages, le durcissement peut être augmenté par un traitement à une température supérieure à l'ambiante : c'est le traitement de revenu ou vieillissement artificiel qui confère une microstructure différente de celle de la maturation et conduit à des caractéristiques supérieures, en particulier pour la limite d'élasticité.

Tableau I. 2 Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium (Al)

ALLIAGE			État	Mise en solution (°C)	Trempe	Maturation	Revenu
Classe	Série	Nom					
CORROYÉS	2000	2011 2014	T6 – T8 T6	510 ± 5 505 ± 5	Eau ≤ 40 °C Eau ≤ 40 °C	≥ 4 jours ≥ 4 jours ≥ 4 jours	14 h/160 °C 20 h/160 °C ou 10 h/175 °C
		2017A 2024	T4 T3 – T4	500 ± 5 495 ± 5	Eau ≤ 40 °C Eau ≤ 40 °C		20 h/200 °C 8 h/175 °C ou 6 h/185 °C 8 h/175 °C ou 6 h/185 °C
		2030 2618A	T3 – T4 T6	490 ± 5 530 ± 5	Eau ≤ 40 °C Eau ≤ 80 °C		
		6005A	T6	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C		
		6060	T5 – T6	535 ± 5	Eau ou air soufflé		
		6061	T6	535 ± 5	Eau ± 40 °C		
	6000	6082	T6	535 ± 5	Eau ± 40 °C		8 h/175 °C ou 6 h/185 °C 16 h/165 °C ou 8 h/175 °C
		6106	T5 – T6	530 ± 5	Eau ou brouillard		8 h/175 °C ou 6 h/185 °C
		7020	T6	450 ± 10	Eau ou air soufflé		5 h/100 °C + 25 h/140 °C
		7049A	T6 T73	465 ± 5 465 ± 5	Eau ≤ 40 °C Eau ≤ 40 °C		12 h/135 °C 24 h/120 °C + 12 h/165 °C
		7075	T6 T73	465 ± 5 465 ± 5	Eau ≤ 50 °C Eau ≤ 40 °C		12 h/135 °C 7 h/108 °C + 10 h/175 °C

7-1-3 Durcissement par addition

Les atomes étrangers, ou éléments d'addition peuvent être en solution solide de Substitution et prennent la place d'un atome d'aluminium dans le réseau. Comme cet atome étranger est plus petit (cas de l'atome du cuivre) ou plus gros (magnésium) que l'atome d'aluminium, il perturbe le réseau qui devient ainsi plus difficile à déformer. Si l'élément étranger n'est pas en solution solide, il forme aussi des perturbations dans le réseau comme les précipités qui ont le même effet de difficulté de déformation. Cette dernière est plus importante en cas de précipités incohérents. Cependant il faut noter que la teneur en élément d'addition est le plus souvent limitée par d'autres considérations que la résistance mécanique : difficultés de transformations (alliage plus de 5% de magnésium), mauvaise résistance à la corrosion (alliage en teneur élevées de Zinc –Cuivre) [10].

II-Alliages d'aluminium :

La capacité de l'aluminium a s'associer avec un grand nombre d'éléments et qui donne naissance a d'autres alliages différents pour satisfaire un grand nombre d'applications.

1-Désignation des alliages d'aluminium :

On distingue les deux grandes familles d'alliages d'aluminium suivantes [11] (Tableau .I.3) :

Les alliages corroyés, produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou/et à froid tels que filage, le laminage.

Les alliages de moulage, obtenus directement par fonderie.

Tableau I : 3 Familles d'alliages d'aluminium

<i>Elément d'alliages</i>	<i>Famille des moulés</i>	<i>Famille des corroyés</i>
Aucun	10000	1000
Cu	20000	2000
Mn	/	3000
Si	40000	4000
Mg	50000	5000
Mg+Si	/	6000
Zn	70000	7000

1-1 Les alliages de corroyage.

Obtenus par (corroyage = déformation à chaud), coulés en plaques ou billettes puis transformés à chaud par laminage, filage, forgeage, matriçage...

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

- * Résistance mécanique
- * Ductilité
- * Résistance à la propagation des fissures
- * Résistance à la fatigue (efforts alternés)
- * Résistance aux multiples formes de corrosion

* Conductibilité électrique[12][13].

1-2 Les alliages de moulage.

Obtenus par coulés dans des moules d'où sortent des produits (presque) finis. Ils ne subissent donc pas de déformation importante mais doivent présenter, selon les applications, certaines des autres propriétés ci-dessus, et aussi d'autres qualités telles que coulabilité, retrait faible à la solidification, aucune formation de criques... une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé refondu [13][14].

1-3 Désignation des alliages corroyés

• Composition

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dont la premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium[11] (Tableau I.4).

Tableau I : 4 Famille d'alliages d'aluminium corroyés.

Élément d'alliage	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium + silicium	6000
Zinc (et cuivre)	7000

1-3-1. Désignation numérique (Norme européenne EN 485-2)

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
- un tiret -

- quatre chiffres représentant la composition chimique :
- **1er chiffre** : indique le groupe d'alliage selon le tableau ci-dessous :
- **2ème chiffre** : pour le groupe 1 : les limites de certaines impuretés, pour les autres groupes, les modifications successives de l'alliage
- **3ème et 4ème chiffres** : indiquent pour le groupe 1 le pourcentage d'aluminium au-delà de 99% et pour les autres groupes, l'identification de l'alliage [15].

Tableau I : 5 groupes de l'alliage d'aluminium

Groupe	Aluminium ou alliages
1	Aluminium non allié
2	Aluminium – cuivre
3	Aluminium – manganèse
4	Aluminium – Silicium
5	Aluminium – Magnésium
6	Aluminium – Magnésium – Silicium
7	Aluminium – Zinc
8	Autres alliages d'aluminium

1-3-2 Désignation symbolique (Norme européenne) :

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. [15]

Exemples : EN AW-1199 [Al 99,99] ou EN AW-1070A [Al 99,7].

Pour les alliages d'aluminium corroyés alliés, la désignation est constituée du symbole Al suivi d'un espace et du symbole des éléments d'addition respectivement suivi de leur teneur par ordre décroissant.

Exemples : EN AW-6061 [Al Mg1SiCu] ou EN AW-2014 [Al Cu4siMg].

1-3-3 Désignation des états métallurgiques des produits corroyés

Cette désignation est ajoutée aux précédentes, elle comporte un groupe de lettres et de chiffres et indique la séquence de traitements utilisés pour obtenir les différents états [15] (Tableau .I.6).

Tableau I :6 Désignation des états métallurgiques des produits corroyés.

Etat de base	Lettres	Chiffres	Autres
Etat brut de fabrication	F	-	-
Etat recuit	O	-	-
Etat Ecroui	H	1 - 2 - 3	dureté 1-9 (3 ^o chiffre pour variances de trait)
Etat traité thermiquement	T	1 – 12	1 ou 2 chiffres pour variétés de traitement
Mis en solution (trempé)	W	-	-

La désignation de ces alliages est faite suivant des règles très précises que nous rappelons ci-après.

1-4. Désignation des alliages de moulage

- Compositions

La désignation alphanumérique, autre fois en usage en France, a été remplacée par une désignation numérique, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres, suivant la norme Afnor NF EN 1780-1. On trouvera au (tableau I : 7) la correspondance entre le premier chiffre et l'élément d'alliage [11].

Pour faciliter la compréhension du texte concernant les alliages de moulage, nous avons indiqué les deux désignations : l'ancienne alphanumérique et la nouvelle, numérique, en vigueur depuis 1998.

Tableau I : 7 Famille d'alliages d'aluminium moulé.

Élément d'alliage	famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
silicium	40000
magnésium	50000
Zinc et cuivre	70000

1-4-1. Désignation symbolique (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret -
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci.

Exemple : EN AC- AlCu4MgTi : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane.

1-4-2 Désignation numérique (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret -

- cinq chiffres représentant la composition chimique :
- 2 premiers indiquent le groupe d'alliage
- 3 derniers indiquent la composition chimique.

Exemple : EN AC-21000 : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane.

1-4-3 Renseignements complémentaires

A la suite des désignations données ci-dessus, il est possible d'indiquer le mode d'obtention et le traitement donné à l'alliage. Une lettre désigne le procédé de moulage, et un groupe de lettre, le traitement (Tableau .I.8).

Tableau I : 8 Tableau indiquant les renseignements complémentaires.

Procédé de moulage	Lettre	Type de traitement	Lettre
Moulage en sable	S	Brut de fonderie	F
		Recuit	O
		Refroidissement contrôle après solidification et vieillissement naturel	T1
Moulage en coquille	K	Mise en solution et vieillissement naturel (maturation)	T4
		Refroidissement contrôle après solidification et vieillissement artificiel ou sur-revenu (stabilisation)	T5
Moulage sous pression	D	Mise en solution et vieillissement artificiel (maturation) maximum	T6
Moulage de précision	L	Mise en solution et sous vieillissement artificiel (sous revenu) T64	T64
		Mise en solution et sur vieillissement artificiel (sur revenu stabilisation)	T7

1-4-4 Anciennes normes de désignation

Les alliages d'aluminium de fonderie sont encore souvent désignés par leurs anciennes normes.

- **Composition**

La désignation est alphanumérique

- * **Cas des aluminiums non alliés :**

"A" suivie d'un indice de pureté chimique représenté par un chiffre dont la valeur augmente avec la pureté

Exemple: A4 = aluminium de pureté ³ 99,0%

A5 = aluminium de pureté ³ 99,5%

- * **Cas des alliages:**

"A" suivie du symbole des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes

- * **Etat de livraison :**

La lettre Y qui signifie alliage moulé est suivie de deux chiffres[11]:

- le premier chiffre indique le mode de moulage

2: moulage en sable

3: moulage en coquille

4: moulage sous pression

8: moulage par centrifugation

9: moulage suivant prescriptions

- le deuxième chiffre indique le traitement thermique

0: pas de traitement

1: recuit

3: mis en solution, trempé revenu

4: mis en solution, trempé et mûri

5: stabilisé

9: suivant prescription

Exemple:A-U5GT-Y24

Alliage de moulage contenant 5% de cuivre, du magnésium et du titane, moulé en sable, mis en solution, trempé et mûri.

1-5 Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages :

Porté par la croissance régulière et soutenue de la consommation mondiale depuis les années 50, l'aluminium occupe aujourd'hui la première place de la métallurgie des métaux non ferreux, en s'intégrant de manière toujours plus innovante dans les applications de secteurs d'activité aussi variés que le transport, l'emballage, le bâtiment...etc. [16]

1-5-1.Transport aéronautique :

L'exigence absolue d'allègement des structures, encore renforcée par les réglementations environnementales, font plus que jamais de l'aluminium et ses alliages le matériau numéro 1 du ciel moderne. En 35 ans, la conception de nouveaux alliages et de procédés de transformation et d'assemblage toujours plus innovants a permis de diviser par deux le poids de la structure d'un avion. Leur pourcentage dans les structures des avions actuellement livrés aux compagnies aériennes avoisine 70% et ils sont indispensables à tous les grands programmes aéronautiques mondiaux.

1-5-2.Transport automobile :

Châssis, carrosserie, bloc-moteur, radiateur, jantes... Poussé par les exigences des consommateurs et les réglementations toujours plus précises, le secteur automobile fait très largement appel à l'aluminium. Une voiture européenne contient aujourd'hui en moyenne 100kg d'aluminium, bénéficiant ainsi des multiples propriétés des matériaux : légèreté (un gain de poids de 100 kg diminue de 0,6 litre/100 km la consommation de carburant et de 20% les émissions de gaz à effet de serre), résistance (amélioration de la tenue de route, absorption de l'énergie cinétique, réduction de la distance de freinage) et recyclage (95% de l'aluminium contenu dans les automobiles est collecté et recyclé; sa valeur représente plus de 50% de la valeur totale du véhicule en fin de vie)

1-5-3. Transport maritime :

Le transport maritime développe son usage de l'aluminium en capitalisant sur deux qualités principales: l'allègement et la résistance à la corrosion. Les alliages avancés ont permis de concevoir les navires à grande vitesse, en allégeant les coques de 40 à 50 % par rapport à l'acier. La résistance à la corrosion, même en milieu marin, permet d'accroître la durabilité des coques, mâts et superstructures des bateaux de plaisance, des ponts et superstructures des paquebots et navires de commerce.

1-5-4. Transport ferroviaire :

L'allègement des structures, la résistance et la durabilité placent l'aluminium au cœur d'applications liées au transport ferroviaire. Le TGV, comme de nombreux métros et tramways en service dans le monde, sont construits en tôle et profilés en alliage d'aluminium.

1-5-5. Bâtiments et travaux publics :

Couramment utilisé sous forme de profilés, de produits plats ou moulés pour les cadres de fenêtres et autres structures vitrées, la couverture ou encore les cloisons, l'aluminium est un partenaire privilégié de l'architecture moderne. Il permet de réaliser des formes complexes dans une gamme étendue de coloris, résiste au temps et ne nécessite que très peu d'entretien.

Ces atouts en font un matériau particulièrement apprécié des architectes et des constructeurs qui l'utilisent aussi bien dans les édifices publics (hôpitaux, universités, immeubles de bureaux), que dans les bâtiments industriels ou dans les maisons individuelles.

1-5-6. Emballage :

L'emballage moderne est l'un des premiers consommateurs d'aluminium. Sa légèreté permet d'économiser à la fois le matériau et l'énergie nécessaire pour le produire ; sa résistance à la corrosion et son rôle de barrière imperméable assurent le niveau de protection et de sécurité essentiels au conditionnement des produits alimentaires et pharmaceutiques ; enfin, sa totale recyclabilité permet sa récupération dans le circuit économique. Exploité de longue date sous forme de « feuille mince » pour les emballages flexibles, l'aluminium accroît aujourd'hui sa présence dans les emballages rigides et semi-rigides, en particulier les aérosols, les boîtes boisson - plus de 25 milliards de boîtes en aluminium utilisées dans la Grande Europe - mais aussi les boîtes de conserve, les capsules de bouchage et couvercles, etc.

1-5-7.Industrie mécanique et ingénierie :

Les multiples caractéristiques de l'aluminium et de ses alliages assurent également la croissance de son usage dans les applications mécaniques. Les fabricants de machines aux éléments en déplacement, comme les robots, multiplient les pièces en alliage d'aluminium pour réduire les inerties. En matière d'échange thermique (liquide/liquide ou liquide/gaz), la conductivité thermique de l'aluminium est essentielle dans l'électronique, le dessalement de l'eau de mer, les échangeurs de climatisation ou la plasturgie, un domaine où l'emploi de moules en alliages d'aluminium à hautes caractéristiques mécaniques permet de gagner jusqu'à 30 % de temps sur le cycle de fabrication.

1-5-8.Transport d'énergie :

La faible densité de l'aluminium, combinée à son excellente conductivité électrique, en font un matériau aujourd'hui essentiel dans le transport d'énergie électrique. Universellement, et aujourd'hui presque exclusivement, utilisé pour les câbles aériens, l'aluminium est également présent dans les conducteurs, le blindage des câbles téléphoniques et la protection contre les champs électriques ou magnétiques.

1-5-9.Sports et loisirs :

Léger et adaptable, l'aluminium occupe désormais une place privilégiée dans de multiples objets de l'environnement quotidien, depuis l'électronique grand public (appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs, revêtement des CD laser, etc.) jusqu'aux équipements de sport (ailes volantes, bâtons de ski, clubs de golf, VTT...) et de loisir (caravanes, matériel de camping, de plongée et d'alpinisme). [17]

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE CHAPITRE 1

- [1] : Altnepoh /D, un regard à l'intérieur de l'aluminium, une introduction à la métallurgie et à la transformation de l'aluminium-ALUMINIUM VERLAG-Paris 1976.
- [2] : Métallurgie générale, J.Bernard, J.Philibert, J.Tablot, éd Masson, (1969,1984 pour la 2ème éd), 607p, ISBN 978-2-225-82347-3.
- [3] : KHIREECHE Soraya .Elaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution à 3% en poids de NaCl .
- [4] : K Guler l'aluminium et ses alliages fabrication emplois
- [5] :(*Ines HAMDI*, Thèse Doctorat « Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000) », Option : Chimie Industrielle, *année 2014*) :
- [6] :(*W. Hufnagel*, Ed. Aluminium Zentrale Düsseldorf, Aluminium Verlag Düsseldorf, (1983))
- [7] :(*G. MrówkaNowotnikJ. Sieniawski, M. Wierzbińska* Archives of Materials Science and Engineering, (2007), 69-76).
- [8] (*C. Chaussin, G. Hilly*, Dunod Paris (1978)).
- [9] :(*R. W. Cahn, P.Haasen*, Physical Metallurgy, Tome III, North Hollond, (1996), pp 2167-2172).
- [10] :(*Mostafa SAHI*, mémoire de fin d'études, « étude des possibilités d'amélioration des caractéristiques mécaniques de l'alliage 6063 a base d'aluminium par traitements thermiques », département science et génie des matériaux, domaine : sciences et techniques, filière : métallurgie, spécialité : science et génie des matériaux).
- [11]: *Michelle Colombié*, matériaux métallique, Fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343-376).
- [12]: *J.E. Hatch*, Aluminium Properties and Physical Metallurgy, Ohio: Metals Park, 319p,1984.
- [13]: *J.P Baillon, J.M.Dorlot*. Des Matériaux, troisième édition, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 480p, 2000.

