République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique

MEMOIRE

De fin d'études

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

Option science des matériaux

theme

Etude de la corrosion du papier aluminium

Dirigé par :

M^{r} : ZAZI. N

Réalisé par :

M^{r} : HAROUN. S

Promotion 2010 /2011

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

REMERCIEMMENTS

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

« Aucun travail ne s'accomplie dans la solitude »

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres de ma famille, grâce à leur aide, mon travail est terminé.

Je remercie profondément mon promoteur Monsieur N.ZAZI, d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui m'ont donné le courage et l'espoir de travailler tranquillement.

Je remercie également Monsieur F.HELLAL responsable du laboratoire de l'Ecole Polytechnique à Alger, d'avoir accepté notre présence au sein de son siège.

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

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

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

Je remercie énormément tous mes enseignants.

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes frères

Toute ma famille

Tous mes amis et en particulier les gens de (SDM) Master.

(SAMIR, LOUNIS, SMAIL, SIDALI)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sommaire

Chapitre I : Aluminium et ses alliages **pages**

Introduction..... 4

I-1- l'aluminium..... 4

I-2- Propriétés de l'aluminium..... 8

I- 2-1- Structure atomique..... 8

I-2-2- Isotopes de l'aluminium 8

I-2-3- Structure cristalline..... 9

I-2-4- Température de fusion 9

I-2-5- Point d'ébullition..... 9

I-2-6- Masse volumique..... 9

I-2-7- l'enthalpie de vaporisation..... 9

I-2-8- Propriétés optiques 10

I-2-9- Propriétés mécaniques 10

I-2-10- Propriétés chimiques..... 10

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

I-3-1 Légèreté..... 11

I-3-2 Conductivité thermique..... 11

I-3-3 Conductivité électrique 12

I-3-4 Tenue à la corrosion..... 12

I-3-5 Aptitude aux traitements de surface 12

I-3-6 Diversité des alliages d'aluminium 12

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-3-7- Recyclage 13

I-3-8-Facilité de mise en œuvre 13

I-4- Alliages d'aluminium 13

I-4-1- Classification des alliages d'aluminium 13

I-4-1-1 Alliages de corroyage 13

I- 4-1-1-1 Alliage avec durcissement structural 14

I-4-1-1-2 Alliages sans durcissement structural 14

I-4-1-2 Alliages de moulages 15

I-4-2- Désignation des alliages d'aluminium 16

I-5- Utilisation du papier d'aluminium dans les emballages 17

- Papier d'aluminium qui se vend en rouleaux 17
- Papier d'aluminium utilisé pour l'emballage des produits alimentaires 17
- Papier d'aluminium utilisé en pharmacie 18

I-5-2-Tenue de l'aluminium aux produits alimentaires 19

I-5-3 Aluminium et alliages d'aluminium revêtu - Usage unique 19

- Domaine d'application 19
- Limites d'acceptabilité 19

I-5-4- Différents types d'aluminium dans le domaine alimentaire 20

I-5-5- Métabolisme et toxicité de l'aluminium ……..20

I-6- Influence du champ magnétique sur le papier Al……21

I-6-1- Propriétés magnétiques ……20

I-6.1. 1 Quelques définitions……22

I-6.1.2 Solides magnétiques……23

I-6.1 2.1 Le diamagnétisme……23

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-6-1-2-2 Le paramagnétisme……23
I-6.1 2.3 Le ferromagnétisme ……24
I-6.2- l'aimant…….25
I-6.3 Aimant permanent.....26
I-6-4 Formes des aimants permanents……26
I-6-5 Magnétisation des aimants permanents.....26
I-6-6 Champ magnétique de l'aimant permanent.....26

Chapitre II : Corrosion de l'aluminium et de ses alliages

II-1- Introduction..... 27

II.1.1 Facteurs de la corrosion 28

Le milieu 28

Le métal 28

- La composition des alliages 28
- Le mode d'élaboration et de transformation 28
- Les traitements thermiques 28
- L'état de surface 29

Conditions d'emploi 29

II-2 Tension de l'électrode à l'équilibre- équation de Nerst et résistance à la polarisation ....
..... 29

II-2.1 Tension de l'électrode à l'équilibre- équation de Nerst..... 29

II.2. 2 Courbe de polarisation 30

II.2. 3 Résistance à la polarisation 30

II.2. 4 Courbe potentiel de la corrosion libre 30

II-3- Aperçu sur la corrosion de l'aluminium 30

II-4- Principaux paramètres qui influencent la corrosion de l'aluminium 32
II-4-1-Facteurs liés au milieu..... 32
II-5- Différents modes de corrosion de l'aluminium et ses alliages 32

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II-5-1 Corrosion générale (uniforme) 32
II-5-2 Corrosion caverneuse 33
II-5-3 Corrosion par piqûre 33
II-5-4 Corrosion-érosion 34
II-5-5 Corrosion feuilletante 34
II-5-6 Corrosion sous contrainte 34
II-5-7 Corrosion bactériologique 34
II-5-8 Corrosion transcristalline et la corrosion intercristalline 35
II-5-9 Corrosion filiforme 35
II-5-10 Corrosion galvanique 36
II-6- Protection des alliages d'aluminium contre la corrosion 36
II-7- Corrosion atmosphérique de l'aluminium 36
II-8- Passivité de l'aluminium 37
II-9- Influence de la teneur en chlores 37
II-10- Action des chlorures sur l'aluminium et ses alliages 38
II-11- Intoxication par l'aluminium 38
10.12 Effets du champ magnétique sur la corrosion……40
Chapitre III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES
III-1 Introduction 41
III-2-Prélèvement des échantillons 41
III-3 Préparation des échantillons pour les essais électrochimique (préparation des électrodes) 41
III-4 Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et microdureté 43
III.5 Préparation de l'électrode de référence pour les essais de la corrosion libre 46
III-6 Préparation de l'essai de corrosion 46
III.7- Montage pour l'essai de corrosion libre 47
III.8 Montage pour les essais potentiodynamiques 48
III.9 Essai de micro dureté Vickers 51

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction..... 53

IV. 1-Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, des différents papiers d'aluminium dans le plan du laminage..... 53

1-papier d'emballage du médicament 53

2-papier d'emballage du fromage 54

3-papier d'aluminium en rouleaux 55

4-papier d'aluminium de l'emballage du chocolat..... 55

IV. 2-Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, des différents papiers d'aluminium dans le plan perpendiculaire au laminage..... 56

IV. 3-Caractérisation microstructurale, par microscope électronique à balayage, des différents papiers d'aluminium dans le plan du laminage 57

1-papier d'aluminium en rouleaux 57

2-papier d'aluminium de l'emballage du chocolat..... 58

3-papier d'emballage du fromage 59

4-papier d'emballage du médicament 60

IV. 4-Caractérisation de la morphologie de la corrosion des différents papiers d'emballage en aluminium..... 61

1-Morphologie de la corrosion..... 61

a-papier pour emballage des médicaments 62

b-papier pour emballage du chocolat..... 63

c-papier pour emballage du fromage 64

d-papier aluminium sous forme de rouleaux..... 65

2-Cinétique de la corrosion..... 67

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.1 Potentiel de la corrosion libre 67

CONCLUSION 80

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I-1 : Organigramme des traitements thermomécaniques pour l'aluminium et ses alliages.....6

Figure I- 2 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés des métaux avec le taux du laminage.....7

Figure I-3 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid.....7

Figure I-4 : Structure cristalline de l'aluminium 9

Figure I-5 : Boucle de courant élémentaire…….21

Figure I-6 : Champ magnétique d'un matériau diamagnétique...……23

Figure I-7 : Champ magnétique d'un matériau paramagnétique…….24

Figure I-8 : Champ magnétique d'un matériau ferromagnétique……24

CHAPITRE II :

Figure II-1 : Couches d'oxyde naturel sur l'aluminium d'après VARGEL 31

Figure II-2 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium dans l'eau..... 31

Figure II-3: Processus de corrosion par piqûre dans un milieu aqueux..... 33

Figure II-4 : Corrosion filiforme de l'aluminium peint 35

Figure II-5 : Passivation d'un alliage d'aluminium..... 37

Figure II-6 : Profondeur de piqûre en fonction de la teneur en chlorures..... 38

CHAPITRE III :

Figure III.1 : 1ère étape de préparation des électrodes 42

Figure III.2 : 2ème étape de préparation des électrodes 42

Figure III.3 : 3ème étape de préparation des électrodes 42

Figure III.4 : polisseuse utilisée 44

Figure III.5 : Schéma d'un microscope métallographique 44

Figure III.6: Microscope électronique à balayage (MEB)..... 47

Figure III.7 : Immersion des échantillons dans une solution de 0,3% de NaCl..... 44

Figure III.8 : Aimant permanant utilise lors des essais électrochimiques 47

Figure III.9 : Montage pour les essais de la corrosion libre..... 48

Figure III.10 : Montage pour le tracé des courbes de polarisations et les courbes de passivations..... 49

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure III.11 : La cellule électrochimique utilisée pour le tracé des courbes de polarisation et de passivation..... 50

Figure III.12 : Electrode de référence du calomel..... 50

Figure .III.13 : Principe de l'essai Vickers 51

Figure III-14 : Micoduromètre..... 52

Figure III-15 : Microscope optique……52

CHAPITRE IV :

Figure IV-1 :(a, b) microstructure du papier d'emballage des médicaments 54

Figure IV-2 : Microstructure du papier d'aluminium d'emballage du fromage..... 54

Figure IV-3 : Microstructure du papier d'aluminium se trouvant sur le marché sous forme de rouleaux 55

Figure IV-4 : Microstructure du papier d'aluminium d'emballage de chocolat 55

Figure IV-5 : Caractérisation microscopique des différents papiers d'aluminium dans le plan perpendiculaire au plan du laminage : PA- c'est le papier d'aluminium sous forme de rouleaux, PC- c'est le papier d'aluminium d'emballage du chocolat, PF- c'est le papier d'aluminium d'emballage du chocolat, PM c'est le papier d'aluminium d'emballage du médicament..... 56

Figure IV-6 : Microstructure au MEB du papier d'aluminium en rouleaux, après polissage au papier abrasif (4000) 58

Figure IV- 7 : Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage du chocolat, après polissage au papier abrasif (4000)..... 59

Figure IV-8: Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage du fromage, après polissage au papier abrasif (4000)..... 60

Figure IV-9: Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage des médicaments, après polissage au papier abrasif (4000) 61

Figure IV-10 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage des médicaments après 7 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl..... 62

Figure IV-11 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage des médicaments après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl..... 62

Figure IV-12 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du chocolat après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl 63

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure IV-13 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du fromage après 9 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl 64

Figure IV- 14 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du fromage après 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl 65

Figure IV-15 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium sous forme de rouleau après 9 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl 66

Figure IV- 16 : morphologie de la corrosion du papier d'aluminium sous forme de rouleau après 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl 66

Figure IV- 17 : Potentiel de la corrosion libre du papier pour emballage du chocolat 67

Figure IV-18 : Potentiel de la corrosion libre du papier pour emballage du fromage 67

Figure IV-19 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage du médicament 68

Figure IV-20 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'aluminium sous forme de rouleaux 68

Figure IV-21 : potentiel de la corrosion libre des différents papiers d'aluminium en absence du champ magnétique permanant 69

Figure IV-22: potentiel de la corrosion libre des différents papiers d'aluminium en présence du champ magnétique permanant 69

Figure IV-23 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'aluminium en rouleaux en présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 71

Figure IV-24 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'aluminium en rouleaux en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 72

Figure IV-25 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du fromage en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 73

Figure IV-26 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du chocolat en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 74

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure IV-27 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du chocolat présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 75

Figure IV-28: (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du médicament en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 76

Figure IV-29: (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du médicament en présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion 77

Figure IV-30 : effet du champ magnétique sur la courbe de polarisation (Log (i) fonction de E, a) : papier sous forme de rouleau, b) papier chocolat, c) papier médicaments 78

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I-1 : les différents isotopes de l'aluminium 8

Tableau I-2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante 10

Tableau I-3 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion 15

Tableau I- 4 : Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés 17

CHAPITRE II :

Tableau II-1: résumé des résultats ISOCORRAG..... 36

Chapitre IV :

Tableau IV 1 : Résistance à la polarisation des différents papiers en présence et en absence du champ magnétique permanant 79

Tableau IV-2 : micro-dureté Vickers des différents papiers selon deux directions 80

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

INTRODUCTION GENERALE

Parmi les matériaux les plus répondus dans différents domaines, on trouve l'aluminium et ces alliages ce lui ci semble suivre une voie semblable à celle des matériaux composites et son domaine d'application s'accroît de plus en plus.

L'aluminium est le troisième élément présent à la surface de la terre, il est le métal le plus utilisé dans l'industrie et autres applications. Il est généralement employé sous différentes formes comme papiers et feuilles d'emballage dont on s'intéresse.

L'aluminium et ses alliages sont destinés à être mis au contact direct des produits alimentaires pour une petite, moyenne et longue durée, ils sont très utilisés dans les emballages alimentaires et des médicaments.

Pour l'utilisation du papier d'aluminium en contact des denrées alimentaires, celui-ci doit être le plus inerte possible vis-à-vis des produits alimentaires.

Pour l'application de ce principe d'inertie, des textes autorisant la mise en service de l'aluminium et ses alliages dans le domaine d'emballage alimentaire, doivent définir les conditions d'utilisation (composition, critère de pureté…) assurant l'aptitude au contact alimentaire, la sécurité du consommateur et la réduction du risque d'intoxication instantanée et à longue durée de l'organisme du consommateur. Un certain nombre de directives ont ainsi été adoptées surtout dans certains pays du monde et ont été transposées par voie d'arrêté, pour la protection du consommateur.

Une première question se pose toujours : est ce que l'aluminium induit une toxicité de l'organisme du consommateur ?

En effet l'emploi de l'aluminium et de ses alliages laisse les gens s'en doutent de sa toxicité sur la santé publique.

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Or l'Aluminium est omniprésent dans notre vie quotidienne de la forme la plus inoffensive et normale, à la plus sournoise et dangereuse (on en trouve dans certaines prothèses dentaires notamment), 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...

Une deuxième question se pose : d'où provient et comment se retrouve la dose d'aluminium dans les aliments emballés par l'aluminium ?

La dose suscitée provient de l'emballage en aluminium après dissolution ou oxydation de ce dernier, lors de son contact avec les aliments emballés riches en différents acides. Ceci est le résultat de la corrosion de l'aluminium et ses alliages en présence du milieu alimentaire contenant des éléments et des substances pouvant jouer le rôle de moteur de corrosion.

Maintenant une troisième question s'impose : est ce que la conservation des aliments emballés dans l'aluminium et ses alliages, dans un réfrigérateur fonctionnant avec un moteur électrique, induisant un champ magnétique, amplifie la corrosion et la dissolution de l'aluminium ou bien non ?

L'objectif de notre travail est d'étudier l'évolution du phénomène de corrosion (la morphologie et la cinétique) du papier d'aluminium en fonction du temps en présence et en absence d'un champ magnétique permanent. De comparer la qualité des différents papiers existant dans le marché Algérien (papier médicament, papier chocolat, papier fromage et le papier qui se vend en rouleaux). Pour ce faire, nous avons suivi le potentiel de la corrosion libre et le courant de la corrosion libre, dans une solution composée de l'eau distillée associé à une faible concentration en chlorure de sodium (0,3 % de NaCl), comparable à la quantité de chlorure de sodium dans les aliments. Nous avons tracé les courbes de polarisation et de passivation des différents papiers d'aluminium suscités. Nous avons suivi la morphologie de corrosion des différents papiers par microscopie optique et microscopie électronique à balayage. Nous avons mesuré la microdureté des différents papiers dans deux directions différentes du papier.

Les résultats de cette étude ont montré que le comportement des quatre papiers vis-à-vis de la corrosion est différent, ceci implique que dans le marché

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Algérien il ya des papiers d'aluminium de différentes qualités et avec une nuisance différente d'un papier à un autre. La présence du champ magnétique influe sur la cinétique et la morphologie de la corrosion des différents papiers.

Ce présent mémoire est subdivisé en deux parties :

Partie Bibliographique comprenant deux chapitres

- Chapitre I : L'aluminium et ses alliages
- Chapitre II : La corrosion de l'aluminium et de ses alliages

La deuxième partie traite l'étape expérimentale à travers deux chapitres

- Chapitre III : Techniques et dispositifs expérimentaux
- Chapitre IV : Résultats et discussions

Les résultats réalisés sont synthétisés par une conclusion générale.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre I

NOTIONS GENERALES SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I- L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

L'aluminium est le principal métal non ferreux industriel. De part sa facilité de mise en œuvre, sa résistance à la corrosion et sa bonne conductivité électrique, l'aluminium et ses alliages ont acquis une place importante dans bon nombre de domaines tels que l'électricité, les industries du bâtiment, de la chimie, des industries mécaniques et aéronautique ainsi que le matériel électroménager et l'emballage. En plus de ses caractéristiques celui-ci possède une affinité élevée vis-à-vis de l'oxygène.

Cette affinité entraine le recouvrement permanent de ce métal par une couche d'oxyde naturel. Cette couche joue un rôle important dans la tenue à la corrosion elle représente une couche de passivation. D'autre part, ce film d'oxyde ne permet pas de bonnes propriétés d'adhérence, résistance à l'usure et aux frottements.

Par ailleurs la mise au point des traitements surfacique visant la modification des propriétés physico-chimique superficielles des matériaux ou bien la protection de ce dernier a permis d'élargir le domaine d'utilisation des alliages d'aluminium.

I-1- L'Aluminium

L'Aluminium, sous forme de lingots, peut être soumis aux traitements thermomécaniques dans le but de produire des pièces et des profilés de construction mécaniques et métalliques.

Les principaux procédés de mise en forme de l'aluminium et ses alliages sont, le laminage, l'extrusion, le forgeage et le moulage. L'organigramme de la figure I-1 présente les procédés de mises en forme et les produits qui en découlent. Les produits obtenus à partir des alliages de corroyages sont identifiés comme produits semi-fini, alors que ceux obtenus par les procédés de fonderie, sont considérés comme produits finis. Les produits semi-finis sont appelés à d'autres transformations, dites secondaires, comme la fabrication, avant d'être utilisés **[1].**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Le laminage

Les produits laminés sont des produits d'aluminium les plus courant. Ce sont des produits minces que l'on appelle lames, feuilles ou plaques, en fonction de leur épaisseur (Figure I-2). Les lames ont une épaisseur inférieure à 0.15 mm, alors que les plaques ont une épaisseur ou égale à 6.35 mm. Entre ces deux limites, on produit des feuilles. Pour l'ingénieur en construction, les lames ont peu d'intérêt. La première étape du laminage consiste à nettoyer le lingot pour le débarrasser de sa couche d'oxyde et à le chauffer dans un four jusqu'à une température se situant entre 350 et 550 °C, en fonction des alliages. Le lingot est ensuite placé entre des rouleaux compresseurs, dans un mouvement de va-et-vient, il est aminci en diminuant progressivement la distance entre les rouleaux. Les lames et les feuilles, qui sont amenées à une épaisseur de 6mm pour le moment, sont enroulées à cette étape et sont refroidies pendant 24 heures avant d'être laminées à froid, à une température inférieure à 60°C pour en réduire d'avantage l'épaisseur. Le laminage à froid permet d'atteindre une épaisseur minimale de 0.1mm. Des laminoirs spécialisés peuvent enfin réduire l'épaisseur des lames jusqu'à 0,007 mm. Des étapes de recuit sont aussi nécessaires durant cette opération pour adoucir le métal **[1].**

Le laminage à froid induit une structure et une texture sensible à la corrosion (Figure I-3).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

