

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU
Faculté de génie de la construction
Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

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

Option science des matériaux

Thème

***Etude de l'effet du fromage fondu sur
le comportement à la corrosion de
papier d'emballage en aluminium***

Proposé et dirigé par :

M^r : ZAZI.N

Réalisé par :

M^r : KETTIH.S

Promotion: 2012/2013

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette présente étude, j'adresse mes remerciements en premier lieu à bon dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

D'abord, je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à mon promoteur, Monsieur ZAZI Nacer pour avoir accepté de diriger ce travail par son soutien et ses conseils pertinents qui m'ont donné le courage et l'espoir de travailler tranquillement.

Je remercie vivement le président de jury pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie les membres de jury qui me font l'honneur d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier également les membres du laboratoire de Génie Mécanique UMMTO (sciences des matériaux) pour leurs services et patience ainsi que pour leurs gentillesse.

Je suis également reconnaissant aux personnels de la bibliothèque de Génie Mécanique pour leur aide.

Je remercie énormément tous mes enseignants.

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

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents

A mes chers frères

A mes chères sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis...

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
Chapitre I : L'Aluminium et ses caractéristiques	
I.1. Généralités sur l'aluminium et ses alliages.....	3
I.1.1. Introduction.....	3
I.1.2. Propriétés de l'aluminium et ses alliages	6
I.1.2.1. Structure atomique	6
I.1.2.2. Isotopes de l'aluminium	6
I.1.2.3. Structure cristalline	6
I.1.2.4. Température de fusion de l'aluminium	7
I.1.2.5. Point d'ébullition	7
I.1.2.6. Masse volumique	7
I.1.2.7. L'enthalpie de vaporisation	7
I.1.2.8. Propriétés optiques	7
I.1.2.9. Propriétés mécaniques	8
I.1.2.10. Propriétés chimiques	8
I.1.3. Atouts de l'aluminium et ses alliages	8
I.1.3.1. Légèreté	8
I.1.3.2. Conductivité thermique	9
I.1.3.3. Conductivité électrique	9
I.1.3.4. Tenue à la corrosion	10
I.1.3.5. Aptitude aux traitements de surface.. ..	10
I.1.3.6. Diversité des alliages d'aluminium	10
I.1.3.7. Recyclage	11
I.1.3.8. Facilité de mise en œuvre	11
I.1.4. Alliages d'aluminium	12
I.1.4.1. Classification des alliages d'aluminium	12
I.1.4.1.1. Les alliages de corroyages	12
I.1.4.1.1.1. Alliage avec durcissement structural	12
I.1.4.1.1.2. Alliage sans durcissement structural	13
I.1.4.1.2. Les alliages de moulages	14
I.1.5. Désignation des alliages d'aluminium	14
I.1.6. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages	15
I.1.6.1. Dans le domaine d'automobile	15
I.1.6.2. Dans le domaine de l'aérospatiale	16
I.1.6.3. Dans le domaine du transport ferroviaire	16

I.1.6.4. Dans le domaine marin.....	16
I.1.6.5. Dans le domaine d'alimentation	16
I.1.6.6. Dans le domaine de la construction	16
I.1.6.7. Dans le domaine de l'électricité	16
I.1.7. Différents types d'aluminium dans le domaine alimentaire	16
I.2. Corrosion de l'aluminium et ses alliages	17
I.2.1. Facture de la corrosion	18
I.2.1.1. Le milieu	18
I.2.1.2. Le métal	20
I.2.1.3. Facteurs liés aux conditions d'emploi	21
I.2.2. Rôle de film d'oxyde	22
I.2.3. Définition d'une électrode	22
I.2.4. Tension de l'électrode à l'équilibre (Potentiel d'équilibre)	22
I.2.5. Appréciation des milieux corrosifs	23
I.3 Processus De La Corrosion	24
I.3.1 Corrosion chimique	24
I.3.2 Corrosion électrochimique	24
I.3.3 Corrosion biochimique	24
I.3.4 Corrosion –érosion	25
I.3.5 Passivité d'aluminium et ses alliages	25
I.3.6. Corrosion générale	25
I.3.7. Corrosion par piquêtes	25
I.3.8. Corrosion caverneuse	28
I.3.9. Corrosion sous tension	28
I.3.10. Corrosion exfoliante (ou feuilletante ou stratifiée)	28
I.4 Rôle des éléments d'alliages	28
Chapitre II : procédures et techniques expérimentales	
II.1. Introduction	30
II.2. Prélèvement des échantillons	30
II.3. Préparation des échantillons pour les essais électrochimique (préparation des électrodes)	30
II.4. Préparation de l'électrode de référence pour les essais de la corrosion libre	31
II.5. Solution	31
II.6. Montage pour l'essai de la corrosion libre	31
II.7. Montage pour l'essai de la corrosion sous une tension imposée de 1,5V	32

II.8. Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et microdureté	33
II.8.1. Microscope optique	34
II.8.2 Microscope électronique à balayage	35
II.8.3. Microscope électronique à transmission	35
II.9. Essai de micro dureté Vickers	36
Chapitre III : résultats et interprétations	
III.1. Structure du papier d'aluminium d'emballage du fromage et d'emballage des médicaments avant et après attaque par une solution de 10% NaOH	38
III.2- Morphologie de la corrosion des deux types de papiers d'aluminium dans du fromage fondu	39
III.3- Morphologie de la corrosion sous une tension imposée des deux types de papiers d'emballage en aluminium dans le milieu corrosif du fromage fondu	40
III.4 Structure du papier d'emballage en aluminium sous microscope électronique à balayage avant et après corrosion libre	41
III.5 Microdureté et résistance à la traction des deux types de papiers aluminium d'emballage	42
III.6 Cinétique de la corrosion libre des deux types de papiers d'emballage en aluminium.....	43
III.7-Cinétique de la corrosion sous une tension de 1,5 V des deux types de papiers d'emballage en aluminium	48
CONCLUSION.....	54

Liste des figures :

Figure I.1 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés des métaux avec le taux du laminage	5
Figure I.2 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid	6
Figure I. 3 : Structure cristalline de l'aluminium.....	7
Figure I.4: Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés.	15
Figure II.1 : Conducteur de l'électrode des essais de la corrosion	30
Figure II.2 : Electrode de corrosion du papier d'aluminium d'emballage de médicament.....	31
Figure II.3 : Electrode de corrosion du papier d'aluminium d'emballage du fromage.....	31
Figure II.4 : Montage pour la corrosion libre.....	32
Figure II.5 : Montage pour la corrosion sous une tension imposée du 1,5V.....	33
Figure II.6 : Polisseuse utilisée.....	33
Figure II.7: Schéma d'un microscope métallographique.....	35
Figure II.8: Microscope électronique à balayage (MEB).....	36
Figure II.9: Principe de l'essai Vickers.....	36
Figure II.10 : Micodurromètre	37
Figure II.11 : Microscope Optique.....	37
Figure III.1 : Microstructure du papier d'emballage du fromage fondu avant et après attaque par une solution de 10% NaOH.....	39
Figure III.2 : Microstructure du papier d'emballage du médicament avant et après attaque par une solution de 10% NaOH.....	39
Figure III.3 : Microstructure du papier d'emballage : du fromage (a), du Médicament (b) après corrosion de 5 jours dans du fromage fondu aéré.....	40
Figure III.4 : Microstructure du papier d'emballage en d'aluminium après une journée de corrosion sous tension de 1.5 V (a) papier d'emballage du fromage, (b) papier d'emballage du médicament.....	41
Figure III.5: Examen au microscope électronique à balayage du papier d'emballage : du fromage (a), des médicaments (b).....	42

Figure III.6: Examen au microscope électronique à balayage du papier d'emballage : du fromage (a), du médicament (b) après corrosion libre de 5 jours dans du fromage fondu aéré.....	42
Figure III.7 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).....	44
Figure III.8 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique décimale).....	44
Figure III.9 : Effet loupe potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).....	45
Figure III.10: Effet loupe potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique décimale).....	45
Figure III.11 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).....	46
Figure III.12 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique décimale).....	46
Figure III.13 : Comparaison du potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle normale).....	47
Figure III.14 : Comparaison du potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle logarithmique).....	47
Figure III.15 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).....	48
Figure III.16 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique).....	49
Figure III.17 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).....	49
Figure III.18 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique).....	50
Figure III.19 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).....	50
Figure III.20 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique).....	51
Figure III.21 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).....	51

Figure III.22 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique).....	52
Figure III.23 : Comparaison du potentiel de la corrosion sous une tension de 1.5V du papier d'emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle normale).....	52
Figure III.24 : Comparaison du potentiel de la corrosion sous une tension de 1.5V du papier d'emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle logarithmique).....	53

Liste des tableaux :

Tableau I-1 : propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante.....	8
Tableau I-2 :L'échelle des Ph.....	19
Tableau III.1 : Dureté Vickers et la résistance à la traction du papier d'emballage du fromage.....	42
Tableau III.2 : Dureté Vickers et résistance à la traction du papier d'emballage du médicament.....	43

Introduction

INTRODUCTION

Les produits d'aluminium sont de plus en plus (fortement) utilisés dans les différentes industries et différents domaines tel que : industrie automobile (mécaniques), aéronautique, du bâtiment, le matériel électroménager, industrie médical **et l'emballage alimentaire et des médicaments.**

L'aluminium et ses alliages sont généralement employé sous différents formes comme papier et feuille d'emballage. Il sont destinés à être mise en contacte directe avec des produits alimentaires pour une petite, moyenne et longue durée, et avec les médicaments pour une longue durée.

La corrosion de l'aluminium et ses alliages est un phénomène d'endommagement structural difficile à modéliser. Ce phénomène est la réaction de nature électrochimique entre un métal (ou un alliage) et un milieu corrosif. Elle se déroule suivant un processus chimique ou électrochimiques complexe liée directement à la structure atomique du métal. Cette dégradation fait intervenir deux types de réaction opérant conjointement : des réactions anodiques de dissolution induisant par la suite une passivation, une dépassivation, dissolution et repassivation. Au cours du cycle passivation-dissolution il y a passage des atomes de métal dans la solution (dons notre cas c'est le passage de l'aluminium dans le milieu corrosif représenter par le fromage fondu) et des réactions cathodiques impliquant la réduction de l'hydrogène et de l'oxygène.

Le premier objectif de notre travail est d'étudier l'évolution du phénomène de corrosion, par le biais de l'étude de l'évolution de la morphologie et la cinétique de corrosion du papier d'emballage en aluminium du fromage fondu et du papier d'emballage en aluminium des médicaments dans un milieu corrosif constitué du fromage fondu, en corrosion libre et en corrosion sous tension imposée de 1.5 V. Le second objectif est de comparer la susceptibilité à la corrosion du papier d'emballage du fromage à celle du papier d'emballage des médicaments.

Nous avons tracé les courbes du potentiel de la corrosion libre et de corrosion sous une tension imposée de 1.5 V des différents papiers d'aluminium suscités. Nous avons suivi la morphologie de corrosion des différents papiers par microscopie optique et microscopie électronique à balayage. Nous avons mesuré la microdureté du papier d'aluminium d'emballage du fromage fondu et de médicaments.

Les résultats de cette étude ont montré que le comportement du papier d'emballage des médicaments et du fromage vis-à-vis de la corrosion est différent. Ceci implique que dans le marché algérien il y a des papiers d'aluminium de différentes provenances, de différentes compositions chimiques et de différentes histoires thermomécaniques. Ceci dit les caractéristiques physico-chimiques des papiers d'emballage en aluminium change d'un fournisseur à un autre.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

- Chapitre I : L'Aluminium et ses caractéristiques
- Chapitre II : Procédures et Techniques expérimentales
- Chapitre III : Résultats et interprétations.

Les résultats réalisés sont synthétisés par une conclusion.

Chapitre I

L'Aluminium et ses caractéristiques

Chapitre I : L'Aluminium et ses caractéristiques

L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre.

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). [1]

Les premiers essais de corrosion connus sur l'aluminium ont commencé vers 1890, à partir du moment où ce métal fut disponible en quantité suffisante pour envisager des applications dans le bâtiment et dans les ustensiles de cuisine. C'est ainsi que les premiers essais de tenue à l'eau de pluie, au contact de plusieurs liquides alimentaires (café, thé,...) furent entrepris dès le début de la décennie 1890. [2]

Cette découverte a donné le coup d'envoi de l'extraordinaire développement de la consommation d'aluminium qui est devenu, en un siècle, le deuxième métal le plus utilisé, après l'acier, avec, hors métal recyclé, plus de 19 millions de tonnes dans le monde en 1994. Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc. [3]

I.1. GENERALITES SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES :

I.1.1. Introduction :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient un liquide qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve. Et Pour obtenir un tonne d'aluminium, il faut :

- ✓ 1900 kg d'alumine
- ✓ 380 kg de coke
- ✓ 100 kg de brai
- ✓ 15 kg de produits cryolithiques
- ✓ 13000 kWh sous forme électrique. [1]

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-1). Les lames ont une épaisseur inférieure à 0.15 mm, alors que les plaques ont une épaisseur ou 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-2).

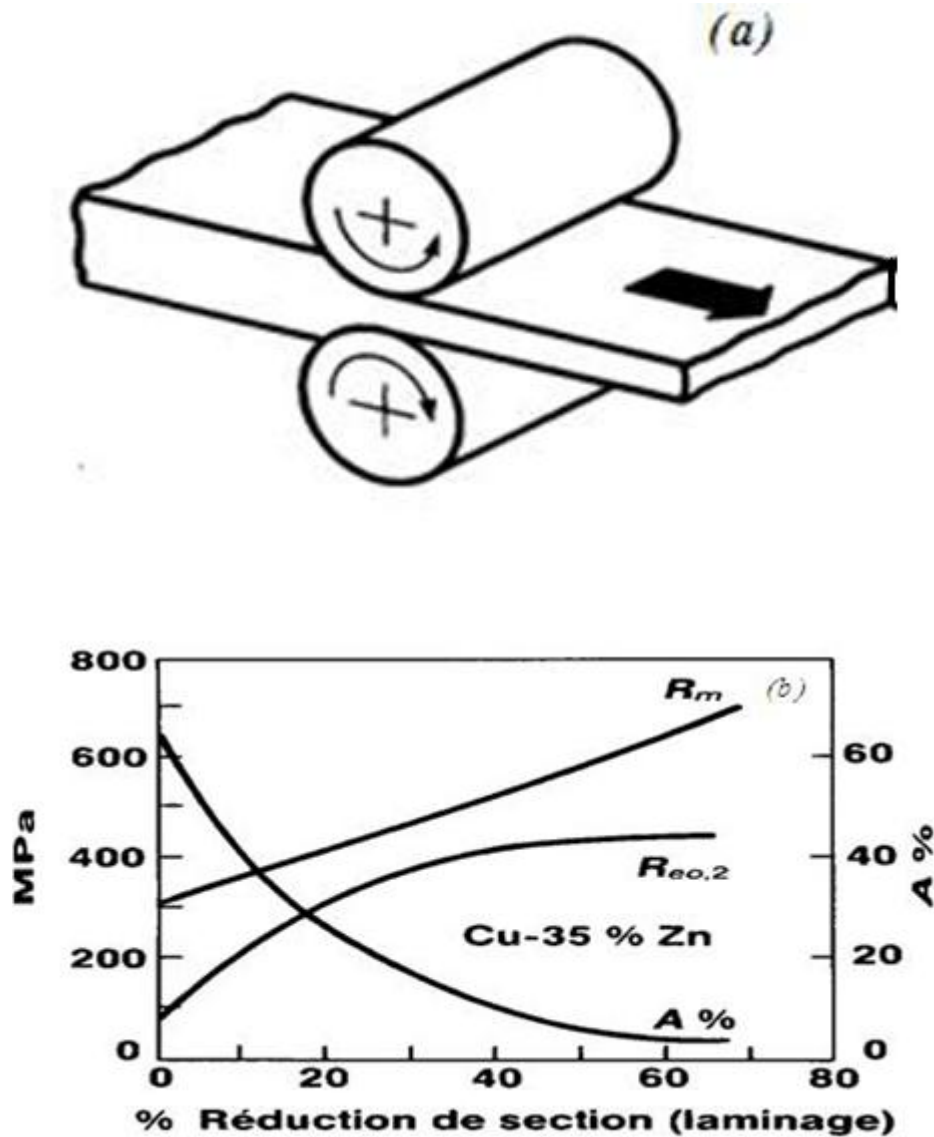


Figure I.1 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés des métaux avec le taux du laminage [4]

Sensibilité des alliages d'aluminium

Le laminage et le filage orientent les grains dans le sens de la transformation, la corrosion sous contrainte ayant une propagation inter cristalline, la sensibilité à ce type de corrosion n'est donc pas la même dans les trois directions par rapport au sens du laminage ou de filage :

- sens long
- sens travers long
- sens travers court

La résistance à la corrosion sous contrainte des produits épais laminés ou filés dépend du sens prélèvement des éprouvettes. Elle est toujours plus faible dans le sens

travers court que dans les deux autres directions.

