



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

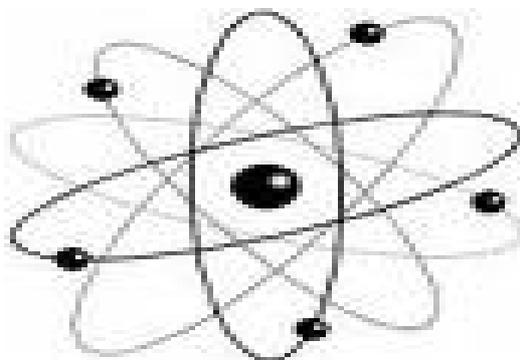


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux



Mémoire de fin d'étude en Master

Intitulé :

*Caractérisation physico-chimique des alliages
d'Aluminium utilisés comme matériau de
revêtement mural*

Présentée par :

Asma Haddouche

Devant le Jury Composé par :

Mr M. T. Soltani

Professeur

Université Med Khider- Biskra

Président

Mr A. Chala

Professeur

Université Med Khider- Biskra

Rapporteur

M^{me} N. Lehraki

M.A-A

Université Med Khider - Biskra

Examineur

Année Universitaire

2013-2014

Remerciements

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

Ce travail a été effectué au laboratoire de physique et chimie des matériaux et laboratoire métallurgie de la faculté des Sciences et Technologie de l'Université de Biskra.

*J'exprime mes profonds remerciements à l'encadreur de cette mémoire le Professeur **Abdelouahad CHALA**, pour son aide précieuse, sa confiance ses encouragements.*

*Je remercie très sincèrement Madame **SAIDA** à Université de Biskra.*

*Je remercie également l'ingénieur **B. Gasmí** de DRX à Université de Biskra qui a contribué à la réalisation de ce travail.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr **Bentrah Hamza** et Melle **L. FATIMA** qui m'ont constamment guidé, conseillé et aidé.*

*Mes remerciements vont également à Mr. **T. Soltani**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.*

*Et Madame **N. Lehraki** qui examiner ce mémoire.*

Sans oublié de remercier vivement tous les enseignants de département de physique.

En fin, merci à tous mes camarades de promotion et amis présent ou absent.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

À mes très partants: Ali et Salîha.

À mes chers frères: Ilyes, Younes.

À mes chers sœurs: Lamia, Siham.

À tout ma famille.

À tous mes amis.

Sommaire

Sommaire	I
Introduction générale	01

Chapitre I: Aluminium et ses alliages

I.1.Généralités sur l'aluminium.....	03
I.1.1. Historique.....	03
I.1.2.Fabrication d'aluminium.....	03
I.1.2.1.Production d'alumine.....	03
I.1.2.2. Production de l'aluminium.....	03
I.1.3. Principales caractéristiques d'aluminium.....	03
I.1.3.1.Masse volumique.....	04
I.1.3.2.Résistance à la fatigue	04
I.1.3.3.Résistance à la corrosion.....	04
I.1.3.4.Mise en forme.....	04
I.1.3.5.Soudage.....	05
I.1.3.6.Conductibilité électrique.....	05
I.1.3.7.Propriétés mécaniques.....	05
I.1.3.8.Propriétés optiques.....	05
I. 1. 3. 9.Module d'élasticité.....	06
I.1.3.10 Ténacité.....	06

Sommaire

I.1.3.11.Résistance à la fatigue.....	06
I.1.3.1.2. Propriétés à chaud.....	06
I.1.4.Propriétés physique de l'aluminium.....	06
I.1.5.L'aluminium et ses alliages.....	07
I.1.5.1.Les familles d'alliages d'aluminium.....	08
I.1.5.1.a.Alliages corroyés	08
I.1.5.1.b.Alliages de fonderie.....	09
I.1.5.2.Influence des éléments d'addition	10
I.2.Corrosion d'aluminium et ses alliages.....	11
I.2.1.Généralités.....	11
I.2.1.1.Corrosion chimique.....	11
I.2.1.2.Corrosion bactérienne	11
I.2.1.3.Corrosion électrochimique	12
I.2.1.3.1.Réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium....	12
I.2.1.3.2.Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages.....	13
I.2.1.3.3.Diagramme potentiel - pH (Pourbais).....	14
I.2.1.3.4.Passivation de l'aluminium et le PH.....	15
I.2.2.Formes de corrosion de l'aluminium.....	16
I.2.2.1.Corrosion généralisée ou uniforme.....	16
I.2.2.2.Corrosion localisée.....	17
I.2.2.2.1.Corrosion par piqûre.....	17
I.2.2.2.1.1.Mécanismes de corrosion par piqûres.....	17
I.2.2.2.1.2.Caractérisation de la corrosion par piqures.....	19
I.2.2.2.2.Corrosion filiforme.....	19
I.2.2.2.3. Corrosions structurales.....	20
I.2.2.2.3.1.Corrosion intergranulaire.....	20
I.2.2.2.3.2.Corrosion feuilletant (ou exfoliante).....	21
I.2.2.2.3.3.Corrosion sous tension (ou sous contrainte).....	22
I.2.2.2.4.Corrosion galvanique.....	22

Sommaire

I.2.2.2.4.1.Conditions de la corrosion galvanique.....	23
I.2.2.2.4.2.Paramètres de la corrosion galvanique.....	23
I.2.2.2.4.3.Influence du rapport de surface Cathodique/ Anodique (SC /SA)...	25
I.2.2.2.4.4.La distance.....	25
I.2.2.2.5.Influence du potentiel d'électrode.....	26
I.2.2.2.6.Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages	26
I.2.3.Farceur de corrosion.....	27

Chapitre II méthodes expérimentales

Introduction.....	30
II.1 Matériaux et solutions étudiés.....	30
II.1.1Alliages étudiés.....	30
II.1.2 Préparation des échantillons.....	30
II.1.3Attaque chimique.....	30
II.1.4 Evaluation de corrosion.....	31
II.1.4.a Milieu.....	31
II.2 Mesures électrochimique.....	31
II.2.1 Les paramètres expérimentaux à calculer.....	34
II.3 Traitement thermique	34
II.4 Techniques expérimentales utilisées.....	35
II.4.1Polissage des échantillons.....	35
II.4.2 Microscopie optique.....	36
II.4.3 Diffraction des rayons X.....	36

Sommaire

II.4.4 Micro-dureté.....	37
II.4.5 Microscopie électronique à balayage.....	38

Chapitre III résultats et discussions

III.1. Microstructure.....	41
III.1.1. Microscopie optique.....	41
III.1.2. Analyse EDAX.....	42
III.1.3. Diffractions RX.....	42
III.1.3: Microdureté de l'alliage étudié.....	43
III.2. Influence de la température sur la dureté.....	43
III.2.1. Diffraction des RX.....	44
III.3. test corrosion.....	48
III.3.2. Observation par MEB.....	49
III.3.3. Analyse EDAX.....	50
III.3.3 Courbe de polarisation.....	51
III.3.4. les paramètres de corrosion après essais corrosion.....	55
III.3.4 mesure la dureté.....	56
Conclusion générale	58
Bibliographie	61

Introduction générale

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique. Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères...etc. Mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

Les transformations de phases ainsi que certaines précipitations caractéristiques mécaniques des matériaux métalliques de façon le plus souvent non négligeable.

L'aluminium est un métal très actif qui doit sa résistance à la corrosion par la formation d'une couche d'alumine (Al_2O_3) protectrice. Compte tenu de l'importance de ses applications, il est nécessaire de le protéger contre la corrosion. Pour prévenir ce phénomène, plusieurs techniques peuvent être utilisées à savoir l'addition des inhibiteurs de corrosion, les revêtements et les traitements de surface.

L'aluminium à l'état pur présente de faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments d'addition et l'application de traitements thermiques provoquent la précipitation de certaines phases dans la matrice d'aluminium. L'alliage est alors généralement plus résistant mais aussi moins ductile que l'aluminium pur. Il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium qui diffèrent par leurs éléments d'addition principaux; (série 2000), (série 3000), (série 4000), (série 5000), (série 6000) et les alliages (série 7000). La faible masse volumique des alliages d'aluminium associée à leurs bonnes caractéristiques mécaniques intéresse l'industrie du transport (ferroviaire, navale, routière, aéronautique).

Le premier chapitre est consacré aux propriétés physico-chimiques des alliages d'aluminium et ses alliages et différentes formes et facture de corrosion

Le deuxième chapitre est consacrée à la description des matériaux utilisés (propriétés physicochimiques et mécaniques), des techniques d'analyse électrochimique qui sont complétés par des observations à la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplée à l'EDAX (analyse dispersive en énergie de rayons X). Ensuite, nous détaillons les conditions expérimentales utilisées pour attaque chimique, traitement thermique et réaliser les essais électrochimiques.

Le troisième chapitre est consacré au travail expérimental qui englobera tous nos résultats ainsi que leurs interprétations.

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

I.1. Généralités sur l'aluminium

I.1.1. Historique

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 l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA). Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport: aviation, automobile, marine .Il est aussi employée dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...

I.1.2. Fabrication d'aluminium

L'aluminium est un métal 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

I.1.2.1. Production d'alumine

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

I.1.2.2. 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). 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.

I.1.3. Principales caractéristiques d'aluminium

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place

importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières

I.1.3.1. Masse volumique

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

I.1.3.2. Résistance à la fatigue

La courbe de WÖHLER ne présente pas de coude marqué et l'asymptote horizontale n'est atteinte que vers 10⁸ cycles. En général, le coefficient d'endurance est de l'ordre de 0.5 pour les alliages non trempant, 0.25-0.3 pour les alliages trempant

I.1.3.3. Résistance à la corrosion

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

La tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

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

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

I.1.3.4. Mise en forme

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

I.1.3.5. Soudage

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

I.1.3.6. Conductibilité électrique

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

I.1.3.7. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

Etat du métal	Charge de rupture à la traction	Allongements de rupture à la traction
Coulé	5 à 9 kg/mm ²	0 à 5 %
Laminé et recuit	8 à 10 kg/mm ²	30 à 40 %
Laminé et écroui	20 à 25 kg/mm ²	2 à 5 %

Tableau (I.1): Propriétés mécaniques d'aluminium pur [1]

I.1.3.8. Propriétés optiques

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre du visible, il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage. Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

I.1.3.9. Module d'élasticité

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

- Conditions de transformation et de moulage
- Sensibilité à la trempe
- Conditions de moulage
- maintien à chaud.

I.1.3.10. Ténacité

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

I.1.3.11. Résistance à la fatigue

La résistance à la fatigue à 10⁸ cycles est donnée pour chaque alliage dans les tableaux de Caractéristiques mécaniques. On détermine le rapport d'endurance comme étant le rapport entre la limite à la fatigue à 10⁸, en contraintes alternées et la charge de rupture en traction:

0,35 à 0,45 dans le cas des alliages sans durcissement structural

0,25 à 0,35 dans le cas des alliages avec durcissement structural

I.1.3.1.2. Propriétés à chaud

Les propriétés mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température

Augmente. La nature de l'alliage, la durée du maintien à chaud et la température de maintien sont les Paramètre les plus sensibles.

I.1.4. Propriétés physique de l'aluminium

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau (I.2) [2].

Tableau(I.2): Propriétés physiques de l'aluminium [2].

<i>Propriété</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>	<i>Remarque</i>
Numéro atomique		13	
Masse volumique ρ	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 698	
Point de fusion	$^{\circ}\text{C}$	660.45	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Point d'ébullition	$^{\circ}\text{C}$	2 056	sous $1013 \cdot 10^{-3}$ bar
Pression de vapeur	Pa	$3.7 \cdot 10^{-3}$	à 927°C
Energie interne massique u	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3.98 \cdot 10^5$	
Capacité thermique massique C_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	237	à 27°C
Coefficient de dilatation linéique α_l	10^{-6}K^{-1}	23.1	à 25°C
Résistivité électrique ρ	$10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	26.548	à 25°C
Susceptibilité magnétique K		$0.6 \cdot 10^{-3}$	à 25°C
Module d'élasticité longitudinal E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson ν		0.33	

I.1.5. L'aluminium et ses alliages

Seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium parce qu'ils ont une solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieure à 0,5 %. Ce sont : l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur uniquement cinq éléments d'alliage qui sont:

- Le cuivre
- Le manganèse
- Le magnésium
- Le silicium
- Le zinc

Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée. Mais, pour certains d'entre eux, leur influence sur les propriétés de l'alliage peut aussi dépendre de la présence d'un, ou plusieurs autres éléments, parce qu'ils peuvent

I.1.5.1. Les familles d'alliages d'aluminium

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement (Tableau I.3)

I.1.5.1.a. Alliages corroyés

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

◆ Alliage durcissement par écrouissage:

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

◆ Alliage durcissement structural:

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

Durcissement par écrouissage

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5 – 1,5	Magnésium – cuivre
5000	Magnésium	0,5 - 5	Manganèse – Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 - 2	Nickel

Durcissement structural

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

*Tableau (I.3): Familles d'alliage d'aluminium [5]***I.1.5.1.b. Alliages de fonderie**

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

◆Qualités recherchées

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie (Tableau I.4).

Tableau (I.4): Qualité des alliages de fonderie [5]

Observations	Qualités
Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte	Coulabilité
Fissuration à chaud causée par le retrait du métal	Absence de formation de criques
Due au retrait qui accompagne la solidification	Bonne répartition de la porosité
Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression	Températures de fusion relativement basses

I.1.5.2. Influence des éléments d'addition

Les éléments d'additions peuvent être classés selon la contribution de chacun dans l'amélioration de la performance de l'anode. Un élément d'addition est ajouté au matériau de base pour :

- Avoir un potentiel plus électro-négatif que celui du métal de base.
- Eviter la passivation de l'anode dans le milieu où elle est utilisée.
- Augmenter la capacité de l'anode.
- Améliorer la morphologie de la dissolution.
- Annuler les effets nuisibles des impuretés.
- améliorer les propriétés mécaniques de l'anode.

De ce fait, on peut résumer les effets des éléments d'addition dans le tableau (I.5):

Tableau(I.5): les effets des éléments d'addition [6].

<i>éléments</i>	<i>effets</i>
Manganèse (Mn)	Il est ajouté pour éliminer l'effet nuisible du fer en évitant la formation de la phase Fe-Al.
Zinc (Zn 5%)	L'addition du zinc, jusqu'à 5%, abaisse le potentiel de l'anode, mais au-dessus de ce niveau aucun avantage n'est obtenu. En dessous de 0,9%, le zinc a peu d'influence sur l'exécution des anodes d'aluminium.
Mercure (Hg), l'indium(In) ou de l'étain(Sn)	Il active la surface de l'anode en évitant sa passivation. Il déplace le potentiel de corrosion vers des valeurs plus électro-négatives.
Magnésium (Mg 0,2% à 2%)	Il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau (dureté).
Cadmium (Cd)	Il est ajouté pour favoriser la formation d'un produit mou de corrosion.
Titane (Ti)	Il agit en tant qu'acqureur pour l'hydrogène ou sert simplement à raffiner les grains et à augmenter le secteur de frontière de grain diluant de ce fait l'effet de fragilisation.

