République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de Génie Mécanique

Mémoire

de Master 2

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN GENIE MECANIQUE
OPTION : SCIENCES DES MATERIAUX

Thème

Etude de l'effet de la concentration du sel de table sur la corrosion du papier aluminium d'emballage du fromage fondu

Proposé et rédigé par :

Mr : ZAZI.N

Réalisé par :

Melle : BOUKHERROUB HENIA

Remerciements

En premier lieu je remercie DIEU de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

D'abord, je tiens à remercier très sincèrement mon promoteur Monsieur ZAZI Nacer pour avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup d'attention et de disponibilité. Ce fut un réel plaisir de bénéficier à la fois de ses connaissances scientifiques et techniques mais aussi de ses qualités d'écoute et pédagogiques.

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

Je remercié également les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie également le personnel du département Génie Mécanique pour leur aide et leur encouragement.

Je remercie Monsieur KADDOUCHE SLIMANE, enseignant au département chimie Faculté des sciences exactes pour son aide.

Je tiens à remercier également les techniciennes des laboratoires chimie (électrochimie et cinétique) pour leurs services et patience ainsi que pour leurs gentillesses.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma chère maman
- Mes sœurs
- Mon frère RAMZI
- Toute ma famille
- Et à ceux qui m’ont soutenu du près ou du loin

Sommaire

Chapitre I : L'aluminium et ses alliages **pages**

Introduction……...3

I.1. Propriétés de l'Aluminium et ses alliages……4

I.1.1. Structure atomique……4

I.1.2. Isotopes de l'aluminium ……4

I.1.3. Effets des additions et des impuretés ……4

I.1.4. Point d'ébullition 4

I.1.5. Masse volumique.....4

I.1.6. Propriétés optiques 4

I.1.7. Propriétés mécaniques 5

I.1.8. Propriétés chimiques.....5

I.2. Fabrication de l'Aluminium et ses alliages.....5

I.2.1.0Minerai 5

I.2.2. Production d'alumine 5

I.2.3. Production de l'aluminium 6

I.2.4. Le laminage 6

I.3. les atouts de l'Aluminium et ses alliages 6

I.3.1. Légèreté 6

I.3.2. Conductivité électrique 7

I.3.3. Tenue à la corrosion 7

I.3.4. Aptitude aux traitements de surface 7

I.3.5. Diversité des alliages d'aluminium 8

I.3.6. Recyclage 8

I.3.7. Facilité de mise en œuvre 8

I.4. Classification des alliages d'Aluminium 9

I.4.1. Les alliages de moulages 9

I.4.2. Les alliages de corroyages 9

I.4.2.1. Alliages avec durcissement structural 9

I.4.2.2. Alliages sans durcissement structural……..……9

I.5. Désignation des alliages d'Aluminium 10

I.6. Corrosion de l'Aluminium et ses alliages.....11

I.6.1. Facteurs de la corrosion.....11

- Le milieu 11
- Le métal 11
  - La composition des alliages.....11
  - Le mode d'élaboration et de transformation.....12
  - Les traitements thermiques.....12
  - L'état de surface.....12
- Facteurs liés aux conditions d'emploi.....12

I.6.2.Rôle du film d'oxyde 12

I.6.3. Comportement de l'Aluminium en solution aqueuse …….13

I.6.4. Définition d'une électrode.....13

I.6.5 Tension de l'électrode à l'équilibre.....13

I.6.6. Evolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion équation de NERST.....14

I.6.7. L'état de polarisation des métaux 14

I.6.8. Courbe de polarisation 15

I.7. Différentes formes de corrosion.....15

I.7.1. Corrosion uniforme ……..…15

I.7.2. Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse) …….15

I.7.3. Corrosion par piqûres ……..16

I.7.4. Corrosion trans ou intercristalline …….....17

I.7.5. Corrosion feuilletante …….....18

I.7.6. Corrosion sous contrainte ……...18

I.7.7. Corrosion filiforme …….……18

I.7.8. Corrosion érosion ……19

I.7.9. La corrosion bactériologique …..... 19

I.7.10. La corrosion galvanique ……19

I.8. L'utilisation domestique de l'aluminium……20

I.8.1. Le papier aluminium ……...……21

I.8.2. Aluminium et toxicité ……21

I.8.3. Classification de l'aluminium et ses alliages en fonction de leur utilisation dans le domaine alimentaire……..……21

Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique ……21

→ Contact de longue durée et à usage unique

Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique…….21

→ Contact de courte durée et à usage répétitif

Aluminium ou alliage non revêtu …….21

→ Contact de durée variable et à usage unique

Aluminium ou alliage non revêtu éventuellement anodisé……22

→ Contact de durée variable et à Usage répétitif

I.8.4. Application de l'Aluminium dans le domaine d'emballage……22

I.8.4.1. Emballages rigides ……22

I.8.4.2. Emballages semi-rigides …….....22

I.8.4.3. Emballages souples……22

I.8.4.4. Utilisation du papier aluminium en fromagerie …….……22

I.9. influence du PH sur la corrosion de l'Aluminium ……....23

I.9.1. Définition de pH (potentiel hydrogène) ……..23

I.9.2. Influence du pH de la solution sur la vitesse de dissolution du film d'oxyde d'Aluminium…….23

I.9.3. Diagramme de POURBAIX ……..……24

I.10. Rôle du Cl^- dans la corrosion de l'Aluminium ……..25

I.10.1 Les chlorures ……...……26

I.10.2. Chlorure de sodium……..……26

I.10.3. Application de l'Aluminium en présence de chlorures de sodium NaCl …...27

I.10.4. La salinité ……...27

Chapitre II : Techniques expérimentales ……...29

II.1. Prélèvement des échantillons…….29

II.2. Préparation des échantillons pour la mesure de la résistivité ……...29

II.3. Préparation des électrodes de travail…….30

II.4. Préparation de l'électrode de référence pour les essais de la corrosion libre …...31

II.5. Préparation des solutions ……..31

II.6. Mesure de pH des solutions ……..31

II.7. Mesure de la résistivité des solutions ……...32

II.8. Montage pour l'essai de corrosion libre ……33

II.8.1. En absence du champ magnétique …….33

II.8.2 En présence du champ magnétique …….34

II.9. Préparation des échantillons pour l'observation au microscope optique et au microscope électronique à balayage …….35

II.9.1. Microscope optique ……35

II.9.2. Fonctionnement du microscope optique…….36

II.9.3. Microscope électronique à balayage (MEB)…….....37

II.10. Essai de micro dureté Vickers……38

Chapitre III. Résultats et discussion……...40

III.1. Evolution de la morphologie de la corrosion du papier aluminium d'emballage du fromage en fonction de la concentration de la solution corrosive en sel de table (NaCl)……40

III.2. Cinétique de la corrosion (potentiel libre de corrosion) du papier d'aluminium d'emballage du fromage en fonction de la concentration de la solution corrosive en sel de table (NaCl) ……..56

Conclusion ……..….***69***

Liste les tableaux :

Tableau. III.1 : pH des solutions de sel de table.

Tableau. III. 2 : Dureté Vickers et résistivité électrique des échantillons utilisés par les entreprises 1, 2,3.

Tableau.III.3 : résistivité des solutions utilisées.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Corrosion par piqure (a) morphologie de corrosion par piqûre, (b) Mécanisme de corrosion par piqûre.

Figure I.2 : Corrosion Trans et inter granulaire et Corrosion feuilletante

Figure I.3 : Corrosion galvanique dans les alliages A-U4G

Figure I.4 : Vitesse de corrosion de l'aluminium et fonction du pH et de la nature des espèces dissoutes en solution

Figure I.5 : Diagramme de POURBAIX (E-pH) de l'aluminium

Figure I.6. Structure cristalline de NaCl

Chapitre II :

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

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

Figure II.3. Schéma d'un pH-mètre

Figure II.4. Schéma d'un conductivimètre

Figure II.5. Montage pour la corrosion libre

Figure II.6 : l'électrode d'aluminium en présence d'un faible champ magnétique

Figure II.7 : Aimant utilisé

Figure II. 8. Principe de fonctionnement d'un microscope optique

Fig. II. 9 : Schéma d'un microscope métallographique.

Figure II.10. Microscope électronique à balayage
Figure II.11 : Principe de l'essai Vickers.
Figure II.12. Schéma d'un microduromètre

Chapitre III :

Figure.III.1 : Microstructure du papier d'emballage du formage fondu produit par l'entreprise 1

Figure.III.2 : Examen au microscope électronique à balayage de l'alliage utilisé par l'entreprise 1 pour emballé le fromage fondu

FigureIII.3 : Microstructure du papier d'emballage du formage fondu produit par l'entreprise2

Figure.III.4 : Examen au microscope électronique à balayage de l'alliage utilisé par l'entreprise 2 pour emballé le fromage fondu

Figure.III.5 : Microstructure du papier d'emballage du formage fondu produit par l'entreprise 3

Figure.III.6 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400

Figure.III.7 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 90g/l de NaCl

Figure.III.8 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=400, (b) G=200

Figure.III.9 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 90g/l de NaCl.

Figure.III.10 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400.

Figure.III.11 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 90g/l de NaCl.

Figure.III.12 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

Figure.III.13 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 60g/l de NaCl.

Figure.III.14 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400.

Figure.III.15 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 60g/l de NaCl.

Figure.III.16 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=200.

Figure.III.17 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 60g/l de NaCl.

Figure.III.18 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

Figure.III.19 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 30g/l de NaCl

Figure.III.20 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

Figure.III.21 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

Figure.III.22 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 5g/l de NaCl, (a) G=40, (b) 100, (c) G=400

Figure.III.23 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 5g/l de NaCl.

Figure.III.24 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 5g/l de NaCl , (a) G=40, (b) 100, (c) G=400

Figure.III.25 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 5g/l de NaCl.

Figure.III.26 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 5g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages , (b) 100, (c) G=400.

Figure.III.27 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 5g/l de NaCl

Figure.III.28 : 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

Figure.III.29 : 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

Figure.III.30: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

Figure.III.31: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 1

Figure.III.32: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de 60g/l en présence d'un faible champ magnétique.

Figure.III.33: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de 60g/l en présence d'un faible champ magnétique.

Figure.III.34: 1année de corrosion du papier d'emballage en aluminium du fromage dans une solution de NaCl de 3g/l.

Figure.III.35 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l.

Figure.III.36 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 30g/l.

Figure.III.37 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 60g/l.

Figure.III.38 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de ◆ 5, ■ 30 et ●60g/l.

Figure.III.39 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 5 g/l.

Figure.III.40 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 30 g/l.

Figure.III.41 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l.

Figure.III.42 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de ■ 5, ◆ 30 et ●60 g/l.

Figure.III.43 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 5 g/l.

Figure.III.44 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 30 g/l.

Figure.III.45 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l.

Figure.III.46 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ◆ 5, ■ 30 et ●60 g/l.

Figure.III.47 : Evolution de la résistivité en fonction de la concentration du sel de table

Figure.III.48: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide acétique.

Figure.III.49 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de ▲60 g/l + acide acétique, ●60g/l.

Figure.III.50: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide acétique.

Figure.III.51 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de ◆60 g/l + acide acétique, ●60g/l.

Figure.III.52: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide acétique.

Figure.III.53 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ◆60 g/l + acide acétique, ●60g/l.

Figure.III.54: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

Figure.III.55: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1dans une solution de sel de table de concentration de ◆5g/l en présence du champ magnétique ■ 5g/l en absence du champ magnétique.

Figure.III.56: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

Figure.III.57: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2dans une solution de sel de table de concentration de ◆5g/l en présence du champ magnétique ■ 5g/l en absence du champ magnétique.

Figure.III.58: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

Figure.III.59: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ■5g/l en présence du champ magnétique ■ ◆5g/l en absence du champ magnétique.

INTRODUCTION

La corrosion des métaux CFC (tel que l'aluminium) est un mode d'endommagement structural difficile à modéliser. En effet, il implique l'interaction entre des paramètres chimiques et électrochimiques, liés à la nature du métal et du milieu, des paramètres caractéristiques de la structure macroscopique et microscopiques du métal, et des paramètres mécaniques liés à l'état de contraintes résiduelles ou appliquées à la surface du métal. Cette dégradation fait intervenir deux types de réactions opérant conjointement : des réactions anodiques impliquant des phénomènes de dissolution, passivation dépassivation, dissolution et repassivation. Au cours du cycle passivation dissolution il y a passage des atomes du métal dans la solution (dans notre cas passage de l'aluminium ou d'autres additions dans le fromage fondu), des réactions cathodiques impliquant les effets de l'hydrogène.

On croyait que les boîtes de conserve, boîtes de boisson, **feuille mince en aluminium** n'était pas toxiques, ils sont facile à mettre en forme, ils ont une bonne résistance à la corrosion et peuvent être recyclé économiquement. Pour ces raisons l'aluminium est très utilisé pour la fabrication des boîtes boissons, beaucoup de produits sont enveloppés dans la **feuille mince d'aluminium** avec ou sans papier (aluminium ménager, beurre, cigarettes, chocolat...).

L'objectif de notre travail est d'étudier l'évolution du phénomène de corrosion (la morphologie et la cinétique) du papier aluminium d'emballage du fromage fondu en fonction du temps. De comparer la susceptibilité à la corrosion de trois papiers d'emballage, de trois entreprises différentes productrices du fromage fondu en Algérie. Pour ce faire, nous avons suivi le potentiel de la corrosion libre, dans plusieurs solutions composées de l'eau distillée associé au sel de table riche en NaCl, comparable à la quantité de chlorure de sodium alimentaire (sel de table) variable contenu dans le fromage

fondu, en absence et en présence d'un champ magnétique de faible intensité produit par un petit aimant collé sur la surface de l'échantillon. Nous avons suivi la morphologie et la cinétique de corrosion des différents papiers, dans plusieurs solutions de sel de table à (5g/l, 30g/l,60g/l, 90g/l) , par microscopie optique et microscopie électronique à balayage. Nous avons mesuré la microdureté et résistivité électrique des différents papiers. Le même travail a été fait dans une solution de 60g/l NaCl additionné à l'acide citrique donnant une solution acide de pH égal à 5,5 représentants un pH proche de celui du fromage fondu. Nous avons mesuré la résistivité électrique des différentes solutions.

La microscopie optique, électronique à balayage, microdurété, mesure de résistivités électriques ainsi que les techniques électrochimiques potentiostatiques ont été utilisés pour la caractérisation du papier d'aluminium avant et après immersion dans les solutions suscitées.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

- Chapitre I : Aluminium et ses alliages
- Chapitre II : Procédures et Techniques expérimentales
- Chapitre III : résultats et discussion

Les résultats sont synthétisés par une conclusion générale.

Chapitre I : L'aluminium et ses alliages

Introduction :

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis 1854 symbolisée par la présentation à l'Académie des Sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie **chimique**. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis.

L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux ; en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans les années 1950.

La production mondiale annuelle de métal « primaire » franchira les 25 millions de tonnes au cours de la première décennie du XXIe siècle.

La consommation mondiale annuelle d'aluminium franchira les 40 millions de tonnes dont 15 millions de métal recyclé.

Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'aluminium : légèreté, ténacité, une excellente résistant à la corrosion, une bonne conductibilité de la chaleur et de l'électricité; les alliages d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation : par déformations (laminage, filage, matriçage…etc.), par moulage…etc. Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage (emballage alimentaire), bâtiment, électricité, mécanique…etc.

L'aluminium et ses alliages renferment des impuretés telles le fer qui lui confèrent une susceptibilité à la corrosion localisée, celle-ci permette la dissolution de l'aluminium.

La dissolution de l'aluminium d'emballage alimentaire est nuisible pour la santé publique. [1]

I.1 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.1.1 Structure atomique :

L'aluminium pur possède un symbole chimique Al, a pour numéro atomique Z= 13 lequel correspondant à 13 électrons.

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

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

I.1.2. 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%).

Structure cristalline :

L'aluminium est un métal de structure cristalline cubique à faces centrées (CFC), quel que soit la température à l'état solide, de paramètre de maille a = 0,4049596 nm à la température ambiante. Son rayon atomique est $1{,}43 \times 10^{-10}$ m.

I.1.3. Effets des additions et des impuretés :

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

Le point de fusion de l'aluminium dépend de sa pureté. Il varie 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.1.4. 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.1.5. 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.1.6. 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.1.7.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.

- 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 de poison 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.1.8. Propriétés chimiques :

L'aluminium résiste bien à l'air et l'eau de mer (en particulier les alliages Al-Mg). Mais il résiste mal aux milieux acides (chlorhydriques, sulfurique) ou organiques. **[12]**

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

L'importance prise aujourd'hui par l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de toute une filière avec, en amont, le minerai et, en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis et finis.

I.2.1. Minerai :

L'aluminium est le troisième élément de l'écorce terrestre après l'oxygène et le silicium : il constitue 8 % de la lithosphère sous forme de silicates plus ou moins complexes à faible teneur en aluminium. Mais dans certaines régions, sous l'action prolongée de l'eau, l'élimination d'une partie importante de la silice a donné des roches riches en alumine (45% à 60 %), ce sont les bauxites qui constituent actuellement la source quasi exclusive d'aluminium.

I.2.2. Production d'alumine :

Le procédé utilisé pour obtenir l'alumine à partir de la bauxite est le procédé Bayer. Après broyage, la bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par de la soude, ce qui permet d'obtenir une liqueur d'aluminate de soude avec insolubles en suspension. Cette liqueur est ensuite décantée : les oxydes de fer et de silicium forment une boue rouge, chimiquement inerte, qui est évacuée vers un site de déversement approprié, la liqueur restante est envoyée

dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine, qui est ensuite récupérée par filtration et calcinée.

I.2.3. Production de l'aluminium :

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique. **[1]**

I.2.4. Le laminage :

Le laminage à chaud, entre 400°C et 500 °C, permet d'obtenir des **tôles** d'épaisseur supérieure à 2,5 mm. Par laminage à froid ultérieur, on obtient des tôles, bandes de plus faible épaisseur pouvant aller, dans le cas des feuilles minces, jusqu'à 0,01 mm.

La coulée continue permet d'obtenir directement des bandes d'épaisseur de 6 à 10mm et de largeur de 2 m à partir du métal liquide, ceci sans passer par l'intermédiaire des plaques et de leur laminage à chaud. **[2]**

I.3. Les atouts de l'Aluminium :

I.3.1. Légèreté :

La légèreté est l'un 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 /m^3, soit presque trois fois moindre que celle des aciers. Il constitue 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.

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 XIXème 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. **[1]**

I.3.2. 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 est utilisé dans les câbles téléphoniques, sous terrains et sous-marins. [2]

I.3.3. Tenue à la corrosion :

L'aluminium et les 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 du Louvre…) que pour les habitations individuelles. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de traitements de la surface, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps.

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

- d'une durée de vie des équipements accrue.
- d'un entretien facilité, même sans protection (ni peint, ni anodisé).
- d'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture. [2]

I.3.4. Aptitude aux traitements de surface :

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

La protection de certains alliages, quand leurs résistances mécaniques et à la corrosion «naturelle» est jugée insuffisante,

- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement,
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle,
- La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire. **[15]**

I.3.5. 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 se caractérisent par une faible résistance mécanique mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium, en plus ils ont une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage, en plus d'une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation [15].

I.3.6. Recyclage :

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

L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des (vieux métaux) montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles.

I.3.7. Facilité de mise en œuvre :

La mise en œuvre 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. [1]

I.4. Classification des alliages d'Aluminium :

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

I.4.1. Les alliages de moulages :

Produits obtenus directement par fonderie (par moulage).

I.4.2. Les alliages de corroyages :

Produits obtenus par les procédés de déformation plastiques à chaud ou à froid tel que le filage, le laminage. Ces demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique, architecture, électricité…..où ils sont assemblés par soudage, rivetage, visage,...etc.

I4.2.1. Alliages 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.

- 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. [8]

I.4.2.2. Alliages sans durcissement structural (alliages non trempent) :

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que (Al-Mn, AI-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. **[3]**

I.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 1à 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
  - 7xxx Zn, pour les alliages Al-Zn-Mg, avec une sous-famille Al-Zn-Mg-Cu ;
  - 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 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.

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. **[4]**

I.6. Corrosion de l'aluminium et ses alliages :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale…, milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être sévères.
La tenue à la corrosion est en effet un critère très important dans le choix d'un métal ou d'un alliage, dès lors que celui-ci est soumis à l'action de l'humidité, des intempéries, de l'eau, du milieu marin, d'une atmosphère industrielle,… Or elle dépend de plusieurs paramètres.

I.6.1. Facteurs de la corrosion :

I.6.1.1. Le milieu :

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

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

I.6.1.2. 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 les parties usinées d'une pièce de fonderie sont plus sensibles à la corrosion par piqûres que le reste de la surface non usinée.

- **Les traitements thermiques**

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

- **L'état de surface**

L'état de surface des pièces joue un rôle très important sur le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion, car la corrosion étant le résultat de l'action qui se développe à la surface du métal avec un liquide ou un gaz. Le degré de finition, les trous, les rayures servent souvent d'amorce à la corrosion qui se développe facilement.