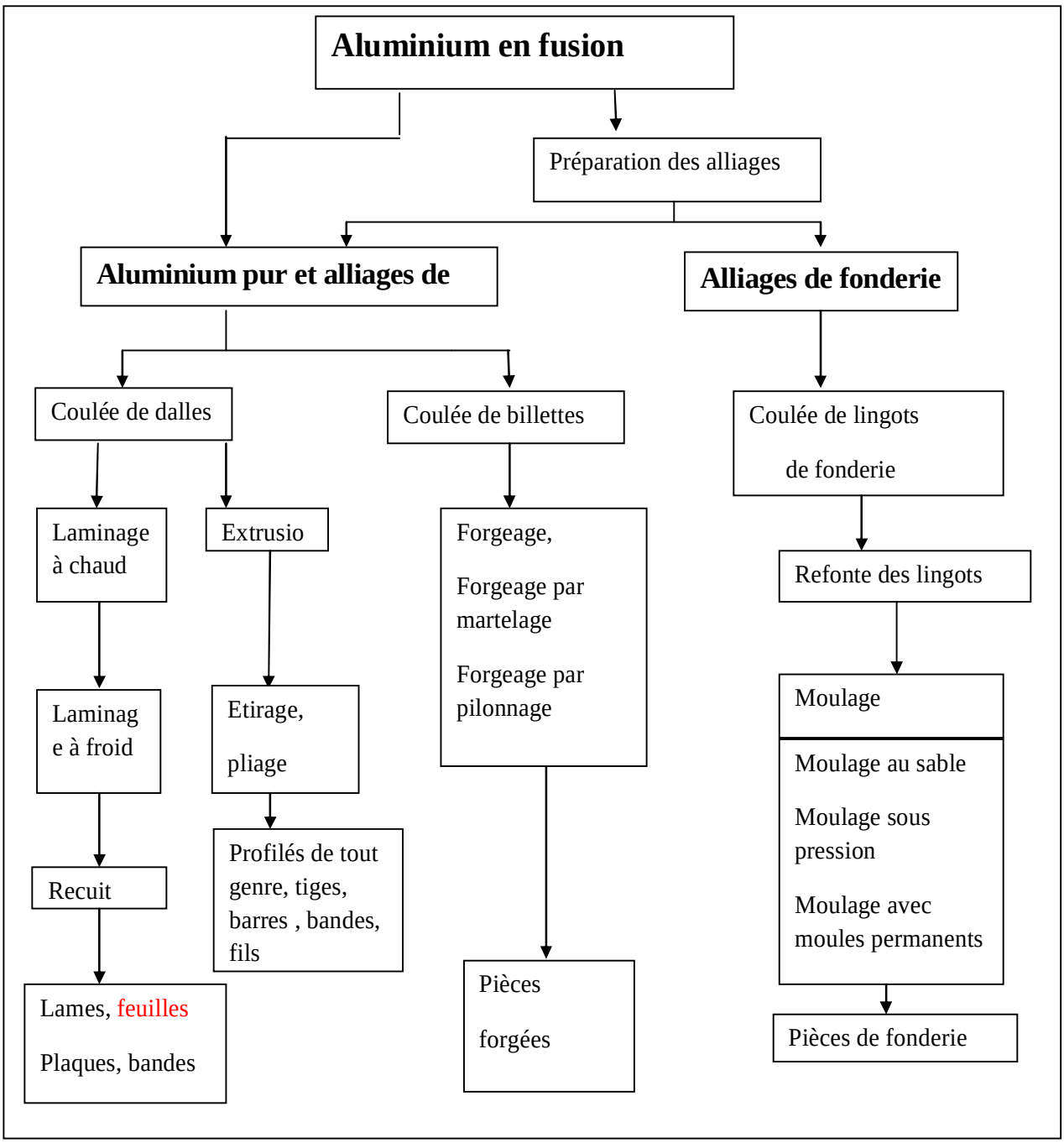


Figure I.1 : Organigramme des traitements thermomécaniques pour l'aluminium et ses alliages [1]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

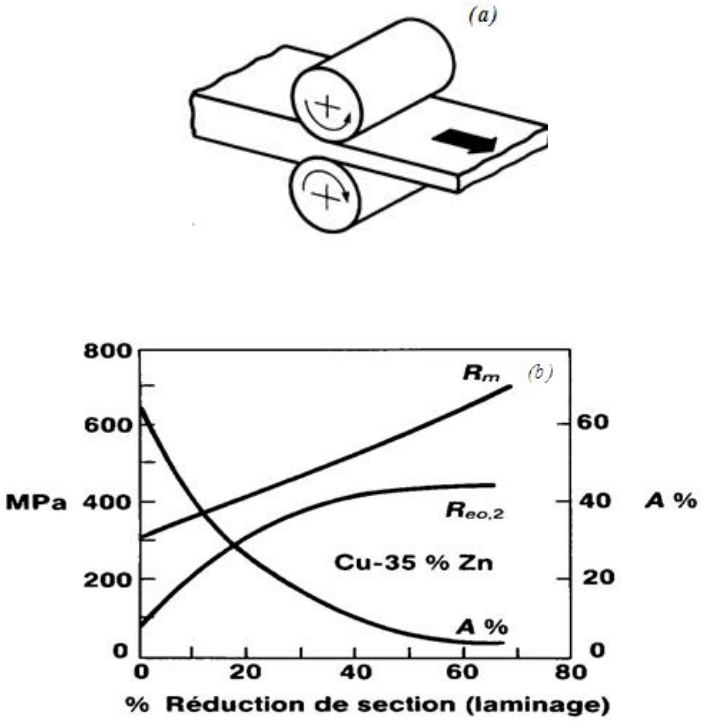


Figure I.2 : (a)procédé de laminage des matériaux métalliques, (b) évolution des propriétés des métaux avec le taux du laminage [1]

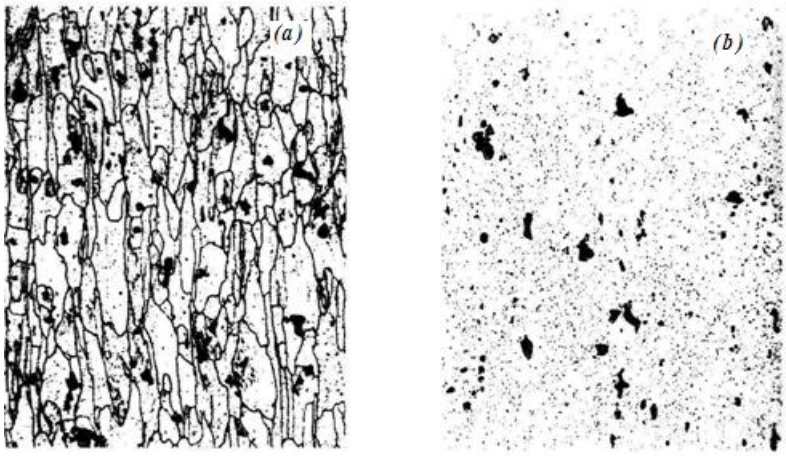


Figure I.3 : Aspect micrographique d'un alliage d'aluminium(a) après laminage à froid (b) sans laminage à froid [1]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-2-Propriétés de l'Aluminium [2]

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

I-2-1- Structure atomique

L'aluminium pur possède un symbole chimique **Al**, a pour numéro atomique Z= 13 lequel correspondant à 13 électrons répartis sur les couches orbitales s et p de la manière suivante :1s2,2s2,2p6,3s2,3p1

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

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

I-2-2- Isotopes de l'aluminium

La plupart des isotopes de l'aluminium ont une demi-durée de vie très courte à l'exception de 26Al. (tableau I-1).Ils sont à l'état de traces (concentration < 10^{-4}%)).

tableau	Isotopes de	L'aluminium			
isotopes	Abondance	Masse (^{12}C)	Demi-vie	Produite de désintégration	Energie de la particule(MeV)
^{23}Al	-	23.004265	0.47s	$ß^+$	12.24
^{24}Al	-	23.999941	2.07s	$ß^+$	13.87
^{25}Al	$<1,5.10^{-4}$	24.990429	7.17s	$ß^+$	4.27
^{26}Al	-	25.986892	$7.1*10^5$ans	$ß^+$	4.00
^{27}Al	100	26.981539			
^{28}Al	$<5.10^{-5}$	27.981910	2.25 min	$ß^-$	4.642
^{29}Al	$<2.10^{-5}$	28.980446	6.5 min	$ß^-$	3.68
^{30}Al		29.982940	3.68 s	$ß^-$	8.54
^{31}Al		30.983800	0.64 s	$ß^-$	7.9
^{32}Al		31.9880	33 ms	$ß^-$	12.8
^{34}Al		33.9965	0.05 s	$ß^-$	16.3

Tableau I.1 : Différents isotopes de l'aluminium [6].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-2-3- Structure cristalline

L'aluminium est un métal dont la structure cristalline est cubique à face centrée (CFC), figure I-4, a un paramètre de maille a = 0,4049596 nm à 298 K. son rayon atomique est de 0,182 nm.

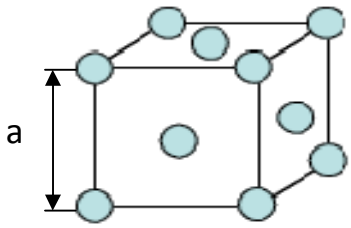


Figure 1. 4 : Structure cristalline de l'aluminium

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

I-2-4- Température de fusion de l'aluminium

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

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

I-2-5- Point d'ébullition

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

I-2-6- Masse volumique

Parmi les métaux usuels, c'est l'aluminium qui est le plus léger. La masse volumique mesurée à partir des paramètres cristallins, et à 20 °C : 2.7g/cm^3.

I-2-7- l'enthalpie de vaporisation

(Encore couramment appelée chaleur latente de vaporisation) au point d'ébullition 2767K (2494°C) est de : 290,93 kj.mol^{-1}(69,5 kcal.mol^{-1}), soit 10,76kj.g^{-1}

.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-2-8- Propriétés optiques

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium est élevé, de l'ordre de 80% dans le spectre visible. Il dépond de l'état de la surface du métal. C'est l'aluminium déposé sous vide en couche mince qui présente la réflectivité la plus élevée, supérieure à 90%dans le spectre visible. Une surface rugueuse perd beaucoup en pouvoir réflecteur. Le pouvoir réflecteur dépond du titre de l'aluminium non allié c'est la raison pour laquelle les « **produit s grand brillant** » sont en aluminium à 99,99%.

I-2-9- Propriétés mécaniques

L'aluminium est trois fois moins rigide que les aciers, son module de Young est de 70 000 MPa contre 210 000MPa pour les aciers de construction. Les caractéristiques de traction dépondent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique.

Module d'élasticité (MPa)	Charge de rupture (MPa)	Limité d'élasticité 0,2% (MPa)	Ar (%)
68 000	80 à 100	30 à 40	25 à 30

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante

- **Coefficient de poisson**

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

- **Aptitude à la compression de l'aluminium**

Comme pour tous les métaux il faut d'énormes pressions pour que le volume subisse une rétraction, de quelques pour-cent.

I-2-10- Propriétés chimiques

L'aluminium présente un bon comportement avec l'eau de mer (en particulier les alliages Al-Mg).D'autre part il a un mauvais comportement en présence de certains acides minéraux (chlorhydriques, sulfurique) ou organiques (trichloracétique).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-3- Atouts de l'aluminium et de ses alliages

I-3-1 Légèreté (faible densité)

La légèreté est l'une des atouts de l'aluminium auquel on pense spontanément, au point qu'on a très longtemps utilisé l'expression « alliages légers » pour désigner ce qu'on appelle maintenant alliages d'aluminium. L'aluminium est le plus léger des métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg /m^3, soit presque trois fois moindre que celle des aciers. Il consiste de ce fait 80% des poids des avions actuels. Il est très utilisé dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobiles. Bien que, en tonnage, la production de l'aluminium ne présente qu'un peu plus de 2% de celle des aciers. Ce métal et ses alliages occupent la seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable [3].

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

I-3-2 Conductivité thermique

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

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

Dés qu'il est question d'échange thermique, l'utilisation de l'aluminium est toujours envisagée, pourvu bien sûr que le milieu s'y prête quand il s'agit d'échange liquide-liquide ou liquide-gaz. Les applications des échangeurs en aluminium sont très nombreuses : automobiles, véhicules industriels, aéroréfrigérants, climatisation, dessalement de l'eau de mer, énergie solaire, refroidisseurs dans l'électronique [3].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-3-3 Conductivité électrique

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

L'aluminium est utilisé dans les câbles téléphoniques, sous terrains et sous-marins, dans la réalisation des postes blindés isolés sous hexafluorure de soufre (SF_6), pour la protection contre les champs électriques ou magnétiques.

I-3-4 Tenue à la corrosion

La bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et ses alliages lui confère une place importante dans l'industrie. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes ; aussi bien dans les édifices publics (pyramides du Louvre, toiture d'une église à Rome) que pour les habitations individuelles **[4].**

Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité explique le développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi d'une longue durée de vie, facilité d'entretien même sans protection et d'un aspect esthétique du fait que les produits d'oxydation de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture.

I-3-5 Aptitude aux traitements de surface [3]

Les traitements de surface que ce soit pour l'acier ou l'aluminium ont pour objectif :

- La modification de la dureté superficielle ;
- La décoration du métal selon les besoins d'utilisation ;
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûre ou le noircissement.

I-3-6 Diversité des alliages d'aluminium [3]

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

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

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

I-3-7 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 réfusion 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 **[5].**

I-3-8 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 pilage, 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. En revanche, il est recommandé d'affecter un atelier au travail des alliages d'aluminium, séparé de celui des aciers et surtout de celui des alliages cuivreux **[3].**

I-4- Alliages d'aluminium

Les matériaux non alliés ont généralement peu d'application parce qu'ils présentent des propriétés singulières, ils sont souvent limités à un champ d'application très restreint. Afin d'améliorer leurs caractéristiques on procède souvent à l'addition d'autres éléments à des quantités mesurées **[6].**

I-4-1- Classification des alliages d'aluminium

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

I-4-1-1 Alliages de corroyage

Ils sont coulés en fonderie sous forme de plaque ou de billettes ensuite transformés par laminage ou par filage tôles, ou profilés. Ces demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique, architecturale, électrique,…où ils sont assemblés par soudage, rivetage, visage,…etc **.**

Les alliages de corroyage sont :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-4-1-1-1 Alliage avec durcissement structural [7]

Le durcissement est obtenu par une gamme de traitement comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante. Ces alliages sont désignés selon la norme AFNOR NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'association de l'aluminium. Ces alliages sont :

- Les alliages aluminium-cuivre de la série 2000 se caractérisent par une résistance mécanique élevée après revenu, une bonne tenue à la chaleur, une résistance chimique moins bonne que celle des alliages sans cuivre et des disponibilités de soudage limitées. Parmi ces alliages on trouve les 2014 et 2024 qui sont très utilisés en aéronautique, armement, mécanique et sport.
- Les alliages aluminium-magnésium-silicium de la série 6000 sont les alliages de filages par excellence, ils présentent par ailleurs, une résistance mécanique moyenne mais surtout une bonne résistance à la corrosion et une excellente aptitude a l'oxydation. Parmi ces alliages on cite : la nuance 6060 qui est utilisée dans la menuiserie métallique et l'alliage 6101 qui est actuellement le constituant majoritaire de tous les câbles des lignes de transport de l'énergie électrique.
- Les alliages aluminium-zinc de la série 7000 sont essentiellement présentés par les alliages AL – Zn – Mg – Cu à haute résistance. Parmi ceux employés en aéronautique et armement on trouve la nuance 7049 et 7075 par contre les nuances 7010 et 7050 sont employés dans la construction des avions modernes (airbus, Boeing) en raison de leur résistance mécanique à la fatigue et à la corrosion.

I-4-1-1-2 Alliages sans durcissement structural

Le niveau de caractéristiques mécaniques dans ce cas est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations par laminage et filage. Ces alliages sont désignés par :

- L'aluminium non allié de la série 1000 qui se caractérise par une résistance mécanique relativement faible, une excellente résistance à la corrosion atmosphérique et une très bonne aptitude au soudage et à la mise en forme. Les nuances 1080A (Al 99,80%), 1050 (Al 99,50%) et 1100 (Al 99,00%) sont très utilisés dans le bâtiment, l'industrie chimique et dans l'emballage. L'aluminium raffiné 1199 (Al 99,99) est réservé à la décoration et aux condensateurs électrolytiques.
- les alliages –silicium de la série 5000 ayant une résistance moyenne, une bonne aptitude à la déformation et au soudage, un excellent comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. Parmi ces alliages on cite: Les

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

nuances 5005 et 5083. Leurs applications sont très importantes et variées comme le transport terrestre l'industrie chimique.

- Ø les alliages aluminium-manganèse de la série 3000 qui ont les propriétés voisines de la série 1000 avec une résistance élevée (par exemple l'alliage 3003 qui tend à remplacer l'aluminium non allié).

I-4-1-2 Alliages de moulages

Les alliages de moulages sont utilisés en fonderie pour l'application des pièces par coulée du métal liquide. Par ce procédé, des pièces aux formes plus au moins complexes sont élaborées comme poignés de portes' blocs moteurs…

Les éléments d'additions sont rajoutés à degrés divers dans la composition des alliages d'aluminium de corroyage ou de moulage. On peut distinguer trois catégories :

- Ø Eléments d'additions majeurs se résumant dans le cuivre, magnésium, manganèse, silicium et le zinc, et dont la teneur peut dépasser un pourcentage important dans l'alliage.
- Ø Eléments d'additions mineurs dont la teneur dans l'alliage dépasse rarement 1%, elle est très souvent de 0,1 à 0,3% dans les alliages de corroyages. Ce sont : le chrome, le fer, le nickel et le cobalt.
- Ø Eléments d'additions très spéciaux réservés à des alliages d'usage particulier comme le plomb dans les alliages de décolletage. Ces éléments se trouvent en générale à des teneurs inferieur à 0,5 et engendre le béryllium, l'argent…..L'ensemble des différents types de l'aluminium en fonction de leurs résistances à la corrosion est résumée dans le tableau suivant.

Résistance à la corrosion

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

Tableau I.3 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion [3]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-4-2- Désignation des alliages d'aluminium [6]

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

- Ø 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.
- Ø 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 précisée dans les registres de désignation de l'Aluminium Association qui entérine les nouveaux alliages, pour les autres séries.
- Ø Le second chiffre chiffres correspond aux variantes de l'alliage de base brevetées pour des applications particulières, exemple : 7175, 7475, variantes de du 7075.

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

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

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

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

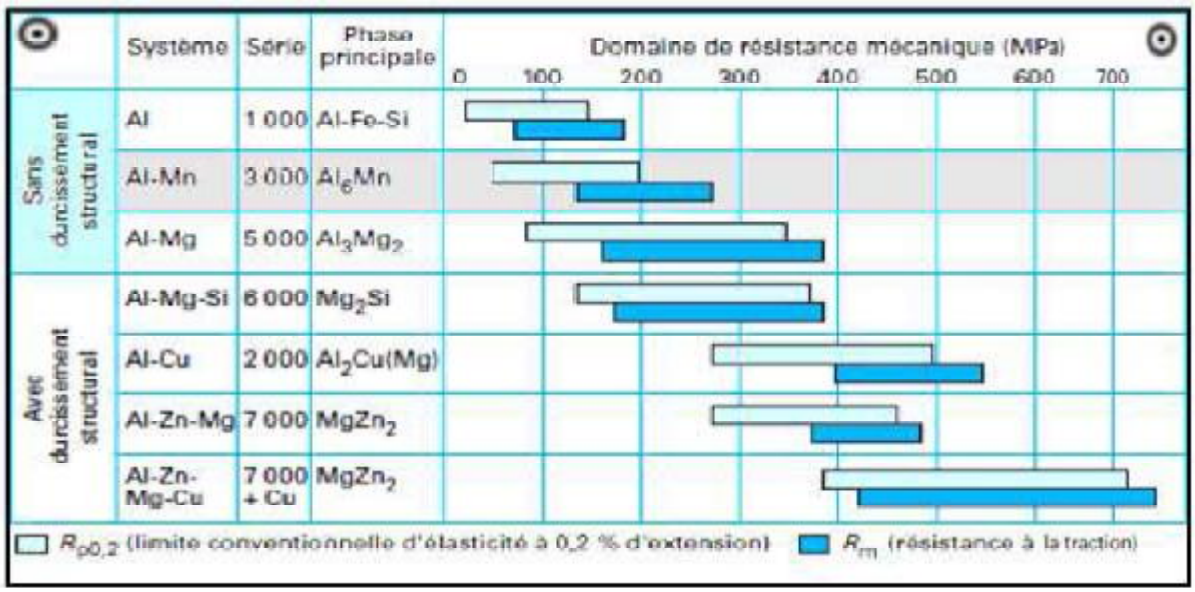


Tableau I.4 : Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés [8].

I-5- Utilisation du papier d'aluminium dans le domaine alimentaire :

L'emballage effectué dans les bonnes conditions contribue à la préservation de la durée de la conservation d'aliment.

- **Papier d'aluminium en rouleaux**

  La **feuille d'aluminium** est une feuille mince, d'environ 0,02 mm d'épaisseur, composée d'aluminium de grande pureté. À cause de cette minceur et de la ductilité du métal, elle est très flexible, ce qui lui permet d'épouser pratiquement toutes les formes. Il se vend plusieurs milliers de tonnes de feuille d'aluminium chaque année, car c'est un produit peu coûteux, réutilisable et qui ne s'endommage pas s'il est conservé dans son emballage d'origine.

- **Papier d'aluminium utilisé pour l'emballage des produits alimentaires**

  (Papier au chocolat et papier au fromage…)

  Le papier sert à emballer et à protéger des aliments. Utilisé tel quel, il permet également d'emballer des aliments qui seront cuits dans une enceinte fermée (exemples : pommes de terre au four, oignons au barbecue, poisson en papillote). Le papier aluminium a souvent deux faces différentes, une mate et une brillante. Cela résulte du procédé de fabrication quand deux feuilles sont laminées en même temps. Les deux faces ont les mêmes propriétés de conservation des aliments.