I.2. Corrosion d'aluminium et ses alliages

I.2.1. Généralités

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

I.2.1.1. Corrosion chimique

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal), et une phase liquide ou gazeuse.



Lorsque le réactif est gazeux, la corrosion est dite sèche. Si le réactif est liquide, il est en général, accompagné d'une corrosion électrochimique.

L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (Al dans CCl₄) peut être considérée comme une corrosion chimique. Donc on peut dire que la corrosion chimique est l'attaque du métal par son environnement. Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [5].

I.2.1.2. Corrosion bactérienne

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

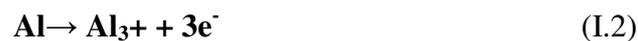
La pollution locale du milieu corrosif en H₂S et son effet connu sur la corrosion, suffisent à expliquer les dommages provoqués par les bactéries [6].

I.2.1.3. Corrosion électrochimique

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

I.2.1.3.1. Réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium

En milieu aqueux la réaction d'oxydation de l'aluminium sur les sites anodiques est traduite par la réaction (I-2) [2].



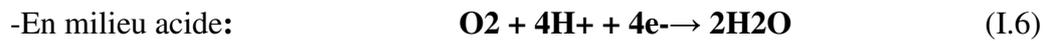
Tandis que sur les sites cathodiques deux réactions sont possibles. En effet dans les milieux aqueux habituels dont le pH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère), il s'agit d'une part de la réaction d'échange de proton selon [2].



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



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



A 20°C, sous pression atmosphérique, la solubilité d'O₂ dans l'eau est de 43,4 mg/Kg, elle diminue avec l'augmentation de la température (elle n'est plus que de 30.8 mg/Kg à 40°C et 13,8 mg/Kg à 80°C).

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



Ou bien



La corrosion de l'aluminium se traduit par la formation de l'hydroxyde Al(OH)₃, qui est insoluble dans l'eau et précipite sous forme d'un gèle blanc qu'on observe sur les piqures sous forme de flocons gélatineux blancs

I.2.1.3.2. Potentiel de dissolution de l'aluminium et ses alliages

La mesure du potentiel de l'aluminium est faite sur une surface toujours recouverte d'un film d'oxyde naturel Al₂O₃. Elle est partagée très inégalement en trois types : les pores (0.5%) de la surface totale, qui sont anodiques, le film barrière qui est cathodique, et les zones de film plus épais qui sont neutre. Tous les paramètres qui modifient les propriétés de la couche d'oxyde modifient plus ou moins le potentiel de dissolution de l'aluminium. Les résultats de mesures dépendent des conditions expérimentales : nature de la solution, nature de l'alliage, état de surface du métal.

Tableau (I. 5) présente les potentiels de dissolution des différents métaux et alliages immergés dans l'eau de mer. [3]

Métal ou alliage	Potentiel (mV)
Graphite C	0.09+
Monel alliage Ni-Cu	-0.08
Hastelloy C	-0.08
Acier inoxydable	-0.10
Argent Ag	-0.13
Titane Ti	-0.15
Inconel alliage Ni-Cr	-0.17
Nickel Ni	-0.20
Cupronickel 70/30	-0.25
Cupronickel 90/10	-0.28
Etain Sn	-0.31
Bronze alliage Cu-Sn	-0.36
Laiton alliage Cu-Zn	-0.36
Cuivre Cu	-0.36
Plomb pb	-0.51
Acier ordinaire	-0.61
Fonte alliage de fer riche en carbone	-0.61
Cadmium Cd	-0.7
Aluminium Al	-0.75
Zinc Zn	-1.13
Magnésium Mg	

I.2.1.3.3. Diagramme potentiel - pH (POURBAIS)

Les diagrammes E-pH sont constitués de plusieurs domaines, trois états possibles:
 -Solubilité $c \rightarrow 10^{-6}M$ (ou corrosion : c'est la concentration à partir de laquelle on peut considérer qu'il y'a corrosion du métal, soit 0.027 mg/l pour l'aluminium).

-Passivation : si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble.

-Immunité : $c \rightarrow 10^{-6}M$.

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

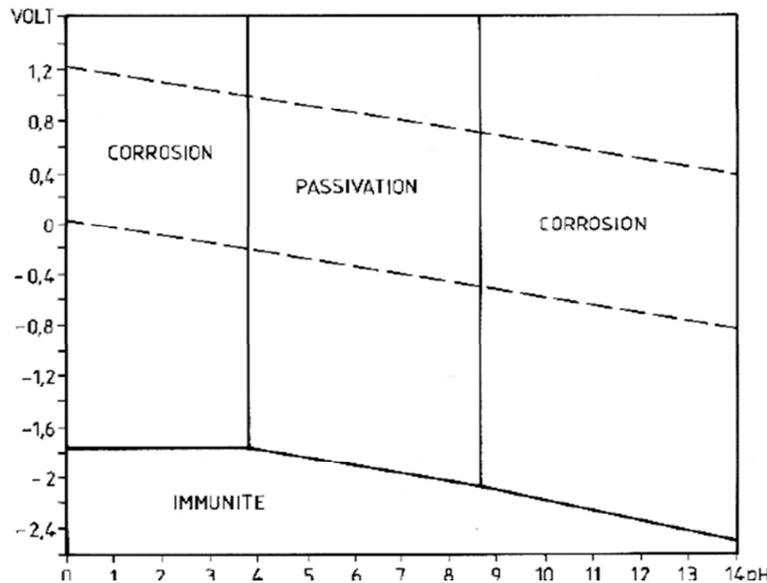


Figure (I.1): Diagramme E-Ph du système Al-H₂O à 25C° (M.POURBAIS)[7].

I.2.1.3.4. Passivation de l'aluminium et le PH

La vitesse de dissolution de l'alumine (Al₂O₃) dépend du pH ainsi que le montre le diagramme de la figure I.2. Elle est plus élevée pour les pH acides et alcalins, ce qui correspond bien au caractère amphotère de l'oxyde d'aluminium. Le pH n'est cependant pas le seul paramètre à prendre en considération pour prévoir la stabilité du film d'oxyde naturel (et donc de l'aluminium) en milieu aqueux, aux pH acides ou aux pH alcalins. La vitesse de dissolution dépend également de la nature de l'acide ou de la base dissoute dans l'eau.

Comme les métaux passifs, l'aluminium est sensible à la corrosion par piqure dans les milieux aqueux proche de la neutralité. La corrosion par piqure dépend alors plus de la quantité d'anions dans l'eau tels que les ions chlorures que des variations de pH.

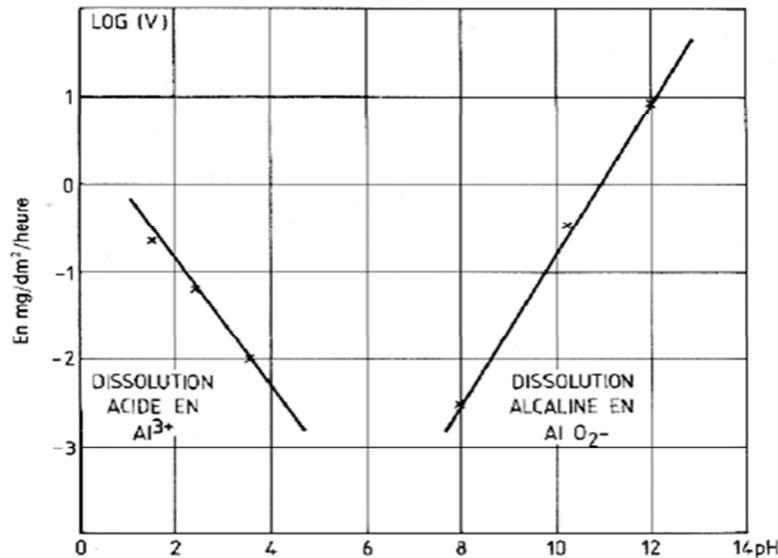


Figure (I.2): Vitesse de dissolution de l'alumine en milieu aqueux en fonction du pH [6].

I.2.2. Formes de corrosion de l'aluminium

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

I.2.2.1. Corrosion généralisée ou uniforme

L'aluminium mis à nu 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 de l'aluminium est extrêmement faible, voire insignifiante. Elle ne dépasse pas 5 µm/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 ($\text{pH} = 13$).

I.2.2.2. Corrosion localisée

I.2.2.2.1. Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres est une forme de corrosion localisée qui se traduit par la création de cavités à la surface du métal pouvant progresser très rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne. L'aluminium, comme tout métal recouvert d'un film passif, est sensible à la corrosion par piqûres. Elle se produit quand le matériau est mis en contact avec un milieu aqueux (pour un pH voisin de la neutralité) contenant les halogénures : F-, Cl-, Br-, I-. Les solutions contenant des ions Cl- (faible diamètre, caractère polaire) demeurent les plus agressives vis-à-vis de l'aluminium.

Les piqûres s'initient sur les points faibles de la couche d'oxyde : défauts mécaniques, présence de composés intermétalliques cathodiques (Al_2Fe , Al_2Cu en particulier) et dans un milieu jouant le rôle d'électrolyte. C'est un phénomène très complexe dont le mécanisme n'est pas encore totalement élucidé. Cependant, les conditions dans lesquelles les piqûres sont initiées et se propagent sont maintenant définies.

I.2.2.2.1.1. Mécanismes de corrosion par piqûres

Le mécanisme de la corrosion par piqûres peut être décomposé en plusieurs étapes :

- adsorption des ions Cl- à la surface du film passif.
- migration des ions Cl- à travers le film passif.
- propagation de la piqûre dans le métal.

• Amorçage des piqûres

L'adsorption des ions agressifs sur le film d'alumine, préférentiellement au niveau des défauts de la couche d'oxyde, constitue la phase d'amorçage. La surface de cet oxyde est hétérogène et présente de multiples sites d'adsorption avec des énergies différentes. Seulement une minorité de ces sites permet l'adsorption des ions Cl-, ce qui en fait un phénomène localisé. Un paramètre important contrôlant l'adsorption des espèces agressives est le pH correspondant au potentiel de charge nulle qui, dans le cas de la couche d'oxyde d'aluminium, est de 9,5. En dessous de cette valeur (pH neutre), la charge globale de la surface devient majoritairement positive et l'adsorption des ions Cl- est favorisée grâce à une attraction électrostatique plus forte. Les ions agressifs migrent jusqu'à l'interface métal/oxyde formant ainsi une rupture dans le film passif : la piqûre est amorcée. Parmi les nombreuses piqûres initiées, seule une infime minorité va se propager et donner des piqûres stables. Les piqûres métastables sont de très petite taille et se passent instantanément dans les secondes qui

suivent leur formation. Pour qu'une piqûre se propage, il faut que les conditions nécessaires à sa propagation (acidité et concentration en ions Cl^-) soient requises.

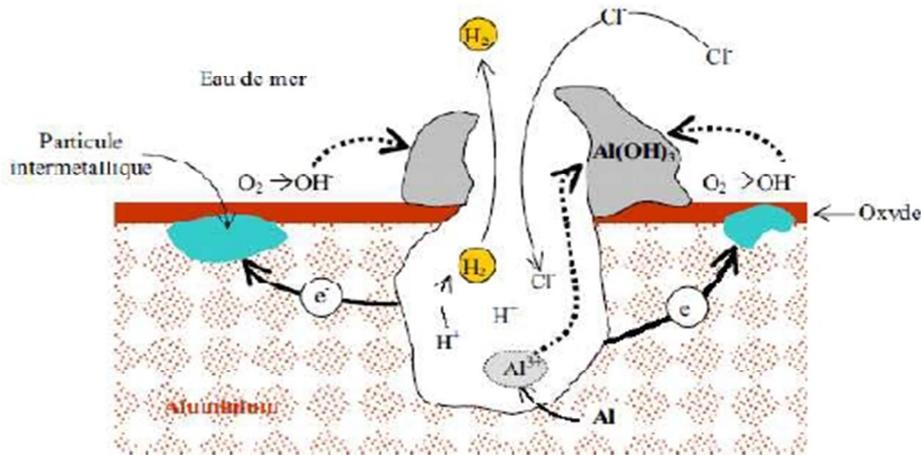


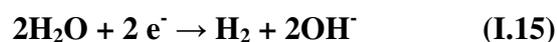
Figure (I.3): Mécanisme de la piqûration de l'aluminium [3]

• Propagation des piqûres

Les piqûres stables se propagent suivant une série de réactions électrochimiques. Il faut distinguer deux parties: l'intérieur de la cavité à caractère anodique et l'extérieur de la cavité à caractère cathodique. Au fond de la cavité, l'aluminium s'oxyde selon la réaction (I.11). Les ions Al^{3+} formés s'hydrolysent au contact de l'eau selon la réaction (I.12). La présence des ions Al^{3+} crée un champ électrique qui déplace vers le fond de la piqûre les ions Cl^- neutralisés chimiquement la solution. Ces ions présents en grande quantité dans la cavité réagissent avec l'hydroxyde d'aluminium selon la réaction (I.13). Enfin, le milieu s'acidifie ($\text{pH} \approx 3$) selon la réaction et provoque l'auto-propagation de la piqûre.



A la surface de la piqûre, les réactions cathodiques ont lieu :



L'augmentation du pH à la surface de la piqûre entraîne la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$. Les microbulles d'hydrogène provenant de la réduction des ions H^+ , poussent l'hydroxyde d'aluminium vers l'ouverture de la piqure où il se dépose sous forme de pustules blanches. L'accumulation des produits de corrosion au-dessus de la piqûre en forme de dôme de volcan obstrue progressivement l'entrée gênant ainsi les échanges ioniques, en particulier ceux dans lesquels les ions Cl^- sont impliqués. Cela peut entraîner le ralentissement, voire l'arrêt total de la propagation de la piqûre dans certains cas.

I.2.2.1.2. Caractérisation de la corrosion par piqûres

Contrairement à la corrosion uniforme, la vitesse de corrosion par piqures ne peut être évaluée ni par la variation de poids ni par la mesure de l'hydrogène dégagé. Ces mesures n'ont en effet pas de sens car une piqure très profonde et isolée se traduit par une faible diminution de poids, alors que de très nombreuses piqûres superficielles peuvent entraîner une diminution de poids notable.

La corrosion par piqures est évaluée selon trois critères :

- La densité, c'est-à-dire le nombre de piqures rapporté à l'unité de surface.
- La vitesse d'approfondissement.
- La probabilité de piqûres.

I.2.2.2. Corrosion filiforme

La corrosion filiforme (figure I.4) s'initie aux défauts de revêtement (découpe transversale des profilés, rayures...) puis se propage à l'interface métal peinture formant de fins filaments ($\approx 0,1$ mm de large et quelques mm de long). Ce phénomène se produit dans des atmosphères marines très humides.