I.6.1.3. 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.
- Les contacts avec d'autres métaux et d'autres matériaux.
- Les contraintes mécaniques.
- Les conditions d'entretien.

I.6.2. Rôle du 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, appelé « 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). **[1]**

I.6.3. Comportement de l'aluminium en solution aqueuse :

Les réactions fondamentales électrochimiques de la corrosion de l'Aluminium en milieu aqueux ont fait l'objet de plusieurs études. De manière simplifiée, l'oxydation de l'Aluminium dans l'eau a lieu suivant la réaction :

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3é$$

Cette réaction est équilibrée par une réduction simultanée des ions présents pour capter les électrons ainsi libérés. Dans les milieux aqueux habituels dont le pH est voisin de la neutralité : eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère, des considérations montrent que seulement deux réactions de réductions sont possibles :

- Réduction des protons H^+ :

$$3H^+ + 3é \rightarrow 3/2\ H_2$$

- Réduction de l'oxygène dissous dans l'eau :
  - En milieu alcalin ou neutre :

$$O_2 + 2\ H_2O + 4é \rightarrow 4OH^-$$

  - En milieu acide :

$$O_2 + 4H^+ + 4é \rightarrow 2\ H_2O$$

La réaction globale de la corrosion de l'Aluminium en milieu aqueux est la suivante :

$$Al + 3H^+ \rightarrow Al^{3+} + 3/2\ H_2$$

Ou bien :

$$Al + 3\ H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3/2\ H_2$$

La corrosion de l'Aluminium se traduit par la formation de l'alumine $Al(OH)_3$ qui est insoluble dans l'eau et se précipite sous forme de gel blanc. **[13]**

I.6.4. Définition d'une électrode :

Une électrode est un métal en contact avec une solution. **[3]**

I.6.5. Tension de l'électrode à l'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. **[11]**

I.6.6. Evolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion- équation de NERST:

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

Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence.
Egalement désigné par potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre, il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. En outre c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié.

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

Ce potentiel n'est pas caractéristique du métal. Il dépend des conditions expérimentales liées au milieu (nature, pH, température) et de l'état de surface du métal. Il correspond à un équilibre tel que les vitesses d'oxydation et de réduction du métal sont égales, c'est-à-dire, il n'y a pas de courant net traversant l'interface. **[10]**

I.6.7. L'état de polarisation des métaux : Lorsqu'un métal est immergé dans une solution, un courant se développe entre ses sites anodiques et cathodiques.

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

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

Dans le cas contraire où la polarisation de la cathode est plus difficile, alors l'anode se corrode davantage (polarisation contrôlée par l'anode). Ainsi, l'ampleur du phénomène de

corrosion galvanique ne dépend pas du potentiel de chacun des matériaux, mais plutôt liée à l'étendue de leur polarisation.

Dans les électrolytes à pH neutre, la cathode est habituellement plus fortement polarisée que l'anode. La réaction cathodique de réduction de l'oxygène contrôle alors l'étendue du phénomène de corrosion galvanique. **[7]**

I.6.8. Courbe de polarisation :

La courbe de polarisation est la courbe de variation de la densité du courant en fonction du potentiel imposé à partir des valeurs inférieure au potentiel de corrosion jusqu'à des valeurs supérieure au potentiel de corrosion. Cette courbe permet de déterminer le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation, le courant de la corrosion n'est pas déterminé à partir de la courbe de polarisation, ceci est dû à la présence de plusieurs phénomènes contrôlant la corrosion. **[3]**

I.7. Différentes formes de corrosion :

I.7.1. Corrosion uniforme :

Elle se traduit par une diminution régulière et uniforme de l'épaisseur sur toute la surface du métal. La vitesse de dissolution peut varier de quelques micromètres par an, dans un milieu non agressif, à plusieurs micromètres par heure selon la nature de l'acide ou de l'hydroxyde en solution.

On peut déterminer facilement la vitesse de corrosion généralisée par la mesure de la perte de poids ou par celle du dégagement d'hydrogène. **[1]**

I.7.2. Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse) :

On l'appelle aussi « corrosion sous dépôt ». Elle se développe dans les recoins, sous les dépôts, là où l'eau, ou l'humidité, pénètre et ne se renouvelle pas. La corrosion caverneuse de l'aluminium progresse généralement peu, sans doute à cause de la formation de l'alumine qui ferme rapidement l'entrée du recoin. On constate très souvent, lors du démontage d'un assemblage de tôles en aluminium rivetées ou vissées, ayant séjourné très longtemps dans l'eau, qu'il y a un dépôt continu d'alumine entre les deux tôles.

Il faut néanmoins éviter, autant que possible, de laisser dans les assemblages des recoins qui peuvent devenir des niches à la corrosion.

I.7.3. Corrosion par piqûres :

L'aluminium pur lutte naturellement contre la corrosion en se recouvrant d'une couche protectrice. Mais dans les alliages, les métaux ajoutés créent des micro-zones où la couche est moins protectrice. Ainsi des piqûres peuvent se former et atteindre dangereusement l'intérieur de l'alliage.

L'aluminium et ses alliages dont la résistance à la corrosion est liée à la présence d'une couche passive, sont sensibles à la corrosion par piqûres.

Ce type de corrosion est localisé. Ce sont des cavités qui se développent sur des sites où le film d'oxyde naturel suite à une fragilisation par les chlorures par exemple. Cette corrosion est provoquée par la présence de micropiles entre la matrice et les précipités, les grains et les joints des grains.

C'est dans les milieux aqueux, dont le pH est voisin de la neutralité, c'est-à-dire, en fait, tous les milieux naturels tels qu'eaux de distribution, eau de mer, que l'aluminium et ses alliages sont sensibles à la corrosion par piqûres, sous un potentiel de piqûration. **[13]**

Le mécanisme de la propagation des piqûres :

Le mécanisme de propagation est de nature électrochimique.

- Les piqures initiées continuent à se propager selon les deux réactions électrochimiques suivantes :

Oxydation à l'anode qui est le fond de la piqure : $2Al \rightarrow 3Al^{3+} + 3é$

Réduction de la cathode, qui est à l'extérieur de la piqure :

- Soit de l'eau : $2/3\ O2 + 3H2O \rightarrow 6OH^-$
- Soit de H+ : $2H^+ + 2é \rightarrow H_2$

- La formation d'ions OH^- ou la consommation d'ions H^+ aboutissent à créer localement un excès d'ions OH^-, donc un pH alcalin, tandis qu'au fond de la piqure l'aluminium continu sa dissolution en ions $Al^{3+,}$ donc il ya création d'un champ électrique qui fait déplacer des ions Cl^-, donc l'intérieur de la piqure est un milieu acide PH ‹ 3.
- Diffusion des ions Al^{3+} vers l'ouverture de la piqure où le milieu devient de plus en plus alcalin, il y aura précipitation d'hydroxyde $Al(OH_3)$ est se dépose sous forme de pustules blanches sur l'ouverture de la piqure.
- Ces pustules s'accumulent à l'ouverture de la piqure en forme de <<dôme de volcan>> ferme progressivement l'entrée la pique gênant ainsi les échanges ioniques.

Cela implique le ralentissement voire l'arrêt du processus de piquration. Donc la corrosion par piqure de l'aluminium est un phénomène discontinu.

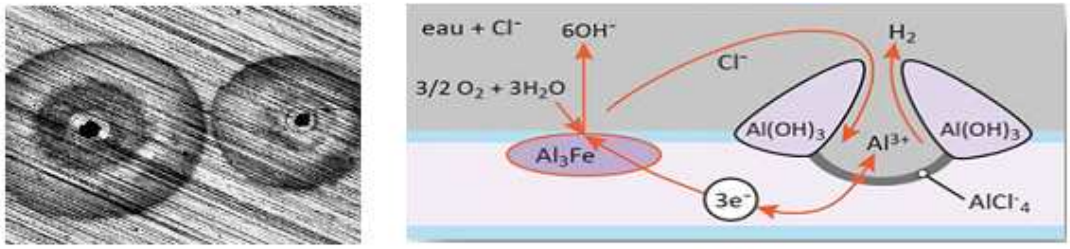


Figure I.1 : Corrosion par piqure (a) morphologie de corrosion par piqûre, (b) Mécanisme de corrosion par piqûre. [7]

I.7.4. Corrosion trans ou intercristalline :

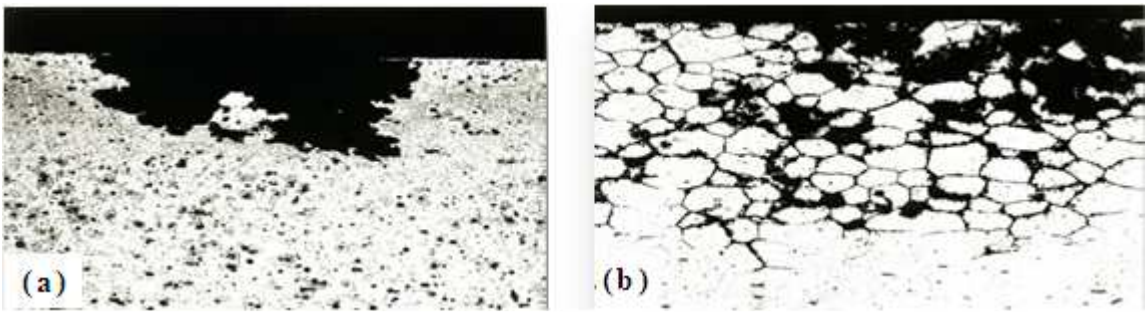
L'examen micrographique montre qu'une corrosion, liée à la structure du métal, peut se propager de deux manières différentes :

• elle progresse dans toutes les directions, c'est la corrosion transcristalline (Figure I.2.a) • elle emprunte un chemin préférentiel, le long des joints de grains, c'est la corrosion intercristalline 2 (Figure I.2.b).

C'est parce qu'il existe une différence de potentiel entre les joints et la masse du grain que la corrosion intercristalline progresse préférentiellement le long des joints de grains. Cette différence de potentiel est due à la présence dans le joint de grain, ou à la lisière, d'une précipitation continue de composés intermétalliques dont le potentiel de dissolution est différent de celui de la matrice.

La corrosion inter-cristalline peut entraîner une détérioration très conséquente des caractéristiques mécaniques, et provoquer la ruine de la structure si sa propagation est profonde.

Cette forme de corrosion concerne presque exclusivement les alliages à durcissement structural et plus particulièrement ceux des familles 2000 et 7000 quand, à la suite des traitements thermiques mal faits, ils sont sensibilisés par des précipitations incontrôlées aux joints de grains. C'est pourquoi les conditions de traitements thermiques sont si importantes et doivent être réglées en durée et en température pour éviter des états sensibilisés. **[1]**



Corrosion transcristallines Corrosion intercristalline

Figure I.2 : Corrosion Trans et inter granulaire **Corrosion feuilletante**

I.7.5. Corrosion feuilletante :

Ce type de corrosion se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du laminage ou du filage. Entre ces plans, subsistent des feuillets de métal inattaqué, très minces, qui sont repoussés de la surface du métal par le gonflement des produits de corrosion et s'en écartent comme les feuillets d'un livre, d'où le nom donné à cette forme de corrosion.

La corrosion feuilletante se produit sur du métal très écroui, ayant des grains très aplatis du fait du laminage ou du filage.

I.7.6. Corrosion sous contrainte :

L'expérience montre qu'une structure peut se rompre brutalement sous l'effet conjugué d'une contrainte (mécaniques, thermiques…etc.) et d'un milieu agressif et corrosif. C'est la corrosion sous contrainte. Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques, ceux des familles 2000 et 7000 peuvent être sensibles à la corrosion sous contrainte.

La résistance à la corrosion sous contrainte, pour les tôles épaisses, dépend de la direction d'application de la contrainte. [15]

I.7.7. Corrosion filiforme :

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

de filaments étroits de 0,1 à 0,5 mm de largeur et de quelques millimètres de longueur qui se propagent à l'interface métal-peinture. **[2]**

I.7.8. Corrosion érosion :

Le déplacement rapide d'un fluide sur la surface métallique peut conduire à des dégradations ou des ruptures très rapides comparées à celles qui se produisent si le fluide restait immobile. Une circulation rapide accélère généralement la dissolution des matériaux métalliques, surtout lorsque le liquide est chargé de particules solides.

L'érosion –corrosion affecte l'ensemble des métaux et des alliages, particulièrement passivables et les métaux de faible dureté **[15].**

I.7.9. La corrosion bactériologique

La corrosion bactériologique d'un métal peut être due à :

- Des bactéries hétérotrophes qui exigent pour se développer une source organique de carbone. Elles sont capables d'assimiler de nombreuses substances organiques qu'elles transforment en gaz carbonique, en métabolite, acide organique, rejetés dans le milieu où prolifèrent les bactéries. Ce sont des modifications du milieu (et non les bactéries elles mêmes) qui sont à l'origine de la corrosion.
- Des bactéries autotrophes, capables de croître uniquement au dépend d'éléments minéraux, en tirant leur énergie de la réaction chimique ou lumineuse.

Toutes les bactéries consomme de l'oxygène d'où la formation d'une aération différentielle au sein du milieu corrosif.

Dans le cas de l'aluminium et ses alliages, le cas de la corrosion d'origine bactériologique le plus connu est celui des réservoirs de carburant d'avion à réaction. C'est en 1950 que l'armée américaine a observé pour la première fois la corrosion d'un réservoir d'avion à réaction. Des études ont monté que cette corrosion est due au développement dans le kérosène de la bactérie CLADOSPORIUM RESINAE. Ce type de corrosion n'est qu'un cas particulier de la corrosion électrochimique **[2].**

Cette corrosion peut être rencontrée sur les surfaces des papiers d'emballage en aluminium.

I.7.10. La corrosion galvanique :

De par sa position dans l'échelle des potentiels, l'aluminium et ses alliages sont plus électronégatifs que la plupart des métaux usuels : les aciers, les aciers inoxydables, les alliages cuivreux…etc.

Tous les processus de corrosion localisée sont contrôlés par un couplage galvanique qui va intervenir à différentes échelles. On montre que le rôle de la microstructure sur les processus de corrosion localisée, par exemple la sensibilité d'un précipité par rapport au reste de la matrice, peut être évalué et simulé en tenant compte des processus de couplage galvanique qui représente une corrosion galvanique. **[10]**

Dans le cas d'un matériau hétérogène de deux ou plusieurs éléments chimiques différents, chaque zone aura un comportement particulier dépendant des autres zones ; certaines zones seront anodes, d'autres seront cathodes dans le couplage. Vis à vis des réactions électrochimiques.

Phénomène de pile en court-circuit, qui peut se former dans les assemblages de métaux à potentiel électrochimique différent et mis en présence d'un électrolyte : humidité, eau, sels en dissolution…etc. Cette pile entraîne une corrosion qui induit la destruction progressive de l'élément le plus électronégatif voir figure … qui représente la corrosion galvanique dans les alliages A-U4G.

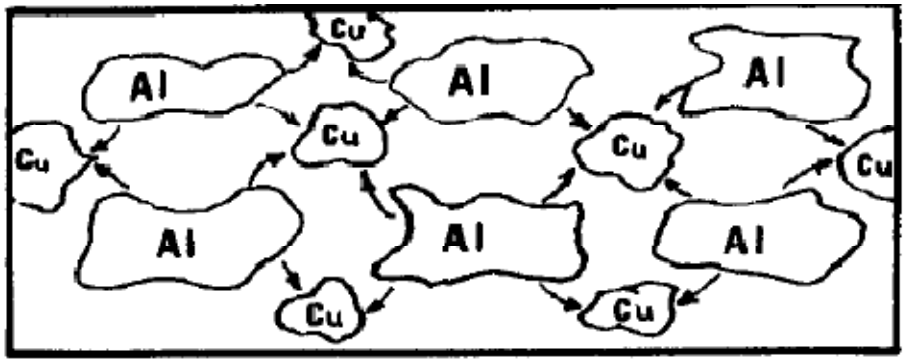


Figure I.3 : Corrosion galvanique dans les alliages A-U4G

Ainsi que nous l'avons mentionné, cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, et elle peut aussi provenir du milieu ou des conditions physicochimiques à l'interface.

I.8. L'utilisation domestique de l'aluminium :

L'Aluminium est omniprésent dans notre vie quotidienne, dans les traitements de l'eau du robinet, dans ceux des produits alimentaires, mais aussi ceux des produits d'hygiène, sans oublier les produits médicamenteux les plus courants (contre les maux d'estomac, les maux de tête,…etc.). **[19]**

I.8.1. Le papier aluminium :

Le papier et rouleau aluminium alimentaire est constitué exclusivement de métal d'aluminium, nous en possédons couramment dans nos cuisines. Il peut être constitué de l'aluminium à grande pureté et son épaisseur est de l'ordre de 0,02mm.

Sa grande flexibilité lui permet d'épouser pratiquement toutes les formes. Pour cette raison, l'agroalimentaire fait grand usage de ce produit : briques de lait et de jus de fruits, emballages, barquettes de plats préparés.

I.8.2. Aluminium et toxicité

Certaines maladies du système nerveux comme la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques, la maladie de Parkinson, mais aussi la fibromyalgie seraient favorisées par l'omniprésence de l'aluminium dans notre environnement quotidien. D'autres symptômes sont également imputés à l'aluminium : maux de tête, troubles de la mémoire, fatigue, troubles digestifs.

Au niveau osseux, l'aluminium empêcherait la bonne assimilation de certains éléments minéraux (calcium, phosphore, fluor). **[14]**

I.8.3. Classification de l'aluminium et ses alliages en fonction de leur utilisation dans le domaine alimentaire :

- Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique :

→ Contact de longue durée et à usage unique :

- Boîtes pour conserves appertisées
- Boîtes pour boisson
- Boîtiers sous pression
- Opercules produits laitiers vernis
- **Feuille mince pour fromage fondu**

- Aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique

→ Contact de courte durée et à usage répétitif :

- Ustensiles ménagers : casseroles, poêles, plats, gourdes.
- Appareils électroménagers de cuisson : autocuiseurs

- Aluminium ou alliage non revêtu

→ Contact de durée variable et à usage unique :

- Papier chocolat

- Aluminium ménager
- Barquettes
- Agrafes (saucisson)
- Plats
- Bagues (poulets)

➢ Aluminium ou alliage non revêtu éventuellement anodisé

→ Contact de durée variable et à Usage répétitif :

- Ustensiles ménagers : casseroles, plats, ustensiles.
- Équipements de l'industrie agro-alimentaire : fûts, citernes, tuyaux, surfaces de travail.**[6]**

I.8.4. Application de l'Aluminium dans le domaine d'emballage:

Les applications de l'aluminium dans l'emballage et le conditionnement se sont étendues à tous les marchés : alimentaire, cosmétologie, hygiène, pharmacie… ; sous les formes les plus variées telles que :

• Emballages rigides :

– Boîtes de conserve, alliages 3004, 3005, 5052 ;

– Boîtes pour boissons gazeuses (corps de boîte en alliage 3004, couvercles en alliage 5182) ;

– Capsules de bouchage, en alliages 3003, 3105, 8011 ;

– Aérosols, tubes, en alliage 1050 A.

• Emballages semi-rigides :

– Tubes pour dentifrice, crèmes… en alliage 1070 ;

– Aluplats, en alliage 3003…

• Emballages souples :

– Feuille mince, en alliages 8011, 8079 ;

– Surbouchage, en alliage 1200 ;

–Couvercles, pots de yaourts, emballages pharmaceutiques (feuille mince contrecollée). **[1]**

I.8.5. Utilisation du papier Aluminium en fromagerie :

La majorité des fromages sont emballés de minces feuilles en Aluminium ou un de ses alliages de corroyage. Dans notre présent travail, nous avons pris trois types de feuilles d'aluminium pour différents types de fromage du marché algérien.

I.9. Influence du PH sur la corrosion de l'Aluminium :

La tenue à la corrosion de l'aluminium et ses alliages est assurée par le film passif d'alumine. La destruction de cette couche dépend de la composition du milieu dans le quel l'aluminium est présent, la présence de chlorure favorise la rupture des couches d'oxyde. Cependant la valeur du pH favorise et influe sur la cinétique de corrosion de l'aluminium une fois la couche d'oxyde est fragilisée, ceci est dû à la valeur du potentiel que prend le métal en présence d'acide : a Ox + yH_3O^+ +né $\rightleftharpoons$ b red + XH_2O

$$\mathbf{E=E°+ (0,059/n) Log [OX]^a / [Red]^b - (0,059/n).y.pH}$$

Ou **(0,059/n).y.pH** représente le potentiel apparent

La valeur du potentiel du métal au cours du temps de corrosion contrôle la cinétique de corrosion.