  L'emballage effectué dans des bonnes conditions contribue à la préservation de la durée de la conservation d'aliments. Le secteur de l'emballage alimentaire est

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

devenu un secteur dynamique grâce aux innovations apportées dans le cadre du combat pour la préservation de l'environnement,

- **Papier d'aluminium utilisé en pharmacie**

  L'Aluminium est obtenu à partir d'un minerai d'origine naturel : la bauxite.

  L'Aluminium est proposé comme médication antiacide dans la protection gastro-intestinale sous forme de différents sels tels que carbonate, hydroxyde, silicate ou phosphate. Sous une forme hydrosoluble l'aluminium présente un risque toxique.

  Bien que l'aluminium est utilisé dans les médicaments mais on le retrouve sous forme de feuilles minces servant à emballer des produits médicamenteux.

I-5-1 Applications alimentaires de l'aluminium [3]

L'aluminium est utilisé dans l'industrie alimentaire soit dans le matériel de traitement des aliments : cuves, bacs, ustensiles de cuisine, appareils à découper, à malaxer, soit pour l'emballage.

Dans l'emballage, il peut être :

- non protégé,
- protégé par vernis ou un film plastique (couche organique),

L'épaisseur du vernissage est comprise entre 5 et 15 µm suivant la nature des produits alimentaires. Il a pour but de protéger l'aluminium contre l'action prolongée des produits alimentaires agressifs telle que la sauce tomate. En fait, la plupart des emballages des conserves, de jus de fruits, de sodas(les boites boisson), etc., sont vernis.

La feuille mince en 1050A, 1100, 1200, 8011, etc., sert à l'emballage de courte durée des aliments (c'est l'aluminium « ménager »). Les emballages souples sont constitués de complexes collés « feuille mince en aluminium –films de polymères », dont l'étanchéité est assurée par l'aluminium.

Les produits d'emballages en aluminium sont très variés : boites de conserve, boites boisson, boitiers aérosols, tubes souples, capsules de bouchage**.**

Compte tenu de sa bonne conductivité thermique et de sa facilité de mise en forme en chaudronnerie, l'aluminium a été très utilisé en laiterie et en fromagerie, et à bord des bateaux de pèche, dans les cales à poissons

Dans certaines industries agroalimentaires telles que la laiterie, l'emploi de l'aluminium a régressé depuis 1950 au profit de l'acier inoxydable pour deux raisons : le noircissement et le nettoyage**.**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-5-2 Tenue de l'aluminium aux contacts des produits alimentaires

A la température ambiante, l'aluminium résiste bien aux acides organiques dilués et très dilués au contact desquels il subit un décapage plus au moins important suivant la nature de l'acide.

Il n'est pas possible de donner une liste détaillée de la tenue de l'aluminium au contact des aliments. Cette question a fait l'objet de longs développements dans plusieurs publications.

D'une manière générale, les produits alimentaires bruts ou traités ne subissent pas l'altération d'aspect ni de gout au contact de l'aluminium, à l'exception des vins, des liqueurs ou des alcools. L'aluminium peut subir une corrosion par piqûres dans ces milieux [3].

I-5-3- Aluminium et alliages d'aluminium revêtu - Usage unique

Contact longue durée (emballages) [9]

- **Domaine d'application**

Objets en aluminium ou alliage d'aluminium revêtus d'un revêtement organique, destinés à un usage unique, pour un contact de longue durée. Il s'agit d'emballages, les principaux exemples étant :

Boîtes pour conserves appertisées ; capsules ; boites pour boisson ; blisters pharmacie ; Boîtiers sous pression ; Opercules produits laitiers vernis ; tubes ; Feuille mince pour fromage fondu ; coupelles.

- **Limites d'acceptabilité**

L'aluminium doit respecter les critères de pureté prévus par l'arrêté du 27 août 1987 :

Fe + Si < 1% ; Ti≤ 0,15 % ;

Chacun des éléments suivants : Cr, Zn ,Cu , Mn, Mg ,Ni , Sn ≤ 0,10 ;

Chacun des éléments suivants : Pb, Tl, Be, et chacune des impuretés : ≤ 0,05% ;

La teneur en cuivre peut atteindre 0,20 % si celles de chrome et de manganèse sont inférieures à 0,05%.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-5-4- Différents types aluminium dans le domaine alimentaire [9,10]

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

I-5-5- Métabolisme et toxicité de l'aluminium [10]

La toxicité du métabolisme se fait par :

Absorption : par voie cutanée, par voie pulmonaire, par voie digestive.

Transport : Transferrine, Albumine, Citrate

La quantité contenue dans l'organisme est comprise entre 30 à 50 mg et ne doit pas dépassé 50 mg, l'élimination d'une quantité allant 5 à 20 µg/jour d'aluminium se fait par voie rénale, l'absorption d'une quantité supérieure à 20µg/jour peut provoquer une accumulation de l'aluminium dans l'organisme.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-6 Influence du champ magnétique sur le papier Aluminium

I-6-1 propriétés magnétiques [11]

Les premières histoires de magnétisme datent du premier siècle avant J.-C. dans les écrits de Lucrèce et les pouvoirs magiques de la magnétite sont mentionnés dans les écrits de Pline l'Ancien. La magnétite est très longtemps restée entourée de superstition et était supposée avoir des pouvoirs magiques tels que guérir les maladies, éloigner les mauvais esprits et dissoudre les navires construits en fer. Contrairement à l'ambre (résine d'arbre fossilisée) la magnétite était capable d'attirer des objets sans avoir à être frottée auparavant, ce qui en faisait une pierre bien plus magique ! Non seulement cette pierre attirait les objets mais une aiguille de fer restait en contact avec elle devenait elle aussi "magnétique" et aux environs de 1000 ans après J.-C. les Chinois ont trouvé qu'une telle aiguille, suspendue librement sur un axe, pointait nord-sud : la boussole était née. Mais on était encore loin de la compréhension scientifique du phénomène qui n'a débuté qu'en 1600 avec les expériences de William Gilbert (médecin et physicien anglais).

Les matériaux magnétiques ont une importance technologique considérable, grâce à leur grande richesse de comportement. Leur rôle est prépondérant dans le stockage de l'information (bande d'enregistrement Hi-fi, disque dur d'ordinateur, …)

Les propriétés magnétiques des matériaux proviennent des courants électriques existant à l'échelle microscopique en leur sein. Ces courants tirent principalement leur origine de deux phénomènes :

- le mouvement des électrons autour de leur noyau, appelé mouvement orbital
- leur mouvement de rotation autour d'eux-mêmes, appelé spin

Puisque les électrons sont des particules chargées, tout mouvement, qu'il soit de rotation ou de spin, peut être assimilé à une boucle de courant élémentaire. Et une boucle de courant donne naissance à un champ magnétique.

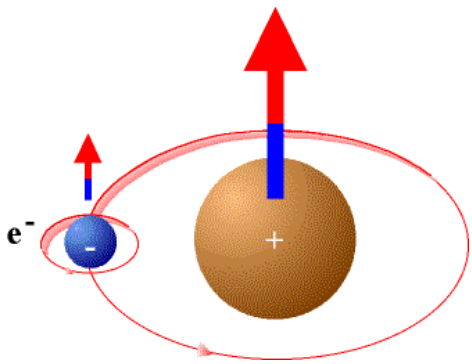


Figure I.5 : Boucle de courant élémentaire [11]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I-6-1-1 Quelques définitions

Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur H, il se crée dans les matériaux un champ d'induction magnétique B :

$$B = mH \qquad \text{[Tesla]}$$

μ est la perméabilité magnétique, elle s'exprime en henry ($H.m^{-1}$). L'unité d'induction magnétique est le tesla (T). Le champ magnétique, H, qui est en général créé par la circulation d'un courant électrique dans un solénoïde, s'exprime en $A.m^{-1}$.

On utilise souvent pour caractériser le comportement magnétique des matériaux, la perméabilité relative μ_r :

$$m_r = \frac{m}{m_0}$$

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, $4\,\pi\,10^{-7}$ $H.m^{-1.}$

On définit le vecteur aimantation M, qui représente le champ magnétique local induit par le champ magnétique extérieur H.

$$B = m_0(H + M) = m_0(H + c_r H) = m_0 H(1 + c_r) = m_r H$$

où χ_r représente la susceptibilité magnétique relative.

Selon les valeurs de μ_r, on regroupe les substances en trois classes :

- les diamagnétiques $\mu_r <= 1$. L'intensité de la magnétisation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Phénomène faible, réversible, affecte tous les corps et souvent caché par un autre phénomène.
- les paramagnétiques $\mu_r >= 1$. Comme le diamagnétisme, c'est un phénomène faible et réversible, mais tend à renforcer l'action du champ inducteur. Le champ induit décroît cependant avec la température. Exemple les métaux.
- les ferromagnétiques $\mu_r >> 1$. Dans le cas de substances ferromagnétiques (seule une minorité de matériaux pour les métaux tels que le fer, le nickel, le cobalt ou certains oxydes comme la magnétite), les moments magnétiques de chaque atome s'alignent spontanément dans des régions appelées domaines et cela même en l'absence de champ magnétique externe. En général, le moment magnétique total est nul parce que les différents domaines ont des orientations différentes et leurs effets s'annulent. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température, appelée point de Curie. Si les moments magnétiques d'une substance sont antiparallèles dans les

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

domaines et de grandeurs différentes, le moment magnétique total est différent de zéro. La substance est alors appelée ferrimagnétique.

I-6-1-2 Solides magnétiques [12]

I-6-1-2-1 Le diamagnétisme

Un diamagnétique parfait offre une grande résistance au passage du champ magnétique. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans les matériaux. La perméabilité est donc nulle.

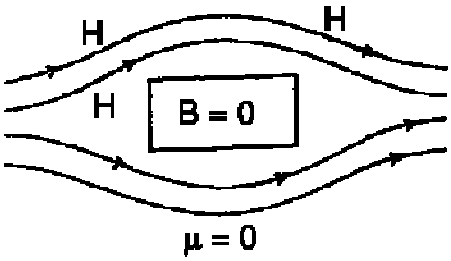


Figure I.6 Champ magnétique d'un matériau diamagnétique [11]

C'est l'attribut d'un matériel qui a une susceptibilité magnétique négative, c'est-à-dire que l'intensité de la magnétisation induite dans le corps par un champ H sera dans la direction opposée à H.

Tous les corps présentent un phénomène de diamagnétisme parce que son origine provient de la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur. Ce phénomène est réversible puisque lorsque le champ extérieur disparaît, l'action disparaît.

Exemples de diamagnétiques: graphite, gypse, marbre, quartz, sel, gaz rares, bismuth, cuivre et diamant.

I-6-1-2-2 Le paramagnétisme

Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques.

Dans un matériau paramagnétique, chaque atome a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, ces moments magnétiques s'orientent et augmentent le champ H appliqué.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

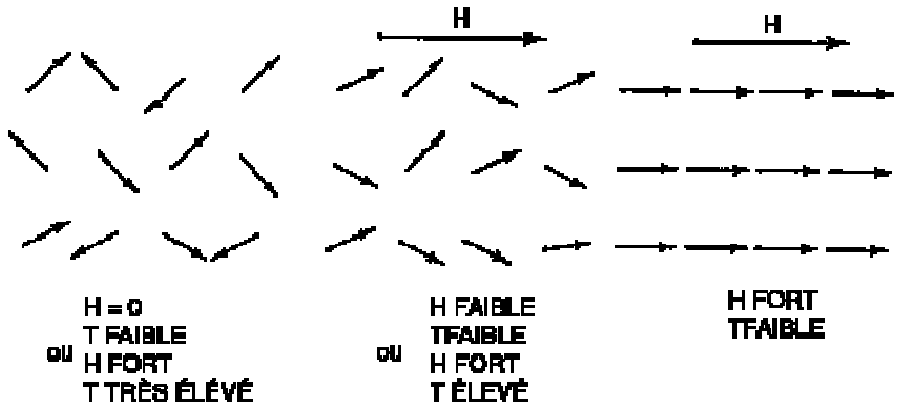


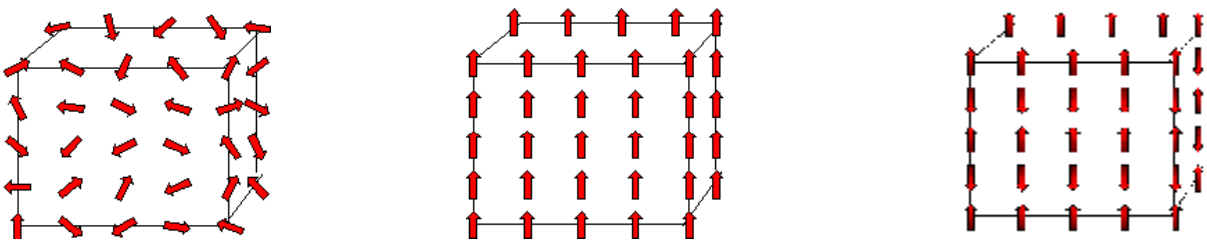
Figure I.7 Champ magnétique d'un matériau paramagnétique [12]

Action combinée de la température et d'un champ extérieur sur un matériau paramagnétique. Les vecteurs symbolisent les courants magnétiques atomiques.

Comme pour le diamagnétisme, il s'agit d'un phénomène faible et temporaire. Contrairement au diamagnétisme, la réponse d'un matériau paramagnétique vise à renforcer l'action du champ H extérieur. Notons que ce phénomène diminue avec l'augmentation de la température puisque l'agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires. La plupart de métaux sont paramagnétique.

I-6-1-2-3 Le ferromagnétisme

En général, les moments magnétiques atomiques d'une substance paramagnétique sont orientés au hasard (Fig.1.8 a). Cependant, dans trois classes principales de substances cet arrangement devient régulier.



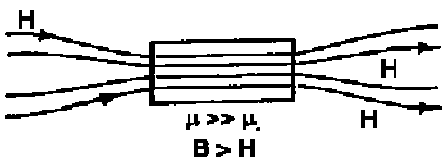
a b c

Figure I.8 Champ magnétique d'un matériau ferromagnétique[11]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dans les substances ferromagnétiques, les moments sont parallèles dans des volumes relativement grands de substance appelés domaines (ces domaines sont observables au microscope) c'est le cas des métaux de transition fer, cobalt, nickel, mais aussi de divers oxydes (Fig.1.8 b). La magnétisation d'un matériau ferromagnétique correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction. À la différence des paramagnétiques, cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H extérieur. La région de l'espace dans laquelle tous les moments magnétiques sont orientés selon une même direction s'appelle un domaine (de Weiss) et les limites entre ces domaines, des parois (de Bloch).

Si on place un matériau ferromagnétique dans un champ H extérieur, les parois vont se déplacer de manière à renforcer le champ H extérieur. Si H augmente beaucoup, le domaine favorablement orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé à saturation.



Dans les substances antiferromagnétiques, les atomes sont arrangés de façon telle que deux atomes voisins ont des moments opposés. C'est le cas des sels ioniques des métaux de transition: Fe_2O_3, MnF_2, etc. (Fig.1.8.c)

Dans les deux cas on observe un ferromagnétisme et un antiferromagnétisme à des températures relativement basses. À plus hautes températures l'ordre observé, parallèle et antiparallèle disparaît et les solides redeviennent paramagnétiques.

I-6.2- l'aimant [13]

Un aimant est un matériau développant naturellement un champ magnétique. Il existe actuellement quatre familles d'aimants : ferrite, alnico (très connu sous la forme d'un fer à cheval), néodyme fer bore (terres rares), samarium cobalt (terres rares). Un aimant possède un pole nord et un pole sud. Les pôles magnétiques de même nature se repoussent, ceux de natures différentes s'attirent. Les aimants sont donc des dipôles magnétiques, dont les pôles sont inséparables; l'existence d'un monopole magnétique étant exclue jusqu'a preuve du contraire.

Les aimants contiennent presque systématiquement des atomes d'au moins un des éléments chimiques suivants : fer, cobalt ou nickel ou de la famille des Lanthanides (terres

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

rares). Les aimants naturels sont des oxydes mixtes de Fer II et de Fer III de la famille des ferrites. Ce sont des matériaux magnétiques durs.

I-6.3 Aimant permanent

Les matériaux les plus utilisés actuellement sont :

1. Le Ferrite
2. Le Néodyme Fer Bore (Terres rares)
3. Le Samarium Cobalt (Terres rares)
4. L' Alnico-Ticonal

I-6.4 Formes des aimants permanants

Tous ces types d'aimants permanents se déclinent en barreaux, disques, blocs ou anneaux.

I-6-5 Magnétisation des aimants permanents

Ils peuvent être magnétisés de façon Isotrope (champ non orienté) ou Anisotrope (à champ magnétique orienté).

L'aimant permanent est toujours au minimum bipolaire, soit un pôle nord et un pôle sud.

I-6-6Champ magnétique de l'aimant permanent

Le champ magnétique est composé de lignes de force qui traversent l'aimant permanent de part en part suivant l'axe des pôles pour se refermer à l'extérieur de l'aimant et que l 'on nomme « les lignes de champs ».

Le champ magnétique est composé de 2 pôles minimum soit un pôle nord et un pôle sud. Le départ des lignes de force s'effectue toujours du pôle nord vers le pôle sud. Pôle nord : émissif donc pôle positif +, Pôle sud : réceptif donc pôle négatif -.

Le champ magnétique est un paramètre qui a un pouvoir d'orienter et d'homogénéiser certaines particules en mouvement ou non dans une direction dépendante de l'orientation du champ magnétique, de ce fait le champ magnétique peut agir et influencer le phénomène de corrosion en modifiant la cinétique et la morphologie de cette dernière.

La prise en considération de la présence du champ magnétique dans cette étude, est due au fait que tous les produits alimentaires emballés sont destinés à être préservés dans un réfrigérateur, qui est équipé par un moteur électrique induisant un champ magnétique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE II

CORROSION DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE II : CORROSION DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

II.1 Introduction

La corrosion est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs paramètres, dépendant du milieu ou du métal. Les cas de corrosion sont parfois difficiles à expliquer parce que la cause de la corrosion n'a pas été identifiée ou que les bases théoriques ne permettent pas toujours d'apporter une réponse satisfaisante. La tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de nombreux facteurs inhérents au métal lui-même, à la solution dans laquelle il est placé et des contraintes physiques aux quelles il est soumis (par exemple un champ magnétique, un chauffage, une traction.etc…).

D'une manière générale et d'après la littérature, la corrosion est définie comme étant :

- L'attaque des matériaux par interaction physique avec d'autres matériaux.
- La dégradation des matériaux ou de leurs propriétés par interaction chimique avec leurs environnements.
- Le retour des métaux et alliages à leurs états stables états de minerais.

Mais sa définition par rapport à notre centre d'intérêt n'est pas simple. Il s'agit de la détérioration lente, progressive ou rapide des propriétés d'un métal : l'aspect, l'état de surface, les caractéristiques mécaniques, etc., suite à son interaction avec l'environnement dans lequel il est placé : atmosphère, eau, eau de mer, solutions diverses, milieux organiques, etc. ainsi que la dissolution induisant la contamination de la solution en contact avec le matériau (aliments, médicaments) [14].

Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible : elle détruit le matériau ou réduit ses caractéristiques, le rendant inutilisable pour une application prévue et elle contamine la solution en contact avec le matériau.

Parfois la corrosion est un phénomène bienvenu, voire souhaitée. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion. Par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique [14].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II.1.1 Facteurs de la corrosion [3]

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

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.

- **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.

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

- **Les traitements thermiques**

Les traitements thermiques des alliages à durcissement structural : mise en solution, trempe et revenu provoquent des changements dans la nature et dans la répartition des constituants métallurgiques en présence dans ces alliages. Ils ont une incidence très importante sur la sensibilité de ces alliages à certaines formes de corrosion, en particulier la corrosion intercristalline, et la corrosion sous contrainte.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **L'état de surface**

L'état de surface a une influence sur la tenue à la corrosion de l'aluminium. L'expérience montre que les surfaces rayées, grattées ou meulées sont des sites où se développent préférentiellement les corrosions [15].

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

II-2 Tension de l'électrode à l'équilibre- équation de Nerst et résistance à la polarisation

II-2.1 Tension de l'électrode à l'équilibre- équation de Nerst [16]

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

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

Lorsqu'un métal est de valence **n** est plongé dans un milieu conducteur des ions M^{n+} passent dans la solution tandis que dans le métal apparaissent des charges négatives. Le passage des ions Mn+ 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.

Le potentiel d'équilibre est un potentiel à courant nul. C'est le potentiel que prend un métal par rapport à la solution dont s'accompagne un équilibre chimique et thermodynamique. Ceci est caractérisé par une relation appelé relation de **Nerst** :

$$\eta = E_{i\neq 0} - E_{i=0} = E° + (RT/nF)\log([Ox]/[Red]) \quad \text{…II.1}$$

Avec:

ŋ: la surtension et **i :** courant d'échange

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

E°**:**le potentiel standard

R**:** constante d'équilibre (8,314j/K.mol**)**

F**:** constante de Faraday (965000)

Ox/Red**:** l'activité de l'oxyde et de réducteur.