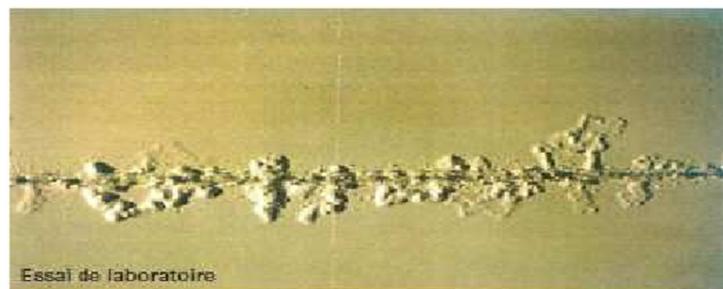


Figure (I.4): Corrosion filiforme de l'aluminium peint[3].

I.2.2.2.3. Corrosions structurales

Les corrosions structurales sont plus particulièrement concernées par le mode de pénétration de la corrosion dans le métal qui peut être particulière dans certains métaux. On les appelle structurales parce qu'elles sont directement liées à la structure métallurgique du métal. La distribution hétérogène des éléments d'addition et/ou des précipités est à l'origine de ces formes particulières de propagation de la corrosion. Pour l'aluminium, les corrosions structurales ne concernent que les alliages d'aluminium à hautes caractéristiques mécaniques : 2xxx, 6xxx, 7xxx, auxquels il faut ajouter les alliages de la série 5xxx à hautes teneurs en magnésium ($Mg > 3,5 \%$). Elles diffèrent des autres formes de corrosion étudiées habituellement par le mode de pénétration dans le métal. La pénétration des corrosions structurales est souvent intergranulaire.

Pour les alliages d'aluminium trois formes particulières de corrosion structurales peuvent être rencontrées:

- la corrosion intergranulaire
- la corrosion feuilletant ou exfoliante.
- la corrosion sous contrainte.

I.2.2.2.3.1. Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire que l'on rencontre sur différents métaux et certains alliages d'aluminium est une corrosion qui se propage dans le métal en consommant uniquement les joints de grain. De nature électrochimique, elle résulte de la présence aux joints des grains d'une zone continue et anodique par rapport à l'intérieur des grains. Pour les alliages d'aluminium, cette zone anodique a deux origines :

◆soit la précipitation directe aux joints de grains de phases anodiques par rapport à l'intérieur des grains :

- cas des phases Mg_2Al_3 dans les alliages série 5000 ;
- cas des phases Mg_2Si dans les alliages série 6000 ;
- cas des phases $MgZn_2$, Al-Zn-Mg dans les alliages série 7000.

◆Soit la constitution aux joints de grain d'une zone anodique appauvrie en éléments nobles:

Dans les alliages de la série 2000 en particulier, la précipitation intergranulaire de phases du type Al_2Cu , Al-Cu-Mg (Al_2Cu-Mg) peut entraîner une diminution de la teneur en cuivre dans la zone adjacente aux joints de grains et donc un couplage galvanique entre cette zone et le reste du grain.

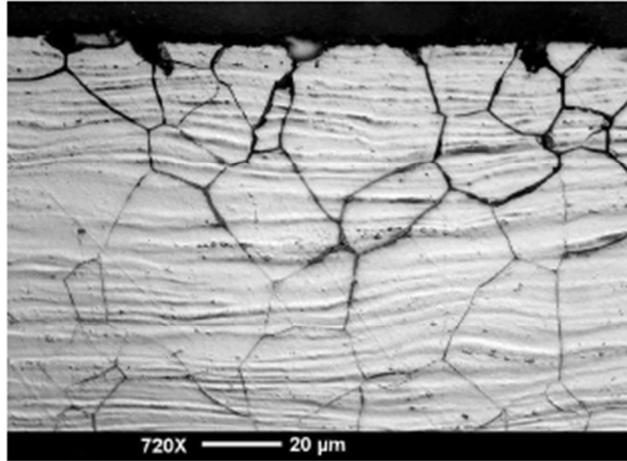


Figure (I.5): Corrosion intergranulaire [6]

I.2.2.2.3.2. Corrosion feuilletant (ou exfoliante)

La corrosion feuilletant est une forme de corrosion de certains alliages d'aluminium qui se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction de transformation (par laminage en particulier), plans qui correspondent généralement aux frontières de grains (corrosion intergranulaire) ou aux alignements de constituants insolubles. Le gonflement par les produits de corrosion fait écarter les feuillets de métal inattaqué qui s'écartent de la surface du métal comme les feuillets d'un livre, d'où le nom de corrosion feuilletant.

Ce type de corrosion qui concerne surtout les produits de faible épaisseur, fortement corroyés et présentant une structure fibrée, ne se rencontre pas avec les alliages des séries 1000, 3000 et 6000.

Il concerne les alliages des séries 2000 et surtout 7000 mais rarement les alliages 5000.

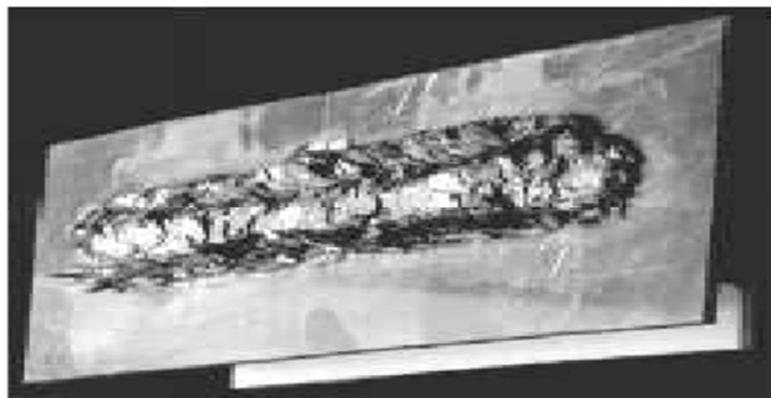


Figure (I.6): Corrosion feuilletant [6]

I.2.2.2.3.3. Corrosion sous tension (ou sous contrainte)

Les alliages d'aluminium et plus particulièrement ceux à haute résistance peuvent être sensibles à la corrosion sous tension lorsqu'ils sont dans certains états métallurgiques : sous l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif, il se forme des fissures dont la propagation toujours intercrystalline peut conduire à la rupture de la pièce.

Les mécanismes de la corrosion sous tension sont relativement complexes et font encore l'objet de différentes théories dont les principales font appel à la propagation électrochimique des fissures et à la fragilisation par l'hydrogène. Lorsque la contrainte diminue, la durée de vie augmente et il existe un seuil en-dessous duquel on n'observe plus de rupture de corrosion sous contrainte avant 30 jours ce seuil de contrainte admissible caractérise la résistance à la corrosion sous tension de l'alliage.



Figure (I.7): Fissure de corrosion sous contrainte propagation électrochimique [3]

I.2.2.2.4. Corrosion galvanique

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

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

- De la différence de potentiel entre les deux métaux en présence.
- De la résistance électrique entre les deux métaux.
- Du rapport des surfaces cathode et anode.
- Du milieu corrosif et plus particulièrement de sa conductivité : l'eau de mer, de

très faible résistivité (quelques ohms / cm²) est particulièrement agressive à cet égard.

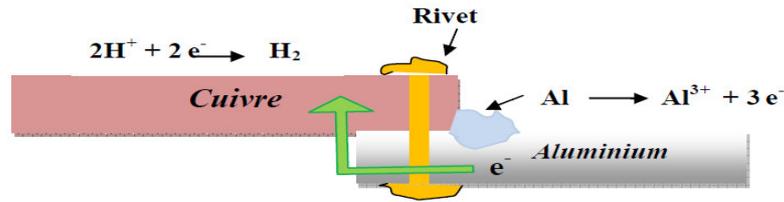


Figure (I.8):corrosion galvanique [3]

I.2.2.2.4.1. Conditions de la corrosion galvanique

Les conditions de ce processus électrochimique rappellent celles de la pile que Volta réalisa en 1800, avec du cuivre, du zinc et du vinaigre. Le courant de corrosion galvanique n'est observé que si les trois conditions suivantes sont simultanément satisfaites:

- **Deux métaux de nature différente:**

Dès que deux métaux de nature différente sont en contact, il y'a possibilité de corrosion galvanique. L'anode est constituée par celui dont le potentiel est le plus électronégatif .L'expérience montre que la corrosion galvanique ne se produit que si les deux métaux en contact présentent une différence de potentiel d'au moins 100 mV. L'intensité de la corrosion galvanique n'est pas fonction de l'écart de potentiel entre les deux métaux.

- **Un électrolyte en contact avec les deux phases:**

Sa présence assure le transport des espèces ioniques, et donc du courant dans le milieu liquide.

- **Un contact électrique entre les deux matériaux:**

Cette continuité électrique assure le transport des électrons entre les deux phases.

I.2.2.2.4.2. Paramètres de la corrosion galvanique

La corrosion galvanique fonctionnant comme une pile, et donc la densité de courant de couplage dépend de plusieurs facteurs dont la nature de l'électrolyte, le rapport de surface des deux métaux, la température et la distance entre les deux matériaux.

Les processus chimiques et électrochimiques décrits précédemment se produisent au sein de l'électrolyte. Les facteurs inhérents au milieu peuvent donc influencer sur leur déroulement: l'aération, l'acidité, et la salinité du milieu. Des paramètres externes tels que la température ou l'hydrodynamique de la solution peuvent également influencer la cinétique de corrosion.

- **Aération**

La cinétique de la corrosion galvanique dépend de la cinétique des demi-réactions

d'oxydoréduction sur la cathode et l'anode. En solution aérée, la réduction du dioxygène est favorisée par rapport à la réduction des protons. Les densités de courant de corrosion i_{corr} et galvanique i_g augmentent, rendant

le matériau plus sensible à la corrosion localisée (galvanique, notamment) et généralisée. La réduction du dioxygène joue donc un rôle primordial dans ce processus. Cette réaction cathodique est considérée comme la force motrice de la corrosion galvanique.

• Acidité

La susceptibilité du matériau à la corrosion galvanique et généralisée est fonction du pH de l'électrolyte. En effet, le potentiel de corrosion du matériau est plus noble et les densités de courant plus élevées en milieu acide. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La migration d'ions Cl^- vers les zones fortement concentrées en ions H^+ conduit à une acidification encore plus forte au voisinage des zones cathodiques, qui n'est limitée que par l'équilibre de la réaction d'hydrolyse des cations métalliques. Le diagramme de Pourbaix de l'aluminium (figure I.1) indique que l'alumine devient soluble lorsque le pH s'écarte de la neutralité. L'acidification du milieu au voisinage de la surface du matériau ne permet ainsi plus à l'aluminium de rester passif et entraîne donc une dissolution importante du métal.

• Salinité

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine du phénomène de corrosion localisée. Leur présence en solution aqueuse s'accompagne de deux effets complémentaires: d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu, et, d'autre part, le film passif d'alumine en surface du métal devient moins efficace car plus instable et donc plus susceptible de se rompre localement. Un autre effet de la salinité sur la corrosion résulte de son influence sur la conductivité du milieu aqueux. La résistivité du milieu corrosif limite la distance sur laquelle le couplage est effectif. Cependant, la forte conductivité des milieux salins tels que l'eau de mer (0,5 M NaCl) implique que la résistivité de l'électrolyte va jouer un rôle mineur dans la cinétique des réactions de corrosion. Finalement, les variations de concentration en ions Cl^- n'ont que peu d'influence sur les cinétiques de corrosion, comparées à celles causées par la température ou l'aération.

• Température

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réactions et de

transport.

L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau.

• Hydrodynamique

La migration des réactifs vers l'interface et des produits de réaction vers l'électrolyte est de nature à modifier les cinétiques des réactions électrochimiques en changeant les concentrations des espèces et donc les potentiels d'équilibre. Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses de réaction en contrôlant le transport de matière par établissement d'une couche limite de diffusion des espèces.

La cinétique de la réaction cathodique est le plus souvent limitée par l'arrivée du dioxygène à l'interface matériau/électrolyte et le courant global de corrosion galvanique en dépend.

I.2.2.2.4.3. Influence du rapport de surface Cathodique/ Anodique (SC /SA)

Le rapport SC/SA joue un rôle prédominant dans l'évolution de la vitesse d'une corrosion galvanique. En effet la densité de courant à l'anode, qui détermine la vitesse avec laquelle le métal se dissout, est une fonction du rapport.

La vitesse de corrosion est d'autant plus grande que le rapport Sc/Sa est grand, c'est-à-dire que la surface anodique est petite par rapport à la surface cathodique. Il n'est pas possible de jouer sur ce paramètre parce que la corrosion galvanique se développe toujours au plus près des contacts hétérogènes.

I.2.2.2.4. La distance

La corrosion galvanique est une corrosion de proximité. Elle se limite à la zone de contacts.

L'intensité de la corrosion décroît très vite au fur et à mesure qu'on s'éloigne, du point de jonction des deux métaux.

I.2.2.2.5. Influence du potentiel d'électrode

Généralement la corrosion galvanique n'est pas à craindre lors du couplage d'alliages dont la différence de potentiel de corrosion libre n'excède pas 50 mV dans le milieu considéré. Dans la pratique, on relève cependant quelques exceptions, en particulier si le rapport de surfaces anode/cathode est très défavorable. L'étape d'amorçage du phénomène résulte aussi souvent d'un couplage galvanique, provoqué par une hétérogénéité locale au niveau de la surface métallique ou du milieu, entre une petite zone anodique et le reste de la surface cathodique.

I.2.2.2.6. Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages

La corrosion des alliages à base d'aluminium est d'origine principalement galvanique. Cette forme de corrosion est liée à la présence des éléments d'alliage. D'autres formes de corrosion peuvent cependant intervenir et modifier le comportement en milieu salin de ces matériaux, elles sont généralement liées à l'alliage matriciel. Diverses études ont porté sur l'influence de paramètres relatifs au métal sur la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium. Les éléments d'alliages, les traitements thermiques et les phases secondaires sont autant de facteurs susceptibles d'être décisifs en termes de corrosion, par leur capacité à délocaliser la corrosion.

La tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal. La formation de particules intermétalliques où la ségrégation de secondes phases dans l'alliage d'aluminium est responsable, soit d'une dégradation accélérée de l'aluminium, soit, au contraire, d'un ralentissement de la cinétique de corrosion du matériau.

Tableau (I.6): Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées sur ces alliages [4].

Série	Éléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al_3Mg_2 , Al_8Mg_5	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al_3Fe , Al_6Fe $Al_{12}Fe_3Si_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	$FeSiAl_5$, Fe_2SiAl_8 $Al_8Si_6Mg_3Fe$, Mg_2Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al_6Mn , Al_6MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg ajout de Cu	$MgZn_2$	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuilletante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Cu	$CuFeMnAl_6$, Al_2Cu Al_2CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuilletante

I.2.3. Farceur de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs généralement en relation les uns avec les autres de manière complexe pouvant réagir avec un effet de synergie. Ces facteurs sont de deux types : externe et interne et sont résumés dans le tableau I.7.