[14]: W.S.Miller, L.Zhuang, J.Bottima, A.J.Witterbrood, P De Smet, A.Haszler,A.Vierregge,Recentdeveloppement in aluminium alloys for the automotive industry. Materials science and engéniring , A280, Vol280, pp. 37-49, 2000.

[15]: Lycée Raymond LOEWY

[16] Nassima KACHI, «Etude du comportement a la corrosion de l'aluminium des aérosols dans une solution de 0.3% de NaCl», mémoire de master 2014, Université de TIZI OUZOU, Faculté de génie de la construction.

[17] : <http://www.constellium.com/technology-center-fr/applications>

Chapitre II

***La corrosion de
l'aluminium et ses
alliages***

Introduction :

La corrosion est un phénomène connu depuis la découverte des métaux. Les premiers essais de corrosion connus sur l'aluminium ont commencés vers 1890, à partir du moment où ce métal fut disponible en quantité suffisante pour envisager des applications dans le bâtiment et dans les ustensiles de cuisine. C'est ainsi que les premiers essais de tenues à l'eau de pluie, au contact de plusieurs liquides alimentaires : bière, café, thé, furent entrepris dès le début de la décennie 1890 [20].

La corrosion des métaux et de leurs alliages témoigne de leur tendance à revenir à leur état originel de minerais (oxydes, sulfures, carbonates,...etc) sous l'action des agents atmosphériques.

1- Définition de la corrosion :

La corrosion signifie l'action de ronger ou attaquer, la corrosion est aussi le résultat qu'exerce un réactif liquide ou gazeux sur un métal ou un alliage. Sa forme la plus connue est la rouille du fer exposé à l'air humide. Elle présente une grande importance étant donné les conséquences qu'elle a dans des domaines très variés de l'activité humaine [1].

La corrosion c'est tous les processus auquel un métal ou un alliage utilisé comme matériau de construction subit, sous l'action de l'ambiance ou il est placé, une transformation qui le fait passer de l'état métallique initial à un état composé chimique [2].

Techniquement nous parlons seulement de corrosion lorsqu'il y a changement dans les propriétés du métal ou du système qui peut conduire à un résultat indésirable. Cela peut aller tout simplement d'une déficience visuelle à la rupture complète d'un système, engendrant des pertes économiques importantes voire même un danger pour les personnes [3].

Avec le matériau couramment utilisé dans l'ingénierie, tels que l'acier inoxydable, l'acier au carbone, le zinc, le cuivre, et l'aluminium, le processus typique de la corrosion peut être considéré comme la réaction inverse à un gain de métal favorisé par la thermodynamique [3].

2- Impact économique de la corrosion :

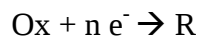
Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants :

- Pertes directes : remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés,
- Pertes indirectes : couts des réparations et pertes de production (temps et argent),
- Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

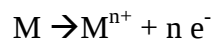
La diversité des couts rend toute estimation des charges économique dues à la corrosion difficile à prévoir et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés [4].

3- Processus de corrosion

Les phénomènes de corrosion sont importants lorsque le métal est placé au contact d'une solution aqueuse. Cette corrosion est dans la plupart des cas de nature électrochimique: elle se manifeste lorsque le métal de l'électrolyte sont en présence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes [5].

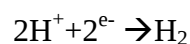


La corrosion ne peut avoir lieu que si les électrons cédés, par l'oxydation du métal, sont captés par un autre couple oxydo-réducteur correspondant, a la réaction de réduction du moteur de corrosion. Les principaux moteurs de corrosion humide, sont l'eau, les protons de l'hydrogène (milieu désaéré) et l'oxygène dissous (milieu aéré). Ainsi, dans ces différents milieux, les réactions ayant lieu [5].

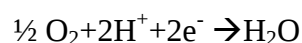


Réaction de réduction de l'agent oxydant, moteur de corrosion: [6]

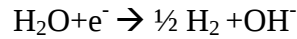
-En milieu acide-désaère:



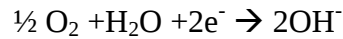
-En milieu acide-aéré:



-En milieu neutre ou basique-désaéré:



-En milieu neutre ou basique-aéré:



4- Classification de la corrosion

La classification de la corrosion peut se faire en trois grandes classes, selon la nature du milieu environnant avec lequel le matériau rentre en interaction, à savoir : corrosion chimique, corrosion bactérienne, et électrochimique [4].

4-1- La corrosion chimique :

La réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. si celle-ci se produit a haute température elle est alors appelée (corrosion sèche) ou corrosion a haute température [4].

Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action , c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [4].

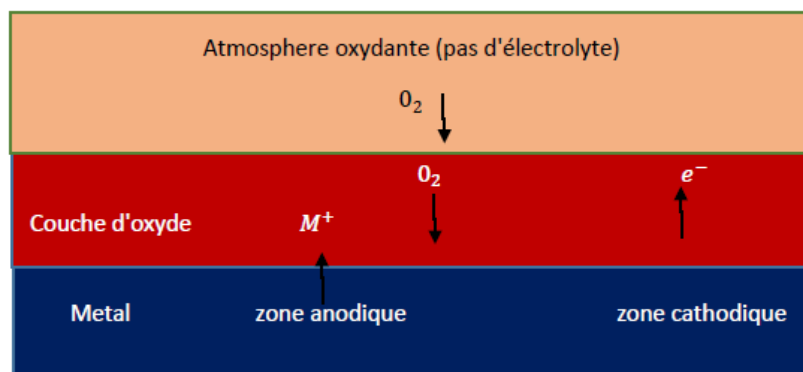


Figure II 1 CORROSION CHIMIQUE

4-2- La corrosion bactérienne :

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les

conditions favorables à son établissement (ex : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries) [4].

4-3- La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes [4].

La corrosion électrochimique fait appel à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc..), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydoréduction, dont:

-La réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction (anodique);

-La réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction (cathodique);

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociable [4].

5- Les formes de corrosion des alliages d'aluminium :

On distingue deux grande formes de corrosion à savoir : (corrosion généralisée, corrosion localisé).

5-1 la corrosion généralisée (uniforme) :

La forme la plus classique de corrosion, mais pas toujours la plus importante en termes économiques ou sécuritaires.

Elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques individuels qui se produisent uniformément sur toute la surface considérée : toute la surface est simultanément cathode et anode. Elle se traduit en diminution d'épaisseur si les produits de corrosion sont solubles, ou par un dépôt uniforme s'ils ne le sont pas [7].

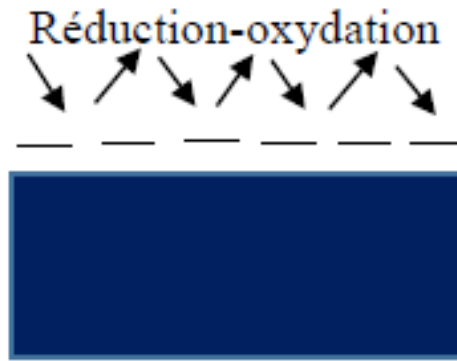


Figure II 2 Corrosion généralisé

5-2- La corrosion localisé :

La corrosion localisée se distingue par diverses formes qu'on peut classer en trois groupes selon des hétérogénéités intervenant au niveau :

- Du milieu : un effet de couplage galvanique se produit lorsqu'il y a une variation locale de composition du milieu ;
- Des conditions physico-chimiques à l'interface : corrosion par crevasse ;
- Du matériau : corrosion galvanique, corrosion inter granulaire et corrosion par piqûres.

5-2-1 La corrosion par piqûres :

L'aluminium et ses alliages sont sensibles à la corrosion par piqûres dans les milieux dont le pH est proche de la neutralité (milieux naturels tels que l'eau de mer).

Cette forme de corrosion se développe suivant une phase d'amorçage pendant laquelle les ions Cl^- sont adsorbés dans le film d'oxyde entraînant sa rupture aux points faibles. A l'endroit des ruptures du film, il y a oxydation rapide de l'aluminium et formation d'un complexe chloruré intermédiaire AlCl_4^- . Une partie des piqûres initiées va se propager grâce à deux réactions électrochimiques d'oxydation et de réduction. La formation d'ions OH^- . Ou la consommation d'ions H^+ va modifier le pH vers un pH alcalin. En fond de piqûre, la dissolution de l'aluminium sous forme d'ions Al^{3+} crée un champ électrique qui déplace des ions Cl^- vers le fond de la piqûre. Ces ions neutralisent chimiquement la solution et forment des chlorures d'aluminium. L'hydrolyse des chlorures d'aluminium provoque une acidification du fond de piqûre à $\text{pH} < 3$ causant l'auto-propagation de la piqûre. En diffusant

vers l'ouverture de la piqûre, les ions Al^{3+} vont rencontrer un milieu de plus en plus alcalin et vont précipiter sous forme d'hydroxyde $\text{Al}(\text{OH})_3$. Les microbulles d'hydrogène produites par la réaction de réduction des ions H^+ poussent l'hydroxyde vers l'ouverture de la piqûre où il se dépose.

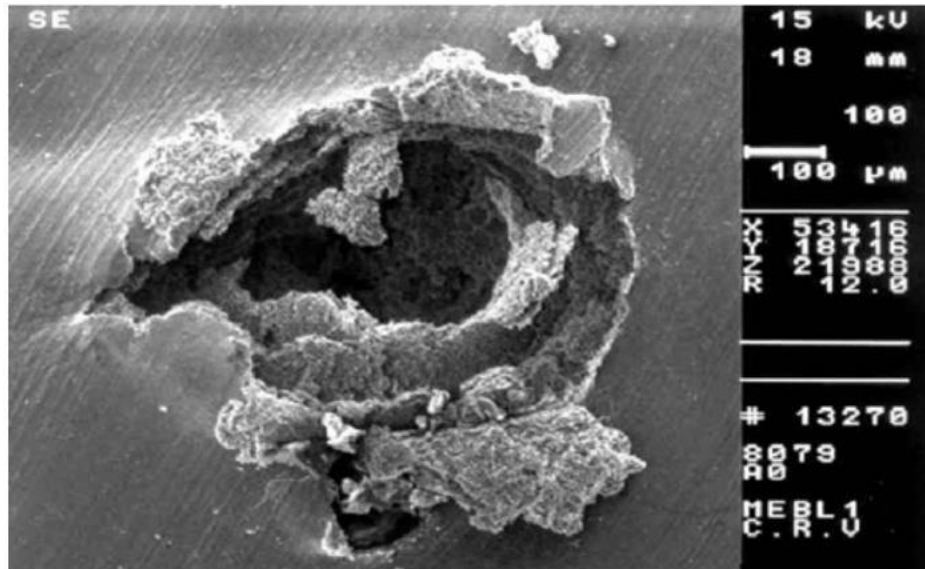


Figure II 3 .Corrosion localisée dans un alliage d'aluminium

Les étapes de la corrosion par piqûre sont comme suit (voir figure II.4)

Etape 1 : Adsorption des ions chlorures au niveau des défauts du film d'oxyde puis migration dans le film.

Etape 2 : Réduction du dioxygène dissous et charge de la capacité de double couche électronique.

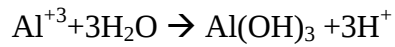
Etape 3 : Rupture du film aux niveaux de défauts.

Etape 4 : Oxydation de l'aluminium et formation de complexes chlorurés (AlCl_4) et hydroxyde chlorurés ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$).

Etape 5 : Dissolution des complexes chlorurés et repassivation de la piqûre.

Etape 6 : Enrichissement en chlorure en fond de piqûre et formation d'une couche stable de Chlorures, oxychlorures.

Etape 7 : Hydrolyse des chlorures d'aluminium et acidification du fond de la piqûre jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 3. La réaction peut être simplifiée ainsi :



Etape 8 : Diffusion des ions Al^{3+} depuis le fond de la piqûre vers l'ouverture et précipitation en $\text{Al}(\text{OH})_3$ au contact du milieu plus alcalin (sur les parois latérales sièges de la réaction cathodique et donc d'une certaine alcalinisation).

Etape 9 : Entretien de la piqûre par dissolution de l'aluminium dans la solution acide de chlorure d'aluminium, et production d'hydrogène, limitant l'accumulation des chlorures et repoussant les produits de corrosion vers l'ouverture de la piqûre.

Etape 10 : Repassivation de la piqûre par obstruction ou perte de stabilité de la couche de chlorure (retour à l'étape 5).

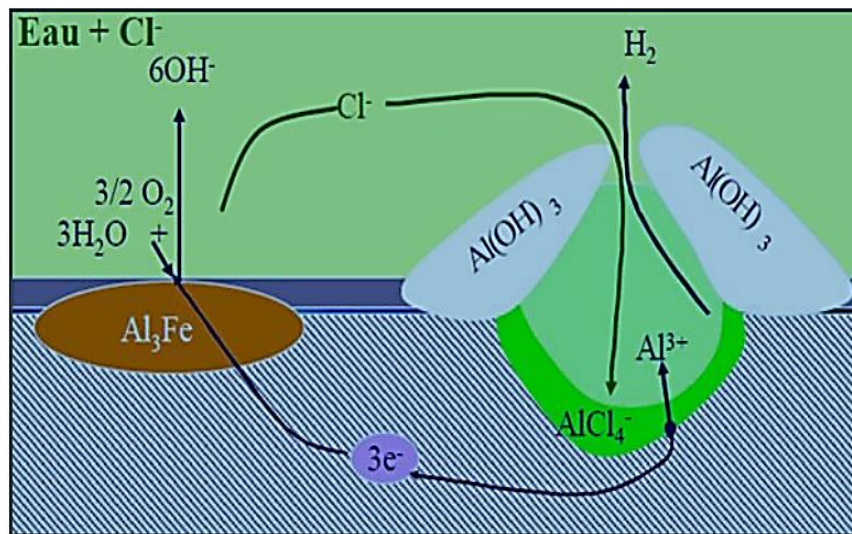


Figure II 4 propagation autocatalytique d'une piqûre

L'accumulation des produits de corrosion en surface peut obstruer l'ouverture de la piqûre et ainsi ralentir ou arrêter le processus. La corrosion par piqûres peut être caractérisée par trois paramètres principaux à savoir la densité de piqûres par unité de surface, la vitesse de propagation, et la probabilité de piqûres.

5-2-2 La corrosion galvanique :

Lorsque deux métaux différents sont en contact électrique dans un milieu corrosif, ils forment une pile qui produit du courant en consommant le métal le plus électronégatif qui constitue l'anode.

L'aluminium est anodique par rapport à la plupart des métaux (à l'exception du zinc et du magnésium). L'aluminium sera donc souvent la victime des assemblages mixtes en contact avec de l'eau ou un liquide qui constituera l'électrolyte de la pile. En fait, la vitesse d'attaque de l'aluminium dépend [8]:

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

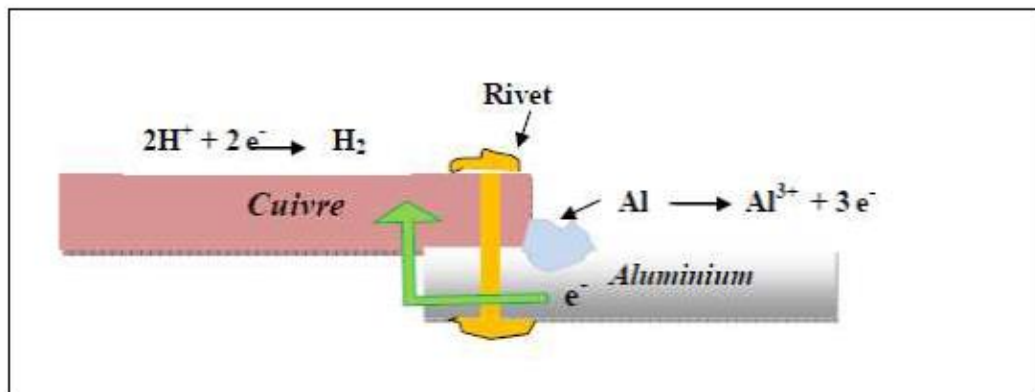


Figure II 5 : corrosion galvanique

- La classification des métaux et quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer sont résumés dans le tableau .II.1 [9].

