

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en Génie Mécanique

Option: Sciences Des Matériaux

Thème

*Etude du comportement à la corrosion
de l'aluminium des aérosols dans une
solution de 0.3% de NaCl*

Proposé et dirigé par :

Mr ZAZI Nacer

Réalisé par :

M^{me} KACHI Nacima

Promotion: 2013/2014

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu pour m'avoir donné le courage, la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce modeste travail et m'éclairer les chemins.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres de ma famille, grâce à leur aide, mon travail a vu le jour.

Ma plus sincère gratitude et mes remerciements sont adressés à mon promoteur, Monsieur ZAZI NACER d'avoir accepté de diriger ce travail par son soutien et ces conseils pertinents qui m'ont données le courage et l'espoir de travailler tranquillement. Ce fut un réel plaisir de bénéficier à la fois de ses connaissances scientifiques et techniques mais aussi de ses qualités d'écoute et pédagogiques.

Je tiens à remercier vivement tous les membres de jury d'avoir accepté de lire, d'examiner et de juger ce mémoire. C'est un honneur pour moi qu'ils fassent part de cette soutenance.

Je tiens à remercier également les membres du laboratoire de Génie Mécanique (sciences des matériaux surtout miliada et sabrina), du hall de technologie d'oued aissi et de la bibliothèque du Département de Génie Mécanique pour leurs services et patience ainsi que pour leurs gentillesse.

Je remercie énormément tous mes enseignants.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles de, près ou de loin, qui m'ont porté aide et encouragements.

Je dédie ce travail

Aux deux êtres les plus précieux au monde

Mes très chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu les protèges.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon cher mari Abdenour

A mes chers frères, mes chères sœurs

A ma belle famille

A tous les professeurs et enseignants

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant mes études

A tous mes amis et camarades de classe et particulièrement ma promotion.

A tous mes voisins et amis.

Sommaire

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

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Introduction	3
---------------------------	----------

I.1. Propriétés de l'aluminium et ses alliages.....	3
--	----------

I.1.1. Structure atomique	3
---------------------------------	---

I.1.2. Isotope de l'aluminium	3
-------------------------------------	---

I.1.3. Structure cristalline	4
------------------------------------	---

I.1.4. Effets des additions et des impuretés	4
--	---

I.1.5. Température de fusion	4
------------------------------------	---

I.1.6. Point d'ébullition	5
---------------------------------	---

I.1.7. Masse volumique	5
------------------------------	---

I.1.8. L'enthalpie de vaporisation.....	5
---	---

I.1.9. Propriétés optiques.....	5
---------------------------------	---

I.1.10. Propriétés mécaniques	5
-------------------------------------	---

I.1.11. Propriétés chimiques.....	7
-----------------------------------	---

I.2. Fabrication de l'aluminium et ses alliages.....	7
---	----------

I.2.1. Fabrication de l'aluminium.....	7
--	---

I.2.2. Minerai	7
----------------------	---

I.2.3. Production d'alumine.....	8
----------------------------------	---

I.2.4. Production de l'aluminium	9
--	---

I.2.5. Le laminage.....	9
-------------------------	---

I.3. Les atouts de l'aluminium et ses alliages	11
---	-----------

I.3.1. Légèreté.....	11
----------------------	----

I.3.2. Conductivité électrique	12
--------------------------------------	----

I.3.3. Conductivité thermique.....	12
------------------------------------	----

I.3.4. Tenue à la corrosion	13
I.3.5. Aptitudes aux traitements de surfaces.....	13
I.3.6. Diversité des alliages d'aluminium	13
I.3.7. Recyclage	14
I.4. Classification des alliages d'aluminium.....	14
I.4.1. Les alliages de moulages	14
I.4.2. les alliages de corroyages.....	15
I.4.2.1. Alliages avec durcissement structural.....	16
I.4.2.2. Alliages sans durcissement structural	16
I.5. Désignation des alliages d'aluminium.....	17
I.6. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages	18
I.7. Utilisation du l'aluminium dans les emballages.....	20
I.8. L'effet de l'aluminium sur la santé	20

Chapitre II : Corrosion de l'aluminium et ses alliages

Introduction	22
II.1. Facteurs de la corrosion.....	22
➤ Le milieu.....	22
➤ Le métal	22
• La composition des alliages.....	22
• Le mode d'élaboration et de transformation	23
• Les traitements thermiques	23
• L'état de surface	23
➤ Facteurs liés aux conditions d'emploi	23
II.2. Rôle de film d'oxyde	24
II.3. Comportement de l'aluminium en solution aqueuse	24
II.4. Définition d'une électrode	25
II.5. Tension de l'électrode à l'équilibre	25

II.6. Evolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion équation de NERST.....	25
II.7. L'état de polarisation des métaux.....	26
II.8. Courbe de polarisation	26
II.9. Résistance à la polarisation	27
II.10. Différente forme de corrosion	27
II.10.1. Corrosion générale (uniforme)	27
II.10.2. Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse)	28
II.10.3. Corrosion par piqûre	28
II.10.4. Corrosion érosion	29
II.10.5. Corrosion feuilletante	29
II.10.6. Corrosion sous contrainte	30
II.10.7. Corrosion filiforme	31
II.10.8. Corrosion intergranulaire.....	32
II.10.9. Corrosion galvanique.....	32
II.11. Protection des alliages d'aluminium contre la corrosion	33

Chapitre III : procédures et techniques expérimentales

Introduction	37
III.1. Préparation des échantillons	37
➤ L'extraction des rectangles du l'aérosol	38
➤ Conception des échantillons	38
➤ Préparation des conducteurs	39
➤ Assemblage des échantillons et les conducteurs	40
III.2. Préparation de l'électrode de référence pour les essais de la corrosion	40
III.3. Préparation du bain de corrosion	41
III.4. Mesure du pH de la solution.....	42
➤ Fonctionnement du PH-mètre.....	42
III.5. Montage pour l'essai de la corrosion	42
III.6. Analyse microscopique des échantillons	43

III.6.1. Observation à l'aide de microscope optique	43
III.6.2. Observation à l'aide de microscope électronique à balayage (MEB)	46
III.7. Essai de microdureté Vickers	47
III.8. Essai de traction.....	49

Chapitre IV : résultats et interprétations

Introduction	53
IV.1. Analyse de la composition chimique des aérosols de déodorant	53
IV.2. Observation de la microstructure de différents échantillons d'aérosols de déodorant en aluminium.....	54
➤ IV.2.1. Observation au microscope optique	54
➤ IV.2.2. Observation au microscope électronique à balayage	55
IV.3. Morphologie de corrosion des différents échantillons d'aérosols en aluminium.....	56
➤ IV.3.1. Observation au microscope optique	56
➤ IV.3.2. Observation au microscope électronique à balayage	57
IV.4. Cinétique de corrosion des aérosols de déodorant en aluminium dans une solution de 0.3% de NaCl.....	58
Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Structure cristalline de l'aluminium.....	04
Figure I.2 : procédé d'extraction d'alumine	08
Figure I.3 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés des métaux avec le taux du laminage	10
Figure I.4 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid.....	11

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Corrosion localisée dans un alliage d'Al –Mg	29
Figure II.2 : corrosion feuilletante	30
Figure II.3 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage Al-Mg	31
Figure II.4 : Corrosion filiforme de l'aluminium peint	31
Figure II.5 : Vue en coupe d'un échantillon d'alliage 6013T6 ayant subi de la corrosion intergranulaire	32

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Les différentes marques d'aérosols.....	37
Figure III.2 : Les aérosols découpés en rectangles.....	38
Figure III.3 : Les échantillons découpés.....	38
Figure III.4 : Le fil de cuivre de 20 cm	39
Figure III.5 : Conducteur de l'électrode des essais de la corrosion.....	39
Figure III.6 : L'assemblage de l'échantillon et le conducteur.....	40
Figure III.7 : Electrode de référence.....	41
Figure III.8 : Présentation des échantillons dans le bain de corrosion	41
Figure III.9 : Montage pour l'essai de la corrosion libre.....	42
Figure III.10 : Polisseuse utilisée	43
Figure III.11 : Echantillons préparés	44

Figure III.12 : Microscope métallographique.....	44
Figure III.13 : Microscope optique.....	45
Figure III.14 : Microscope électronique à balayage (MEB).....	46
Figure III.15 : Appareil de microdureté	48
Figure III.16 : Principe de l'essai Vickers.....	49
Figure III.17 : Machine de traction.....	51
Figure III.18 : Dispositif d'amarrage des éprouvettes.....	51
Figure III.19 : Les dimensions de l'éprouvette de traction utilisée.....	52

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Courbe de traction (Contrainte-déformation) pour trois marques d'aérosols de déodorant.....	54
Figure IV.2 : Microstructure au microscope optique de trois aérosols en aluminium de marques différentes	55
Figure IV.3 : Image au MEB de deux types d'aérosols en aluminium de marques différentes .	56
Figure IV.4 : Morphologie de corrosion des échantillons d'aérosols en aluminium de différentes marques après trois jours de corrosion dans la solution de 0.3%NaCl	56
Figure IV.5 : Image au MEB d'un échantillon d'aérosols en aluminium après trois jours de corrosion dans la solution de 0.3% NaCl	57
Figure IV.6 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol (premier échantillon) a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion, c) durant les premières heures de corrosion	59
Figure IV.7 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol (deuxième échantillon), a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion..	60
Figure IV.8 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol, a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion	60
Figure IV.9 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol, a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion	61
Figure IV.10 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol de quatre échantillons, a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion de quatre échantillons.....	61
Figure IV.11 : Potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol, a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion	62

Figure IV.12 : La variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol en fonction du temps dans la solution de NaCl	62
Figure IV.13 : La variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol en fonction du temps dans la solution de NaCl tous les échantillons.....	63
Figure IV.14 :a) Potentiel de la corrosion libre de la troisième marque d'aérosol ■échantillon non poli ▲ échantillon poli, a) en fonction du temps jusqu'à 72 heures b) Effet loupe au premier instant de corrosion	63
Figure IV.15 : Potentiel de la corrosion libre de toutes les marques d'aérosol et tous les échantillons, a) durant 72 heures de corrosion, b) Effet loupe au premier instant de corrosion .	64

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Les principales propriétés mécaniques de l'aluminium06

Tableau I.2: Désignation des séries principales des alliages d'aluminium 17

CHAPITRE IV:

Tableau. IV.1 : Dureté Vickers des différentes marques d'aérosols de déodorant..... 53

Tableau IV.2 : analyse chimique d'aérosols de déodorants 54

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La corrosion est une dégradation structurale difficile à modéliser, qui implique une interaction entre le métal et son milieu environnant.

La corrosion est un phénomène chimique ou électrochimique qui induisant une oxydation ou une dissolution d'un métal dans le milieu entourent de ce dernier.

L'aluminium et ses alliages sont utilisés comme emballages des déodorants (aérosols) pour une durée allant jusqu'à plusieurs années.

Un contact de longue durée de la surface interne de l'aérosol en aluminium avec le déodorant peut entraîner une dissolution ou l'oxydation de la surface interne cette dernière entraîne le passage des ions d'aluminium, ou l'oxyde ou bien d'hydroxyde d'aluminium dans le déodorant.

L'application du déodorant sur l'épiderme induit le passage du déodorant dans le sang, alors l'aluminium dissous dans le déodorant passe directement dans le sang.

De récentes études médicales laissent à penser que certaines maladies telles que la maladie d'encéphalopathie aluminique de l'hémodialysé, la maladie de Guam, l'imprégnation aluminique cérébrale (enfants), la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer, nutrition parentérale, rachitisme par carence calcique, hématopoïétique, foie, rein et cœur seraient d'origine d'ingestion chronique de petites doses d'aluminium.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'évolution du phénomène de corrosion (la morphologie et la cinétique) des aérosols en aluminium en fonction du temps. De comparer la qualité des différents types d'aérosols existants dans le marché Algérien.

Dans ce travail, pour trois marques de déodorant nous avons étudié le comportement à la corrosion de la surface interne de l'aérosol, emballent ces derniers, dans une solution de 0.3% en masse de NaCl qui représente un milieu peu agressif, ceci dit nous avons tester l'effet d'un milieu de faible agressivité de la surface interne de l'aluminium d'aérosol sur la dissolution et l'oxydation, et nous avons déterminés les propriétés mécaniques de la feuille d'aluminium constituant cette dernière, par la suite nous avons étudiés la relation existante entre les propriétés chimiques (la corrosion), mécaniques (l'état de contraintes), et la microstructure (constitution en phases, grains et particules intermétalliques, et la forme et taille des grains).

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre c'est l'aluminium et ses alliages,

Le deuxième chapitre c'est la corrosion de l'aluminium et ses alliages,

Le troisième chapitre c'est les procédures et les techniques expérimentales,

Et le dernier chapitre c'est les résultats et interprétations.

Les résultats réalisés sont synthétisés par une conclusion générale.

CHAPITRE I

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

CHAPITRE I- L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Introduction

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA).

Cette découverte a donné le coup d'envoi pour le développement de la métallurgie ainsi l'aluminium est devenu, en un siècle, le deuxième métal le plus utilisé, après l'acier.

L'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans plusieurs industries comme le transport (aviation, automobile, marine), l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...etc.

I.1. Propriétés de l'aluminium

I.1.1 Structure atomique

L'aluminium pur possède un symbole chimique **Al**, a comme numéro atomique $Z = 13$ ce qui signifie qu'il possède un total de 13 électrons. Les deux premiers électrons viennent compléter la première couche que l'on note $(K)^2$. Il reste ensuite $13 - 2 = 11$ électrons: les 8 électrons suivants viennent compléter la couche L ce qui donne $(K)^2(L)^8$. Il reste $13 - 2 - 8 = 3$ électrons qui appartiennent donc à la couche M. La configuration électronique de l'atome d'aluminium est donc $(K)^2(L)^8(M)^3$.

L'aluminium appartient au groupe (**IIIA**) du tableau périodique des éléments.

La masse atomique de l'aluminium est : **26.98154g/Mole**.

I.1.2. Isotope de l'aluminium

Les atomes qui ont le même nombre atomique Z mais des nombres de masses différents sont des isotopes.

L'aluminium (Al) possède 22 isotopes connus, de nombre de masse variant entre 21 et 42. Seul ^{27}Al est stable.

La plupart des isotopes de l'aluminium ont une demi-durée de vie inférieure à 7 minutes et la plupart d'entre eux inférieure à une seconde. Il existe dans la nature à l'état de traces (concentration $<10^{-4}\%$) [2].

I.1.3. Structure cristalline

L'aluminium est un métal de structure cristalline cubique à face centrées (CFC), il a toujours à l'état solide, la même structure cristalline quelle que soit la température.

La figure I-1 ci dessous, a un paramètre de maille $a = 0,4049596$ nm à 298 K. son rayon atomique est de 0,182 nm.

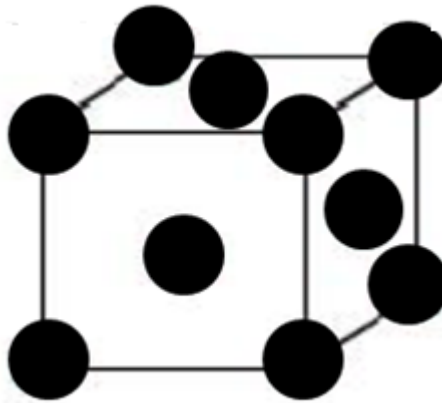


Figure I.1 : Structure cristalline de l'aluminium

I.1.4. Effets des additions et des impuretés

La plupart des éléments d'addition modifient les propriétés chimiques et mécaniques de l'aluminium, mais ne modifient que très faiblement le paramètre de maille de l'aluminium. Mais une faible évolution du paramètre de la maille change considérablement les propriétés mécaniques et physiques du matériau.

I.1.5. Température de fusion

Comme pour tous les métaux, le point de fusion de l'aluminium dépend de sa pureté. Il varie de 657 à 660°C.

- De 559 à 660°C pour l'aluminium de pureté de 99,99%.
- 657 °C pour un aluminium « commercial »

I.1.6. Point d'ébullition

L'aluminium est peu volatil. Le point d'ébullition n'est pas connu avec précision. Il se situe entre 2700 et 2800 K (2477°C) étant la valeur admise.

I.1.7. Masse volumique

Parmi les métaux usuels, c'est l'aluminium qui est le plus léger. La masse volumique mesurée à partir des paramètres cristallins, et à 20 °C : 2.7g/cm³.

I.1.8. L'enthalpie de vaporisation

Appelée aussi chaleur latente de vaporisation) au point d'ébullition 2767K (2494°C) est de : 290,93 kJ. mol⁻¹ (69,5 kcal .mol⁻¹), soit 10,76kJ.g⁻¹.

I.1.9. Propriétés optiques

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium est élevé, de l'ordre de 80% dans le spectre visible. Il dépend de l'état de la surface du métal. L'aluminium déposé sous vide en couche mince qui présente la réflectivité la plus élevée, supérieure à 90% dans le spectre du visible.

Une surface rugueuse possède un faible pouvoir réflecteur.

Le pouvoir réflecteur dépend du titre de l'aluminium en éléments d'alliages.

I.1.10. Propriétés mécaniques

L'essai de traction est la méthode la plus simple pour la détermination de la résistance à la déformation et de la plasticité des métaux et des alliages.

Ses résultats sont valables pour tous les procédés du travail des métaux et des alliages par déformation.