I.9.1. Définition du pH (potentiel hydrogène) :

Le pH c'est le coefficient caractérisant l'état acide ou basique d'une solution aqueuse :

- Une solution est neutre si son pH est égal à 7
- Une solution est acide si son pH est inférieur à 7
- Une solution est basique si son pH est supérieur à 7

Le pH d'une solution est le Logarithme décimal de sa concentration en ions H^+ :

$$pH = -\log [H^+]$$

I.9.2. Influence du pH de la solution sur la vitesse de dissolution du film d'oxyde d'Aluminium :

La vitesse de dissolution de film d'oxyde d'Aluminium (alumine) dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et en milieu alcalin, ce qui correspond bien au caractère amphotère de l'oxyde d'aluminium, mais elle est faible, et à son minimum, dans les milieux proches de la neutralité de pH 5 à 9. Les eaux naturelles : de rivières, de sources, de pluie, de distribution, ont un pH généralement voisin de 7. L'eau de mer a un pH voisin de 8.

Le pH n'est pas le seul paramètre à prendre en considération pour prévoir la stabilité du film d'oxyde naturel en milieu aqueux : aux pH acides ou aux pH alcalins, la vitesse de dissolution de l'aluminium dépend également de la nature de l'acide ou de la base dissous dans l'eau ainsi que le montre la fiqure çi-dessous.

Pour deux solutions ayant des pH très voisins, elles ont des vitesses de dissolution très différentes. **[7]**

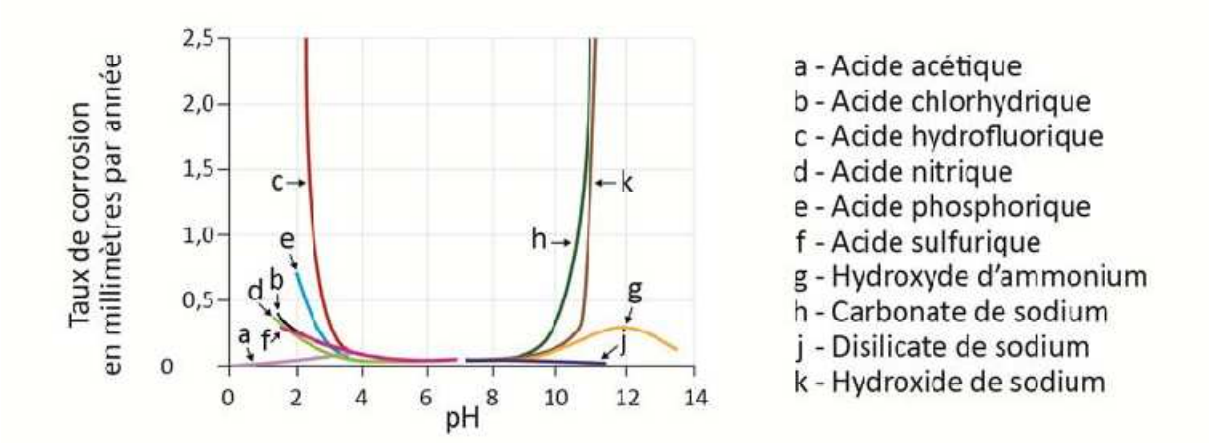


Figure I.4 : Vitesse de corrosion de l'aluminium et fonction du pH et de la nature des espèces dissoutes en solution [7]

I.9.3. Diagramme de POURBAIX :

Les nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques intervenant dans les phénomènes de corrosion dépendent du pH de la solution.

POURBAIX a établi des diagrammes potentiel-pH qui délimitent différents domaines dans lesquels il y a :

- **Corrosion :** le métal est corrodé, le produit de corrosion possède principalement une forme soluble.
- **Passivité :** le métal est susceptible de passiver. Le produit de corrosion est un solide insoluble susceptible de protéger le métal. La passivation du métal ne peut pas être observée si le produit solide de la corrosion n'isole pas parfaitement le métal du réactif.
- **Immunité :** le métal est stable vis-à-vis du réactif (aucune réaction n'est thermodynamiquernent possible).

Pour utiliser avec profit ces diagrammes, on doit bien connaître les conditions dans lesquelles ils sont valables. Ces diagrammes sont établis par le calcul, à partir de données de la thermodynamique, ils font intervenir toutes les réactions auxquelles peuvent participer tous les composés susceptibles de se former.

Le pH indiqué en abscisse des diagrammes est celui qui existe au contact de la surface métallique. Etant donné leur nature thermodynamique, ces diagrammes ne font intervenir aucune considération de cinétique. Ces diagrammes sont utilisés en particulier pour tout ce qui concerne la protection électrochimique de l'aluminium. **[13]**

Dans diagramme E-pH de l'aluminium on peut distinguer trois domaines : voir (figure I.5)

- **Domaine de corrosion :** Les formes d'oxydation du métal sont des ions (Al^{3+}, $Al(OH)^{4-}$).
- **Domaine de passivité :** Eventuellement les formes d'oxydation du métal sont des oxydes (Al_2O_3) ou l'alumine hydraté qui peuvent être protecteurs.
- **Domaine d'immunité :** La forme stable est l'aluminium plus précisément La concentration molaire volumique des ions en équilibres y est inférieure à une valeur déterminée.

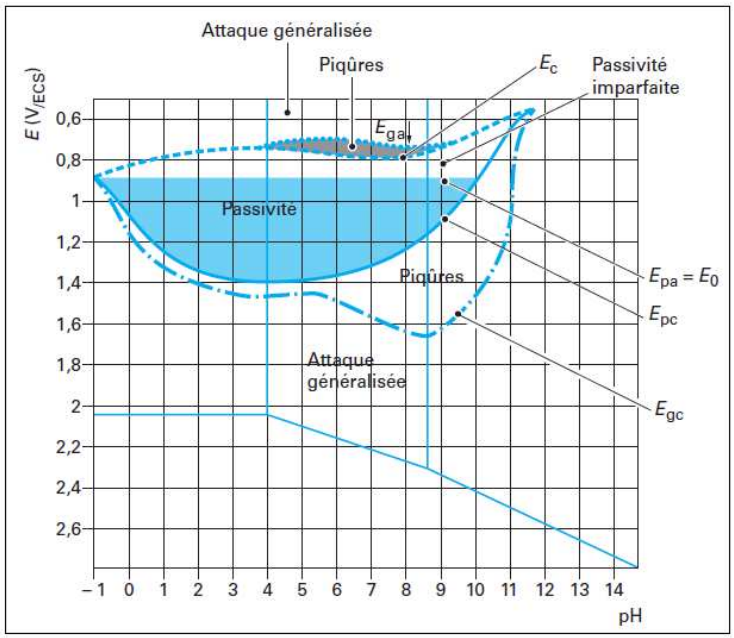


Figure I.5 : Diagramme de POURBAIX (E-pH) de l'aluminium

I.10 Rôle du Cl^- dans la corrosion de l'Aluminium

Les électrolytes sont les liquides qui conduisent le courant électrique. Ils possèdent des porteurs de charges libres : les ions.

On distingue les ions positifs (ou cations) et les ions négatifs (ou anions). Tout liquide étant électriquement neutre, le nombre des charges positives portées par l'ensemble des cations est égal au nombre des charges négatives portées par l'ensemble des anions. En l'absence de courant électrique les ions sont animés d'un mouvement d'agitation désordonnée. Lors du passage du courant électrique, ils sont animés d'un double mouvement d'ensemble : les ions positifs se déplacent dans le sens conventionnel du courant et les ions négatifs se déplacent en sens contraire. **[16]**

La conductibilité d'une solution ionique dépend :

- de la concentration des ions de la solution ;
- de la mobilité des ions.

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

I.10.1. Les chlorures :

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages dans un milieu aqueux. La nature de l'acide de la base ou des sels dissous a un rôle prépondérant.

Il est reconnu depuis 1930 que de tous les anions, ce sont les chlorures qui ont le plus grand pouvoir de pénétration du film d'oxyde naturel parce qu'ils sont petits et très mobiles. Leur dimension est proche de celle de l'oxygène.

Les chlorures sont très abondants dans la nature. Ils constituent les éléments fragilisant de la couche d'oxyde formée sur les métaux passivés.

Les chlorures se substituent aux atomes d'oxygène dans le réseau de l'alumine. Il en résulte une diminution de la résistance du film qui facilite le départ des atomes l'Aluminium. L'agressivité d'un milieu vis-à-vis des métaux en général et de l'Aluminium en particulier dépend pour beaucoup de sa teneur en chlorures.

I.10.2. Le chlorure de sodium :

- Données générales : Parmi tous les chlorures, le chlorure de sodium NaCl, le ''sel'', est le plus important en tonnage produit. Il est extrait par évaporation de l'eau de mer ou par extraction dans les mines de sel. Ses applications sont très nombreuses dans l'industrie agroalimentaire et l'industrie chimique **[17]**

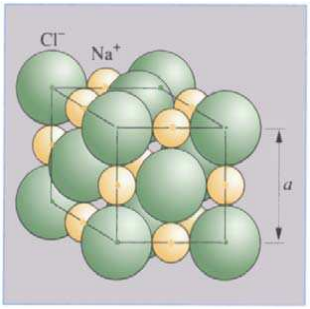


Figure I.6. Structure cristalline de NaCl

Propriétés physico-chimique : **[17]**

- Cristaux blancs, inodores, de saveur salée
- Structure cristalline : CFC
- Non explosif
- Non inflammable
- Température de fusion : 801° C
- Température d'ébullition : 1413° C
- Densité (H2O=1) à 25° C: 2,17
- Densité de vapeur : 0,1 kPa (1mm Hg°)
- Solubilité dans l'Eau : 360 g/L-1 à 20 ° C
- pH (50g/ L-1 d'eau à 20 ° C) ≈ 6

I.10.3. Application de l'Aluminium en présence de chlorures de sodium NaCl :

- En pratique, les applications des alliages d'Aluminium sont très nombreuses :

On les utilise dans l'industrie alimentaire : casseroles pour la cuisson des aliments dans de l'eau salée, titrant environ 10 g/l de NaCl, bacs dans les salaisons et les conserveries. L'Aluminium ne provoque aucune altération du goût ou de couleur des solutions salées.

- On les utilise dans les emballages alimentaires dans le but de les protéger et les conserver, comme l'emballage du fromage dont on va s'intéresser dans notre présent travail.

I.10.4. Salinité :

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées. Leur présence en solution aqueuse s'accompagne de deux effets complémentaires : d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu, et, d'autre part, le film passif d'alumine en surface du métal devient moins efficace car plus instable et donc plus susceptible de se rompre localement. Un autre effet de la salinité sur la corrosion résulte de son influence sur la conductivité du milieu aqueux. La résistivité du milieu corrosif limite la distance sur laquelle le couplage est effectif. Cependant, la forte conductivité des milieux salins tels que l'eau de mer (0,5 M NaCl) implique que la résistivité de l'électrolyte va jouer un rôle mineur dans la cinétique des réactions de corrosion. **[9]**

Chapitre II : Procédures et Techniques expérimentale :

Dans le présent chapitre nous présentons les opérations que nous avons effectuées et nous décrivons les procédures, les techniques et les équipements utilisés dans notre travail.

II.1. Prélèvement des échantillons :

Nous avons prélevé les échantillons de papier d'aluminium de plusieurs types de fromages fondus disponibles dans le marché algérien.

- De l'emballage du fromage en portion utilisé par l'entreprise (1).
- De l'emballage du fromage en portion utilisé par l'entreprise (2).
- De l'emballage du fromage en portion utilisé par l'entreprise (3).

II.2. Préparation des échantillons pour la mesure de la résistivité :

Pour caractériser un matériau sur sa capacité à laisser passer le courant on utilise la conductivité électrique. Pour déterminer la conductivité électrique il faut trouver la résistivité électrique, cette dernière est calculée à partir de la relation **(R=ρ.l/s)** représentant résistance électrique mesuré par le biais d'un multimètre à haute précision. L'inverse de la résistivité électrique représente la conductivité électrique.

La résistance d'un conducteur est proportionnelle à la longueur de celui-ci. En doublant la longueur d'un conducteur on double sa résistance électrique.
En augmentant la section d'un conducteur on diminue sa résistance électrique.

R : résistance en Ohm

l : Longueur en m

ρ : Résistivité électrique en Ohm. Mètre

s : Section du conducteur en m^2.

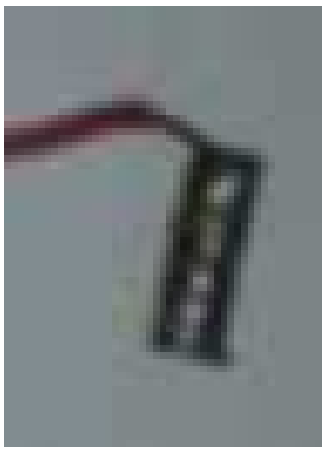
Afin de mesurer la résistivité de chaque type papier fromage, nous avons préparé un échantillon de 1.5cm x 3cm pour chaque type de papier fromage. Puis, à l'aide d'un multimètre nous avons mesuré la résistance aux extrémités de chaque échantillon, et à l'aide d'un pied à coulisse on mesure la longueur, la largeur et l'épaisseur des échantillons, pour calculer par la suite la résistivité des échantillons à 25^0C et à 0^0C.

II.3. Préparation des électrodes de travail:

L'électrode de travail constitué d'un conducteur électrique en cuivre de diamètre de 1.5mm assemblé avec l'échantillon (papier fromage) de dimension de1.5 x 3cm^2.

- **1ère Etape** : Dénuder les deux extrémités du fil de cuivre
- **2ème Etape** : Enroulement spirale d'une extrémité et remplissage des inters-spire par l'étain, afin de supprimé l'effet de l'inductance de la bobine et permettre le passage du courant sans perte (Figure 1).

(a)



(b)

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

- **3ème étape :** Mise en contact de la deuxième extrémité du conducteur avec l'échantillon et isolation du fil conducteur apparent et de la surface inutile de l'échantillon par un film adhésif en plastique.

  Pour les essais de corrosion, la surface de travail (S_C) est la même pour tous les échantillons :

  S_C =2.1,5.1cm^2=3 cm^2

Figure II.2 : 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 libre :

L'électrode de référence choisie pour les mesures lors de la corrosion libre est une électrode d'Ag/AgCl de potentiel standard $E°= 0,223V$.

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 devienne noir cette couleur et un signe de la formation d'une couche d'AgCl à la surface du fil d'argent.

II.5. Préparation des solutions :

Nous avons préparé Quatre solutions à différentes concentration de sel de table à base de NaCl :

- **Première solution** : Une solution de concentration 0,5% de sel de table riche en NaCl (5g de sel de table /litre).
- **Deuxième solution**: Une solution de concentration 3% de sel de table riche en NaCl (30g de sel de table /litre).
- **Troisième solution :** Une solution de concentration 6% de sel de table riche en NaCl (60g de sel de table /litre).
- **Quatrième solution** : Une solution de concentration 9 % de sel de table riche en NaCl (90 g de sel de table /litre).

II.6. Mesure de pH des solutions :

Après avoir préparé les quatre solutions, on mesure le pH de chaqu'une d'elles à l'aide d'un pH-mètre.

II.6.1. Fonctionnement du pH-mètre :

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

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

II.7. Mesure de la résistivité des solutions :

Dans le but de voir l'influence de la concentration de sel de table dans les solutions sur la résistivité des ces dernières, nous avons mesuré la conductivité de chaque solution à l'aide d'un conductivimétre. Puis on a calculé les résistivités des solutions à partir des conductivités mesurées par la relation :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

ρ:résistivité (Ω.m) ; σ : conductivité

Par ces résistivités, on trace la courbe de la résistivité en fonction de la concentration des solutions en NaCl.

Figure II.4. Schéma d'un conductivimètre

II.8. Montage pour l'essai de corrosion libre :

II.8.1. En absence du champ magnétique :

On a préparé quatre électrodes de travail pour chaque type de papier fromage (4x3) par série d'expérience, puis on les a immergés dans des récipients contenant les solutions à différentes concentration de sel de table riche en NaCl (0.5 %, 3%, 6% et 9%) et nous avons relié l'électrode immergée avec une électrode de référence Ag/AgCl. Nous avons mesuré le potentiel de corrosion libre par l'intermédiaire d'un millivoltmètre de marque DIGITAL (Figure II.5).

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

On a mesuré le courant et le potentiel de corrosion chaque demi-heure pendant plusieurs heures par jour, et cela pendant une semaine.

Figure II.5. Montage pour la corrosion libre

II.8.2. En présence du champ magnétique :

Après l'emballage des fromages dans du papier Aluminium, le fromage est conservé basses températures, dans des réfrigérateurs fonctionnant à l'électricité. Le moteur électrique du réfrigérateur induit un faible champ magnétique.

Pour voir l'effet du faible champ magnétique sur la corrosion du papier Aluminium d'emballage du fromage, nous avons préparé trois électrodes de travail, une électrode pour chaque type de papier d'emballage du fromage. Puis, nous avons collé sur ces électrodes un petit aimant de diamètre de 5mm (Figure II.4-5).

Figure II.6 : l'électrode d'aluminium en présence d'un faible champ magnétique

Figure II.7 : Aimant utilisé

On a immergé les trois électrodes dans des récipients contenant la même solution de concentration de 60g/l.

A l'aide d'un multimètre, on a relié chaque électrode de travail à l'électrode d'argent, puis on a suivi la variation du potentiel et de courant de corrosion pendant 7 jours.

II.9. Préparation des échantillons pour l'observation au microscope optique et au microscope électronique à balayage :

Le but de l'observation des échantillons pour différents types de fromage est de voir les microstructures des papiers Aluminium avant corrosion et après corrosion dans les solutions de différentes concentrations en sel de table riche en NaCl.

Les échantillons n'ont pas étaient polis ou attaqués.

II.9.1. 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'oculaires (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.

II.9.2. Fonctionnement du microscope optique

Un faisceau lumineux produit par une lampe. Un prisme dirige ce faisceau vers l'échantillon après d'être passé à travers une lame. L'échantillon est posé sue une platine ayant deux sens de translation, longitudinal et transversal. La lumière réfléchie par l'échantillon est renvoyée par une lame vers l'objectif qui permet la projection de l'image.

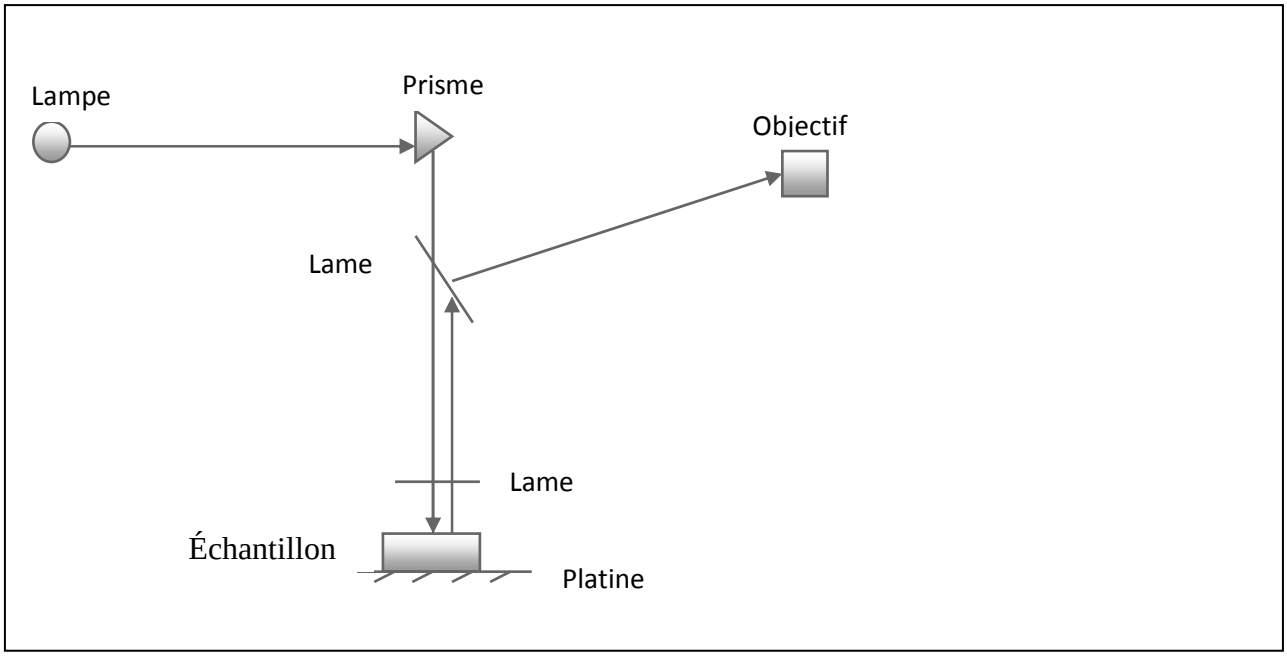


Figure II. 8. Principe de fonctionnement d'un microscope optique

Fig. II. 9 : Schéma d'un microscope métallographique.

II.9.3. Microscope électronique à balayage (MEB):

Le MEB permet d'observer des détails de surface relatifs aux cavités de corrosion. Les images sont formées point par point, du fait du balayage de la surface par le faisceau d'électrons. Les informations provenant de l'interaction « faisceau incident-matériau » sont transformées en signal électrique

Avec ce microscope, on peut obtenir des grossissements de 10 000 à 50 000 fois les dimensions réelles.