Tableau II 1 Série galvanique des métaux exposés à l'eau .

Matériau actif (-) ↑ E_{corr} ↓ Matériau passif (+)	Magnésium et ses alliages
	Zinc
	Acier galvanisé
	Alliages d'aluminium, série 5000,3000, 6000
	Aluminium, série 1000
	Cadmium
	Alliage d'aluminium, série 2000
	Acier bas carbone
	Plomb
	Cuivre
	Bronze
	Alliage de cuivre
	Nickel
	Argent
	Titane
	Acier inoxydables
	Graphite
	Or
	Platine

5-2-3- Corrosion caverneuse :

La corrosion caverneuse est une forme de corrosion localisée qui se développe à l'intérieur de crevasses entre deux surfaces, qui peuvent être constituées du même métal (fissures dans le métal, assemblages), de métaux dissemblables, entre un métal et un non-métal. Ce type de corrosion est amorcé par l'entrée limitée de l'oxygène, contenu dans l'air, qui diffuse dans la zone de la crevasse conduisant à différentes concentrations d'oxygène dissous dans l'électrolyte (voir Figure II 6). La pile d'aération différentielle se développe pour une ouverture de crevasse de l'ordre de 50 à 200 μm . Si la crevasse est trop fine, la corrosion par électrolyte ne sera pas présente. Si la crevasse est trop large pour réduire l'entrée d'oxygène, la cellule d'aération différentielle ne peut pas se développer. La largeur critique de la crevasse dépend également des facteurs tels que le type des métaux concernés, l'environnement corrosif et les cycles humides / secs. La nature de l'alliage utilisé est un facteur important pour la cinétique de propagation de ce type de corrosion, car elle est liée à l'établissement

d'une concentration critique d'espèces dans la crevasse. Les différents exemples incluent les joints par recouvrement, les joints d'étanchéité, les rondelles, les rivets, etc.

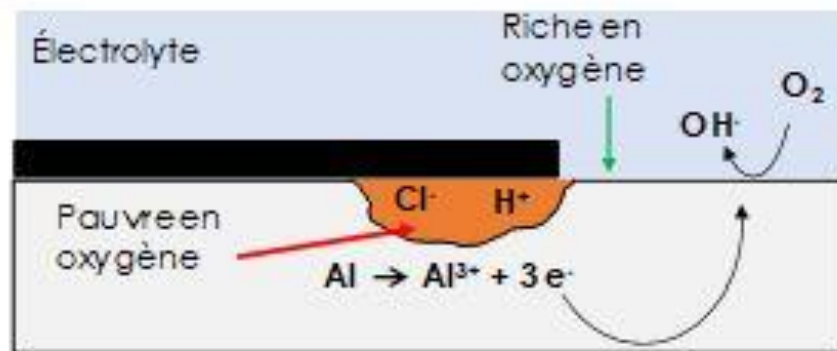


Figure II 6 : Corrosion caverneuse

5-2-4- Corrosion érosion

La corrosion par érosion se produit dans un fluide en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal sous la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientés dans une même direction (la direction du mouvement du fluide) [9].

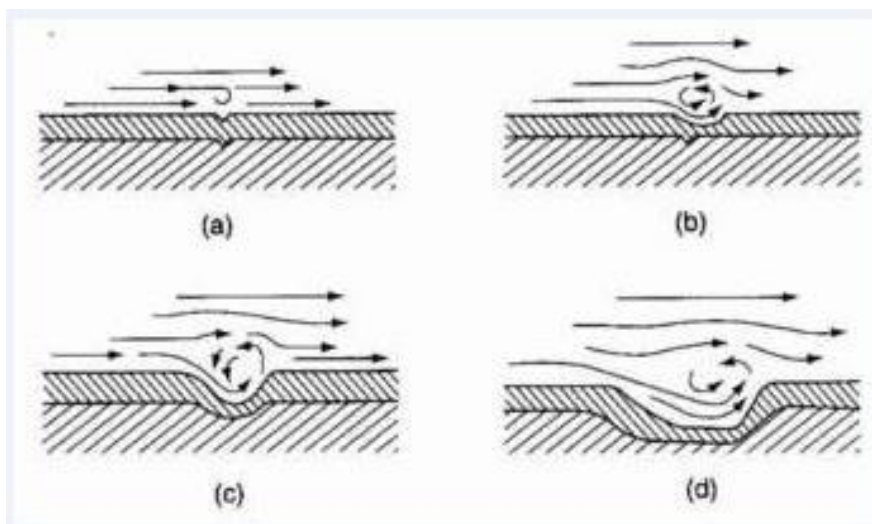


Figure II 7 : corrosion érosion

5-2-5 La corrosion filiforme :

La corrosion filiforme est spécifique aux pièces peintes. Cette corrosion survient lorsque la peinture est abîmée et qu'un liquide corrosif, comme de l'eau de mer, s'infiltre entre l'aluminium et la peinture. Ce type de corrosion est principalement esthétique et l'attaque est superficielle. La corrosion filiforme se propage de quelques millimètres en filament sous la peinture. Lorsque la corrosion survient, l'oxydation prend de l'expansion et décolle la peinture. La corrosion filiforme apparaît sur les alliages d'aluminium à haute résistance mécanique comme les séries 3000, 5000 et 6000. Pour éviter cette corrosion, il est important de bien préparer et de bien nettoyer les surfaces avant d'y appliquer la peinture. Il est aussi recommandé d'inspecter afin de s'assurer qu'elle a bien adhéré aux surfaces et aux arêtes vives. [10]

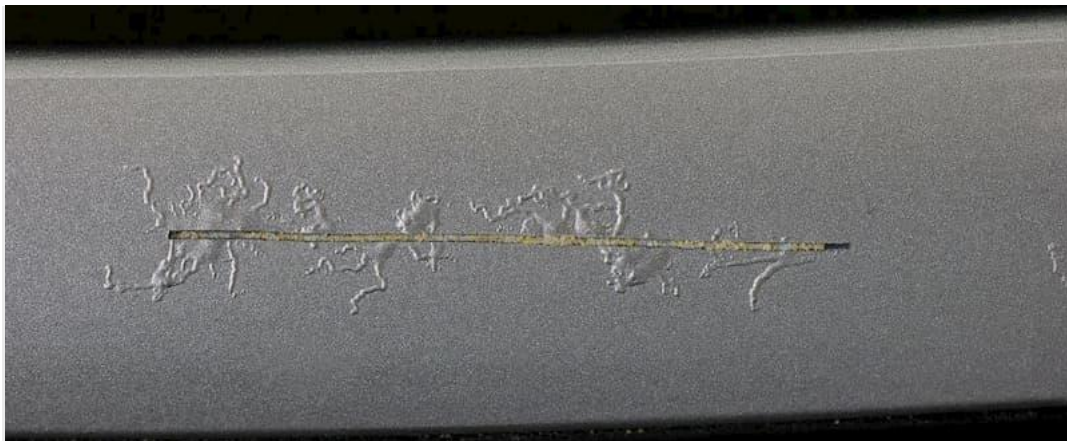


Figure II 8 : corrosion filiforme

5-2-6- La corrosion inter granulaire :

Est une forme de corrosion qui se propage dans le métal en consommant uniquement les zones associées aux joints de grains. Elle peut être liée à la structure atomique et à la composition des joints de grains en l'absence de précipitation (corrosion inter granulaire hors précipitation), ou à la décoration des joints de grains par une précipitation (corrosion inter granulaire liée à la précipitation d'une seconde phase) [11]. La corrosion exfoliante ou feuilletante : est une forme de corrosion inter granulaire se propageant suivant une multitude de plans parallèles à la direction de transformation. Des feuillets de métal inattaqués très minces subsistent entre ces plans et sont repoussés par le gonflement des produits de corrosion et s'écartent de la surface du métal comme les feuilles d'un livre.

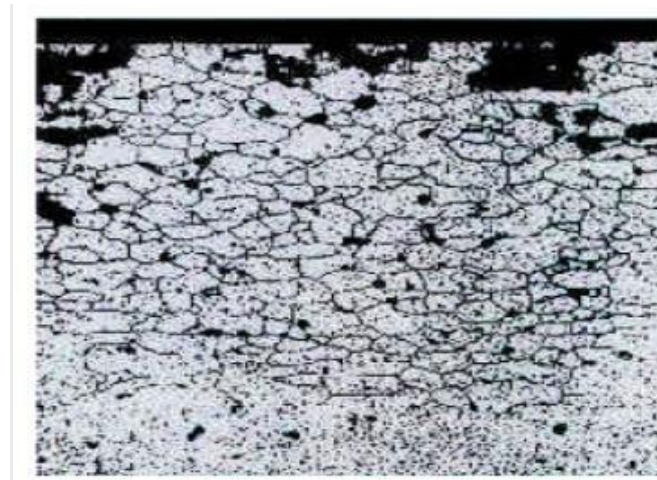


Figure II 9 : *Corrosion inter granulaire de l'alliage 5083*

Pour ce type de corrosion il y a deux cas de figures :

1)-Cas des alliages sensibles, avec des précipités continus aux joints de grains (voir Figure. II.10).

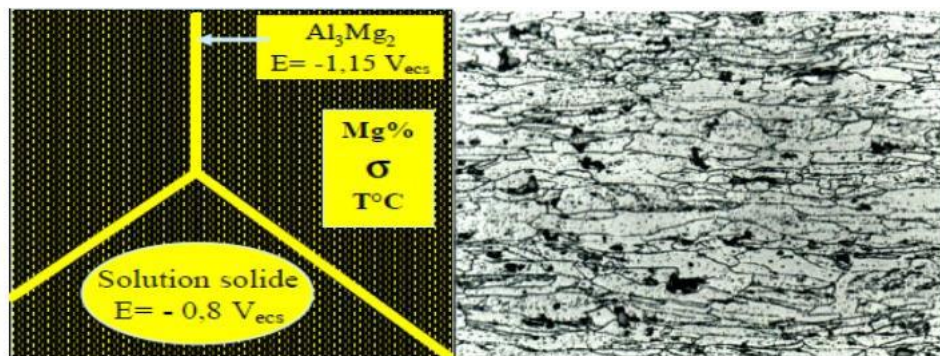


Figure II 10 : *Corrosion inter granulaire des alliages aluminium-Magnésium sensibles*

2)- Cas des alliages non sensibles avec des précipités discontinus aux joints de grains voir Figure.II.11.

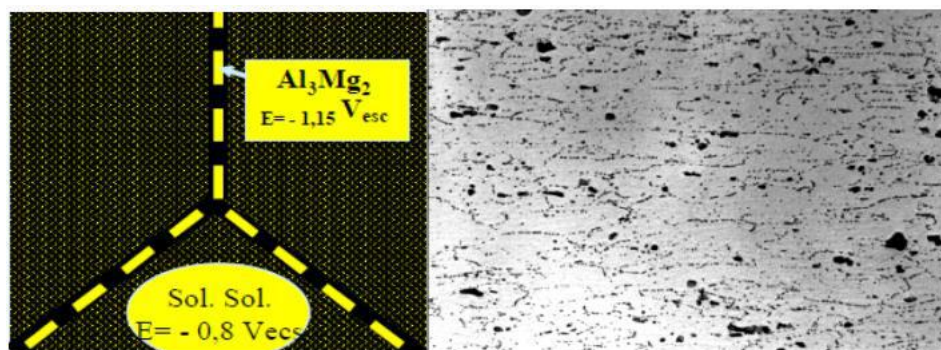


Figure II 11 : *Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium non sensibles*

5-2-6- La corrosion sous contrainte :

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique en tension (Résiduelle ou appliquée) et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter granulaires ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte. Cette dernière peut être d'origine résiduelle (cintrage, écrouissage, laminage froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement...) [12].

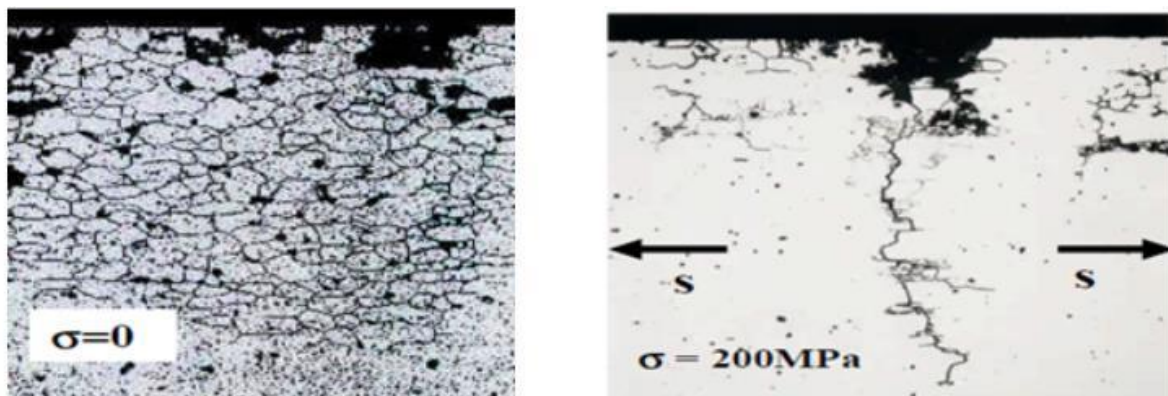


Figure II 12 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage A-Mg

5-2-7- Corrosion feuilletante (exfoliante) :

C'est une forme de corrosion qui se propage dans une multitude de plans parallèles à la surface de la pièce. Ces plans sont séparés par des feuillets de métal non attaqués qui sont repoussés de la surface du métal, par le gonflement des produits de corrosion des zones attaquées [13].

La corrosion feuilletante (ou exfoliante) comme la corrosion intergranulaire est une conséquence de <<l'histoire>> thermomécanique des pièces. Seuls les alliages à haute caractéristiques mécaniques sont concernés : ces phénomènes sont liés à la structure métallurgique particulière des alliages laminés. Cette forme de corrosion qui affecte seulement quelques alliages (ceux de la série 2000, 5000 et 7000) se développe si les conditions de traitements thermiques ou de soudage sont mal adaptées. Le mécanisme de propagation est généralement assimilé à une corrosion intergranulaire, dirigée

préférentiellement par des contraintes exercées par les produits de corrosion. Dans certain cas, la propagation est de type transgranulaire [14].

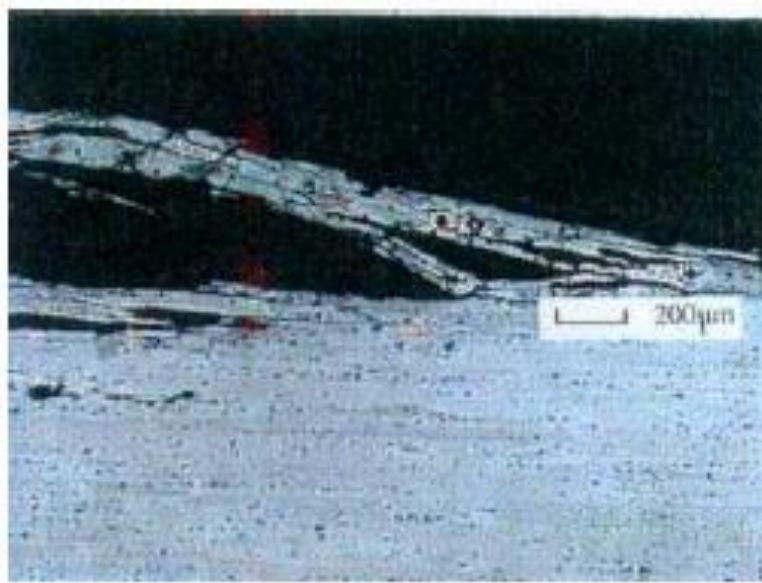


Figure II 13 : *Photomicrographie MEB d'un alliage 2024 T351 développant de la corrosion feuilletante*

6- Facteurs de la corrosion :

6-1- Le milieu :

Le milieu joue un rôle très important sur la tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage. Il contrôle cette tenue par le biais de :

- Sa nature ;
- Sa concentration en éléments nobles ;
- Sa teneur en oxygène ;
- Son pH ;
- Sa température.