Tableau (I.7): Les facteurs influençant la corrosion

Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	<ul style="list-style-type: none"> • Concentration du réactif • Teneur en Oxygène, en impuretés en gaz dissous (CO₂, NH₃, H₂S, ...) • Acidité du milieu, salinité, résistivité • Température, pression • Présence de bactéries.
Facteurs Métallurgiques	<ul style="list-style-type: none"> • composition d'alliage, hétérogénéités cristallines • Procédés d'élaboration • Impuretés dans l'alliage, inclusions • Traitements thermiques, mécaniques • Additions protectrices
Facteurs définissant les conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> • Etat de surface, défauts de fabrication • Formes de pièces • Sollicitations mécaniques • Emploi d'inhibiteurs • Procédés d'assemblage (couples galvaniques, soudures, etc.) • Croûte d'oxydes superficiels • Force électromotrice extérieure (électrolyse)
facteurs dépendants du temps	<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement • Tensions mécaniques internes ou externes • Température- modalité d'accès de l'oxygène ou autre gaz dissous • Modification des revêtements protecteurs • Apparition d'un dépôt (calcique ou autre)

Introduction

Dans ce chapitre seront d'abord présentés les alliages que nous avons étudiés et ses compositions chimiques, puis les techniques de préparation des échantillons pour les différents essais, ensuite nous citons les différents traitements thermiques

On a également décrit les techniques d'analyse utilisée pour la caractérisation des échantillons telles que le MEB, L' EDAX, le microscope optique, la micro-dureté et la diffraction des rayons X. électrochimique.

II.1. Matériaux et solution utilisées

II.1.1. Alliages étudiés

Les alliages aluminium sont des matériaux largement utilisés dans l'industrie; leurs applications s'étendent du bâtiment aux boites de conserves alimentaires

Dans ce travail, nous avons utilisés des alliages d'aluminium utilisé comme matériaux de revêtement mural.

II.1.2. Préparation des échantillons

Pour l'étude métallographique, l'observation en microscope optique ou électronique nécessite une bonne préparation de la surface. Les échantillons traités ont subi un polissage mécanique avec papier abrasif 800 et 1000 et avec la pâte diamantée 1.5μ

II.1.3. Attaque chimique

L'observation des échantillons en microscope optique ou électronique nécessite une attaque chimique pour révéler sa structure, on utilise un réactif de Keller dont sa composition est la suivante :

-Acide fluorhydrique (HF) : 2 ml

-Acide chlorhydrique (HCl) : 3ml

-Acide nitrique (HNO₃) : 5 ml

-Eau distillée (H₂O) : 180 ml

II.1.4. Evaluation de corrosion

II.1.4.a. Milieu

Des solutions aqueuses de NaCl avec différente concentration sont préparées pour réaliser les tests de corrosion la température est constante $T=70\text{ C}^\circ$ et durée est de un jour 1.

On a préparé 3 échantillons il présentés dans le tableau (II.1).

Tableau (II.1): les solutions utilisées pour la corrosion

Echantillons de travail	Concentration de NaCl g/l
Ech 1	20
Ech 2	30
Ech 3	50

II.2 Mesures électrochimiques

La réaction des matériaux étudiés est déterminée par le tracé des courbes de polarisation courant-potentiel qui donnent en outre accès aux paramètres cinétiques des réactions d'oxydo-réduction du processus de corrosion.

L'application de l'appareillage non stationnaire (non agitation) et la mesure de la réponse en courant nécessitent un appareillage comprenant trois électrodes reliées à un potentiostat: une électrode de travail (matériau étudié), une électrode de référence (au calomel saturé) et une électrode axillaire (contre-électrode inerte chimiquement(en platine)).

Un potentiel est imposé entre l'électrode de travail et l'électrode de référence et la réponse en courant est mesurée entre l'électrode de travail et la contre-électrode. Le potentiostat est équipé d'un microordinateur pour tracer les courbe de polarisation à l'aide d'un logiciel apparié.

Pour obtenir des courbes $i=f(E)$ dans des conditions identiques pour tous les matériaux, une cellule spécialement conçue pour les mesures électrochimique est utilisée (figure.II.1).

Méthodes expérimentales

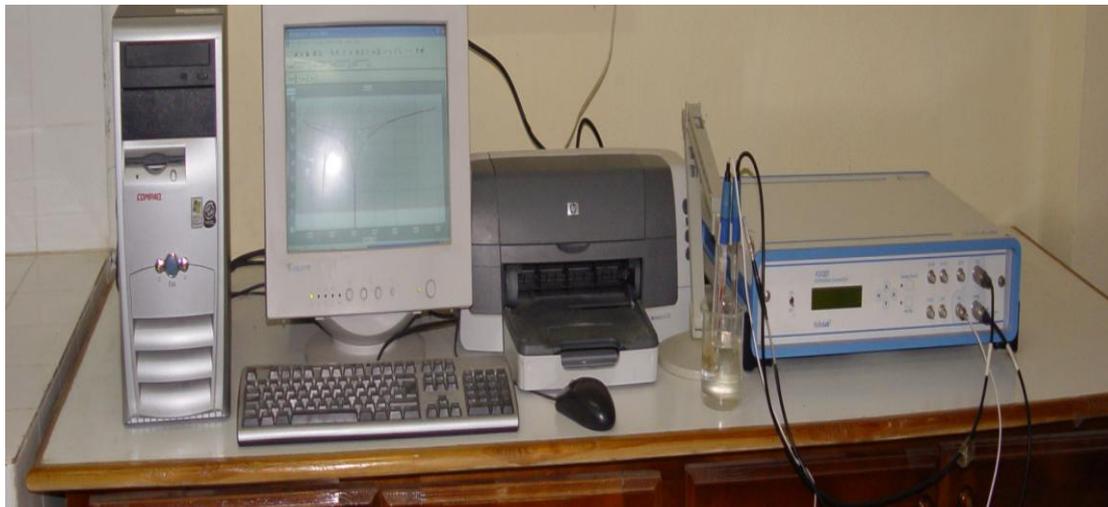
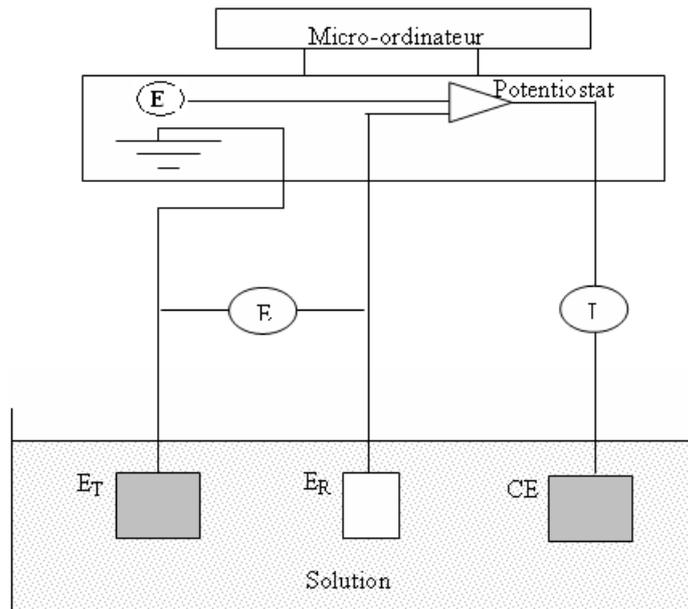


Figure (II.1): Montage de la cellule du test de polarisation

Les échantillons de travail utilisés sont section polaire de l'électrode de travail est 0.5cm^2 .

Les branches anodique et cathodique des courbes de polarisation sont tracées en mode potentiostatique, après stabilisation au potentiel de corrosion.

en utilisant l'équation de Nernst :

$$E_{\text{éq}} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Ox}}^a}{a_{\text{R}}^b}$$

(II.1)

Méthodes expérimentales

la résistance à la polarisation est calculée par équation (II.2):

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} = \frac{1}{2.303 i_{corr}} \left(\frac{b_a b_c}{b_a + b_c} \right) \quad (\text{II.2})$$

On peut calculer le courant de corrosion en se référant à l'équation:(II.3)

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \frac{1}{R_p} = \frac{K}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

$$K = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (\text{II.4})$$

E_{eq} : force électromotrice de la pile à l'état d'équilibre électrochimique;

E^0 : constante caractéristique de la pile, désigne f.e.m. de la pile à l'état standard ou les activités

de toutes les espèces ont la valeur 1;

R : constante des gaz parfaits égale à 8,314 J.K-1.mole-1 ;

F : à 96500 Coulombs.mole-1 ;

T : température absolue (°K);

n : le nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction;

a_{Ox} : activité des espèces oxydées (réactifs), exprimée en [mol.L-1];

a_{Red} : activité des espèces réduites (produits), exprimée en [mol.L-1].

II.2.1. Les paramètres expérimentaux à calculer

II.2.1.1. La densité du courant, le potentiel de corrosion et résistance de corrosion

Le calcul de la densité du courant du potentiel de corrosion, i_{corr} et E_{corr} est effectué en extrapolant les droites de Tafel anodique et cathodique vers le potentiel E_{corr} , le point d'intersection nous donne directement i_{corr} et E_{corr} et R_p

II.2.1.2. La vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion V_{corr} exprimée en (mm/an) est calculée en appliquant la relation suivante/

$$V_{\text{corr}} = [i_{\text{corr}} \cdot t \cdot M \cdot 10] / n \cdot F \cdot d \quad (\text{II.5})$$

Où:

I_{corr} : la densité de courant de corrosion (A/cm²)

t: le temps qui correspond à une année (s)

M : masse atomique de l'aluminium

n: la valence

d : la densité (g/cm³)

II.3. Traitement thermique

Cette méthode est réalisée à l'aide d'un four, Nous avons préparé 4 échantillons dans différents températures allant de 50 à 120°C pendant un temps de maintien de 6 heures tableau (II.2):

Tableau (II.2):différent de température est utilisé

L'échantillon	Température C°
1	50
2	70
3	100
4	120

II.4. Techniques expérimentales utilisées:

II.4.1. Polissage des échantillons.

Les échantillons subissent un polissage mécanique en utilisant des papiers abrasif 800 et 1000, placés sur un disque rotatif. Les échantillons sont lavés à l'eau et séché à l'air comprimé une finition avec la pâte diamantée est ensuite réalisée.

Pour révéler la structure, une attaque chimique avec le réactif killer est enfin procédée (Figure.II.2)



Figure (II.2): Appareil de polissage

II.4.2. Microscopie optique:

La microscopie optique (MO) a été utilisée afin d'une part, de déterminer la structure et la texture granulaire des matériaux étudiés, et d'autre part, pour caractériser l'état de dégradation des échantillons après les différents tests de corrosion.

Pour cela un microscope optique de type *binoculaire* avec des grossissements x10, x50, x100 est utilisé (Figure. II.3)



Figure (II.3):Appareil de microscopie optique

II.4.3. Diffraction des rayons X:

Le principal outil utilisé pour la détermination de la cristallinité des matériaux est la diffraction des rayons X .lors d'une analyse par cette technique, un faisceau de rayons, émis par une source, est envoyé sur l'échantillon à analyser par cet angle (figure II-3)

II.4.3.a. la taille de grain:

La taille de grain des différents a été déterminée tout d'abord à partir des spectres des diffractions de RX. en mesurant la largeur à mi- hauteur(FWHM) des pics les plus intenses, on peut estimer la taille moyenne des cristallites (grains) D par la formule de Scherrer

$$D = \frac{(0.94.\lambda)}{B.\cos\theta hkl} \quad (\text{II.5})$$

Ou

D: est la taille des grains ([D]=n m)

λ : la longueur d'onde du faisceau diffracté

θ : est l'angle de diffraction.

B: est la largeur à mi-hauteur.



Figure (II.4): le diffractomètre utilisé de type siemens Bruker D8

II.4.4. Micro-dureté:

La micro dureté est une partie complémentaire de l'examen métallographique qui donne un aperçu sur les caractéristiques mécanique, en mesurant la dureté des matériaux

L'appareil utilisé (Figure (II.5)) est équipé d'un microscope optique pour permettre de positionner l'empreinte sur la face désirée, il permet l'acquisition automatique des valeurs de micro-dureté Vickers



Figure (II.5): Appareil micro-dureté

II.4.5. Microscopie électronique à balayage

Le MEB est actuellement la technique la plus utilisée en matière de topographie à l'échelle microscopique. Son avantage considérable par rapport à des microscopes optiques, par exemple, réside dans le fait que l'image ne souffre pas d'une profondeur de champ limitée.

Le principe de la microscopie électronique à balayage consiste à balayer la surface d'un échantillon par un faisceau d'électrons finement localisé pour en collecter, par détecteurs respectifs, les électrons secondaires et les électrons rétrodiffusés. Le matériau analysé doit être conducteur afin d'éviter des phénomènes de charges dus aux électrons.

L'association du microscope avec un microanalyseur permet la détection des rayons X, caractéristiques de fond continu (pour établir la cartographie X de l'échantillon analysé : il s'agit du mode EDS(X Energie Dispersive Spectroscopie). Ce mode établit une carte de distribution des éléments présents sur une étendue choisie. Autant de cartes X sont éditées qu'il y a d'éléments à analyser (Figure.II.6).



Figure (II.7): microscopie électronique de balayage MEB

Ce chapitre décrit les méthodes et les protocoles employées dans l'expérimentale. Toutes les étapes de préparation et d'exécution des tests seront décrites.

Les résultats et leurs discussions font aussi la partie la plus importante.

III.1.Microstructure:

III.1.1.Microscopie optique:

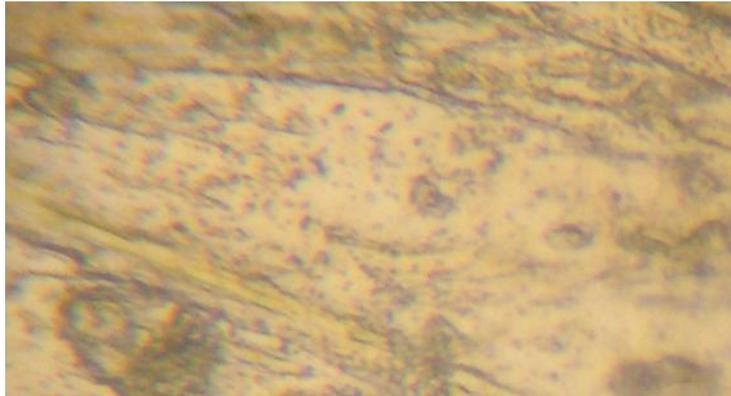


Figure (III.1): Microstructure de l'alliage d'aluminium par microscopie optique

La figure (III.1) montre la microstructure de l'alliage étudié après l'attaque chimique par le réactif de killer, avant test de corrosion et traitement thermique.

C'est une structure homogène qui ne présente aucun défaut.

On a obtenu l'image suivante par MEB qui montre une structure laminaire et homogène.