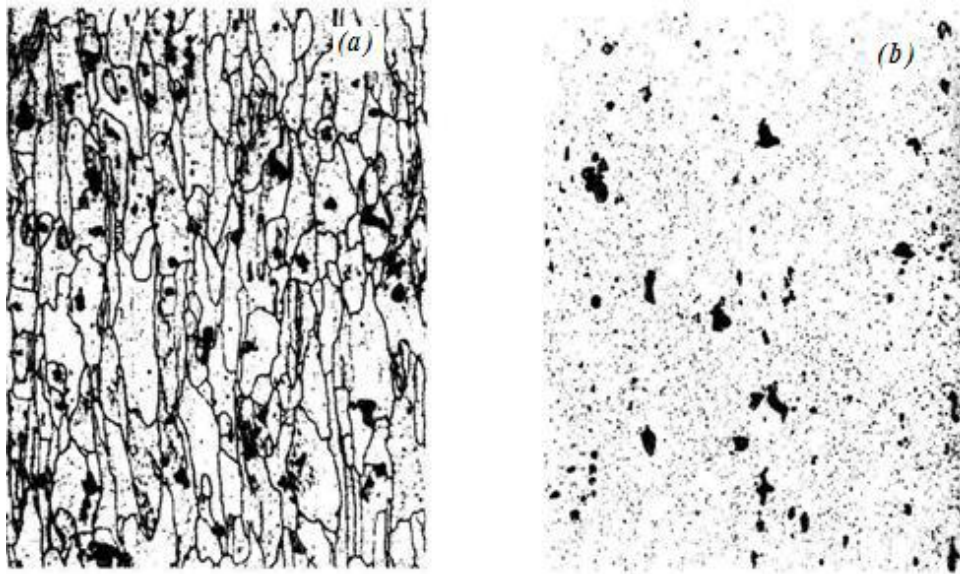


Figure I.2 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid [4]

I.1.2. Propriétés de l'aluminium et ses alliages :

Les propriétés indiquées sont généralement celles de l'aluminium non allié dont le degré de pureté est de 99.99%.

I.1.2.1. Structure atomique :

L'aluminium pur possède un symbole chimique **Al**, a pour numéro atomique $Z = 13$ lequel correspondant à 13 électrons répartis sur les couches orbitales s et p de la manière suivante : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^1$

L'aluminium appartient au groupe (IIIA) du « tableau de la classification périodique des éléments ». Il a une valence de +3.

La masse atomique de l'aluminium est : 26,98154 g/Mole

I.1.2.2. Isotopes de l'aluminium :

La plupart des isotopes de l'aluminium ont une demi-durée de vie très courte. Il existe dans la nature à l'état de traces (concentration $< 10^{-4}\%$).

I.1.2.3. Structure cristalline :

L'aluminium est un métal dont la structure cristalline est cubique à face centrée (CFC), figure I-3, a un paramètre de maille $a = 0,4049596 \text{ nm}$ à 298 K. son rayon atomique est de 0,182 nm.

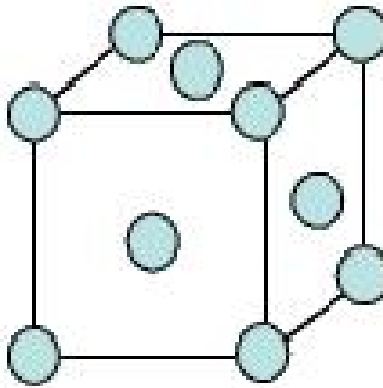


Figure I. 3 : Structure cristalline de l'aluminium

La plupart des éléments d'addition ne modifient que très faiblement les paramètres cristallographiques de l'aluminium. Contrairement à d'autres métaux usuels, l'aluminium a toujours à l'état solide, la même structure cristalline CFC quelle que soit la température.

I.1.2.4. Température de fusion de l'aluminium :

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

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

I.1.2.5. 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.1.2.6. 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.1.2.7. L'enthalpie de vaporisation :

(Encore couramment appelée 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.1.2.8. 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.1.2.9. Propriétés mécaniques :

L'aluminium est trois fois moins rigide que les aciers, son module de Young est de 70000 MPa contre 210 000MPa pour les aciers de construction. Les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique.

Module d'élasticité (MPa)	Charge de rupture (MPa)	Limité d'élasticité 0,2% (MPa)	Ar (%)
68000	80 à 100	30 à 40	25 à 30

Tableau I-1 : propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante

➤ **Coefficient de poisson :**

Ce coefficient donne une idée de l'aptitude d'un métal à la compression et est fonction du rapport entre les allongements relatifs transversaux et longitudinaux. Pour l'aluminium, la valeur de ce coefficient varie de 0,32 à 0,40, avec une valeur probable de 0,35.

➤ **Aptitude à la compression de l'aluminium :**

L'aluminium nécessite d'énorme pression pour que son volume subisse une rétraction de quelques pour-cent.

I.1.2.10. Propriétés chimiques :

L'aluminium résiste bien à l'air et l'eau de mer (en particulier les alliages Al-Mg). Mais il a un mauvais comportement en présence de certains acides minéraux (chlorhydriques, sulfurique) ou organiques (trichloracétique). [5]

I.1.3. Atouts de l'aluminium et ses alliages :

I.1.3.1. 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. Il consiste de ce fait 80% des poids des avions actuels. Il est très utilisé dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobiles. Bien que, en tonnage, la production de l'aluminium ne présente qu'un peu plus de 2% de celle des aciers.

Ce métal et ses alliages occupent la seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable.

La légèreté n'est pas seulement un atout pour l'application, elle a aussi des conséquences sur le fonctionnement des ateliers et les conditions de travail. Ainsi, la manutention des demi-produits et des objets en alliage d'aluminium est plus facile. Cela peut se traduire par un coût d'investissement moindre pour les équipements de manutention. [2]

I.1.3.2. Conductivité thermique :

L'aluminium offre une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre, le plus performant des matériaux usuels. La conductivité thermique des alliages l'aluminium dépend de leur composition et de leur état métallurgique.

Cette caractéristique a été à l'origine du remplacement dès la fin du XIX^{ème} siècle du cuivre entamé dans la fabrication des ustensiles de cuisine domestiques et collectifs en alliage d'aluminium.

Dés qu'il est question d'échange thermique, l'utilisation de l'aluminium est toujours envisagée, pourvu bien sûr que le milieu s'y prête quand il s'agit d'échange liquide-liquide ou liquide-gaz. Les applications des échangeurs en aluminium sont très nombreuses : automobiles, véhicules industriels, aéroréfrigérants, climatisation, dessalement de l'eau de mer, énergie solaire, refroidisseurs dans l'électronique. [2]

I.1.3.3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre des deux tiers de celle du cuivre qu'il a remplacé dans beaucoup d'applications électriques.

L'aluminium, sous forme de barres, de tubes, est également très utilisé dans les postes de connexion des réseaux aériens haute et moyenne tension.

L'aluminium est utilisé dans les câbles téléphoniques, sous terrains et sous-marins, dans la réalisation des postes blindés isolés sous hexafluorure de soufre (SF₆), pour la protection contre les champs électriques ou magnétiques. [2]

I.1.3.4. Tenue à la corrosion :

L'aluminium et ses alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics (grande arche de la défense, pyramide de Louvre) que pour les habitations individuelles. Toute en offrant de nombreuses possibilités de formes et de traitements de surface, les structures de bâtiments en aluminium traité demandent peu d'entretien et résistent bien au cours du temps.

Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi :

- d'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de portes, des bateaux..., vieux de plusieurs décennies.
- d'un entretien facile, même sans protection ad hoc (peintures et anodisation).
- d'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à traitements de coloration. [6]

I.1.3.5. Aptitude aux traitements de surface :

Les traitements de surfaces sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels :

- 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 piquûre ou le noircissement,
- la modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle,
- la décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire. [6]

I.1.3.6. 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.
- [2]

I.1.3.7. Recyclage :

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusion de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir d'un minerai.

L'expérience montre que les déchets d'aluminium ont une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles car une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite, En évitant l'étape de l'électrolyse qui réclame beaucoup d'énergie, on évite les rejets polluants qui lui sont associés. L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités. [6]

I.1.3.8. Facilité de mise en œuvre :

La mise en oeuvre de l'aluminium et de ses alliages s'inscrit dans les pratiques habituelles de mise en forme, de pliage, de chaudronnage, emboutissage et emballage. Pour travailler les alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaire, dans la plus part des cas, de disposer d'équipements ou de machine et outils spécifiques. [7]

En revanche, il est recommandé d'affecter un atelier au travail des alliages d'aluminium, séparé de celui des aciers et surtout de celui des alliages cuivreux.

Tout comme les autres métaux usuels, les alliages d'aluminium se prêtent bien aux techniques d'assemblage telles que :

- Le soudage,
- Le boulonnage,
- Le rivetage,

- Le clipage,
- Le collage,
- Le brasage. [2]

I.1.4. Alliages d'aluminium :

Les matériaux non alliés ont généralement peu d'application parce qu'ils présentent des propriétés singulières, ils sont souvent limités à un champ d'application très restreint. Afin d'améliorer leurs caractéristiques on procède souvent à l'addition d'autres éléments à des quantités mesurées. [8]

I.1.4.1. Classification des alliages d'aluminium :

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

I.1.4.1.1. Les alliages de corroyages :

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

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

- Résistance mécanique,
- Ductilité,
- Résistance à la propagation des fissures,
- Résistance à la fatigue (efforts alternés),
- Résistance aux multiples formes de corrosion,
- Conductibilité électrique. [6]

Les alliages de corroyage sont :

I.1.4.1.1.1. Alliage avec durcissement structural :

Le but de traitement de durcissement structural est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau. Les étapes de ce traitement sont : la mise en solution, trempe suivie d'un revenu ou d'une 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 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. [9]

I.1.4.1.1.2. Alliage sans durcissement structural :

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que (Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Mn) (alliages de forge et d'estampage). Leur durcissement naturel est du à la formation d'une solution solide et dans une moindre mesure aux phases en excès.

Ces types d'alliages se comportent bien au soudage et possèdent 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. [10]

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 –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. Leurs applications sont très importantes et variées comme le transport terrestre l'industrie chimique.
- 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). [9]

I.1.4.1.2. Les alliages de moulages :

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

Les traitements thermiques et la déformation, agissent sur les propriétés physicochimiques des alliages en modifiant la microstructure, la texture et les contraintes internes résiduelles. Ceci par une dispersion des éléments d'alliages dans le réseau de la matrice, par formation de fines particules intermétalliques avec les éléments d'additions, par recristallisation et restauration, création ou éliminations des différents défauts dans le matériau et.

Le développement des applications de l'aluminium et ses alliages, la croissance régulière de sa consommation, s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant décisive dans le choix des utilisateurs, en particulier pour le transport, le bâtiment, l'industrie électrique et l'emballage. [6]

I.1.5. Désignation des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont désignés par des numéros à quatre (4) chiffres : 1050, 3003, 7075...

- le **premier chiffre de 1 à 8** indique la famille d'alliage, il est déterminé par l'élément principal d'alliage :
 - ✓ 1xxx, sans élément, pour l'aluminium non allié, les alliages correspondent à différents niveaux de pureté, Fe et Si étant les principales impuretés de l'aluminium
 - ✓ 2xxx Cu, pour les alliages Al-Cu, avec une sous-famille Al-Cu-Mg
 - ✓ 3xxx Mn, pour les alliages Al-Mn
 - ✓ 4xxx Si, pour les alliages Al-Si
 - ✓ 5xxx Mg, pour les alliages Al-Mg
 - ✓ 6xxx Mg + Si, pour les alliages Al-Mg-Si
 - ✓ 8xxx divers, pour les autres alliages.
- Les **deux derniers chiffres** indiquent :
 - ✓ La pureté de l'alliage dans les alliages de la série 1xxx (1050 = 99,5%Al; 1070 = 99,7%Al; 1100 = 99% Al) ;

- ✓ L'alliage de la série dont la composition chimique est précisé dans les registres de désignation de l'Aluminium Association qui entérine les nouveaux alliages, pour les autres séries.
- Le second chiffre chiffres correspond aux variantes de l'alliage de base brevetées pour des applications particulières, exemple : 7175, 7475, variantes de du 7075.

Dans la série 8xxx sont rassemblés des alliages divers qui ne peuvent pas figurer dans les sept (7) premières séries.

Le **durcissement maximal** est obtenu avec un maximum de précipités cohérents répartis de façon homogène et uniforme dans la matrice aluminium.

Les alliages de fonderie n'ont pas encore adopté le système de désignation numérique à quatre chiffres, chaque pays désigne sa norme de désignation nationale.

La figure suivante rassemble les huit familles d'alliages d'aluminium regroupées dans deux sous-familles sans et avec durcissement structural. [11]

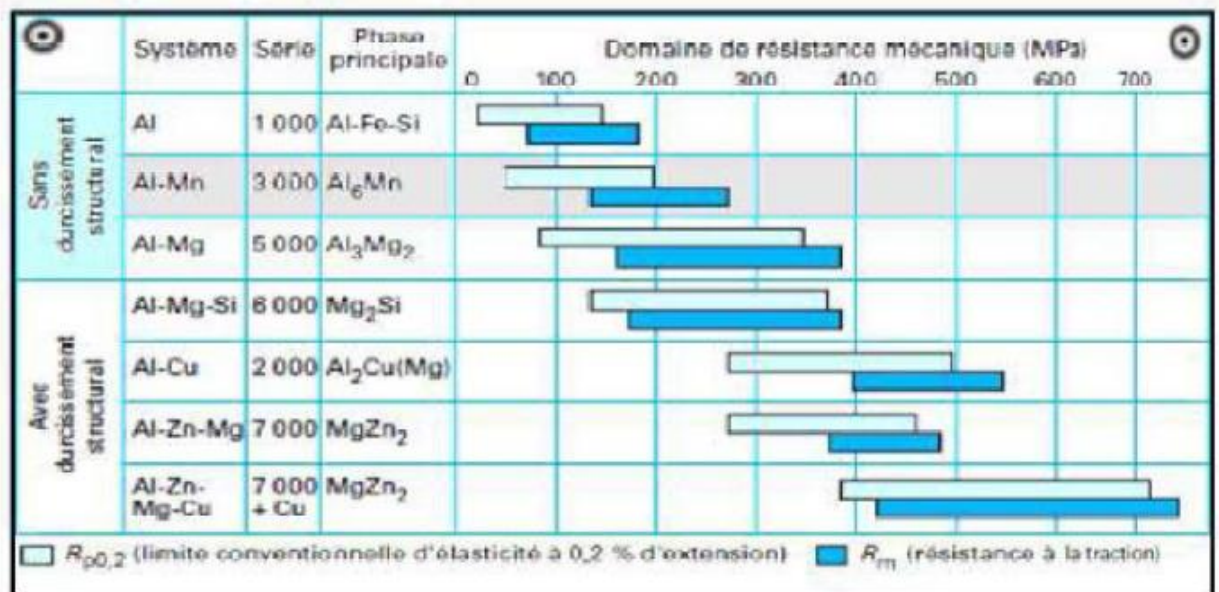


Figure I.4: Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés. [11]

I.1.6. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages :

I.1.6.1. Dans le domaine d'automobile :

Sa légèreté permet de réduire la consommation et les émissions de carburant. Son utilisation réduit le bruit et les vibrations. Son absorption de l'énergie cinétique fait que, dans un accident, une grande partie du choc est absorbé par la structure en aluminium, et non par les occupants du véhicule. L'aluminium ne rouille pas comme l'acier. La longévité d'une pièce en aluminium est trois à quatre fois supérieure à celle

de l'acier. Sur de petits véhicules, le poids de la structure en aluminium peut être jusqu'à 45% moins important qu'une structure en acier.

I.1.6.2. Dans le domaine de l'aérospatiale :

L'aluminium est très présent du fait surtout de sa légèreté. Il permet d'économiser le carburant, de réduire les émissions et d'augmenter la charge utile d'un avion.

I.1.6.3. Dans le domaine du transport ferroviaire :

Il est utilisé pour les mêmes raisons que précédemment : son poids (sur un wagon, on économise 10 tonnes) et sa tenue à la corrosion (permet de transporter du soufre, et tout autre produit corrosif).

I.1.6.4. Dans le domaine marin :

Des alliages d'aluminium ont été développés, et aujourd'hui, 50% des moteurs hors bords sont fait d'aluminium. Une coque en aluminium peut tenir plus de 30 ans sans donner de signe de fatigue. Le peu d'entretien que demande ce matériau est une raison de son utilisation dans ce domaine.

I.1.6.5. Dans le domaine d'alimentation :

Boîtes de conserves, papier aluminium, canettes, barquettes, ustensiles de cuisine.

Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets néfastes pour le système nerveux. Il a été reporté que des personnes exposées à des taux élevés d'aluminium (comme celles qui reçoivent des traitements de dialyse) aient développé une encéphalopathie (forme de démence).

I.1.6.6. Dans le domaine de la construction :

Le poids et la polyvalence de l'aluminium font de lui un matériau idéal pour les bâtiments et les revêtements. Sa résistance à la corrosion l'exempt pratiquement d'entretien.

I.1.6.7. Dans le domaine de l'électricité :

Lignes aériennes, câbles électriques de distribution et de transport d'énergie électrique, câbles d'énergie pour usage industriel. L'aluminium est en particulier adapté à cette utilisation en raison de sa conductivité électrique élevée, de sa base densité et sa bonne résistance à la corrosion. [6]

I.1.7. Différents types d'aluminium dans le domaine alimentaire :

- Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique sont utilisés dans le cas du contact de longue durée, et un usage unique, nous pouvons citer comme exemple la

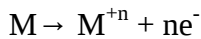
feuille mince utilisée pour fromage fondu, le papier aluminium utilisé pour l'emballage des médicaments.

- Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique sont utilisés dans le cas du contact de courte durée, et un usage répétitif, nous pouvons citer comme exemple ustensiles ménagers tels que casseroles, poêles, plats, gourdes. Appareils électroménagers de cuisson : autocuiseurs.
- Aluminium ou alliage non revêtu dans le cas du contact de durée variable et pour un usage unique nous pouvons citer comme exemple le papier chocolat.
- Aluminium ou alliage non revêtu éventuellement anodisé dans le cas du contact de durée variable, et à usage répétitif, nous pouvons citer les ustensiles ménagers tels que casseroles, plats, ustensiles, équipements de l'industrie agro-alimentaire : fûts, citernes, tuyaux, surfaces de travail, machines. [12]

I.2. CORROSION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ces propriétés fonctionnelles (propriété mécanique, esthétique, électrique, optique, etc. endommagement du matériau se traduit par des réactions d'oxydoréduction:

Réaction d'oxydation : Est une réaction qui se produit à l'anode, c'est une dissolution du métal.



Réaction de réduction : Est une réaction qui se produit à la cathode, c'est la réaction de réduction des moteur de la corrosion (l'oxygène et/ou l'hydrogène).

Moteur de corrosion (solution riche en O_2 et/ou H_2) + ne^{-} → dégagement d'oxygène ou d'hydrogène

Les deux réactions se produisent simultanément de sorte que le courant électrique total est en apparence nul.

Phénomène de corrosion est important lorsque le métal est placé au contact d'une solution aqueuse riche en oxygène dissous ou en cation d'hydrogène). La corrosion est souvent de nature électrochimique. La corrosion se manifeste lorsqu'un métal et un électrolyte sont en contact. Les réactions électrochimiques sont des réactions d'oxydoréduction avec transfert d'électrons. [2]

Parfois la corrosion est un phénomène bienvenu, voire souhaitée. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés

industriels font également appel à la corrosion. Par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique. [13]

I.2.1. Facteur de la corrosion :

I.2.1.1. Le milieu :

Le milieu contrôle la tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage par le biais de :

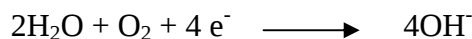
- ✓ Sa nature : Il n'est pas facile de dresser une typologie rigoureuse des milieux par rapport aux phénomènes de corrosion des milieux. On peut toutefois avancer les tendances suivantes :
 - Dans des milieux aqueux ionisés, les réactions électrochimiques fondamentale de la corrosion des métaux peuvent avoir lieu ;
 - Dans des milieux organiques non aqueux, non ionisables, il n'y a pas des réactions d'oxydo-réduction possibles, il faut donc s'attendre à ce que la tenue soit très différentes.

Toutefois, certains produits organiques totalement déshydratés, comme les alcools et les phénols, peuvent réagir très violemment à chaud avec l'aluminium.

Il faut aussi distinguer entre :

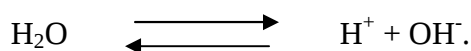
- Les milieux gazeux, qui sont généralement peu réactif à la température ambiante, sauf en présence d'humidité.
 - Les milieux liquides, dans lesquels le contact avec le métal est facile, surtout si le liquide mouille le métal, c'est dans ces milieux que les réactions sont les plus probables.
 - Dans les milieux solides comme les pulvérulents, qui sont généralement peu réactifs, sauf en présence d'humidité, les sels minéraux anhydres n'ont en théorie aucune action s'ils sont réellement anhydres, dans l'eau de constitution d'un sel, par exemple, les molécules d'eau sont sans action tant qu'elles sont liées à la molécule du sel, mais la liaison peut être rompue en cas de chauffage.
- ✓ Sa concentration en éléments nobles : La concentration est un facteur important de la corrosion des métaux, en règle générale la vitesse de corrosion augmente avec la concentration des agents actifs de la corrosion mais la relation entre leur concentration dans l'air, dans l'eau,...etc., et la vitesse de corrosion n'est pas forcément proportionnel.

- ✓ Sa teneur en oxygène : La vitesse et la forme de la corrosion de certains métaux dont le fer sont fortement influencées par la teneur en oxygène de l'eau. L'oxygène est un oxydant et un facteur de corrosion en ce sens qu'il dé passe les cathodes en entretenant la réaction cathodique :



Ce qui a comme conséquence de favoriser la réaction d'oxydation à l'anode, c'est-à-dire la corrosion. Avec l'aluminium, ce n'est pas aussi simple parce que la corrosion est régie par le film d'oxyde naturel, lequel a besoin d'oxygène pour se reconstituer. C'est la raison pour laquelle le rôle de l'oxygène n'est pas déterminant. L'exemple du dessalement de l'eau de mer l'a clairement montré : la tenue à la corrosion est la même dans l'eau de mer aérée ou désaérée, toutes choses étant égales par ailleurs (température, concentration saline, vitesse, etc.).

- ✓ Son pH : Selon la théorie de S. Arrhenius, la conductivité électrique de l'eau pure s'explique par la dissociation d'une partie de ses molécules (en fait 10^{-7} à 25°C) suivant l'équilibre :



Par définition : $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, et l'échelle des pH va de 0 à 14 (tableau I.2)

Rapport $[\text{H}^+] / [\text{OH}^-]$	Valeurs des pH	Milieu
$[\text{OH}^-] = [\text{H}^+]$	= 7	Neutre
$[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$	< 7	Acide
$[\text{OH}^-] > [\text{H}^+]$	> 7	Alcalin

Tableau I-2 : L'échelle des Ph.

Le pH caractérise un milieu aqueux. C'est une donnée très importante en chimie, en électrochimie et en biologie parce qu'il aide à la compréhension des réactions en milieu aqueux. Il intervient sur la précipitation des hydroxydes : ainsi, magnésie $\text{Mg}(\text{OH})_2$ contenue dans l'eau ou l'eau de mer précipite en milieu alcalin, en général à la surface du métal, ce qui peut modifier sa teneur à la corrosion. La précipitation des carbonate est liée aussi au pH.

Le pH est un facteur très important de la tenue à la corrosion des métaux dans les solutions aqueuses. Il est bien connu que l'acier résiste mal dans les milieux acide et

que l'aluminium supporte mal les milieux très alcalins à base d'hydroxyde de sodium ou de potassium.

- ✓ Sa température : Il est bien connu que l'élévation de température augmente la vitesse des réactions chimiques. Dans le cas de la corrosion de l'aluminium, c'est vrai dans les acides et les bases inorganiques et aussi dans certains milieux organiques (dont les alcools, les phénols et les dérivés chlorés), surtout quand la température s'approche de leur point d'ébullition. Par contre dans l'eau pure, distillée ou peu minéralisée, l'élévation de température a pour effet de modifier la forme de la corrosion de l'aluminium parce que le film d'oxyde naturel peut réagir avec l'eau pour former une couche protectrice de boehmite. La tenue à la corrosion de l'aluminium dans l'eau dépend de la température.

I.2.1.2. 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 régler pour obtenir la meilleure résistance à la corrosion possible. Parmi ces facteurs:

➤ **La composition des alliages:**

Contrairement à ce qui est avancé, par exemple, la pureté n'améliore pas la tenue à la corrosion de l'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. [2]

➤ **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 le reste de la surface non usinée.

Donc l'écrouissage a un effet mineur sur la résistance à la corrosion. Il modifie tout au plus l'aspect des piqûres.

➤ **Les traitements thermiques :**

Les traitements thermiques des alliages à durcissement structural : mise en solution, trempe et revenu 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 inter cristalline, et la corrosion sous contrainte.

➤ **L'état de surface :**

L'état de surface a une influence sur la tenue à la corrosion de l'aluminium. L'expérience montre que les surfaces rayées, grattées ou meulées sont des sites où se développent préférentiellement les corrosions. [14]

I.2.1.3. 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 en sont :

- ✓ Les modes d'assemblage : Sauf sur les alliages de famille 7000 sans cuivre, les soudages à l'arc MIG ou TIG, effectués dans des conditions normales avec les alliages d'apport conformes, ne diminuent pas la résistance à la corrosion affectée thermiquement (ZAT) et de cordon de soudure des alliages soudables [7]. Ce ne sont pas des zones préférentielles de corrosion, c'est ce qu'on observe en chaudronnerie navale, dans les équipements de littoral, etc. Le brassage réalisé dans des conditions métallurgiques normales n'est pas non plus un facteur de corrosion. Les autres modes d'assemblages mécaniques : rivetage, boulonnage, etc. ne sont pas en soi des facteurs de corrosion puisqu'ils ne modifient pas la structure de métal, comme le font le soudage et le brassage.
- ✓ Les dispositions constructives : Il faut entendre par ce terme tout ce qui a trait aux formes définitives d'un matériel et à sa réalisation. De mauvaises dispositions constructives peuvent avoir des effets désastreux sur la résistance à la corrosion, tout cela étant égal par ailleurs ; choisir correctement des alliages, conditions de service acceptables, etc. [8, 9].

Il est de la responsabilité des bureaux d'études d'éviter certaines configurations qui favorisent les rétentions d'eau, les zones à recoins où s'accumulent des projections humides et où peut se développer une corrosion sévère. [10].

- ✓ Les contacts avec d'autres métaux et d'autres matériaux : Les assemblages mécaniques avec d'autres métaux (ou avec le graphite) sont possibles à conditions d'apprécier le risque de corrosion galvanique et prendre, si le faut, les mesures nécessaires pour l'éviter. Le contact avec les matériaux non métalliques ne présente

pas le risque de corrosion galvanique, s'ils sont poreux, ils peuvent favoriser la corrosion d'aluminium

- ✓ Les contraintes mécaniques : Ils peuvent de certains cas entraîner une corrosion sous contrainte.
- ✓ Les conditions d'entretien : Que ce soit le matériel à usage industriel ou dans le bâtiment, l'entretien périodique est un facteur de longévité. L'élimination régulière de poussières et des dépôts minéraux réduit très sensiblement le risque de corrosion par piqûres, des batteries d'échangeurs thermiques à ailettes en aluminium sont capable à tenir plus de 10 ans, même dans des usines d'engrais qui connaissent un fort empoussiérage, s'ils sont entretenus par un lavage au jet des surfaces d'échange.

I.2.2. Rôle de film d'oxyde :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appel « alumine » qui le rend « passif » à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène de l'air, l'eau.

Bien que ce film ait une très faible épaisseur, comprise entre 5 et 10 nanomètres, ce film d'oxyde constitue une barrière entre le métal et le milieu environnant. Sa stabilité physico-chimique a donc une très grande importance sur la résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages. Elle dépend, en particulier, des caractéristiques du milieu (pH, sels) [7].

I.2.3. Définition d'une électrode :

Une électrode est une phase, la plupart du temps métallique avec une surface caractéristique, en contact avec l'électrolyte. Par extension, l'ensemble métal-oxyde-couche double –solution est souvent appelé électrode. [15]

Généralement l'électrode est un métal en contact avec une solution. [10]

I.2.4. Tension de l'électrode à l'équilibre (Potentiel d'équilibre) :

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. [15]

Le potentiel d'équilibre est le potentiel pris par un métal plongé dans un électrolyte contenant ses ions métalliques. Son expression et sa valeur sont obtenus en appliquant la loi de Nernst au système redox considéré [5] :

$$E = E^0 + (RT / nF) \log (OX/ Red) \quad (I.1)$$

Avec :

E: le potentiel de l'électrode.

E°: le potentiel standard de l'électrode.

R: constante des gaz parfaits (8,314 joule /K.mol).

F: constante de Faraday (96500 Coulomb).

[Ox], [Red]: les activités de l'oxydant et du réducteur.

Le potentiel E est relié à l'enthalpie libre de la réaction d'oxydoréduction par la relation suivante :

$$\Delta G = -nFE \quad (I.2)$$

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \log K \quad (I.3)$$

$$K = [M]/[M^{n+}] \quad (I.4)$$

Avec :

ΔG : enthalpie libre de la réaction

n : nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction

K : représente la constante d'équilibre de la réaction d'oxydation.

Par convention l'activité d'un matériau à l'état solide » est $[M] = 1$

D'où :

$$E = (\Delta G / nF) + [(RT / nF) \log [M^{n+}]] \quad (I.5) \quad [2]$$

I.2.5. Appréciation des milieux corrosifs

L'aluminium est un métal amphotère, et donc capable de se dissoudre à la fois en milieu acide, sous forme de cation Al^{+++} , et en milieu alcalin sous forme d'anion. Il en résulte que, d'une manière générale, la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium se limite aux milieux neutres ou très proches de la neutralité ($4 < pH < 9$). Dans ces milieux, les alliages d'aluminium sont naturellement passifs. Toutefois, en présence de chlorures (ou d'autres halogénures), les alliages d'aluminium peuvent eux aussi subir divers types de corrosion localisée, tels que corrosion par piqûres, corrosion intergranulaire, corrosion sous tension, corrosion exfoliante. Comme pour les aciers inoxydables, la croissance de ces divers types de corrosion localisée est toujours liée à

la stabilisation d'un milieu localement acide, riche en chlorure d'aluminium. Enfin, la très grande réactivité de l'aluminium donne ici une dimension toute particulière aux problèmes de corrosion galvanique. En effet, en dehors du zinc et du magnésium, tous les métaux sont cathodiques par rapport à l'aluminium, et donc capables de promouvoir une corrosion galvanique de celui-ci (cf. dans ce traité, le chapitre Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages [M 150]). Le contact électrique avec des métaux différents, ou même avec d'autres alliages d'aluminium, doit ainsi être étudié dans tous les cas avec la plus grande attention. Les assemblages avec le graphite et les alliages cuivreux sont à cet égard les plus dangereux. Le milieu est d'ailleurs souvent déterminant.

Il existe également, dans le cas des alliages d'aluminium, une autre forme plus originale de corrosion galvanique. Au potentiel de corrosion de l'aluminium, certains ions de métaux lourds présents en solution peuvent en effet être réduits à l'état métallique. Le métal correspondant se dépose alors sur l'alliage d'aluminium, où il constitue une infinité de microcathodes extrêmement efficaces. Les ions de nickel et de cuivre sont ici les plus dangereux, de même que les ions de mercure qui entraînent des altérations de la couche protectrice.

I.3. PROCESSUS DE LA CORROSION :

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun type de corrosion [10]

I.3.1. Corrosion chimique :

Cette corrosion se traduit par une réaction hétérogène entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si le réactif est gazeux, la corrosion est appelée corrosion sèche ou oxydation ; par contre, si le réactif est liquide, la corrosion aura lieu avec formation d'un produit de corrosion à la surface de métal. De ce type de corrosion il n'y a de passage de courant électrique. On rencontre rarement ce type de corrosion. Elle représente 3% du total des cas.

I.3.2. Corrosion électrochimique :

Lorsqu'il existe une hétérogénéité, soit dans le métal soit dans le réactif, il y'aura par conséquent formation d'un pile électrochimique. Un courant circule entre l'anode et la cathode, et les zones qui constituent l'anode seront attaquées. Ce type de corrosion représente 97% du total des cas.

I.3.3. Corrosion biochimique :

C'est l'attaque bactérienne des métaux, elle est rencontrée particulièrement dans les canalisations enterrées.

I.3.4. Corrosion –érosion :

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérents et continu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de corrosion, la couche formée peut être éliminée en certain point par abrasion de métal, due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient il y alors accélération de la corrosion. Il est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre.

I.3.5. Passivité d'aluminium et ses alliages :

Le potentiel d'aluminium et ses alliages dans la plupart des milieux à 25C° est de l'ordre de -05V par rapport à l'électrode à hydrogène, alors que le potentiel standards est de -1.66V, cette différence très importante entre les deux potentiels est due à la surface du métal d'un film d'oxyde qui se forme spontanément dès que l'aluminium entre en contact avec un oxydant (eau, oxygène). La présence de ce film continu d'alumine (Al_2O_3) rend le métal passif et l'isole du milieu corrosif. Ce film d'oxyde forme un écran ou une barrière entre le métal et le milieu dans lequel placé [11]. Des travaux récents montrent que ce film n'est pas à l'état stable, mais à l'état stationnaire : il est en équilibre avec son environnement, mais en constante destruction [13].

I.3.6. Corrosion générale :

Pour les alliages d'aluminium, les problèmes de corrosion générale sont intimement liés au pH du milieu. Lorsque le pH s'écarte en effet du voisinage immédiat de la neutralité ($4 < pH < 9$), la corrosion générale se traduit très rapidement par une attaque extrêmement violente. Il existe, naturellement, un certain nombre d'exceptions à cette règle. L'aluminium peut ainsi se passiver en milieu acide si le pouvoir oxydant du milieu est très élevé (par exemple, l'acide nitrique fumant). De même, l'aluminium et ses alliages peuvent résister en milieux alcalins grâce à certains effets d'inhibition (par exemple, l'ammoniaque concentrée, les bases organiques faibles, les silicates, le béton). Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion générale des alliages d'aluminium passifs est certes très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de 5 μm par an, ce qui peut entraîner à la longue une évolution progressive de l'état de surface avec les conséquences associées sur l'aspect esthétique et la rugosité (peau d'orange).