6-2- Le métal :

C'est sur la composition des alliages, les gammes de transformation et les traitements thermomecaniques que les métallurgistes et les corrosionnistes essayent de jouer pour obtenir la meilleure résistance à la corrosion possible et parmi ces facteurs on trouve :

- La composition des alliages :

Les études ont été faites pour mesurer l'influence des éléments d'alliages et d'impureté sur la corrosion des alliages d'aluminium. Le métal à très bas titre en fer et en silicium (1199) n'a pas une meilleure tenue à la corrosion atmosphérique que le 1070 ou le 1050. Il faut des titres en fer et en silicium beaucoup plus élevés ($Fe > 0.50$ et $Si > 0.25$), pour que la tenue à la corrosion soit modifiée. [15]

- Le mode d'élaboration et de transformation :

L'expérience montre que les alliages d'aluminium de moulage sans cuivre, ont en général, une meilleure tenue à la corrosion par piqûres que les alliages de corroyage transformés par laminage ou par filage. Cela tiendrait que le film d'oxyde de la peau de fonderie est plus résistant que celui des demi-produits corroyés. On constate souvent que les parties usinées d'une pièce de fonderie sont plus sensibles à la corrosion par piqûres que le reste de la surface non usinée.

- Les traitements thermiques :

Les traitements thermiques thermomécaniques des alliages à durcissement structural et durcissement par écrouissage, mise en solution, trempe, revenu, laminage à froid, laminage à chaud, emboutissage, filage, tréfilage...etc., provoquent des changements dans la nature et dans la répartition des constituants métallurgiques en présence dans ces alliages. Ils ont une incidence très importante sur la sensibilité de ces alliages à certaines formes de corrosion, en particulier la corrosion intercrystalline, et la corrosion sous contrainte.

- L'état de surface :

L'état de surface des pièces joue un rôle très important sur le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion, car la corrosion étant le résultat de l'action qui se développe à la surface du

métal avec un liquide ou un gaz. Le degré de finition, les trous, les rayures servent souvent d'amorce à la corrosion qui se développe facilement.

6-3- Facteurs liés aux conditions d'emploi :

Ils sont souvent décisifs. L'expérience montre que dans beaucoup de cas de corrosion en service, ce n'est pas l'alliage, souvent choisi à bon escient, qui est en cause, mais c'est les facteurs suivants qui sont en cause :

- Les modes d'assemblage ;
- Les contacts avec d'autres métaux et d'autres matériaux ;
- Les contraintes mécaniques externes ;
- Les conditions d'entretien ;
- Les dispositions constructives.

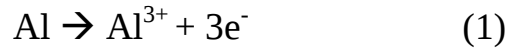
7- Rôle de film d'oxyde :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium est due à la présence permanente sur le métal d'un film d'oxyde naturel constitué d'alumine de formule Al_2O_3 , qui rend ce métal «passif » à l'environnement.

Ce film d'oxyde constitue une barrière entre le métal et le milieu ambiant malgré il a une très faible épaisseur, qui est comprise entre 5 et 10 nanomètres. Il se forme instantanément dès que le métal entre en contact avec un milieu oxydant : l'oxygène de l'air, l'eau. La vitesse de formation de ce film est de l'ordre du millième de seconde et se produit même sous des pressions très faibles d'oxygène, de l'ordre du millibar. Sa stabilité physicochimique a donc une très grande importance pour la résistance à la corrosion de l'aluminium. Elle dépend des caractéristiques du milieu, dont le pH, et aussi de la composition de l'alliage d'aluminium. [16]

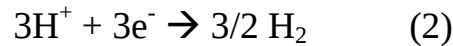
8- Comportement de l'aluminium en solution aqueuse :

L'aluminium en contact avec une solution aqueuse s'oxyde de la manière suivante :

8-1- Formation de cation d'aluminium :

Les électrons libérés vont entrer simultanément au contact avec la solution dont le pH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère...).

Selon les conditions thermodynamiques les deux réactions de réduction possibles sont :

8-2- Réduction d'ions hydrogène (H^+) :**8-3- Réduction de l'oxygène O_2 :**

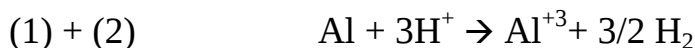
En milieu alcalin ou neutre : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

En milieu acide : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

La corrosion de l'aluminium en milieu aqueux va se traduire par la somme de deux réactions électrochimique définies préalablement :



Ou bien :



La corrosion de l'aluminium se traduit par la formation de l'alumine $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui est insoluble dans l'eau et se précipite sous forme de gel blanc [17].

9- Potentiel de corrosion libre (OCP):

La potentiométrie est une méthode qui consiste à suivre l'évolution du potentiel à l'abandon (ou du potentiel de corrosion libre) en fonction du temps. C'est la tension d'un métal ou d'un alliage métallique mesurée par rapport à une électrode de référence lorsque aucun courant ne s'écoule de ou vers cet échantillon. L'unité de mesure est le (V/électrode de référence).

Les courbes potentiel/temps permettant d'apprécier les modifications de la surface de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans le milieu. Les variations de potentiels de corrosion enregistrées renseignent sur la dégradation, la passivation ou l'immunité d'une surface métallique. Cependant, le déplacement du potentiel de corrosion d'un métal vers des valeurs plus nobles n'est pas toujours corrélé avec une augmentation de résistance à la corrosion. Il est donc indispensable de mesurer parallèlement la valeur de l'intensité de courant de corrosion [18].

10-Courbe de polarisation :

10-1- La résistance de polarisation :

Aucune condition cinétique particulière n'est requise pour déterminer la résistance de polarisation qui est déterminée à partir de la courbe $E=f(i)$ au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de l'échantillon.

La résistance à la polarisation est la pente ($\Delta E/\Delta i$) au voisinage du potentiel de corrosion sur la courbe de polarisation. L'unité de mesure est l'(Ω/cm^2). La résistance de polarisation est l'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 [18].

10-2- Le potentiel de corrosion :

La connaissance de la variation du potentiel de corrosion est insuffisante pour déterminer le sens dans lequel évolue le phénomène de corrosion et il est indispensable de mesurer parallèlement la valeur de l'intensité du courant de corrosion.

10-3- La densité du courant de corrosion :

Elle est déterminée graphiquement à partir de courbe $\log i=f(E)$, elle est exprimée en intensité, l'unité de mesure qui est (A/cm^2). C'est la différence entre la densité du courant cathodique et du courant anodique. La valeur de l'intensité du courant de corrosion i_{corr} peut alors être obtenu en extrapolant la droite de Tafel, cathodique et/ou anodique, jusqu'au potentiel de corrosion E_{corr} . Cette méthode n'est exacte que pour les métaux purs. [18]

11- Protection de l'aluminium et ses alliages :

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

- Anodisation ;
- Revêtements ;
- Prévention par études des formes adaptées des pièces ;
- Prévention par affinage lors du choix du matériau ;
- Protection anodique ;
- Protection cathodique ;
- Application d'inhibiteurs de corrosion.

Pour les alliages d'aluminium, leur comportement à la corrosion ne diffère pas trop de celui du métal pur néanmoins certains éléments accentuent ce phénomène car selon les conditions de traitements, les phases intermétalliques précipitent aux joints de grains causant ainsi une corrosion inter granulaire [19].

Référence Bibliographique Chapitre II :

- [1] : [HTTPS://WWW.UNIVERSALIS.FR/ENCYCLOPEDIE/CORROSION:#I_O](https://www.universalis.fr/encyclopedie/corrosion/#I_O)
- [2] : baus,R./Bremeisen,K. définitions et classifications des processus de corrosion.article,1970
- [3] : Hilti.Performance.Manuel-Corrosion Octobre 2015
- [4] : H.BENSABRA.cours de corrosion et protection des matériaux.université de jijel.2016
- [5] :H.H Uligh,R W Revie <<Corrosion And Corrosion Control>> 3ed,New York : John Wiley & Sons Ltd (1985)
- [6] : A.ZAABAR,mémoire de magister.utilisation de l'extrait de la plante d'ortie (urtica L)comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieu HCl 0.5M et NaCl 3% universite abderehmane mira-bejaia,2010.
- [7] : K.EL.GUERMAI,La corrosion.universite hassani II-ain chok
- [8] : C.Vargel,corrosion de l'aluminium,paris dunod,1999,501p.isbn2-100-04191-6
- [9] : Baboian,R 'NACE corrosion engineer's reference book'',NACE international the corrosion society,houston,2002.
- [10] :Beaulieu, D. (2013) Les caractéristiques de l'aluminium structural (2e Édition) Chicoutimi (Québec) : Les presses de l'aluminium
- [11] : Tahar ABID,Etude et caracterisation de toles en alliages Al-Mg-Si-(Cu),these de doctorat,universite constantine.
- [12] : M.G.Fontana,Moderne theory-principes,in :corrosion engineering,new york :me graw-hill ,PP.445-481,1986.
- [13] : C.Vargel,corrosion de l'aluminium,edition dunod,1999.
- [14] :Kuntz-laguerre,C : contribution al'etude de la comprehension des phenomenes chimiques engendrant la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium et de la contificationde cette corrosion.these de doctorat :univ paris VI ,(1997).
- [15] : C.VARGEL<<corrosion de l'aluminium>> ed dunod,paris1999.(legerté)

[16] :F.MIOMANDE,S.SADKI,P.AUDEBERT.<<electrochimie des concepts aux applications>>.DUNOD,paris 2005.

[17] : Soraya KHIRACH,mémoire de magister <<elaboration et etude de la corrosion des alliages Al-Zn-Sn dans une solusion de 3% en pois de NaCl>>.universite Mouloud MAMMERI TIZI OUZOU.faculete des sciences.departement chimie

[18] : Pr.P.COLON,Dr B.GROSGOGEAT-BALAYRE compus odontologie.

[19] : DIETER landolt ,traité des materieaux.12.corrosion et chimie des surfaces des materieaux.ed,pres polytechniques et universitaires romandes.P332.

[20] : Reboul M., warner T., Mayet H, Baroux B., A ten step mechanism for the pitteig corrosion of alm alloys, corrosion reviews, vol.15, nos 3-4, p.471-496.

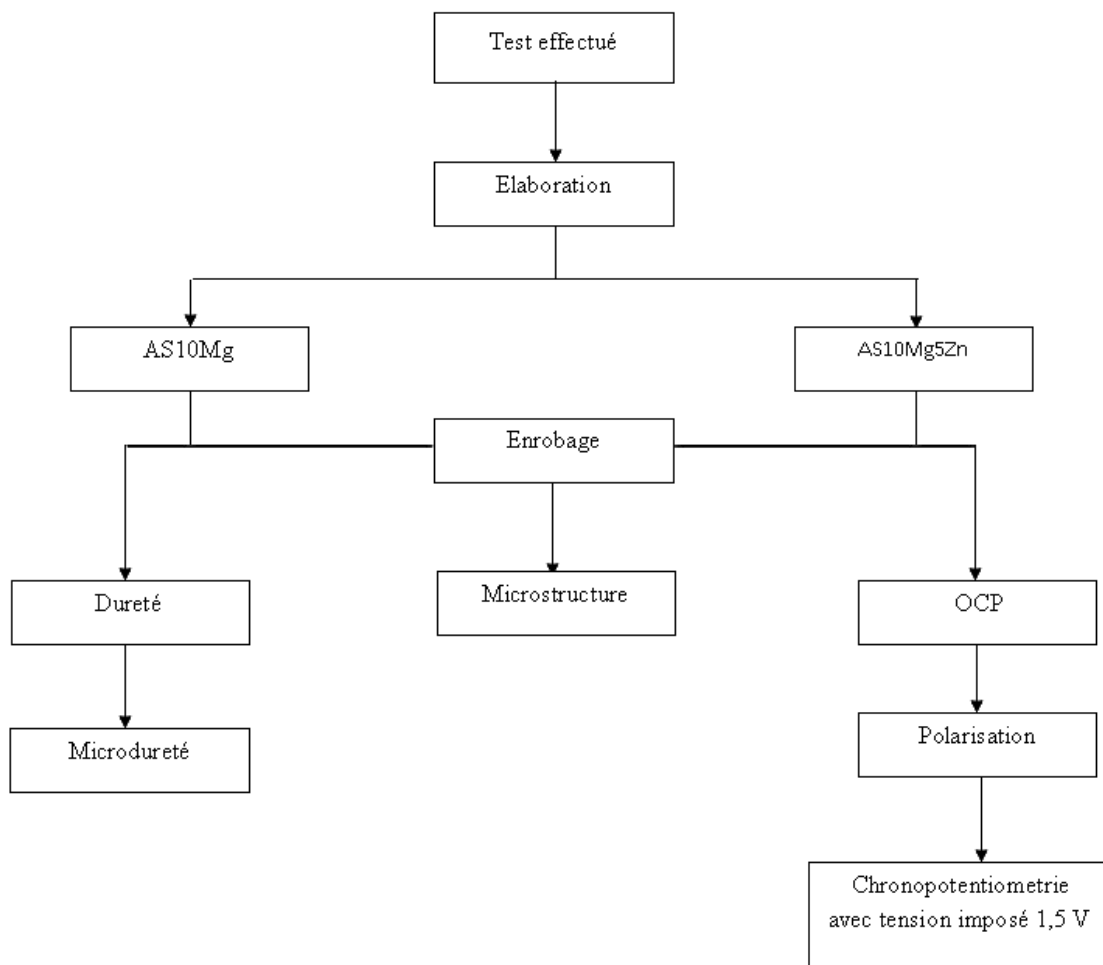
Chapitre III
***Les procédures et
techniques
expérimentales***

1- Introduction :

Dans ce travail nous avons utilisé un alliage d'aluminium silicium magnésium, AlSi10Mg (gracieuseté de la SNVI Algérie), et un alliage obtenus par addition du zinc à l'alliage cités.

Dans ce chapitre nous avons présenté les alliages qui ont fait l'objet de notre projet de fin d'étude, la méthode d'élaboration de l'alliage AlSiMgZn dans le laboratoire, la composition chimique des deux alliages, les techniques de préparations des échantillons pour les différents essais, et on a décrit les techniques d'analyse pour la caractérisation des échantillons telles que le duromètre, microscope optique, le potentiel de corrosion libre, et la polarisation.

2- Organigramme :



3- Alliage étudié :

Nous avons utilisé un alliage d'aluminium sous forme de lingot fourni gracieusement par la SNVI dont les désignations est (AlSi10Mg).

Nous avons effectué un mélange de 5.37 % de zinc et de 94.63% de l'alliage (en masse), que nous avons chauffé jusqu'à 700°C, et puis nous avons effectué une coulée dans un moule métallique.

L'analyse chimique, par spectroscopie de masse des deux alliages, sont donnée dans le tableau (tableau III 1).

La concentration du zinc n'a pas beaucoup augmenté dans l'alliage élaboré malgré l'ajout de 5,37 % du Zinc. Cette situation est due à la précipitation du zinc au fond du creuset utilisé en raison de sa masse molaire élevée.(raison probable).

Tableau III. 1 Composition chimique (AS10Mg/AS10MgZn5)

Eléments	Al %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	autres %
AS10Mg	87,4	11,99	0,48	0,0004	0,007	0,018	0,008	0,002	<0,0010	0,0936
AS10MgZn5	87,6	11,73	0,49	0,001	0,008	0,012	0,007	0,003	0,070	0,083

4- Méthode d'élaboration :

Matériel utilisé durant l'expérience :

Un four électrique à chambre horizontale: utilisé pour la fusion du mélange zinc et AlSi10Mg (Fig 3.1). La température mesurée est égale à la température consignée plus au moins 20°C.

Un creusé : c'est une cuve en graphite qui contient l'alliage AlSi10Mg et le zinc, cette dernière est utilisée pour la fusion du mélange (Fig3.2).