II.2. 2 Courbe de polarisation

La courbe de polarisation est la courbe de la 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

II.2. 3 Résistance à la polarisation

La résistance à la polarisation est ($\Delta E/\Delta i$**)** sur la courbe de polarisation aux alentours de $E = 0$

II.2. 4 Courbe potentiel de la corrosion libre

C'est la courbe représentant l'évolution du potentiel de la corrosion en fonction du temps E(t).

II-3 Aperçu sur la corrosion de l'aluminium

L'emploi de l'aluminium et ses alliages constitue une solution efficace dans la lutte contre la corrosion.

L'aluminium très réactif, présente une forte affinité pour l'oxygène. Les produits d'oxydation formés, recouvrent le métal d'un film compact et isolant qui le rend passif.

La résistance à certains milieux agressifs et la faible densité, font que l'aluminium trouve des applications dans le bâtiment, les appareils ménagés, l'industrie aéronautique et l'industrie automobile [3].

La corrosion de l'aluminium en milieu aqueux se fait suivant la réaction électrochimique : $Al \longrightarrow Al^{3+} + 3é$

Les considérations thermodynamiques montrent que les seules réactions de réduction possibles sont :

$$3H_2O + 3é \longrightarrow 3OH^- + 3/2\ H_2$$

$$½\ O_2 + H_2O + 2é \longrightarrow 2OH^-$$

Globalement, la corrosion de l'aluminium dans un milieu aqueux électrolytique neutre s'écrit [22] :

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

Le diagramme de Pourbaix de l'aluminium (figure II.1) dans l'eau montre que la couche d'oxyde est stable dans la gamme de PH comprise entre 4 et 9. Par contre, elle se dissout en milieu acide ($pH < 4$) pour donner des ions Al^{3+}, et en milieux alcalins ($Ph > 9$) pour donner des ions aluminates AlO_2^-.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La formation d'alumine se fait par migration des ions Al^{3+} du métal vers le film pour réagir avec les (OH^-) de l'eau. L'épaisseur du film naturel varie entre 40 et 100 A°, suivant les conditions dans lesquelles, il est formé (figure II.2).

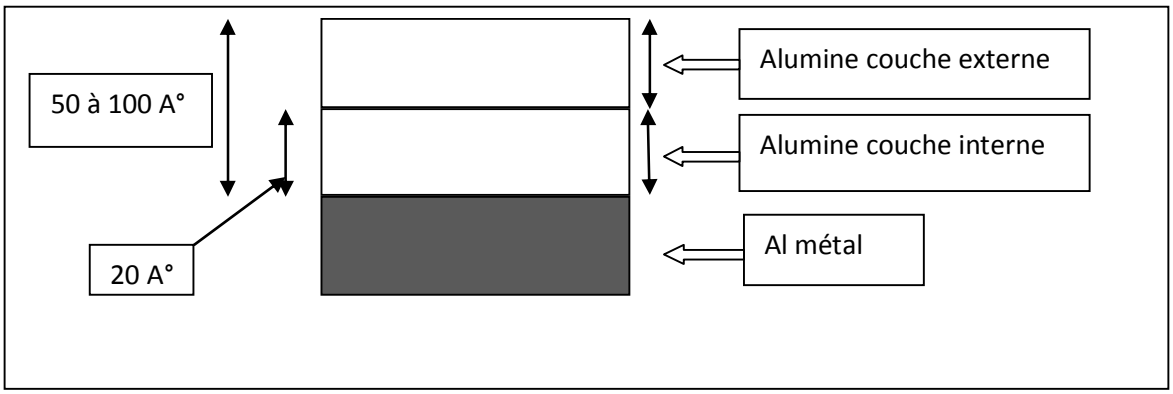


Figure II.1 : Couches d'oxyde naturel sur l'aluminium d'après VARGEL [3].

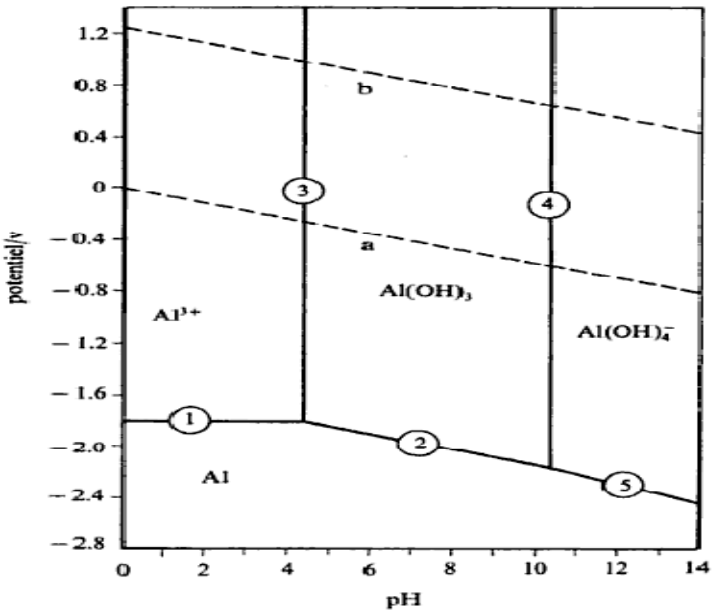


Figure II.2 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium dans l'eau [5]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II-4-Principaux paramètres qui influencent la corrosion de l'aluminium

II-4-1-Facteurs liés au milieu

L'aluminium est un métal passif, sa résistance à la corrosion est directement liée au pouvoir protecteur de sa couche d'oxyde.

L'oxyde d'aluminium est amphotère, il n'est pas stable qu'en milieu neutre (4< pH <9), donc l'aluminium ne peut être utilisé qu'en milieu neutre.

Des essais de corrosion d'échantillons dans différentes solutions de différents pH confirment la bonne résistance à la corrosion de l'aluminium en milieu neutre de Ph 4 à 9 et la faible résistance en dehors de cette avec quelques exceptions

- pas de corrosion dans l'acide nitrique;
- pas de corrosion dans silicate de soude;
- pas de corrosion dans l'ammoniaque;
- peu de corrosion dans l'acide acétique;

De façon générale, l'agressivité des milieux acides et alcalins est plus forte pour les produits minéraux que pour les produits organiques.

L'aluminium est présent en abondance dans la croûte terrestre (le plus abondant après l'oxygène et le silicium) sous forme d'oxyde (bauxite) dont on extrait l'aluminium métal.

II-5- Différents modes de corrosion de l'aluminium et ses alliages

L'aluminium ne se corrode pas d'une manière spécifique, mais sous diverses formes suivant des facteurs inhérents au métal (éléments d'alliages) et au milieu.

II-5-1 Corrosion générale (uniforme)

Pour les alliages d'aluminium, les problèmes de corrosion généralisée sont intimement liés au PH du milieu. Lorsque le PH s'écarte du voisinage immédiat de la neutralité (4 < PH < 9), la corrosion générale se traduit par une attaque rapide. Il existe naturellement, un certain nombre d'exceptions à cette règle. L'aluminium peut ainsi se passiver en milieu acide si le pouvoir oxydant du milieu est très élevé (par exemple, l'acide nitrique fumant). De même, l'aluminium et ses alliages peuvent résister en milieux alcalins grâce à certains effets d'inhibition par exemple, l'ammoniaque concentrée, les bases organiques faibles, les silicates, le béton.

Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion générale des alliages d'aluminium passifs est très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de 5 micromètres par an, ce qui peut entrainer à la longue une

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

évolution progressive de l'état de surface vers un aspect inesthétique du à une variation de la rugosité [21].

II-5-2 Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse)

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est une manifestation particulière de la corrosion par piqûres. L'acidification du milieu corrosif emprisonné dans une caverne interdit en effet, dans ce cas, la répartition homogène des piqûres, et concentre ainsi en un seul point la pénétration de la corrosion [17].

II-5-3 Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres est une forme sérieuse de dommage dans les structures aéronautiques car les alliages d'aluminium, en particulier les alliages d'aluminium de haute résistance, utilisés pour les structures avioniques, sont sensibles à la corrosion par piqûres quand ils sont exposés à un environnement agressif. Ce type est dangereux et difficile à détecter car elle s'initie par piqûre qui se propage à l'intérieur du cœur du matériau où la dissolution devient rapide ce qui fragilise le matériau [6].

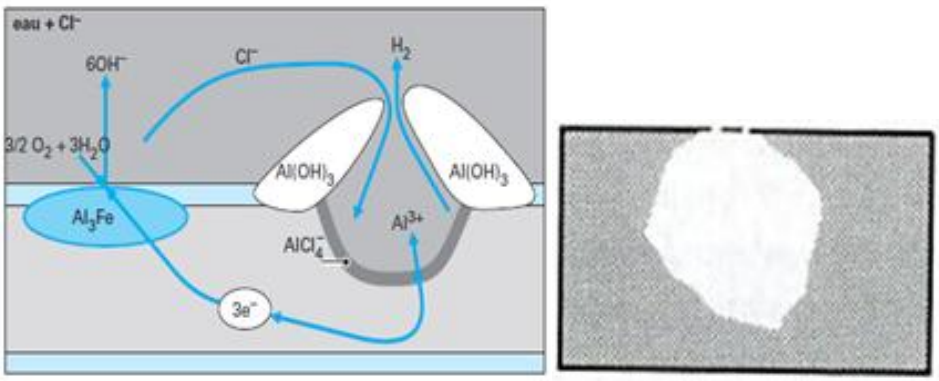


Figure II.3 : mécanisme de la corrosion par piqûre [8]

Condition de corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres désigne une attaque locale d'une surface passive. Elle nécessite la présence d'anions agressifs, notamment les ions Cl^-, Br^- et I^-, et d'un oxydant. Elle se manifeste par la formation de petites cavités (piqûres), alors que la surface passive reste intacte. Le nombre et la forme des piqures de corrosion varient selon les conditions expérimentales . on trouve des piqûres profondes montrant une attaque cristalline , des piqûres occuleuses et des piqûres hémisphèriques brillantes. La dimension des piqûres varie de quelques micromètres à quelques milimètres[6].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II-5-4 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 [17].

II-5-5 Corrosion feuilletante

La corrosion feuilletante des alliages de l'aluminium est une corrosion intergranulaire particulière. Les produits de corrosion ont un volume plus important que le métal de base, donnant à la structure l'aspect d'un livre feuilleté [3]. Elle se produit sur des alliages qui ont une texture fibreuse à la suite d'un laminage par exemple. Elle se manifeste par une attaque des joints de grains suivant l'orientation de la texture. Les grains très plats tels des feuillets. Ce type de corrosion est lié à la participation de phases intermétalliques aux joints de grains et aux sous-grains [18].

II-5-6 Corrosion sous contrainte

Elle est définie comme l'attaque par un milieu corrosif sur un matériau sous contraintes. Ces contraintes proviennent soit des charges appliquées, soit des contraintes résiduelles. La corrosion sous contraintes se traduit par la présence de deux types de fissures, des fissures intergranulaires qui se propagent en suivant les limites de grains et des fissures transgranulaires qui s'étendent indifféremment à travers les grains. Ces deux types de fissures peuvent se retrouver dans le même alliage suivant l'environnement et la structure métallique. Il est évident que l'action simultanée des contraintes et de la corrosion donne des résultats désastreux même si toutes les combinaisons de métaux et de milieux ne sont pas susceptibles d'entrainer de la corrosion sous contrainte [19].

II-5-7 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.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Des bactéries autotrophes, capables de croître uniquement au dépend d'éléments minéraux, en tirant leur énergie de la réaction chimique ou lumineuse.

  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 Résinae. Ce type de corrosion n'est qu'un cas particulier de la corrosion électrochimique [3].

II-5-8- Corrosion transcristalline et la corrosion intercristalline

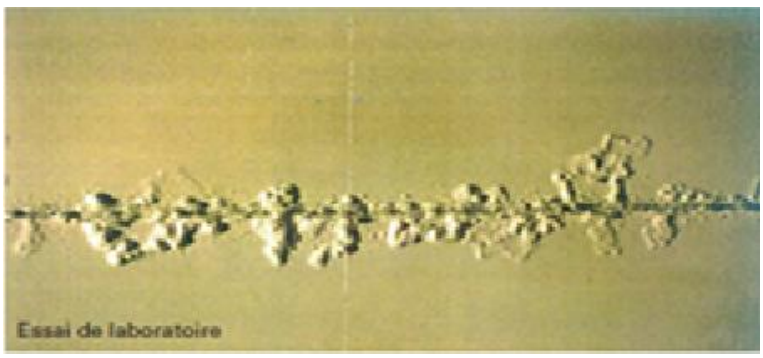
C'est une corrosion qui se déroule à l'intérieur du métal, à l'échelle du grain et elle peut se propager de deux manières :

- Dans toutes les directions : la corrosion affecte indifféremment tous les constituants métallurgiques, il n'y a pas de corrosion sélective. C'est la corrosion transgranulaire (trancristalline), ainsi appelée parce qu'elle progresse à l'intérieur des grains [6].
- suivant des chemins préférentiels : la corrosion progresse le long des joints de grains. Cette forme de corrosion intercristalline consomme très peu de métal, et c'est pourquoi les pertes de poids ne sont pas un bon indicateur de cette forme de corrosion. Elle n'est pas décelable à l'œil nu [3].

II-5-9 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.



FigureII.4 Corrosion filiforme de l'aluminium peint [8]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II-5-10 corrosion galvanique

Entre deux métaux dissemblables plongés dans un électrolyte, existe une différence de potentiel. Si ces métaux sont en contact (c'est-à-dire connectés électriquement), un courant électrique s'établit. Le métal le moins noble (qui a un potentiel de dissolution moins élevé dans la série galvanique) joue le rôle d'anode et se corrode. C'est ce qui se passe dans une pile sèche avec le zinc [3].

II-6 Protection des alliages d'aluminium contre la corrosion

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

II.7 - Corrosion atmosphérique de l'aluminium

L'aluminium est un métal oxydable, ce qui ne veut pas dire que l'aluminium n'est pas un métal résistant à la corrosion. Durant la fin des années 1990 l'ISO (International Standard Organisation) a demandé à un groupe de travail de mesurer la corrosion atmosphérique des métaux usuels. Des échantillons d'aluminium, d'acier, de zinc et de cuivre de 150mm*100mm*1mm ont été testés en atmosphères naturelles sur les cinq continents (12 pays et 48 sites d'expositions y participés) pour des durées 1 à 4 ans. Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau suivant [8].

Métal	Corrosion (en µm/an)		
	Moyenne	Minimale	Maximale
Al	0,5	0,07	1,7
Fe	47,7	0,82	373
Zn	2,26	0,44	17,5
Cu	1,66	0,09	6,16

Tableau II.1 résumé des résultats ISOCORRAG [8]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ces résultats montrent que la corrosion atmosphérique moyenne est de 0.5µm/an pour l'aluminium, 100 fois plus faible que pour l'acier, avec un minimum de 0.07 pour une atmosphère sèche (désertique) et un maximum de 1.7µm/an pour une atmosphère marine très humide.

II.8- Passivité de l'aluminium

L'Aluminium est un métal passif parce qu'il possède en sa surface une couche mince d'oxyde, le film passif, qui sépare le métal de l'électrolyte, contrairement aux métaux actifs, qui conservent un contact direct avec la solution. La plupart des métaux et des alliages résistant bien à la corrosion sont à l'état passif [14].

L'Aluminium est habituellement recouvert d'une couche dite protectrice d'alumine amorphe Al_2O_3 de 2 à 4 nm d'épaisseur [17]. L'épaisseur augmente avec la température, par exemple l'épaisseur est doublée pendant un traitement de 500 °C. Le film d'oxyde est très compact (V_{al2O3} / V_{Al} =1.4 avec V volume).

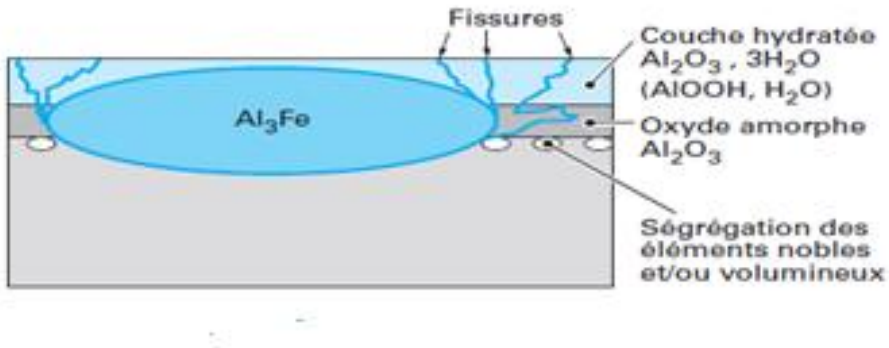


Figure II.5 Formation d'une couche de passivation sur un alliage d'aluminium [8]

II.9- Influence de la teneur en chlores

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 voisine de celle de l'oxygène. Les chlorures Cl^- comme les fluorures F^-, les bromures Br^- et les iodures I^- font partie des anions qui activent la corrosion de l'aluminium dans l'eau [3].

Les chlorures se substituent aux atomes d'oxygène dans le réseau de l'aluminium. Il en résulte une diminution de la résistance du film qui facilite le départ des atomes

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

d'aluminium qui diffusent dans l'eau. L'agressivité du milieu vis-à-vis des métaux en général et de l'aluminium en particulier dépend pour beaucoup de sa teneur en chlorure et en sulfates.

Compte tenu du pouvoir de pénétration du film d'oxyde naturel par les anions, en spécificité les chlorures, la densité et la profondeur des piqûres augment en général avec la teneur en chlorures.

Figure II.6 Profondeur de piqûre en fonction de la teneur en chlorures [6]

II.10 -Action des chlorures sur l'aluminium et ses alliages

Très abondant dans la nature : dans l'eau de mer qui contient entre 25 et 30 g/l de chlorures de sodium NaCl, dans les eaux saumâtres 3à4 g / l de NaCl, selon les eaux et les puits, dans les eaux de surfaces de 20 à 200 mg / l, selon la salinité de l'eau, ils contiennent l'élément le plus corrosif pour la plupart des métaux usuels.

Parmi les chlorures, de part de son abondance naturelle et l'utilisation qui en est faite, le plus important est le chlorure de sodium NaCl, le « sel » qui existe à l'état naturel dans l'eau de mer sous forme cristallisée dans les mines de sel.

L'aluminium et ses alliages (à l'exclusion de ceux qui contiennent des additions de cuivre importantes, série 2000 et 7000, aluminium - cuivre des alliages de fonderie) sont de tous les métaux usuels ceux qui résistent le mieux en milieu salé : que le sel soit sec, humide ou en solution. Des essais comparatifs ont en plus montré que la vitesse de corrosion décroît plus rapidement avec le temps [6].

L'expérience montre en effet que lors des premiers mois de contact avec les solutions des chlorures de sodium ou avec le sel lui-même à l'état de cristaux plus ou moins humide, l'aluminium se ternit et subit une corrosion par piqures très denses : entre 50 et 100 dm^2 dont la profondeur maximum varie suivant les alliages et l'état d'écrouissage de ceux-ci, entre 100

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

et 300 microns, mais les piqures une fois formées ne s'approfondissent plus passé la période initiale qui est de quelques mois.

II.11 Intoxication par l'aluminium

L'aluminium pénètre les tissus en se combinant à la ferritine à la place du fer. Il est un toxique cellulaire, conduisant progressivement les cellules à la nécrose ce qui génère les vacuoles comme dans les maladies à prions. Il se concentre sélectivement dans certains tissus : os, reins, systèmes nerveux. Les tissus qui manifesteront la plus grande sensibilité à ce toxique sont ceux dont les cellules se renouvellent peu ou pas du tout, et ou chaque cellule a une place irremplaçable au sein de chaque réseau, comme dans le système nerveux.

A l'heure actuelle la toxicité de l'aluminium est démontrée [20].

Certaines circonstances sont favorisantes :

- Les insuffisants rénaux (ayant des difficultés à éliminer et subissant de nombreux traitements), sont bien sûr plus sérieusement touchés.
- De même les personnes âgées compte tenu de la fragilisation de la barrière hémato-méningée.
- Les constantes bioélectroniques du milieu joueraient en favorisant la formation de telle ou telle forme chimique : certaines formes moléculaires comme l'ion aluminate [Al(OH)4-] ou L'hexahydrate octohédrique [Al(H20+++)].

Concentration sérique en aluminium

- Etat normal : inferieur à 15 µg par litre.
- Une altération des fonctions cérébrales est détectable à partir d'un taux de 60 µg.
- Les signes cliniques patents d'encéphalopathie apparaissent à partir de 100µg.

Sources officielles de l'intoxication

- L'eau de boisson
- L'industrie autour de l'aluminium (passage direct vers le cerveau par les récepteurs olfactifs, sans transiter par le sang).
- Utilisation de produits cosmétiques en contenant (antiperspirant par exemple).
- Certains médicaments (beaucoup de pansement gastriques).
- Des emballages alimentaires (surtout si le contenu est acide ou salé).
- Les casseroles et autres ustensiles en aluminium (attention à la feuille d'aluminium recouvrant un aliment dans un plat en inox par exemples : il y « effet pile » et passage d'ions d'aluminium dans l'aliment).