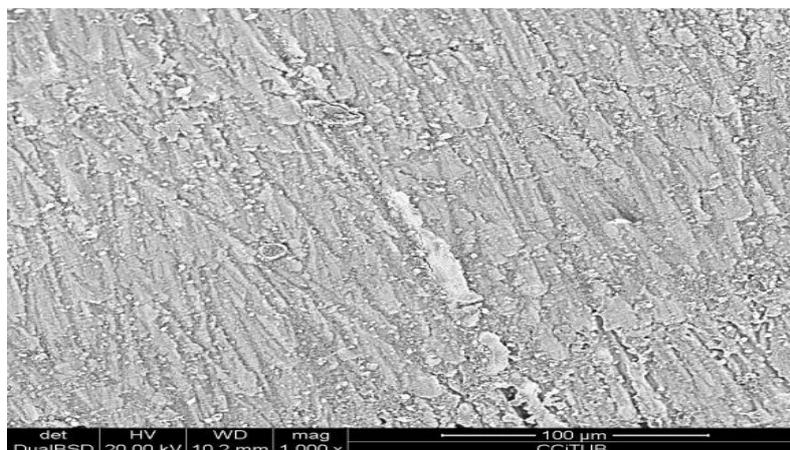


Figure (III.2): Obtenu par MEB

III.1.2. Analyse EDAX

La composition chimique est déterminée par spectroscopie EDAX.

Cette présente le spectre EDAX obtenu sur l'alliage d'aluminium. On observe un seul pic représentatif de l'aluminium pur. (Figure III.3)

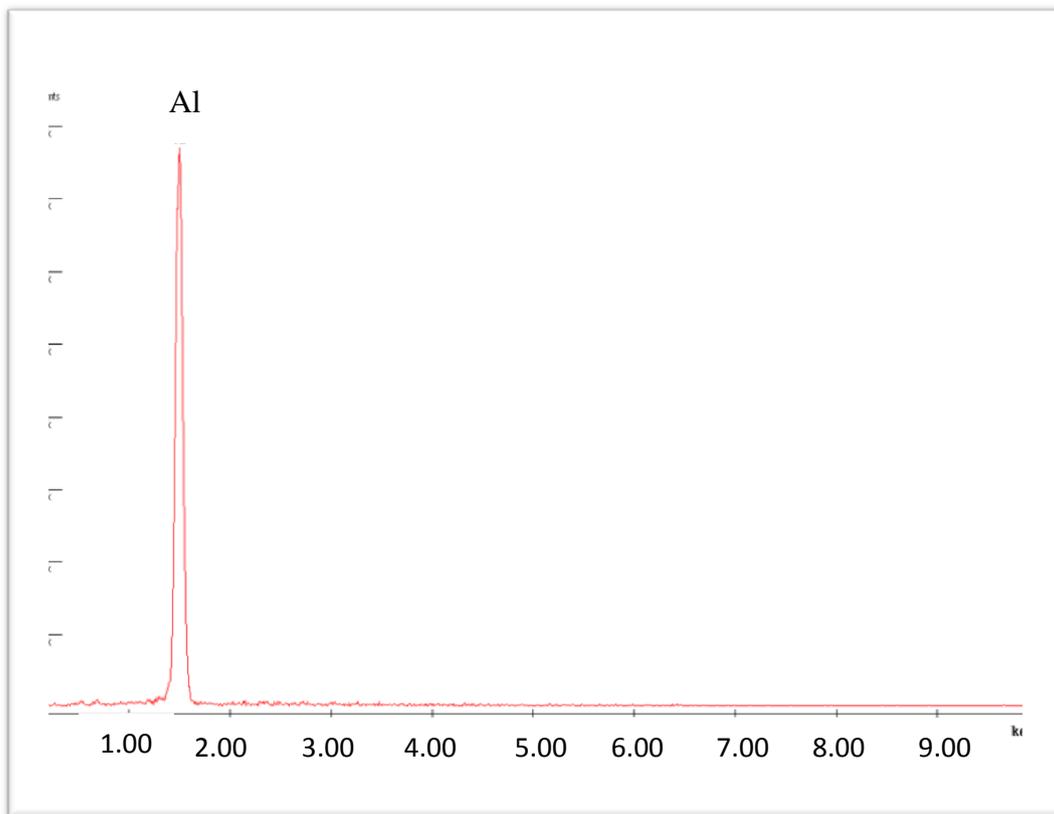


Figure (III.3): Analyse EDS d'alliage d'aluminium

III.1.3. Diffractions RX

Les diffractogrammes des RX d'un échantillon témoin montre bien une structure cristalline avec les orientations (111), (200), (220), (311) et (222).

L'orientation (220) est dominante le diffractogramme confirmé aussi qu'il s'agit de l'aluminium pur. (Figure III.4):

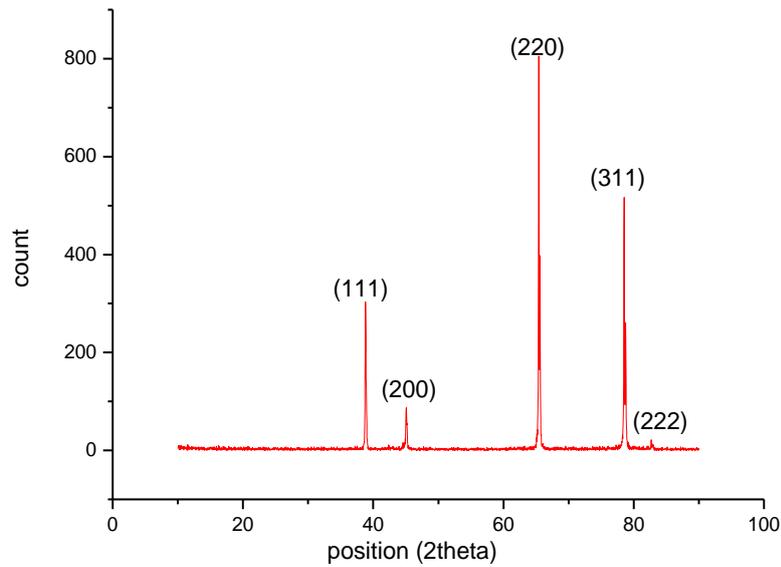


Figure (III.4): Diffractogramme de RX de l'aluminium

III.1.3: Microdureté de l'alliage étudié

Tableau (III.1): la dureté d'échantillon référence

Echantillons	Hv	Hv	Hv	Hv	Hv moyen
Référence	40.4	38.6	38.8	41.3	39.775

Les essais de micro dureté Vickers ont donné une dureté moyenne.

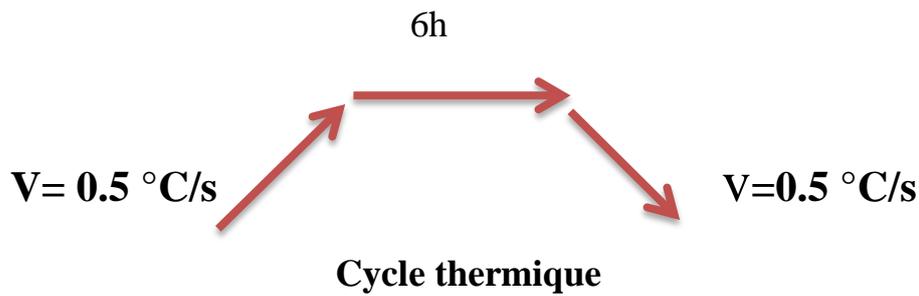
III.2. Influence de la température sur la dureté

Nous avons choisi 4 températures 50, 70, 100 et 120C°.

Les mesures de la dureté des échantillons après traitement thermique sont résumées dans le tableau (III.2).

Tableau (III.2): La dureté des échantillons après traitement thermique

Température C°	HV
50	39.7
70	38.75
100	37.86
120	36.16



La figure (III.5) montre la variation de la dureté en fonction de la température

Entre 50C° et 100C° , la diminution est faible. Par contre elle est importante entre 100 et 120C° (figure III.5).

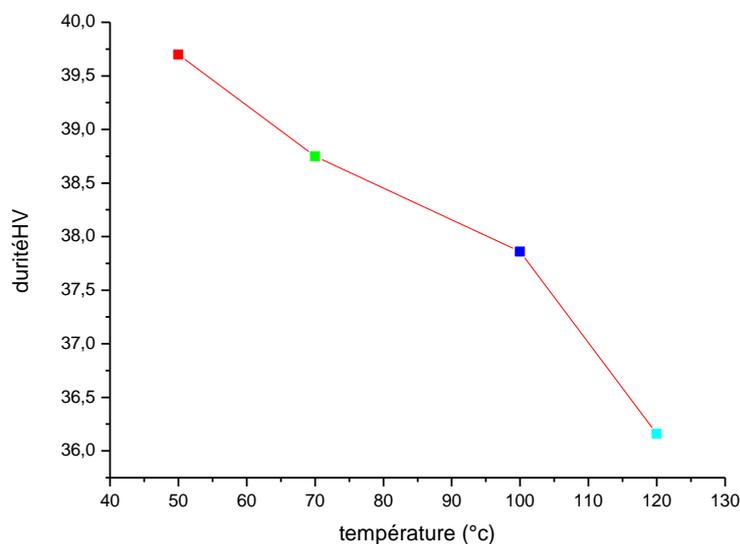


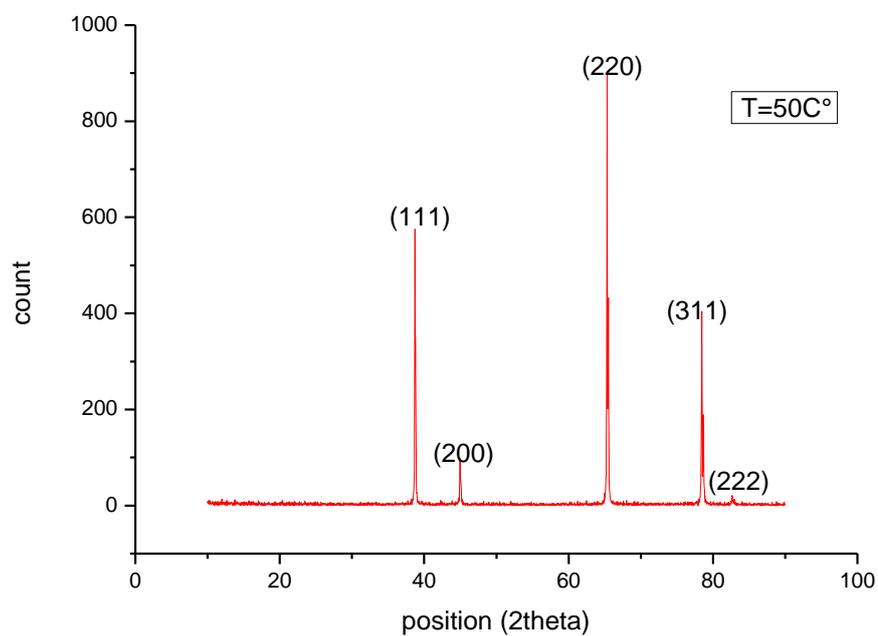
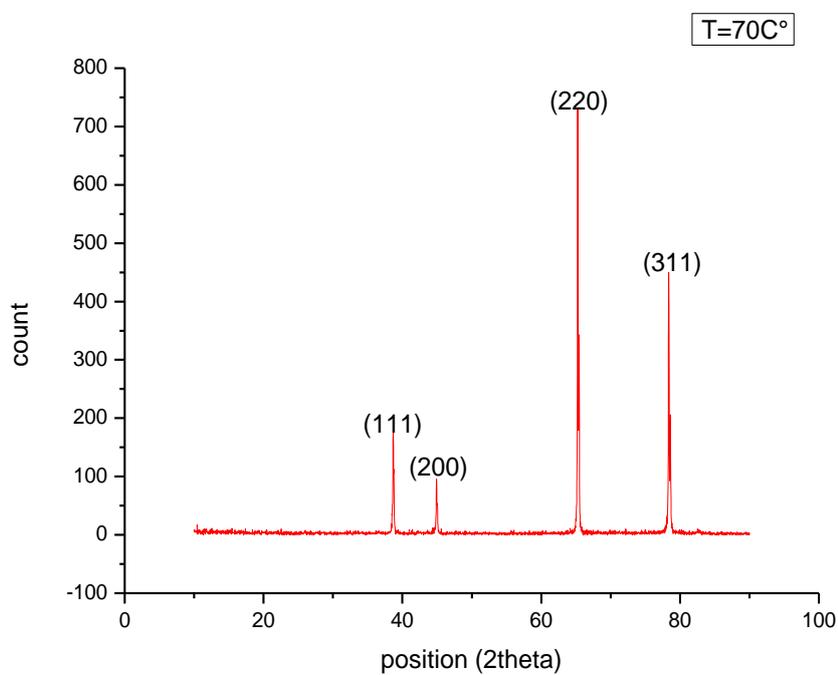
Figure (III.5): Courbe de la dureté en fonction la température

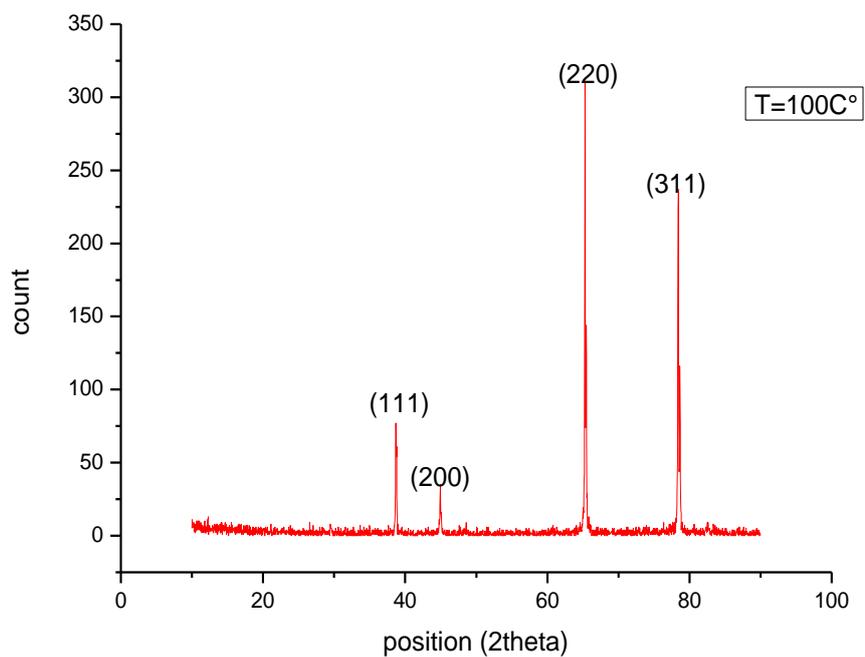
III.2.1. Diffraction des RX

La figure (III.6) montre l'évaluation des pics en fonction des températures des traitements (52 , 70 , 100 et 120C°).