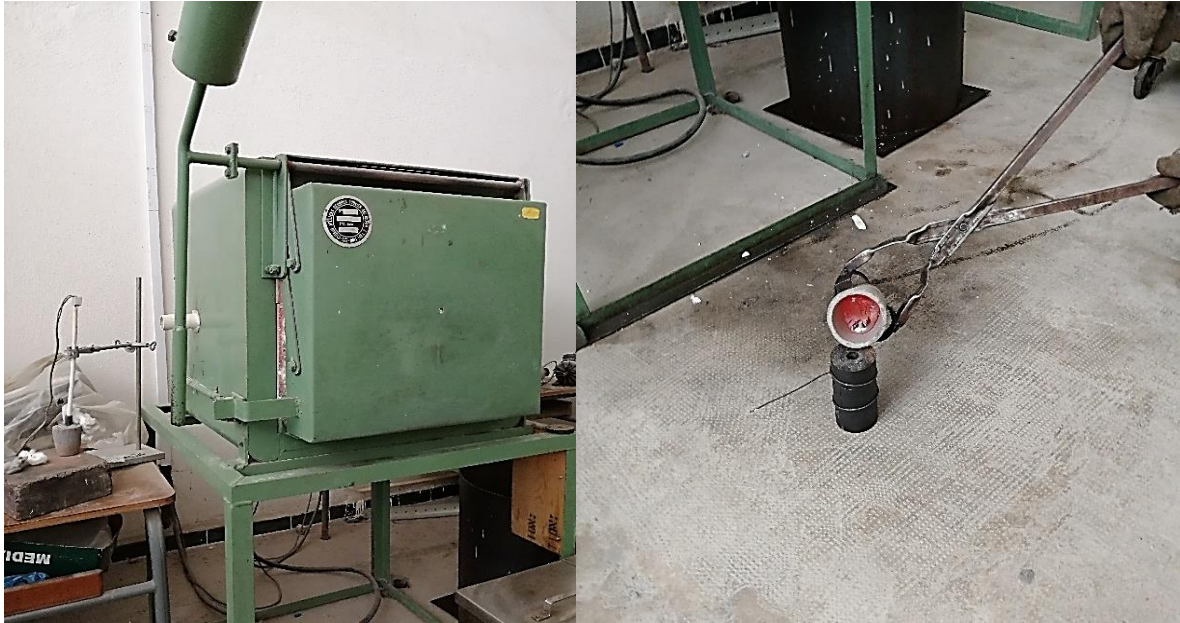


Figure III. 1: Four électrique a chambre horizontale Figure III. 2 : creuset utilisé pour la fusion du mélange

Balance électronique : Une balance électronique, d'une précision de 10 mg, a été utilisée pour la peser de l'alliage AlSi10Mg, le zinc, et le sel utilisé pour la préparation de la solution pour les tests de corrosion.



Figure III. 3 : balance électronique

Protocole : Nous avons découpé 129.17 gr du lingot de (AlSi10Mg), par la suite nous avons rajouté 6.87 gr de zinc.

Après avoir réglé la température consignée à 700°C et la vitesse de chauffage à 100% de la capacité du four. Nous avons mis l'alliage d'aluminium découpé dans le creuset, et nous avons enfourné le creuset dans le four, après 30 min nous avons rajouté à l'alliage d'aluminium enfourné le zinc découpé, et nous avons laissé le mélange dans le four pendant une durée d'une heure. Après une heure d'enfournement le mélange a atteint la température consignée. Par la suite nous avons procédé à la coulée dans un moule métallique Fig(3.2).

5- Essais de dureté :

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre matériau plus dur que lui. Plusieurs types d'essais de dureté normalisés sont couramment utilisés, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme, le matériau du pénétrateur, et la valeur de la charge appliquée. Dans notre étude nous allons utiliser l'essai de BRINELL dans le quelle on utilise une bille en acier trempé, de diamètre 2.5 mm, et une charge de 30 Kg Fig (III 4).



Figure III. 4 : Durometre

5-1- Principe de l'essai de BRINELL :

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

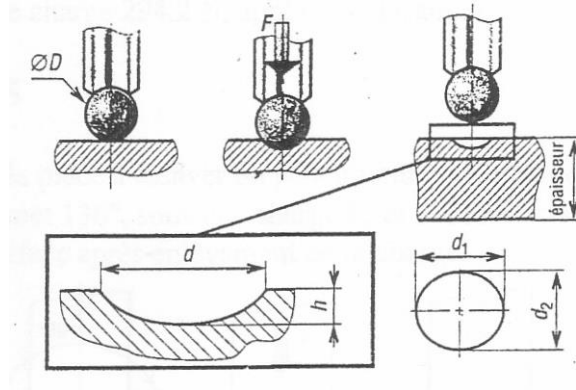


Figure III. 5 : principe de l'essai de dureté brinell

5-2- Calcule de la duretébrinell :

Le rapport entre la charge appliquée et la surface de l'empreinte détermine la valeur de la dureté brinell par la relation suivante **HB=F/S**

(F en Kg et sla surface de l'empreinte en mm²)

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

L'empreinte est projetée au moyen d'un microscope, sur un écran poli ou son diamètre sera mesure directement en vrais grandeur a l'aide d'une règle qui correspond à l'agrandissement du microscope.l'air de cette empreinte dite : (calotte sphérique) est calculée par l'équation suivante : $S = \frac{\pi d}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ (mm²)

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

6- Mesure de MICRODURETE VICKERS

L'essai de la MICRODURETE VICKERS consiste à réaliser une empreinte d'un pénétrateur, en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136° , sous une charge F , sur l'échantillon, et à mesurer les diagonales de l'empreinte laissée par la pyramide après suppression de la charge.

Nous avons utilisé le MICRODUROMETRE DE MARQUE ZWICK, et effectué cinq essais pour chaque échantillon. Nous avons appliqué la même charge de 500g pour tous les tests.

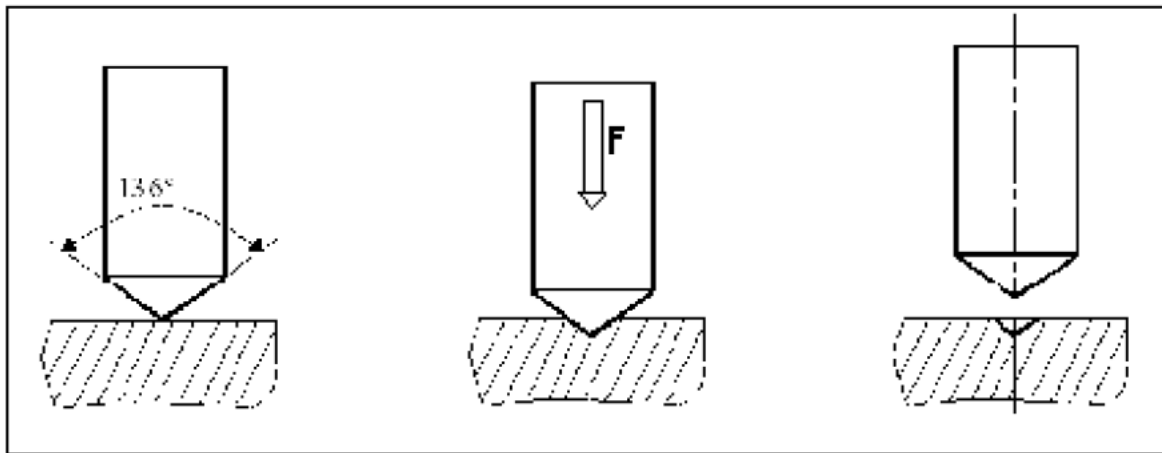


Figure III.6 : Principe de l'essai Vickers.

La dureté Vickers est calculée à partir de la relation: $HV = F / S$

La surface de l'empreinte est donnée par la relation : $S = d^2 / (2 \cdot \sin A/2)$

$$HV = 0,189 F / d^2$$

d : diagonale de l'empreinte en millimètres.

A : angle au sommet du pénétrateur : 136° .

F : charge d'essai en newtons, celle qu'on a appliquée est de 500 g.



Figure III.7 : Microdurometre de marque ZWICK

7- Enrobage des échantillons :

Nous avons effectué un enrobage pour nos échantillons dans le but d'isoler les surfaces pendant le test de corrosion et en laissant seulement une seule surface à traiter.

Pour notre enrobage nous avons choisi une résine qui porte le nom (résine polyester)

- **présentation** : c'est une résine polyester thixotropique particulièrement étanche et principalement utilisée dans la construction de tout matériel destinée à une immersion permanente
- **aspect** : incolore légèrement jaunâtre
- **application** : l'application se fait à une température comprise entre 15°C et 20°C et a mélanger avec 2% de catalyseur P MEC

7-1 méthodes d'enrobage :

Nous relierons nos échantillons à un fil en cuivre pour réaliser le contact entre l'échantillon et la solution corrosive, afin que le courant puisse circuler.

Nous positionnons l'échantillon dans un moule en plastique.

Ensuite, nous versons la résine et le durcisseur, et nous laissons le mélange durcir, et en fin nous procédons au démoulage de nos échantillons Fig(III.8).



Figure III. 8 : enrobage des échantillons pendant et après démoulage

8- Préparation pour micrographie :

8-1 préparation des échantillons

L'observation micrographique nécessite la préparation de la surface à observer, ceci-dit, nous avons effectué un polissage mécanique, qui consiste à enlever mécaniquement des microscopies avec des papiers abrasifs à granulométrie décroissante; 400, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 4000.

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

Nous avons réalisé à finition à l'aide d'un disque feutré monte sur une polisseuse et avec surface lubrifié avec l'oxyde d'alumine.



Figure III.9 : Polisseuse type (STRUERS)

8-2 Attaque chimique :

Pour observer sur un microscope optique tous les constituants de la microstructure, non corrodée, nous avons fait subir une attaque chimique aux échantillons, afin d'éliminer le pouvoir réfléchissant qui permet leur observation.

Il est recommandé pour l'aluminium et ses alliages d'utiliser le réactif de KILLER. Vu l'absence de ce réactif dans notre laboratoire nous avons utilisé l'acide nitrique à d'une concentration égale 65%, et la durée de l'attaque été de 35 secondes.

8-3 Examen au microscope optique :

L'examen métallographique consiste à observer la microstructure d'un métal au microscope métallographique.

La microstructure est obtenue via le microscope optique de type HUND (WETZLAR), ayant un agrandissement maximal de 400 fois, celui-ci est couplé à une caméra permettant la transmission de l'image sur l'écran du micro-ordinateur, et un logiciel d'acquisition et de traitement d'image Piced CORA.

Ce microscope se compose des accessoires suivant :

- 1- Emplacement pour la caméra.
- 2- Lampe pour observation par réflexion.
- 3- Bouton de mise au point de l' image.
- 4- Bouton de déplacement longitudinal de l' échantillon.
- 5- Bouton de déplacement transversal de l' échantillon.
- 6- Potentiomètre de réglage de l' intensité de lumière.
- 7- Oculaires avec agrandissement de 10X.
- 8- Porte objectifs, libre en rotation.

9- Objectifs avec agrandissement 40, 100, 200 et 400X.

10- Porte échantillon.

11- Platine.

12- Lampe pour utilisation en transmission

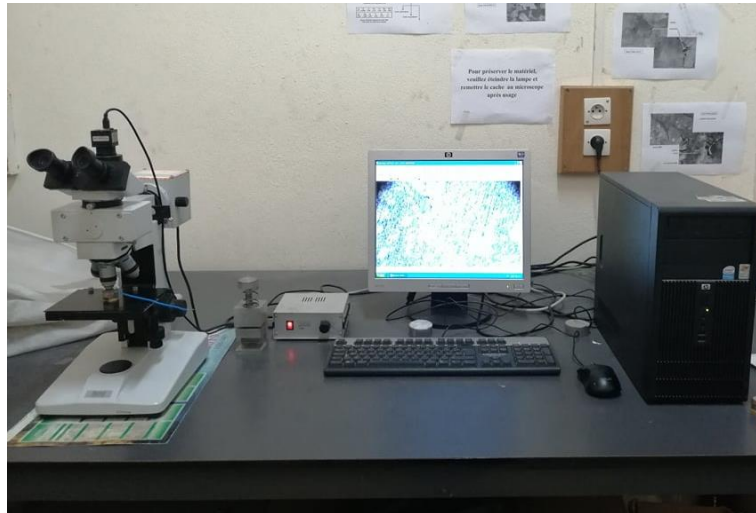


Figure III.10 : microscope optique HUND (WETZLAR)

9- Mesure du potentiel de corrosion libre: (Chronopotentiométrie) :

Pour la mesure du potentiel de corrosion libre nous avons effectué le test de Chronopotentiométrie. Ce test consiste à immerger une électrode de travail (l'alliage à étudié) dans un électrolyte et de suivre l'évolution de son potentiel en fonction de temps avec ou sans imposition de courant électrique. En circuit ouvert ($i=0$), l'électrode métallique prend par rapport à la solution un potentiel, appelé : potentiel à circuit ouvert, appelé aussi potentiel d'abandon ou potentiel de corrosion. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence (dans notre cas cette électrode est l'électrode Ag/AgCl). La solution corrosive utilisée est une solution de NaCl à 3% de concentration.

A l'instant 0 d'immersion l'électrode de travail on révèle la valeur du potentiel affiché. Nous enregistrons par la suite le potentiel de corrosion libre pendant 5 jours.



Figure III. 11 : Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl

10- Tracé des courbes de polarisation :

Une courbe de polarisation de chaque échantillon de chaque type a été tracée à l'aide d'un Potentiostat de marque AUTOLAB relié à un ordinateur utilisant un logiciel NOVA.

NOVA est le nouveau logiciel d'électrochimie de Autolab. Cette application est utilisée pour contrôler tous les instruments accessoires compatibles Autolab.

NOVA combine la puissance et la flexibilité des versions précédentes avec une interface utilisateur simple et moderne. La conception de NOVA repose sur des représentations graphiques simples et efficaces des tâches communes pouvant être effectuées par l'instrument.

NOVA fournit une liste complète de caractéristiques uniques :

- * Une présentation simple, cohérente et claire.
- * Un tableau de bord pour toutes les informations pertinentes.
- * Navigation par onglets tout au long de l'application.
- * Une vaste bibliothèque de méthodes prédéfinies.

- *Un éditeur de processus facile à utiliser pour les méthodes personnalisées.
- *Puissance option de traçage 2D et 3D.
- *Une large gamme d'outils d'analyse de données et de traitements de données.
- *Une transition en douceur de procédures.
- *Multi Autolab prend en charge jusqu'à 128 instruments à partir d'un seul ordinateur.
- *Options de contrôle manuel de tous les instruments pris en charge.



Figure III.12 : Potentiostat de marque AUTOLAB



Figure III.13 : dispositif utilisé pour la polarisation dans une solution de NaCl

11- Chronopotentiometrie sous une tension imposée de 1.5 volt:

Dans ce test nous avons enregistré le potentiel et le courant mesuré.

Nous avons utilisé une cellule de corrosion a montage de deux électrode, électrode de référence représentée l'électrode Ag/AgCl, et une électrode de travail représentée par l'alliage étudié. Nous avons imposé dans le circuit électrique une tension de 1.5 V. Le pôle positif est relié à l'électrode de référence et le pôle négatif sur l'électrode de travail. La solution utilisée est une solution de NaCl à 3% de concentration.

Nous avons enregistré les valeurs du potentiel et du courant depuis l'immersion jusqu'à 24 heures de corrosion.

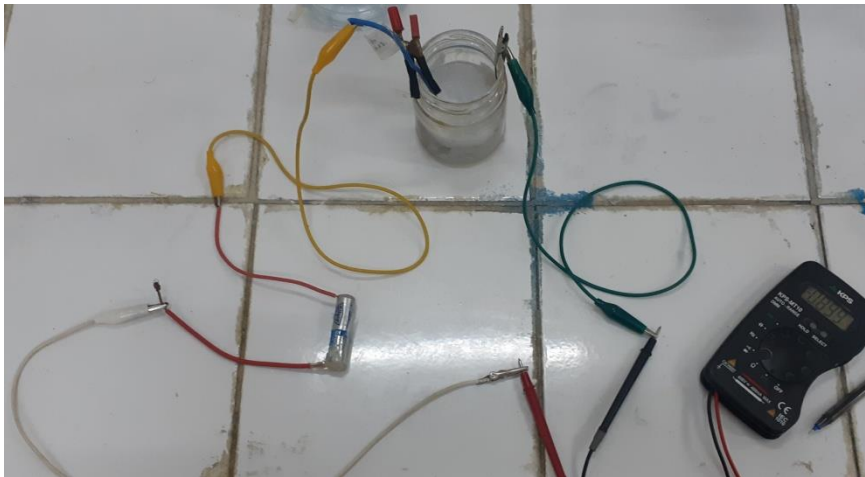


Figure III.14 : dispositif de mesure corrosion a courant imposé

Chapitre IV
Les résultats et
interprétations

1- Microstructure avant corrosion des alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn :

La Figure.IV.1 montre que la microstructure de l'alliage AlSi10Mg contient trois phases, l'eutectique (la phase blanche), phase mère de l'aluminium(le fond gris), et des particules intermétalliques grises sous plusieurs formes. Les particules grises sont constituées de plusieurs métaux tels que : l'aluminium, le silicium, le fer et d'autres éléments.