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.

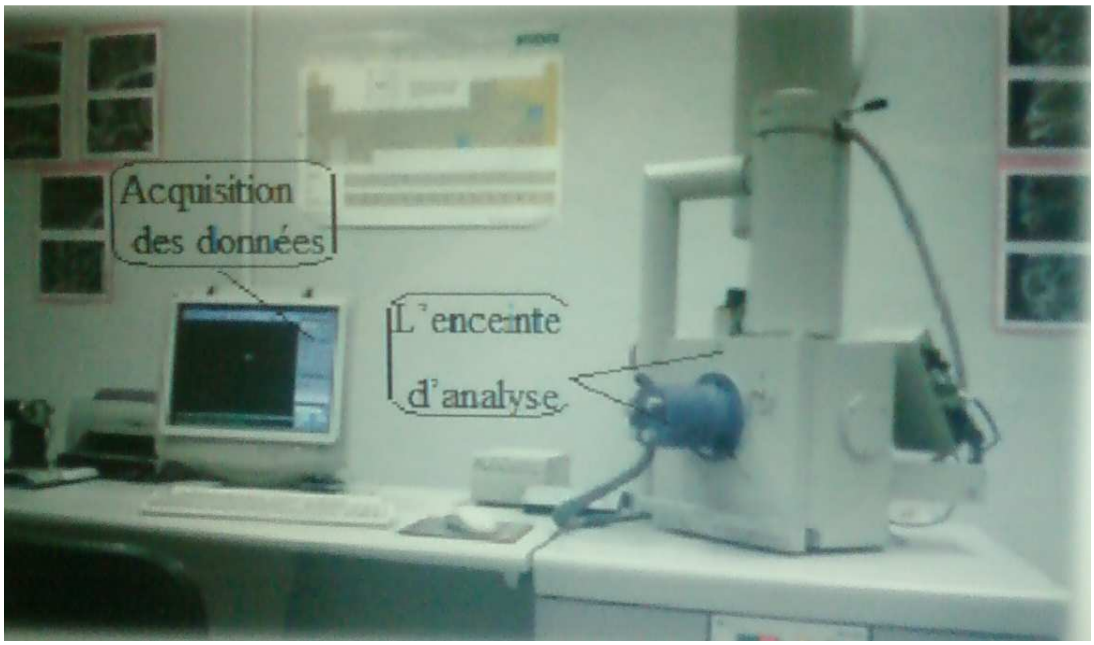


Figure II.10. Microscope électronique à balayage

II.10. 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. Nous avons utilisé le microduromètre de marque ZWICK, nous avons

effectué plusieurs essais pour chaque échantillon des trois types de fromages et nous avons appliqué une charge de 10g

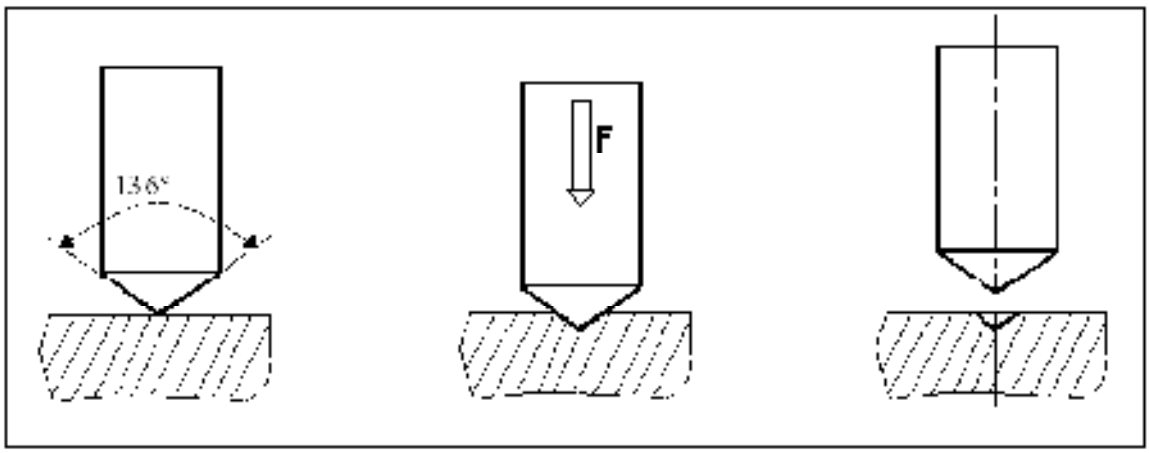


Figure II.11 : Principe de l'essai Vickers.

HV = F / S

$S = d^2 / (2.\sin A/2)$

$HV = 0{,}189\ F / d^2$

d : diagonale de l'empreinte en millimètres.

A : angle au sommet du pénétrateur : 136°.

F : charge d'essai en newtons, celle qu'on a appliquée est de 10 g.

Figure II.12. Schéma d'un microduromètre de marque ZWICK

Chapitre III : résultats et discussion

1. Evolution de la morphologie de la corrosion du papier d'aluminium d'emballage du fromage en fonction de la concentration de la solution corrosive en sel de table (NaCl) :

La macrographie et la micrographie constituent deux méthodes optiques d'examen direct de la surface des métaux. Elles présentent un grand intérêt, car elles fournissent à une échelle différente de nombreux renseignements, sur la texture et la structure des métaux et alliages corrodés et non corrodés. Elles sont utilisées dans tous les laboratoires de recherches et de contrôle. La microscopie électronique, maintenant d'un emploi 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 immersion, dans la solution de sel de table (NaCl) à différentes concentrations.

Les microstructures observées avant immersion des échantillons non polis des papiers d'emballages du fromage, utilisés par différentes entreprises de production du fromage fondu, sont distinctes.

On observe sur la (figure 1), utilisé par l'entreprise 1 de production de fromage fondu, la présence de deux phases en plus de la matrice en l'aluminium, ces phase ont un aspect de particules avec des formes et des tailles différentes, distribuées d'une façon hétérogène dans toute la surface de la microstructure, dans certains endroits. Il semble qu'un type de ces particules forment des rosettes (figure 1). Sur cette même figure on observe en plus, l'existence de quelques sillons multidirectionnels. De tous ces faits nous pouvons conclure que ce papier d'emballage d'aluminium est un alliage d'aluminium.

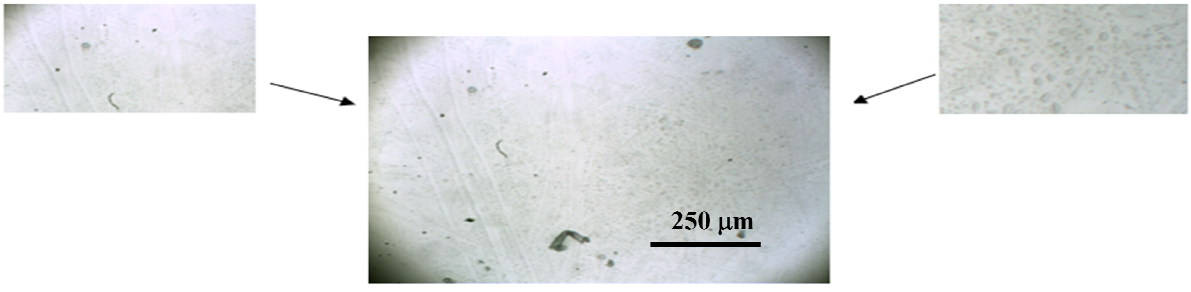


Figure.III.1 : Microstructure du papier d'emballage du fromage fondu utilisé par l'entreprise 1

La microscopie électronique à balayage (Figure 2) confirme l'existence les particules suscitées. Le premier type de particules est de couleur grise et l'autre est de couleur sombre. En plus des deux types de particules, on observe que dans certains endroits il ya des porosités, celles-ci sont probablement dues à l'arrachement d'un type ou des deux types de particules au cours des traitements de mise en forme.

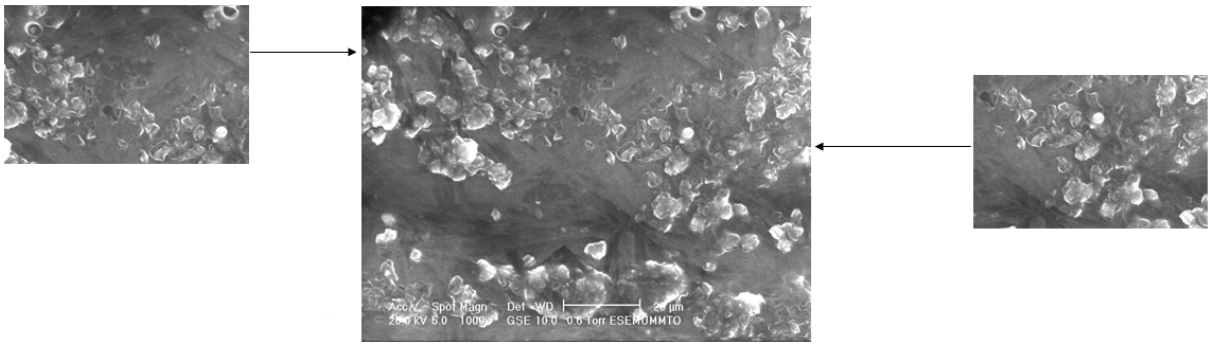
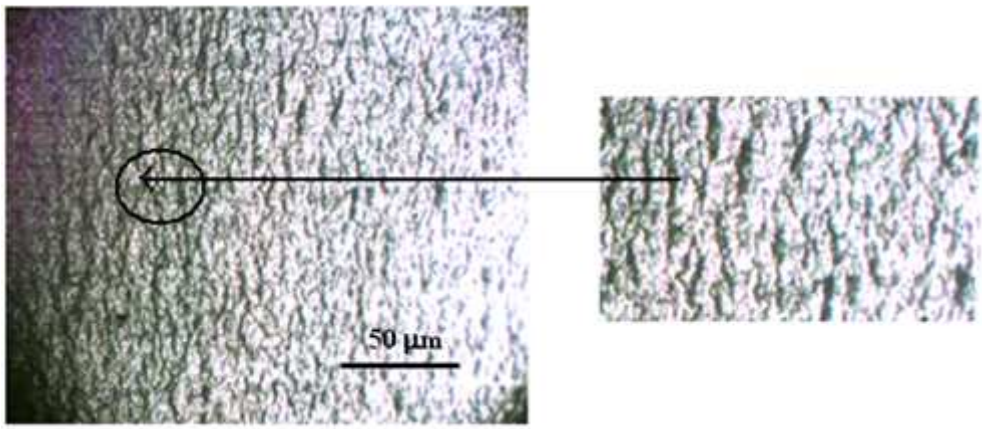


Figure.III.2 : Examen au microscope électronique à balayage de l'alliage utilisé par l'entreprise 1 pour emballé le fromage fondu

La figure 3 représentant la microstructure d'un autre échantillon utilisé par l'entreprise (2) de production de fromage fondu, montre une microstructure à grains allongées dans une seule direction, probablement celle-ci est la direction du laminage, une seconde phase est observée aux joints des grains, celle -ci peut être un type de précipité ou bien une corrosion inter granulaire, issue de la mise en service du papier fromage (Figure 3 (a)). Nous observons l'existence de sillons unidirectionnels peu visible, en raison de la couleur noire des particules de la seconde phase (Figure 3(b)).



(a)

(b)

Figure.III.3 : Microstructure du papier d'emballage du formage fondu produit par l'entreprise 2 :

(a) Observation d'une seconde phase au niveau des joints des grains.

(b) Observation des sillons unidirectionnels.

(La figure 4) de l'échantillon utilisé par l'entreprise 2 pour l'emballage du fromage fondu, représente une microstructure, prise par le microscope électronique à balayage du matériau après sa mise en service, cette figure montre que l'échantillon durant sa mise en service s'est corrodé déjà avant la date de péremption du produit emballé.

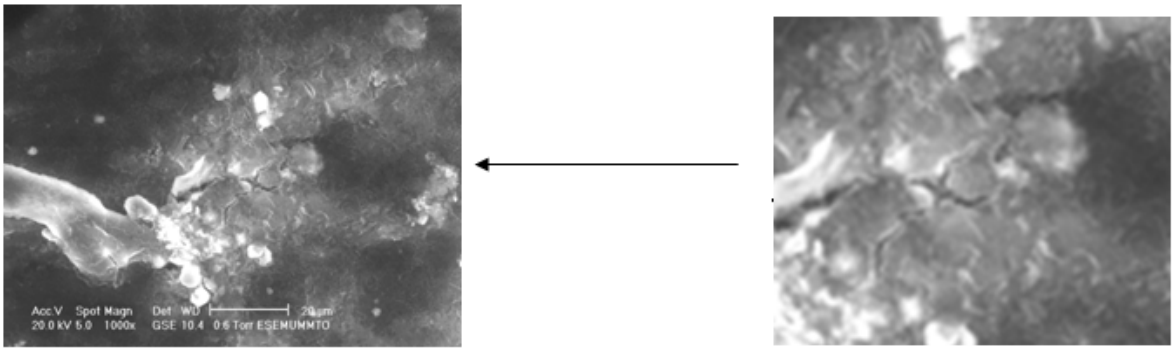
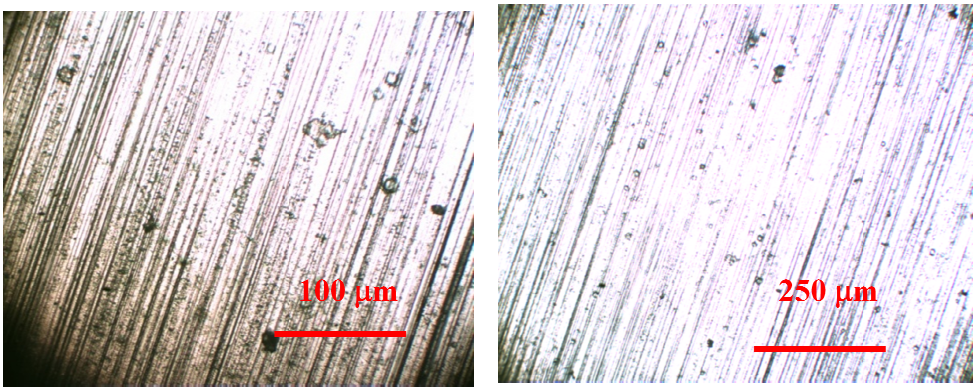


Figure.III.4 : Examen au microscope électronique à balayage de l'alliage utilisé par l'entreprise 2 pour emballé le fromage fondu

Sur (la figure 5) représentant le papier d'emballage du fromage fondu produit par l'entreprise 3, nous observons des sillons unidirectionnels visibles, sûrement ceux-ci représentent la direction du laminage, une fine phase secondaire distribuée dans la direction des sillons. La petite dimension de la seconde phase dans la direction du laminage, est probablement due à la fragmentation de cette dernière après déformation par laminage à froid.

L'existence de la seconde phase montre que le papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 est un alliage d'aluminium.



(a) (b)

Figure.III.5 : Microstructure du papier d'emballage du formage fondu produit par l'entreprise 3

Les trois échantillons sont susceptibles à la corrosion galvanique et intergranulaire, correspondant à la dissolution préférentielle des zones d'émergences telles que les joints des grains et les contours des particules de précipités présentes dans le matériau en immersion dans un milieu agressif. Cette corrosion est due essentiellement à la formation de micropiles entre les phases présentent au sein du matériau, les joints des grains et la phase mère. Ainsi la précipitation continue ou discontinue d'une autre phase au voisinage des joints des grains ou bien dans les grains peut entraîner, suivant la nature de l'environnement agressif, la dissolution préférentielle des précipités ou des zones au voisinage des joints des grains ou dans la matrice, ceci causera un appauvrissement en éléments constituant le matériau.

En plus de tous ça, supposant que l'alliage d'aluminium utilisé en emballage est constitué de métaux lourds, du moment où sa provenance est inconnue, c'est pour cette raison qu'une analyse de la composition chimique des papiers d'emballage alimentaire est obligatoire, car ces papiers peuvent être élaborés à partir des alliages d'aluminiums issues du recyclage des culasses…etc.

La mise en service de ce matériau, c.-à-d. son utilisation comme papier d'emballage du fromage, engendre un autre type de corrosion causée par des micro-organismes (bactéries) appelée biocorrosion, celle–ci est due à une formation d'une aération différentielle. La corrosion bactérienne rassemble tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissent directement, ou par l'intermédiaire de leur métabolisme, en créant les conditions favorables à

son établissement. Dans notre travail nous nous n'intéressant pas à ce type de corrosion mais nous avons jugé important de le signaler puisque le papier en question est utilisé pour l'emballage alimentaire.

La fragmentation et la dispersion des précipités suite à la déformation à froid par le laminage, lors de la mise en forme de ces différents papiers, implique l'existence d'un état assez élevé de contraintes internes. Cet état induit une augmentation de l'énergie libre et décroitra la noblesse et le potentiel standard de ces échantillons d'où l'accroissement de la susceptibilité à la corrosion sous contraintes.

La variation de la concentration du sel de table ajouté lors de la fabrication du fromages fondu produit d'une entreprise à une autre et au cours du temps, nous a imposé de faire des essais de corrosion à différentes concentrations de sel de table (5g/l, 30g/l, 60g/l, 90g/l).

Avant de commencer les essais de corrosion, nous avons mesuré le pH de ces solutions. (le tableau 1) ci-dessous résume les résultats de mesures.

Concentration du sel (g/l) dans la solution	5g/l	30g/l	60g/l	90g/l
pH de la solution	6.20	5.98	5.95	6.87

Tableau.III.1 : pH des solutions de sel de table.

Ces mesures montrent bien la constance du pH avec la variation de la concentration, le pH de toutes ces solutions est proche, pour une concentration de sel de table inférieure ou égale à 60g/l, par contre pour une concentration de 90g/l nous observons un accroissement considérable du pH.

L'augmentation de la concentration du sel de table, constitué essentiellement de NaCl, engendre un accroissement de la concentration d'ions Cl^-, agissant comme élément fragilisant de la couche d'oxyde et favorise la formation de porosités à la surface de la couche d'oxyde, ainsi les éléments corrosifs tels que l'oxygène et l'hydrogène trouveront le passage pour oxyder l'aluminium, et les autres éléments moins nobles constituants le substrat. S'il ya dissolution de l'aluminium, les atomes d'aluminium trouveront le passage à travers ces porosités pour passer dans la solution, dans le cas du papier d'emballage du fromage ils passeront dans le fromage.

Nous tenons à signaler que le pH du fromage fondu est de l'ordre de 5,5 à 5,7, donc le fromage fondu est acide. Pour approcher le pH de 5,5 correspondant à celui du fromage fondu nous avons préparé une solution à base du sel de table de concentration de 60g/l pour laquelle nous avons ajouté de l'acide citrique, constituant un acide alimentaire, jusqu'à ce que nous avons obtenu le pH de 5,5.

Huit jours de corrosion dans des solutions à différentes concentration de NaCl, a révélé une corrosion plus au moins profonde des échantillons étudiés :

L'échantillon utilisé par l'entreprise 1 a subi une corrosion localisée dans certaines régions, celles-ci sont probablement les zones de concentration des particules de précipités. Mais une question reste toujours posée : pourquoi certaines zones se corrodent et pas d'autres, la réponse à cette question peut comportée deux volés : le premiers volé concerne la distribution des particules de précipités car celles-ci ne sont pas distribuées d'une manière homogène, le second volé concerne l'hétérogénéité de la distribution des contraintes internes ou contraintes résiduelles. La forte corrosion observée dans certaines régions de ce papier, peut aussi être due à l'existence de rosettes de précipités dans la structure du matériau, celles-ci constituent des hétérogénéités de la surface induisant des micropiles (Figure 1).

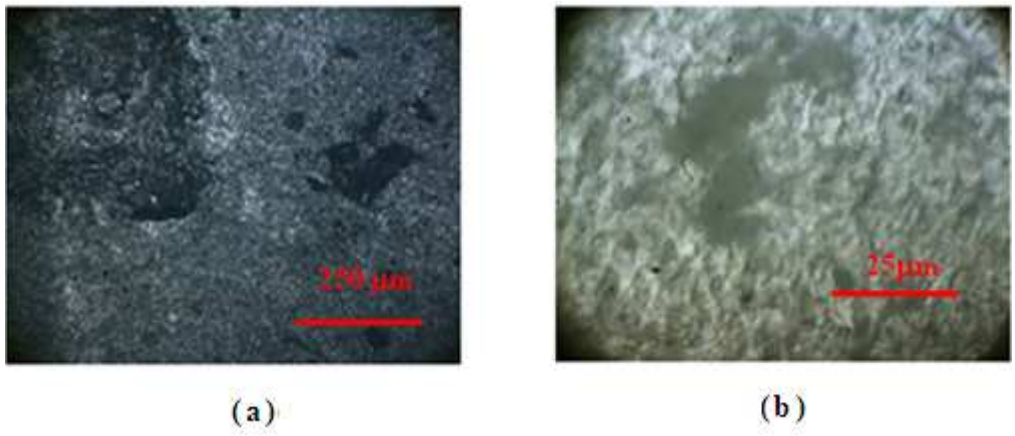


Figure.III.6 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400

La Figure 7 montre l'effet du chlore sur la couche d'oxyde, nous observons clairement sur cette figure des fissures sur la couche d'oxyde, ceci favorise la pénétration des éléments oxydant. De se fait l'oxydation et la dissolution du métal au dessous de la couche d'oxyde se produit.