I.3.7. Corrosion par piqûres :

Le potentiel de piqûre des alliages d'aluminium est en règle générale extrêmement bas. Il est ainsi très rare de pouvoir empêcher toute apparition de piqûre sur un alliage

d'aluminium. En revanche, par le choix des éléments d'alliage, il est très souvent possible de maîtriser la croissance de ces piqûres, en réalisant des distributions de piqûres suffisamment denses et homogènes, de manière à limiter à des valeurs acceptables les vitesses maximales de pénétration de ces piqûres. Les critères de résistance à la corrosion par piqûres sont alors les caractéristiques de ces distributions de piqûres pour chaque alliage (densité, homogénéité, vitesses de pénétration moyenne et maximale). Pour les alliages d'aluminium, l'intensité de la corrosion par piqûres décroît en général avec le temps. En immersion, par exemple, la vitesse de pénétration des piqûres suit une cinétique parabolique en $t^{1/3}$ (par exemple : les alliages de la série 5 000 dans la mer). En exposition atmosphérique, la corrosion par piqûres cesse même en pratique au bout d'un à trois ans, après que la surface du métal ait acquis la patine grise typique des alliages d'aluminium. Dans les alliages d'aluminium, la corrosion par piqûres apparaît ainsi très souvent comme un phénomène temporaire et sans gravité. Néanmoins, certaines utilisations en immersion nécessitent parfois un contrôle absolu de la pénétration de la corrosion. Un tel contrôle peut être assuré grâce à l'utilisation de tôles plaquées.

Initiation et propagation de la piqûre :

Comme tous les métaux passifs, l'aluminium est sensible à la corrosion localisée qui résulte d'une rupture locale du film passif. Elle se traduit par une piqûre qui peut se propager.

La corrosion par piqûres se développe suivant des mécanismes électrochimiques très complexes qui ne sont pas toujours élucidés et dont la portée pratique est encore limitée. Il y a deux phases dans la corrosion par piqûres : l'amorçage et la propagation.

✓ Phase d'amorçage :

Il est bien connu depuis longtemps que la corrosion par piqûres se développe en milieu chloruré. Il y a adsorption des ions Cl^- dans le film d'oxyde naturel suivie d'une rupture de celui-ci aux points faibles avec formation de microfissures de quelques nanomètres de large. Beaucoup de piqûres sont rapidement initiées, jusqu'à $10^7/\text{cm}^2$. Leur densité varie suivant les alliages : de $10^4/\text{cm}^2$ sur le 1199 à $10^{10}/\text{cm}^2$ sur un alliage à 4% de cuivre.

Mais la plupart s'arrêtent au bout de quelques jours. Des essais de polarisation montrent que si les piqûres s'arrêtent, elle se repassivent. Quand on polarise de nouveau le métal, les piqûres déjà passivées ne sont pas réinitiales, et la piqûration redémarre sur d'autres sites.

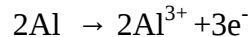
Il y a réduction lente de l'oxygène sur les zones cathodiques. Celles-ci seraient

constituées par les intermétalliques qui affleurent au –dessous du film d'oxyde qui le recouvre plus au moins bien. À l'endroit des ruptures du film, il y a oxydation rapide de l'aluminium et formation d'un complexe chloruré intermédiaire AlCl_4^- .

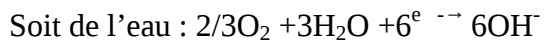
✓ **Phase de propagation :**

Parmi les nombreuses piqûres initiées, seule une minorité va continuer à se propager suivant les deux réactions électrochimiques:

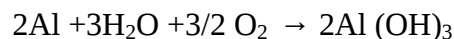
-d'oxydation à l'anode qui est le fond de la piqûre



-de réduction à la cathode, qui est à l'extérieur de la piqûre :

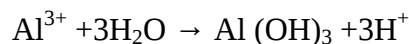


Si l'anode est stable et localisée, la corrosion va creuser une cavité, c'est-à-dire une piqûre. La formation d'ions OH^- ou la consommation d'ions H^+ aboutissent à créer localement un excès d'ions OH^- , donc un PH alcalin. La réaction globale de la corrosion par piqûres de l'aluminium est :



En fond de la piqûre, la dissolution de l'aluminium sous forme d'ions Al^{3+} crée un champ électrique qui déplace vers le fond de piqûre des ions Cl^- pour neutraliser chimiquement la solution et former des chlorures d'aluminium. Les ions Cl^- sont les plus mobiles de tous les ions en jeu dans ces réactions.

L'hydrolyse des chlorures d'aluminium (ou de complexe hydrochloruré intermédiaire AlCl^- et suivant la réaction suivante



Provoque une acidification du fond de la piqûre à $\text{PH} < 3$. Le milieu devient très agressif et cause l'auto propagation de la piqûre.

Les ions Al^{3+} très concentrés en fond de la piqûre diffusent vers l'ouverture de celle-ci. Ils rencontrent un milieu dont le PH est de plus en plus alcalin, surtout sur les parois latérales, où il y a alcalinisation du fait de la réaction cathodique

Il y a précipitation d'hydroxyde $\text{Al}(\text{OH})_3$. Les microbulles d'hydrogène provenant de la réduction des ions H^+ , poussent l'hydroxyde de l'aluminium vers l'ouverture de la piqûre où il se dépose sous forme de postules blanches.

Il y a gradient de concentration des réactants depuis le fond jusqu' au bord de la piqûre. L'accumulation de produits de corrosion au sommet de la piqûre en forme de « dôme de volcan » obstrue progressivement l'entrée de la piqûre gênant ainsi les échanges ioniques,

en particulier ceux dans les quels les ions Cl^- sont impliqués. Cela explique le ralentissement.

I.3.8. Corrosion caverneuse :

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûres. L'acidification du milieu corrosif emprisonné dans une caverne interdit en effet, dans ce cas, la répartition homogène des piqûres, et concentre ainsi en un seul point la pénétration de la corrosion. Les alliages sans cuivre sont en pratique relativement peu sensibles à cette forme de corrosion.

I.3.9. Corrosion sous tension :

La corrosion sous tension des alliages d'aluminium est toujours de nature intergranulaire. Elle est souvent liée à la corrosion intergranulaire elle-même, mais cela n'est cependant pas une condition nécessaire. Elle est également liée à la répartition globale des joints de grains, et donc à l'orientation de la contrainte appliquée par rapport aux axes de corroyage du métal. En pratique, la corrosion sous tension concerne essentiellement le sens travers court des produits épais, et elles alliages à haute résistance des séries 2 000 et 7000. Comme pour la corrosion intergranulaire, la sensibilité à la corrosion sous tension peut être éliminée par des traitements thermiques particuliers (sur-revenu), propres à chaque alliage. Comme pour les aciers inoxydables, la résistance à la corrosion sous tension des alliages d'aluminium est caractérisée par le niveau des seuils de contraintes de non-rupture.

I.3.10. Corrosion exfoliante (ou feuilletante ou stratifiée) :

Ce type de corrosion, spécifique des alliages d'aluminium, ne concerne en pratique que certains alliages à haute résistance des séries 2000 et 7 000, certains produits très écrouis (structure fibreuse), et certains états métallurgiques (état sous-revenus, zones par les soudures). Il se traduit par une pénétration de la corrosion parallèlement aux fibres du métal, et par un feuilletage de la structure sous l'effet du gonflement des produits de corrosion. Comme les précédents phénomènes de corrosion structurale, la corrosion exfoliante peut être éliminée par des traitements thermiques particuliers (sur-revenu).

I.4. ROLE DES ELEMENTS D'ALLIAGES :

Dans les alliages d'aluminium, on distingue fondamentalement deux grandes classes d'alliages : les alliages non trempants et les alliages trempants susceptibles d'un durcissement structural. Une telle classification souligne à l'évidence l'importance

accordée aux caractéristiques mécaniques et aux propriétés métallurgiques dans le choix des alliages d'aluminium. Dans les alliages non trempants, mis à part l'aluminium non allié (série 1 000), dont les impuretés principales sont le fer et le silicium, les éléments d'alliage principaux sont le manganèse (série 3 000) et le magnésium (série 5 000). Dans les alliages trempants, les éléments d'alliage principaux sont cette fois le cuivre (série 2 000), le magnésium et le silicium (série 6 000) et le zinc (série 7 000). À l'intérieur de chaque série, l'élément d'alliage principal est combiné soit avec les éléments principaux des autres séries, soit avec des éléments secondaires tels que Cr, Zr, Ti, etc. De nombreux éléments d'alliages n'ont d'ailleurs en réalité que très peu d'effet sur la résistance à la corrosion (Si, Ti). Le manganèse n'a même aucune influence. Le chrome apparaît légèrement favorable. Au total, les éléments les plus marquants sont certainement le cuivre pour les effets défavorables et le magnésium pour les effets favorables.

En résumé, tous les alliages d'aluminium ont en principe une bonne résistance à la corrosion dans notre environnement naturel. La résistance à la corrosion apparaît ainsi bien souvent non pas comme un réel critère de sélection, mais plutôt comme un facteur d'élimination de certains alliages ou de certains états métallurgiques [16].

Chapitre II

Procédures et Techniques expérimentales

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les opérations que nous avons effectuées pour mener à bien ce travail, avec la description des procédures, des techniques et des équipements utilisés dans notre travail (dans le cadre de l'étude).

II.2. Prélèvement des échantillons :

Nous avons prélevé les échantillons d'emballage d'aluminium pour les essais de corrosion, la microscopie optique électronique à balayage et microdureté à partir :

- De l'emballage du fromage en portion ; ce lui-ci doit être de l'aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique, sont utilisés dans le cas du contact de longue durée, et un usage unique.
- De l'emballage de médicaments ; ce lui-ci aussi doit être de l'aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique, sont utilisés dans le cas du contact longue durée, et un usage unique.

Les emballages de produit de large consommation et commercialisés en Algérie sont de différentes provenances.

II.3. Préparation des échantillons pour les essais électrochimique (préparation des électrodes) :

L'électrode de travail est constituée d'un conducteur électrique en cuivre de diamètre de 1,5mm assemblée avec l'échantillon (papier médicaments et fromage) de dimension de $2 \times 1 \text{ cm}^2$.

1^{ère} étape : dénuder les deux extrémités du fil de cuivre.

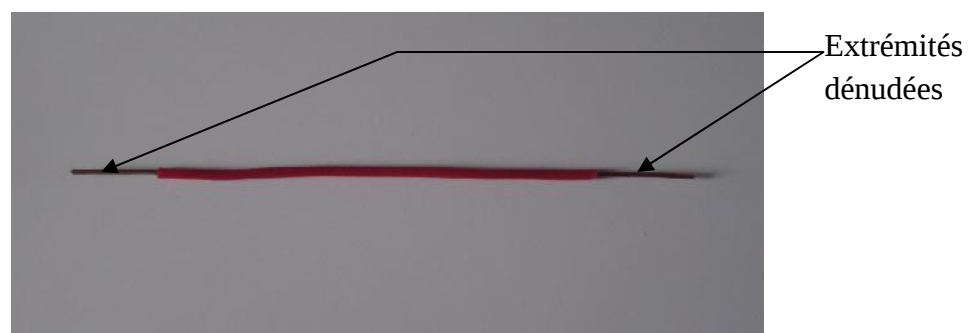


Figure II.1 : Conducteur de l'électrode des essais de la corrosion.

2^{ème} étape : mise en contact d'une extrémité du conducteur avec l'échantillon et isolation du fil conducteur apparent et de la surface inutile de l'échantillon par un autocollant.

Pour les essais de corrosion, la surface de travail (S_c) est la même pour tous les échantillons : $S_c = 2 \times 1 \text{ cm}^2 = 2 \text{ cm}^2$.

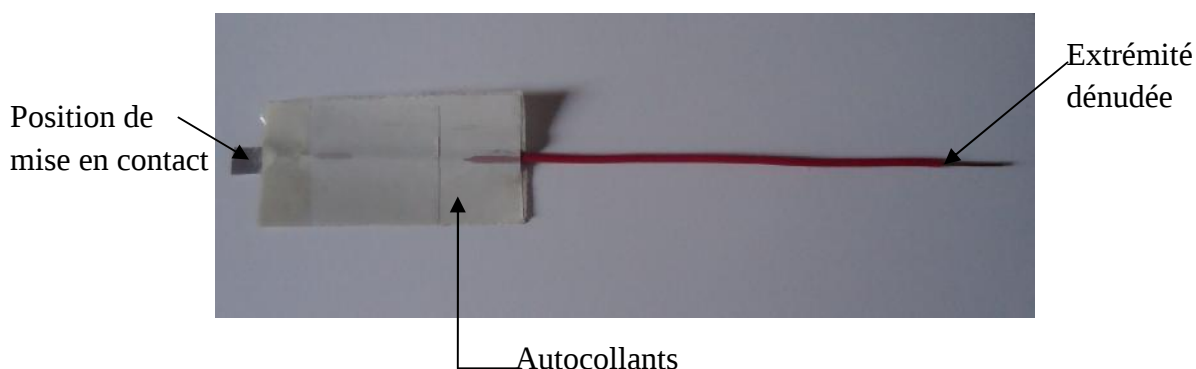


Figure II.2 : Electrode de corrosion du papier d'aluminium d'emballage de médicament.

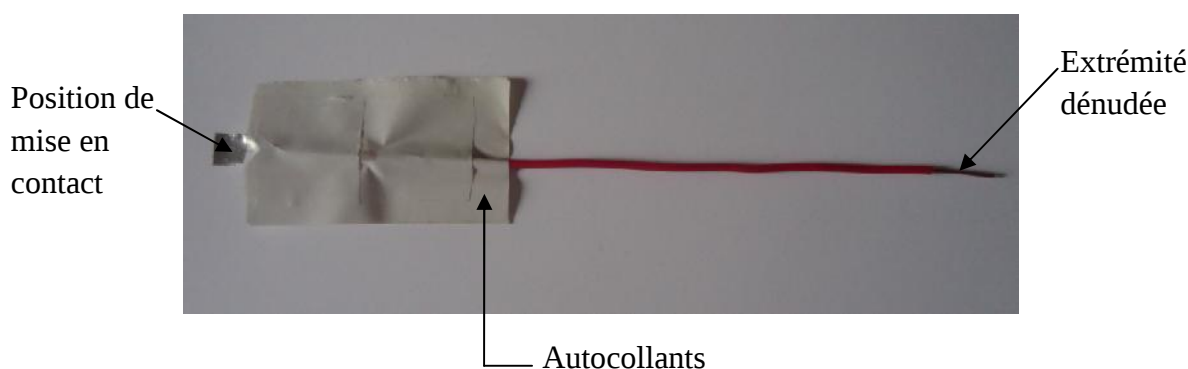


Figure II.3 : Electrode de corrosion du papier d'aluminium d'emballage du fromage.

II.4. 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 de potentiel standard $E^\circ=0,223V$ pour préparer l'électrode d'Ag/AgCl nous avons immergé un fil d'argent dans l'eau de javel riche en (ClO^-) jusqu'à ce que la couleur de sa surface devient noir, cette couleur est un signe de la formation d'une couche d'AgCl à la surface du fil d'argent.

II.5. Solution:

Nous avons choisi comme milieu corrosif le fromage fondu.

II.6. Montage pour l'essai de la corrosion libre :

On prépare trois électrodes de travail pour chaque type du papier (papier de médicament et de fromage) « 3×2 » par série d'expérience, puis on les immergés du fromage et nous avons relié l'électrode immergée (l'échantillon) avec une électrode de référence Ag/AgCl.

Nous avons mesuré le potentiel de la corrosion libre par l'intermédiaire d'un multimètre de marque DIGITAL, chaque seconde on prend une mesure jusqu'à 10s, après chaque 10s on prend une mesure jusqu'à chaque 10secondes jusqu'à 1mn, après chaque une minute on prend une mesure jusqu'à 10mn, après chaque 10mn on prend une mesure jusqu'à 1heur, après chaque 1h en prend jusqu'à 24h.

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.

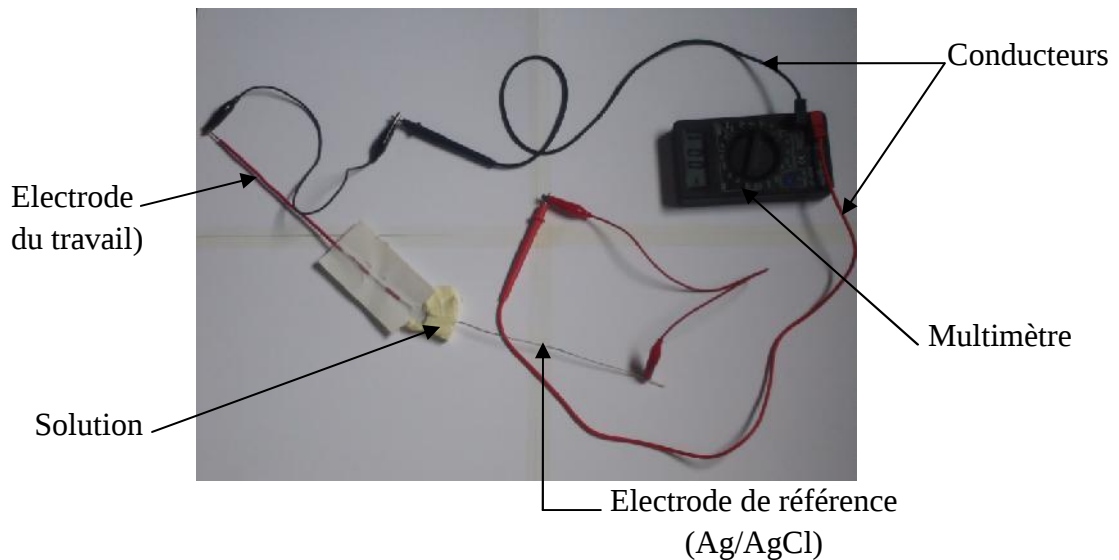


Figure II.4 : Montage pour la corrosion libre.