✓ La limite élastique

Est la contrainte à partir de laquelle les dislocations commencent à se mouvoir, c'est la limite entre le domaine élastique et le domaine plastique.

✓ Limite d'élasticité conventionnelle :

Est la contrainte pour laquelle l'allongement résiduel atteint 0.02% de la longueur utile de l'éprouvette.

✓ Module de YOUNG:

L'aluminium est trois fois moins rigide que les aciers, son module de Young est de 70000 MPa (par contre pour les aciers de construction c'est 210 000MPa). Les

caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique (recuit, écroui ou trempé).

Malgré que les éléments d'addition offrent à l'aluminium une multitude de propriétés, mais la plus part d'entre eux n'ont pas une grande influence sur le module de Young. On peut citer deux exceptions notables : le lithium dont de faibles addition (moins de 2 %) augmente le module de Young de 10 % et le silicium à 7 % qui augmente le module jusqu'à 74 000 MPa.

Le module d'élasticité augmente en présence des impuretés et les éléments d'addition. [7, 8,9].

✓ **Coefficient de POISSON**

Le coefficient de Poisson permet d'estimer l'aptitude du métal ou de l'alliage à la compression. Il exprime le rapport entre les allongements relatifs transversaux et longitudinaux. Généralement, pour l'aluminium en prend la valeur de 0,35. [9, 10].

L'aluminium est très bien déformable à froid et à chaud, très ductile à toutes températures. Ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, et cela grâce à sa structure cristalline cubique à face centrées (CFC). [8, 9, 10].

Les principales caractéristiques retenues sont regroupées dans le tableau **I.1**.

Tableau I.1: Les principales propriétés mécaniques de l'aluminium [4].

Propriétés	Valeur
Module d'élasticité	70000 MPa
Module de cisaillement	27000 MPa
Charge de rupture	80 à 100
Coefficient de POISSON ν	0,35
Limite d'élasticité 0,2%	30 à 40 MPa
Coefficient de dilatation linéique α	$23. 10^{-6} K^{-1}$
Masse volumique ρ	$2700 Kg.m^{-3}$
Allongement à la rupture A	25 à 30 %

I.1.11. Propriétés chimiques

L'aluminium est un métal fortement oxydable grâce à la couche protectrice d'alumine (Al_2O_3) qui se forme à la surface, l'aluminium et ses alliages résistent relativement bien à la corrosion. Cette se caractérise par sa compacité et sa réfraction. On peut d'ailleurs rendre cette couche plus épaisse par anodisation pour résister aux attaques violentes des bases, l'aluminium et ses alliages peuvent être utilisés comme revêtement extérieur de bâtiments.

Lorsqu'il y a contact de l'aluminium avec certain corps comme l'eau de mer et les solutions salines, cette couche d'alumine peut être altérée, l'oxydation de l'aluminium se poursuit alors très rapidement. Donc le comportement de l'aluminium dépend des propriétés du film d'oxyde qui le recouvre.

Les cas de mauvaise résistance de l'aluminium à la corrosion sont souvent liés à une modification du degré de porosité du film d'oxyde. De plus, l'aluminium a un mauvais comportement en présence de certains acides minéraux surtout l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et les acides organiques. [3, 5, 7].

I.2. Fabrication de l'aluminium et ses alliages

I.2.1 Fabrication de l'aluminium :

L'aluminium n'est jamais retrouvé sous forme de métal pur mais en combinaison avec l'oxygène et autres éléments. D'ailleurs L'importance prise aujourd'hui par l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de toute une filière avec, en amont, le minerai et, en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis et finis.

Ce métal est très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (la composition moyenne est de 55% d' Al_2O_3 , 5% SiO_2 , 15% Fe_2O_3 et 25 % de perte au feu), représentent la source de production de l'aluminium.

I.2.2. Minerai :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium : il constitue 8 % de la lithosphère sous forme de silicates plus ou moins complexes à faible teneur en aluminium. Mais dans certaines régions, sous l'action prolongée de l'eau, l'élimination d'une partie importante de la silice a donné des roches riches en aluminium (la composition moyenne est de 55% d' Al_2O_3 , 5% SiO_2 , 15% Fe_2O_3 et 25 % de perte au feu), ce sont les bauxites qui constituent actuellement la source quasi exclusive

d'aluminium. D'ailleurs, le seul minerai utilisé dans la métallurgie de l'aluminium est la bauxite. Celle-ci se présente sous forme de poudre de granules de roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Ces différentes formes et couleurs sont dues à la présence d'autres constituants, notamment : [7]

- Oxyde de fer (bauxite rouge) ;
- Oxyde de Silicium (bauxite blanche).

Du minerai au produit fini, l'aluminium doit subir une série de traitements.

I.2.3. Production d'alumine :

A partir du minerai, on extrait l'alumine par le procédé Bayer. La bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par de la soude pour obtenir une liqueur d'aluminate de soude. Après décantation (élimination des oxydes de fer et de silicium), la liqueur restante est envoyée dans des décomposeurs pour la précipitation de l'alumine. L'alumine est récupérée par filtration, puis calcinée.

La figure I.2 illustre le schéma du procédé d'extraction de l'alumine.

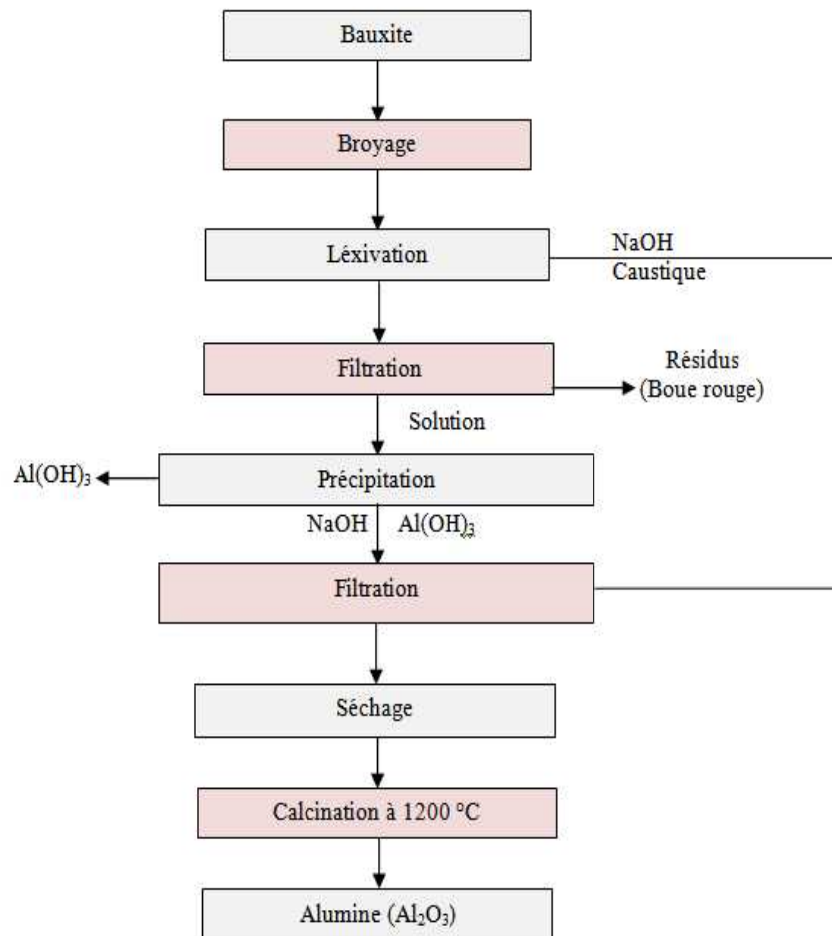


Figure I.2 : procédé d'extraction d'alumine.

I.2.4. Production 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 de 0.1%, qui est inférieur à la limite de la solubilité du fer en aluminium à la température ambiante. 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 du fer en 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 constitue 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. [11]

I.2.5. Le laminage :

Les produits laminés sont des produits d'aluminium les plus courants. Ce sont des produits minces que l'on appelle lames, feuilles ou plaques, en fonction de leur épaisseur (Figure I-3).

Les lames ont une épaisseur inférieure à 0.15 mm, alors que les plaques ont une épaisseur égale à 6.35 mm. Entre ces deux limites, on produit des feuilles. Pour l'ingénieur en construction, les lames ont peu d'intérêt. La première étape du laminage consiste à nettoyer le lingot pour le débarrasser de sa couche d'oxyde et à le chauffer dans un four jusqu'à une température se situant entre 350 et 550 °C, en fonction des alliages. Le lingot est ensuite placé entre des rouleaux compresseurs, dans un mouvement de va-et-vient, il est aminci en diminuant progressivement la distance entre les rouleaux. Les lames et les feuilles, qui sont amenées à une épaisseur de 6mm pour le moment, sont enroulées à cette étape et sont refroidies pendant 24 heures avant d'être laminées à froid, à une température inférieure à 60°C pour en réduire d'avantage l'épaisseur. Le laminage à froid permet d'atteindre une épaisseur minimale de 0.1mm. Des laminoirs spécialisés peuvent enfin réduire l'épaisseur des lames jusqu'à 0,007 mm. Des étapes de recuit sont aussi nécessaires durant cette opération pour adoucir le métal [4].

Le laminage à froid induit une structure et une texture sensible à la corrosion (Figure I-4).

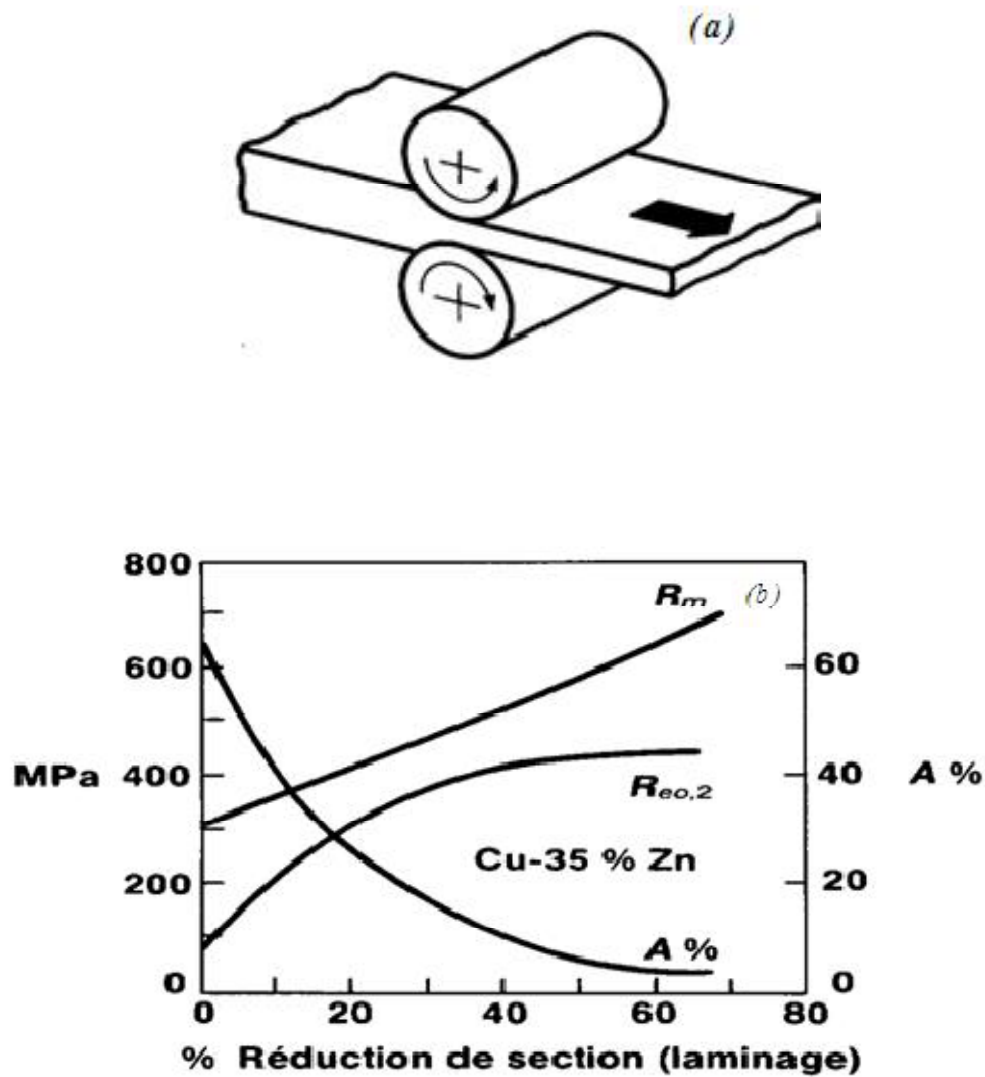


Figure I.3 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés de l'alliage Cu-35% Zn avec le taux du laminage [4]

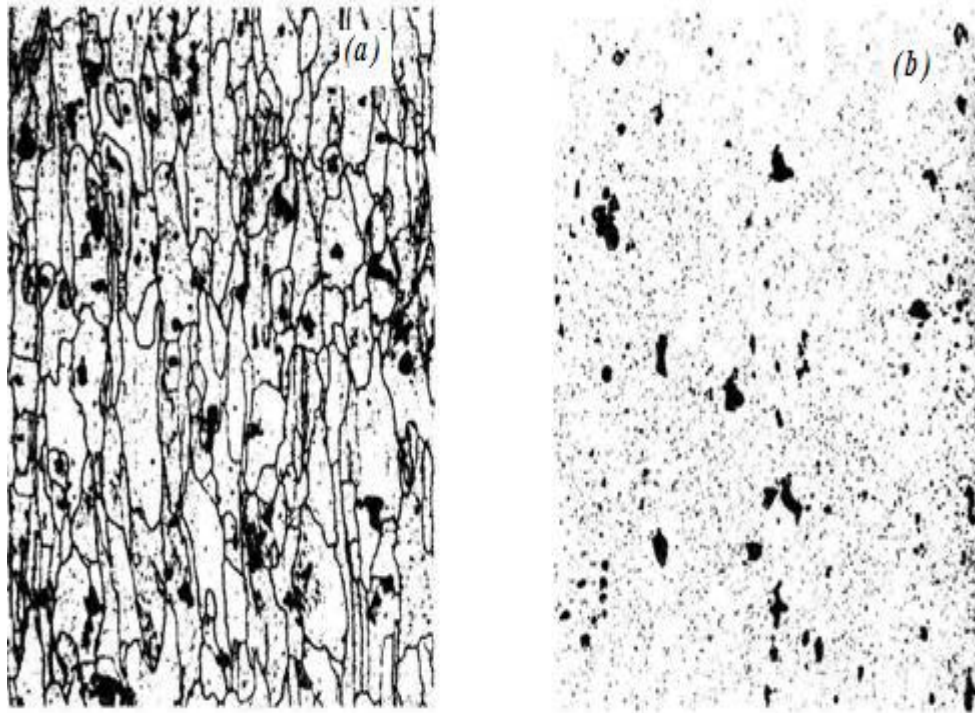


Figure I.4 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid [4]

I.3. Les atouts de l'aluminium et ses alliages

I.3.1. Légèreté :

La légèreté est l'une des atouts de l'aluminium auquel on pense spontanément, au point qu'on a très longtemps utilisé l'expression « alliages légers » pour désigner ce qu'on appelle maintenant alliages d'aluminium. L'aluminium est le plus léger des métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg /m³, soit presque trois fois moindre que celle des aciers. [1] L'allègement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium qui peut atteindre 50 % par rapport à une structure équivalente en acier. Cette capacité d'allègement des structures est déjà exploitée dans des applications telles que le transport routier où l'allègement peut atteindre 30 à 50%.

- le transport ferroviaire : le TGV, les métros et les tramways.
- le transport maritime : les navires à grande vitesse.
- l'aérospatiale : tous les avions sont construits en alliage d'aluminium.
- les applications mécaniques : les éléments de machines en déplacement comme les moteurs et les robots.

- le transport d'énergie électrique : à résistance égale, le conducteur en alliage d'aluminium est deux fois plus léger que le conducteur en cuivre.

- la manutention des demi-produits et des objets en alliages d'aluminium est plus facile du fait de sa légèreté.

En mobilier urbain, c'est donc une pose facilitée par des moyens de manutentions moindres: Un homme seul peut porter 2, voir 3 barrières à lui seul. [12]

I.3.2. Conductivité électrique :

La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre des 2/3 de celle du cuivre. L'aluminium non allié et certains alliages sont très utilisés comme conducteurs sous forme de barres et sous forme de tubes, dans de nombreuses applications électriques, telles que les postes de connexion, les barres de distribution.

A conductivité égale, la section d'un conducteur en aluminium est 1,6 fois plus grande qu'un conducteur en cuivre. L'économie réalisée sur le poids s'élève à 50 % environ.

L'aluminium et ses alliages sont notamment utilisés pour le blindage des câbles téléphoniques grâce à leur bonne conductivité électrique. [12]

I.3.3. Conductivité thermique :

L'aluminium offre une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre, ce qui justifie son utilisation pour les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les éléments frigorifiques, les disques de frein, les échangeurs pour l'automobile, les moules en alliages à hautes caractéristiques mécaniques, etc.

L'utilisation de l'aluminium est aussi très importante dans l'électronique, dans le dessalement de l'eau de mer, dans les échangeurs de climatisation, domaines où il est question d'échange thermique, à condition bien sûr que le milieu s'y prête dans les échanges liquide/liquide ou liquide/gaz.