La Figure. IV.2 montre une présence de porosités dans l'alliage AlSi10Mg, la porosité est le résultat de l'échappement des gaz tels que l'oxygène et l'hydrogène durant la solidification du métal liquide. La taille des pores observées est variable.

Les Figure. (IV.3 et IV..4) montrent la microstructure de l'alliage AlSi10MgZn et les pores dans l'alliage AlSi10MgZn respectivement. Nous observons sur la Figure.IV.3 un eutectique de plus faible dimension par rapport à celui de l'alliage de provenance de l'SNVI (AlSi10Mg), les particules intermétalliques sont plus grosses. Sur la Figure.IV.4 nous observons des pores de dimension plus grande que celle observées pour l'alliage (AlSi10Mg). D'où nous pouvons conclure que l'ajout du zinc agit sur l'eutectique, la taille des particules et des pores.

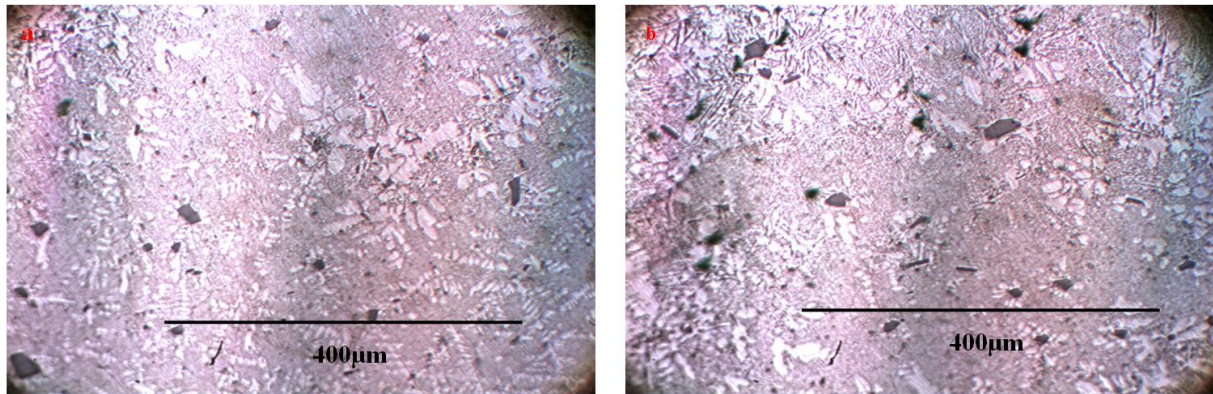


Figure. IV.1 Microstructure de l'alliage AlSi10Mg

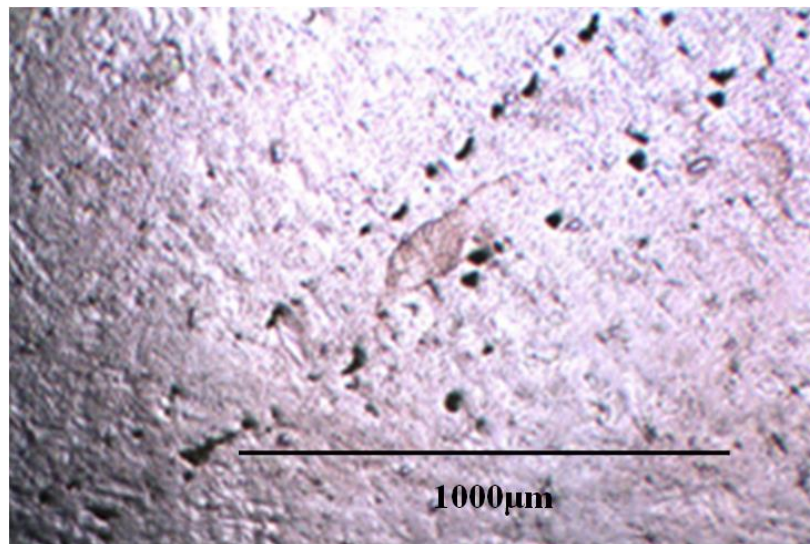


Figure.IV. 2 porosités observées sur l'alliage AlSi10Mg

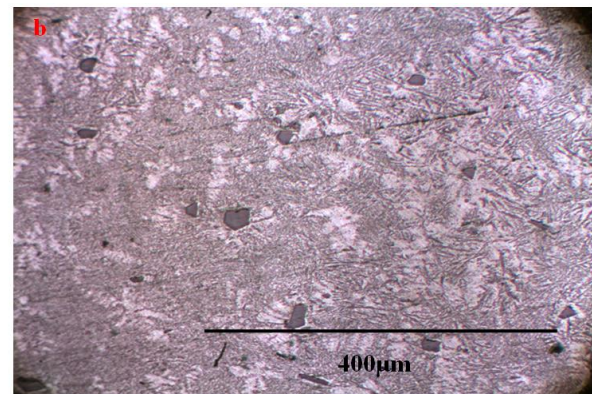
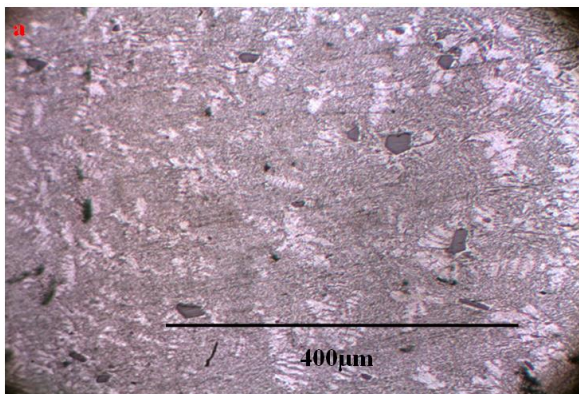


Figure. IV.3 microstructure de l'alliage AlSi10MgZn

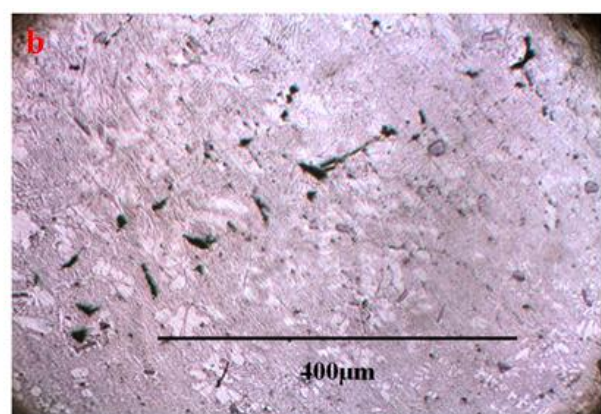
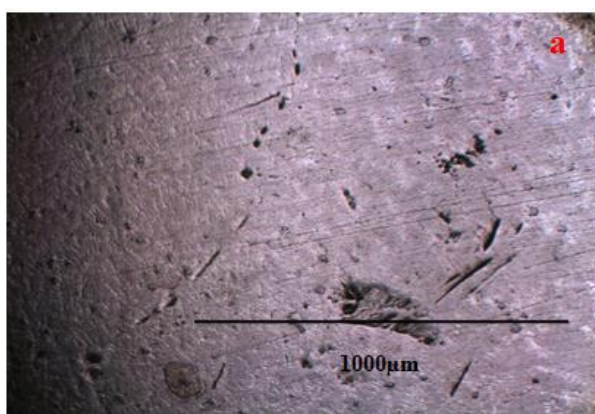


Figure. IV.4 : Porosités observées l'alliage AlSi10MgZn

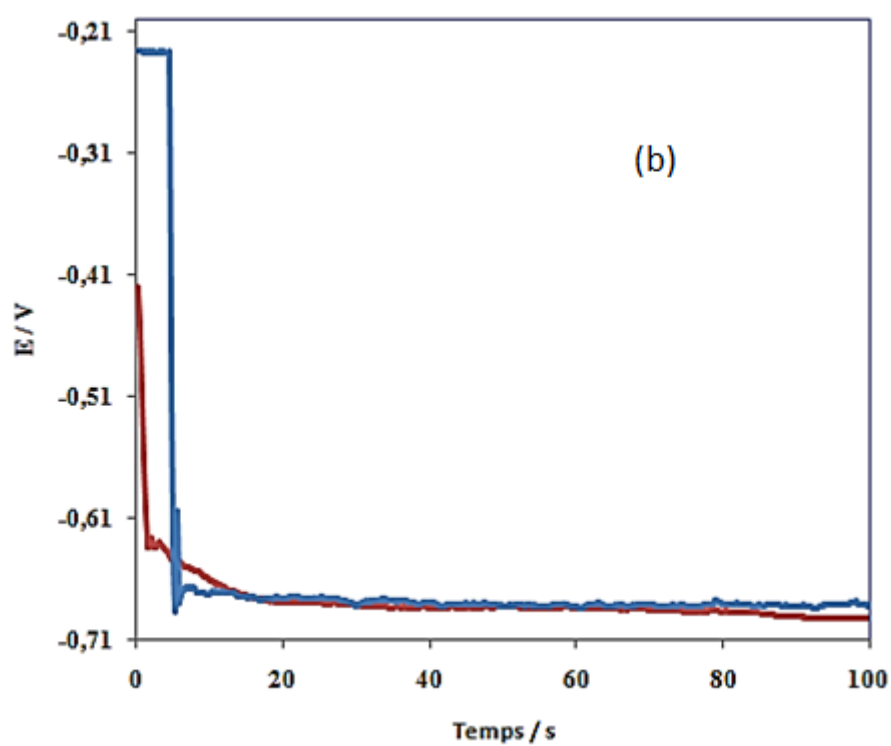
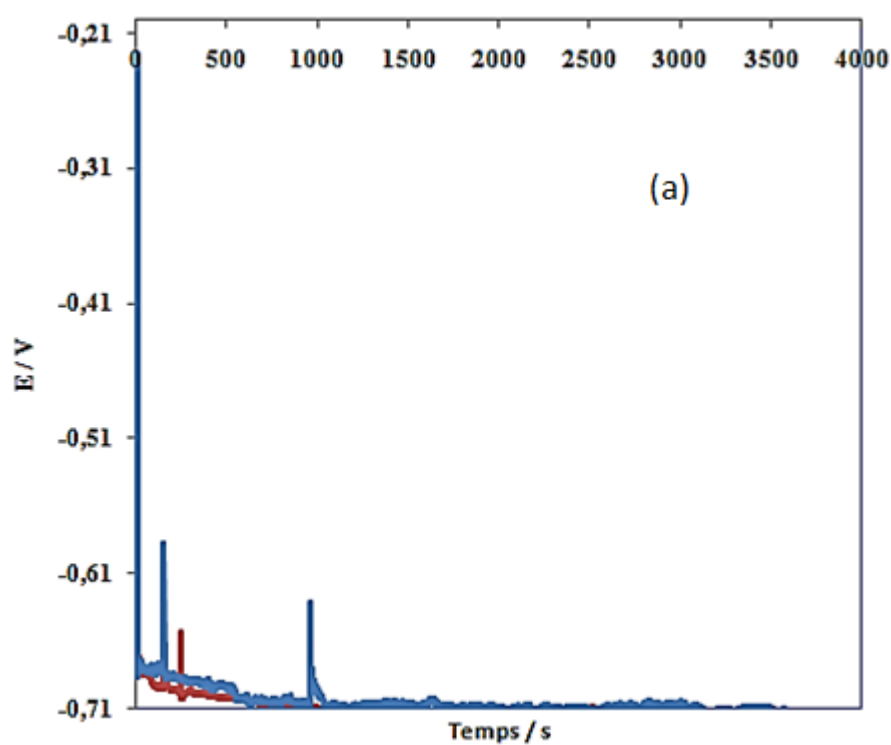
2- Evolution du potentiel de corrosion libre des alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn :

Les Figures. (IV.5 et IV.6) représentent les courbes de corrosion libre des alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn dans une solution de 3% de NaCl.

La Figure.IV.5 regroupe l'enregistrement des valeurs du potentiel de corrosion durant une heure pour chaque seconde, la Figure.IV.6 regroupe six valeurs, la première valeur concerne l'instant d'immersion, la deuxième valeur le potentiel mesuré après 24 heures, la troisième est la valeur du potentiel après 48, la quatrième est la valeur de ce dernier après 72 heures, la cinquième représente le potentiel de corrosion après 96 heures, et la dernière et la valeur du potentiel après 120 heures de corrosion.

La Figure. IV.5 montre un enregistrement du potentiel de corrosion libre pendant une heure, à chaque seconde, à l'immersion le potentiel de corrosion libre de l'alliage AlSi10MgZn est plus élevé égal à -0.24V par contre celui de l'alliage AlSi10Mg est égal -0.41V. A partir de vingt secondes de corrosion jusqu'à 1 heures le potentiel des deux alliages sont proches.

La Figure. IV.6 montre que le potentiel des deux alliages sont différent par la suite jusqu'au troisième jour. Du troisième jour au cinquième jour le potentiel des deux alliages sont proches. Le potentiel de corrosion libre de l'alliage AlSi10Mg semble plus grand que celui de l'alliage AlSi10MgZn après 2jours de corrosion.



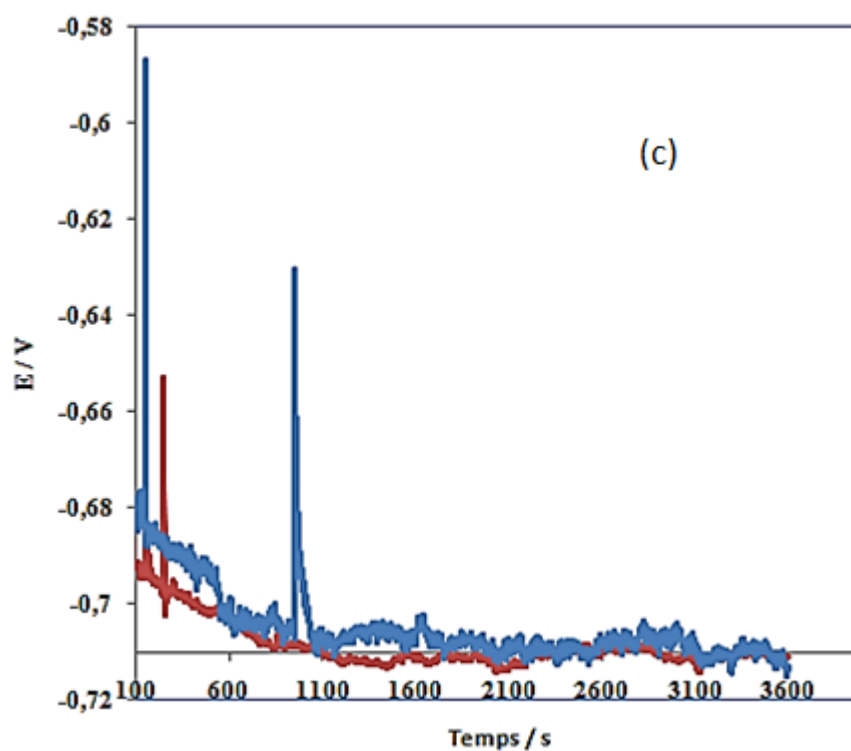


Figure.IV.5 : Potentiel de corrosion libre durant la première heure de corrosion : bleu AlSi10MgZn, Rouge AlSi10Mg

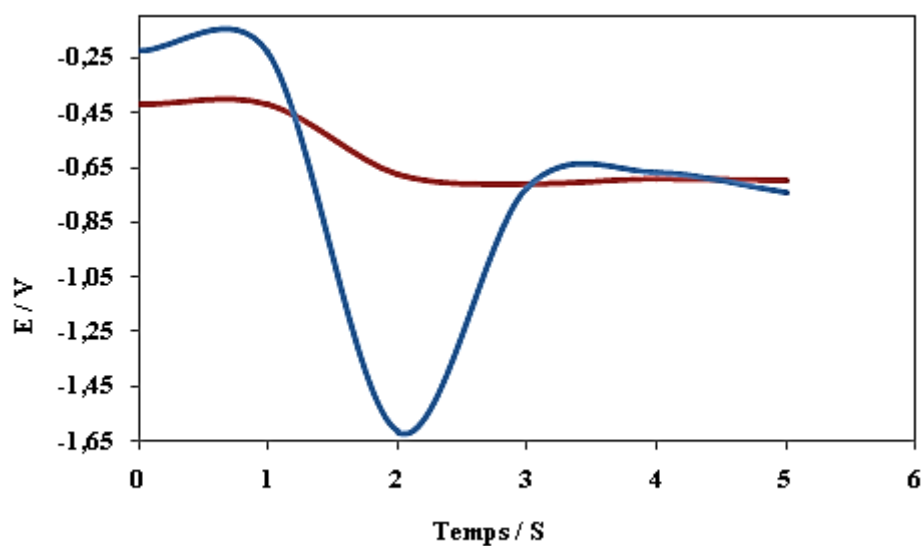


Figure.IV.6 : Potentiel de corrosion libre durant 5 jours de corrosion : bleu AlSi10MgZn, Rouge AlSi10Mg

3 - Morphologie de corrosion après cinq jours d'immersion :

La Figure.IV.7 représente la morphologie de corrosion des alliages après cinq jours de corrosion. Il semble que la corrosion de l'alliage AlSi10Mg tend vers une corrosion généralisée, par contre les images (c et d), montre une présence importante de la corrosion localisée par piquûressur la surface de l'alliage AlSi10MgZn.