II.7. Montage pour l'essai de la corrosion sous une tension imposée de 1,5V :

On prépare trois électrodes de travail pour chaque type du papier (papier de médicament et de fromage) « 3×2 » par série d'expérience, puis on les immergés dans des solutions différents types du fromage et nous avons relié l'électrode immergée (l'échantillon) avec une électrode de référence Ag/AgCl et une pile de potentiel 1,5V.

Nous avons mesuré le potentiel de la corrosion libre par l'intermédiaire d'un multimètre de marque DIGITAL, et avec mêmes étapes qui ont été faites dans l'expérience précédente (l'essai de la corrosion libre).

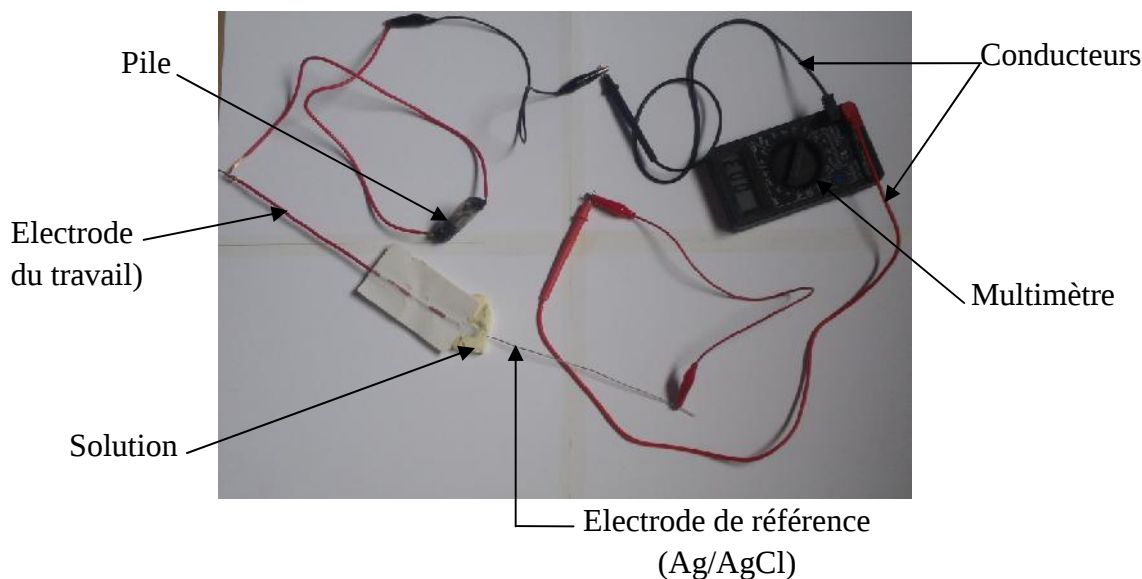


Figure II.5 : Montage pour la corrosion sous une tension imposée de 1,5V.

II.8. Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et microdureté :

Les échantillons pour la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage ont été préparés presque de la même façon, une partie de ces échantillons ont été polis seulement avec le papier abrasif de grade 4000(figure II-6) en raison de leurs faible épaisseur, lavés et séchés à l'air chaud, sauf que les échantillons préparés pour la microscopie optique, en plus, ont été attaqués par le réactif de NaOH, une autre partie de ces échantillons n'ont pas été polis.



Figure II.6 : Polisseuse utilisée

Trois types d'échantillons ont été préparés :

- les échantillons pour une observation microscopique au microscope optique de la surface du papier aluminium dans le but de voir la microstructure des

différents papiers, ces échantillons étaient attaqués, ces échantillons ont été polis.

- Les échantillons pour une observation microscopique de la surface selon l'épaisseur, par la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage, ces échantillons ont été préparés pour vérifier est ce que les différents papiers ne sont pas revêtus ou vernis à la surface, ces échantillons n'ont pas été polis.
- Les échantillons pour l'observation de l'évolution de la morphologie de la corrosion par microscopie optique et microscopie électronique à balayage, ces échantillons n'ont pas été polis.

Caractérisation des propriétés microstructurales :

II.8.1. Microscope optique :

Le microscope optique est composé de quatre parties essentielles :

1. Une platine orientable : qui porte l'échantillon à observer. Elle possède deux mouvements de translation ;
2. Un dispositif d'observation : qui est constitué d'oculaire (permettant d'agrandir l'image) et d'objectifs (permettant la projection de l'image)
3. Un dispositif d'éclairage
4. Un dispositif photographique : qui permet une prise de photographies des structures observées.

Fonctionnement du microscope optique :

Un faisceau lumineux produit par une lampe à incandescence ou une lampe à arc (1) traverse un ensemble de lentilles (2–4). Le diaphragme d'ouverture (3) permet de régler la quantité de lumière. Le diaphragme de champ (5) permet de réduire les réflexions parasites qui peuvent se produisent dans le microscope. Le faisceau lumineux est réfléchi par une lampe semi-réfléchissante (6), traverse l'objectif (7) et vient frapper l'échantillon à examiner (8). Il traverse à nouveau l'objectif puis la lame (6). Un prisme à réflexion total (9) le dirige vers l'oculaire (10) pour l'examiner à l'œil. Les rayons lumineux sont focalisés sur un écran ou un film photographique (12) grâce à un oculaire de projection (11). Figure II.7

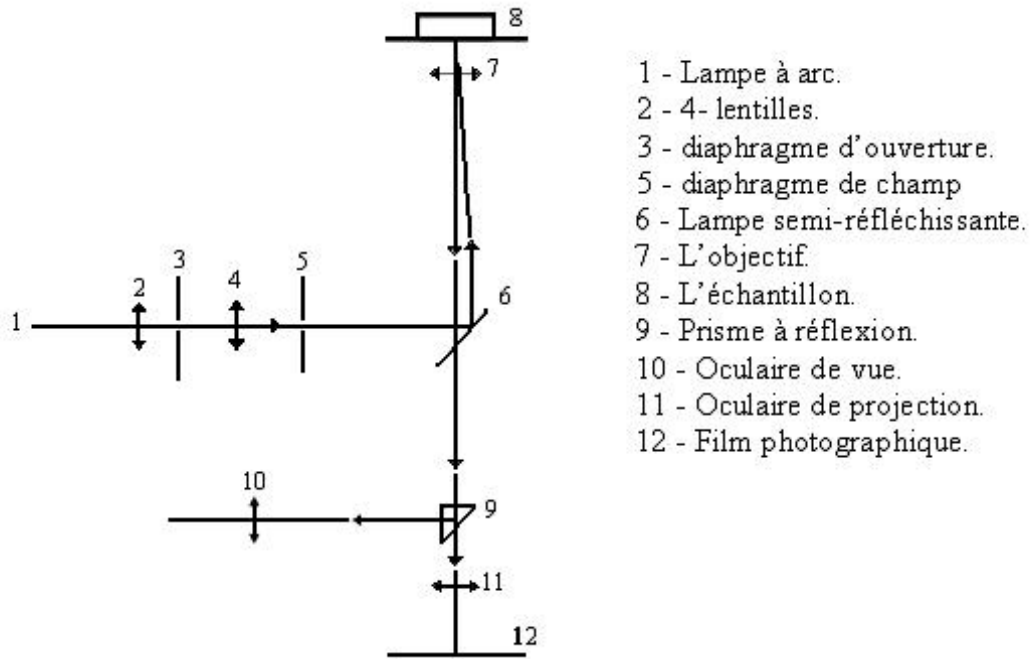


Figure II.7: Schéma d'un microscope métallographique.

II.8.2 Microscope électronique à balayage :

Avec le MEB, il est possible d'obtenir des grossissements de 10 000 à 50 000 fois.

Le principe du MEB est de balayer un échantillon par une sonde électronique. Les informations provenant de l'interaction « faisceau-incident-matériau » sont transformées en signal électrique.

Ce signal électrique module l'intensité du faisceau d'un tube d'oscilloscope ou de télévision à balayage synchrone.

Pour être observables, les échantillons ne requièrent aucune préparation spéciale, à condition qu'ils soient conducteurs électriques. La simplicité de préparation des échantillons pour l'examen microscopique et la possibilité d'observation directe de leur surface font que cet instrument est de plus en plus utilisé tant en recherche que pour les contrôles industriels.

II.8.3. Microscope électronique à transmission :

Le principe du MET est le même que celui d'un microscope optique à lumière transmise, la différence vient essentiellement de la lumière utilisée : c'est un faisceau d'électrons.

Les lentilles sont des lentilles électromagnétiques qui agissent sur le faisceau lumineux. L'image est observée sur un écran ou enregistrée sur plaque photographique.

Le pouvoir de résolution de ce microscope peut, dans les meilleures conditions, être aussi faible que 0.12 μm et les grossissements peuvent atteindre 300000 fois. Les

échantillons doivent être minces puisqu'ils sont traversés par le faisceau d'électrons, et de petites dimensions pour pouvoir être placés sur une grille de diamètre de 3 mm.

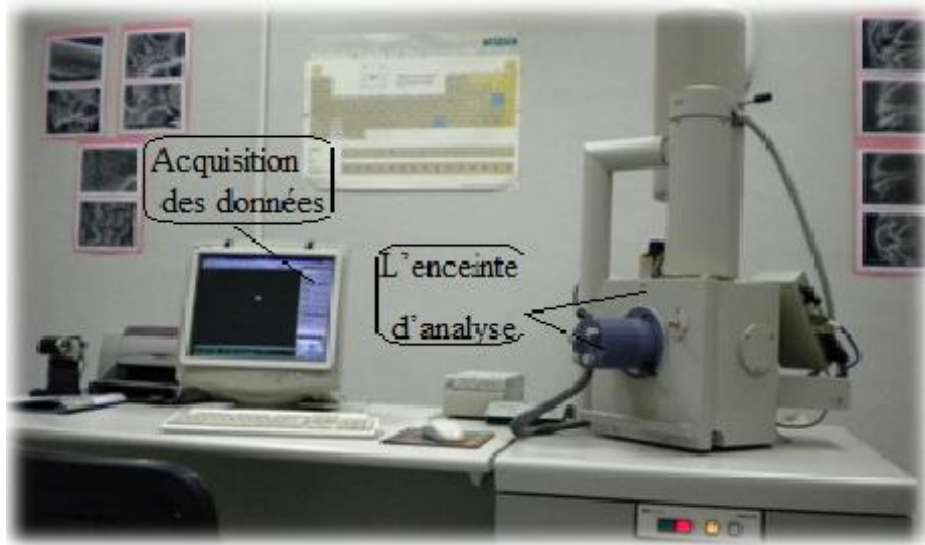


Figure II.8: Microscope électronique à balayage (MEB).

II.9. Essai de micro dureté Vickers :

L'essai de la microdureté Vickers consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136° , sous une charge F , et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge Figure II.9 Nous avons utilisé le microduromètre de marque ZWICK, nous avons effectué plusieurs essais selon deux directions perpendiculaires. Les essais sur le papier pour l'emballage du fromage n'étaient pas possible même sans polissage, ceci est dû à la faible épaisseur du papier aluminium destiné pour l'emballage du fromage.

Pour la charge appliquée est de 10 g.

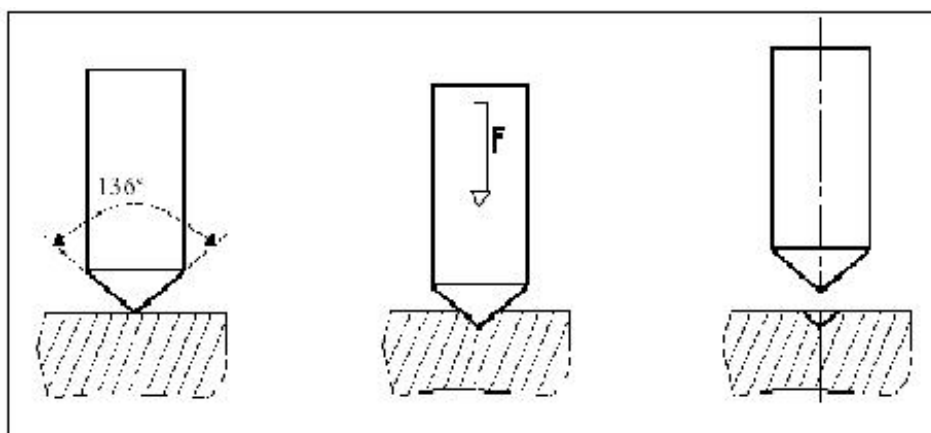


Figure II.9: Principe de l'essai Vickers.

$$HV = F / S$$

La surface est calculée en fonction de la moyenne des deux diagonales d1 et d2.

$$S = d^2 / (2 \cdot \sin 136^\circ / 2)$$

$$d = (d1 + d2) / 2$$

$$HV = 0,189 F / d^2 \quad (F \text{ en N})$$

Symboles et désignations :

Angle au sommet du pénétrateur : 136° .

F : charge d'essai en newtons.

d : diagonale de l'empreinte en millimètres : $d = (d1 + d2) / 2$



Figure II.10 : Micoduromètre

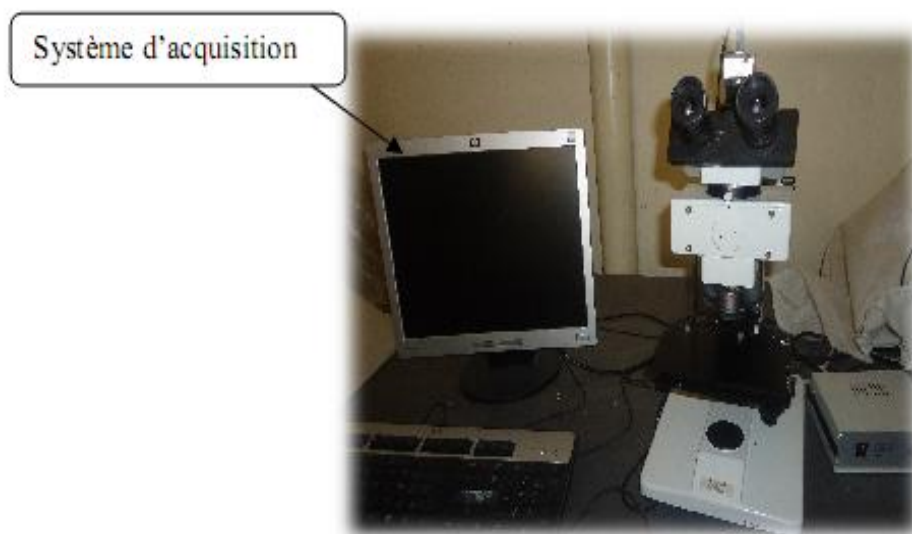


Figure II.11 : Microscope Optique

Chapitre III

Résultats et interprétations

Chapitre III : résultats et interprétations

III.1. Structure du papier d'aluminium d'emballage du fromage et d'emballage des médicaments avant et après attaque par une solution de 10% NaOH :

La micrographie constitue une méthode d'examen direct de la surface des métaux. Elle présente un grand intérêt car elle fournit, dans certains cas, à une échelle microscopique de nombreux renseignements sur la texture et la structure du métal et de ces alliages, attaqués, non attaqués, corrodés, non corrodés.

Elles sont utilisées dans tous les laboratoires de recherches et de contrôle. La microscopie électronique, d'un emploi maintenant courant permet des études micrographiques très fines puisque leur échelle est celle de quelques microns à l'angström.

L'examen métallographique à l'aide d'un microscope optique révèle l'état de surface de différents échantillons utilisés pour l'étude de la corrosion avant et après contact du milieu corrosif dans notre cas celui-ci est du fromage fondu.

Figure III.1 (a-b) montrent les microstructures des échantillons non polis observées avant immersion dans le milieu corrosif de papier d'emballage du fromage et du papier d'emballage de médicament, les microstructures de ces deux papiers est différentes.

On observe sur la Figure III.1 (a-b), du papier d'emballage du fromage fondu, la présence d'une seule phase en plus de la matrice de l'aluminium, cette phase a un aspect de particules avec des formes et des tailles différentes, distribuées d'une façon homogène. Ainsi nous pouvons conclure que ce papier d'emballage en d'aluminium du fromage comporte d'autres éléments autres que l'aluminium, cet élément est soit sous la forme d'impureté ou d'addition. Nous observons aussi sur cette figure des sillons. Ceux-ci ont une orientation unidirectionnelle, nous pensons que l'origine de ces sillons est l'usure des laminoirs utilisés pour la fabrication du papier d'aluminium d'emballage du fromage, en réalité les sillons représentent une zone de stockage de la solution corrosive, la solution corrosive une fois stockée dans les sillons (les microcrevasses) induit une corrosion localisée par crevasse. Une attaque avec la solution de 10% de NaOH durant 10 secondes n'apporte aucune autre information supplémentaire sur ce matériau. La Figure.III.2 (a-b) représentant la microstructure au microscope optique du papier d'aluminium d'emballage de médicaments.

Les figures (III.1-2) montrent que les microstructures des deux papiers d'emballage sont différentes.