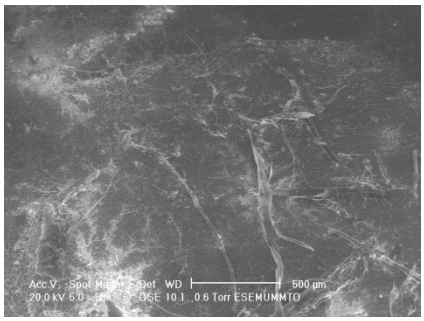


Figure.III.7 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 90g/l de NaCl

Par contre les échantillons utilisés par les entreprises 2 et 3 ont subi une corrosion localisée dans plusieurs endroits, cette corrosion est probablement une corrosion intergranulaire ou galvanique.

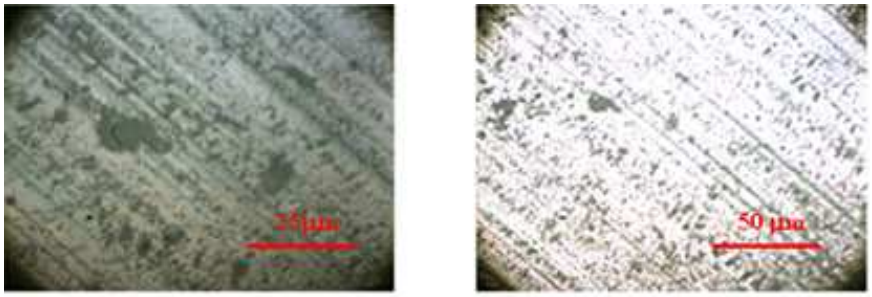


Figure.III.8 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=400, (b) G=200

La figure 9 montre bien l'effet du chlore sur la couche d'oxyde puisque nous observons des fissures dans plusieurs endroits et dans plusieurs directions.

Figure.III.9 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 90g/l de NaCl.

Sur la (Figure 10) obtenue après huit jours de corrosion dans une solution de sel de table de concentration de 90g/l du papier utilisé par l'entreprise 3, nous observons une corrosion par piqûre, ceci nous ramène à posé la question suivante : où passera l'oxyde

formé ? Dans le cas où le papier sert comme emballage de fromage, l'oxyde diffusera sûrement dans le fromage.

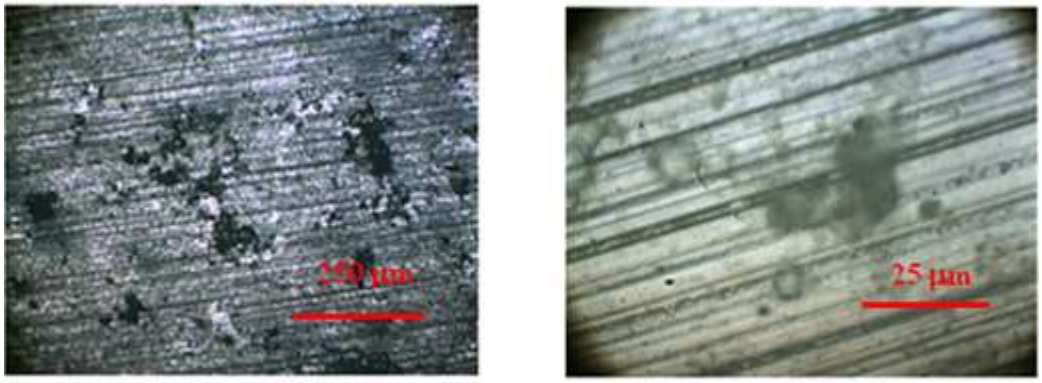


Figure.III.10 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 90g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400.

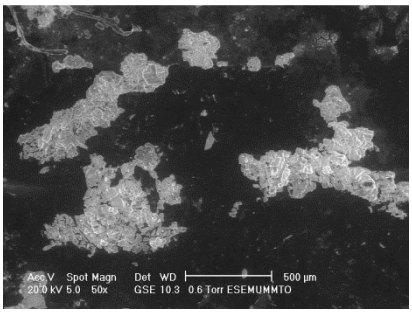
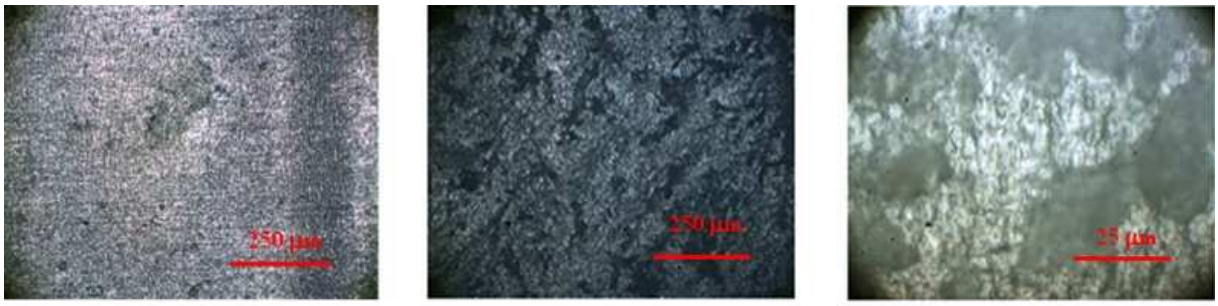


Figure.III.11 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 90g/l de NaCl.

Les figures (7, 9,11) montrent l'effet de l'attaque du Cl^- sur la couche protectrice, et la mise à nu de la surface dévoilent ainsi les différentes phases. De ce fait, l'augmentation de la dissolution de l'aluminium est probablement due à la forte adsorption du chlore, facilitant ainsi le passage de l'aluminium en ions (Al^{+3}) Figures (6-11).

Il est probable que la forte concentration de l'ion Cl^- ou son adsorption affecte les propriétés électroniques et ionique du film passif. Il est bien connu que les ions de Cl^- brisent localement la couche passive. Comme nous pouvons le remarquer dans les microstructures de Figure (12), la corrosion localisée prend naissances aux défauts de la couche d'oxyde et se propage suivant un mécanisme électrochimique. Nous pensons que la propagation électrochimique forme au fond du produit de corrosion localisée une solution acide de chlorure d'aluminium, ceci empêche la repassivation et fait propager la corrosion de façon autocatalytique. La forte corrosion observée dans certaines régions de ce papier est peut être due, à l'existence de rosettes de précipités dans la structure du matériau (Figure 1).



(a) (a) (b)

Figure.III.12 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

La figure 13 représentant la corrosion du papier d'aluminium dans une solution de sel de table de concentration de 60g/l, montre bien que la corrosion se produisant dans le cas du papier utilisé par l'entreprise 1 est une corrosion localisée par piqûres, ceci est représenté par les zones noires figurant sur la microstructure, nous observons la même chose sur les Figures (15 et 17).

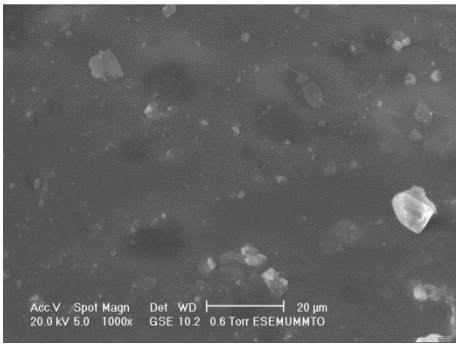
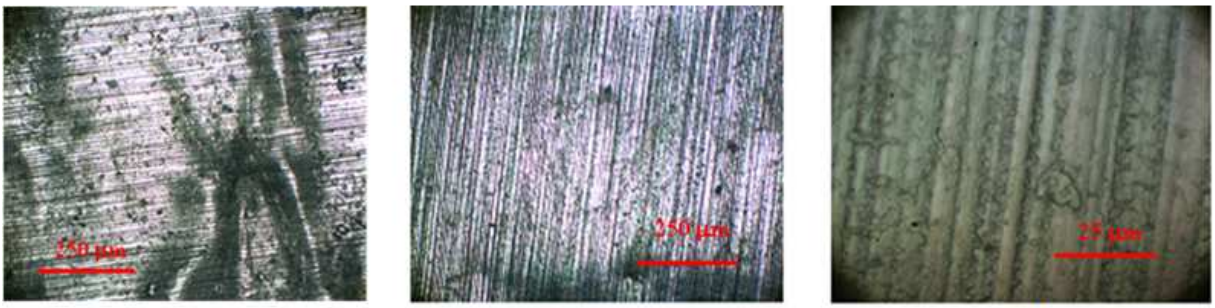


Figure.III.13 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 60g/l de NaCl.

La Figure 14 représentant la corrosion du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 60g/l. Ce papier se corrode dans certaines régions et pas dans d'autres, ceci est probablement dû à la distribution des contraintes internes et des précipités.



(a) (a) (b)

Figure.III.14 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40, (b) G=400.

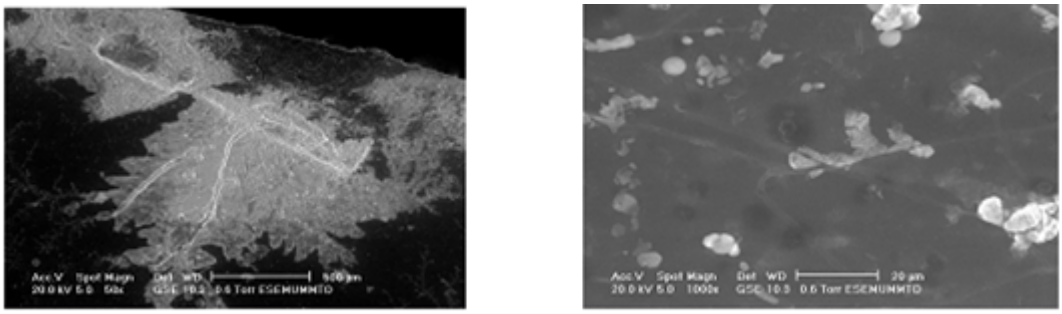
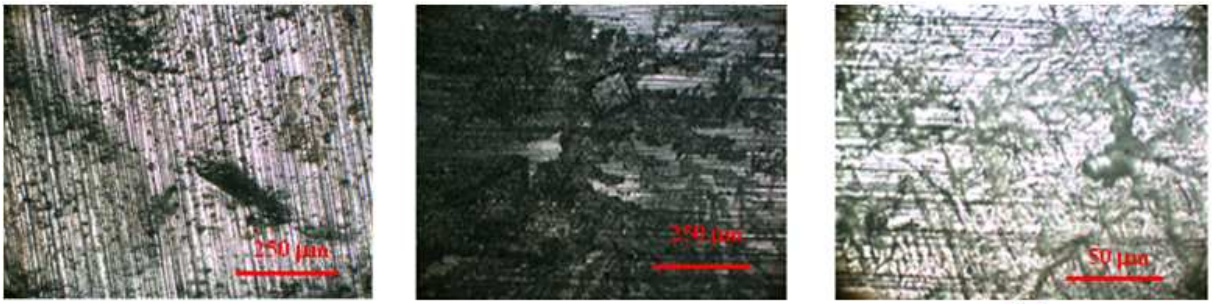


Figure.III.15 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 60g/l de NaCl.

La Figure 16 montre que le papier utilisé par l'entreprise 3 se corrode par piqûre, sur toute la surface du papier, après 8jours de corrosion dans une solution de 60g/l de sel de table.



(a) (a) (b)

Figure.III.16 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 60g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=200.

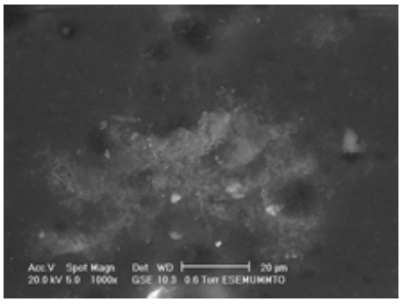


Figure.III.17 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 60g/l de NaCl.

Les Figures (18-27) montrent qu'une faible concentration de sel de table, induit une corrosion localisée pour les différents papiers d'emballage d'aluminium.

Figure.III.18 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

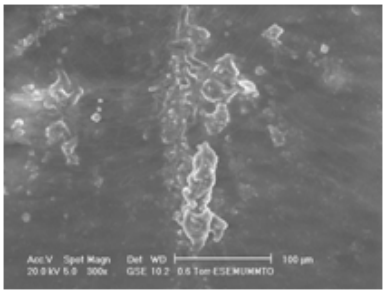


Figure.III.19 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 30g/l de NaCl

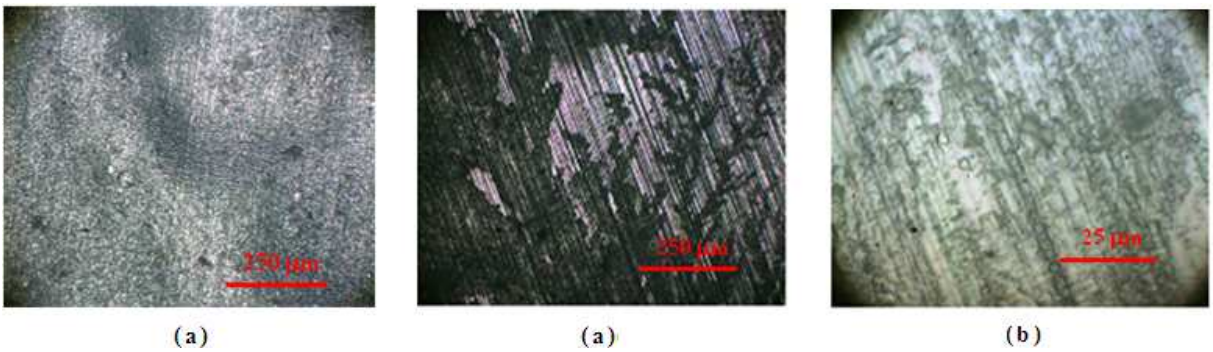


Figure.III.20 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

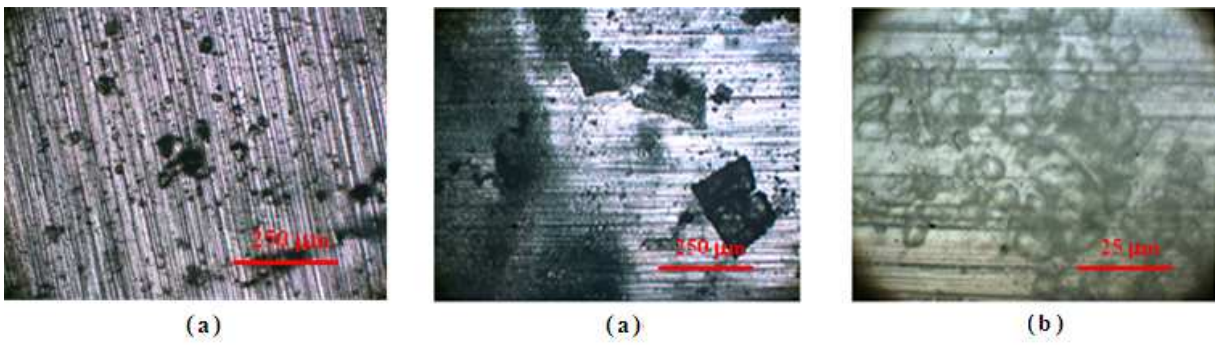


Figure.III.21 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 30g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages, (b) G=400.

Figure.III.22 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 5g/l de NaCl, (a) G=40, (b) 100, (c) G=400

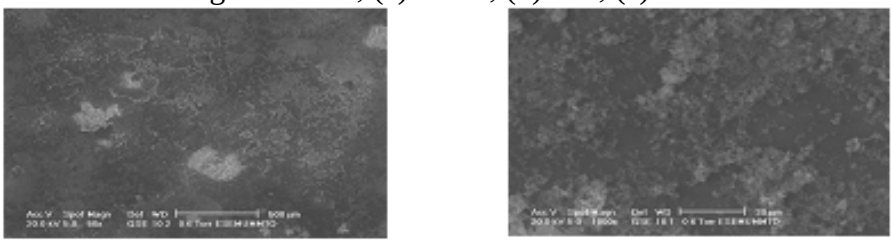


Figure.III.23 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de 5g/l de NaCl.

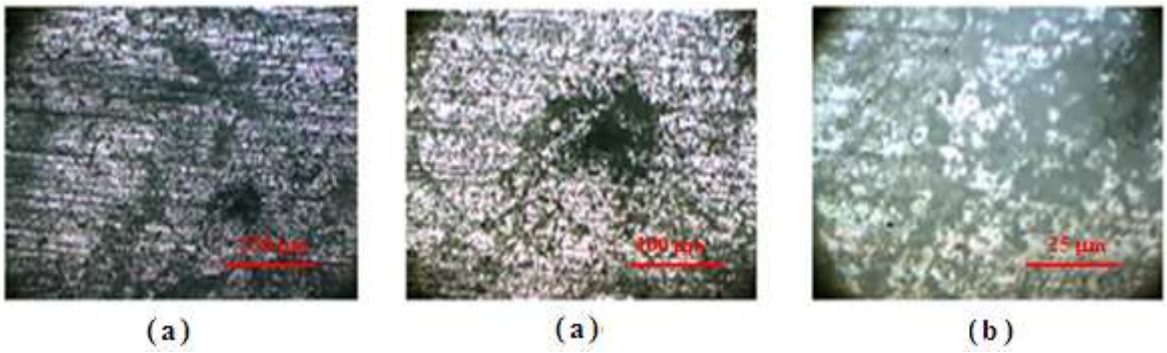


Figure.III.24 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 5g/l de NaCl , (a) G=40, (b) 100, (c) G=400

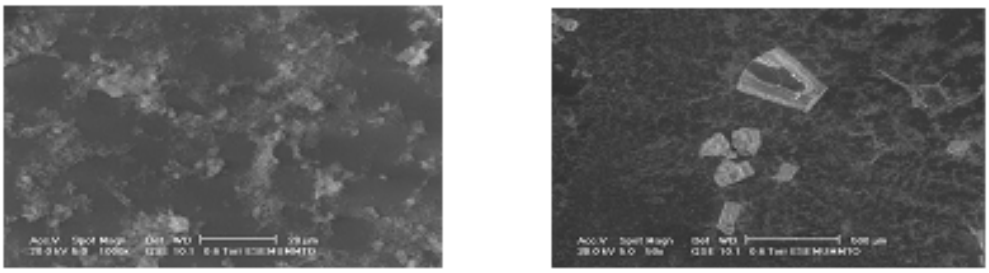


Figure.III.25 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de 5g/l de NaCl.

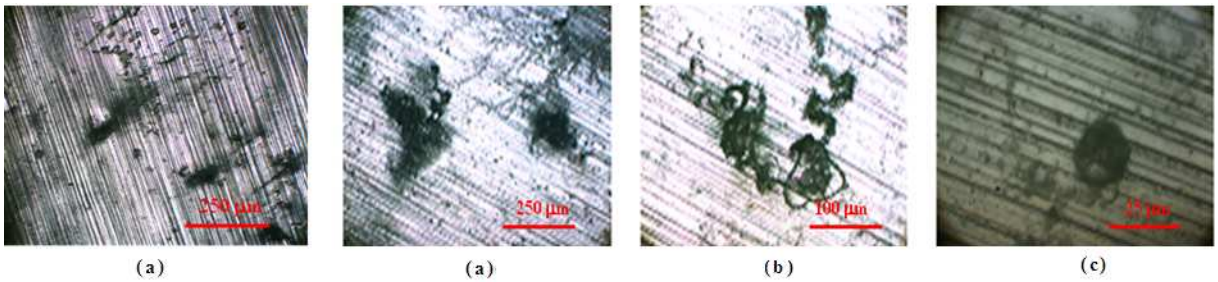


Figure.III.26 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 5g/l de NaCl, (a) G=40 (2) plages , (b) 100, (c) G=400.

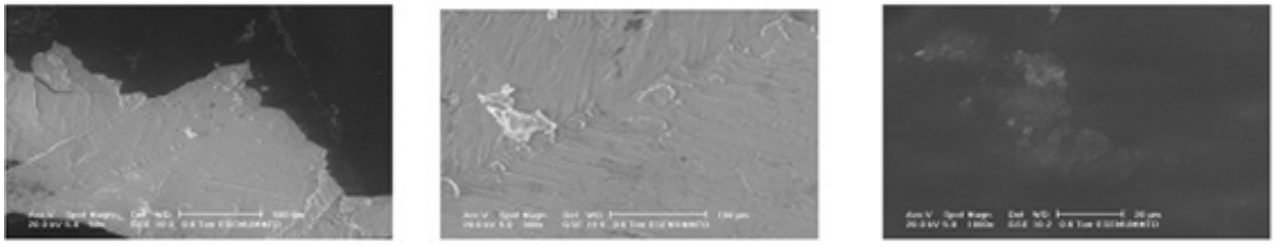


Figure.III.27 : Huit jours de corrosion de l'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de 5g/l de NaCl.