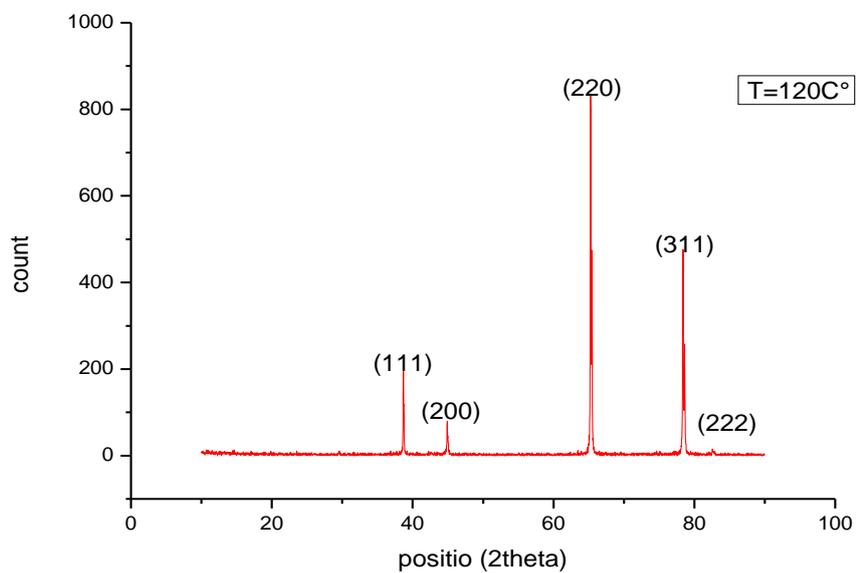
Un léger décalage des pics vers le droit est observé c'est probablement dû aux contraintes structurales.

L'intensité des pics (111), (220) et (311) diminue avec l'augmentation de la température. Ce qui peut conduire à conclure la dégradation des propriétés structurales des échantillons.

**a)****b)**



c)



d)

Figure (III.6): Diffractogramme de RX de l'aluminium dans température:

a) 50C° , b) 70C° , c) 100C° et d) 120C°

La largeur à mi-hauteur (FWHM) de pic (220) varie avec l'augmentation de la température d'une façon aléatoire (tableau III.6).

La taille de grain:

Tableau (III.3): Valeur de la taille de grain à déférent température

Echantillon	2θ (°)	FWHM (°)	Taille de grain (nm)
Echan à T=50C°	65.1759	0.1172	80.4845
Echan à T=70C°	65.2640	0.1098	95.3031
Echan à T=100C°	65.3161	0.0977	97.6432
Echan à T=120C°	65.3308	0.0922	100.2585

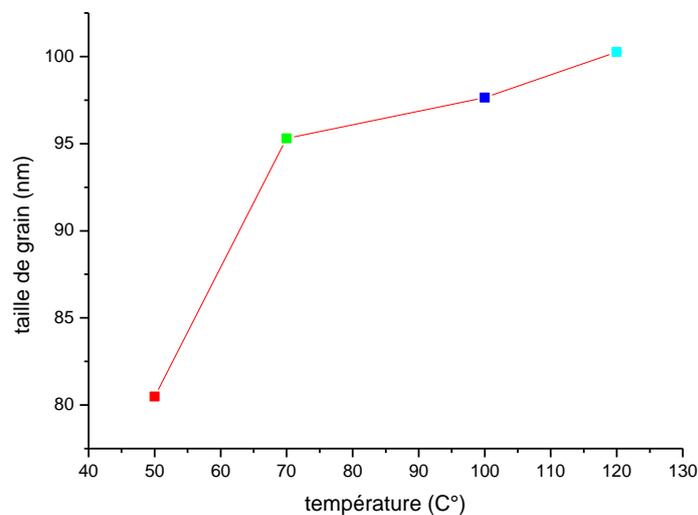


Figure (II.7): La variation de taille de grain en fonction de la variation de température

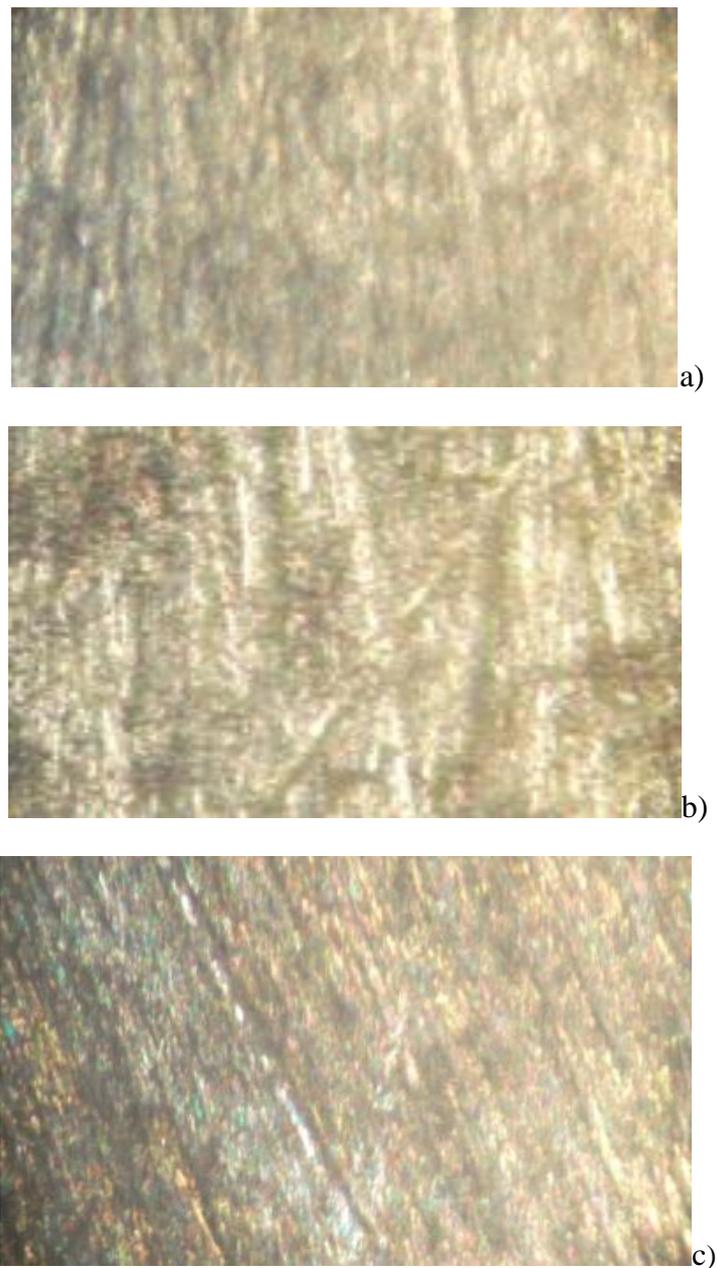
On observe que la taille de grain est augmenté avec l'augmentation de la température mais lors T=100C° le taille de grain est diminué et plus petit que taille de grain à T=70C° et T=120C°

III.3. Tests de corrosion

Le but de cette partie est de voir le comportement à la corrosion d'alliage d'aluminium, on immerge les échantillons dans les solutions d'un NaCl, cela concentration est différente

III.3.1. Observation par microscopie optique:

Dans tous les échantillons on a remarqué l'apparition d'une couche grise probablement l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 (figure III.8). C'est une couche homogène et protectrice.



*Figure (II.8): Microstructure d'échantillons après test corrosion dans NaCl:
a) 20g/l, b) 30g/l, c) 50g/l à $T=70C^\bullet$ et $t=1$ jour*

III.3.2. Observation par MEB:

L'observation par MEB confirme les résultats précédents (figure III.9). Aucun signe de corrosion par piqures ou autre anomalie n'a été observé il semble que le NaCl n'a aucun effet sur les échantillons reste à confirmer tout cela par les courbe de polarisation.

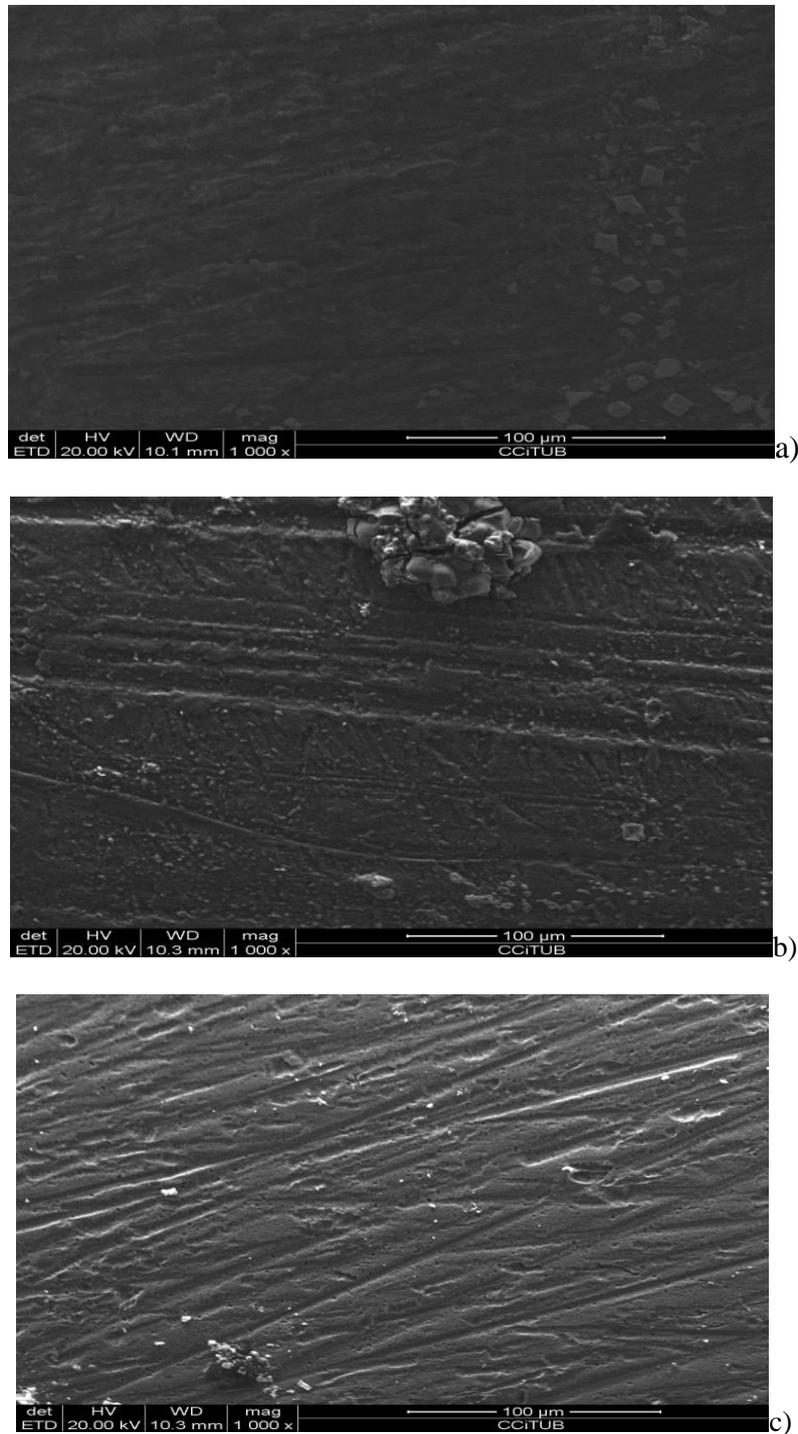


Figure (III.9): MEB d'échantillons après test corrosion a) 20g/l, b) 30g/l, c) 50g/l

III.3.3. Analyse EDAX:

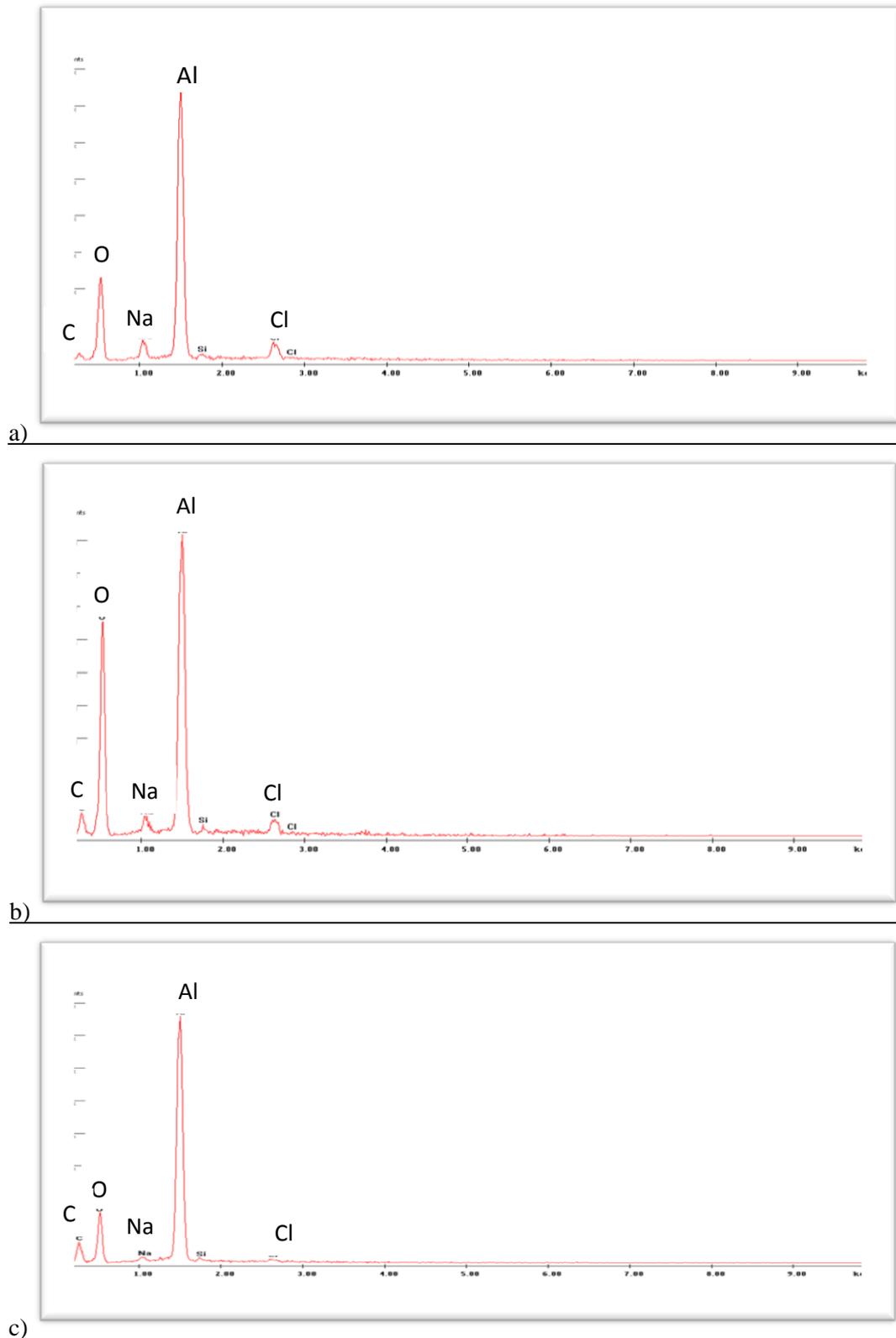


Figure (III.10): Analyse EDS d'alliage d'aluminium après test corrosion dans $T=70^{\circ}\text{C}$ a) 20g/l, b) 30g/l, et c) 50g/l de NaCl

La microanalyse EDAX montre bien l'apparition des pics d'O₂ qui augmente avec l'augmentation de la concentration de NaCl.