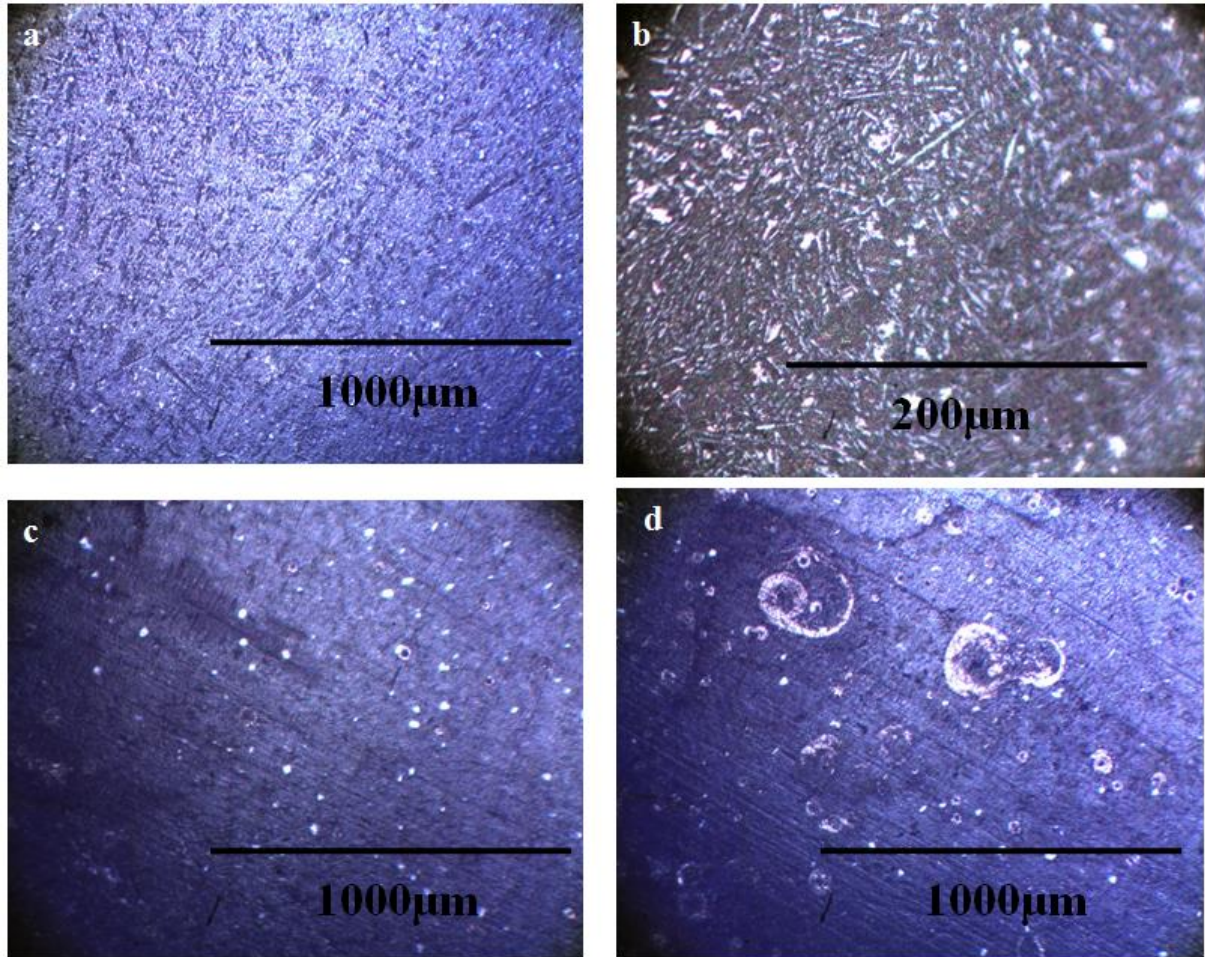


Figure.IV.7 Morphologie de corrosion après 5 jours de corrosion AlSi10Mg (images a et b),AlSi10MgZn (images c et d)

4- Courbes de polarisation des deux alliages :

Les courbes de polarisations Figure. (IV.8-IV.12) et les Tableau. (1et 2) montrent que les potentiels de corrosion des deux alliages différent dès la première heure. Le potentiel de corrosion de l'alliage AlSi10MgZn est plus grand que celui de l'alliage AlSi10Mg après une heure et après cinq jours de corrosion. Par contre la résistance à la polarisation de l'alliage AlSi10Mg est plus grande que celle de l'alliage AlSi10MgZn après une heure et après cinq

jours. Nous avons aussi observé que le potentiel de corrosion des deux alliages diminue en fonction du temps c.-à-d. celui après cinq jours est plus petit que celui après une heure. Par contre la résistance à la polarisation augmente en fonction du temps pour l'alliage AlSi10Mg et diminue en fonction du temps pour l'alliage AlSi10MgZn.

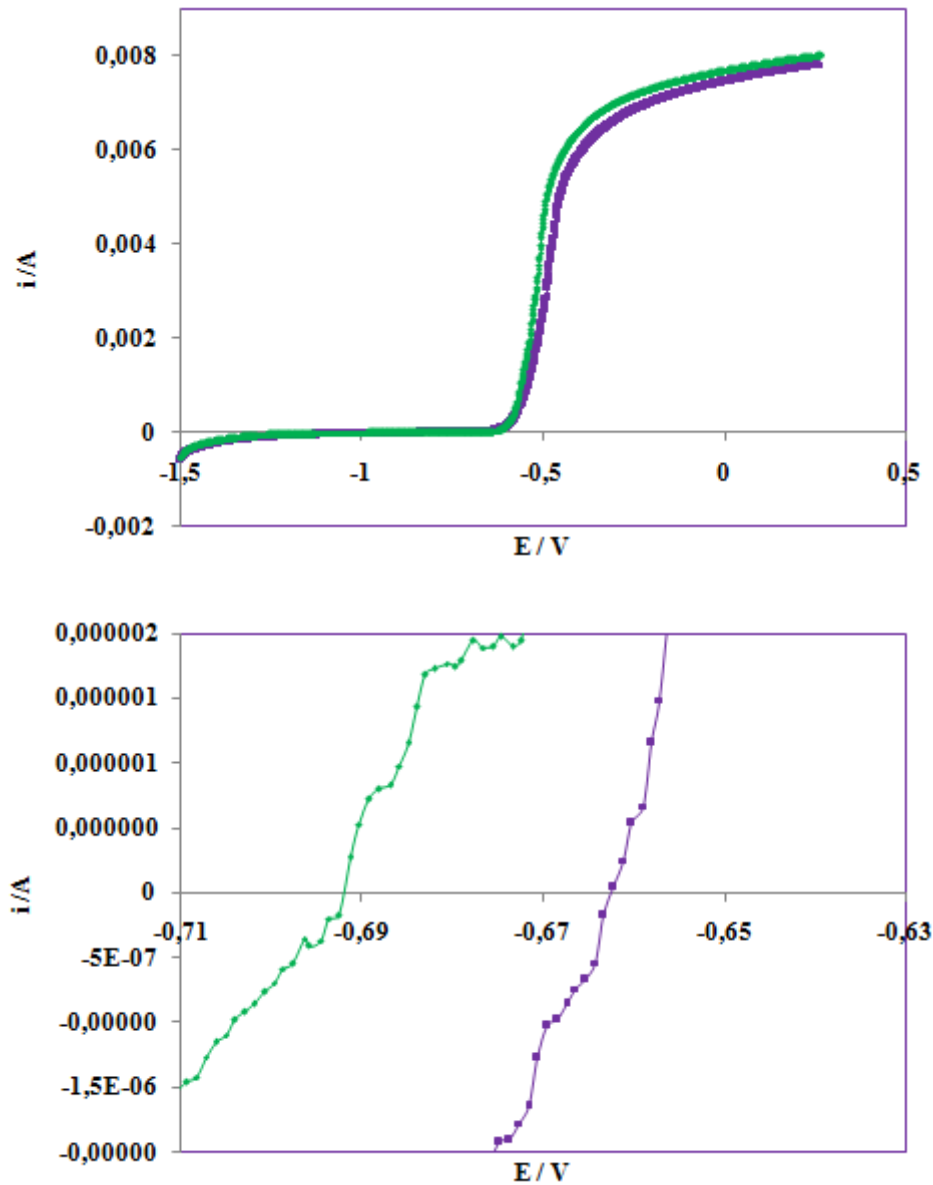


Figure.IV.8: Courbes de polarisation ($i = f(E)$) des deux alliages après 1 heure de corrosion dans une solution de 3% de NaCl, Al Si10Mg (violet), AlSiMgZn (vert).

Tableau VI. 1 : Résistances de polarisation et potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn après une heure de corrosion.

c	Temps de corrosion	R_p (Ω)	E_{corr}
AlSi10Mg	1 heure	4666	-0.6625
AlSiMgZn	1 heure	2638	-0,6915

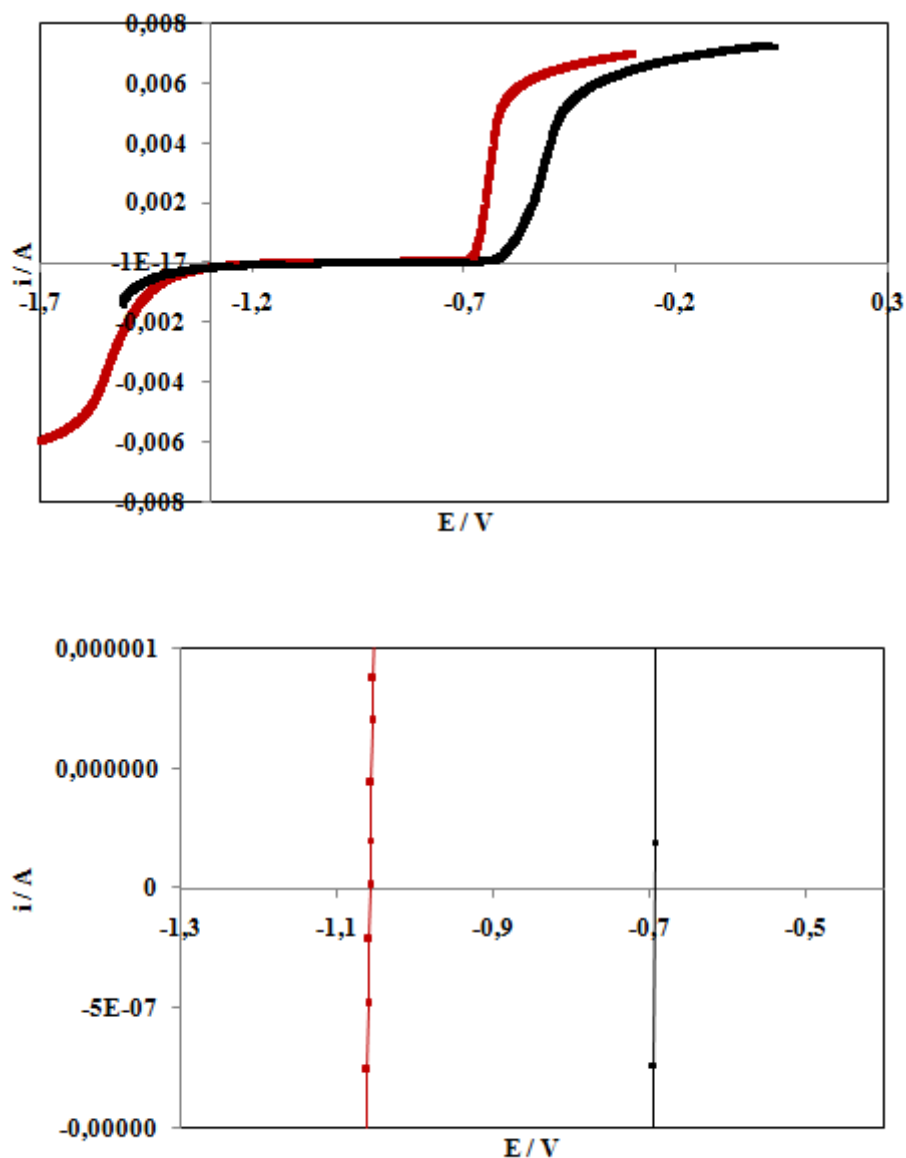
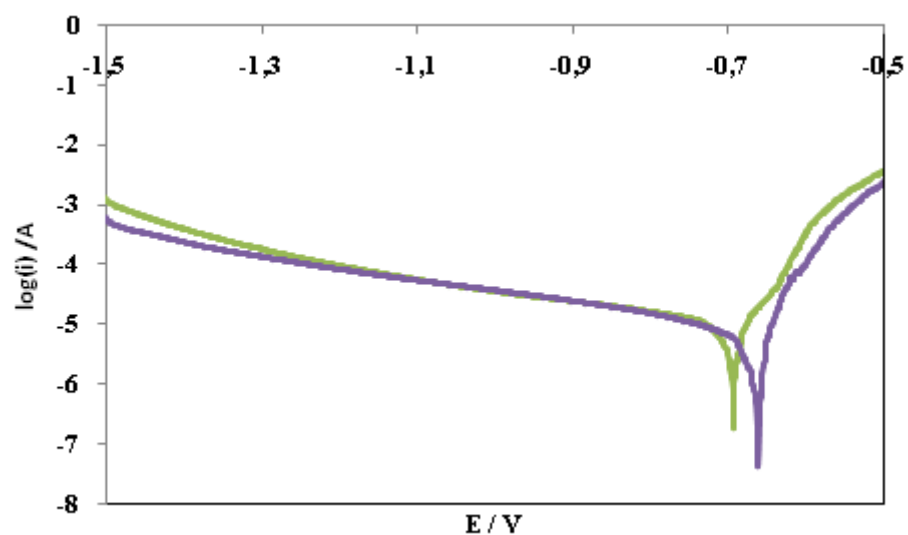
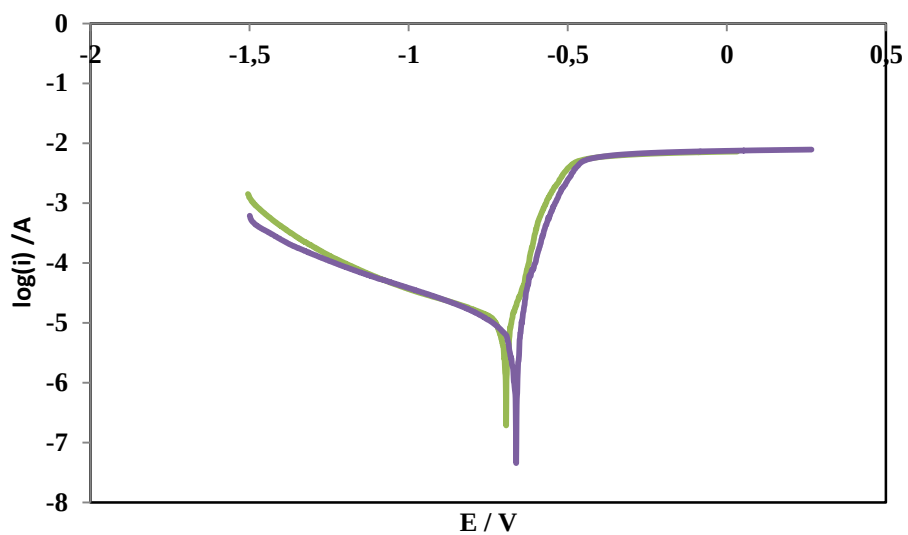