Ainsi, lors d'utilisations comme des lattes de bancs ou des abris fermés (caissons projecteurs ...), cette bonne diffusion permet d'amoindrir les températures de contact ou de fonctionnement pour une meilleure durée de vie des appareils. [12].

I.3.4. Tenue à la corrosion :

Une couche très compacte d'oxyde se forme naturellement à la surface de l'aluminium et le protège de la corrosion.

L'aluminium et ses alliages ont une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel comme l'a montré leur utilisation dans le bâtiment, l'équipement du territoire, la construction navale, etc.

Pour les utilisateurs, cela se traduit par une longue durée de vie du matériau ou des équipements, tels que toitures, bardages, équipements de ports de plaisance, bateaux, avions, ...etc.

L'aspect du matériau est conservé du fait de la très bonne tenue à la corrosion. Cependant l'aspect peut être amélioré par une anodisation ou un thermolaquage réalisés une fois pour toutes, notamment dans les applications telles que le bâtiment, l'aménagement intérieur et extérieur, les véhicules, le mobilier urbain, les équipements de signalisation routière. [12]

I.3.5. Aptitudes aux traitements de surfaces :

Les traitements de surface de tout genre ont plusieurs objectifs parmi lesquels:

- La fabrication de produits esthétiques ou décoratifs,
- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion «naturelle» est jugée insuffisante,
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement,
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle. [13]

I.3.6. Diversité des alliages d'aluminium :

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisateurs envisagées. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi, le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal 2000 pour le Cuivre, 3000 pour le Manganèse, 4000 pour le Silicium, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si et 7000 pour le Zinc.

D'une famille à une autre les propriétés sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables et résistants à la corrosion tandis, que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique. Les alliages de la série 3000 (composants radiateur du chauffage automobile) se caractérisent par :

- Une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium.
- Une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage.
- Une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation.[8]

I.3.7. Recyclage :

L'aluminium fait partie des matières les plus recyclables.

L'aluminium recyclé est utilisé dans une démarche qui allie l'esthétique à des motifs économiques, sociaux et politiques. En effet, de nos jours, des préoccupations d'ordre économique et environnemental gouvernent le recyclage des matériaux. L'aluminium bénéficie dans ce domaine d'un avantage certain. Il peut être recyclé à plusieurs reprises sans que sa qualité soit altérée, et la production d'aluminium secondaire est source d'économie d'énergie. Elle ne consomme environ que 5% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium primaire, c'est-à-dire fabriqué à partir de sa matière première. Favorable à l'environnement et apprécié par l'opinion publique, le recyclage de l'aluminium constitue en outre une activité économiquement rentable. [14]

Actuellement, 30 % de l'aluminium consommé provient d'aluminium recyclé. Ce recyclage est un atout essentiel pour l'aluminium dans une perspective de développement durable, car il participe à la lutte contre l'accroissement des déchets, il permet des économies de matières premières et d'énergie. [12]

I.4. Classification des alliages d'aluminium

Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium :

I.4.1. Les alliages de moulages :

Produits obtenus directement par moulage en coulant l'aluminium liquide dans des moules. Derrière cette simplicité relative se cachent plusieurs procédés de fonderie très différents les uns des autres tant par leurs modes opératoires que par leurs applications.

En effet, certains procédés de fonderie sont principalement destinés à la fabrication de prototypes ou de très courtes séries de pièces, tandis que d'autres sont développés pour répondre aux besoins de l'industrie automobile où les quantités sont toujours de l'ordre de centaines de milliers de pièces annuellement. [15]

On distingue :

➤ **Les alliages de première fusion**, élaborés à partir d'aluminium primaire, issu de l'électrolyte ;

➤ **Les alliages de seconde fusion, (appelés aussi alliages d'affinage)** : Ils sont élaborés par fusion des déchets récupérés .ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces automobiles du groupe motopropulseur, dans les pays développés uniquement, Une analyse chimique des alliages d'aluminium utilisés pour la fabrication des ustensiles de cuisine en Afrique montre que ces alliages sont élaborés a partir des pièces usées de la voiture, des cannettes de boissons, les boites la conserves ...etc. Cette même analyse à montrée que ces alliages contiennent les éléments chimiques lourds tels que Cd, Co, Cr, le Pb, Ni, Zn, et contaminent la chaîne alimentaire de l'homme, ceci a mené à une bioaccumulation par les métaux lourds de certains organes du corps tels que (le foie, les reins, la rate).

I.4.2. les alliages de corroyages :

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

Les principales propriétés de ces alliages sont une bonne résistance mécanique, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue et résistance aux multiples formes de corrosion. [16]

Ces produits sont obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou/et à froid tels que le filage, le laminage ils sont réparti en deux catégories

- Il existe deux catégories totalement différentes, les alliages à durcissement structural et les alliages sans durcissement structural.

I.4.2.1 Les alliages avec durcissement structural :

Le durcissement est un procédé d'amélioration des caractéristiques mécaniques par un traitement thermique qui comporte trois étapes :

- La mise en solution.
- La trempe.
- Le revenu ou la maturation à l'ambiante.

Ces alliages sont désignés selon la norme AFNOR NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'association de l'aluminium.

Ces alliages sont :

- Les alliages Al-Cu de la série 2000 sont des matériaux où l'élément d'addition principale est le cuivre et en moindre quantité le manganèse et le silicium. Ils sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu. Ils présentent une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faibles à cause de la teneur élevée en Cu, à cet effet ces types d'alliages sont toujours sous forme de plaque.
- Les alliages Al-Si-Mg de la série 6000 sont les alliages de filage par excellence, ils présentent par ailleurs, une résistance mécanique moyenne et une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants à la corrosion.
- Les alliages Al-Zn et avec ajout de Mg de la série 7000 qui possèdent une haute résistance mécanique et une bonne tenue à la fatigue et à la corrosion. Ces nuances sont largement employées en aéronautique et en armement. [6]

I.4.2.2 Les alliages sans durcissement structural :

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que (Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Mn). Leur durcissement correspond à une modification de structure provoquée lors de la fabrication d'un demi produit par déformation plastique tel que le laminage, le tréfilage le forgeage,etc.

Ce type d'alliages se comporte bien au soudage et possède une tenue à la corrosion élevée. La limite élastique et la résistance à la traction augmentent et l'allongement diminue. Au delà de la température de 150°C, le long séjour conduit à la diminution de la résistance. Un recuit de recristallisation entre 350 à 450°C peut produire un retour à l'état doux. Pour obtenir une structure à grains fins lors de la recristallisation, il exige au préalable une déformation allant jusqu'à 50 %. Leur usinage à l'état recuit est très difficile. [17]

Ces alliages sont désignés par :

- L'aluminium non allié de la série 1000 qui se caractérise par une résistance mécanique relativement faible, une excellente résistance à la corrosion atmosphérique et une très

bonne aptitude au soudage et à la mise en forme. Les nuances 1080A (Al 99,80%), 1050 (Al 99,50%) et 1100 (Al 99,00%) sont très utilisés dans le bâtiment, l'industrie chimique et dans l'emballage. L'aluminium raffiné 1199 (Al 99,99) est réservé à la décoration et aux condensateurs électrolytiques.

- les alliages aluminium-manganèse de la série 3000 qui ont les propriétés voisines de la série 1000 avec une résistance élevée (par exemple l'alliage 3003 qui tend à remplacer l'aluminium non allié).
- les alliages –silicium de la série 5000 ayant une résistance moyenne, une bonne aptitude à la déformation et au soudage, un excellent comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. Parmi ces alliages on cite: Les nuances 5005 et 5083. [6]

I.5. Désignation des alliages d'aluminium :

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.
- Les troisième et quatrième sont des numéros d'ordre et serve à identifier l'alliage.

La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium

Tableau I.2: Désignation des séries principales des alliages d'aluminium. [18]

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre(Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium et Silicium	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-

I.6. 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.

I.6.1.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.

I.6.2.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 100 kg 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)

I.6.3.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.

I.6.4.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.

I.6.5. 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.

I.6.6. 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 conserve, les capsules de bouchage et couvercles, etc.

I.6.7.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.

I.6.8.Transport d'énergie :

La faible densité de l'aluminium, combinée à et 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.

I.6.9.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). [19]

I.7. Utilisation du l'aluminium dans les emballages :

L'aluminium est le deuxième métal le plus courant sur terre après le silicium. Du point de vue technologique, sa légèreté constitue un atout pour tous les usages où le poids du composant est un handicap, comme dans les industries aéronautique, spatiale ou automobile.

Bombes aérosols est un emballage en aluminium caractéristique mais on le trouve aussi dans certaines boîtes de conserves, canette, tubes souples, capsules, couvercles, feuilles protectrices,... Il est également vendu sous forme de feuilles en rouleau, de raviers, de barquettes et autres contenants. [20]

I.8. L'effet de l'aluminium sur la santé :

L'aluminium peut entrer dans l'organisme humain par voies respiratoires, par la voie de la peau et les muqueuses, et par voie digestive avec les aliments qui en contiennent d'une manière naturelle. Nous ingérons aussi de l'aluminium avec les additifs alimentaires et les médicaments qui contiennent ce métal, ainsi qu'avec les boissons et les aliments cuits ou conservés dans les ustensiles en aluminium comme le fromage emballé dans du papier aluminium. Des cosmétiques contenant aussi de l'aluminium apportent eux aussi

l'organisme leur charge aluminique et par injection des bébés par des vaccins contenant des doses en aluminium.

Certaines maladies du système nerveux comme la maladie d'Alzheimer, seraient favorisées par l'omniprésence de l'aluminium dans notre environnement quotidien. D'autres symptômes sont également imputés à l'aluminium : maux de tête, troubles de la mémoire, fatigue, troubles digestifs. Au niveau osseux, l'aluminium empêcherait la bonne assimilation de certains éléments minéraux (calcium, phosphore, fluor).

CHAPITRE II

CORROSION DE L'ALUMINIUM

ET DE SES ALLIAGES

CHAPITRE II: CORROSION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Introduction :

La majorité des métaux ne sont pas stable du point de vue thermodynamique : au contact de l'atmosphère ils forment une couche qui peut ne pas être protectrice dans ce cas la dégradation du métal va se poursuivre plus au moins rapidement selon différents paramètres comme la température et l'humidité. Dans des milieux fluides les phénomènes sont plus complexes, dans ce cas nous parlons de la corrosion électrochimique. Cette dernière elle se produit lorsqu'il y a hétérogénéité soit dans le métal ou l'alliage métallique soit dans le milieu. Il y a formation d'une pile avec passage de courant.

Dans tous les cas, le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et son environnement liquide ou gazeux. Elle se produit généralement par une diminution de poids, d'altération de la surface et d'affaiblissement.

II.1. Facteurs de la corrosion :

II.1.1 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.

II.1.2 Le métal :

C'est sur la composition des alliages, les gammes de transformation et les traitements thermiques 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. [1]

- **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 des alliages à durcissement structural : 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.

II.1.3 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.

II.2. 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 physico-chimique 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. [21]

II.3. Comportement de l'aluminium en solution aqueuse :

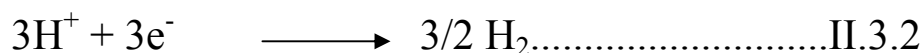
L'aluminium en contact avec une solution aqueuse s'oxyde de la manière suivante :

II.3.1. Formation de cation d'aluminium :

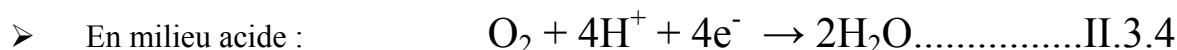


Les électrons libérés vont entrer simultanément au contact avec la solution dont le pH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère...). Selon les conditions thermodynamiques les deux réactions de réduction possibles sont :

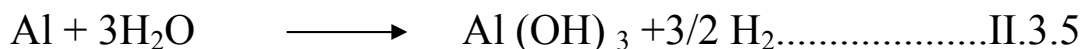
II.3.2. Réduction d'ions hydrogène (H^+) :



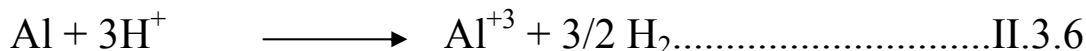
II.3.3. Réduction de l'oxygène O_2 :



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. [11]

II.4. Définition d'une électrode :

Une électrode est un métal en contact avec une solution. [17]

II.5. Tension de l'électrode à l'équilibre :

Les deux réactions se produisent simultanément à l'anode constituée du métal ou d'alliage, et à la cathode constituée du moteur de la corrosion induit un courant anodique et un courant cathodique de sorte que le courant électrique total est en apparence nul, nommé courant de corrosion.

Lorsqu'un métal est de valence n est plongé dans un milieu conducteur des ions M^{n+} passent dans la solution tandis que dans le métal apparaissent des charges négatives. Le passage des ions M^{n+} est limité dans le temps car pour quitter le métal ces ions doivent vaincre la répulsion des ions qui sont déjà dans la solution et l'attraction des électrons en excès qui sont chargés négativement. Le potentiel pris par le métal par rapport à la solution tend donc vers une valeur stationnaire appelée potentiel d'électrode. [21]

II.6. Evolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion :

Le suivi temporel du potentiel de corrosion a un double objectif : d'une part, il permet d'avoir une première idée du comportement de la surface en milieu corrosif (corrosion, formation d'une couche passive) et d'autre part, il permet de déterminer le temps nécessaire à l'obtention d'un régime stationnaire, indispensable pour les tracés potentiodynamiques.

Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence. Egalement désigné par potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre, il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement

mesurable. En outre c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié.

Lorsqu'on plonge un métal dans un électrolyte donné, la nature de l'interface métal/solution varie avec le temps donc le métal prend par rapport à une électrode de référence, un potentiel qui évolue avec le temps pour se stabiliser à une valeur appelée : potentiel libre ou d'abandon.

Ce potentiel n'est pas caractéristique du métal. Il dépend des conditions expérimentales liées au milieu (nature, pH, température) et de l'état de surface du métal. Il correspond à un équilibre tel que les vitesses d'oxydation et de réduction du métal sont égales, c'est-à-dire, il n'y a pas de courant net traversant l'interface. [22]

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

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

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

Le phénomène de polarisation se produit aussi entre deux métaux caractérisés par des potentiels différents. Dans ce cas, lorsque les deux métaux sont mis en contact dans un milieu conducteur, ils s'approchent d'un même potentiel. Si la cathode est facilement polarisée pour se rapprocher du potentiel de l'anode, alors la corrosion à l'anode est mineure (polarisation contrôlée par la cathode).

Dans le cas contraire où la polarisation de la cathode est plus difficile, alors l'anode se corrode davantage (polarisation contrôlée par l'anode). [23]

II.8. Courbe de polarisation :

La courbe de polarisation est la courbe de variation de la densité du courant en fonction du potentiel imposé à partir des valeurs inférieure au potentiel de corrosion jusqu'à des valeurs supérieure au potentiel de corrosion. Cette courbe permet de déterminer le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation, le courant de la corrosion n'est pas déterminé à partir de la courbe de polarisation, ceci est dû à la présence de plusieurs phénomènes contrôlant la corrosion. [17]

II.9. Résistance à la polarisation :

La mesure de la résistance à la polarisation (R_p) est une technique qui permet de suivre l'évolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion de l'échantillon. La résistance de polarisation est égale à l'inverse de la pente à la courbe de polarisation $i = f(E)$, au voisinage du potentiel de corrosion. [21]

$$R_p = \Delta E / \Delta I$$

II.10. Différente forme de corrosion :

Il existe plusieurs formes de corrosion de l'aluminium plus ou moins visibles à l'œil nu : Corrosion générale ou uniforme, Corrosion galvanique, Corrosion bactériologique.....etc la prédominance d'une forme de corrosion dépendra d'un certain nombre de facteurs inhérents au métal, au milieu et aux conditions d'emploi. Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages.

II.10.1. Corrosion générale (uniforme) :

L'aluminium se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde de 5 à 10 nm d'épaisseur et sa résistance à la corrosion dépend de la stabilité de cette couche d'oxyde vis-à-vis du milieu corrosif. La corrosion généralisée se caractérise par une diminution d'épaisseur uniforme sur toute la surface du métal : la couche d'oxyde étant dissoute d'une façon régulière par l'agent corrosif.

Dans une atmosphère naturelle, rurale ou marine, la vitesse de corrosion des alliages d'aluminium est extrêmement faible. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de 5 μm par an. D'une manière générale, la résistance à la corrosion généralisée de l'aluminium dépend du PH du milieu corrosif, la corrosion ne pouvant pratiquement se produire que dans les milieux acides avec $\text{pH} < 4$ et dans les milieux basiques avec $\text{pH} > 9$. Mais en fait, pour un pH donné, la vitesse de corrosion dépend fortement des ions présents dans la solution. Il existe des exceptions aux limites de pH à l'intérieur desquelles on peut utiliser l'aluminium : ainsi l'aluminium résiste à la corrosion dans l'acide nitrique concentré ($\text{pH}=1$) et dans l'ammoniaque ($\text{pH}=13$). [11]

II.10.2. Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse) :

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûre, est due à la formation d'une pile à aération différentielle entre un milieu confiné (appelé « crevasse » ou « caverne ») et la solution extérieure. L'aluminium et en général les alliages d'aluminium sans cuivre sont peu sensibles à la corrosion caverneuse. [8]

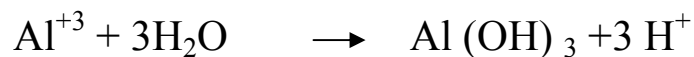
Les alliages dénués de cuivre sont en pratique relativement assez résistants à cette forme de corrosion.