L'étude de la corrosion en fonction de la concentration en sel montre que le comportement à la corrosion diffère d'un échantillon à un autre, on a remarqué que le plus souvent c'est la corrosion localisée qui se produit, ceci est sûrement dû à la fragilisation de la couche d'oxyde par le chlore du sel. L'augmentation de la concentration du sel accroit cette corrosion.

Pour mieux comprendre la différence de la morphologie de corrosion entre les différents échantillons et l'effet de la concentration de la solution de sel de table, nous avons effectués la mesure de dureté Vickers, sous une charge de 10gramme, et de la résistivité électrique des différents échantillons (Tableau 2).

La dureté Vickers, et la résistivité électrique des différents papiers semblent légèrement différentes d'où nous pouvons la considérés constante d'un papier à un autre.

Echantillon	Utilisé par l'entreprise 1	Utilisé par l'entreprise 2	Utilisé par l'entreprise 3
Micro dureté Vickers (à 25°C) de 10g	16,2	19,4	14,8
Résistivité électrique (Ohm. Mètre) à 25°C	$0{,}954.\ 10^{-5}$	$1{,}01.\ 10^{-5}$	$1{,}11.\ 10^{-5}$
Résistivité électrique (Ohm. Mètre) à 0^0C	$0.848*10^{-5}$	$0.897*10^{-5}$	$0.986*10^{-5}$

Tableau.III.2 : Dureté Vickers et résistivité électrique des échantillons utilisés par les entreprises 1, 2,3.

Nous avons mesurés la résistivité électrique des différents papiers à 0°C, nous avons constaté que ces mesures diffèrent de celles obtenues à la température de 25°C, ces mesures ont été faites, par ce que la conservation du fromage se fait à la température de 6°C.

Pour voir l'effet du pH sur la corrosion, nous avons effectués des essais de corrosion dans une solution à base de sel de table à une concentration de 60g/l, pour laquelle nous avons ajouté de l'acide citrique, jusqu'à ce que nous avons obtenu une solution de pH de 5.5, correspondant au pH du fromage fondu. Les Figures (28-29) montrant la morphologie de corrosion du papier d'aluminium, utilisé par l'entreprise 1et 2 après 8 jours de corrosion dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide citrique de pH 5.5. Sur ces figures, nous observons une forte dégradation du papier d'emballage du fromage utilisé par les entreprises, 1, 2, (Figure 28-29).

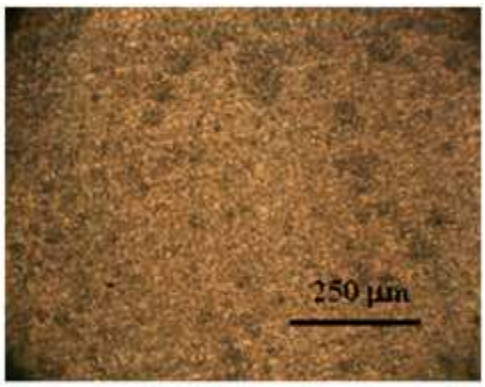


Figure.III.28 : 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

La Figure 29 montre la morphologie de corrosion du papier d'aluminium, utilisé par l'entreprise 2, après 8 jours de corrosion, dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide citrique de pH 5.5

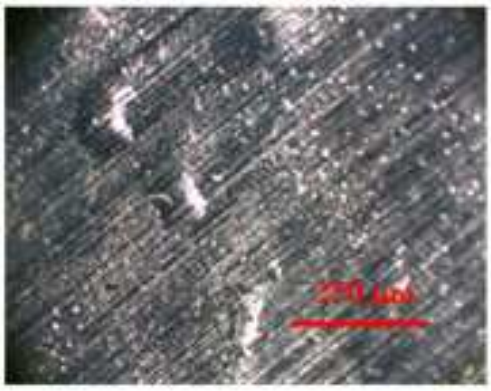


Figure.III.29 : 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

La Figure 30 montre la morphologie de corrosion du papier d'aluminium, utilisé par l'entreprise 3, après 8 jours de corrosion, dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide citrique de pH 5.5. Sur cette figure nous n'observons pas l'effet de l'acidité de la solution.

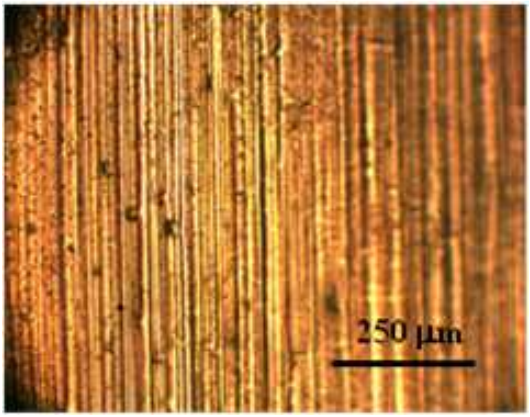


Figure.III.30: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de 60g/l +l'acide acétique de pH 5.5.

Donc les papiers d'emballage utilisé par les entreprises 1 et 2 sont plus sensibles à l'acidité.

La conservation du fromage emballé, se fait dans les réfrigérateurs fonctionnant avec un moteur électrique, induisant un champ magnétique de faible intensité. Ceci nous à encouragé, à testé la corrosion des différents papiers, sous un faible champ magnétique de quelques MICROTESLA.

La Figure 31 montre la morphologie de corrosion du papier d'aluminium, utilisé par l'entreprise 1 ; après 8 jours de corrosion, dans une solution de sel de table de 60g/l en présence d'un faible champ magnétique :

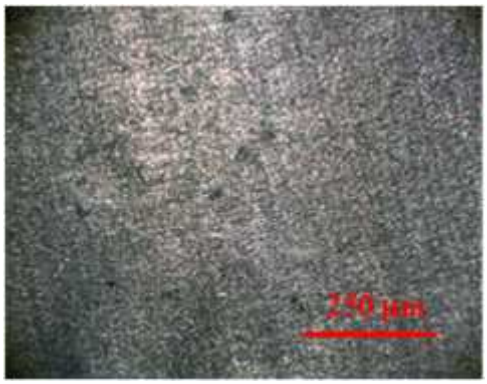


Figure.III.31: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 1
dans une solution de sel de table de 5g/l en présence d'un faible champ magnétique.

La Figure 32 montre la morphologie de corrosion du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 2, après 8 jours de corrosion, dans une solution de sel de table de 60g/l en présence d'un faible champ magnétique :

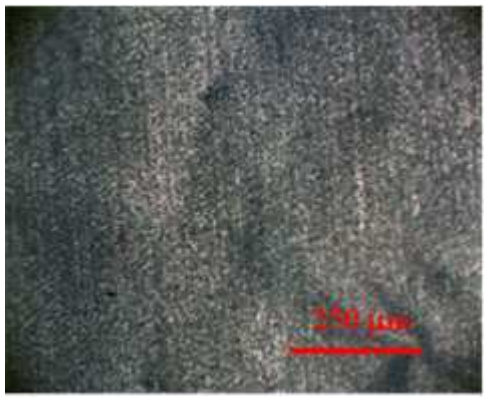


Figure.III.32: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de 5g/l en présence d'un faible champ magnétique.

La Figure 33 montre la morphologie de corrosion du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 3, après 8 jours de corrosion, dans une solution de sel de table de 60g/l en présence d'un faible champ magnétique :

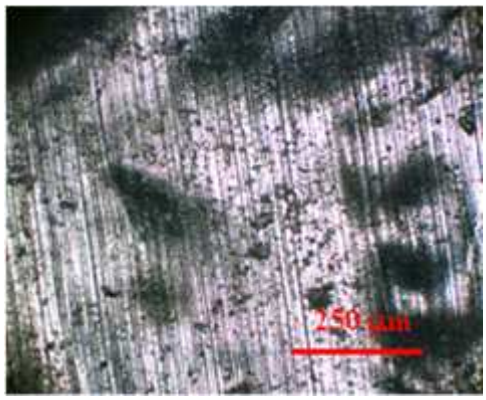


Figure.III.33: 8 jours de corrosion du papier d'emballage en aluminium utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de 5g/l en présence d'un faible champ magnétique.

Le champ magnétique semble amplifie le phénomène de corrosion du papier d'emballage en aluminium dans une solution de 0.5 % de sel de table (Figure (31-33)).

La Figure 34 représente l'état de surface du papier d'aluminium d'emballage du fromage, après une année de corrosion dans une solution de 3g/l de NaCl.

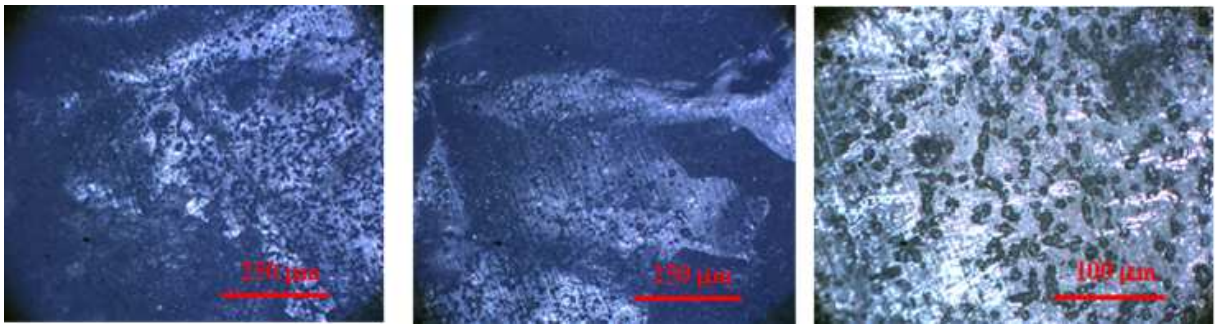


Figure.III.34: 1année de corrosion du papier d'emballage en aluminium du fromage dans une solution de NaCl de 3g/l.

Une immersion du papier d'aluminium pour l'emballage du fromage dans une solution de 0,3%, pendant une longue durée, induit une dégradation totale du papier d'emballage, et une dissolution de l'aluminium et des autres éléments constituant le papier d'aluminium, dans la solution (Figure 34).

2. Cinétique de la corrosion du papier aluminium d'emballage du fromage en fonction de la concentration de la solution corrosive en sel de table (NaCl) :

Tout d'abord nous tenons à signaler que le potentiel de corrosion à l'immersion, est très difficile à mesurer, ceci est dû à l'instabilité de la double couche électronique se formant à la surface de l'électrode.

La fixation du conducteur sur le papier d'emballage du fromage est difficile à réalisé, du fait que ce papier est de faible épaisseur.

Les Figures (35-38), représentant les courbes de la corrosion libre du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 1, montrent que le potentiel de corrosion libre au début de l'immersion dans la solution de sel de table varie en fonction de la concentration. Celui-ci converge vers une valeur de -241mV qui représente le potentiel de passivation après environ 140 heures d'immersion. Quelque soit la concentration de la solution en sel de table, le potentiel de la corrosion passe par un maximum compris entre -140 et -170mV.

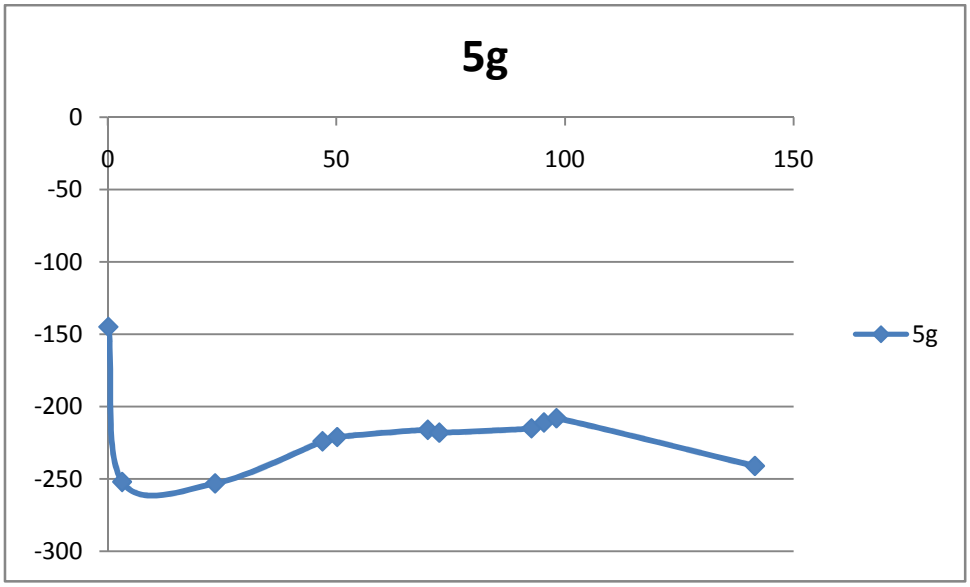


Figure.III.35 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l.

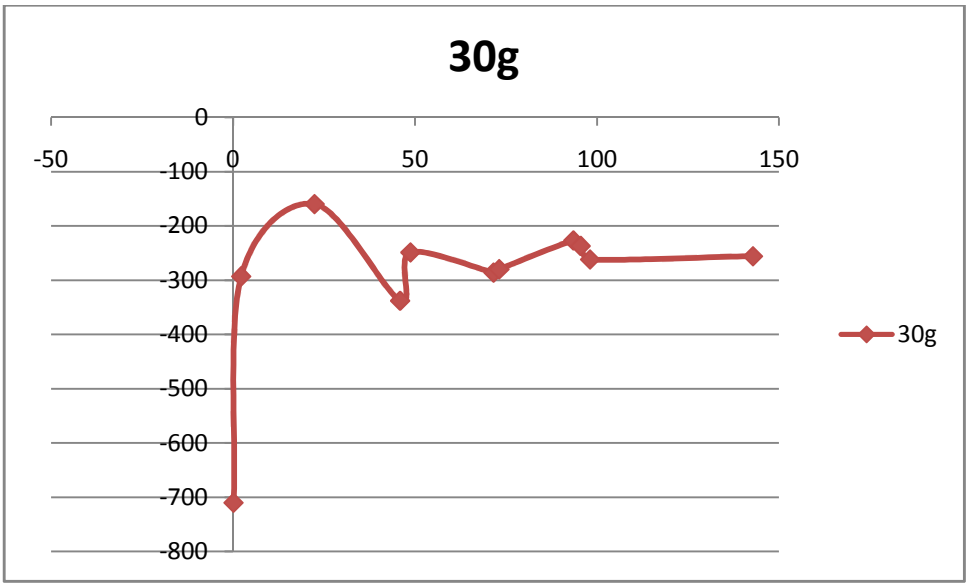


Figure.III.36 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 30g/l.

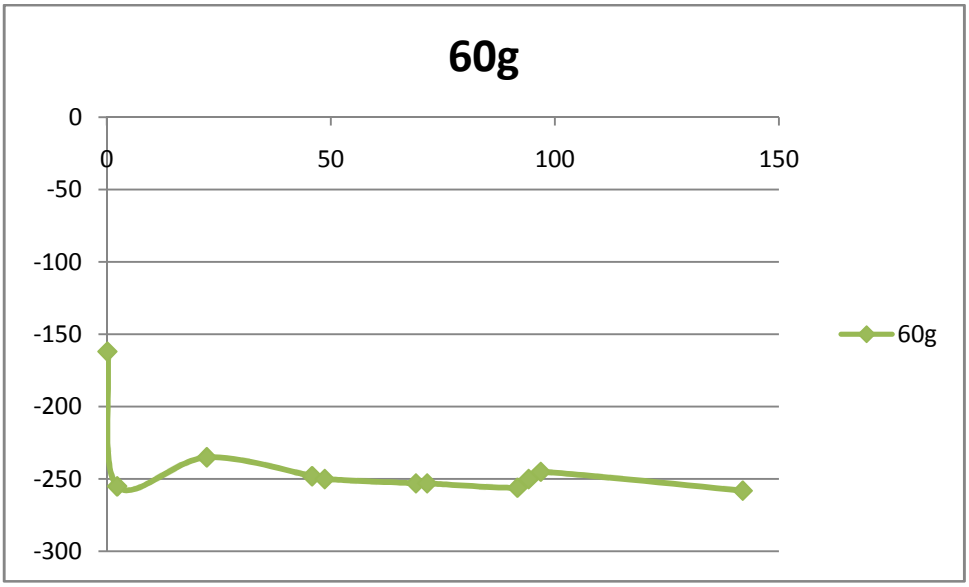


Figure.III.37 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 60g/l.

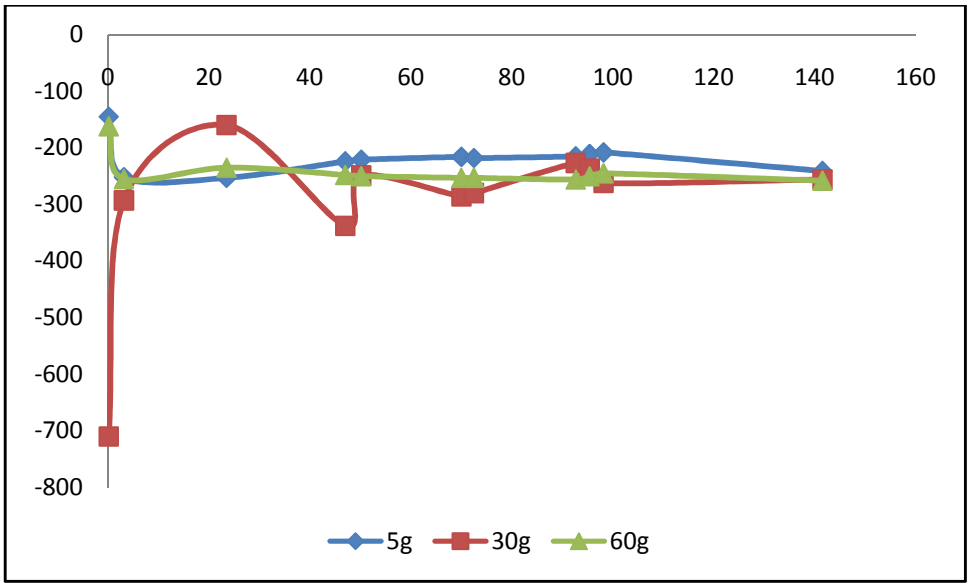


Figure.III.38 : potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de ◆ 5, ■ 30 et ● 60g/l.

Les Figures (39-42), représentant les courbes de la corrosion libre du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 2, montrent que le potentiel de corrosion libre au début de l'immersion dans la solution de sel de table diminue considérablement, en fonction de la concentration du sel de table dans la solution, il passe de -127mV pour une concentration de 5g/l à -223mV pour une concentration de 30g/l. La passivation de ce papier n'est pas atteinte après 140 heures d'immersion.

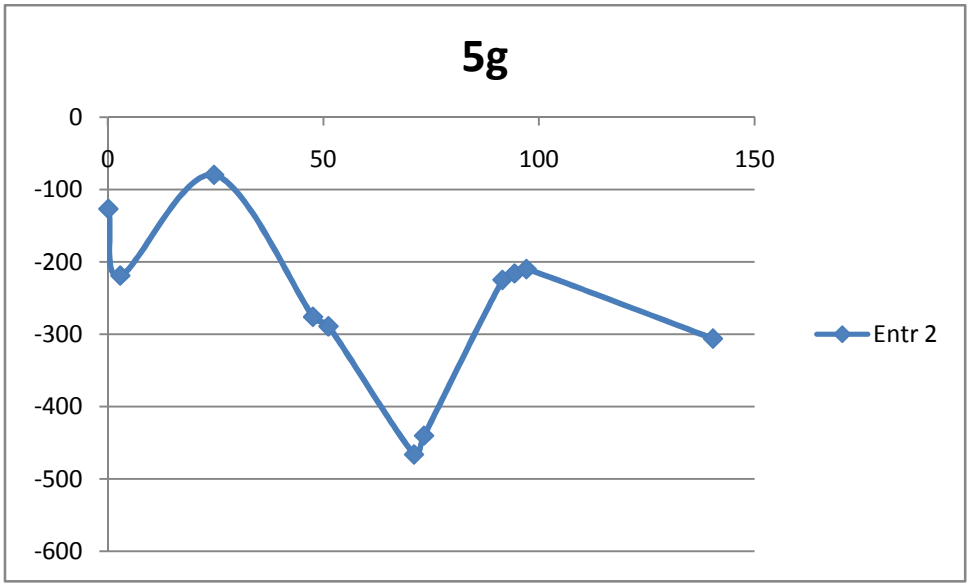


Figure.III.39 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 5 g/l.