Figure.IV. 9: Courbes de polarisation $i = f(E)$ des deux alliages, après cinq jours de corrosion dans une solution de 3% de NaCl, Al Si10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir)

Tableau IV. 2 : Résistances de polarisation et potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn après cinq jours de corrosion.

alliage	Temps de corrosion	R_p (Ω)	E_{corr}
AlSi10Mg	5 jours	5498	-1,058
AlSi10MgZn	5 jours	1054	-0,696



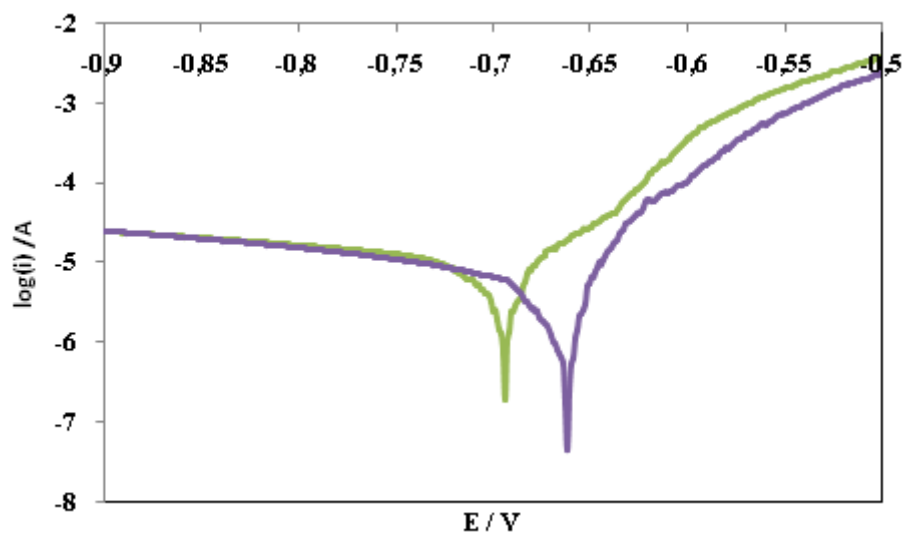
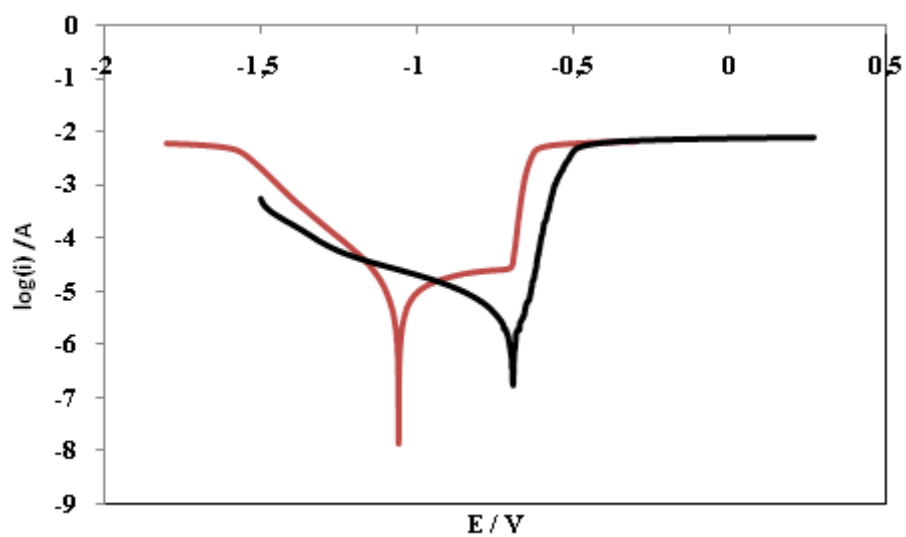


Figure.IV.10 Courbes de polarisation ($\text{Log}(i) = f(E)$) des deux alliages, alliage AlSi10Mg (violet) et alliage AlSi10MgZn (vert), après 1h d'immersion dans une solution de 3% de NaCl.



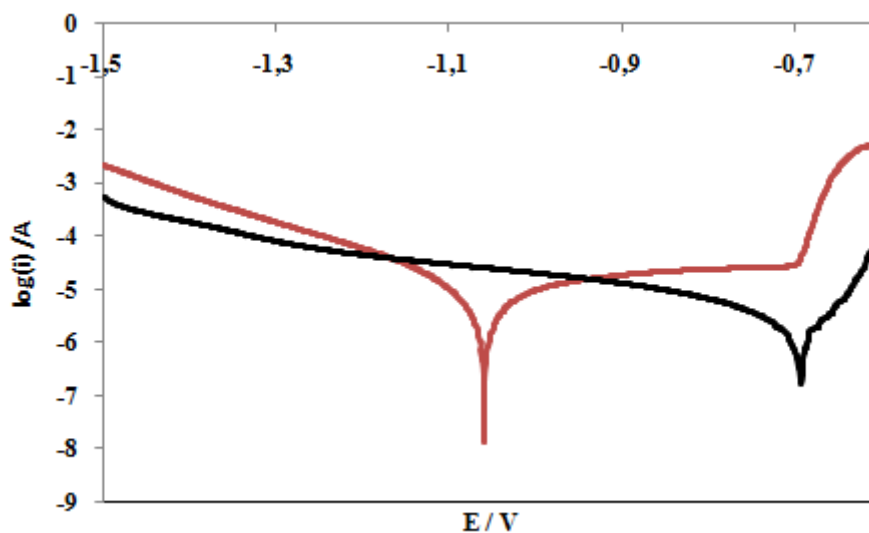


Figure.IV.11 Courbes de polarisation ($i = f(E)$) des deux alliages, alliage AlSi10Mg (rouge) et alliage AlSi10MgZn (noir), après 5 jours de corrosion dans une solution de 3% de NaCl.

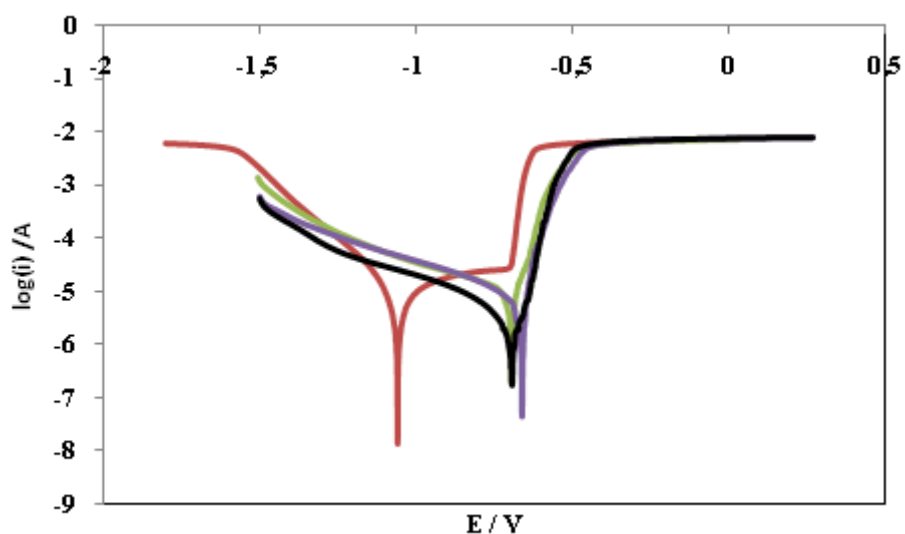


Figure.IV.12 Courbes de polarisation des l'alliages AlSi10Mg (violet) et AlSi10MgZn (vert) après 1h de corrosion, et AlSi10Mg (rouge) et AlSi10MgZn (noir) après 5 jours de corrosion.

5- Effet de la tension imposée de 1.5V sur le courant et le potentiel de corrosion des deux alliages AlSi10Mg et AlSi10MgZn :

Une tension imposée de 1.5 volt ne montre pas une différence entre le courant de corrosion enregistré de l'alliage AlSi10Mg par rapport à l'alliage AlSi10MgZn. La valeur du courant de corrosion aux premiers instants de corrosion est d'environ -60 mA et après environ 100 minutes elle augmente pour atteindre une valeur comprise entre -20 et -30 mA (Fig.IV.13).

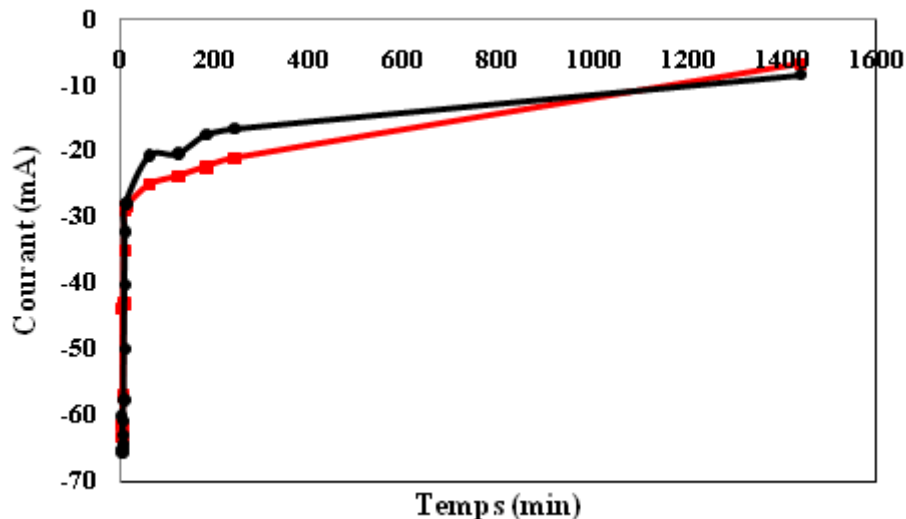


Figure.IV.13 Courbe du courant de corrosion libre sous une tension imposée de 1.5 volt, AlSi10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir)

En ce qui concerne le potentiel de corrosion, nous n'observons que le potentiel de corrosion, sous une tension imposée de 1.5 Volt, des deux alliages sont presque les mêmes à l'immersion, après quelques instants celui de l'alliage AlSi10Mg devient plus grand que celui de l'alliage AlSi10MgZn, après 100 minutes de corrosion c'est celui de l'alliage AlSi10MgZn qui devient plus grand. Après 770 minutes de corrosion c'est l'alliage AlSi10Mg qui devient plus noble (Figure.IV.14).

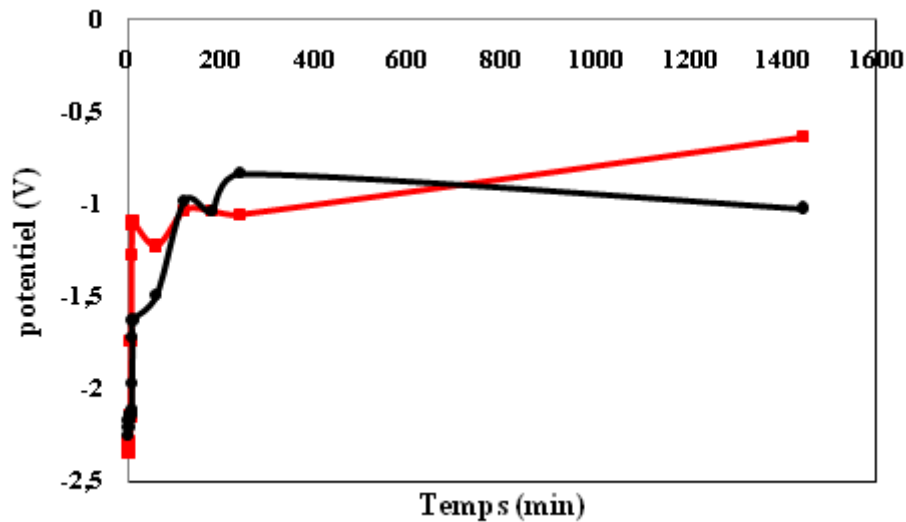


Figure. IV. 14 Courbe du potentiel de corrosion libre sous une tension imposé, AlSi10Mg (rouge), AlSi10MgZn (noir)

6. Résultats de Dureté Brinell :

La charge utilisée est égale 30 Kg

Les tableaux (IV.3-IV.6), montent la dureté Brinell et la microdureté Vickers. Nous avons observé que la dureté et la microdureté de l'alliage AlSi10Mg sont plus grandes que celle de l'alliage AlSi10MgZn. Ainsi nous concluons que l'ajout du zinc diminue la dureté.

Tableau IV.3 dureté Brinell de l'alliage AlSi10Mg :

N° de l'essai	1	2	3	4	5
Diamètre 1 (mm)	0.72	0.7	0.7	0.7	0.7
Diamètre 2 (mm)	0.7	0.68	0.68	0.68	0.7
Moyenne des diagonales	0.71	0.69	0.69	0.69	0.7
Dureté HB	74.23	78.69	78.69	78.69	76.41

Dureté HB moyenne est : 77,34 HB

Tableau IV.4 dureté Brinell de l'alliage AlSi10MgZn :

N° de l'essai	1	2	3	4	5
Diamètre 1 (mm)	0.8	0.78	0.8	0.8	0.78
Diamètre 2 (mm)	0.76	0.76	0.78	0.78	0.76
Moyenne des diagonales	0.8	0.78	0.8	0.8	0.78
Dureté HB	61.23	62.87	59.65	59.65	62.87

La dureté HB moyenne est : **61.25 HB**

7. Résultats de la microdureté HV :

Tableau IV.5 microdureté Vickers de l'alliage AlSi10Mg :

N° du test	D1 (mm)	D2 (mm)	HV
1	103.43	99.53	90.00
2	96.91	103.30	92.50
3	101.67	97.79	93.20
4	101.38	102.37	89.30
5	101.94	99.59	91.30

La microdureté HV moyenne est : **91.26 HV**

Tableau IV.6 microdureté Vickers de l'alliage AlSi10MgZn :

N° du test	D1 (mm)	D2 (mm)	HV
1	113.60	110.20	74.00
2	112.13	115.22	71.70
3	114.12	108.57	74.70
4	116.43	115.61	68.80
5	115.25	110.39	72.80

La microdureté HV moyenne est : **72.4 HV**

Conclusion générale

Le travail réalisé nous a permis de conclure ce qui suit :

- Présence de trois phases, l'eutectique (la phase blanche), phase mère de l'aluminium (le fond gris), des particules intermétalliques grises, et des pores dans les deux alliages étudiés.
- L'alliage AlSi10MgZn possède un eutectique de plus faible dimension par rapport à l'alliage de provenance de l'SNVI (AlSi10Mg), et des particules intermétalliques plus grosses. L'alliage élaboré possède des pores de dimension plus grande que ceux observés sur l'alliage (AlSi10Mg). D'où l'ajout du zinc agit sur l'eutectique, la taille des particules et des pores.
- Le potentiel des deux alliages est différent par la suite jusqu'au troisième jour. Du troisième jour au cinquième jour le potentiel des deux alliages est proche. Le potentiel de corrosion libre de l'alliage AlSi10Mg semble plus grand que celui de l'alliage AlSi10MgZn après 2 jours de corrosion.
- la corrosion de l'alliage AlSi10Mg tend vers une corrosion généralisée, par contre la figure de corrosion sur la surface de l'alliage AlSi10MgZn montre une présence importante de la corrosion localisée par piqûres.
- Les courbes de polarisations montrent que les potentiels de corrosion des deux alliages sont différents dès la première heure. Le potentiel de corrosion de l'alliage AlSi10MgZn est plus grand que celui de l'alliage AlSi10Mg après une heure et après cinq jours de corrosion. Par contre la résistance à la polarisation de l'alliage AlSi10Mg est plus grande que celle de l'alliage AlSi10MgZn après une heure et après cinq jours.
- Une tension imposée de 1.5 volt ne montre pas une différence entre le courant de corrosion enregistré de l'alliage AlSi10Mg par rapport à l'alliage AlSi10MgZn.
- Le potentiel de corrosion, sous une tension imposée de 1.5 Volt, des deux alliages est presque le même à l'immersion, après quelques instants celui de l'alliage AlSi10Mg devient plus grand que celui de l'alliage AlSi10MgZn, après 100 minutes de corrosion c'est celui de l'alliage AlSi10MgZn qui devient plus grand. Après 800 minutes de corrosion c'est l'alliage AlSi10Mg qui devient plus noble.
- La dureté et la microdureté de l'alliage AlSi10Mg sont plus grandes que celle de l'alliage AlSi10MgZn, ceci-dit, l'ajout du zinc diminue la dureté et la microdureté.