II.10.3. Corrosion par piqûre :

La corrosion par piqûre se développe dans tous les milieux naturels, sous forme de cavités de profondeurs variables. Les conditions d'initiation et de propagation de la piqûration sont bien connues, même s'il s'agit d'un phénomène très complexe, dont le mécanisme n'est pas totalement déterminé Figure (II.1).

Les étapes de la corrosion par piqûre sont comme suit:

- ✓ **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.
- ✓ **Etape 3:** Rupture du film aux niveaux de défauts.
- ✓ **Etape 4:** Oxydation de l'aluminium et formation de complexes chlorurés ($AlCl_4^-$) et hydroxychlorurés ($Al(OH)_2Cl$).
- ✓ **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 $Al(OH)_3$ 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)

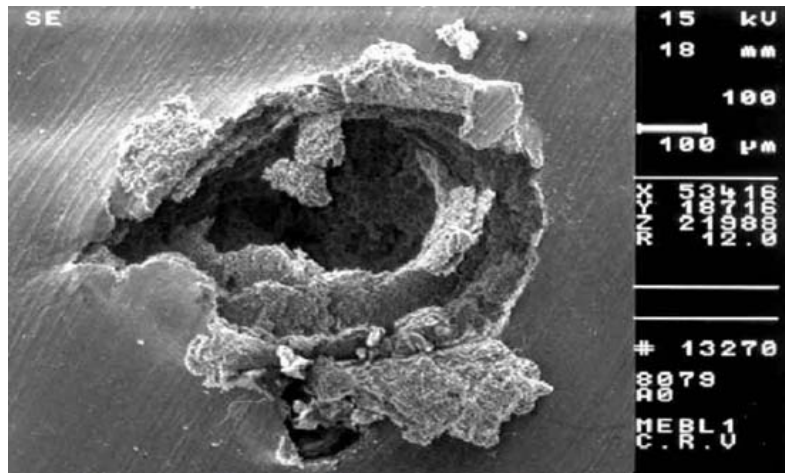


Figure II.1 : Corrosion localisée dans un alliage d'Al –Mg. [8]

II.10.4. 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 qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orienté dans une même direction [24].

II.10.5. Corrosion feuilletante :

La corrosion feuilletante (ou exfoliante) comme la corrosion intergranulaire est une conséquence du traitement thermomécanique préalable 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 des séries 2000, 5000 et 7000) se développe si les conditions de traitements thermiques ou de soudage sont mal adaptées. La corrosion feuilletante de l'alliage AlMn1 est caractérisée par une déformation locale de feuillets métalliques et fait apparaître des cloques à la surface du matériau. Il s'agit d'une attaque qui se propage généralement de façon inter-granulaire selon des plans Parallèles aux surfaces, séparées par de fins feuillets métalliques. Le déchaussement des grains est dû aux produits de corrosion formés, qui sont plus volumineux que les espèces initialement non corrodées. Le mécanisme de propagation est généralement assimilé à une corrosion inter granulaire, dirigé préférentiellement par les contraintes exercées par les produits de corrosion. Dans certains cas, la propagation est de type transgranulaire, la figure II.2 illustre ce processus.



Figure II.2 : corrosion feuilletante. [17]

II.10.6. 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) Figures (II.3) 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 intergranulaires 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 à froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement...)

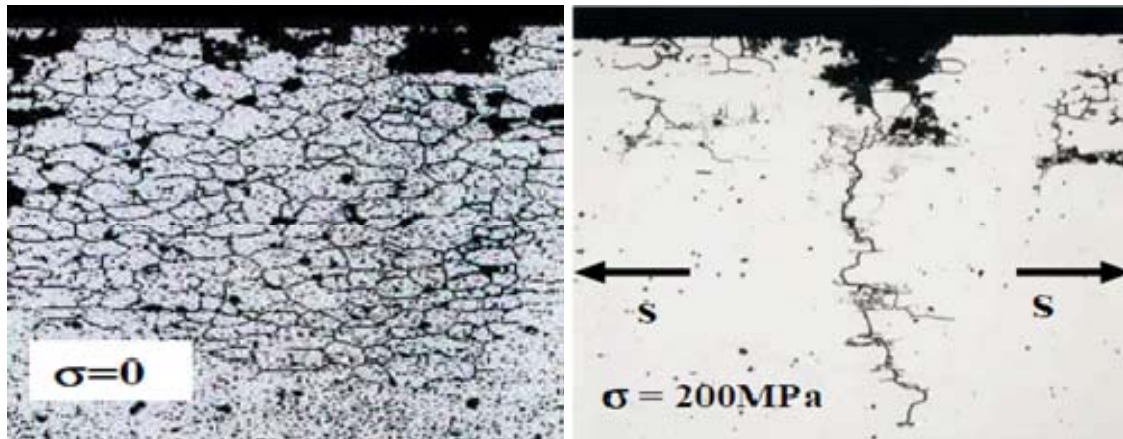


Figure II.3 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage Al-Mg [8]

II.10.7. Corrosion filiforme :

La corrosion filiforme est une forme de corrosion spécifique aux métaux peints. C'est avant tout une corrosion d'aspect, le métal sous-jacent ne subissant qu'une attaque très superficielle, quelques dizaines de micromètres de profondeur.

Elle se développe sous forme de filaments étroits de 0,1 à 0,5 mm de largeur et de quelques millimètres de longueur qui se propagent à l'interface métal-peinture. Ce phénomène se produit dans des atmosphères marines très humides.

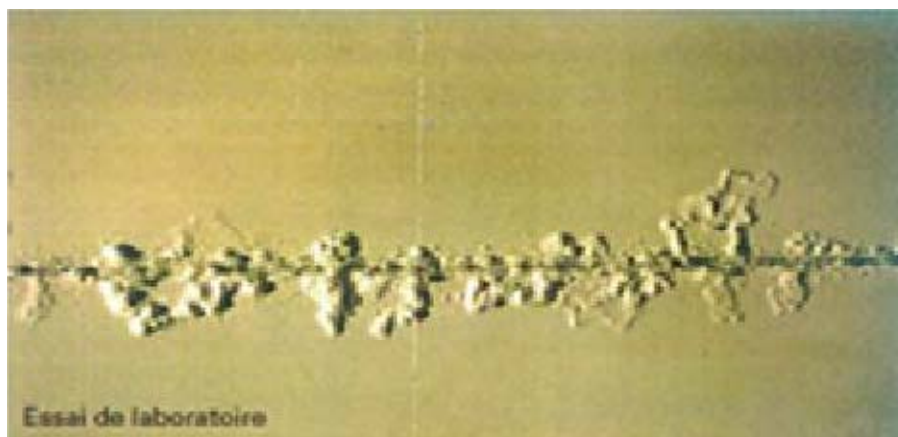


Figure II.4 : Corrosion filiforme de l'aluminium peint [25]

II.10.8. Corrosion intergranulaire :

La corrosion intergranulaire est un mode de corrosion structurale qui se propage dans le métal en attaquant soit les joints de grains, soit les zones adjacentes aux joints de grains (figure II. 5). Ce mode de corrosion résulte de la présence, aux joints de grains, d'une phase continue et anodique par rapport au cœur du grain. Cette phase peut être due à la présence de précipités intergranulaires anodiques comme les précipités Al_3Mg_2 présents dans les alliages de la série 5XXX ou à un appauvrissement d'éléments nobles à la périphérie du grain. La corrosion intergranulaire se résume alors à un couplage galvanique entre le cœur du grain et la zone anodique. Elle apparaît lorsque la différence entre les potentiels des deux phases est d'au moins 50 à 100 mV ; le potentiel global de l'alliage est alors compris entre les potentiels des deux phases. Si le potentiel de l'échantillon est supérieur à celui de la phase la plus noble, il y a coexistence des phénomènes de corrosion intergranulaire et de corrosion par piqûre. [26]

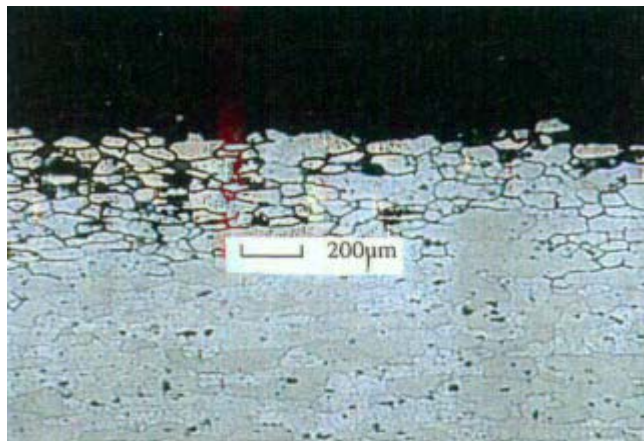


Figure II.5 : Vue en coupe d'un échantillon d'alliage 6013T6 ayant subi de la corrosion intergranulaire. [26]

II.10.9. Corrosion galvanique :

La corrosion galvanique est une forme de corrosion localisée dans la zone de contact entre deux matériaux de potentiels électrochimiques différents. Ce phénomène, pour survenir, nécessite outre un contact électrique entre les deux matériaux (courant électronique), un contact électrolytique (courant ionique). Ceci peut être observé par mise en contact de l'aluminium avec un métal plus noble comme l'acier par exemple, au sein d'un électrolyte ou atmosphère humide. C'est aussi le cas en général des alliages, contenant des phases intermétalliques de potentiel électrochimique différent de celui de la matrice. On

parle alors de phénomènes de microcouplage galvanique. La corrosion galvanique provoque la dissolution accélérée de l'élément le moins noble du couple, par polarisation anodique de ce dernier [27].

Contrairement aux différentes formes de la corrosion structurale la corrosion galvanique est indépendante de la texture de métal de son état métallurgique etc.

Forme de la corrosion galvanique

L'aspect de la corrosion galvanique d'Al est très caractéristique, elle n'est pas dispersée comme la corrosion par piqûre, mais au contraire, très localisée dans la zone du contact avec l'autre métal. L'attaque de l'aluminium est régulière et progresse en profondeur sous forme de caractères plus ou moins arrondis. La zone affectée par la corrosion galvanique est souvent plus brillante que le reste de surface.

Tous les alliages d'Al peuvent subir de la même manière une corrosion galvanique, en plus il peut y avoir une corrosion inter cristallin et feuilletant sur les alliages des familles 2000, 6000 et 7000 s'ils y sont sensible.

Conditions de la corrosion galvanique.

La corrosion galvanique fonctionne suivant le même principe, et il faut que les trois conditions suivantes soient simultanément satisfaites :

- Métaux de nature différente
- Présence d'un électrolyte
- Continuité électrique entre les deux métaux.

II.11. Protection des alliages d'aluminium contre la corrosion :

La corrosion des alliages d'aluminium ne présente pas en générale de réels problèmes en atmosphère, eau douce, eau de mer et pour la plupart des sols. Une «bonne résistance à la corrosion» sous-entend que l'aluminium peut être utilisé de façon durable sans protection de surface. En fonction de l'agressivité de l'environnement et des conditions d'utilisation, des mesures doivent néanmoins parfois être prises afin de limiter ou d'empêcher la dégradation. Il existe divers moyens de prévention focalisée sur le matériau ou le milieu.

II.11.1. Protection de l'aluminium par revêtement organique :

Les peintures ou vernis remplissent la double fonction suivante :

- ❖ protection contre la corrosion rencontrée dans toutes les applications (emballage, bâtiment industrie...).
- ❖ décoration : couleur et aspect de surface.

➤ **Nature des revêtements :**

Une peinture est constituée par:

- ✓ **liants**: polymères divers
- ✓ **pigments**: minéraux ou organiques
- ✓ **solvants volatils**

Les peintures donnant les meilleurs résultats sont celles qui nécessitent une cuisson (Thermo-réticulation).

➤ **Choix d'un système de protection :**

On utilise un revêtement multicouche dans lequel chaque couche remplit un rôle particulier.

- Première couche: assure l'adhérence métal/polymère
- deuxième couche: fonction coloration et barrière aux agents suivants :
 - rayonnement
 - humidité, acidité, ...etc
 - chocs, rayures, ...etc
- troisième couche: propriétés particulières: brillant ou mat, glissance, effets spéciaux...etc.

II.11.2 Emploi d'inhibiteurs de corrosion :

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement.

En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action.

On distinguera ainsi :

- **Les inhibiteurs anodiques** : Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur. La concentration en inhibiteur doit être suffisante pour atteindre l'intensité critique de passivation.
- **Les inhibiteurs cathodiques** : Au contraire des précédents, l'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles.

- **Les inhibiteurs organiques:** Ils constituent un groupe important car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface.

II.11.3 Traitement de la surface :

✓ Préparation de surfaces

- **Elimination des souillures superficielles**

Les procédés de fabrication laissent des souillures sur la surface du métal qui sont éliminées par les procédés de dégraissage et de désoxydation.

- **Modification d'aspect**

L'aspect de surfaces des alliages d'aluminium peut être modifié par les méthodes suivantes:

- traitements mécaniques : usinage, polissage, ponçage, projection de particules, microbillage, tribo-finition.
- traitements chimiques et électrolytiques: selon les réactifs, il est possible de modifier l'aspect pour obtenir des surfaces plus :
 - réfléchissantes: brillantage chimique
 - plus mates: satinage en milieu basique.

✓ Les revêtements métalliques

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques :

- **Les revêtements anodiques:**

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant catholiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Plus que l'absence de défaut, c'est donc l'épaisseur qui est un élément important de ce type de revêtement. En général, elle est comprise entre 100 et 200 μm .

- **Les revêtements cathodiques:**

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée

par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial.

II.11.4 Protection électrochimique : [16]

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet, cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, voire nulle. On distingue :

- **La protection cathodique** qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal.
- **La protection anodique**, d'origine plus récente, Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte.

Chapitre III:

*PROCÉDURES ET TECHNIQUES
EXPÉRIMENTALES*

III. PROCEDURES ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Introduction:

Dans ce chapitre nous présentons les opérations que nous avons effectuées, et nous décrivons les procédures, les techniques et les équipements utilisés pour mener à bien ce travail.

III.1. Préparation des échantillons:

Notre étude sera concentrée sur les aérosols qui apparaissent sur la figure ci- dessous

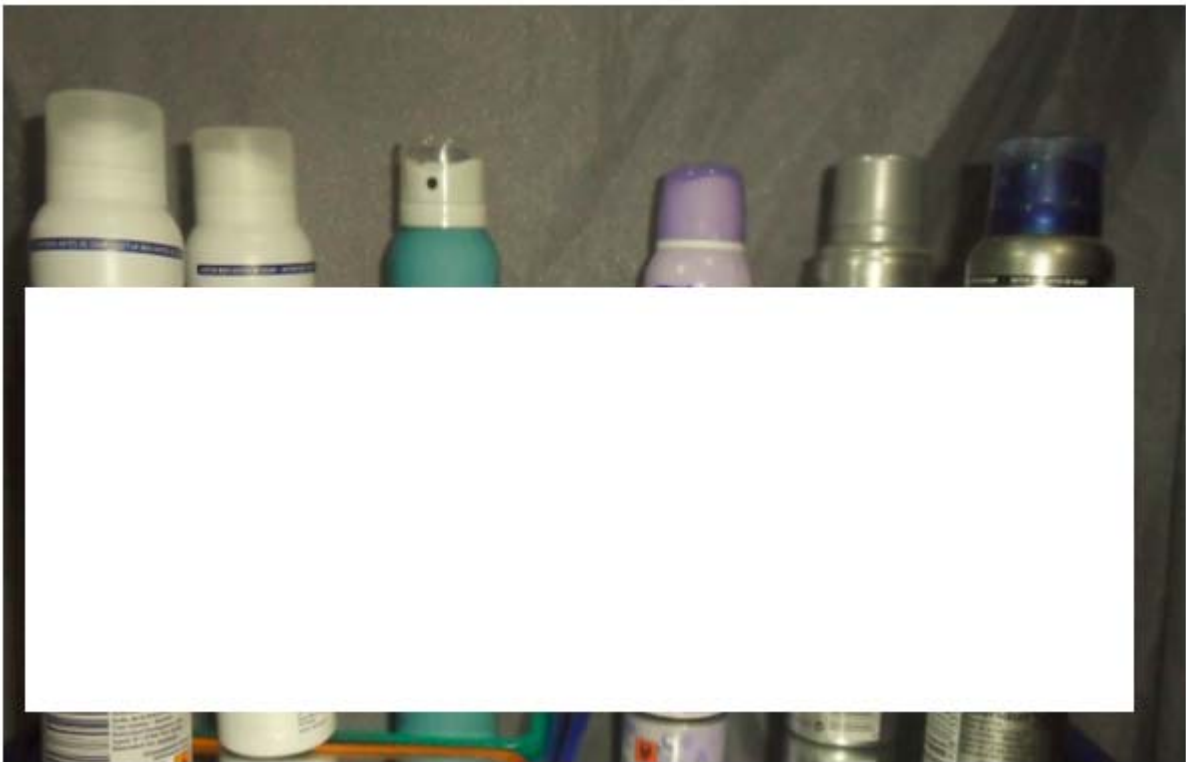


Figure III.1. Les différentes marques d'aérosols.