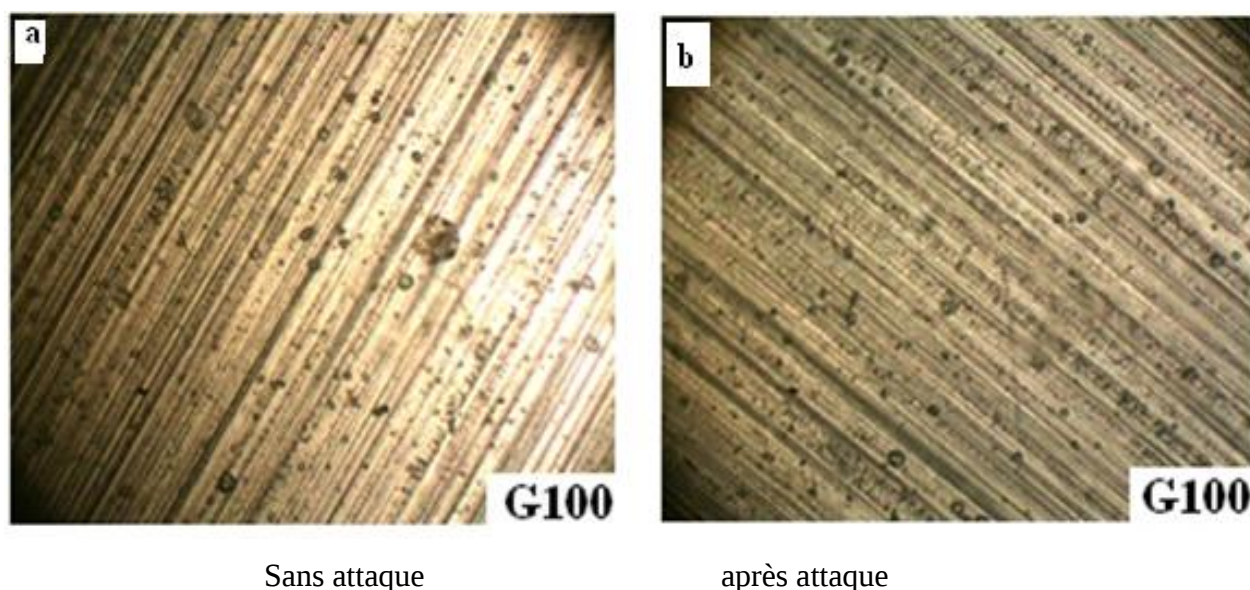


Figure III.1 : Microstructure du papier d'emballage du fromage fondu (a) avant attaque et (b) après attaque par une solution de 10% NaOH.

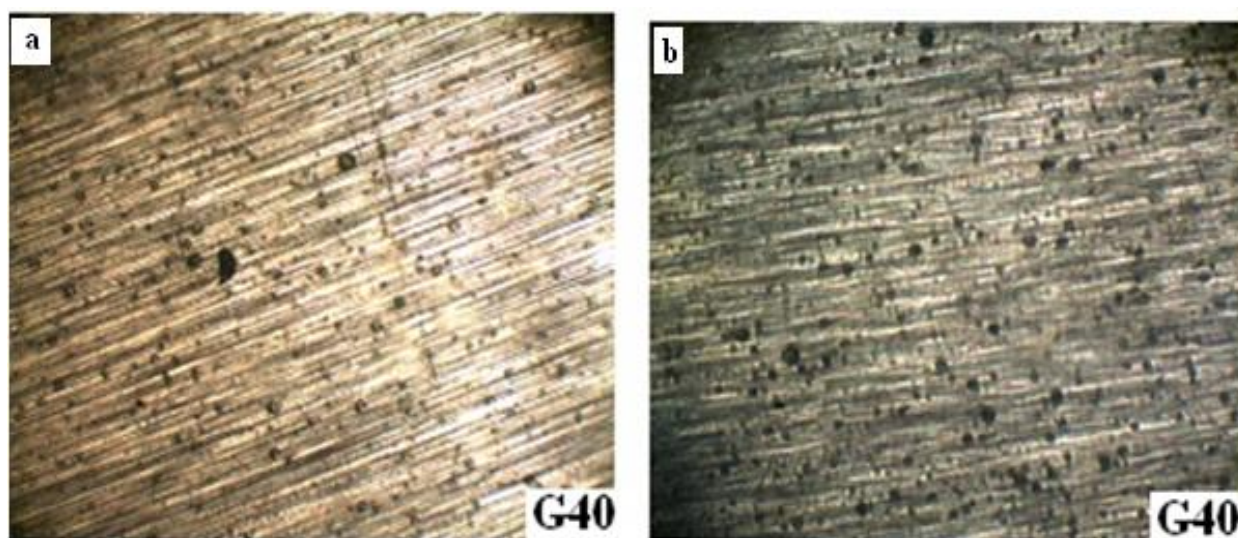


Figure III.2 : Microstructure du papier d'emballage du médicament (a) avant attaque et (b) après attaque par une solution de 10% NaOH .

III.2- Morphologie de la corrosion libre des deux types de papiers d'emballage en aluminium dans le milieu corrosif du fromage fondu :

Après 5 jours en contact avec du fromage fondu, le papier d'emballage du fromage semble subir une corrosion localisée dans certains endroits (Figure III.3a), le papier d'emballage de médicaments semble aussi se corrodé de la même façon (Figure III.3b),

mais la corrosion observée sur le papier d'aluminium d'emballage du fromage semble plus marquée. Nous pensons que cette différence est due à la différence dans la composition chimique ou bien à la différence dans les traitements thermomécaniques subis par chaque papier d'emballage.

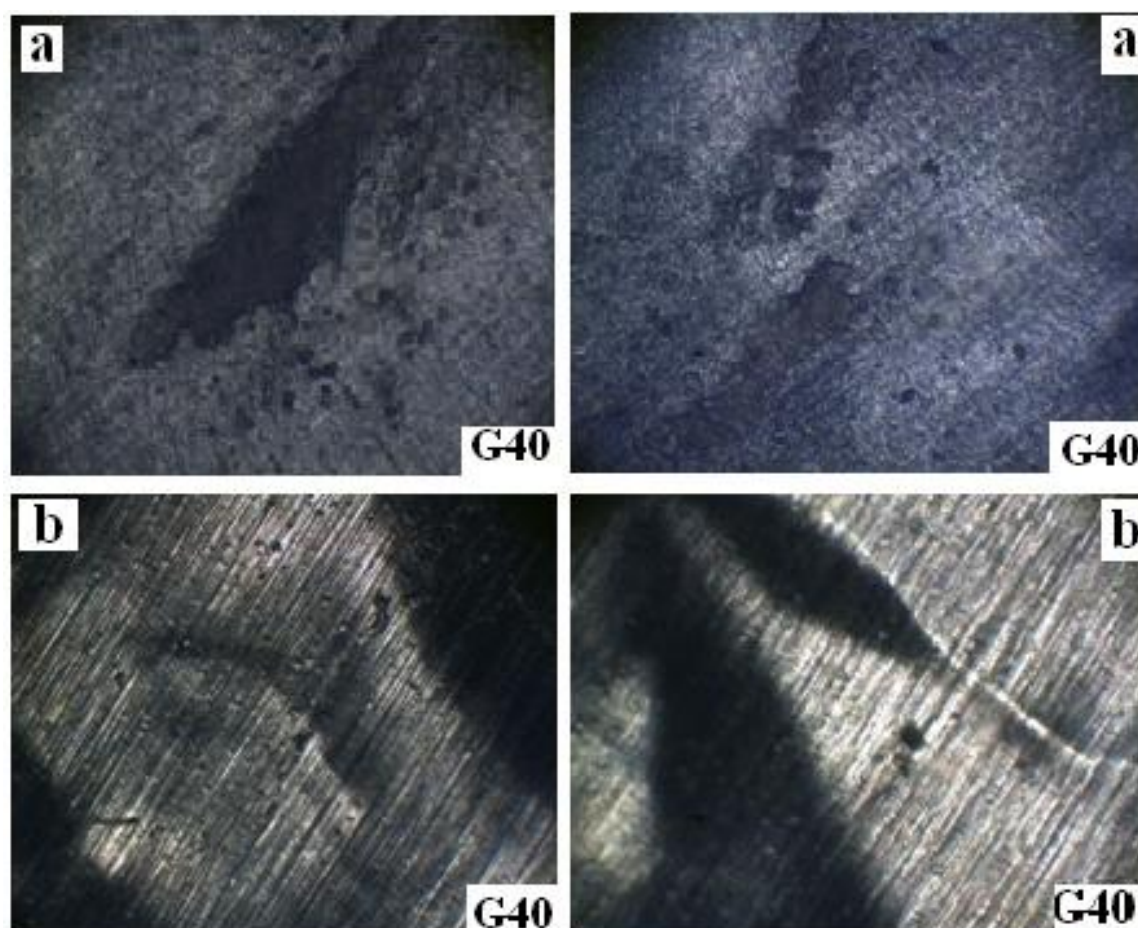


Figure III.3 : Microstructure du papier d'emballage : du fromage (a), du Médicament (b) après corrosion de 5 jours dans du fromage fondu aéré.

III.3- Morphologie de la corrosion sous une tension imposée des deux types de papiers d'emballage en aluminium dans le milieu corrosif du fromage fondu :

Les microstructures de corrosion de ces papiers après une journée de corrosion sous tension imposée de 1.5 V, montrent que la dégradation de ces derniers est plus marquée. Nous observons aussi une apparence marquée de piqûres sur une des microstructures.

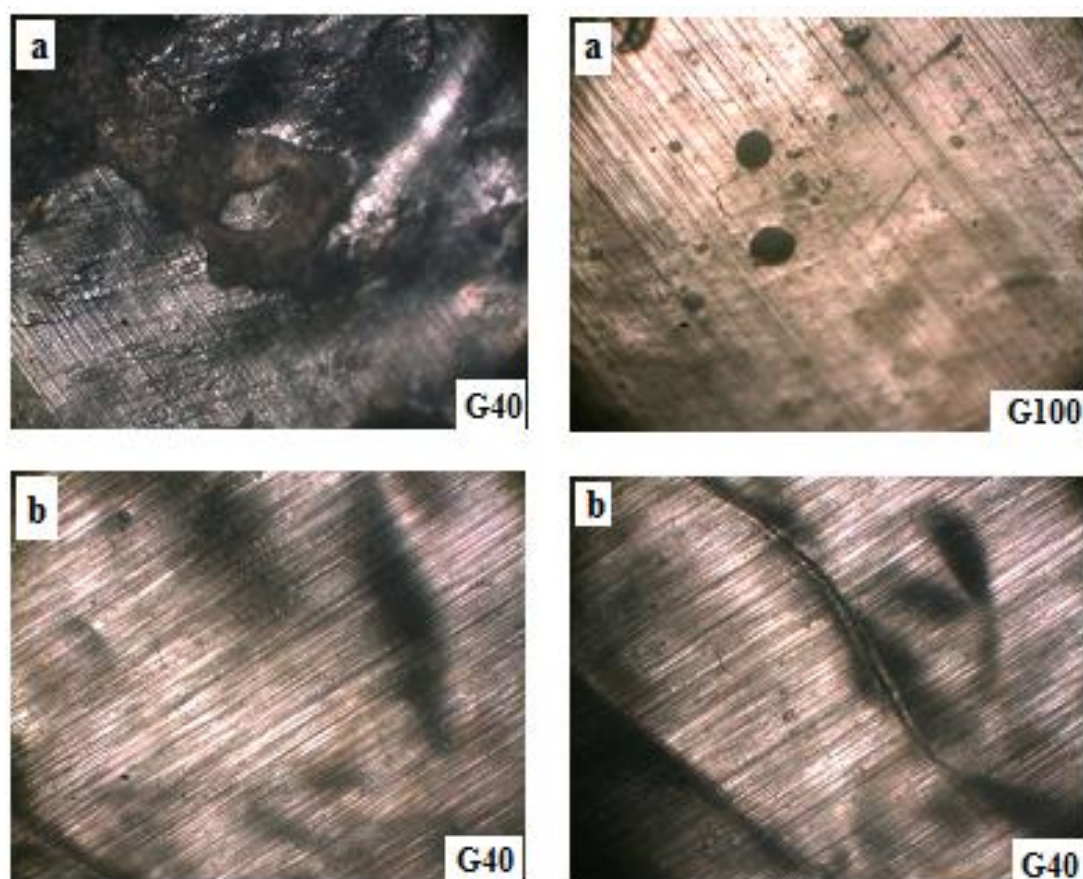


Figure III.4 : Microstructure du papier d’emballage en d’aluminium après une journée de corrosion sous tension de 1.5 V (a) papier d’emballage du fromage, (b) papier d’emballage du médicament.

III.4 Structure du papier d’emballage en aluminium sous microscope électronique à balayage avant et après corrosion libre:

La microscopie électronique à balayage (Figure III.5) montre l’existence de deux types de particules intermétalliques. Le premier type de particules est de couleur blanche et l’autre est de couleur grise. Ceci implique que la microscopie optique est insuffisante pour décrire la constitution en phase d’un matériau.

La Figure III.6 représentant les images au M.E.B des papiers d’emballage en aluminium après 5 jours de corrosion dans le fromage fondu montrent la formation d’une corrosion dans la direction des sillons observés au microscope optique et la formation de piqûres autour des particules intermétalliques observés auparavant.

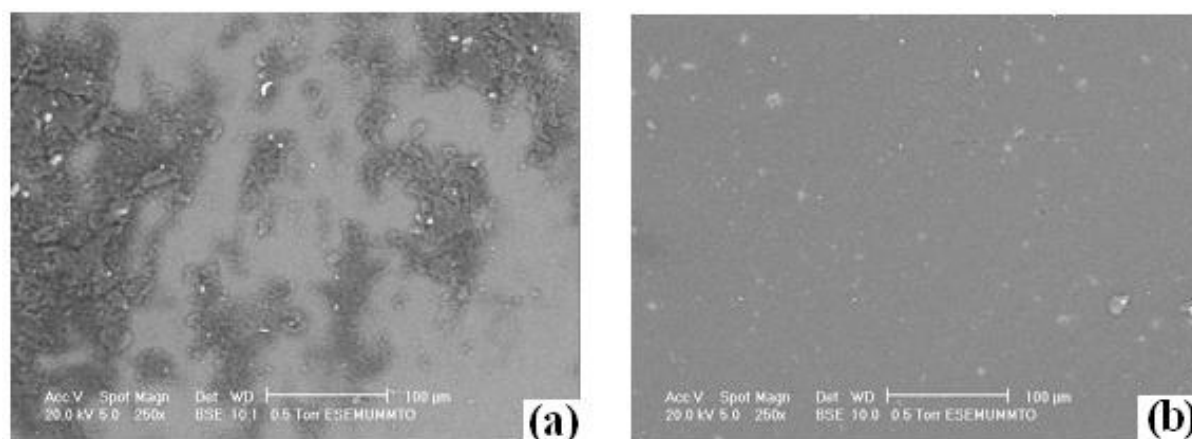


Figure III.5: Examen au microscope électronique à balayage du papier d'emballage : du fromage (a), des médicaments (b).

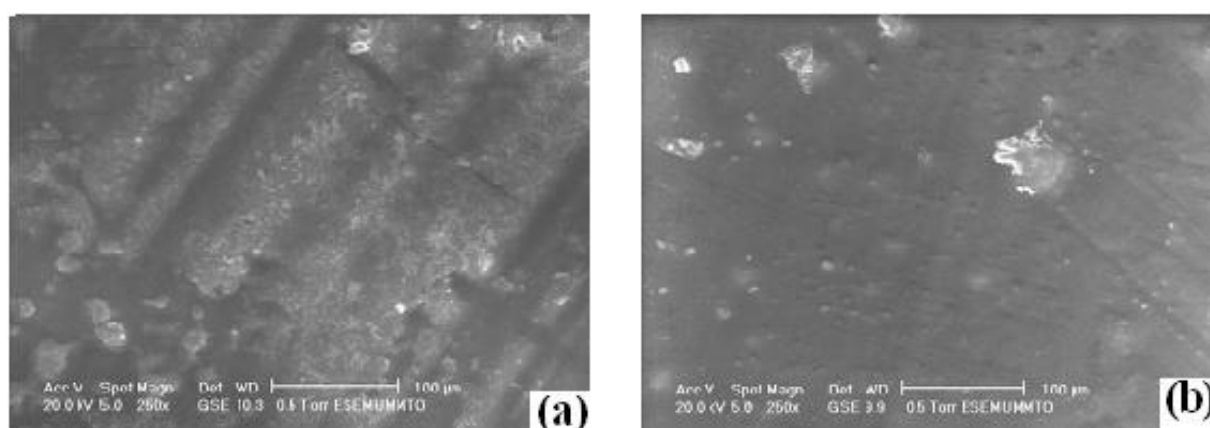


Figure III.6: Examen au microscope électronique à balayage du papier d'emballage : du fromage (a), du médicament (b) après corrosion libre de 5 jours dans du fromage fondu aéré

III.5 Microdureté et résistance à la traction des deux types de papiers d'emballage en aluminium :

Microdurté (Hv)	20	18	16	16	18
Résistance à la traction (N/mm ²)	71	63	55	55	63

Tableau III.1 : Dureté Vickers et la résistance à la traction du papier d'emballage du Fromage.

Microdurté (Hv)	12	14	16	15	15
Résistance à la traction (N/mm ²)	41	49	55	52	52

Tableau III.2 : Dureté Vickers et résistance à la traction du papier d'emballage du Médicament.

Nous avons mesurés dureté Vickers des deux types de papiers d'emballage (du papier d'emballage du fromage et d'emballage de médicament) à la température ambiante sous une charge de 10g (Tableaux III.1 et 2) et nous avons converti via des tables de conversions la dureté Vickers aux résistances à la traction comme le montre les tableaux (III.1 et 2).

La mesure de dureté Vickers montre que la dureté du papier d'aluminium d'emballage du fromage est légèrement différente de la dureté du papier d'emballage du médicament. Ceci dit nous pouvons dire que la composition chimique ou bien l'histoire thermomécanique des deux papiers n'est pas identiques.

La conversion des valeurs de la dureté Vickers en résistance à la traction via les tables de conversion montre que cette différence est plus marquée ceci prouve que les deux papiers ne sont pas identiques.