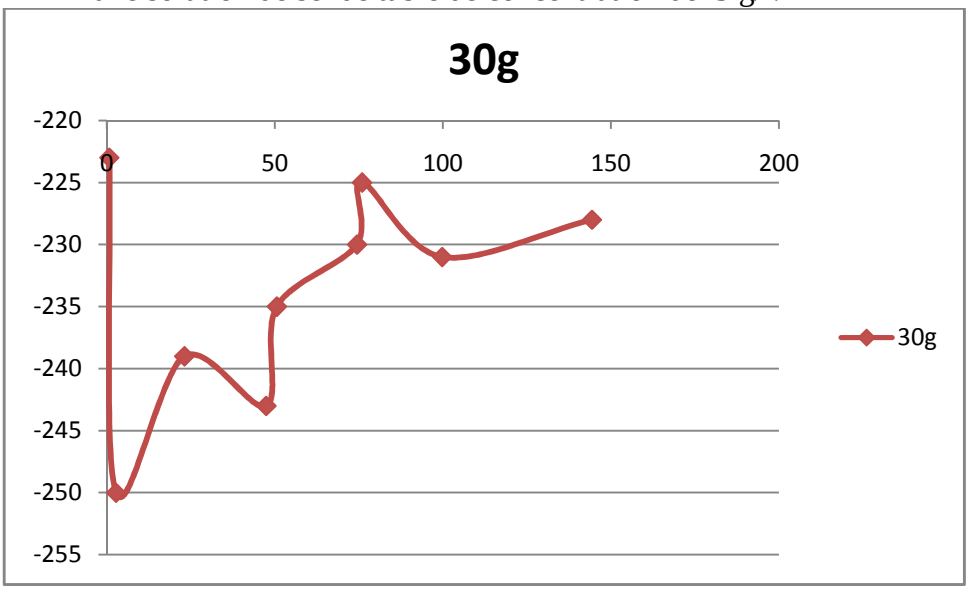


Figure.III.40 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 30 g/l.

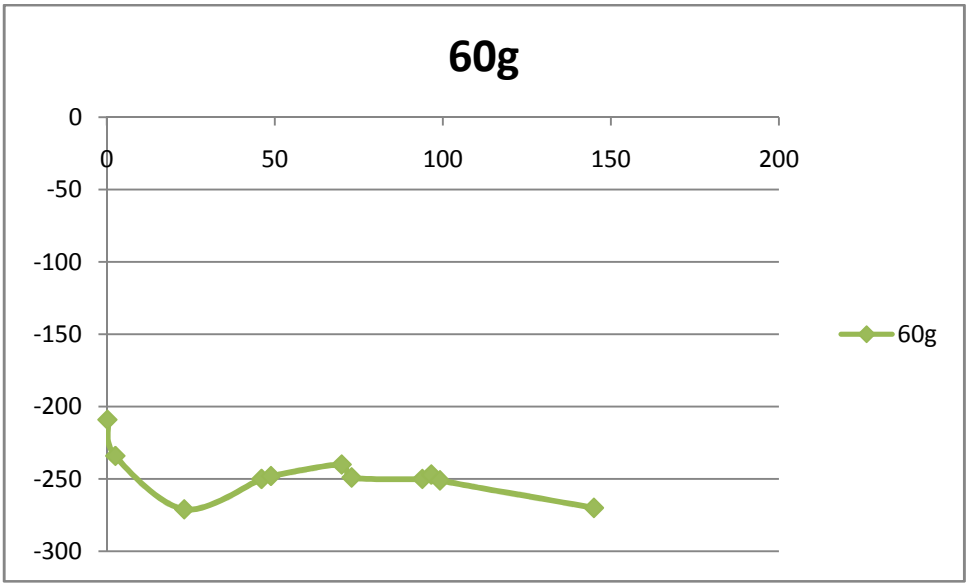


Figure.III.41 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l.

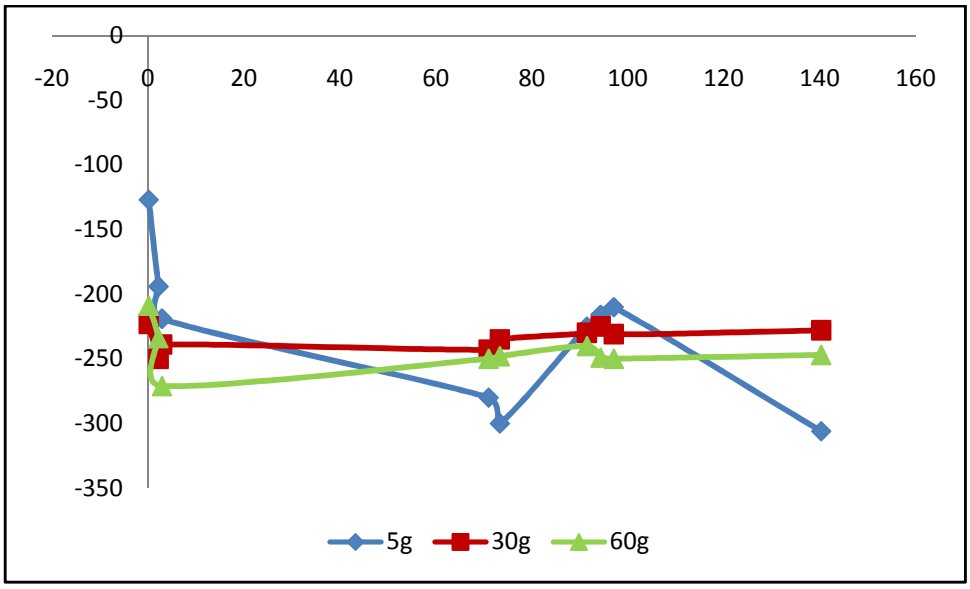


Figure.III.42 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de ■5, ◆30 et ●60 g/l.

Les Figures (43-46), représentant les courbes de la corrosion libre du papier d'aluminium utilisé par l'entreprise 3. Nous observons sur ces courbes la diminution du potentiel de corrosion libre, du début de l'immersion jusqu'à 160 heures d'immersion dans la solution de sel de table, en fonction de la concentration du sel de table dans la solution il passe au début d'immersion de -204 mV pour une concentration de 5g/l jusqu'à -237mV pour une concentration de 60g/l. A 140 heures d'immersion, il passe d'une valeur de -224mV

pour une concentration de 5g/l, à une valeur de -285 mV pour une concentration de 60g/l. La passivation n'est pas atteinte après 140 heures d'immersion.

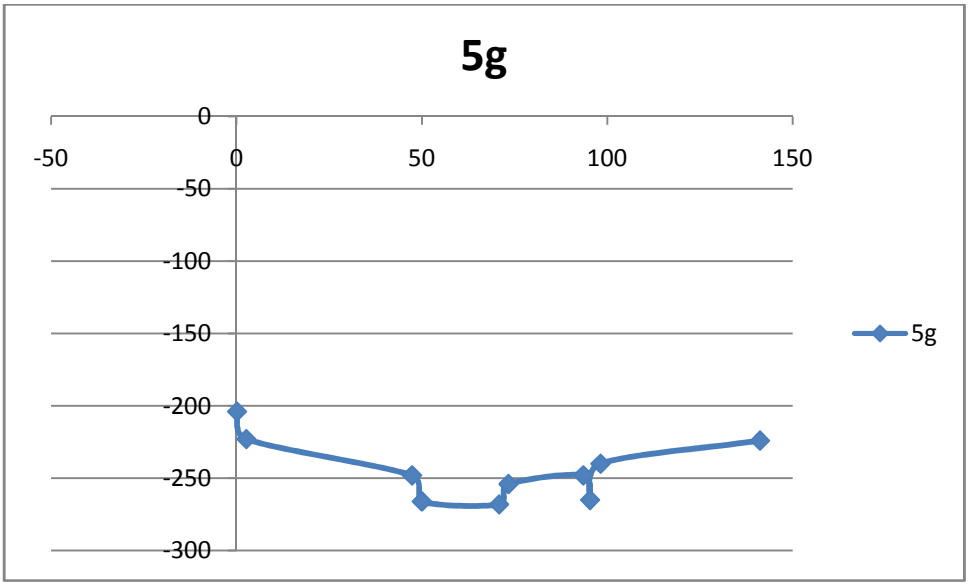


Figure.III.43 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 5 g/l.

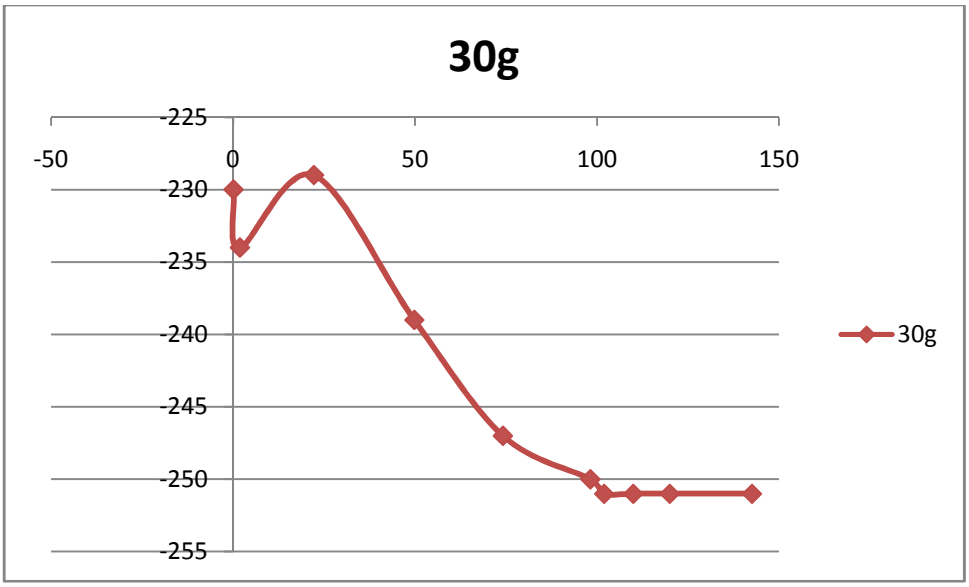


Figure.III.44 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 30 g/l.

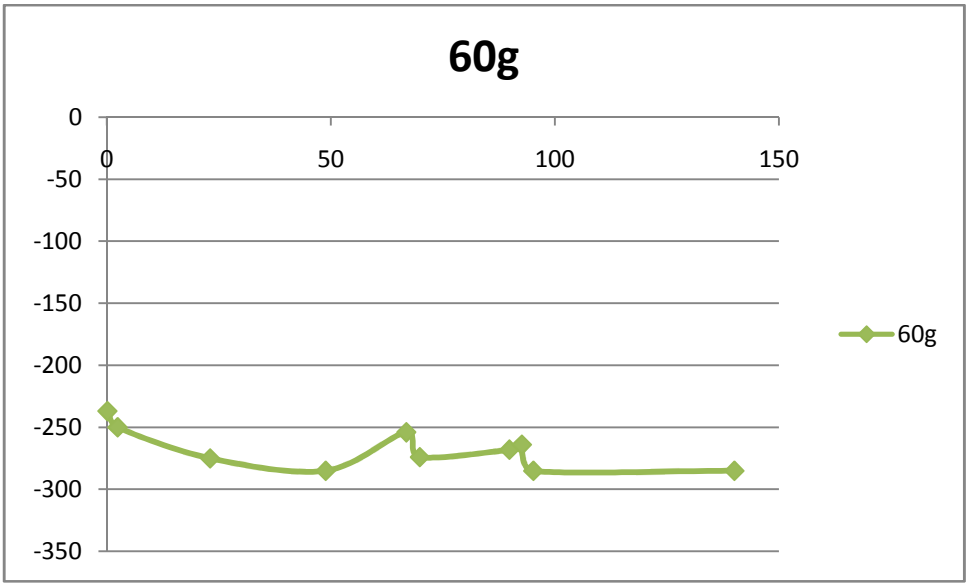


Figure.III.45 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l.

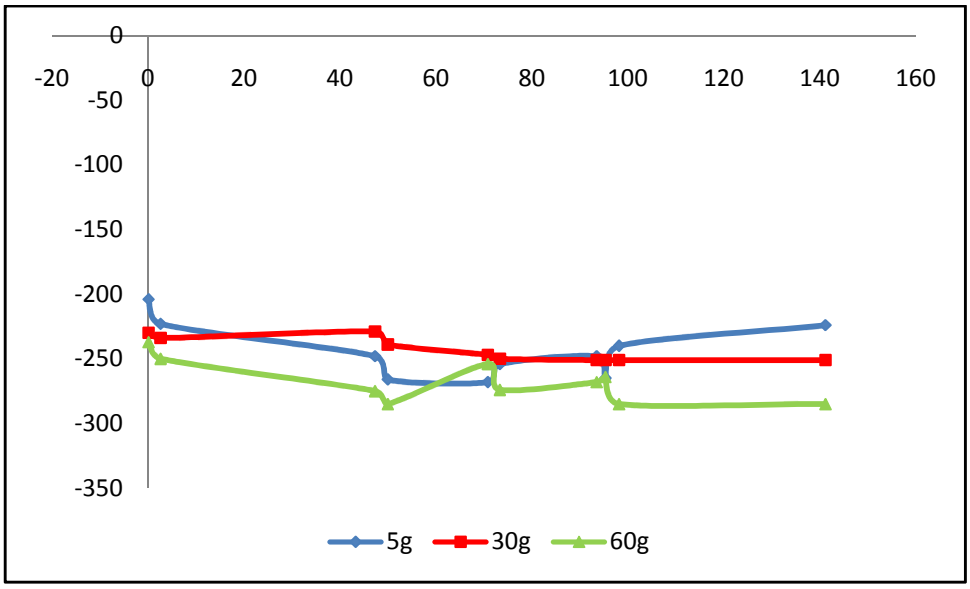


Figure.III.46 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ◆5, ■30 et ●60 g/l.

La (figure 47) montre que l'augmentation de la concentration du sel de table fait augmenter la conductivité électrique de la solution, et la corrosion électrochimique est favorisée par l'augmentation de la conductivité électrique. Ceci a été bien observé sur les microstructures et les courbes du potentiel de corrosion libre.

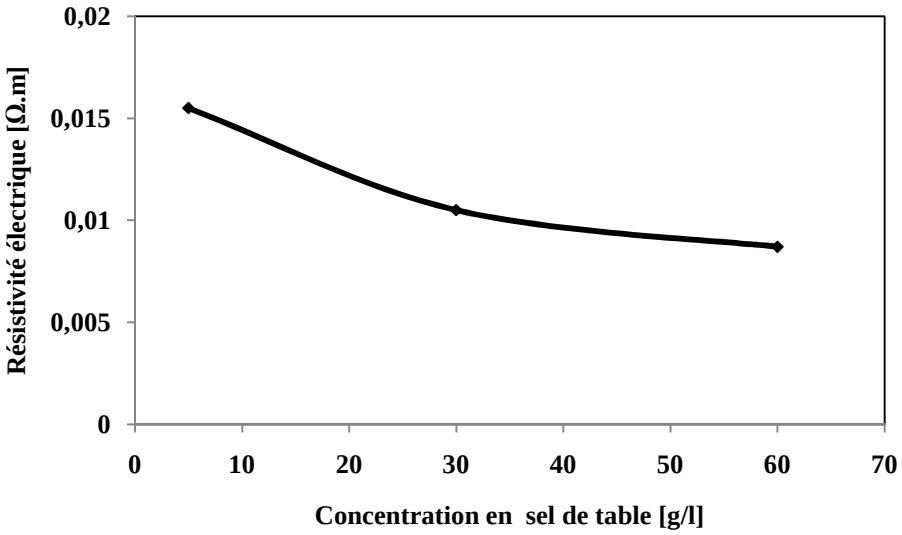


Figure.III.47 : Evolution de la résistivité en fonction de la concentration du sel de table

Les Figures (48-53) montrent que l'ajout d'un acide alimentaire (acide citrique), ramène le pH de la solution de sel de table de concentration de 60g/l à la valeur de 5,5, diminue le potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage du fromage utilisé par les entreprises 1 et 2. Le potentiel de corrosion du papier utilisé par l'entreprise 3, ne change pas après ajout de l'acide citrique. Ceci confirme les résultats obtenus par microscopie optique.

Le tableau 3 montre que l'ajout de l'acide citrique pour la solution de 60g/l de sel de table, diminue la conductivité de la solution, ceci prouve que la cinétique de la corrosion ne dépend pas uniquement de la conductivité électrique.

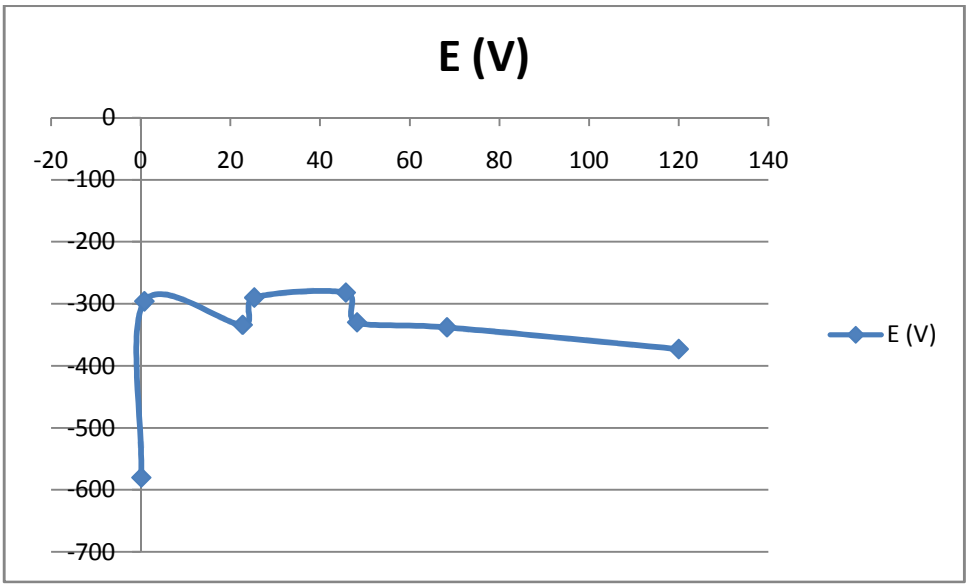


Figure.III.48: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide acétique.

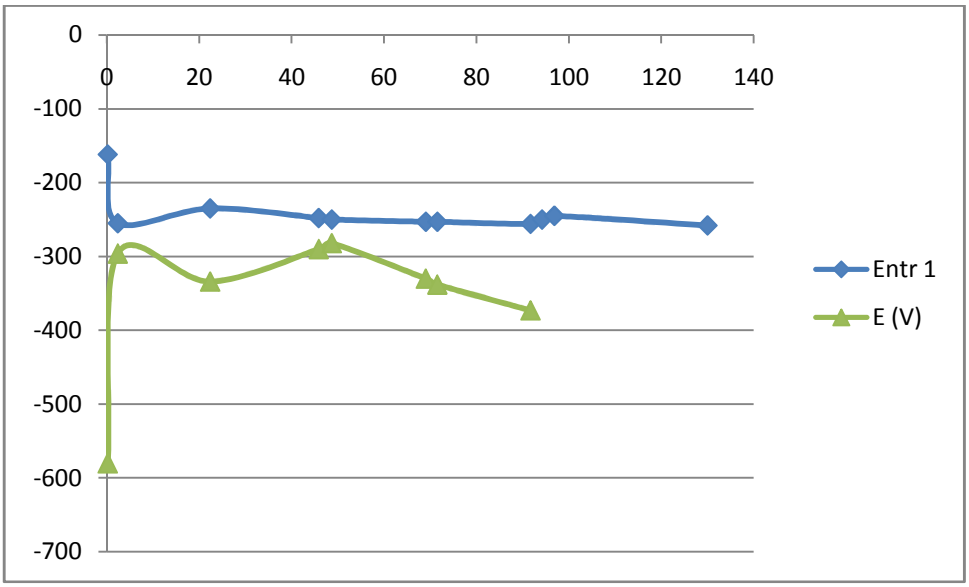


Figure.III.49 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1 dans une solution de sel de table de concentration de ▲60 g/l + acide acétique, ●60g/l.

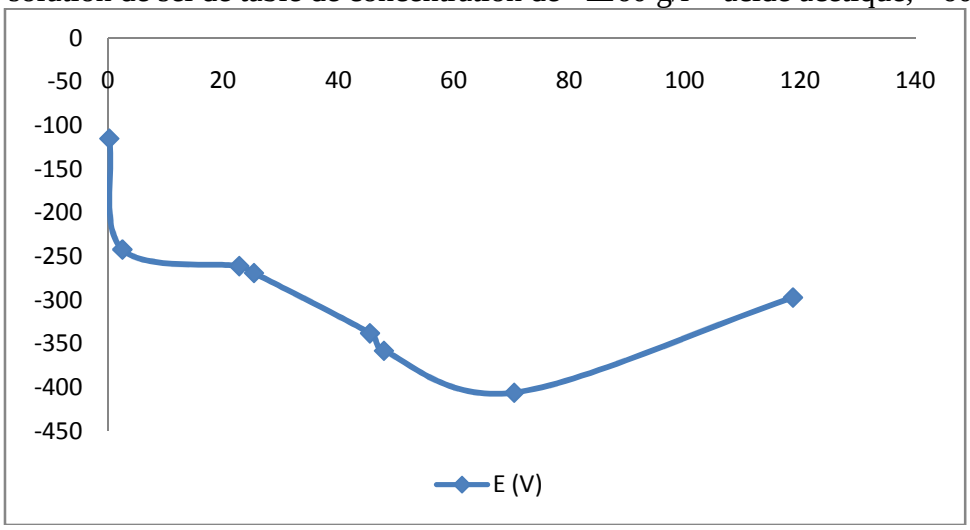


Figure.III.50: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide citrique.