Nous avons utilisé les échantillons d'emballage d'aluminium pour les essais de corrosion, la microscopie optique, microscopie électronique à balayage, microdureté et traction à partir des aérosols de différentes marques. L'extraction et la préparation des échantillons à partir de ces aérosols, sont décrites dans les étapes suivantes :

➤ **Etape 1 : L'extraction des rectangles du l'aérosol :**

Dans cette présente étape qui consiste à découper les aérosols sous forme de rectangle en aluminium, à l'aide des ciseaux, la figure suivante illustre les rectangles juste après découpage :



Figure III.2. Les aérosols découpés en rectangles.

➤ **Etape 2 : Conception des échantillons :**

Dans cette étape on découpe 12 échantillons de dimension $2\text{cm} \times 2\text{cm}$, puis on les aplane soigneusement puis sur l'un des extrémités on fait des trous de 1.5mm de diamètre. La figure III.3 illustre d'une manière explicite la forme de ces échantillons.

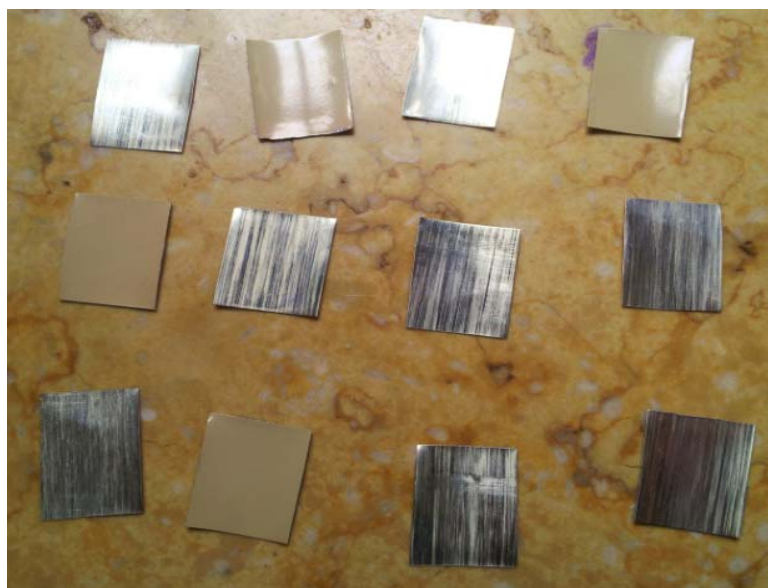


Figure III.3. Les échantillons découpés

➤ **Etape 3 : Préparation des conducteurs :**

Cette partie est consacrée aux étapes adoptées pour préparer les conducteurs.

- ❖ On prend des fils en cuivre de diamètre 1,5mm puis on fait des coupes de 20 cm.



Figure III.4. Le fil de cuivre de 20 cm.

- ❖ Dénuder les deux extrémités du fil de cuivre.



Extrémités
dénudées

Figure III.5. Conducteur de l'électrode des essais de la corrosion.

➤ **Etape 4 : Assemblage des échantillons et les conducteurs:**

Après avoir préparé les échantillons et les conducteurs, maintenant en va les assembler pour cela en fait passer les fils en cuivres dans les trous des échantillons, à l'aide d'une pince on serre le conducteur pour assurer un bon contact, et à l'aide d'un isolant en plastique on isole la partie du conducteur en contact avec la solution. La figure III.6 illustre cette procédure.



Figure III.6. L'assemblage de l'échantillon et le conducteur.

III.2. Préparation de l'électrode de référence pour les essais de la corrosion :

L'électrode de référence choisie pour les mesures lors de la corrosion libre est une électrode d'Ag/AgCl.

Pour préparer l'électrode d'Ag/AgCl nous avons immergé un fil d'argent pendant quelques secondes dans l'eau de javel riche en (ClO^-) jusqu'à ce que la couleur de sa surface devienne noire, cette couleur est un signe de la formation d'une couche d'AgCl à la surface du fil d'argent (Figure III.7). Pour éliminé les molécules de (ClO^-) accroché à la surface de l'électrode nous avons rincé l'électrode avec de l'eau déminéralisée.

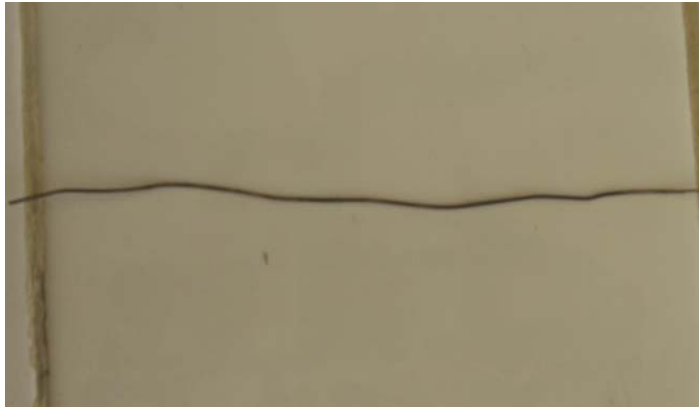


Figure III.7 : Electrode de référence.

III.3. Préparation du bain de corrosion :

Nous avons mélangé dans une fiole 1 litre d'eau déminéralisée avec 3 gramme de NaCl à haute pureté pour obtenir une solution de 0,3% NaCl (3 g/l), qu'on met par la suite dans un récipient en verre. Nous avons choisie pour les essais de corrosion une solution de 0,3% de NaCl qui représente une solution de faible concentration.



Figure III.8. Présentation des échantillons dans le bain de corrosion.

III.4. Mesure du pH de la solution :

Après avoir préparé la solution, on mesure son pH à l'aide d'un pH-mètre.

Le pH de la solution de 0,3% de NaCl est égal à 5,43. (pH = 5,43).

➤ Fonctionnement du pH-mètre :

Le pH-mètre est un appareil qui permet la mesure du pH d'une solution. Il comporte une électrode en verre qu'on immerge dans la solution et un afficheur sur lequel on lit la valeur de pH après stabilisation.

Un étalonnage préalable du pH-mètre avec une solution-étalon permet d'effectuer ensuite une lecture directe du pH.

III.5. Montage pour l'essai de la corrosion :

On a préparé quatre échantillons de travail pour chaque marque de l'aérosol (4x3) par série d'expérience, 2 qui sont polis et 2 qui ne sont pas polis puis on les a immergés dans un récipient contenant la solution de 0,3% de NaCl, nous avons relié l'électrode de travail avec l'électrode de référence en Ag/AgCl.

Nous avons mesuré le potentiel de la corrosion libre par l'intermédiaire d'un multimètre de marque DIGITAL, chaque 10s on prend une mesure pendant 1min, après chaque 30s on prend une mesure pendant 5mn, après chaque 10mn on prend une mesure jusqu'à 1heure, après chaque 24h on prend une mesure pendant 3jours.

La corrosion se produit au niveau de l'électrode du travail et la réduction au niveau de l'électrode de référence (Ag/AgCl). L'électrode Ag/AgCl est plus noble que l'électrode d'Aluminium.



Figure III.9. Montage pour l'essai de la corrosion libre

III.6. Analyse microscopique des échantillons:

La connaissance de la structure métallurgique de l'alliage à étudier est un point essentiel pour la compréhension des divers phénomènes intervenant dans le processus de corrosion. Les techniques disposées pour cette partie sont : le microscope optique (MO) et le microscope électronique à balayage (MEB).

III.6.1. Observation à l'aide de microscope optique:

Avant de passer à l'observation de la surface des échantillons non corrodés au microscope, nous avons préparé les échantillons par les techniques suivantes :

✓ **l'enrobage :**

Pour faciliter la manipulation de l'échantillon lors du polissage on a effectué un enrobage à froid en utilisant une patte ABRO se solidifiant à la température ambiante.

✓ **Le polissage :**

❖ **Les équipements utilisés pour le polissage :**

La polisseuse :

Nous avons utilisé une polisseuse à deux disques de types « STRUERS » alimentés sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W. (Figure III.10).



Figure III.10 : Polisseuse utilisée

Les échantillons préparés sont présentés dans la **figure III.11** :

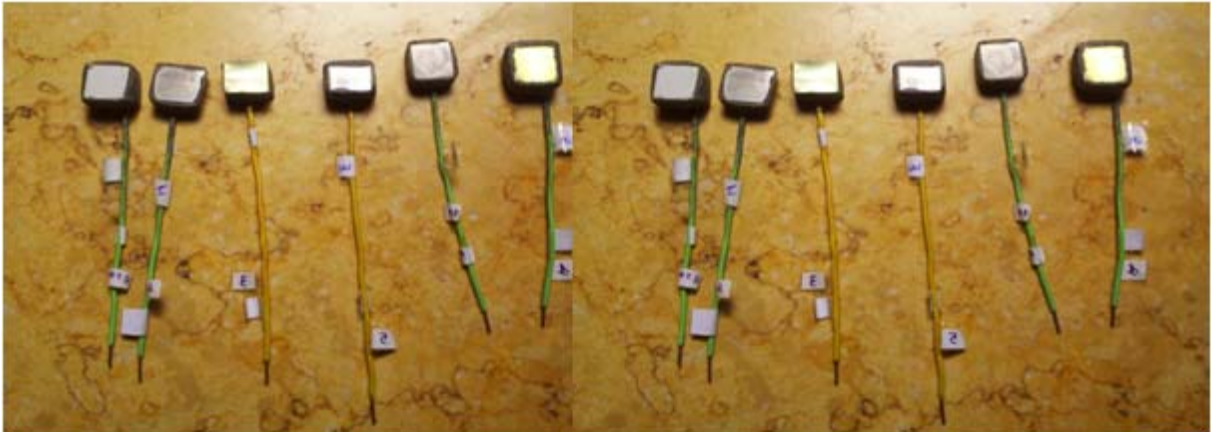


Figure III.11: Echantillons préparés.

Microscope optique :

Pour procéder à l'observation des différents échantillons avant et après corrosion, On a utilisé un microscope optique universel de type ZEISS, alimenté sous une tension de 220V avec une fréquence de 50 Hz et une puissance de 100W. Muni d'un appareil-photo automatique, cet appareil est doté d'une caméra reliée à un ordinateur permettant d'enregistrer directement les micrographies.

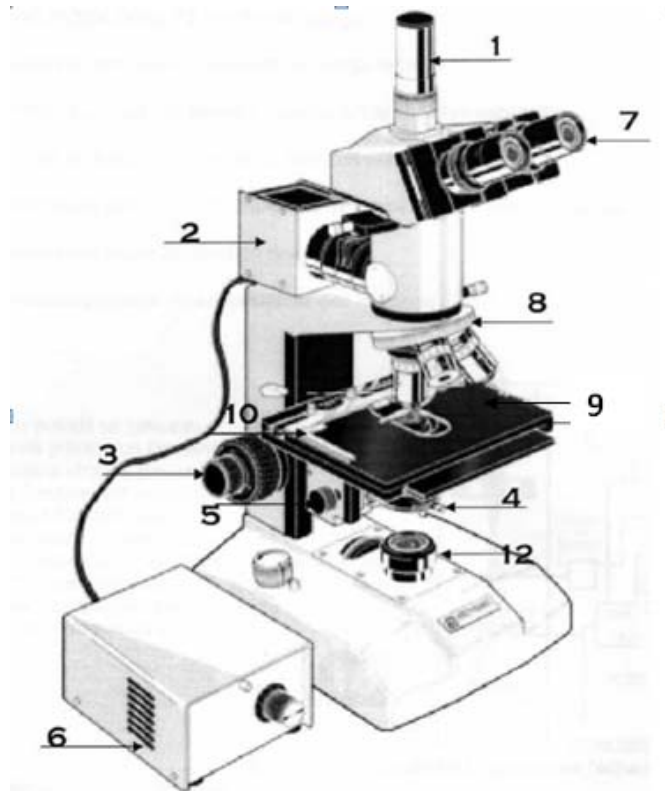


Figure III.12 : Microscope métallographique

Les accessoires de ce microscope sont :

- 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 5, 10 et 40X.
- 10- Porte échantillon.
- 11- Platine.
- 12- Lampe pour utilisation en transmission.

La microscopie optique (MO) est utilisée afin, de caractériser la morphologie de dégradation des échantillons après corrosion.

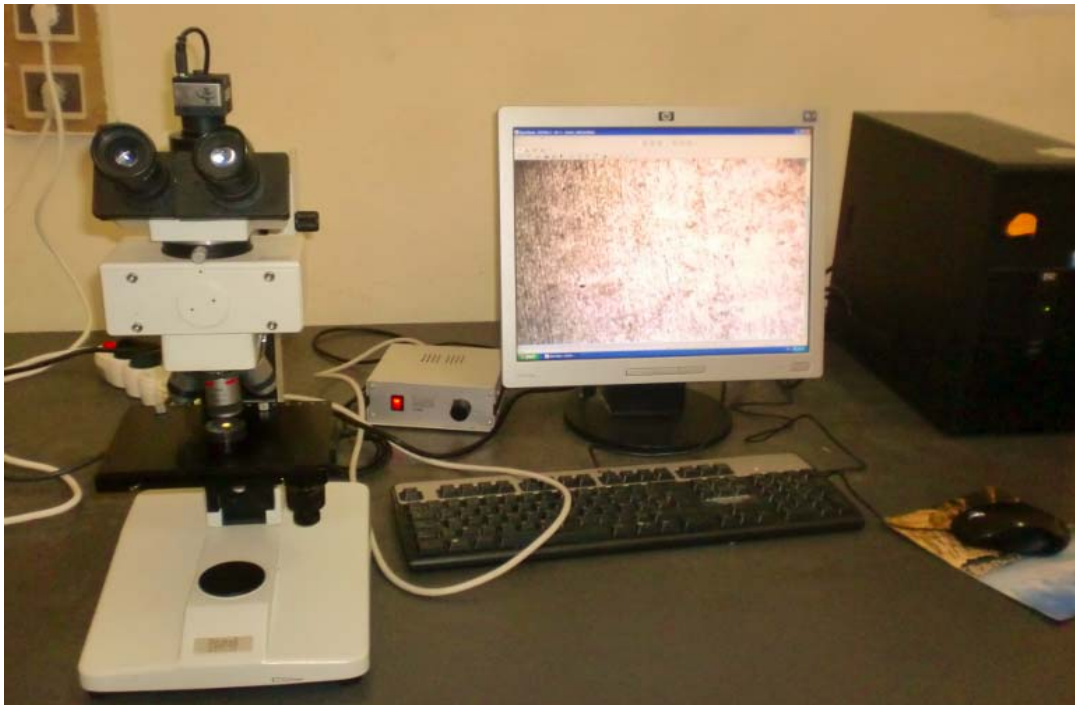


Figure III.13: Microscope optique

III.6.2. Observation à l'aide de microscope électronique à balayage (MEB) :

III.6.2.1. Définition microscopie électronique a balayage :

Le microscope Electronique à Balayage (MEB) est un instrument scientifique permettant de réaliser des images de la surface d'objets en 3 dimensions. Avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre. La résolution d'un instrument de grossissement est définie par la taille minimale détectable par l'œil humain sur l'image produite par cet instrument. Ceci signifie qu'une image produite par un MEB permet de différencier distinctement deux points séparés de moins d'un nanomètre.

III.6.2.2. Présentation d'un microscope électronique a balayage :



Figure III.14 : Microscope électronique à balayage (MEB).

Le microscope électronique à balayage comporte :

- Un canon à électron qui envoie un faisceau d'électrons (source d'électrons primaire).
- Une lentille magnétique qui focalise les électrons comme peut le faire une lentille optique avec la lumière de manière à obtenir un faisceau très fin et focalisé ;
- Des bobines de balayage permettant de balayer la surface de l'échantillon à observer avec le faisceau d'électrons. Ces bobines sont positionnées perpendiculairement de manière à faire parcourir des lignes au faisceau de la même manière que dans une télévision ;

- Une pompe à vide permettant de faire le vide dans l'enceinte où se trouve l'échantillon. En effet, pour obtenir une mesure précise, il est important de faire le vide dans l'enceinte (environ 10^{-3} Pascal) ;
- Un détecteur permettant de détecter les électrons secondaires. Un détecteur d'Everhart Thornley est généralement utilisé. Les électrons secondaires sont « captés » grâce à un champ électrique positif d'environ 500 Volts de manière à diriger les électrons vers un scintillateur convertissant ces derniers en photons. Les photons ainsi produits sont envoyés vers un photomultiplicateur via une fibre optique pour retransformer les photons en un nombre important d'électrons qui sera mesurable par un dispositif électronique classique. Ce type de détecteur est utilisé pour faire de l'imagerie en électron secondaire, mais il existe d'autres techniques d'imagerie.

III.6.2.3. Principe de la microscopie électronique a balayage :

Le principe général est en somme assez simple: l'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique et on vient détecter les électrons secondaires de très faible énergie qui sont produits suite au bombardement de l'échantillon. Ces électrons secondaires sont amplifiés, détectés puis interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. Le MEB réalise donc une topographie de l'échantillon à analyser, c'est pourquoi le MEB fournit des images en noir et blanc où chaque nuance de gris est le résultat de l'intensité du courant détecté.

III.7. Essai de microdureté vickers :

III.7.1. Introduction :

L'essai de microdureté Vickers (HV) a été effectué sur l'alliage d'aluminium dont les surfaces ont été préalablement polies. Cet essai nous permet de mesurer la dureté de l'échantillon à l'échelle microstructurale. Le microduromètre utilisé est semi automatique de type ZWICK/Roell (Figure III.15).



Figure III.15 : Appareil de Microdureté.

La dureté quantifie la résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge F .

Elle est fonction de :

- forces de frottements sur la surface du matériau ;
- géométrie du pénétrateur ;
- force appliquée.

III.7.2. Principe de l'essai de microdureté :

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté.