III.6 Cinétique de la corrosion libre des deux types de papiers d'emballage en aluminium :

La corrosion libre est une dégradation purement naturelle du matériau en contact avec une solution, dans notre cas la solution et du fromage fondu, le suivi de celle-ci nous renseigne sur cinétique de corrosion et le temps nécessaire pour l'obtention du régime stationnaire (la passivation) et la durée du régime actif.

Nous avons effectué des mesures de potentiel de la corrosion libre pour les deux types de papiers d'emballage d'aluminium pendant une durée 24 heures dans le fromage fondu aéré.

(La Figure III 7-14) montre que le potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage est différent du potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du médicament. Ces deux potentiels ne convergent pas vers le même potentiel de passivation après 24 heures de corrosion dans du fromage fondu

aéré. Ceci dit nous pouvons dire que la cinétique de la corrosion des deux papiers est différente.

Le potentiel de corrosion du papier d'emballage du fromage est supérieur au potentiel de corrosion libre du papier d'emballage du médicament dès le début de la corrosion, donc ce dernier est moins noble que le premier.

Cette différence est observée dès le début de la corrosion. La transformation de l'échelle de des abscisses en échelle logarithmique décimale mis en évidence cette différence.

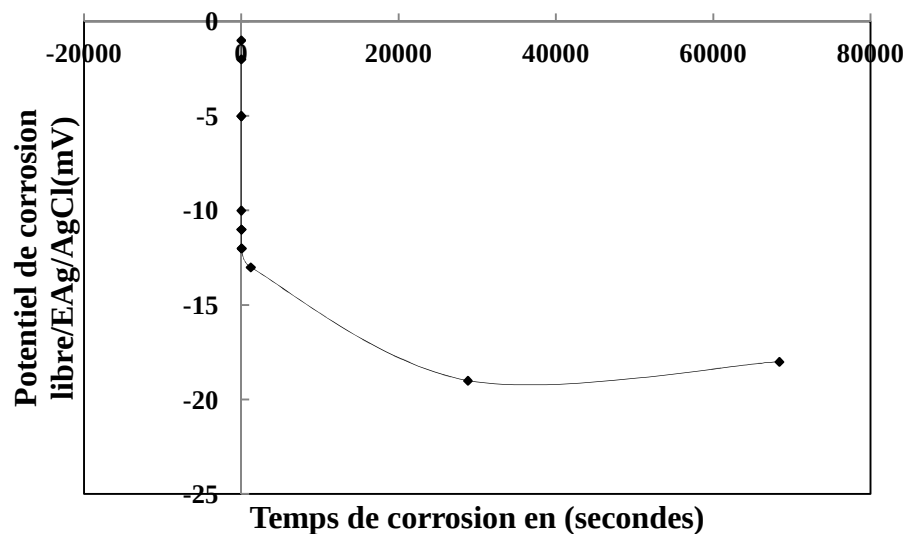
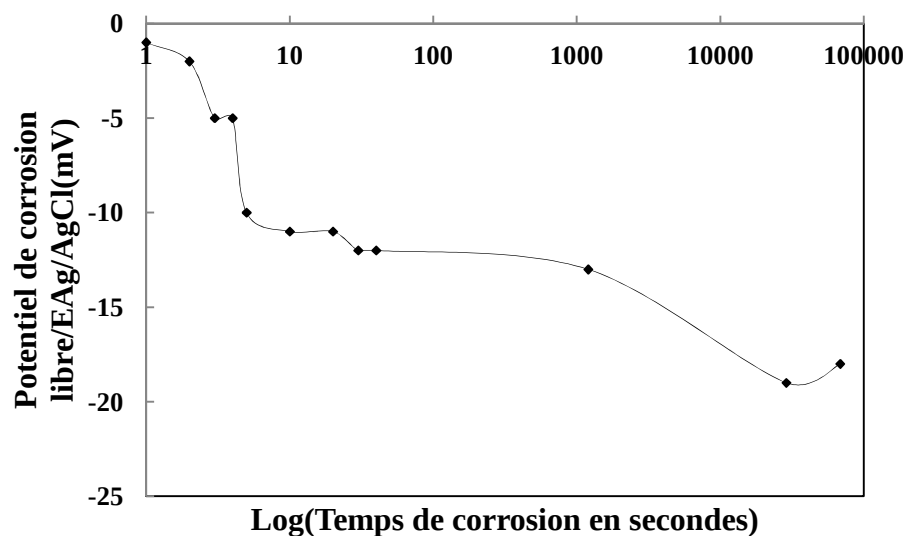


Figure III.7 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).



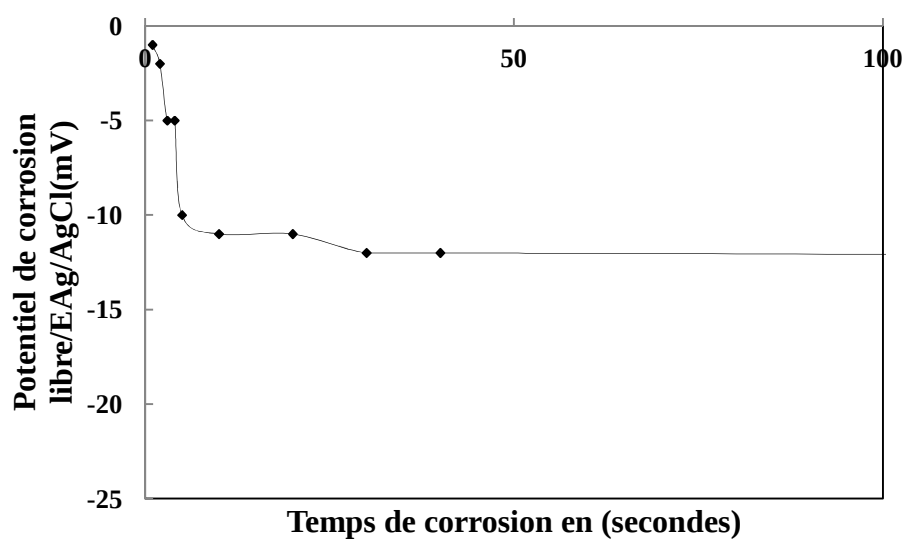


Figure III.9 : Effet loupe potentiel de la corrosion libre du papier d’emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).

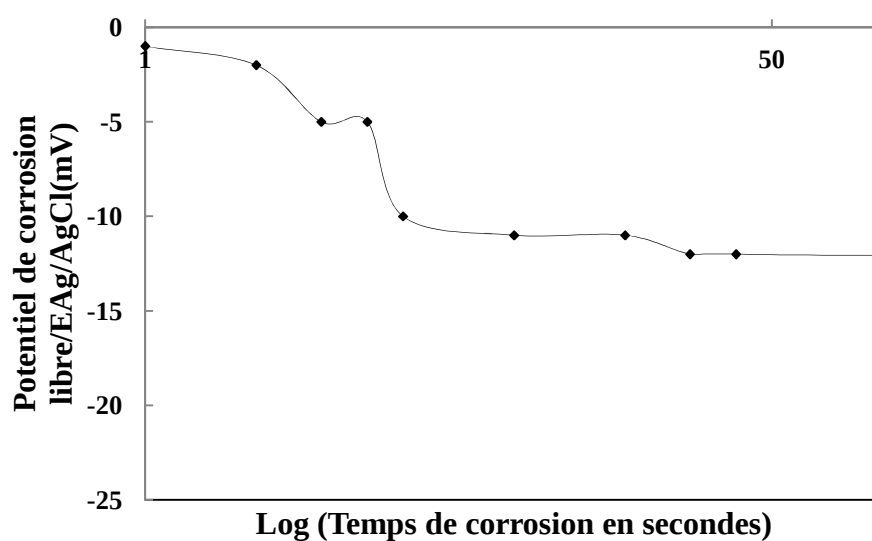


Figure III.10: Effet loupe potentiel de la corrosion libre du papier d’emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique décimale).

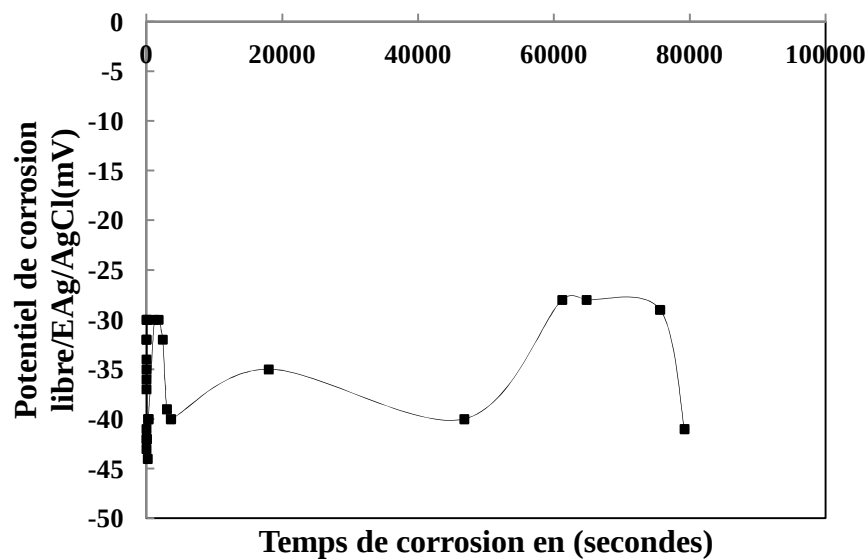


Figure III.11 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).

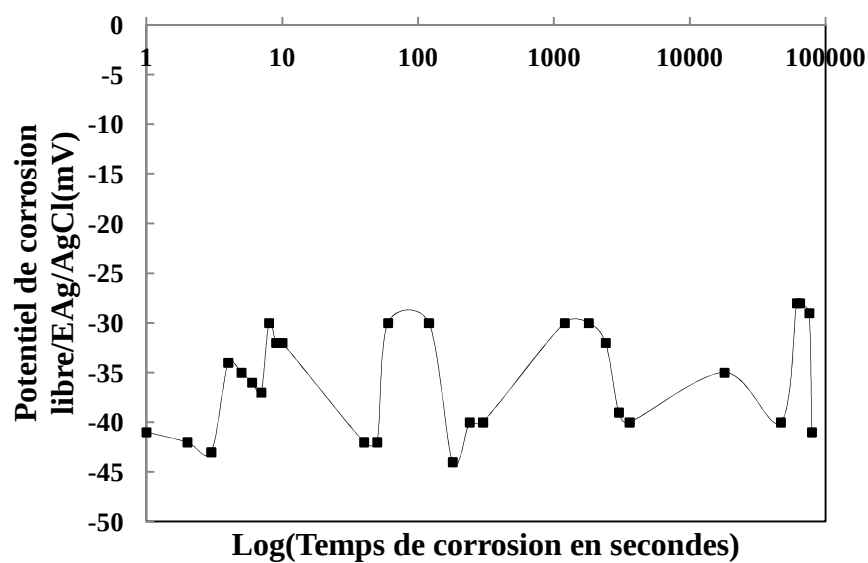


Figure III.12 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique décimale).

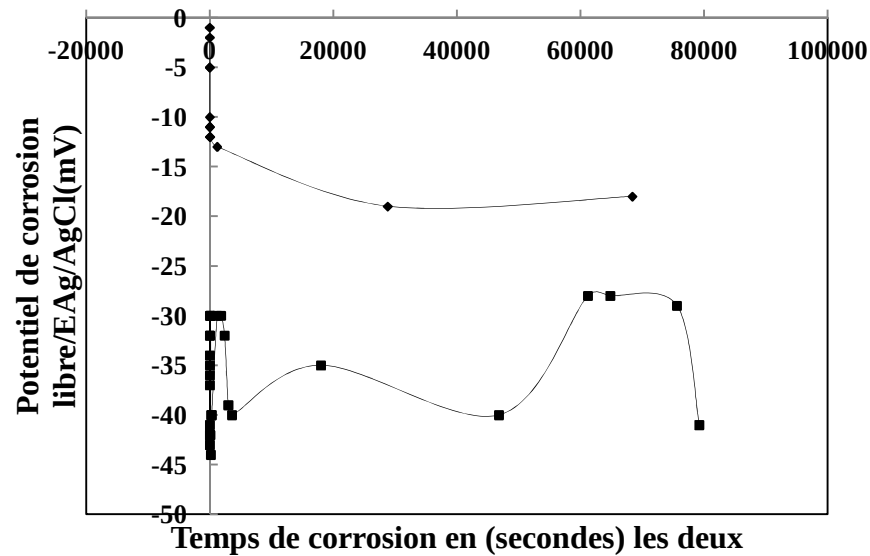


Figure III.13 : Comparaison du potentiel de la corrosion libre du papier d’emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle normale).

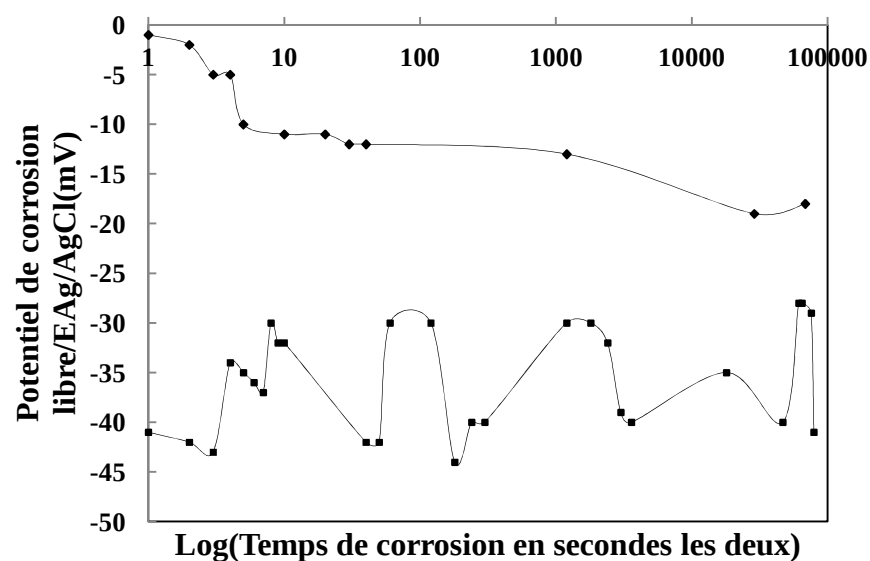


Figure III.14 : Comparaison du potentiel de la corrosion libre du papier d’emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle logarithmique).

III.7-Cinétique de la corrosion sous une tension de 1,5 V des deux types de papiers d’emballage en aluminium :

(La Figure III 15-24) montre que le potentiel de la corrosion sous une tension de 1.5V du papier d’emballage en aluminium du fromage est différent du potentiel de la corrosion libre du papier d’emballage en aluminium du médicament au début de la

corrosion. Ces deux potentiels convergent vers la même valeur de passivation après 24 heures de corrosion dans du fromage fondu aéré. Ceci dit nous pouvons dire que la cinétique de la corrosion des deux papiers sous une tension imposée de 1.5V n'est pas très différente. Le potentiel de corrosion sous tension de 1.5 V du papier d'emballage du fromage est inférieur au potentiel de corrosion sous tension du papier d'emballage du médicament au début de la corrosion.

Ainsi une tension imposée change la cinétique de corrosion du papier d'emballage d'aluminium.

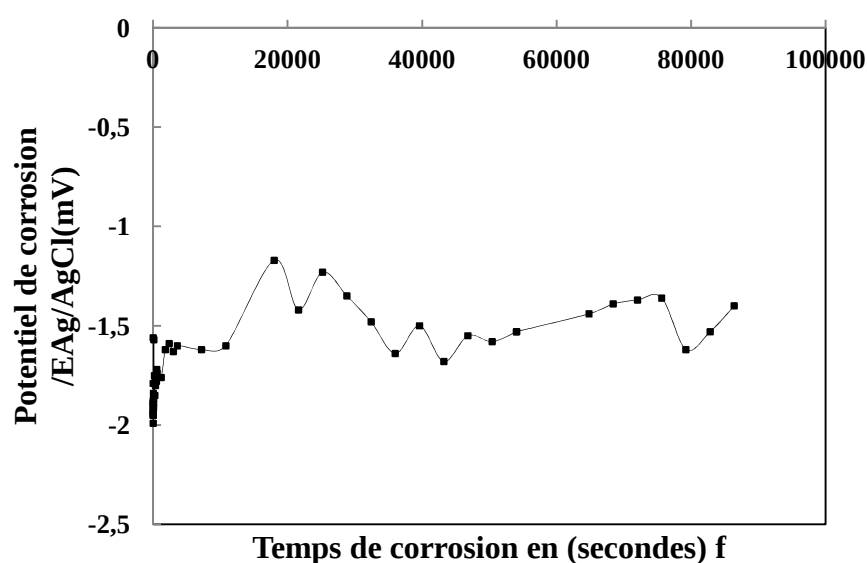


Figure III.15 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).