On a aussi détecté des pics relatifs à Na et Cl provenant sûrement de la solution d'attaque.

L'existence de l'O₂ est signe de la formation de couche d'alumine (Al₂O₃).

III.2.3 Courbes de polarisation

Pour compléter l'étude, on a utilisé les tests d'électrochimie ils permettent de déterminer les propriétés des alliages d'aluminium, en utilisant les essais électrochimique rapide comme critère qualitatif pour estimer la résistance à la corrosion.

Nous avons tracé les courbes de polarisation dans un intervalle de [-1200,-100mV] avec une vitesse de balayage de 3mV/s et après avoir atteint l'équilibre au bout d'un demi heure

La température utilisée est de 25C°

Les courbes de polarisation des réactions contrôlées par la diffusion satisfont à la loi de Tafel pour de faibles surtensions mais présentent une saturation du courant pour des surtensions fortes pour lesquelles la diffusion d'une espèce devient limitant. Un exemple de ces courbes est présenté dans la figure (III.11)

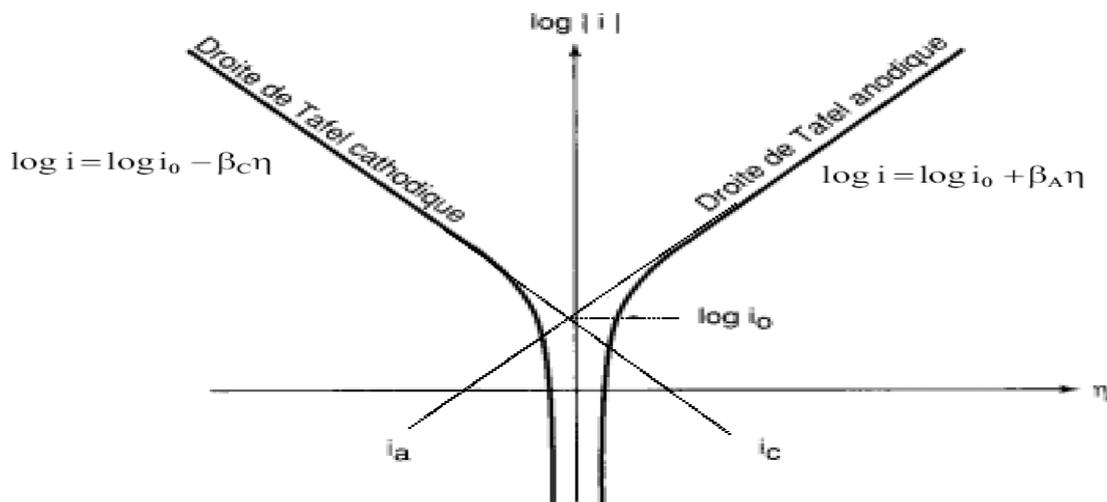


Figure (III.11): Courbe de polarisation et droites de Tafel d'un système redox à l'équilibre en l'absence d'une limitation par le transport de matière

Les figure III.12, III.13, III.14 nous montrent respectivement la variation d'intensité de courant en fonction de potentiel:

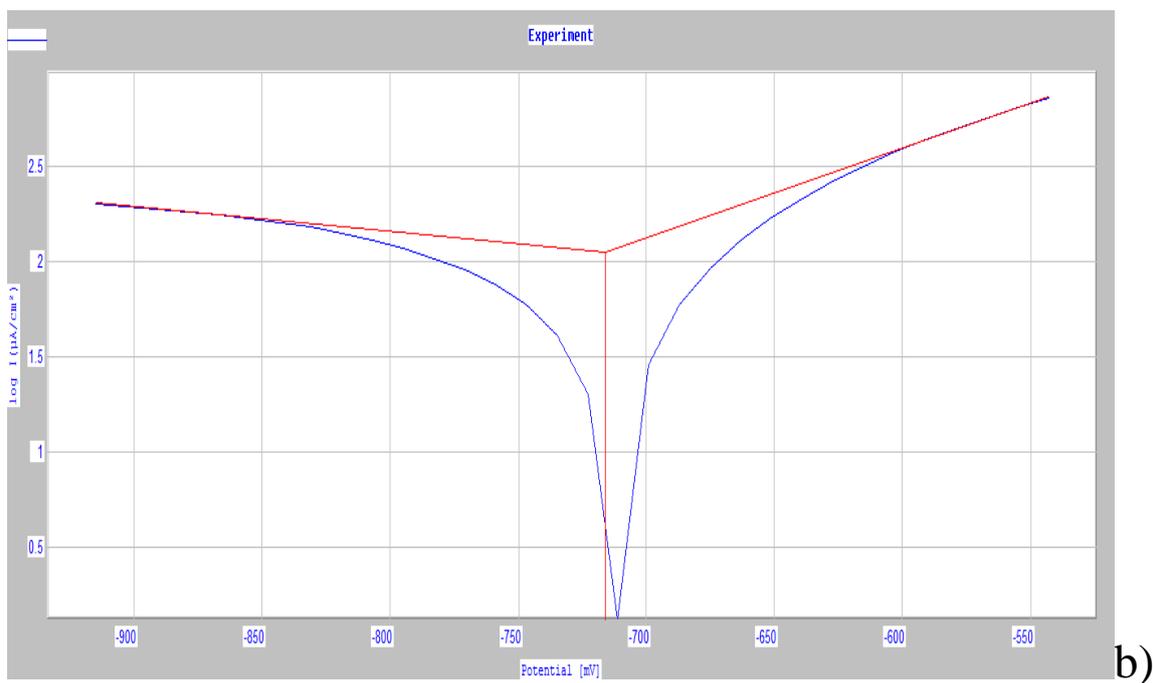
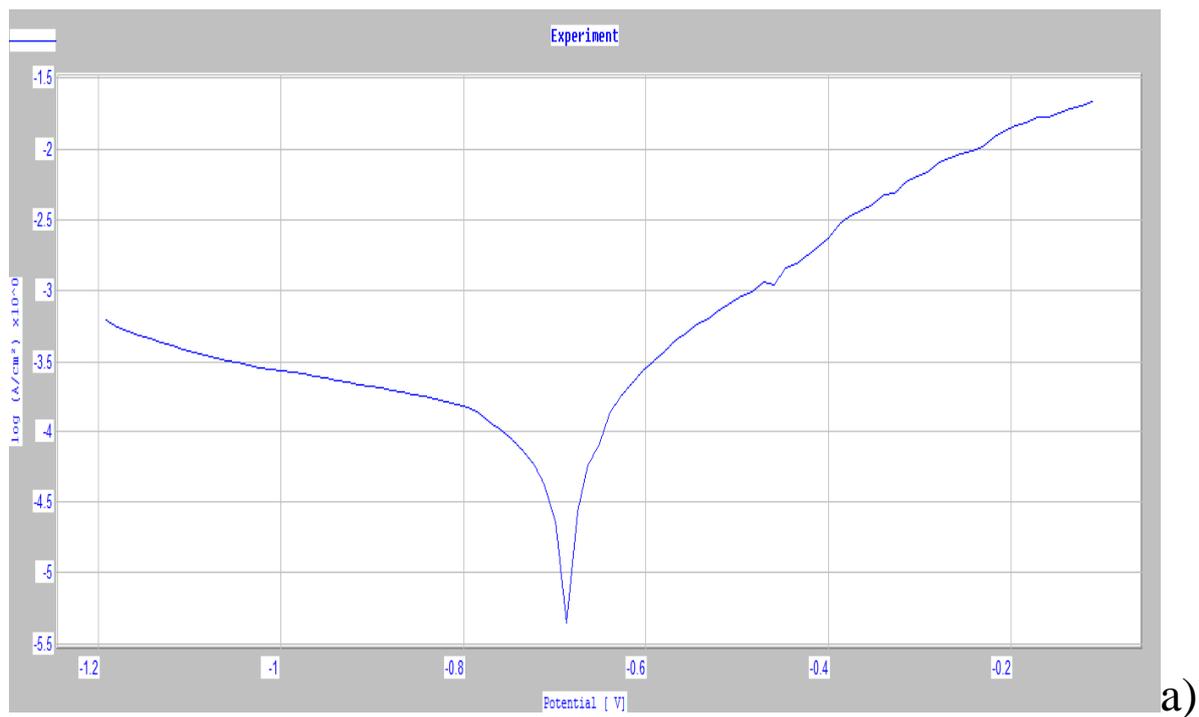


Figure (III.12): Courbe de polarisation a) échelle logarithmique de l'alliage d'aluminium dans NaCl=20g/l, avec b) l'extrapolation des droites de Tafel

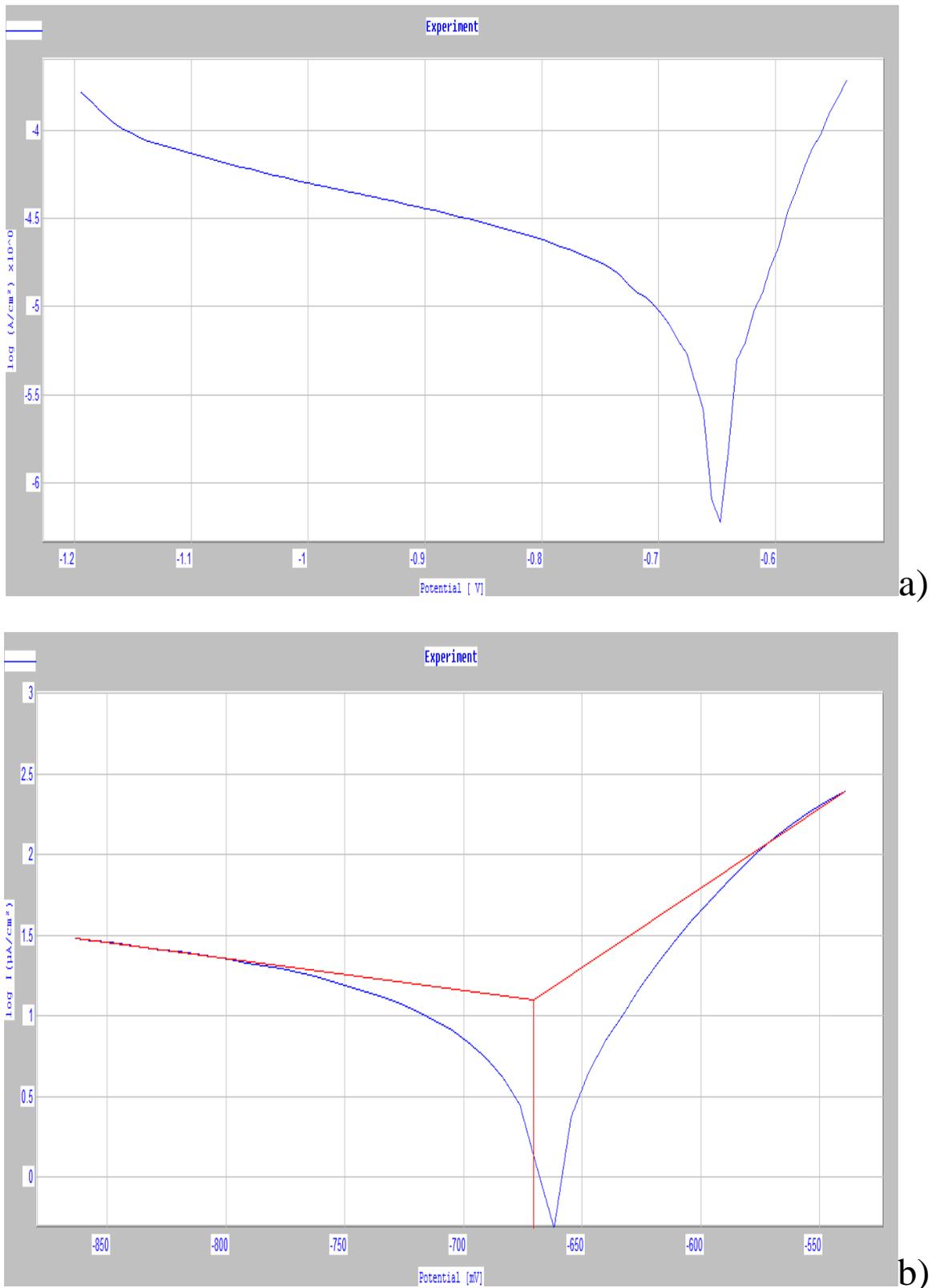


Figure (III.13): Courbe de polarisation a) échelle logarithmique de l'alliage d'aluminium dans NaCl=30g/l, avec b) l'extrapolation des droites de Tafel