Après avoir préparé la surface à indenter de la manière décrite précédemment (microscopie optique) en veillant à ce qu'elle soit parfaitement parallèle à la surface de contact, celle-ci est examinée au moyen du système de microscopie, solidaire à l'appareil, pour mettre en évidence les phases en présence. Ensuite, on fixe les paramètres d'expérience et la charge à appliquer de sorte que le logiciel utilise ces données pour le calcul de la microdureté après mesure des diagonales de l'empreinte.

Ensuite, on choisit la phase à tester et on la ramène sur le point de la règle. Lorsque l'indentation est lancée, l'objectif du microscope est retiré automatiquement et le pénétrateur vient s'enfoncer dans la phase ciblée. En fin, le système remet le microscope et permet de visionner l'empreinte et de mesurer ses diagonales. Après validation des mesures. L'appareil calcule automatiquement la dureté correspondante en utilisant la formule adéquate.

Dans notre cas, nous avons effectué plusieurs essais pour chaque échantillon des trois marques d'aérosols et les mesures ont été réalisées en appliquant une charge de 100g.f pendant 20 secondes.

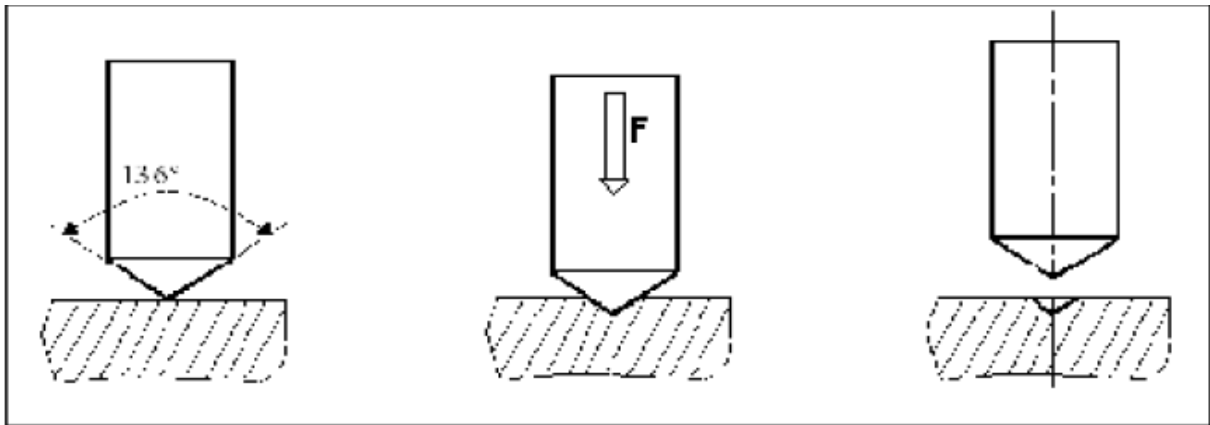


Figure III.16 : Principe de l'essai Vickers

III.8. Essai de traction :

III.8.1. Introduction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques. Ainsi, dans ce qui suit nous présenterons les résultats associés à cette technique expérimentale.

III.8.2. But de l'essai de traction :

Le but de cette expérience est de déterminer les propriétés mécaniques et les caractéristiques usuelles telles que le module d'élasticité (E), la contrainte à la rupture (σ_r), la résistance maximale (R_m).

III.8.3. Principe de l'essai de traction :

Cet essai destructif consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction, et cela généralement jusqu'à rupture.

L'éprouvette utilisée de géométrie parfaitement définie est encastrée à ses deux extrémités dans des mors ou des mâchoires. L'un de ces mors est fixe. L'autre mors est mobile et relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement imposé ainsi qu'à un système dynamométrique permettant de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et la déformation correspondante.

L'éprouvette au repos présente une longueur initiale L_0 et une largeur initiale l_0 . Lorsque les efforts sont appliqués axialement, un allongement est constaté suivant la longueur L , tandis que sa largeur l , diminue.

La contrainte nominale
$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

F est la force appliquée et S_0 est la section initiale de l'éprouvette.

La déformation nominale mesure l'allongement relatif, $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$.

III.8.4. Montage expérimental

III.8.4.1. Machine de traction :

La machine de traction utilisée est de type Thümler (Figure III.17). Elle est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse mobile équipé d'un capteur de force et d'un dispositif d'amarrage (Figure III.18) variant suivant la forme de l'éprouvette. L'effort est exercé par des vérins hydrauliques sur la traverse mobile activée par un moteur électrique.

La machine possède une vitesse de chargement qui varie de 1 à 500 mm/min. Elle est pilotée par un ordinateur en temps réel qui permet l'acquisition des données et leur traitement rapide à l'aide d'un logiciel.



Figure III.17: Machine de traction.

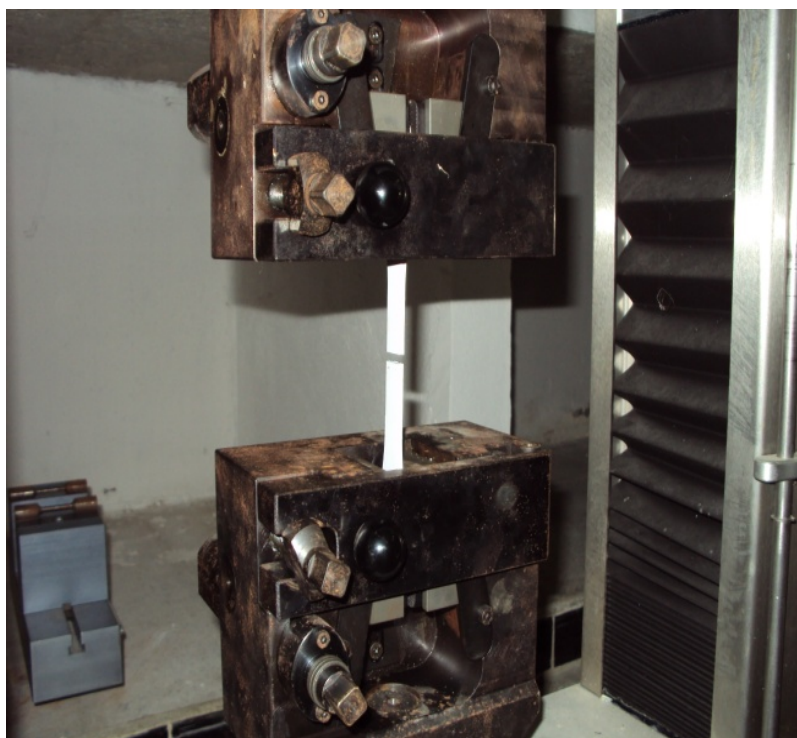


Figure III.18 : Dispositif d'amarrage des éprouvettes

III.8.4.2. Les éprouvettes de traction :

Les dimensions des éprouvettes utilisées sont présentées dans la figure suivante :

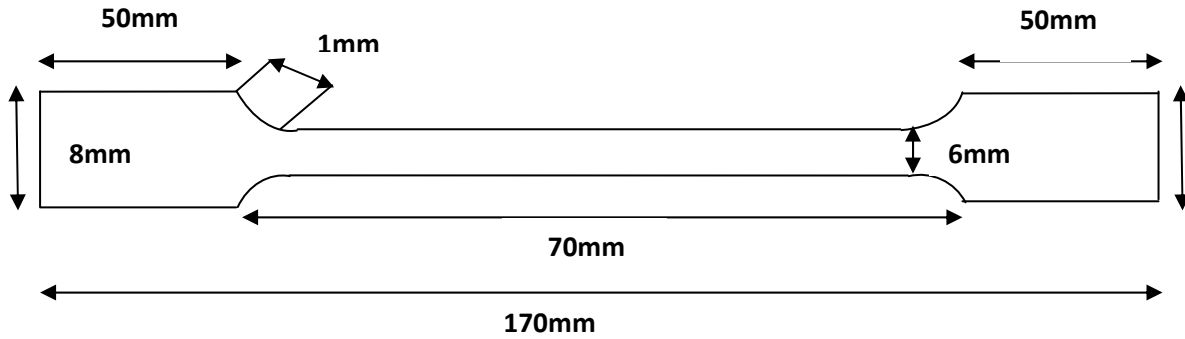


Figure III.19. Les dimensions de l'éprouvette de traction utilisée.

$e = 0.5\text{mm}$ (épaisseur de l'éprouvette)

$S_0 = 6 \times 0.5 = 3\text{mm}^2$ (surface initiale de l'éprouvette).

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Introduction :

On tient à signaler que les séries d'expériences se basent sur les techniques expérimentales décrites dans le chapitre III, Techniques expérimentales.

Les résultats de caractérisation microscopiques, électrochimiques et chimiques, mécanique des différents aérosols de déodorant en aluminium sont présentés dans ce chapitre.

Les aérosols proviennent des tôles en aluminium obtenus par une mise en forme par le laminage.

IV.1. Analyse de la composition chimique des aérosols de déodorant :

Sachant que l'épaisseur des différentes marques d'aérosols de déodorant est de 0.5 mm, mais on a observé une variation de la dureté Vickers, de l'élasticité, la résistance à la traction, la longueur du domaine plastique et élastique d'un aérosol à un autre (Figure. IV.1, tableau. IV.1). Ceci dit l'analyse chimique de l'aérosol et l'histoire thermomécanique du matériau utilisé peut varier d'une marque à une autre. La norme internationale exige la fabrication d'emballage en aluminium (papier aluminium, aérosols...) par les alliages de séries 1000 et 8000, par ailleurs l'analyse faite à la SNVI a montré la présence d'une concentration importante et variable, d'un échantillon à un autre prélevé chacun d'un aérosol de marques différentes, du nickel, du molybdène, du chrome et carbone. (Tableau. IV.2).

N° de l'essai	Dureté Vickers (HV) aérosol de marque 1	Dureté Vickers (HV) aérosol de marque 2	Dureté Vickers (HV) aérosol de marque 3
1	52	43	44
2	57	48	49
3	44	49	56
4	48	47	43
5	49	47	40
Microdureté moyenne Vickers	50	47	46

Tableau. IV.1 : Dureté Vickers des différentes marques d'aérosols de déodorant : la charge pendant le test est de 100g.f.

Chapitre IV : résultats et interprétations

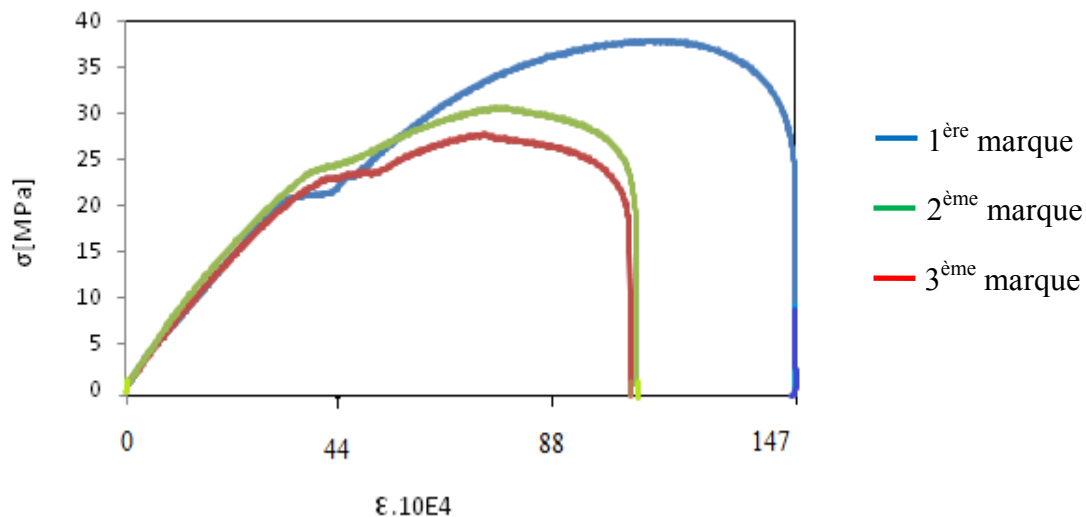


Figure IV.1 : Courbe de traction (Contrainte-déformation) pour trois marques d'aérosols de déodorant.

Elément Chimique	Molybdène	Nickel	Chrome	Carbone	Aluminium	Echantillon
% en poids	0.27%	4%	1.2%	0.35%	Reste	Aérosol de déodorant 1
% en poids	0.22%	/	1.2%	1%	Reste	Aérosol de déodorant 2

Tableau IV.2 : analyse chimique d'aérosols de déodorants

IV.2.Observation de la microstructure de différents échantillons d'aérosols de déodorant en aluminium :

IV.2.1.Observation au microscope optique :

Les observations au microscope optique de matériau constituant de trois aérosols de déodorant en aluminium de marques différentes nous ont permis d'observer, l'existence de particules fines de forme sphérique de taille moyenne de 50µm distribuées sur toute la surface de l'échantillon sur la microstructure constituant l'aérosols de marque 1 (Figure.IV.2 a,b), par contre pour les deux autres marques d'aérosols on observe un nombre moins important de particules intermétalliques de dimension 50µm sur la microstructure (Figure.IV.2 c,d), mais un grossissement plus important révèle la présence de particules

Chapitre IV : résultats et interprétations

intermétalliques plus fine. La présence de ces particules représentant une seconde phase, étant donné que celle-ci possède un potentiel différent de la phase mère, de ce fait des micropiles s'établissent, celles-ci favorisent l'apparition d'une corrosion galvanique à la surface du matériau.

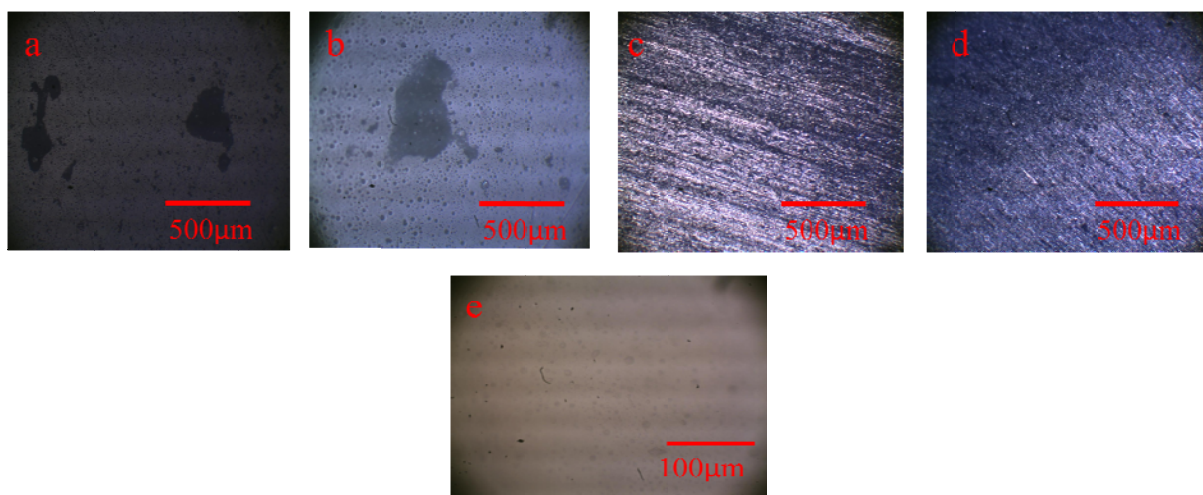


Figure IV.2: Microstructure au microscope optique de trois aérosols en aluminium de marques différentes

IV.2.2.Observation au microscope électronique à balayage :

L'analyse par microscope électronique à balayage a montré l'existence de deux types de particules intermétalliques dans l'échantillon de l'aérosol de déodorant de marque 1, le premier type de particules est blanche et très fines (particules A), le deuxième type de particules est sombre (particules B) et de dimension plus grande, tandis que sur les autres types d'aérosols nous observons uniquement les particules intermétalliques couleur blanche (Figure IV.3 a-b).

Les observations faites par le microscope optique et le microscope électronique à balayage la présence d'autres éléments autres que l'aluminium dans la composition chimique du matériau.

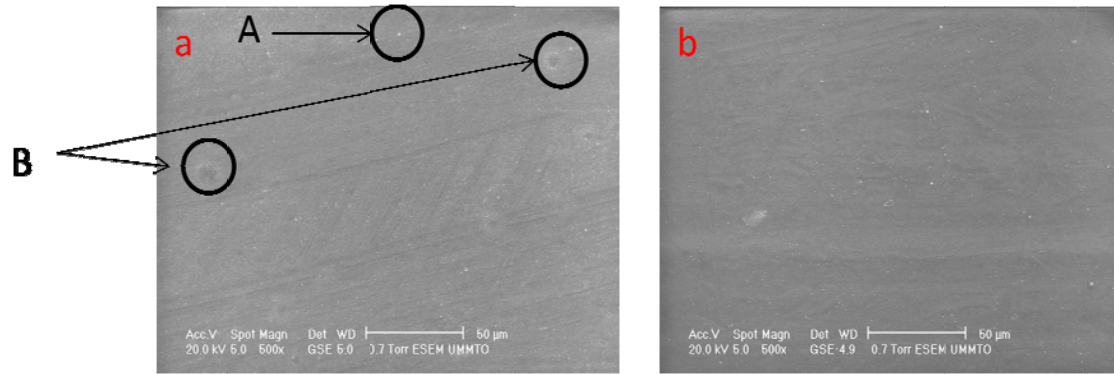


Figure IV.3 : Image au MEB de deux types d'aérosols en aluminium de marques différentes

IV.3.Morphologie de corrosion des différents échantillons d'aérosols en aluminium :

IV.3.1.Au microscope optique :

La corrosion observée sur la surface interne des aérosols de déodorant en aluminium des différentes marques est une corrosion localisée autour des autres phases observée (les particules intermétalliques) par le microscope optique et le microscope électronique à balayage. Cette corrosion est provoquée par une différence de potentiel entre les particules intermétalliques et la phase mère ou bien entre deux types différents de particules intermétalliques (Figure IV.4).