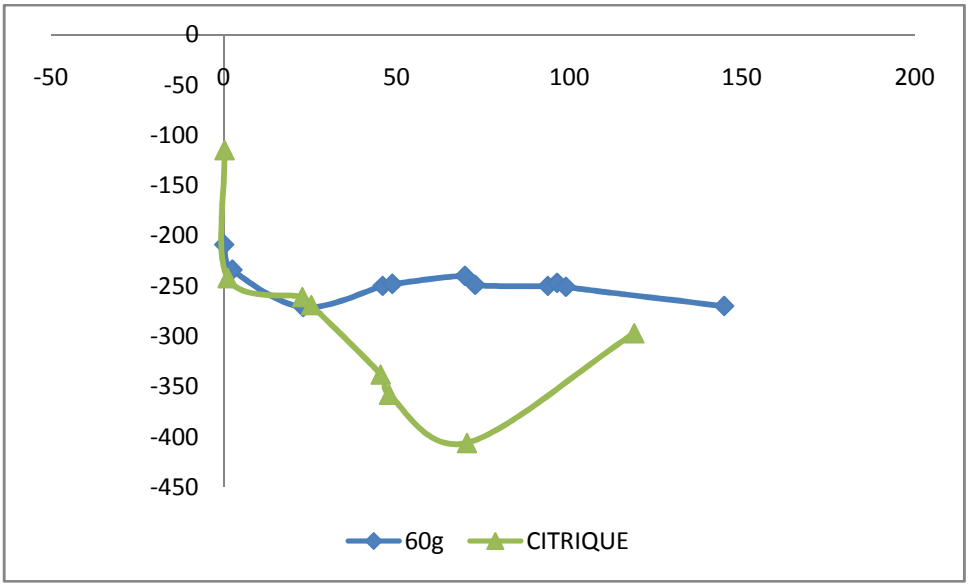


Figure.III.51 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de ◆60 g/l + acide citrique, ●60g/l.

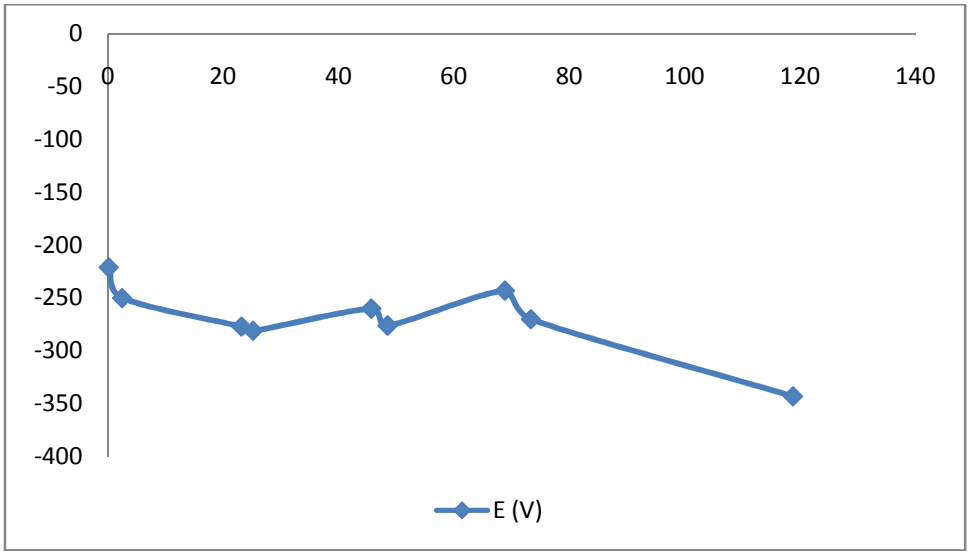


Figure.III.52: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 60 g/l + acide citrique.

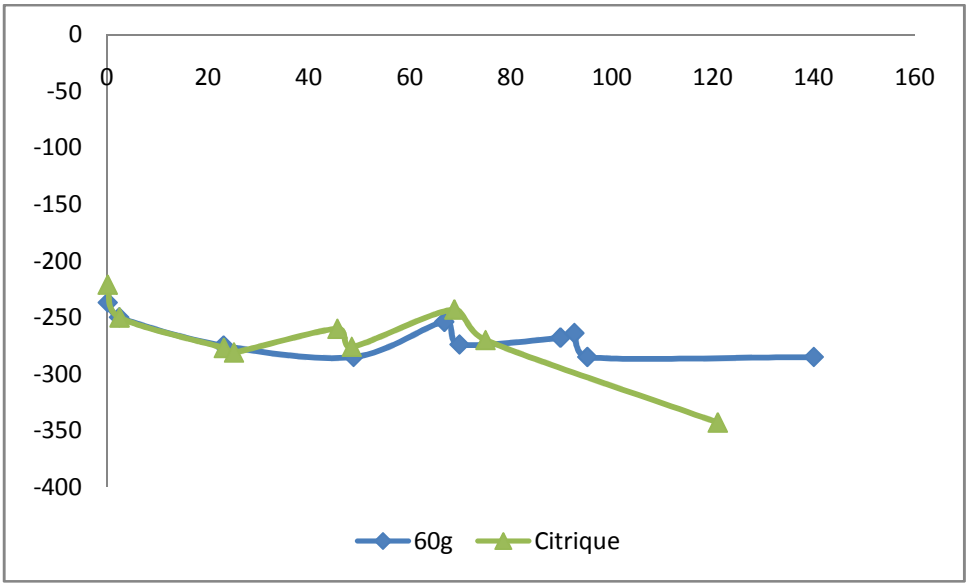


Figure.III.53 : Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ◆60 g/l + acide citrique, ●60g/l.

Composition de la solution	**5g/l de sel de table**	**30g/l de sel de table**	**60g/l de sel de table**	**60g/l de sel de table + l'acide citrique**
Résistivité électrique	**0,0155**	**0,0105**	**0,0087**	**0,0109**

Tableau.III.3 : résistivité des solutions utilisées.

Les Figures (54-58) montrent qu'un faible champ magnétique, influe sur la cinétique de corrosion du papier d'emballage du fromage utilisée par les entreprises 1 et 2 dès le début de la corrosion. Mais influe peu sur le papier utilisé par l'entreprise 3. Ceci confirme ce que nous avons observé, sur les microstructures représentées par les figures (28-30) et sur les courbes de corrosion libre représentées par les Figures (48-53).

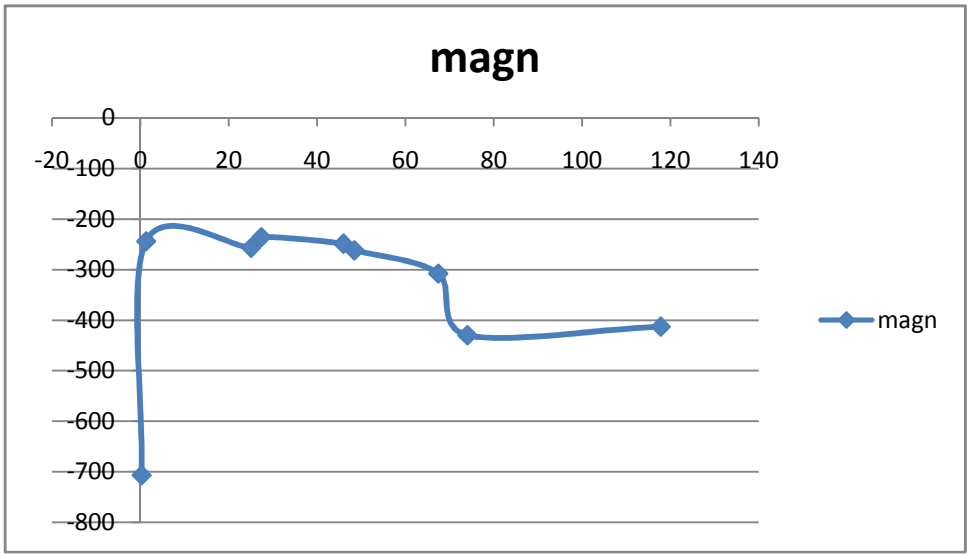


Figure.III.54: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

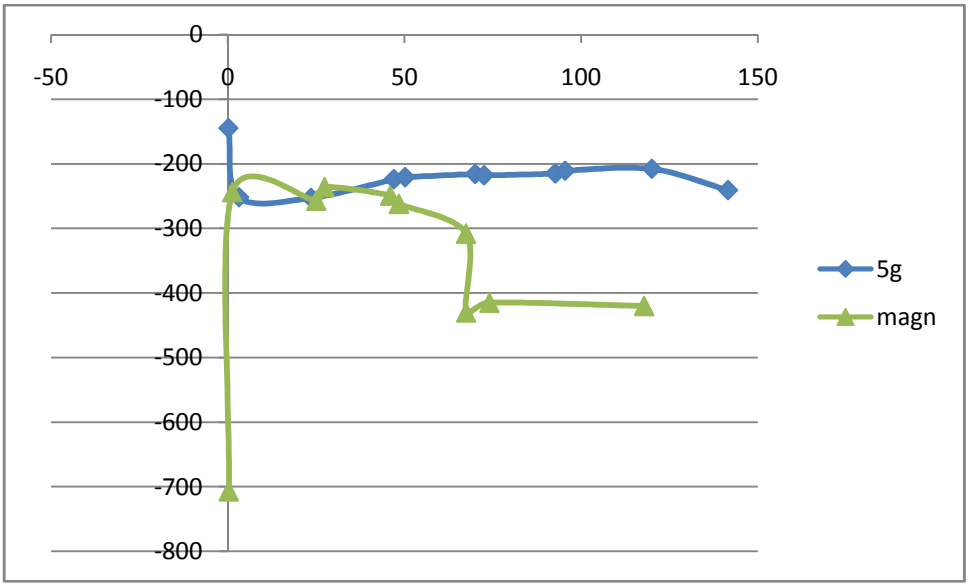


Figure.III.55: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 1dans une solution de sel de table de concentration de ◆5g/l en présence du champ magnétique ■ 5g/l en absence du champ magnétique.

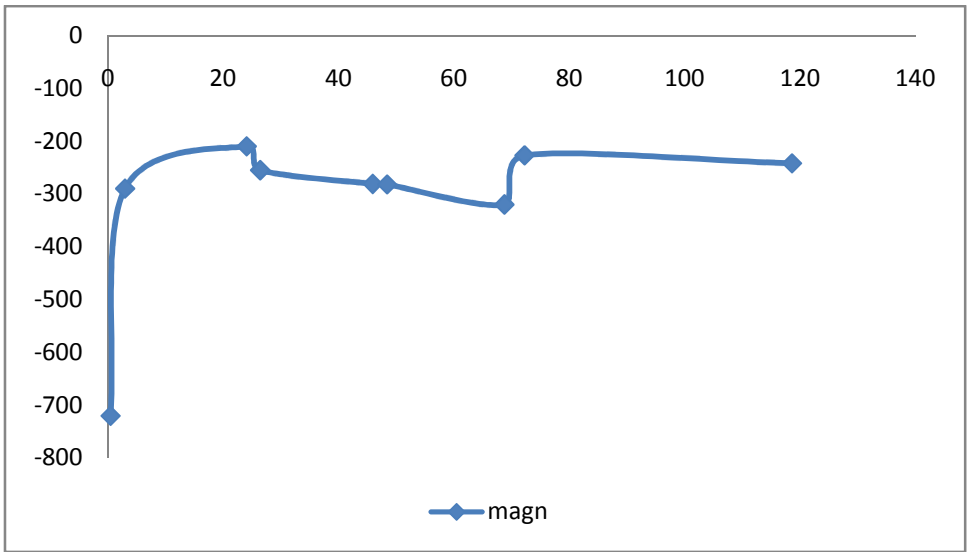


Figure.III.56: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

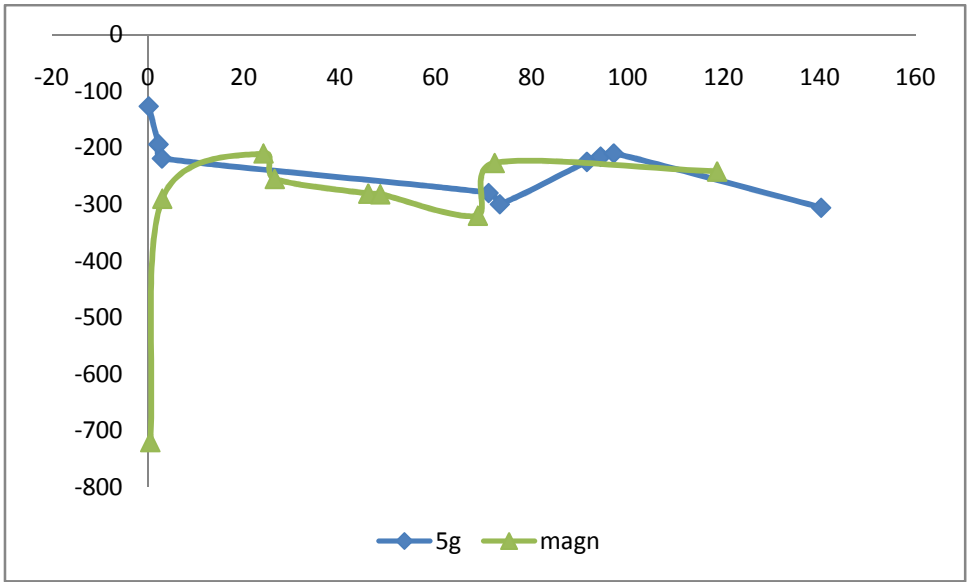


Figure.III.57: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 2dans une solution de sel de table de concentration de ◆5g/l en présence du champ magnétique ■ 5g/l en absence du champ magnétique.

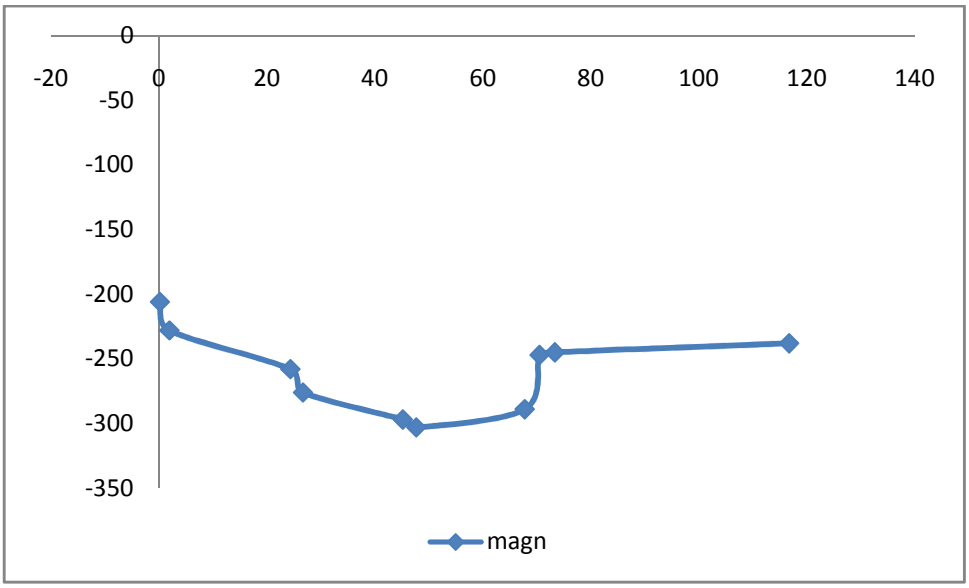


Figure.III.58: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de 5g/l en présence du champ magnétique.

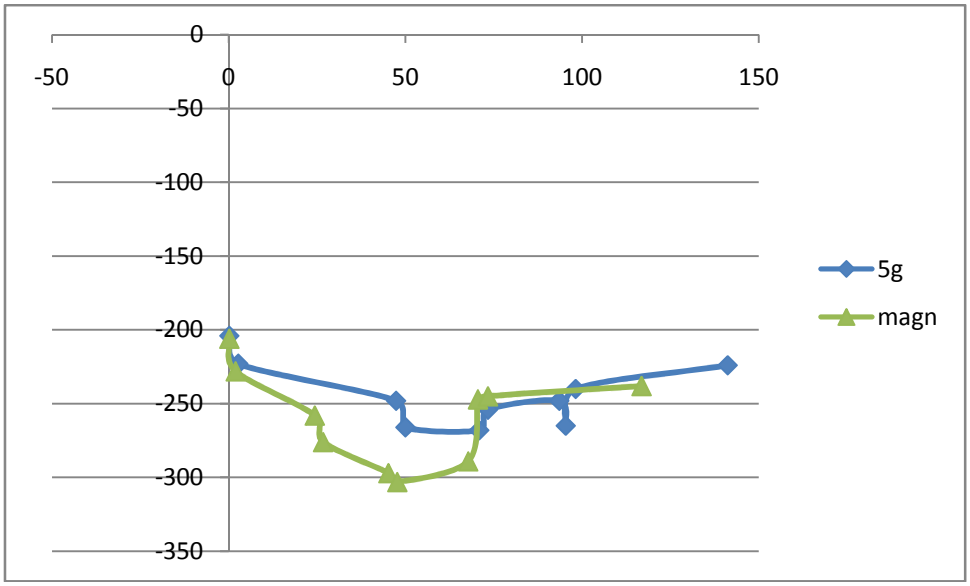


Figure.III.59: Potentiel de la corrosion du papier d'emballage utilisé par l'entreprise 3 dans une solution de sel de table de concentration de ■5g/l en présence du champ magnétique ■ ◆5g/l en absence du champ magnétique.

CONCLUSION

Conclusion

- L’étude de la morphologie de corrosion en fonction de la concentration en sel montre que le comportement à la corrosion diffère d’un échantillon à un autre, on a remarqué que le plus souvent c’est la corrosion localisée qui se produit ceci est surement dû à la fragilisation de la couche d’oxyde par le chlore du sel. L’augmentation de la concentration du sel accroit cette corrosion.
- Le potentiel de corrosion libre au début de l’immersion dans la solution de sel de table varie en fonction de la concentration pour les trois types de papiers d’emballage du fromage.
- Le Potentiel de corrosion converge vers une valeur représentant le potentiel de passivation après environ 120 heures d’immersion uniquement pour le papier d’emballage utilisé par l’entreprise 1. La durée de 120 heures, ne suffit pas pour le papier d’emballage utilisée par l’entreprise 2,3 d’atteindre la passivation.
- Le champ magnétique amplifie le phénomène de corrosion du papier d’emballage en aluminium dans une solution de 6 % de sel de table.
- La dureté Vickers et la résistivité électrique des différents papiers semblent légèrement différentes d’où nous pouvons la considérés constante d’un papier à un autre.
- Une immersion du papier d’aluminium pour l’emballage du fromage dans une solution de 0,3% pour une longue durée (une année) induit une dégradation totale du papier d’emballage et une dissolution de l’aluminium et des autres éléments constituant le papier d’aluminium dans la solution.
- L’ajout de l’acide citrique pour la solution de 60g/l de sel de table, diminue la conductivité de la solution, de ce fait, la cinétique de la corrosion ne dépend pas uniquement de la conductivité électrique.

Références bibliographiques

[1] : Michel Colombié et coll. ‘’Matériaux Métalliques’’, édition DUNOD

[2] : Cristian Vargel ‘’Corrosion de l’Aluminium’’, édition DUNOD 1999

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

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

[5] : Marc Degrez Professeur, Emmanuelle Paquay Expert traitements des surfaces, ‘’PROTECTION DES ALLIAGES D’ALUMINIUM CONTRE LA CORROSION’’.

[6] : Rim KARBOUJ, ‘’ Transfert d’aluminium : Cas des matériaux pour contact alimentaire’’, thèse de Doctorat, Le 8 Mai 2008, École Française Papeterie et des Industries Graphiques Institut Polytechnique de Grenoble.

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

[8] : M. REDJAIMIA, thèse doctorat, Université De Biskra, les alliages d’aluminium, 1998.

[9] : Sandrine PAYAN, ‘’Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d’alliage d’aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module’’, THÈSE PRÉSENTÉE A L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2001.

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

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

[12] : Jean BARRALIS – Gérard MAEDER, « Précis de métallurgie » Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition Nathan 1994.

[13] : Soraya KHIRACHE, mémoire de Magistère ‘’Elaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution de 3% en pois de NaCl’’. Univérssité MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, faculté des sciences, département chimie.

[14] : Jean pillete, Docteur en médecine, membre de E F V V (European Forum For Vaccin Vigilance), ‘’Aluminium et vaccins’’.nouvelle édition de 17/09/2008.

[15] : 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.

[17]: http://www.vulgaris-medical.com/encyclopedie/-lectrolyte-6292.htmls

[16] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorure_de_sodium