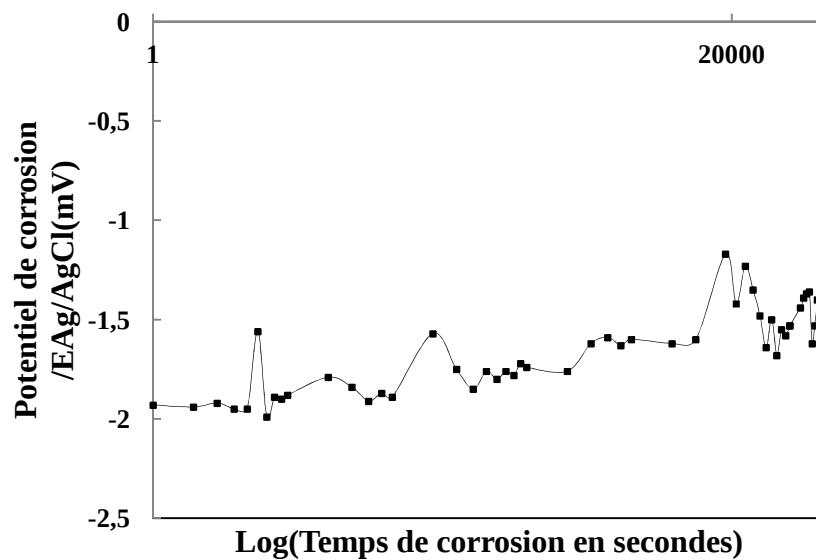


Figure III.16 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d’emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique).

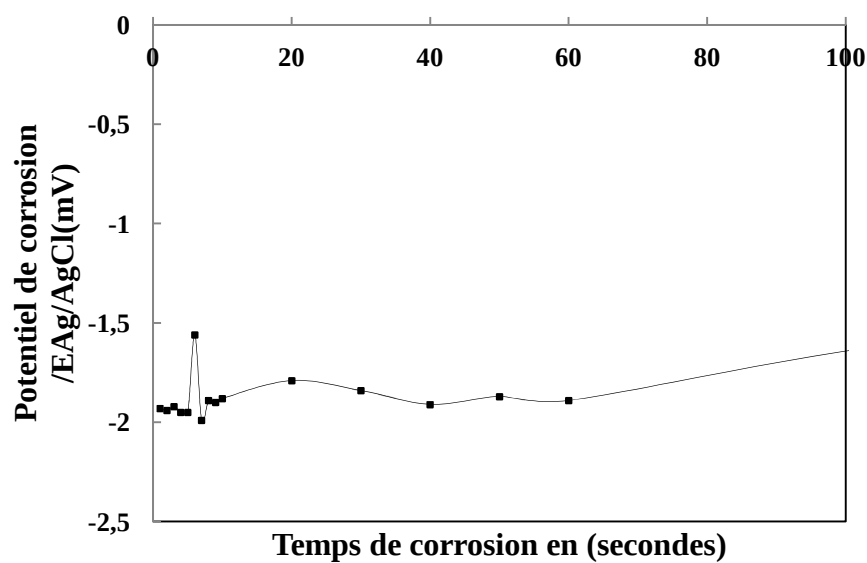


Figure III.17 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d’emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle normale).

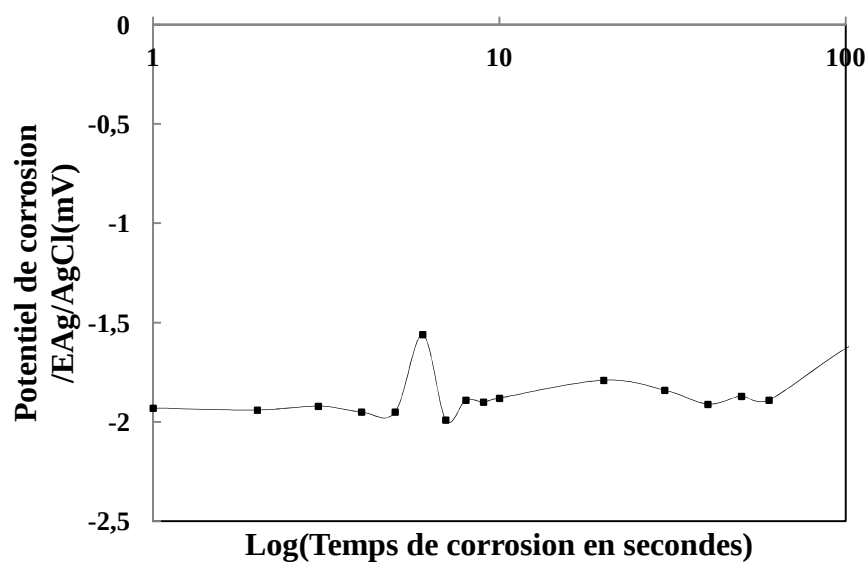


Figure III.18 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d’emballage en aluminium du fromage (le temps en échelle logarithmique).

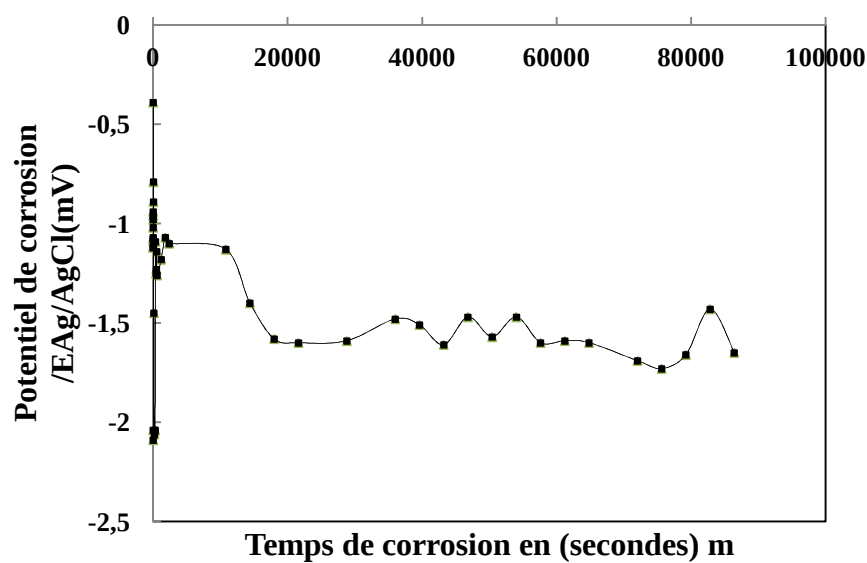


Figure III.19 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d’emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).

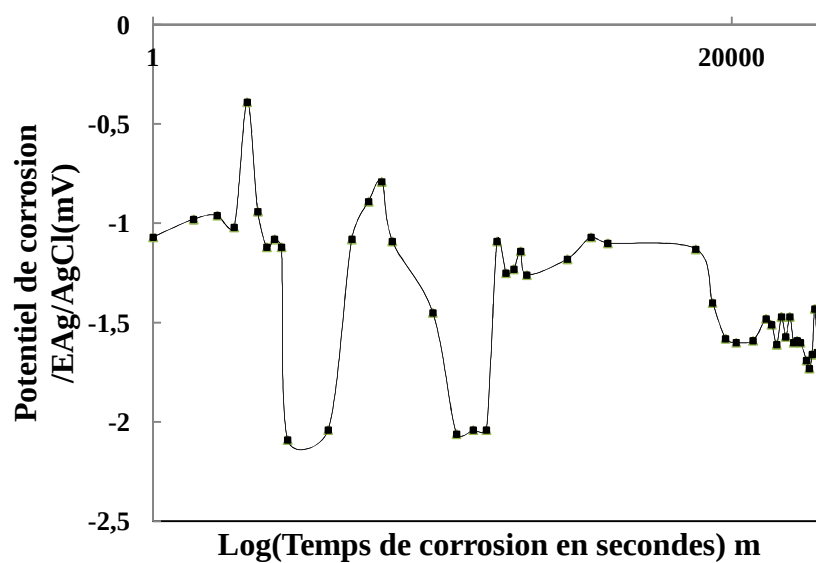


Figure III.20 : Potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique).

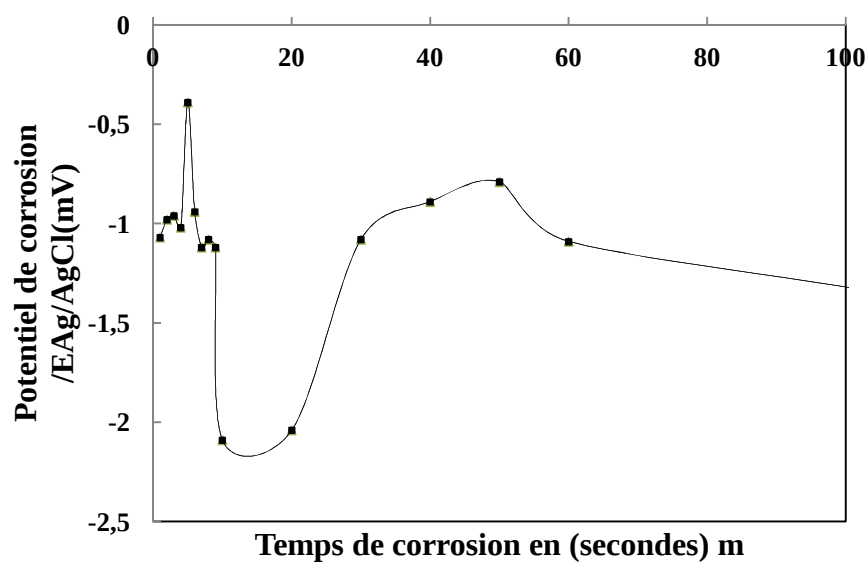


Figure III.21 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d'emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle normale).

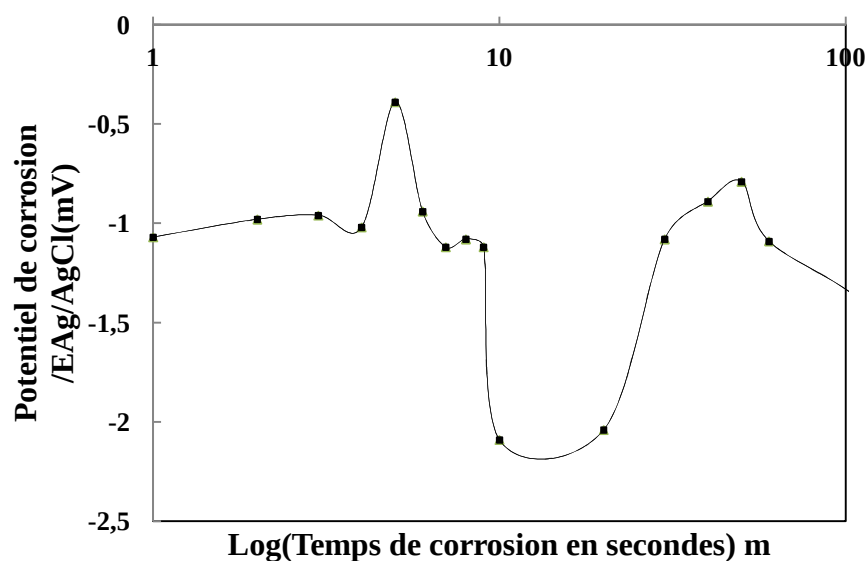


Figure III.22 : Effet loupe du potentiel de la corrosion sous tension du papier d’emballage en aluminium du médicament (le temps en échelle logarithmique).

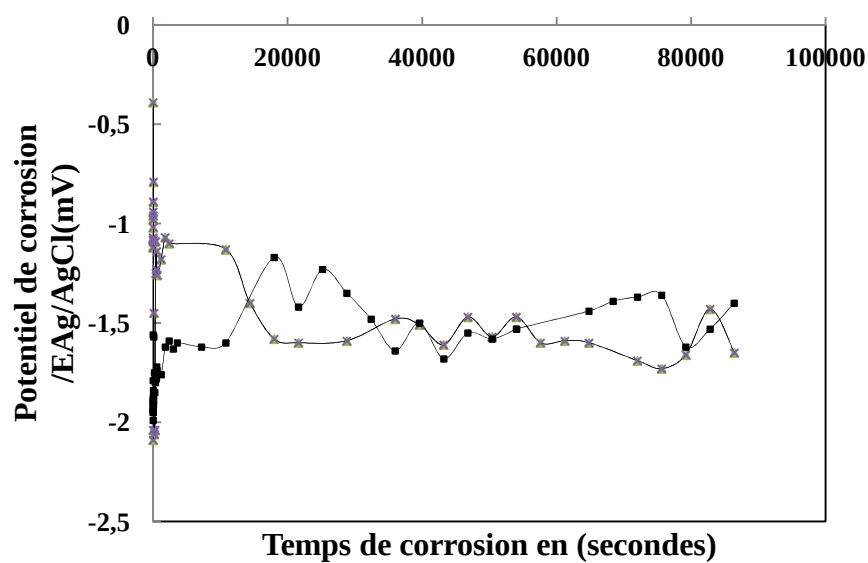


Figure III.23 : Comparaison du potentiel de la corrosion sous une tension de 1.5V du papier d’emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle normale).

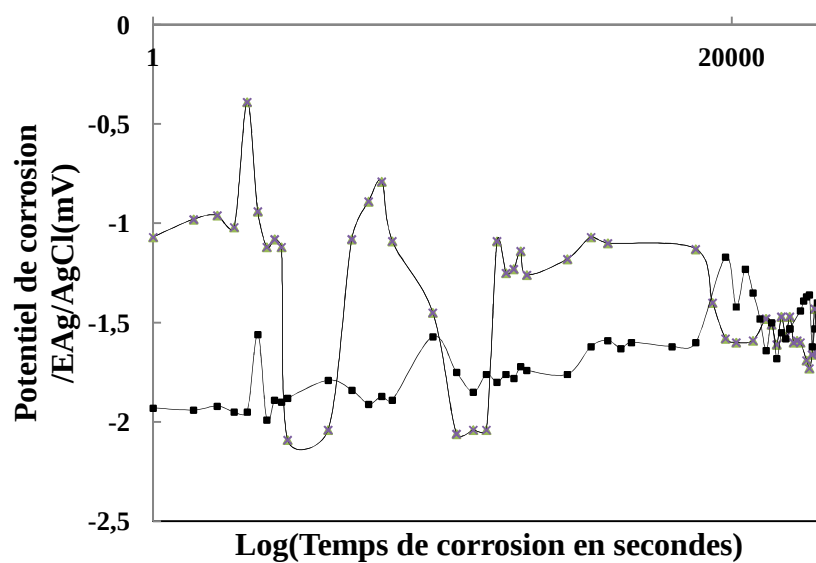


Figure III.24 : Comparaison du potentiel de la corrosion sous une tension de 1.5V du papier d'emballage en aluminium du fromage et du médicament (le temps en échelle logarithmique).

Conclusion

CONCLUSION

CONCLUSION

Le travail concernant la corrosion du papier d'emballage du fromage et du médicament dans le milieu de corrosion (fromage fondu), nous a permis de faire les conclusions suivantes :

- Une présence d'autres phases en plus de la matrice de l'aluminium, sous la forme de particules intermétalliques avec des formes et des tailles différentes une distribution homogène, et les sillons dus aux traitements thermomécaniques préalables sont responsables de l'amorçement de la corrosion localisée dans le matériau.
- La dureté et la résistance à la traction du papier d'aluminium d'emballage du fromage est légèrement différente de la dureté du papier d'emballage du médicament.
- Après 5 jours de contact avec du fromage fondu en corrosion libre, le papier d'emballage du fromage et du médicament semble subir une corrosion localisée dans certains endroits, mais la corrosion observée sur le papier d'aluminium d'emballage du fromage semble plus marquée que celle observée sur le papier médicament.
- L'imposition d'une tension 1.5 V amplifie la corrosion.
- La cinétique de la corrosion libre des deux papiers est différente
- Les potentiels de la corrosion sous une tension de 1.5 V des deux papiers est différent au cours des premières heures mais après 24 heures de corrosion convergent à la même valeur.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [1] R DEVELAY. Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium **corroyés .technique de l'ingénieur .M440.1992.**
- [2] C.VARGEL, « Corrosion de l'aluminium », Ed. Dunod, Paris 1999.
- [3] J.-L. VIGNES, T. DI COSTANZO Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Une vie d'aluminium Expériences de chimie sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau Vol. 91 ,1997 .
- [4] Denis Beaulieu, « les caractéristiques de l'aluminium structural » ; Québec : les presses de l'université Laval, 2002.
- [5] Jean BARRALIS – Gérard MAEDER, « Précis de métallurgie » ; Ed. Nathan 1997.
- [6] 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.
- [7] Michel Colombié et coll. "Matériaux Métalliques", édition DUNOD 2003.
- [8] C. VARGEL, « Comportement de d'aluminium et de ses alliages » ; Paris, Dunod ; 1979.
- [9] M. REDJAIMIA, thèse doctorat, Université De Biskra, les alliages d'aluminium, 1998.
- [10] E.LUMINITA, Thèse Doctorat, « Comportement à la corrosion des alliages D'Aluminium », Institut national des sciences appliquées, 2005.
- [11] Max REBOUL, « Corrosion des alliages d'aluminium », Technique de l'ingénieur, COR 325.
- [12] Rim KARBOUJ, thèse Doctorat « Transfert d'aluminium : Cas des matériaux pour contact alimentaire », École Française Papeterie et des Industries Graphiques. Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [13] Dieter Landolt, « corrosion et chimie de surfaces des métaux », Lausanne : presses Polytechniques et Université Romandes, 1997.
- [14] Bernard Pierraggi, "Oxydation des matériaux métalliques" Paris, LAVOIER, 2003
- [15] F.MIOMANDE, S.SADKI, P.AUDEBERT. « Electrochimie des concepts aux applications ». DUNOD, Paris 2005.
- [16] Loïc LACROIX, Thèse Doctorat « mécanismes de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie à force atomique (afm) couplée au mode kelvin (kfm) et des alliages modèles », Institut National Polytechnique de Toulouse 2008.