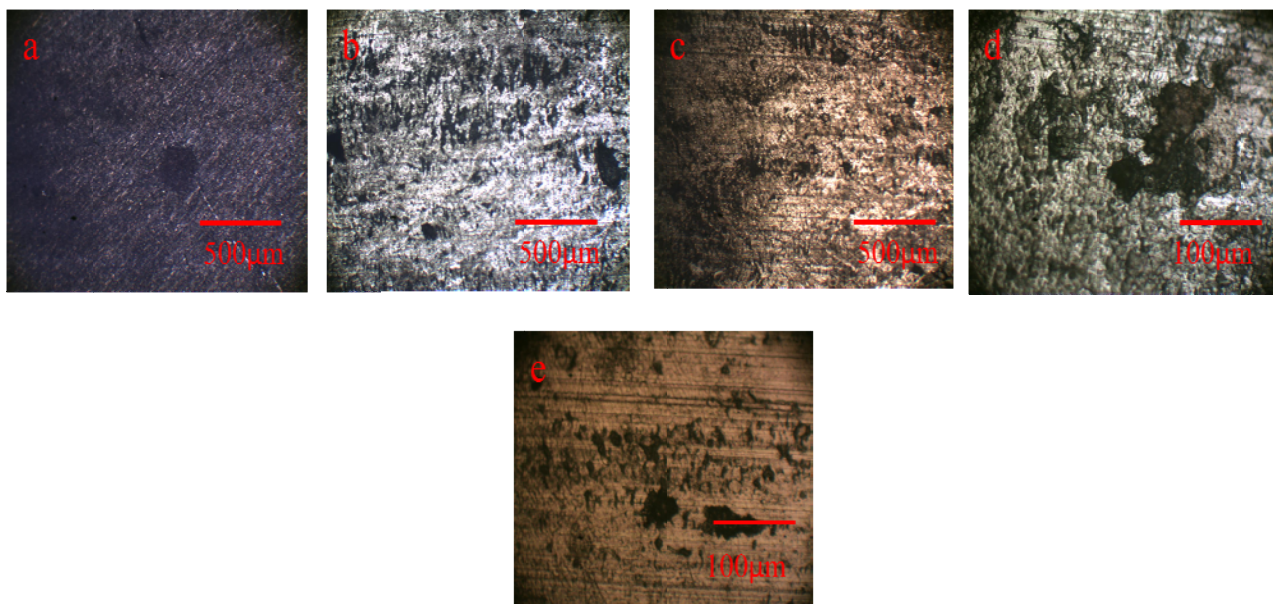


Figure IV.4 : Morphologie de corrosion des échantillons d'aérosols en aluminium de différentes marques après trois jours de corrosion dans la solution de 0.3%NaCl.

IV.3.2. Au microscope électronique à balayage :

La figure. IV.5 représentant la microstructure d'échantillon d'un aérosol ayant subi une corrosion dans une solution de 0.3 % de NaCl prise par microscopie électronique à balayage, confirme que la corrosion subi par l'échantillon est une corrosion localisé autours des particules intermétalliques.

Ceci dit lorsque il y a formation de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou bien de l'hydroxyde d'aluminium (oxyde hydraté $\text{nH}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ou bien une dissolution de oxyde ou bien les ions d'aluminium dans la solution corrosive. Une partie de cet oxyde ou bien des ions dissous passeront dans la solution corrosive dans notre cas la solution corrosive utilisée est la solution de 0.3% NaCl mais dans l'aérosol cette solution est le diodorant. Donc lorsque il ya le passage d'ions ou bien d'oxyde d'aluminium dans le déodorant celui-ci devient toxique et il pourra passé directement dans le sang après aplicacation sur la peau.

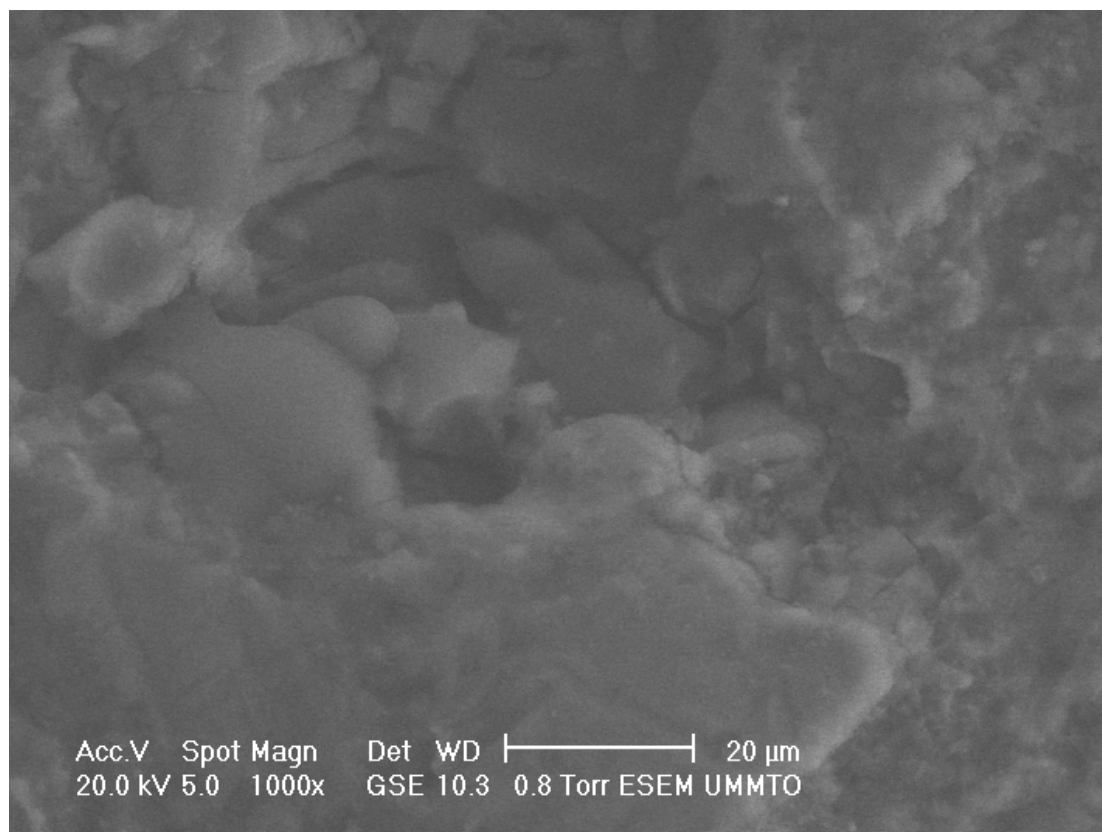


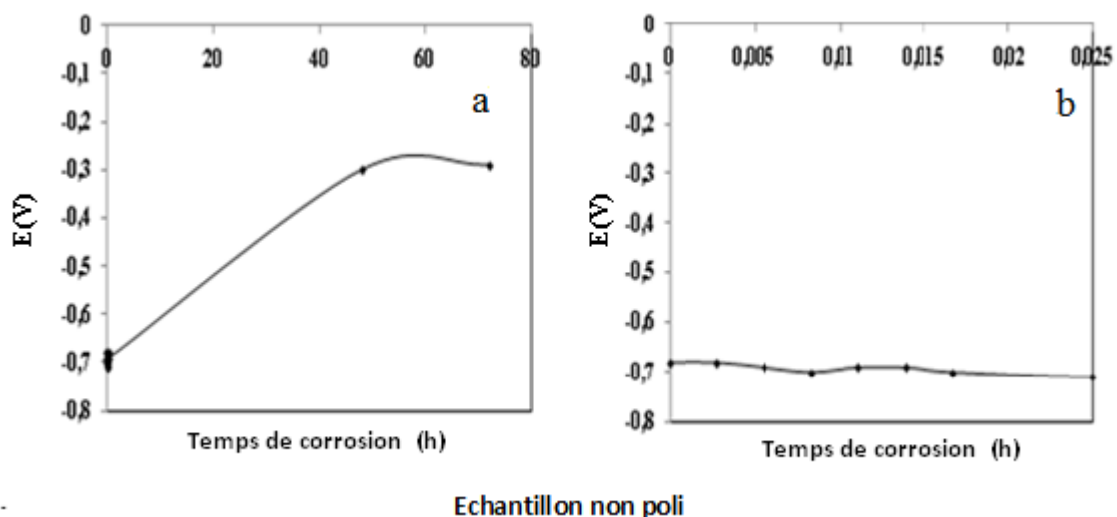
Figure IV.5: Image au MEB d'un échantillon d'aérosols en aluminium après trois jours de corrosion dans la solution de 0.3% NaCl.

IV.4. Cinétique de corrosion des aérosols de déodorant en aluminium dans une solution de 0.3% de NaCl :

L'essai du potentiel de la corrosion libre est le premier test susceptible d'évaluer une dégradation purement naturelle du matériau en contact avec une solution, le suivi de celui-ci nous renseigne sur l'évolution du phénomène de la corrosion et de la passivation si elle aura lieu au cours du temps, nous permet aussi d'apprécier la durée du régime actif et le temps nécessaire pour atteindre le régime passif.

Dans notre cas nous avons effectué des mesures du potentiel de la corrosion libre pour les trois types d'aérosols, sur une durée de 72 heures de corrosion, dans une solution de 0.3% de chlorure de sodium.

La (figure IV.6) représente l'évolution du potentiel de la corrosion libre d'un échantillon de la première marque d'aérosol contenant un revêtement, en fonction du temps dans la solution de -0.3% NaCl. Cette figure montre qu'après 72 heures de corrosion le potentiel augmente pour atteindre une valeur d'environ -0.3V après 40 heures de corrosion (Figure IV.6(a)). Aux premiers instants, la valeur du potentiel diminue légèrement autour de la valeur de -0.7V (Figure IV.6 (b)), durant ces instants le chlore de la solution agit sur la couche de revêtement pour la fragiliser, nous tenons à signaler que le revêtement peut être perméable dans certaines zones au début de la corrosion. L'augmentation du potentiel de corrosion est probablement due à une passivation des zones fragilisées.



Chapitre IV : résultats et interprétations

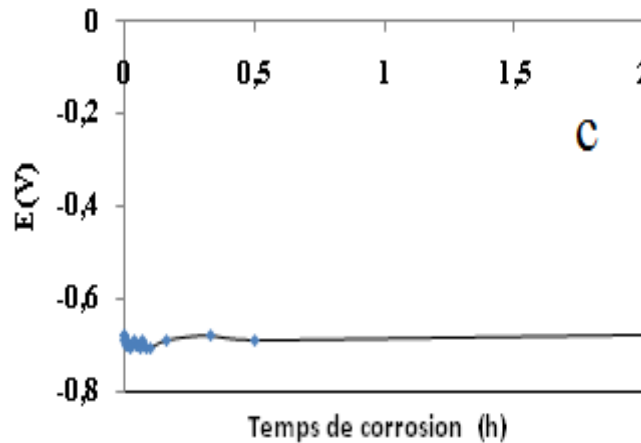


Figure IV.6 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol (premier échantillon) **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion, **c)** durant les premières heures de corrosion.

La (figure IV.7) représente la variation du potentiel de la corrosion libre d'un autre échantillon de la première marque d'aérosol avec revêtement en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre que l'échantillon prend un potentiel cathodique au début d'immersion, celui diminue rapidement durant la première heure de corrosion pour atteindre la valeur de -0.6V, par la suite le potentiel de la corrosion augmente pour atteindre une valeur d'environ -0.3V après environ 20 heures de corrosion après 20 de corrosion le potentiel de corrosion semble constant. La valeur élevée du potentiel au début de corrosion doit être dû à la présence d'un revêtement adhérent à la surface de l'échantillon, tandis que la diminution brusque de ce potentiel est due à la fragilisation de la surface par le chlore de la solution, et l'augmentation de ce potentiel par la suite est due à la formation d'un oxyde d'aluminium dans les zones fragilisées. La différence entre le comportement du premier échantillon et le deuxième échantillon est due à l'hétérogénéité du revêtement.

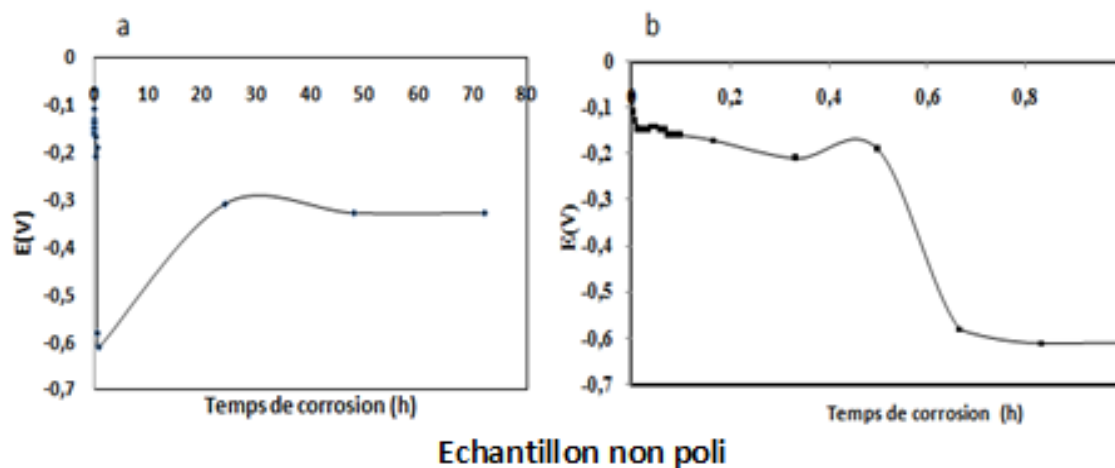


Figure IV.7 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol (deuxième échantillon), **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

La (figure IV. (8-9)) représentent la variation du potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol de deux échantillons polis en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre que le potentiel à l'immersion est de -0.9V, celui-ci augmente rapidement pour atteindre environ -0.7V après quelques secondes de corrosion par la suite le potentiel de corrosion libre reste constant autour de -0.7V. L'augmentation du potentiel de la corrosion libre à l'immersion est due à la formation d'une couche d'oxyde d'aluminium adhérente.

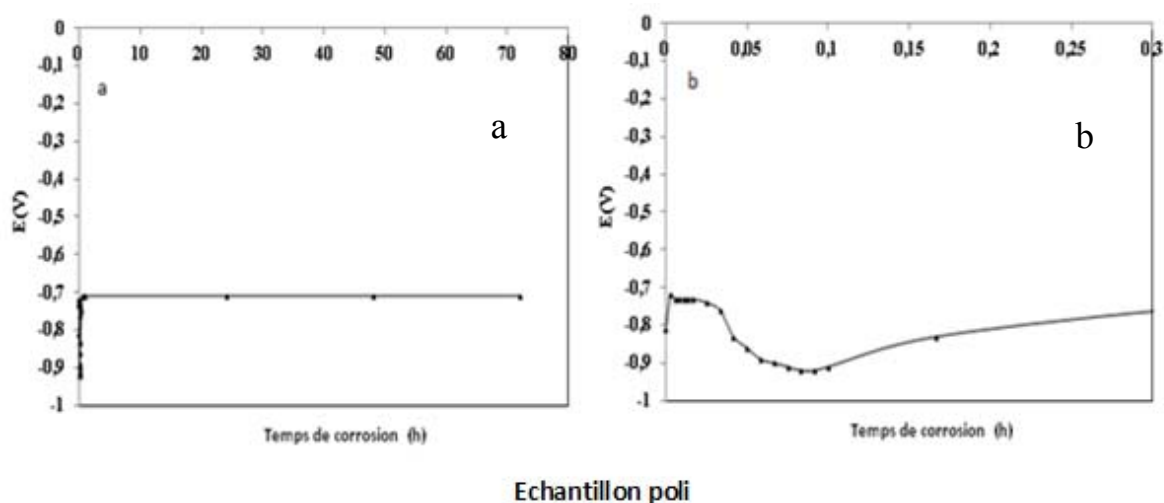


Figure IV.8 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol, **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

Chapitre IV : résultats et interprétations

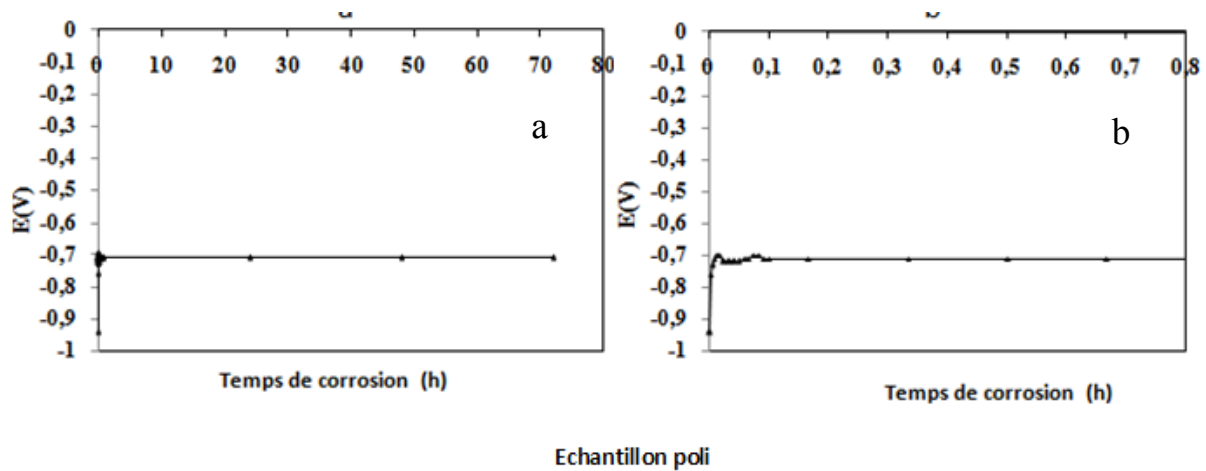


Figure IV.9 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol, **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

La (figure IV.10) représente la variation du potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol de quatre échantillons en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre l'effet du revêtement sur la cinétique de la corrosion des aérosols en aluminium.