Les travaux se multiplient depuis vingt ans, prouvant l'influence de l'aluminium dans :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- La diminution des facultés cognitives.
- L'apparition de démences provoquant la maladie d'Alzheimer, il serait d'ailleurs impliqué officiellement dans la genèse de cette maladie : on en retrouve des concentrations importantes dans le cerveau des malades.

A noter que cette maladie d'Alzaheimer se caractérise comme intoxication par l'aluminium ou les maladies à prions [10,20].

II.12 Effets du champ magnétique sur la corrosion : La cinétique de la corrosion est contrôlée par trois phénomènes :

-le transfert de charges ;

- le transport de matière ;

- l'adsorption à la surface.

Le champ magnétique oriente les atomes dans une direction privilège, d'où celui-ci influe surtout sur le transport de matière.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE III :

Techniques expérimentales

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III-1 Introduction

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

III-2-Prélèvement des échantillons: nous avons prélevé les échantillons d'aluminium pour les essais de corrosion, la microscopie optique, électronique à balayage et microdureté à partir :

- De l'emballage du fromage en portion ;

  Celui-ci doit être de l'aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique, sont utilisés dans le cas du contact de longue durée, et un usage unique.
- Du papier d'aluminium sous forme de rouleaux ;

  Celui-ci doit être de l'aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique, sont utilisés dans le cas du contact de longue durée, et un usage unique.
- D'emballage de chocolat ;

  Celui-ci doit être de l'aluminium ou alliage non revêtu dans le cas du contact de durée variable et pour un usage unique.
- Et d'emballage de médicaments.

  Celui-ci aussi doit être de l'aluminium ou alliage revêtu d'un revêtement organique, sont utilisés dans le cas du contact de longue durée, et un usage unique.

  Les emballages de produits de large consommations et commercialisés en Algérie ont été choisis, pour bien viser l'intérêt de la santé publique.

III-3 Préparation des échantillons pour les essais électrochimique (préparation des électrodes).

La technique de préparation de l'électrode de travail est imposée par la forme et la dimension de celui-ci.

L'électrode de travail est constituée d'un assemblage du conducteur du matériau à étudier.

Préparation du conducteur (fil de cuivre de diamètre de 1,5 mm).

1ère Etape : dénuder les extrémités du fil de cuivre

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

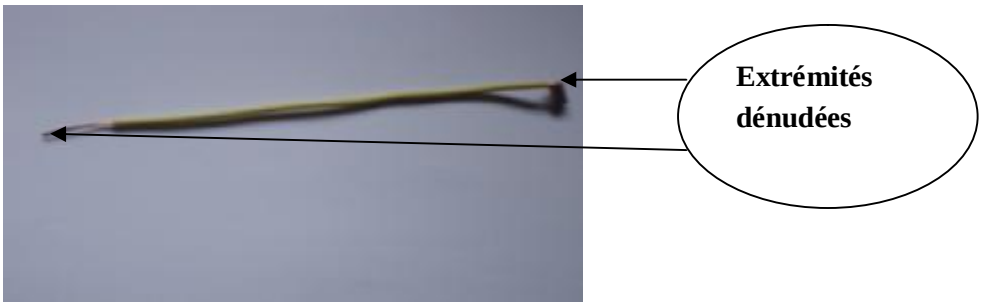


Figure III.1 : 1ère étape de préparation des électrodes

2ème Etape enroulement spirale d'une extrémité et remplissage des inters-spire par l'étain, pour minimiser l'effet de l'inductance de la bobine (enroulement spirale).

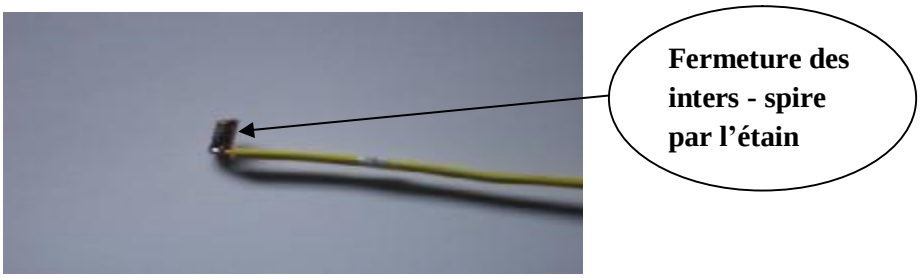


Figure III.2 : 2ème étape de préparation des électrodes

3ème étape : mise en contact de la deuxième extrémité du conducteur avec l'alliage et isolation du fil conducteur et de la surface inutile de l'échantillon par un film adhésif en plastique (la surface de travail est la même surface sur tous les échantillons).

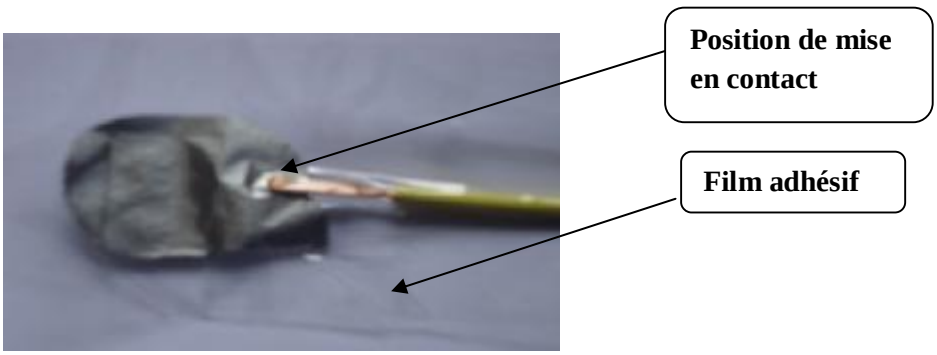


Figure III.3 : 3ème étape de préparation des électrodes

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III-4 Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et microdureté : les échantillons pour la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage ont été préparés presque de la même façon, une partie de ces échantillons ont été polis seulement avec le papier abrasif de grade 4000(figure II-4) en raison de leurs faible épaisseur, lavés et séchés à l'air chaud, sauf que les échantillons préparés pour la microscopie optique, en plus, ont été attaqués par le réactif de Keller, une autre partie de ces échantillons n'ont pas été polis.

Figure III.4 : Polisseuse utilisée

Trois types d'échantillons ont été préparés :

- les échantillons pour une observation microscopique au microscope optique de la surface du papier aluminium dans le but de voir la microstructure des différents papiers, ces échantillons étaient attaqués, ces échantillons ont été polis.
- Les échantillons pour une observation microscopique de la surface selon l'épaisseur, par la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage, ces échantillons ont été préparés pour vérifier est ce que les différents papiers ne sont pas revêtus ou vernis à la surface, ces échantillons n'ont pas été polis.
- Les échantillons pour l'observation de l'évolution de la morphologie de la corrosion par microscopie optique et microscopie électronique à balayage, ces échantillons n'ont pas été polis.

Caractérisation des propriétés microstructurales

2.1. Microscope optique :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Le microscope optique est composé de quatre parties essentielles :

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

Fonctionnement du microscope optique

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

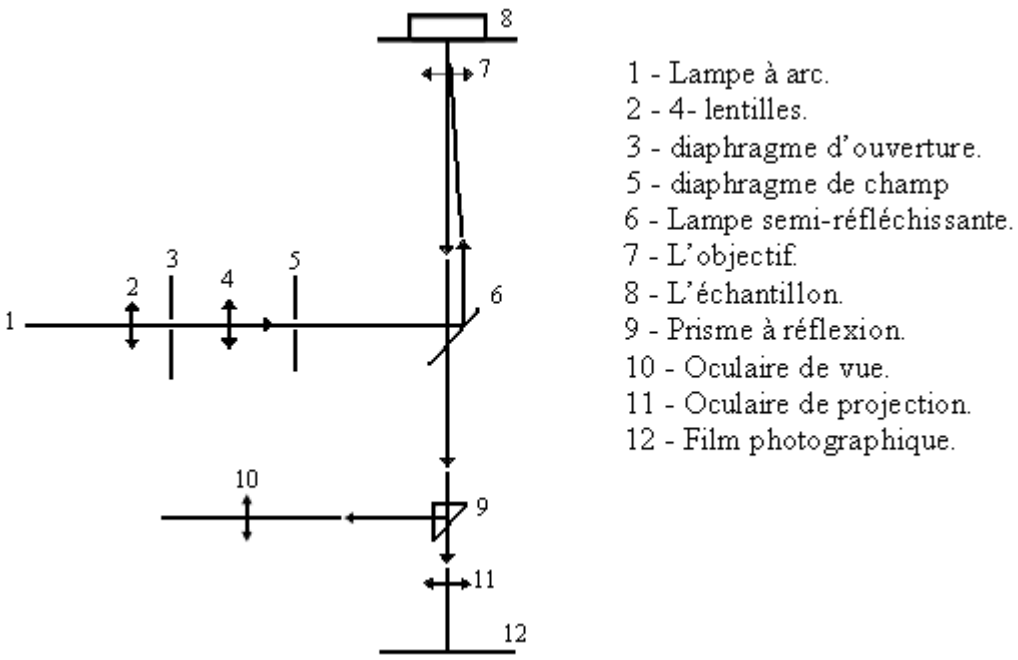


Fig.III.5 : Schéma d'un microscope métallographique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.2 Microscope électronique à balayage :

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

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

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

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

2.3. Microscope électronique à transmission :

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

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

Le pouvoir de résolution de ce microscope peut, dans les meilleures conditions, être aussi faible que 0.12 µ m et les grossissements peuvent atteindre 300000 fois. Les échantillons doivent être minces puisqu'ils sont traversés par le faisceau d'électrons, et de petites dimensions pour pouvoir être placés sur une grille de diamètre de 3 mm.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

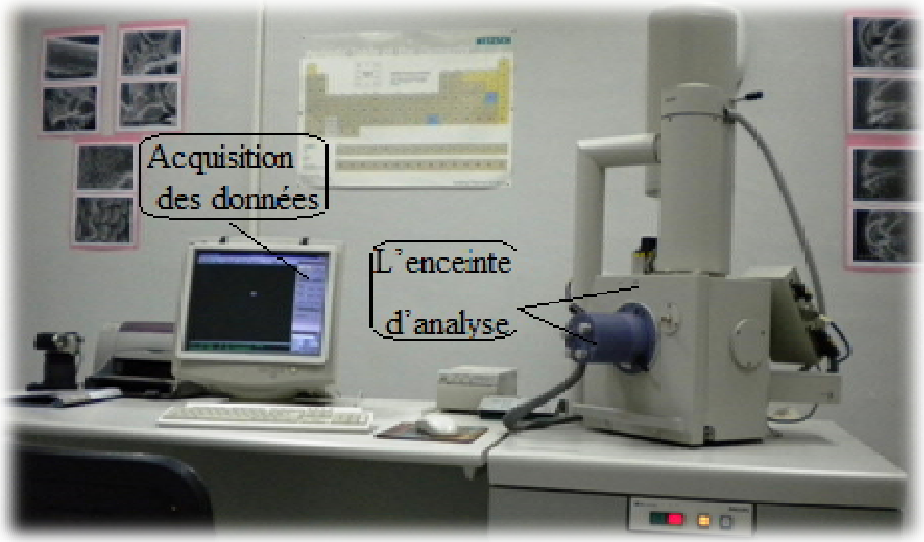


Figure III.6: Microscope électronique à balayage (MEB).

III.5 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 d'Ag/AgCl de potentiel E°= 0,195V, tandis que l'électrode choisie pour le tracé des courbes de polarisation et de passivation est l'électrode de calomel saturé en KCl de potentiel de E° = 0,241V.

Pour préparer l'électrode d'Ag/AgCl on a immergé un fil d'argent pendant quelques seconde dans l'eau de javel riche en (ClO^{-}) suite à cette opération une couche de AgCl se forme à la surface du fil d'argent d'où la production d'une électrode d'argent.

L'électrode Ag/AgCl est immergé par la suite dans une autre cellule contenant une solution de 0,3% NaCl, celle-ci jouera par la suite le rôle d'une cathode du fait que son potentiel est supérieur à celui des alliages d'aluminium car l'argent est plus noble que l'aluminium et ses alliages.

III-6 Préparation de l'essai de corrosion

On prépare une solution de l'eau salée à une concentration de 0,3% (3g/l) en présence et en absence d'un aimant permanent de forme circulaire, qu'on met dans un récipient en verre, tous les échantillons ont été immergés dans le récipient en même temps, tout en vérifiant que la surface libre (non isolée) est totalement trempée dans l'eau (Voir figure III.7).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

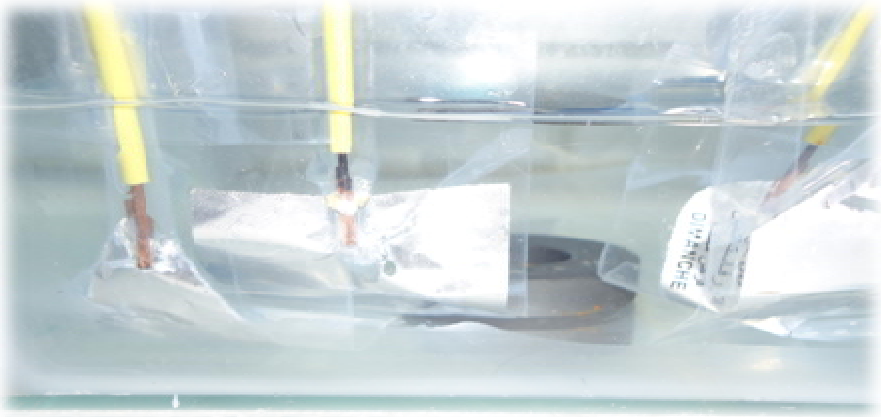


Figure III.7: Immersion des échantillons dans une solution de 0,3% de NaCl

III.7- Montage pour l'essai de corrosion libre

Au moyen d'un multimètre reliant l'électrode de travail et l'électrode de référence en Ag/AgCl, dans la solution de 0,3% de NaCl, on prend 5 mesures du potentiel et de la densité de courant de la corrosion libre, chaque heure, entre nos échantillons (en position d'anode) et l'électrode d'argent (on position de cathode) durant plusieurs jours en présence et en absence du champ magnétique.

L'essai de la corrosion libre qui nous permet surtout la mesure du potentiel de la corrosion libre, n'exige pas l'utilisation d'une électrode auxiliaire, car ce qui nous intéresse dans cet essai c'est le potentiel du courant traversant le circuit électrique en corrosion libre qui constitue un phénomène indépendant des excitations électriques externes.

Figure III.8 : Aimant permanant utilisé lors des essais électrochimiques

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

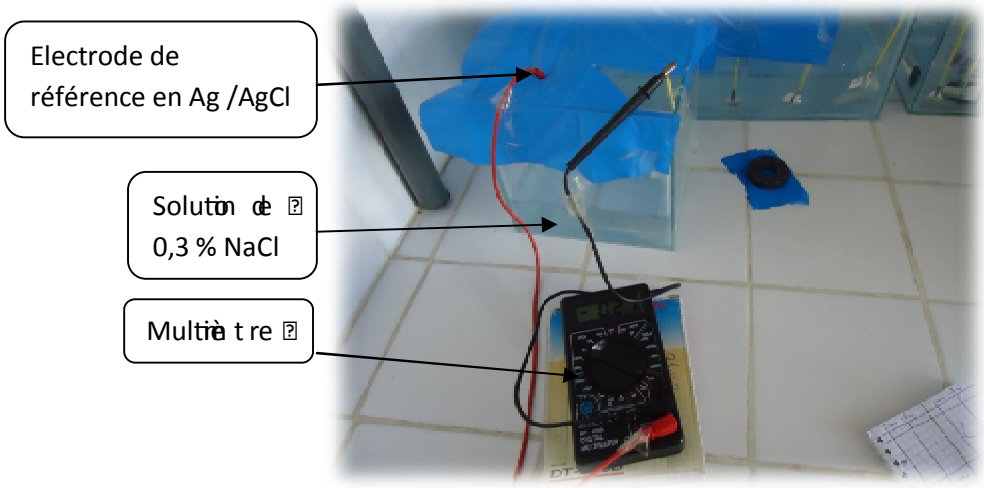


Figure III.9 : Montage pour les essais de la corrosion libre

III.8 Montage pour les essais potentiodynamiques

Montage pour les essais potentiodynamiques représentant le tracé des courbes densités de courant en fonction du potentiel (c.-à-d. le tracé des courbes de polarisations et courbes de passivations), ce tracé a été effectué dans le domaine du potentiel d'excitation allant de -1,5V jusqu'à 2,8V est donné par (la figure III.10) , dans ce montage nous avons utilisé une électrode de référence du calomel et deux contre électrodes en graphite. Nous tenons à signaler que les essais potentiodynamiques ont été effectués au laboratoire de métallurgie à l'école nationale polytechnique. Les essais potentiodynamiques nous ont permet de mesurer la résistance à la polarisation, le potentiel de corrosion, le potentiel de passivation, le courant de passivation et le courant passif et approcher la valeur de la densité du courant.

Le tracé des courbes de polarisation renseigne aussi sur la cinétique de l'étape la plus lente du processus global de corrosion qui se compose de différentes réactions élémentaires (transfert de charge, transfert de matière, adsorption …). Étant donné que la vitesse globale de réaction est déterminée par celle de l'étape la plus lente, le tracé des courbes de polarisation peut être exploité pour mesurer la vitesse de corrosion.

Trois types de courbes de polarisation sont obtenus en fonction de la cinétique de la réaction :

1) Cinétique d'activation (ou transfert de charge), dans ce cas on obtient une relation linéaire entre le potentiel et le logarithme du courant mesuré.

$$E = b \log I + a \quad \text{(Loi de Tafel)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

L'extrapolation de la droite de Tafel au potentiel de corrosion fournit le courant de corrosion).

2) Cinétique de diffusion (ou transfert de matière), dans ce cas les courbes de polarisation font apparaître un palier de diffusion auquel correspond un courant limite I_L. La vitesse de corrosion est égale à la densité du courant limite de diffusion.

c) Cinétique mixte : Grace à une correction de diffusion à l'aide de la formule :

$$1/I = 1/I^{*} + 1/I_L$$

Ou I est le courant mesuré, correspondant au processus mixte, I* le courant corrigé de la diffusion et I_L le courant du palier de diffusion, on obtient une relation linéaire de type Tafel et I_{corr} est obtenu par extrapolation au potentiel de corrosion, comme dans le cas d'une cinétique d'activation pure.