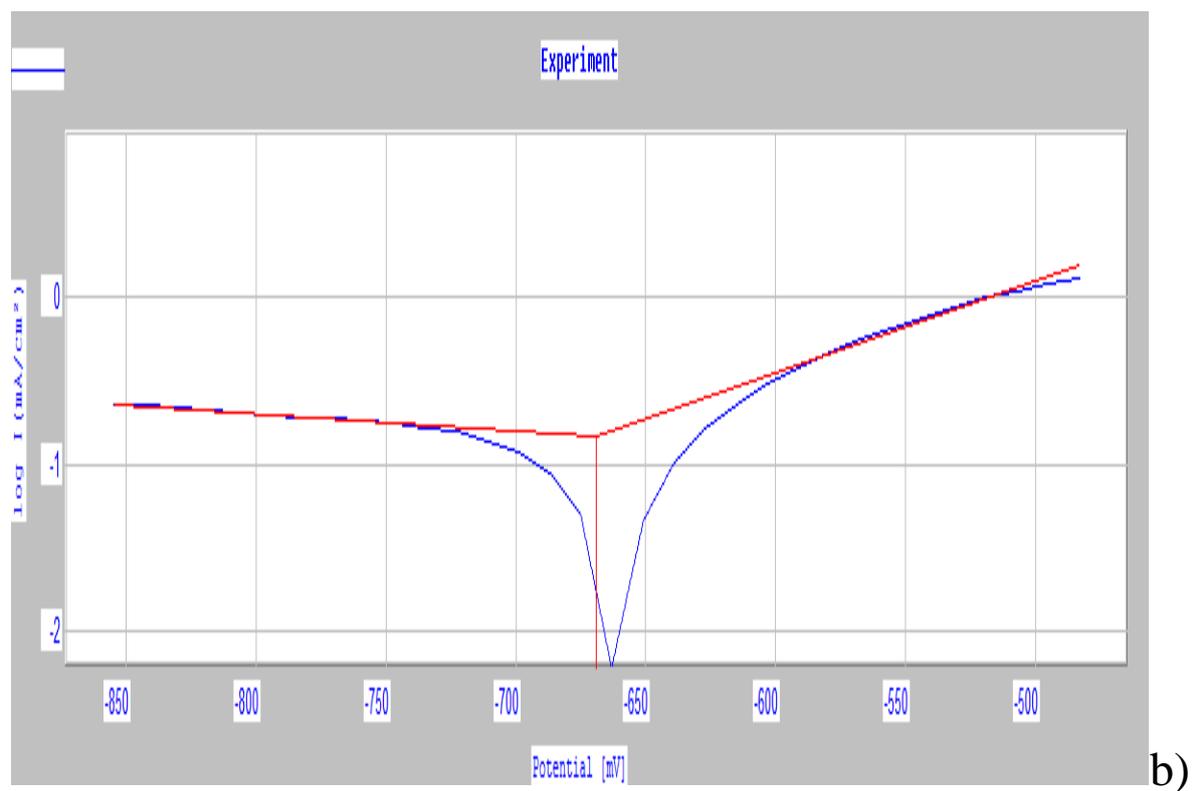
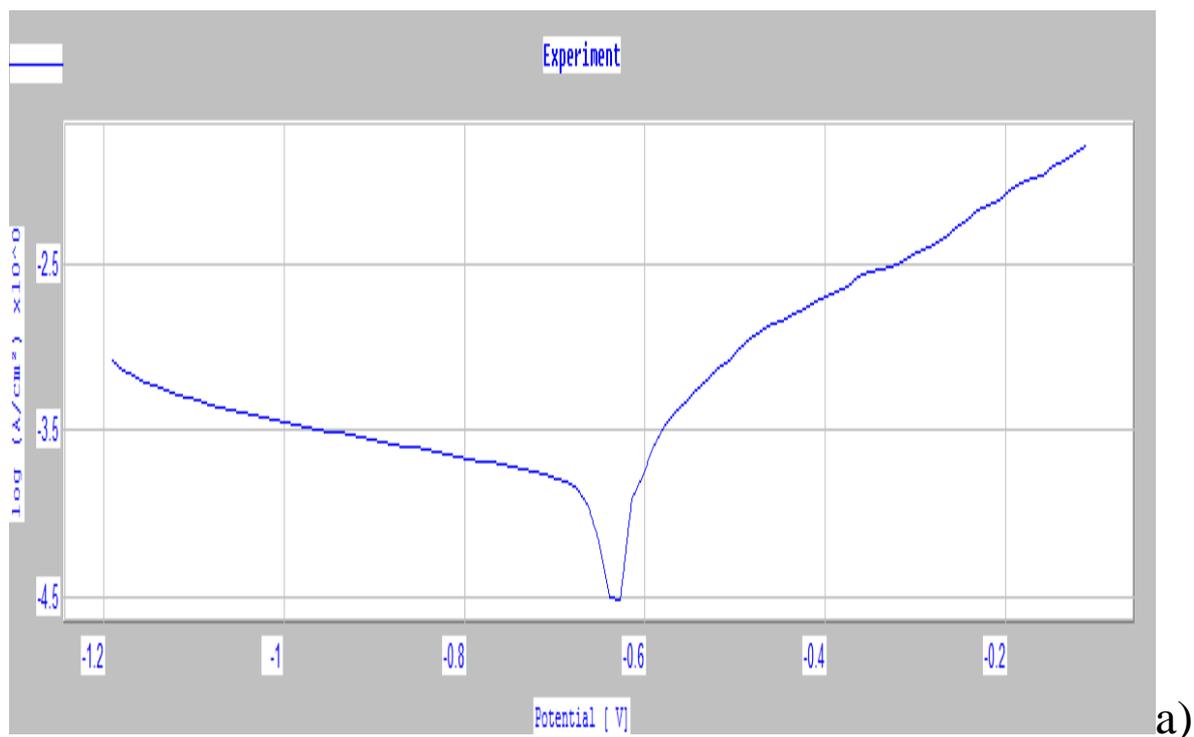


Figure (III.14): Courbe de polarisation a) échelle logarithmique de l'alliage d'aluminium dans NaCl=50g/l, avec b) l'extrapolation des droites de Tafel

III.2.4. Les paramètres de corrosion après essais corrosion:

Le tableau suivant représente les paramètres de corrosion des alliages étudiés

Tableau (III.4): Quelques paramètre de corrosion après test corrosion $T=70C^{\circ}$ et $t=1j$

L'état	I_{corr} (mA/cm ²)	E (i=0) (mV)	R_p ohm.cm ²	Vitesse de corrosion
NaCl=20g/l	0.0112	-715.8	925.76	1.310
NaCl=30g/l	0.0126	-670.3	866.05	1.148
NaCl=50g/l	0.1461	-668.9	791.09	1.711

On observe que le taux de corrosion augmente en fonction de la concentration de NaCl plus la concentration augmente, plus le taux de corrosion augmente

Alors la vitesse de corrosion est concernée de varier de concentration et temps de immersion

On observe aussi que la densité de courant de corrosion pour l'échantillon dans la NaCl=50g/l est plus élevée que densité de courant de corrosion pour l'échantillon dans la solution de NaCl =20g/l et NaCl= 30g/l. il passe de 0.0112mA/cm² pour 20g/l à 0.1596 mA/cm². Ceci est en accord avec le taux de corrosion.

Une densité de courant élevée (courant sur la surface) au potentiel correspondant a indiqué un taux élevé de corrosion d'alliage.

La corrosion des échantillons est dû e à l'existence des ions de Cl⁻ dans la solution

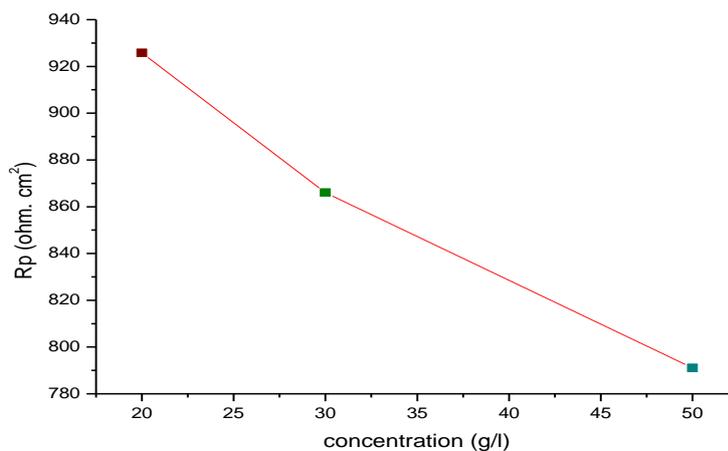


Figure (III.15): Courbe représentant la variation de la résistance de polarisation en fonction de concentration de NaCl

Les valeurs des potentiels de corrosion obtenue indiquent qu'il s'agit probablement d'une corrosion. La figure (III.15) présente l'évolution de R_p en fonction de la concentration en NaCl.

Il est clair que la résistance de polarisation diminue significativement avec l'augmentation de la concentration ce qui confirme l'augmentation du taux de corrosion.

III.3.4 mesure de la dureté:

Le tableau suivant représente les valeurs de la dureté Vickers d'alliage Al selon la concentration de NaCl

Tableau(III.5): La dureté d'échantillons dans différente da concentration de NaCl

Concentration de NaCl g/l	HV
20	40.87
30	39.1
50	38.65

Une légère diminution est observée (figure III.) les propriétés mécaniques de l'alliage se dégradent à cause des piqûres de corrosion.

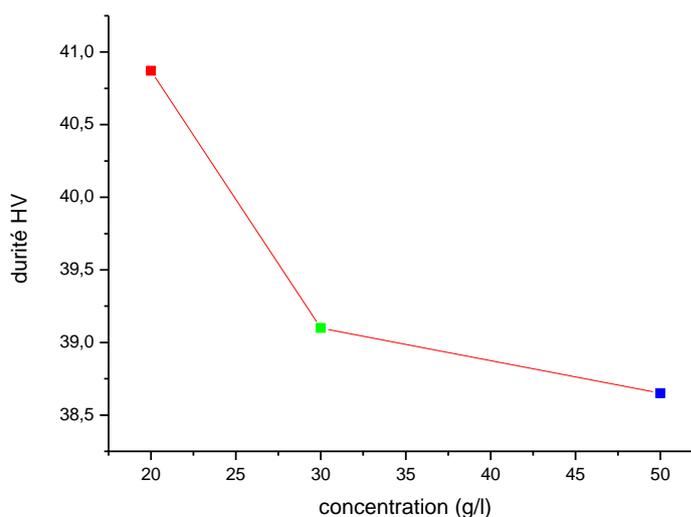


Figure (III.16): Courbe de la dureté en fonction de la concentration

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail nous avons procédé aux traitements thermiques des alliages d'aluminium et leur comportement à la corrosion en effectuant des tests électrochimiques par le tracé des courbes de polarisation.

Les résultats des traitements thermiques dans des températures allant de 50 à 120 C° ont montré que la dureté des échantillons diminue avec l'augmentation de la température.

Les tests de corrosion effectués dans une solution saline NaCl de différentes concentrations ont révélé que:

- l'augmentation de la concentration de la solution NaCl provoque une augmentation de la vitesse de corrosion.
- la morphologie des échantillons corrodés montre qu'il s'agit d'une corrosion par piqûres.
- la résistance des échantillons d'aluminium pur ou des alliages d'aluminium à la corrosion par piqûres est faible à cause de la présence des ions Cl^- . la résistance diminue d'une façon rapide avec l'augmentation des ions Cl^- dans la solution NaCl.
- la corrosion des pièces étudiées a influencé négativement les propriétés mécaniques et surtout la dureté qui a diminué avec l'augmentation de la concentration de NaCl
- pour remédier à ces problèmes, les industriels ont pensé à introduire une couche polymère entre deux plaques d'aluminium. Solution que nous jugeons non efficace.
- Enfin, et après cette étude, nous proposons de procéder à la protection par des revêtements métalliques en prenant en considération les propriétés thermiques, mécaniques, électrochimiques ainsi que l'aspect décoratif. Pour cela les couches minces à base de nitrure (CrN , TiN ou ZrN) sont des candidats potentiels.

Références bibliographiques

- [1] Gérard. Hartmann. L'Aluminium historique. Larousse des industries, 2004.
- [2] Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina .Fabrication characterization and application. Thin solid. Films; 29(1-2) -192-201, 1997
- [3] Kh. Soraya. Mémoire de magister. Université de Tizi ouzou.
- [4] Lycée. Raymond. LOEW. Aluminium et Alliages D'Aluminium.
- [5] M. Sara. Mémoire magister en physique. Université de Constantine 2007.
- [6] M. Ratiba. Mémoire magister en chimie appliquée. Université de Skikda 2008.
- [7] M. Pourbaix. Diagramme potentiel pH d'Aluminium In. Atlas d'équilibre électronique à 25C°. Paris France. Gauthier Villars 1963. pp169-172.
- [8] C. Vargel. Corrosion de l'Aluminium .Ed Dunod. 1999.
- [9] J. Barralis. G. Maeder, Précis de métallurgie, communications actives 5^{eme} édition (Paris 1975),pp.11-14.
- [10] M. Reboul, Techniques de l'Ingénieur. Corrosion des alliages d'Aluminium cor 325.
- [11] F. Dabosi. G. Beranger. B. Baroux. Corrosion Localisée. Les éditions de physique 1994.
- [12] L. L. Shereir. R. A Jarmani and GT Bustein. Corrosion. Vol. 2. Corrosion control. Third. Edition 1994.
- [13] Y. Aoubdia. Mémoire de magister. Univertion de Constantine 2005.
- [14] Pumps and process. Magazine issue. 65 Mach la corrosion 2010.
- [15] H. Leirs. Métaux et alliage autre les aciers et les fonts. Tome II Masson et éditeurs p 71-92. 1971.
- [16] Professeur de construction génie mécanique au lycée Denis.Papin de la Courneuve 1993.
- [17] Wilm (A). Recherche sur la métallurgie physique des alliages Aluminium Magnésium. Métairie 8-1911 p225-7.
- [18] E. Slad ((une métallurgie nouvelle Ed larouse 17. Rur du Montpamasse Paris. VIC(1967).
- [19] J. IDRAC. Mémoire Doctorat. Ecole, Mâtereaux STRUCTURE Mécanique .2007.
- [20] J. M Cuntz Aéronautique/ prévention lutte control la corrosion (Thème-cor 2002) Tome III. V₂ p 7 (oct. 2002) Anglet

Références bibliographiques

- [21] C. Blanc. Etude comparative de la sensibilité du germanium et la propagation de piqure des alliages d'Aluminium. (1997) NPT Oulose.
- [22] G. Béronger et H. Mazylle des facteurs de la corrosion/ prévention et lutte control(2002).
- [23] K.R cooper. R. G Kelley. Sources of variable in cation analyse for aquantilise exfoliation corrosion résistance test Journal of chnotogrphy A 1996 Vol pp 183-190.
- [24] D. Londolt corrosion et chimie de surface des traite des Matériaux presses.
- [25] Europeau. Aluminium association Aluminium dès les Bâtiments un solution Durable.
- [26] Karima. Roubih. Mémoire de magisters contribution à l'étude du comportement Electrochimique du couple galvanique au carbone.
- [27] C. Manaronche. Helga Horn Berger. Dental Materials 23 p 1428- 1437 (2007).
- [28] M. Stern Methode for Determing corrosion Rates from Linear polouzation data corrosion 1958 .vol. 14n° 9 pp 400-444.
- [29] Z. S Z Klarka. Smialwska. Pitting corrosion of Aluminum corrosions science w 9 Vo. 1743-1767.
- [30] A. Ghamri. Mémoire magistère. Université de Biskra 2013.
- [31] D. Benkhadra. Mémoire magistère. Université de Biskra 2013.

Résumé

Cette étude traite des problèmes de la tenue en fonction de la température de l'aluminium utilisé comme matériau de revêtement mural

On a étudié le comportement à la corrosion dans un milieu salin (NaCl) dans des températures allant de 50 à 120 C° et avec différentes concentrations

Nous avons utilisé plusieurs méthodes de caractérisation: microscopie optique, des mesures de dureté, des mesures électrochimique (des courbes de polarisation) pour l'étude de la vitesse et de la résistance à la corrosion et enfin la diffraction de rayons X.

Abstract

This study addresses the problems of resistance at high temperature of aluminum metal used as wall covering.

We studied the corrosion behavior in saline solution (NaCl) in temperature ranging from 50 to 120 C° and with different concentrations.

We used several characterization methods: Optical microscopy, hardness measurements electrochemical measurements (polarization curves) for the study of the speed and of the corrosion resistance and finally the X-ray diffraction.

الخلاصة

تتناول هذه الدراسة مشاكل مقاومة سبائك الالمنيوم المستعمل في تغليف الجدران لدرجة الحرارة العالية.

كذلك تناولت مشاكل التآكل في وسط ملحي كلور الصوديوم تحت حرارة متغيرة بين 50 و 120 درجة مئوية و بتراكيز مختلفة

قمنا باستعمال عدة طرق تشخيصية, قياسات الصلادة, القياسات الكهروكيميائية (منحنيات الاستقطاب) من اجل دراسة سرعة و مقاومة التآكل, كما استعملنا انعراج الاشعة السينية والمجهر الضوئي