Le potentiel de corrosion libre des échantillons sans revêtement plus anodique que le potentiel de la corrosion libre des échantillons avec revêtements.

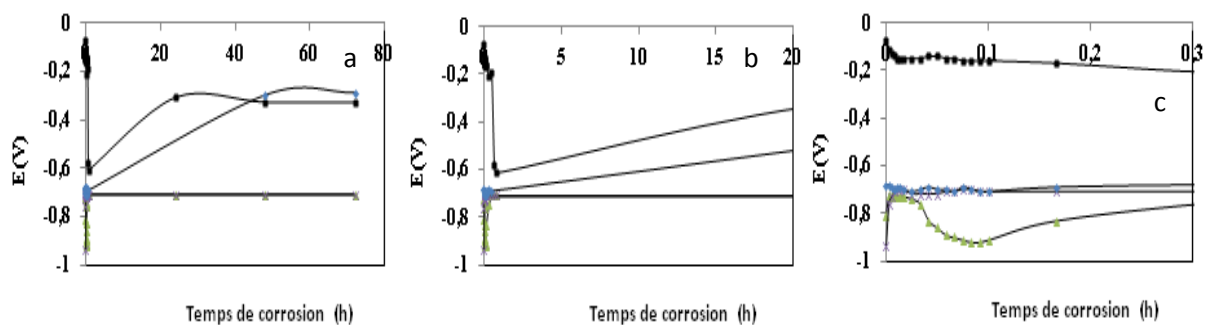


Figure IV.10 : Potentiel de la corrosion libre de la première marque d'aérosol de quatre échantillons **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** durant 20 heures de corrosion, **c)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

La (figure IV.11) représente la variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol pour trois échantillons non polis en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre à l'immersion, le potentiel de la corrosion libre des trois échantillons, après 72 heures de corrosion le potentiel des trois échantillons converge vers la même valeur.

Chapitre IV : résultats et interprétations

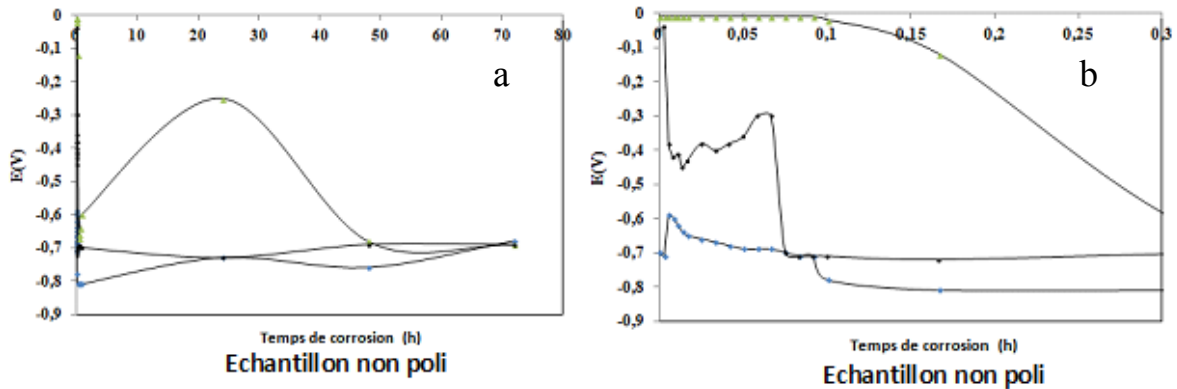


Figure IV.11 : Potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol, **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

La (Figure IV.12) représente la variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol pour un échantillon poli en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre que le potentiel de corrosion à l'immersion est élevé puis il diminue pour atteindre la même valeur que les échantillons non polis après 72 heures de corrosion (Figure IV13).

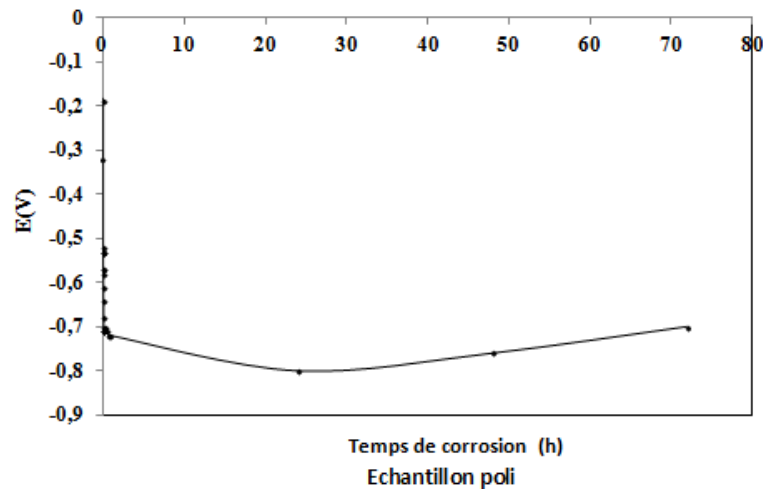


Figure IV.12 : La variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol en fonction du temps dans la solution de NaCl.

Chapitre IV : résultats et interprétations

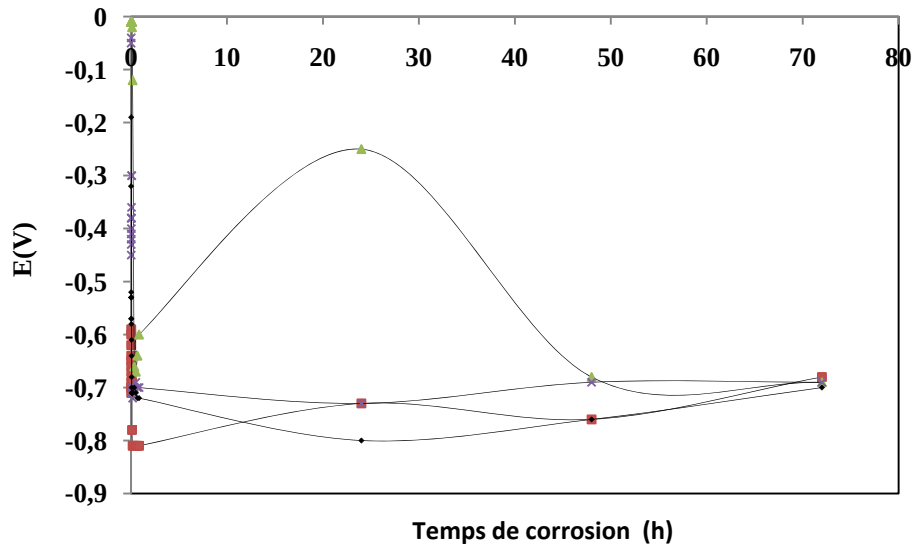


Figure IV.13 : La variation du potentiel de la corrosion libre de la deuxième marque d'aérosol en fonction du temps dans la solution de NaCl tous les échantillons.

La (Figure IV.14) représente la variation du potentiel de la corrosion libre de la troisième marque d'aérosol pour un échantillon poli et un échantillon non poli en fonction du temps dans la solution de NaCl. Cette figure montre que le potentiel de corrosion des deux échantillons est différent uniquement durant les 20 premières heures après ce temps ils ont le même potentiel de corrosion.

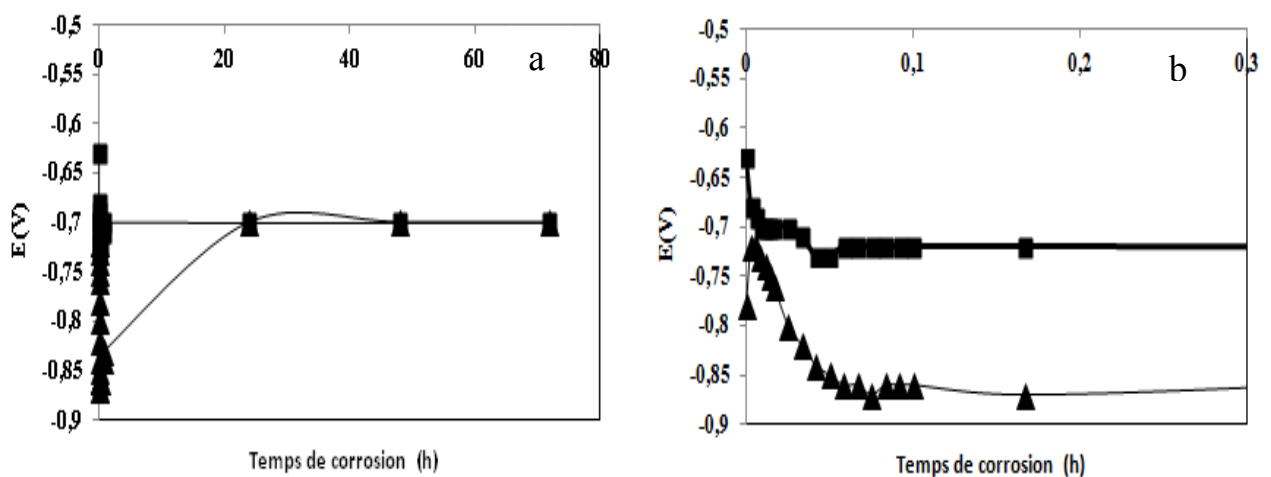


Figure IV.14 : Potentiel de la corrosion libre de la troisième marque d'aérosol (■ échantillon non poli ▲ échantillon poli) en fonction du temps. **a)** durant 72 heures de corrosion **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

Chapitre IV : résultats et interprétations

La Figure IV.15 représente 12 échantillons 4 échantillons par marque, parmi eux deux sont polis et deux non polis (contiennent le revêtement), cette figure montre que le revêtement n'est pas résistant plus de 50 heures pour deux marques, par contre ce revêtement est résistant pour plus de 80 heures pour une marque. En plus de ça cette figure montre que le potentiel de passivation pour la majorité des échantillons est de $-0.7V$ et le potentiel à l'instant de la mise en solution est différent d'un échantillon à un autre. De ce fait nous pouvons dire que la cinétique de corrosion des différentes marques d'aérosols est différente. Les revêtements et substrat d'aérosols ne sont pas homogènes d'une zone à une autre. De ce fait l'aérosol constitué essentiellement d'aluminium est susceptible à la corrosion d'où les atomes d'aluminium peuvent passer dans le déodorant et enfin dans le sang.

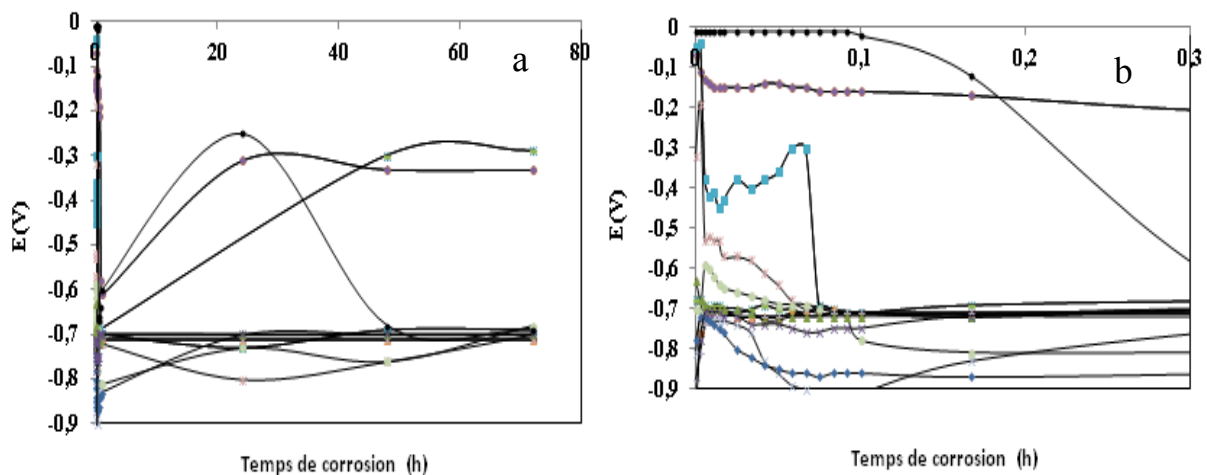


Figure IV.15 : Potentiel de la corrosion libre de toutes les marques d'aérosol et tous les échantillons, **a)** durant 72 heures de corrosion, **b)** Effet loupe au premier instant de corrosion.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude de la corrosion de l'aluminium des aérosols dans une solution de 0.3% de NaCl, nous a permis de conclure ce qui suit :

- La composition chimique de deux marques d'aérosols montre qu'il y a une variation de la composition chimique d'une marque à une autre.
- Une présence d'autres phases en plus de l'aluminium sous la forme de particules intermétalliques avec des formes et des tailles différentes.
- Les propriétés mécaniques (dureté, la résistance à la traction, élasticité allongement etc...) diffèrent d'une marque d'aérosol à une autre.
- Après une durée de corrosion de 3 jours dans une solution de 0.3% NaCl, le potentiel de corrosion des trois marques se convergent vers le même potentiel sauf les deux échantillons non polis (contenant un revêtement à la surface) de la première marque. Un revêtement homogène adhérent peut protéger la surface d'aérosols en l'aluminium contre la corrosion.
- La corrosion observée sur la surface interne des aérosols de déodorant en aluminium des différentes marques est une corrosion localisée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : C.VARGEL, « Corrosion de l'aluminium », Ed. Dunod, Paris 1999. (Légèreté)
- [2] : Claude. Divoux, « Structure de l'atome », www.physique-appliquée.net / physique / chimie / Fiche_éléments_chimique, 1999.
- [3] WWW.Physique-chimique-lycée.fr
- [4] : D. Beaulieu : Les caractéristiques de l'aluminium structural. Les presses de l'université, Laval 2002.
- [5] : Jean BARRALIS – Gérard MAEDER, « Précis de métallurgie » Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition Nathan 1994.
- [6] : M. REDJAIMIA, thèse doctorat, Université De Biskra, les alliages d'aluminium, 1998.
- [7] : M. Colombie et coll : Matériaux industriels, Matériaux métalliques. (Propriété chimique).
- [8] : ZAZI NACER, Thèse doctorat «Influence du vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium Magnésium », Tizi-Ouzou, 2011.
- [9] : Jean BAILON et J.M.DORLOT, des matériaux, 3^{ème} édition, école polytechnique de Montréal, 2000.
- [10] : Jean BARRALIS et Gérard MEADER, Pièce _ Métallurgie élaboration, structure ; propriété, normalisation, AFNOR NATHAN Paris 2001
- [11] : Soraya KHIRACHE, mémoire de Magistère « Elaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution de 3% en poids de NaCl ».Université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, faculté des sciences, département chimie.

[12] : <http://www.le-portail-aluminium.com/choixaluminium2012.pdf>

[13] : Amel BOURBIA, Thèse doctorat «Etude du durcissement mécanique des matériaux métalliques : Al-Al₂O₃», Université badji mokhtar-Annaba, 2009-2010.

[14] : <http://www.cite-sciences.fr/l'agedel'aluminium2003.pdf>

[15] : HOUDE A., Répertoire des fonderies québécoises, révision 2002, Québec, Direction des communications du ministère de l'Industrie et du Commerce, 2000.

[16] : J.-P. Baillon & J. M. Dorlot : Des Matériaux, 2000.

[17] : E.LUMINITA, Thèse Doctorat, « Comportement à la corrosion des alliages D'Aluminium », Institut national des sciences appliquées, 2005.

[18] : Sara Mecheri, mémoire de Magistère, « Etude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles ». Université mentouri-constantine, faculté des sciences exactes département de physique, 2007.

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

[20] : <http://www.ecoconso.be/Que-penser-des-emballages-en>

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

[22] : OUARDA DOB, «Formulation d'une solution aqueuse anti corrosive pour le refroidissement des moteurs à combustion interne», mémoire de magister 2008, Université de SKIKDA, Faculté Des Sciences Et Sciences De L'ingéniorat.

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

[24] : HAROUAKA Saad, «Influence de la température et de l'agitation du liquide de refroidissement sur la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile», mémoire de magister 2012/2013, Université du 20 Août 1955-Skikda, Faculté de Technologique.

[25] : Max REBOUL, « Corrosion des alliages d'aluminium », Technique de l'ingénieur, COR 325.

[26] : Fabien BELLENGER, Thèse Doctorat, « Etude et contrôle de la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium 2024 et 7449 par bruit électrochimique et émission acoustique. Analyse microstructurale et caractérisation de l'endommagement», Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

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