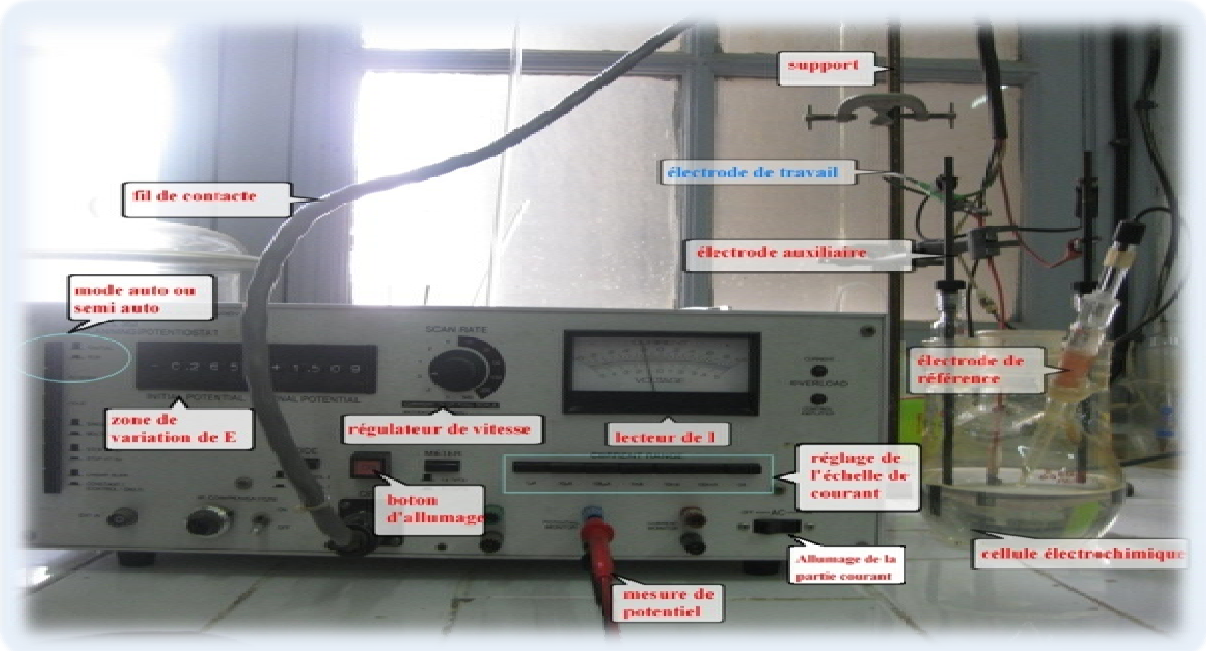


Figure III.10 Montage pour le tracé des courbes de polarisations et les courbes de passivations

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

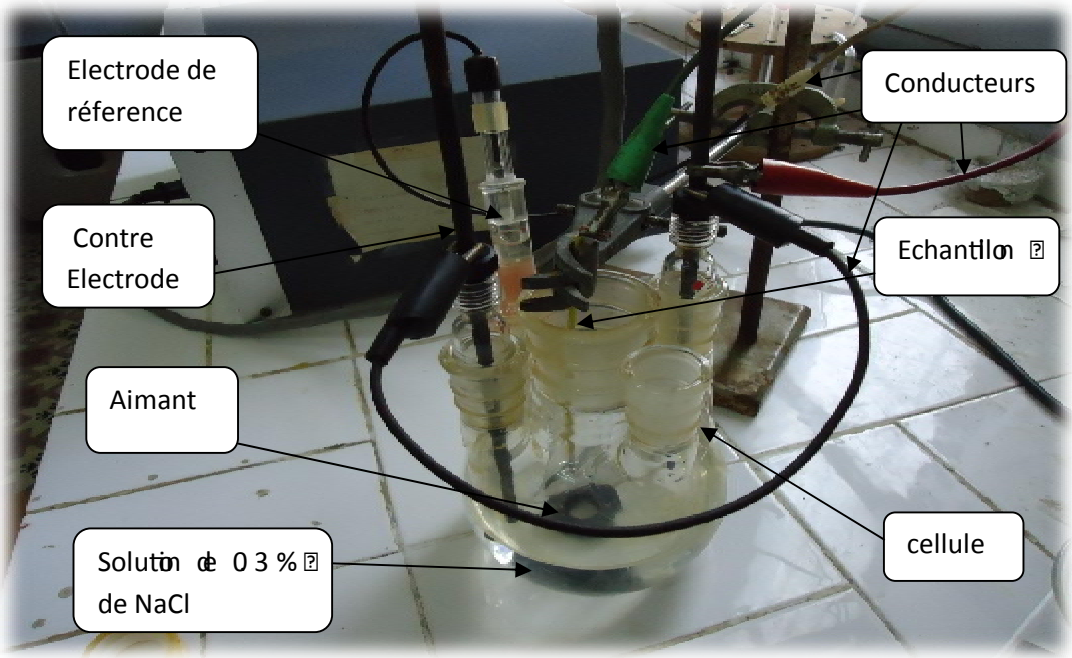


Figure III.11 : Cellule électrochimique utilisée pour le tracé des courbes de polarisation et de passivation

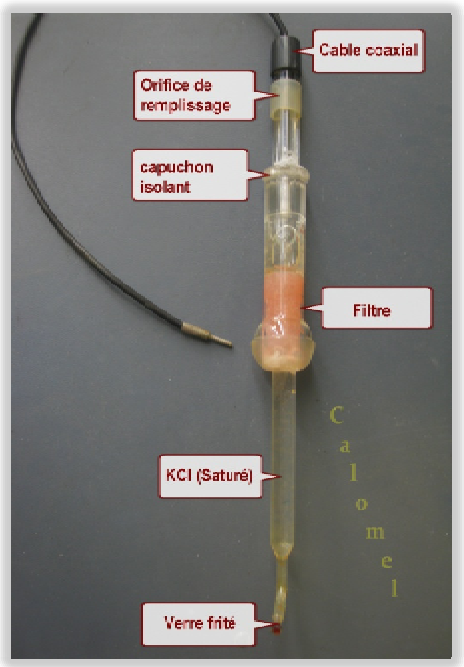


Figure III.12 : Electrode de référence du calomel

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III.9 Essai de micro dureté Vickers

L'essai de la microdureté Vickers consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous une charge **F**, et à mesurer la diagonale **d** de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge Figure III.12. Nous avons utilisé le microduromètre de marque ZWICK, nous avons effectué plusieurs essais selon deux directions perpendiculaires. Les essais sur le papier pour l'emballage du fromage n'étaient pas possible même sans polissage, ceci est dû à la faible épaisseur du papier aluminium destiné pour l'emballage du fromage.

Pour la charge appliquée est de 10 g.

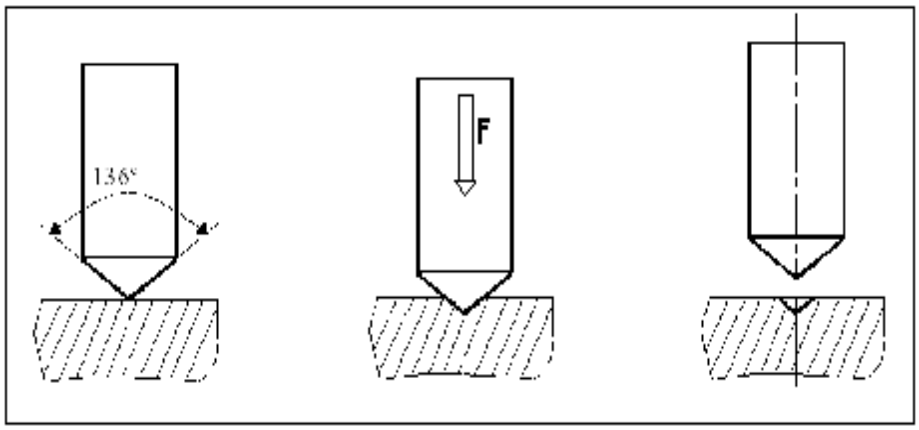


Figure .III.12 : Principe de l'essai Vickers.

HV = F / S

La surface est calculée en fonction de la moyenne des deux diagonales d_1 et d_2.

$S = d^2 / (2.\sin 136°/2)$

$d = (d1 + d2) / 2$

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1.3.1 Symboles et désignations

Angle au sommet du pénétrateur : 136°.

F : charge d'essai en newtons.

d : diagonale de l'empreinte en millimètres : $d = (d1 + d_2) / 2$

Figure III-14 : Micoduromètre

Figure III-15 : Microscope Optique

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CHAPITREIV : RESULTATS ET DISCUSSION

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

Les résultats de caractérisation microscopiques, électrochimiques et chimiques, des différents papiers d'aluminium sont présentés comme suit.

Les différents papiers d'aluminium étudiés sont issus du laminage vue leurs forme plate.

IV. 1-Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, des différents papiers d'aluminium dans le plan du laminage.

1-papier d'emballage du médicament .

Les microstructures obtenues par microscopie optique (Figure IV-1(a,b)), sans application de polissage, sur la surface du laminage, montrent que le papier d'emballage de médicament étudié est chargé de sillons, comporte deux phases autre que la phase mère, ceci implique que ce papier est un alliage.

L'étude de la microstructure du papier d'aluminium sans application du polissage nous renseigne sur la réalité du comportement du matériau vis-à-vis la corrosion.

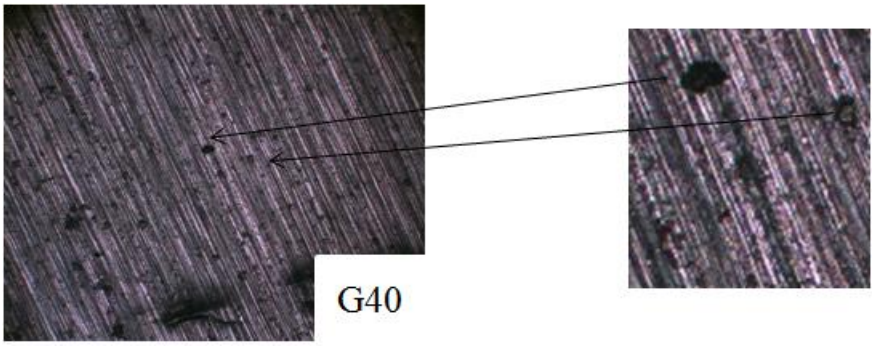
La présence de sillons sur ce papier, nous incite à poser une question importante :

Est-ce que l'état physique de ce matériau est adéquat pour emballer les médicaments ? Comme nous le savons très bien la présence de cavités ou bien la présence des sillons favorise la corrosion par crevasse, par la formation d'un oxyde ou bien par la dissolution de l'aluminium en contact avec le médicament.

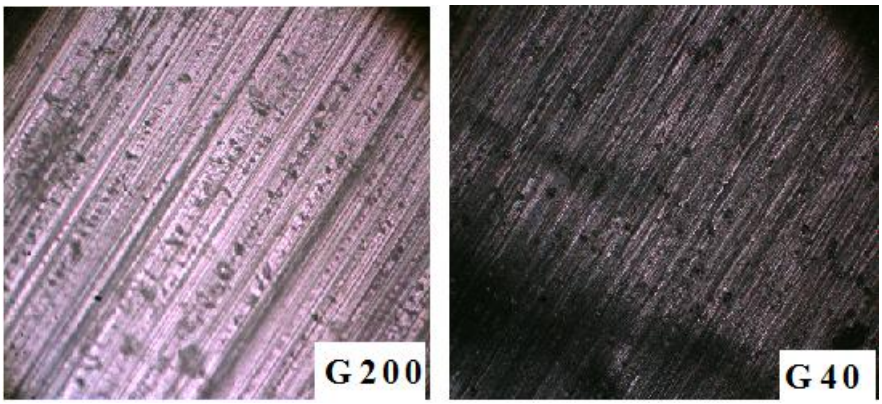
Entre la phase mère et les deux autres phases probablement il y a une différence du potentiel électrochimique, qui peut être la source d'une micro-corrosion galvanique, produisant une dissolution du matériau ou bien une formation d'un oxyde.

Une deuxième question s'impose est ce que le médicament emballé par ce papier n'est pas toxique ?

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(a)



(b)

Figure IV- 1(a, b) microstructure du papier d'emballage des médicaments

2-papier d'emballage du fromage.

Les microstructures obtenues par microscopie optique (Figure IV-2), sans application de polissage, sur la surface du laminage, illustrent que le papier d'emballage du fromage étudié comporte deux phases autres que la phase mère, ceci implique que ce papier est un alliage d'aluminium et celui-ci est vulnérable à une corrosion galvanique.

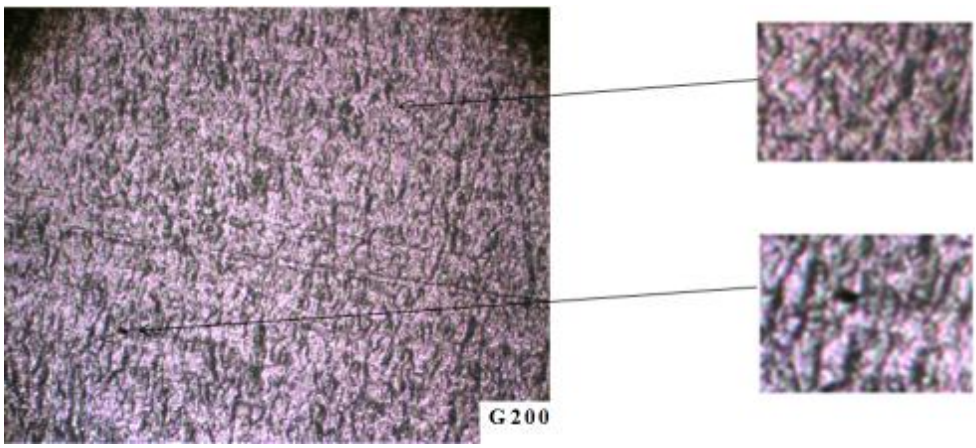


Figure IV-2 : Microstructure du papier d'aluminium d'emballage du fromage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3-papier d'aluminium en rouleaux.

La microstructure de ce papier d'aluminium (Figure IV-3) ressemble beaucoup à celle du papier aluminium utilisée pour l'emballage du fromage. De ce fait nous pouvons soupçonner que le papier utilisé pour l'emballage du fromage et celui existant sur le marché sous forme de rouleaux sont les mêmes. Comme nous l'avons suscité ce papier est susceptible à la corrosion galvanique.

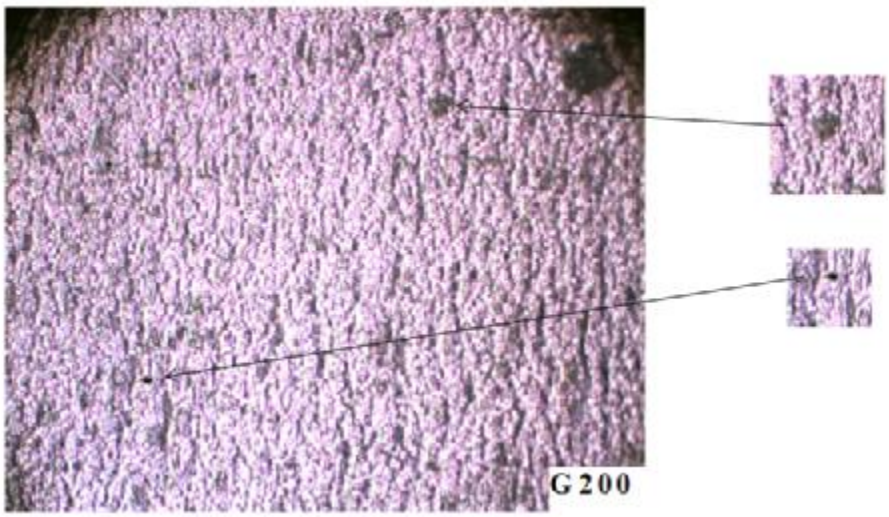


Figure IV-3 : Microstructure du papier d'aluminium se trouvant sur le marché sous forme de rouleaux

4-papier d'aluminium de l'emballage du chocolat .

La microstructure de ce papier d'aluminium (Figure IV-4) coincide aussi à celle du papier aluminium utilisée pour l'emballage du fromage. De ce fait nous pouvons suspecter que le papier utilisé pour l'emballage du fromage et celui utilisé pour l'emballage du chocolat sont les mêmes. Comme nous l'avons dit ce papier est susceptible à la corrosion galvanique.

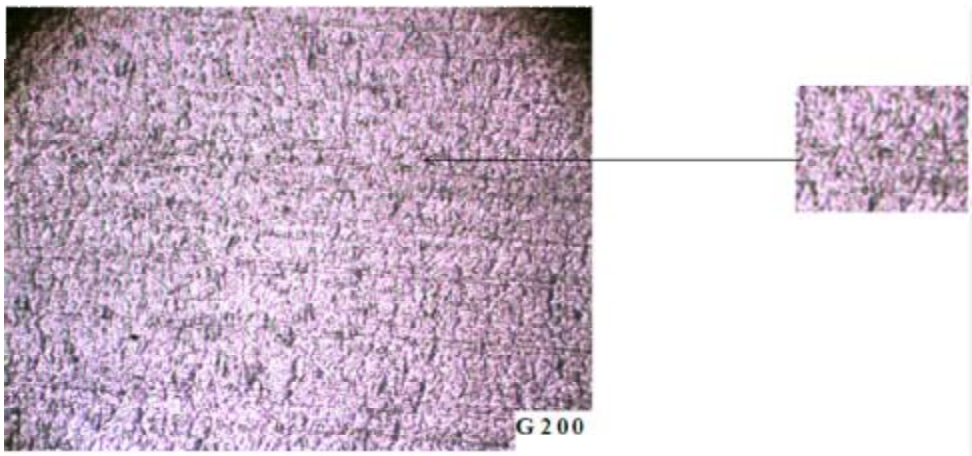


Figure IV-4 : Microstructure du papier d'aluminium d'emballage de chocolat

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

IV. 2-Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, des différents papiers d'aluminium dans le plan perpendiculaire au laminage.

La figure IV-5 montre le plan perpendiculaire au plan du laminage des différents papiers après enrobage à chaud suivi par un polissage avec le papier abrasif de grade (4000).

Ces microstructures nous ont permet de faire deux conclusions importantes :

1- Les propriétés mécaniques des différents papiers ne peuvent pas être les mêmes par ce que l'arrachement de matière après polissage mécanique avec le papier abrasif de grade (4000) n'est pas le même, la forme du papier d'aluminium d'emballage des médicaments ne semble pas modifier après polissage.

2- L'épaisseur des différents papiers n'est pas la même.

En ce qui concerne la possibilité de l'existence d'un revêtement organique (polymère) à la surface de ces papiers, les microstructures prises ne montrent rien.

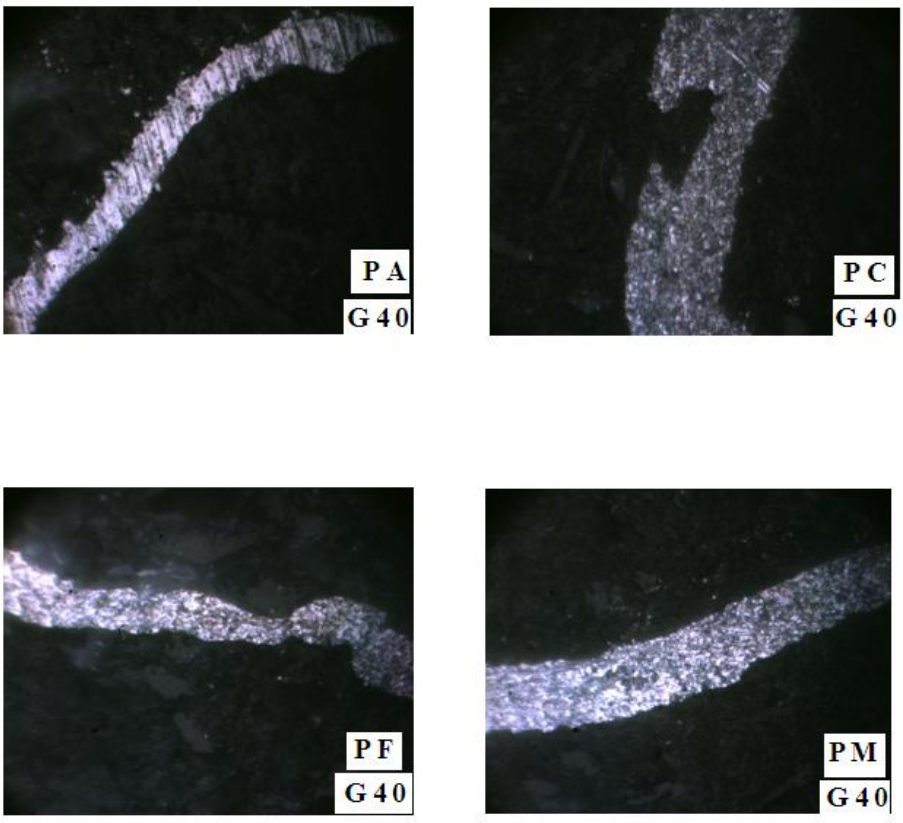


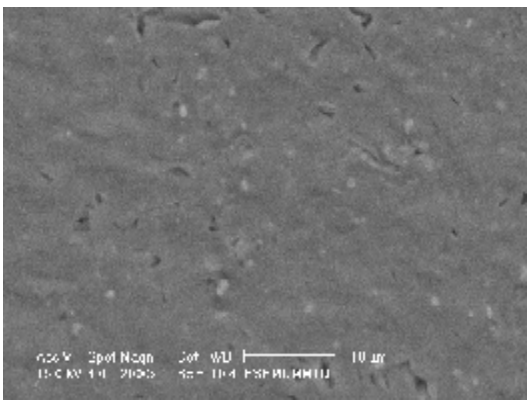
Figure IV-5 : Caractérisation microscopique des différents papiers d'aluminium dans le plan perpendiculaire au plan du laminage : PA- c'est le papier d'aluminium sous forme de rouleaux, PC- c'est le papier d'aluminium d'emballage du chocolat, PF- c'est le papier d'aluminium d'emballage du chocolat, PM c'est le papier d'aluminium d'emballage du médicament.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

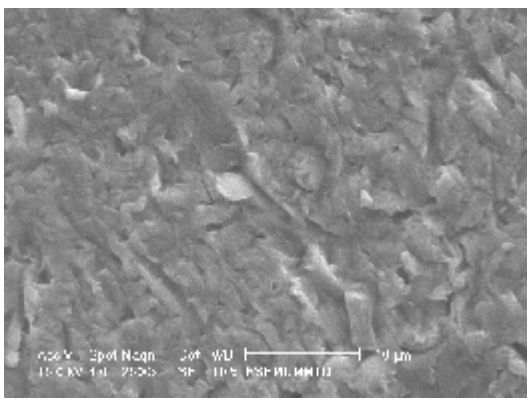
IV. 3-Caractérisation microstructurale, par microscope électronique à balayage, des différents papiers d'aluminium dans le plan du laminage.

1-papier d'aluminium en rouleaux.

La microscopie électronique à balayage montre que le papier d'aluminium sous forme de rouleaux après polissage au papier abrasif de grade (4000) est constitué de la phase mère et une deuxième phase grise ainsi que quelques porosités d'une phase arrachée probablement suite au polissage avec le papier abrasif de grade (4000), cette porosité peut être le siège de la phase grise ou bien une autre phase (Figure IV-6.a), les figures IV- (6.b, 6.c) montrent que l'arrachement de matière suite au polissage mécanique par le papier abrasif de grade (4000) est important et plastique, ceci implique que ce matériau est plastique.

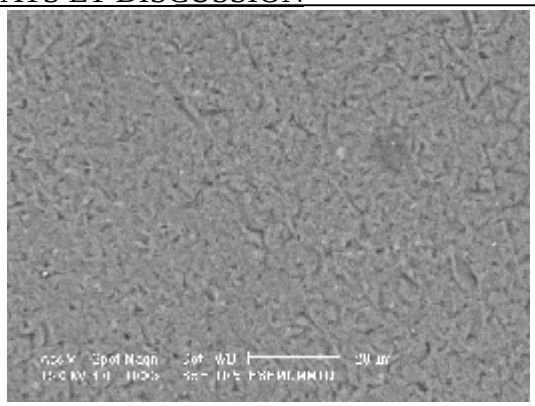


(a)



(b)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

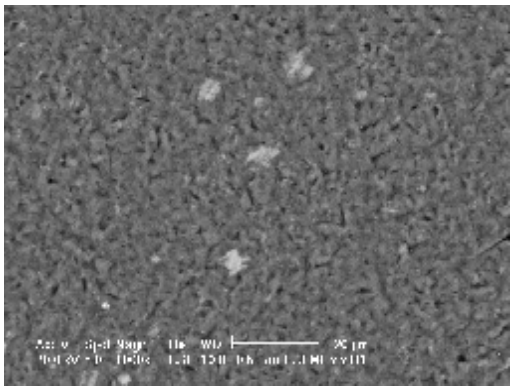


(c)

Figure IV-6 : Microstructure au MEB du papier d'aluminium en rouleaux, après polissage au papier abrasif (4000)

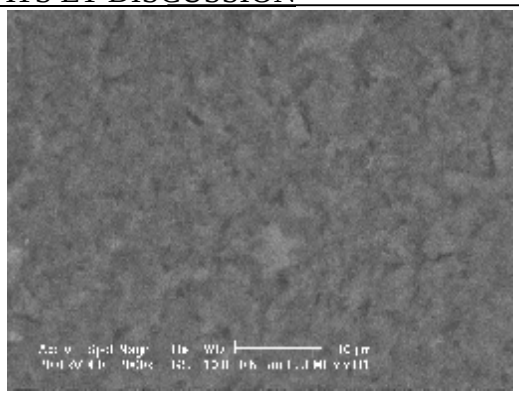
2-papier d'aluminium de l'emballage du chocolat.

La microscopie électronique à balayage illustre que le papier d'aluminium d'emballage du chocolat après polissage au papier abrasif de grade (4000) est formé aussi de la phase mère et une deuxième phase grise ainsi que quelques porosités d'une phase enlevée probablement suite au polissage avec le papier abrasif de grade (4000), cette porosité peut être le siège de la phase grise ou bien une autre phase (Figure IV-7.a), la figure IV-(6.b) montre que l'arrachement de matière suite au polissage mécanique par le papier abrasif de grade (4000) est important mais moins plastique.



(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

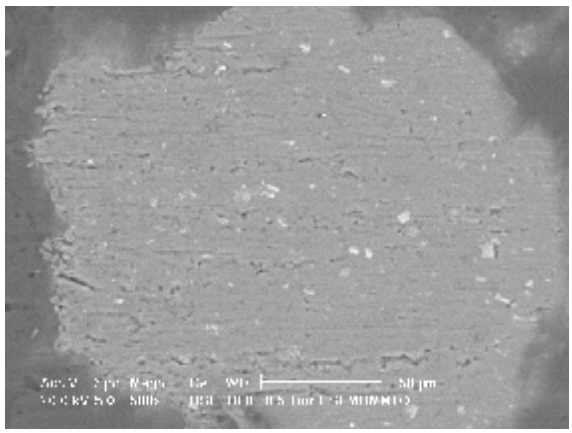


(b)

Figure IV-7 : Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage du chocolat, après polissage au papier abrasif (4000)

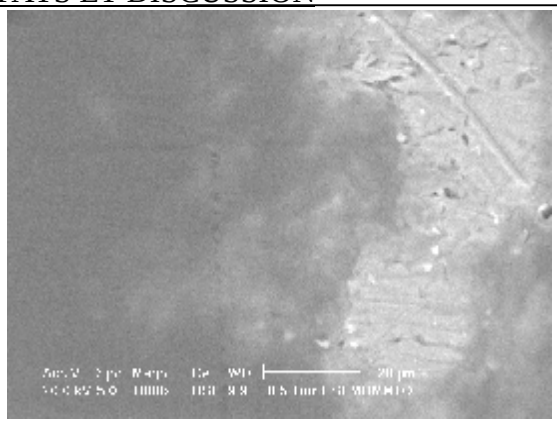
3-papier d'emballage du fromage.

La microscopie électronique à balayage échalote que le papier d'aluminium d'emballage du fromage après polissage au papier abrasif de grade (4000) est constitué aussi de la phase mère et une deuxième phase blanche ainsi que quelques porosités d'une phase déracinée probablement suite au polissage avec le papier abrasif de grade (4000), cette porosité peut être le siège de la phase grise ou bien une autre phase (Figure IV- 8), la figure IV-(8.a) montre que l'arrachement de matière suite au polissage mécanique par le papier abrasif de grade (4000) est important cet arrachement semble fragile.



(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

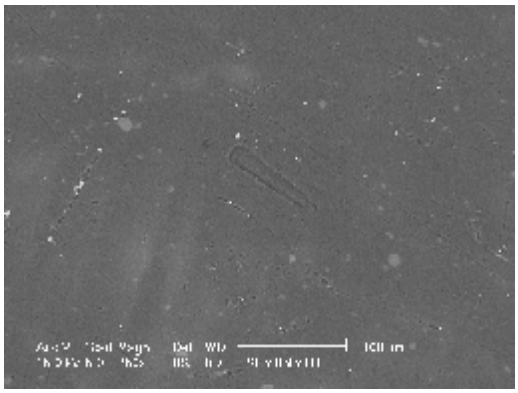


(b)

Figure IV-8: Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage du fromage, après polissage au papier abrasif (4000)

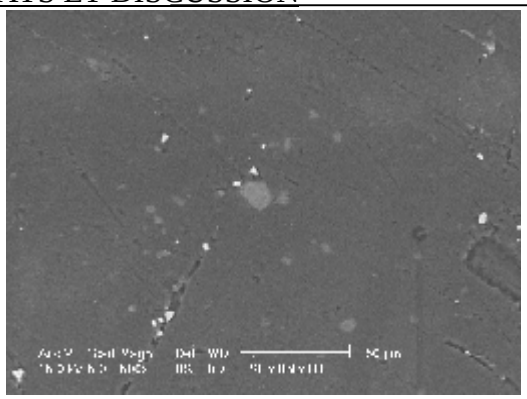
4-papier d'emballage du médicament.

La microscopie électronique à balayage illustre que le papier d'aluminium d'emballage du médicament après polissage au papier abrasif de grade (4000) est constitué aussi de la phase mère et deux autres phases une phase blanche et une phase grise peu de porosités d'une phase ôtée probablement suite au polissage avec le papier abrasif de grade (4000), cette porosité peut être le siège de la phase grise ou bien de la phase blanche (Figure IV-9), la figure (IV-9) montre que l'enlèvement de matière suite au polissage mécanique par le papier abrasif de grade (4000) est négligeable.

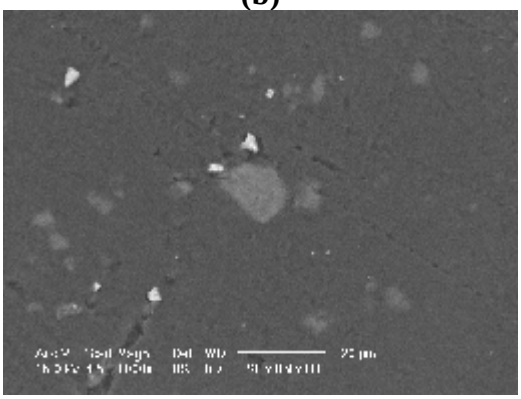


(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(b)



(c)

Figure IV-9: Microstructure au MEB du papier d'aluminium d'emballage des médicaments, après polissage au papier abrasif (4000)

En conclusion tous les différents papiers d'emballage en aluminium sont susceptibles à la corrosion galvanique, le papier d'emballage des médicaments parait plus écroui.

IV. 4-Caractérisation de la morphologie de la corrosion des différents papiers d'emballage en aluminium.

1-Morphologie de la corrosion.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

a-papier pour emballage des médicaments.

-Après 7 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

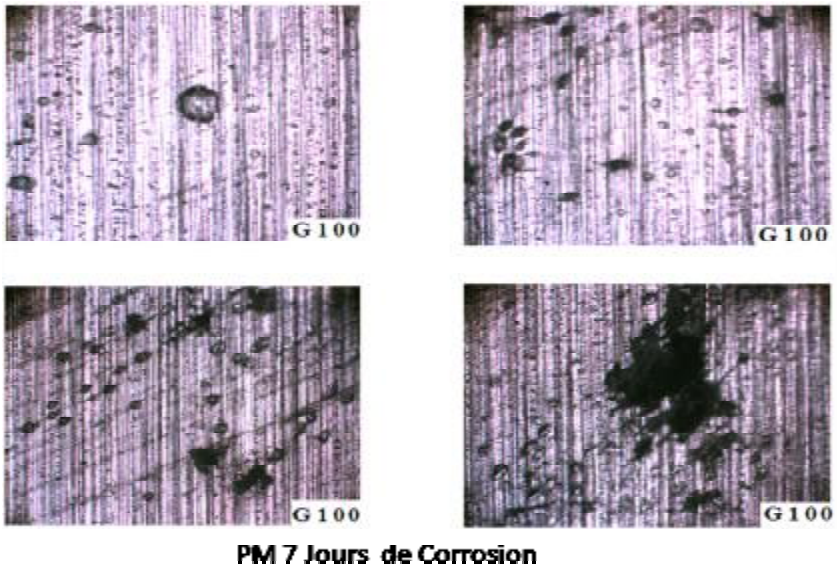


Figure IV-10 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage des médicaments après 7 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl .

-Après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl .

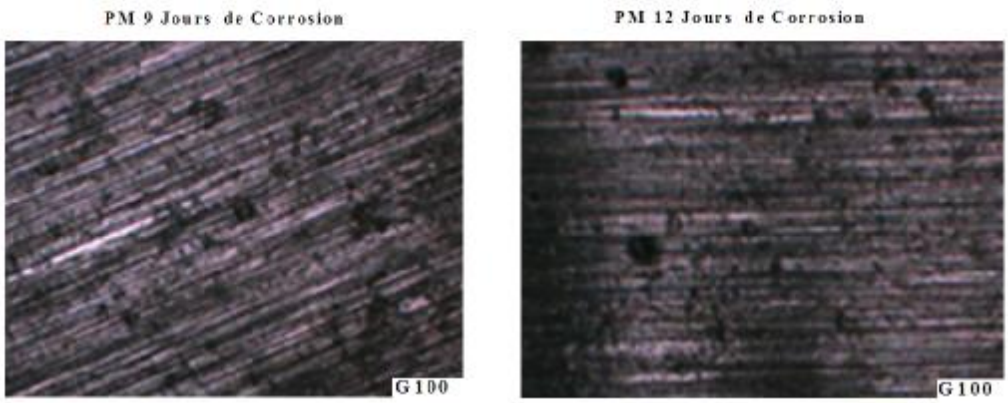


Figure IV-11 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage des médicaments après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

La corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage de médicaments est une corrosion localisée autours des autres phases observées par le microscope électronique à balayage.

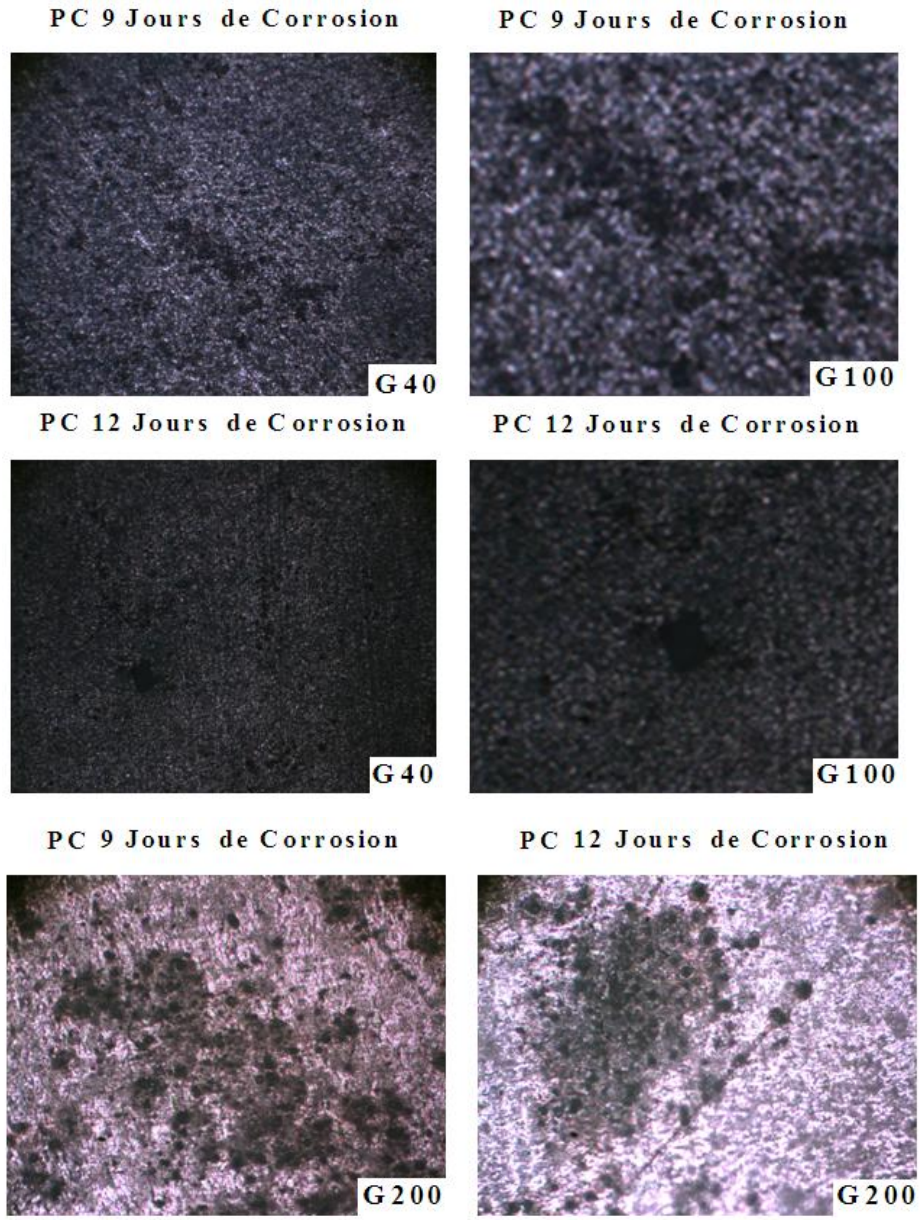
La corrosion localisée à été observée dès les premiers jours d'immersion, ceci nous permet de dire que la différence de potentiel entre les phases (mère et les autres phases) est grande.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Après 9 jours et 12 jours de corrosion nous observons une corrosion (par crevasses) le long des sillons préexistant sur le papier, ces derniers représentent une rugosité sur ce papier, cette dernière est constituée de micro crevasses allongées.

b-papier pour emballage du chocolat.

Après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl :



La corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du chocolat est localisée autour des autres phases.

Figure IV-12 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du chocolat après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

c-papier pour emballage du fromage .

Après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl .

La corrosion du papier fromage n'est pas apparente même après 12 jours de corrosion ce qui fait, nous soupçonnons dans ce cas la présence d'un revêtement en polymères alimentaire malgré que l'observation par microscope optique ne révèle rien.

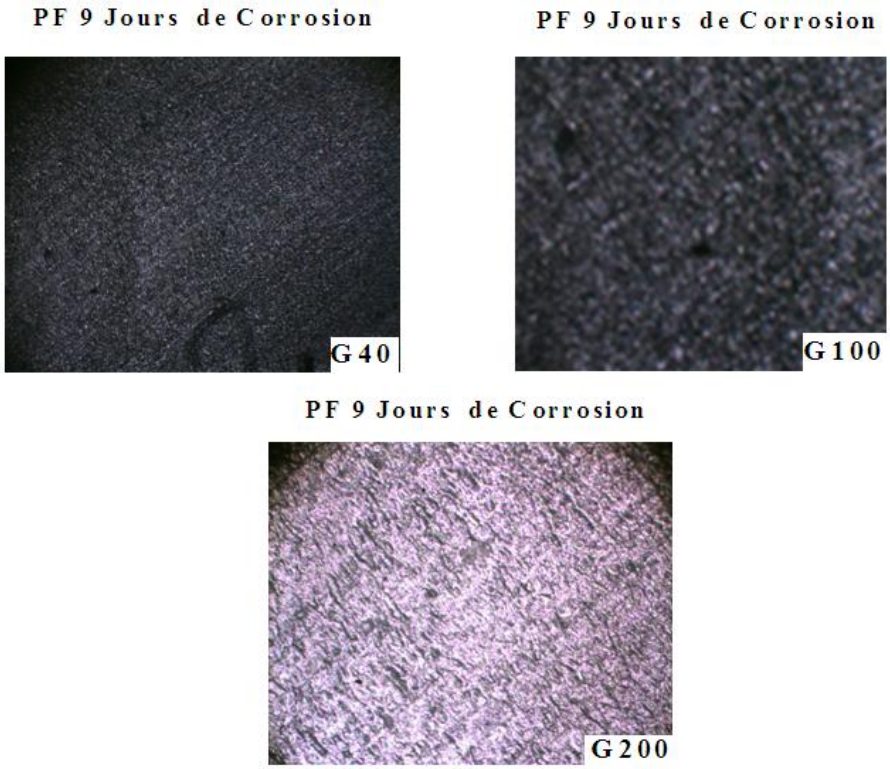


Figure IV-13 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du fromage après 9 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

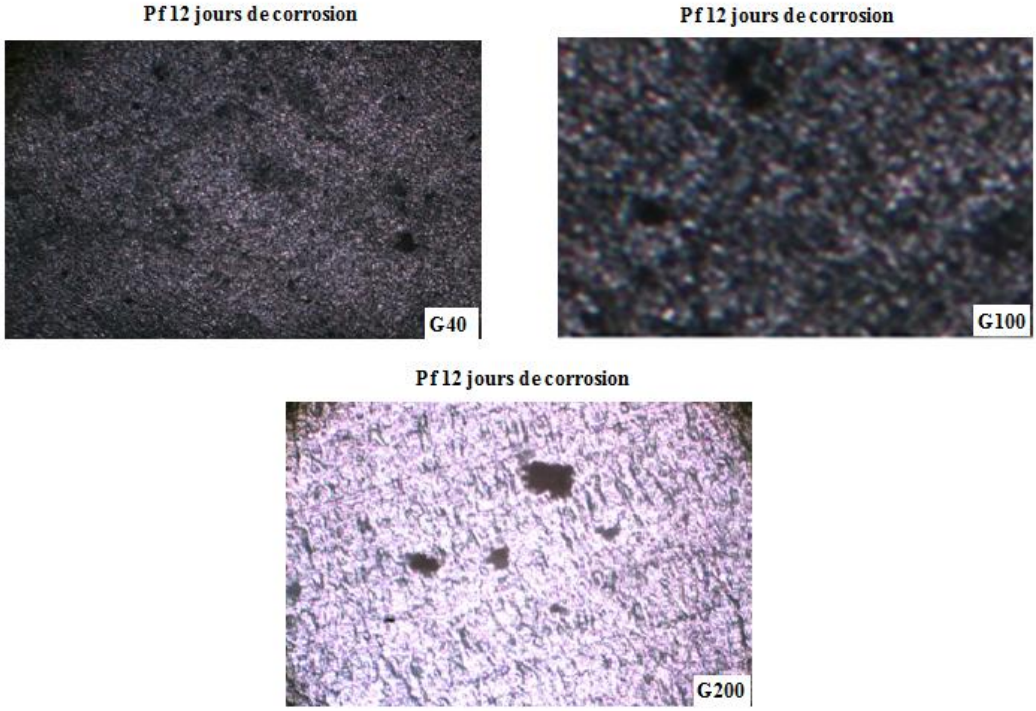


Figure IV-14 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium pour l'emballage du fromage après 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

d-papier aluminium sous forme de rouleaux.

Après 9 et 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl : le papier aluminium sous forme de rouleaux se corrode par piqûre les figures ci-dessous montrent cette corrosion.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

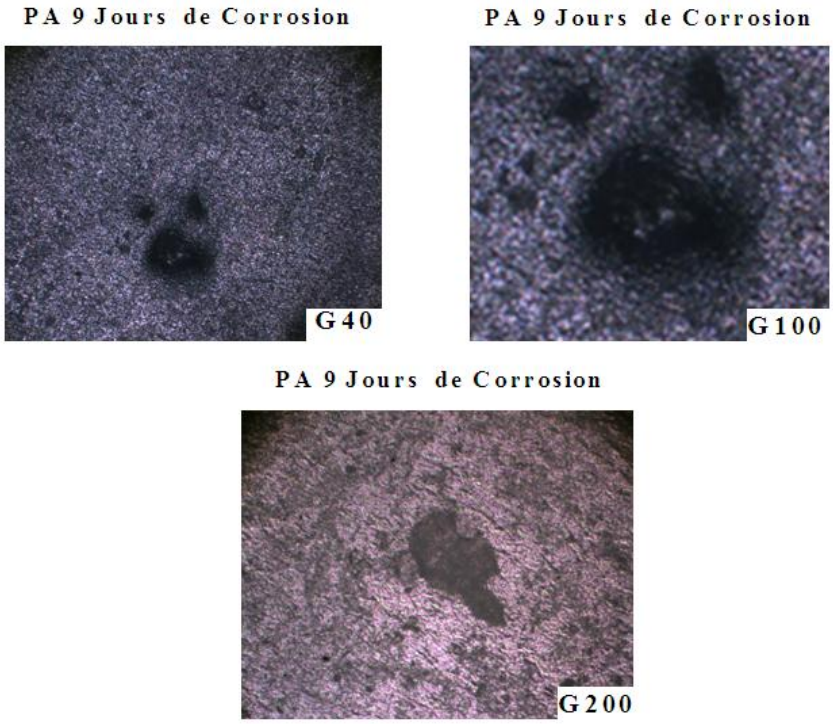


Figure IV-15 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium sous forme de rouleau après 9 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

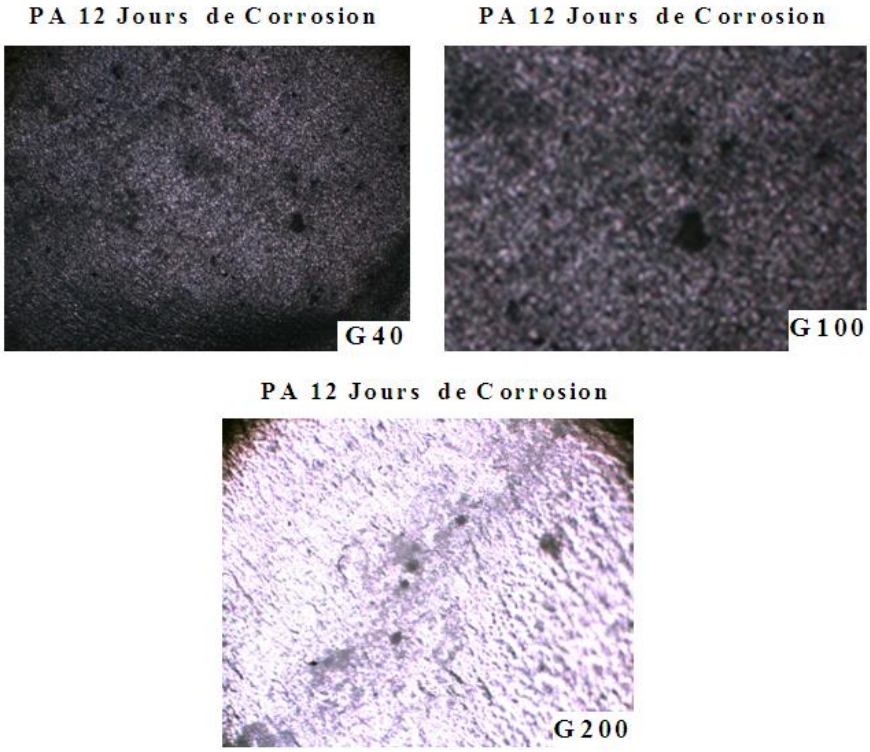


Figure IV-16 : Morphologie de la corrosion du papier d'aluminium sous forme de rouleau après 12 jours de corrosion dans une solution de 0,3% de NaCl

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2-cinétique de la corrosion.

2.1 Potentiel de la corrosion libre.

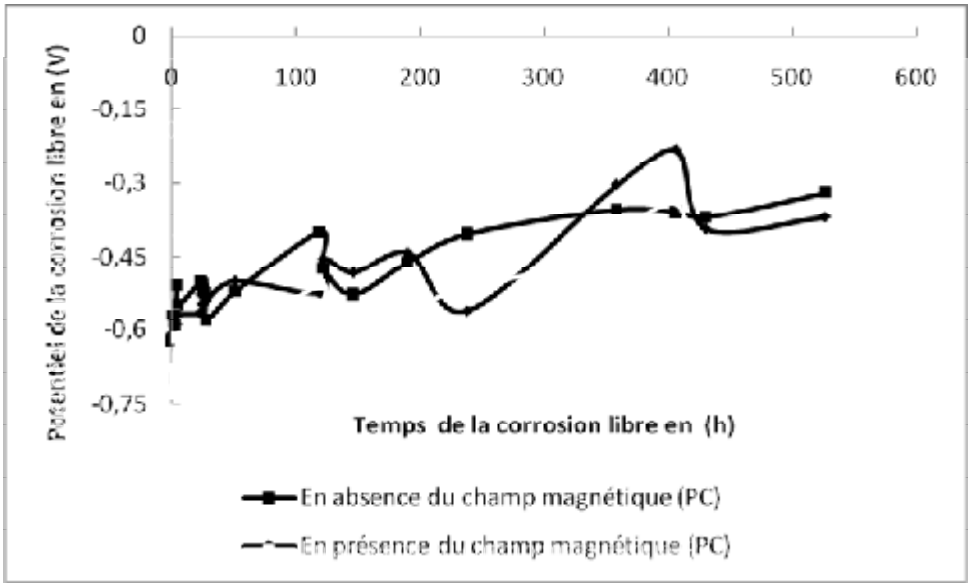


Figure IV-17 : Potentiel de la corrosion libre du papier pour emballage du chocolat

On remarque dans cette courbe des fluctuations

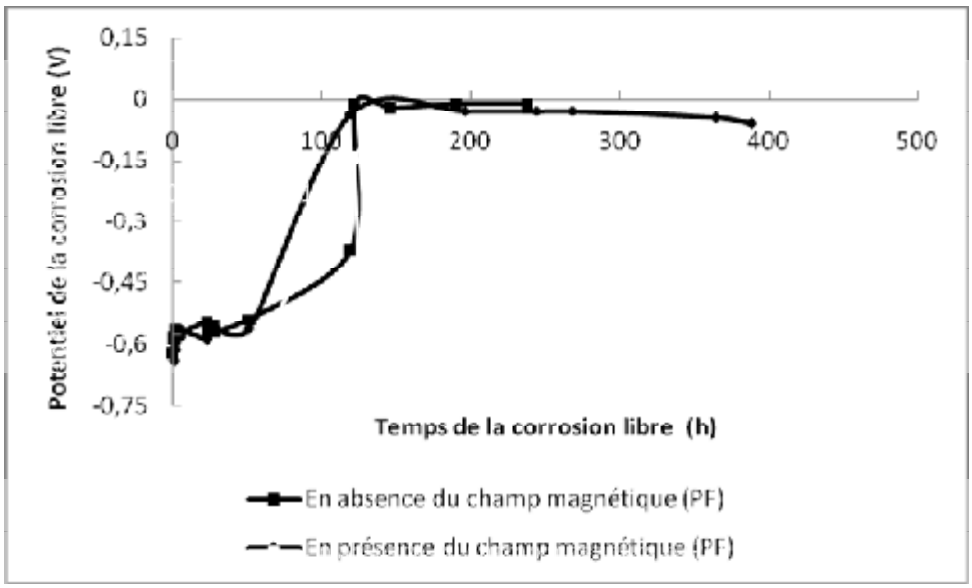


Figure IV-18 : Potentiel de la corrosion libre du papier pour emballage du fromage

On voit une passivation meilleure pour le papier fromage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

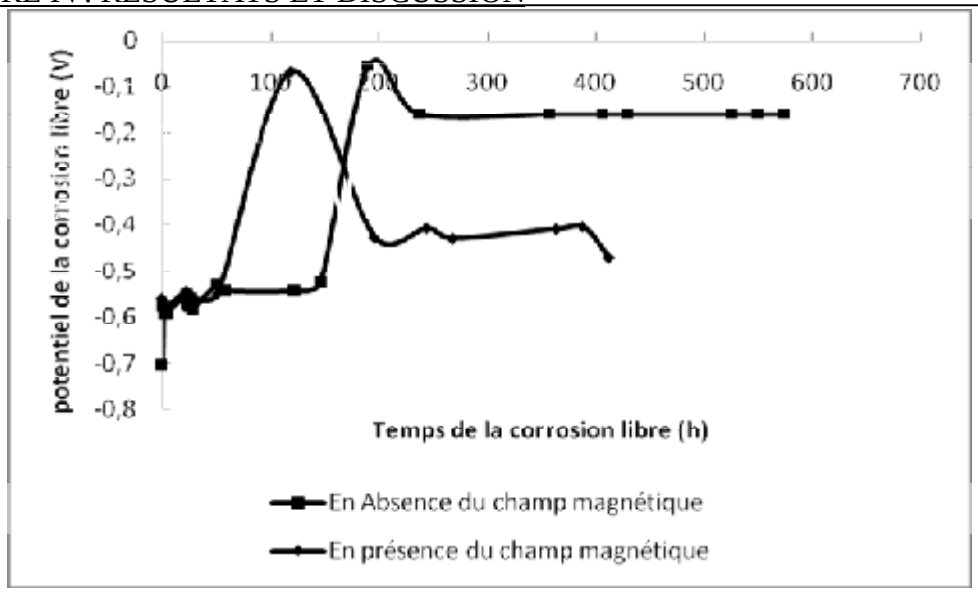


Figure IV-19 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'emballage du médicament

On constate que le papier médicament atteint la passivation

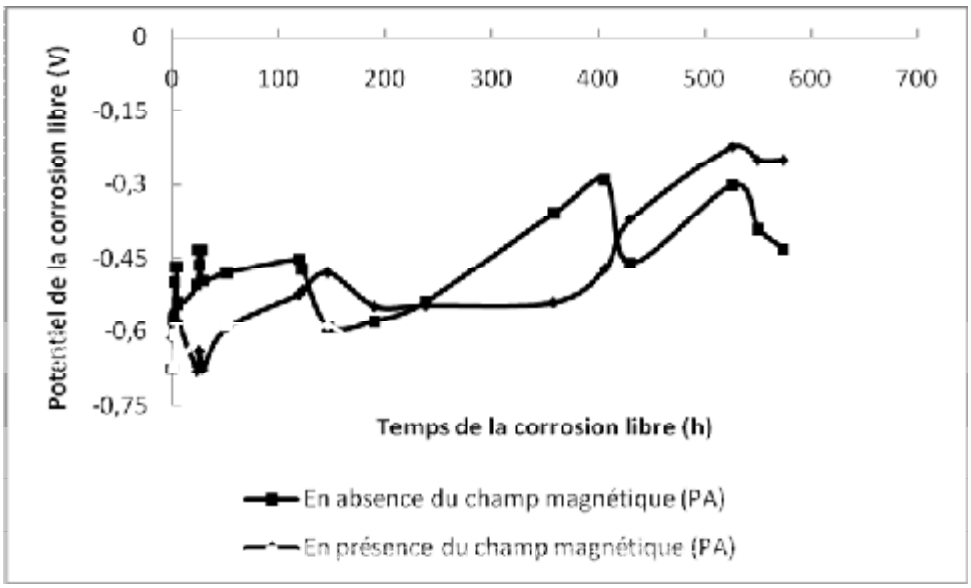


Figure IV-20 : Potentiel de la corrosion libre du papier d'aluminium sous forme de rouleaux

On remarque dans cette courbe des fluctuations

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

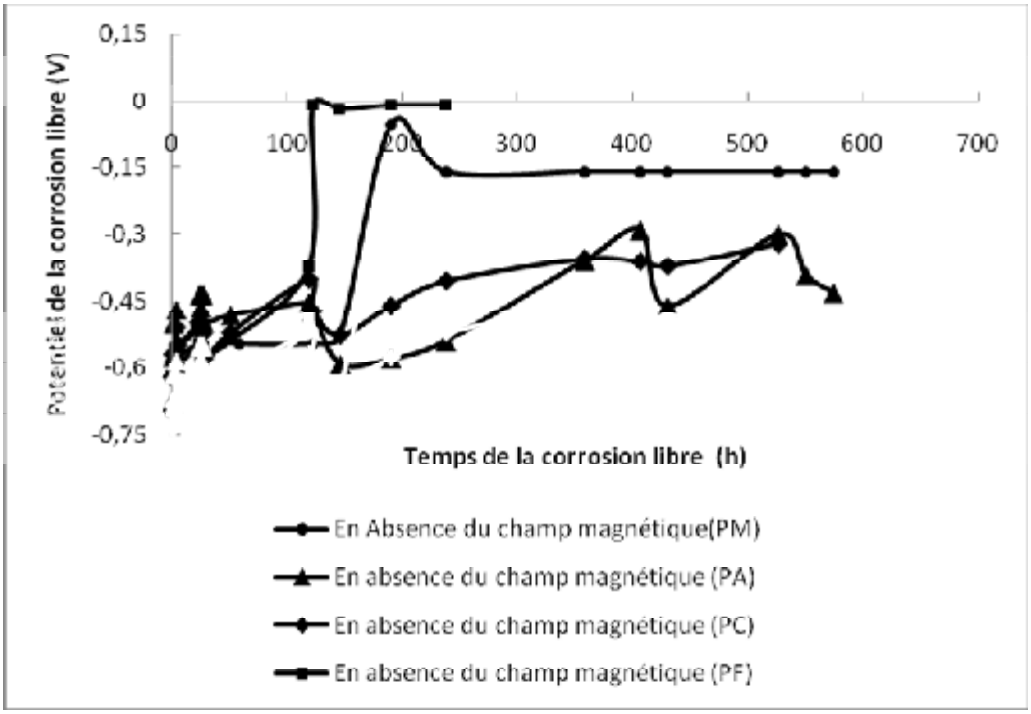


Figure IV-21 : potentiel de la corrosion libre des différents papiers d'aluminium en absence du champ magnétique permanant

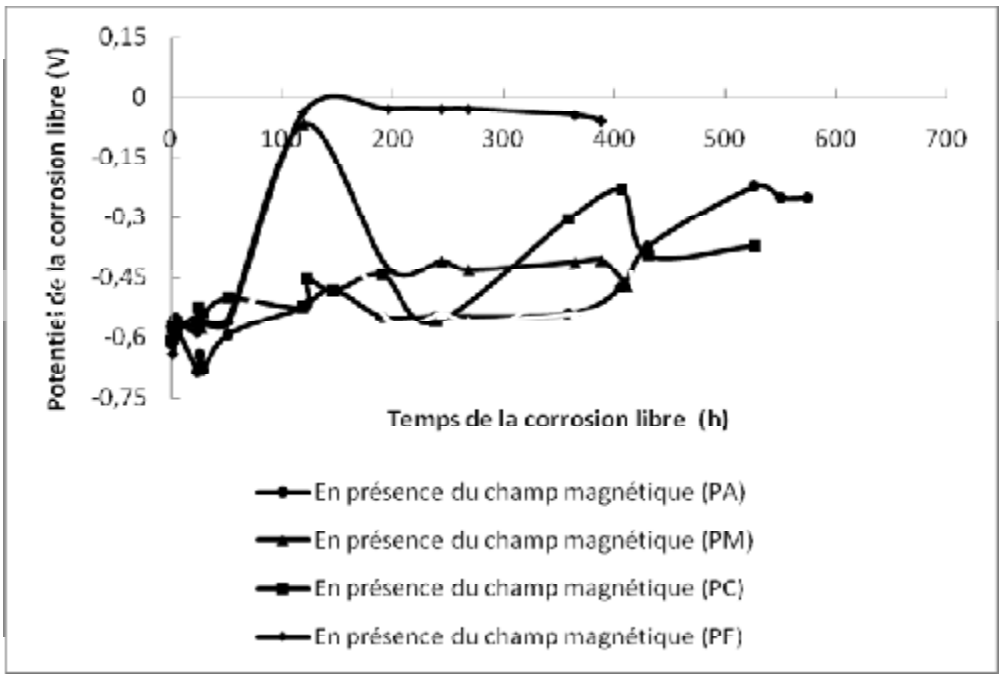


Figure IV-22 : potentiel de la corrosion libre des différents papiers d'aluminium en présence du champ magnétique permanant

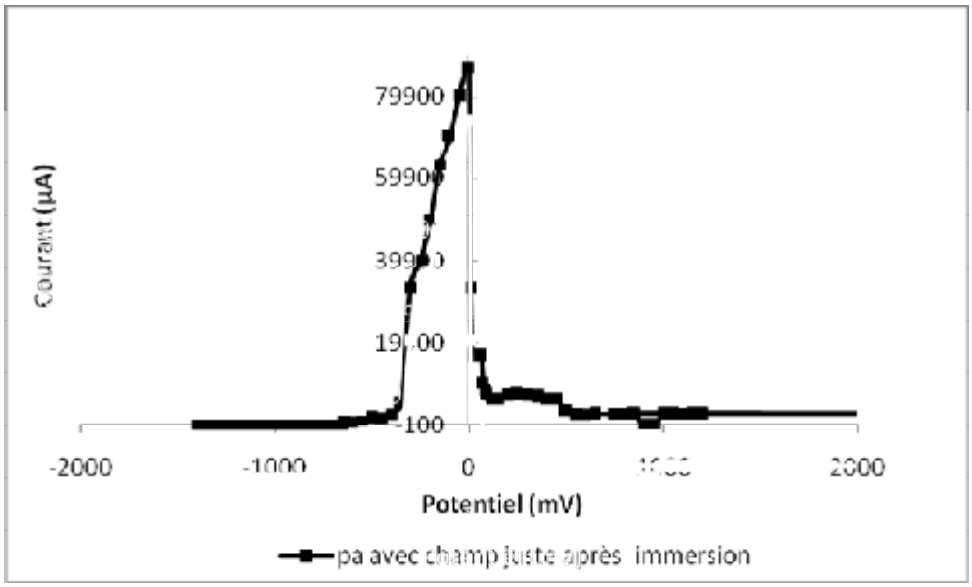
Les figures (17,22) montrent que le potentiel de la corrosion libre du papier aluminium sous forme de rouleau, le papier d'emballage du chocolat, et le papier d'emballage du fromage ne sont pas influencés par la présence du champ magnétique. Le potentiel de la

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

corrosion du papier d'emballage des médicaments change sous l'effet du champ magnétique permanant.

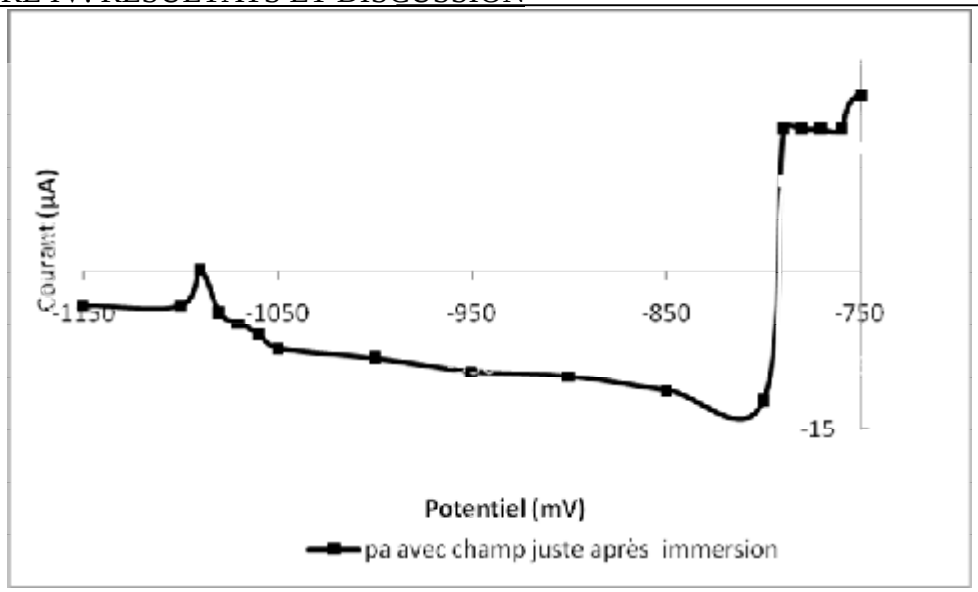
Ces même figures montrent que le potentiel de la corrosion libre des différents papiers d'aluminium n'est pas le même.

Les figures (21,22) illustrent que le papier d'emballage du fromage atteint la passivation avant les autres papiers.



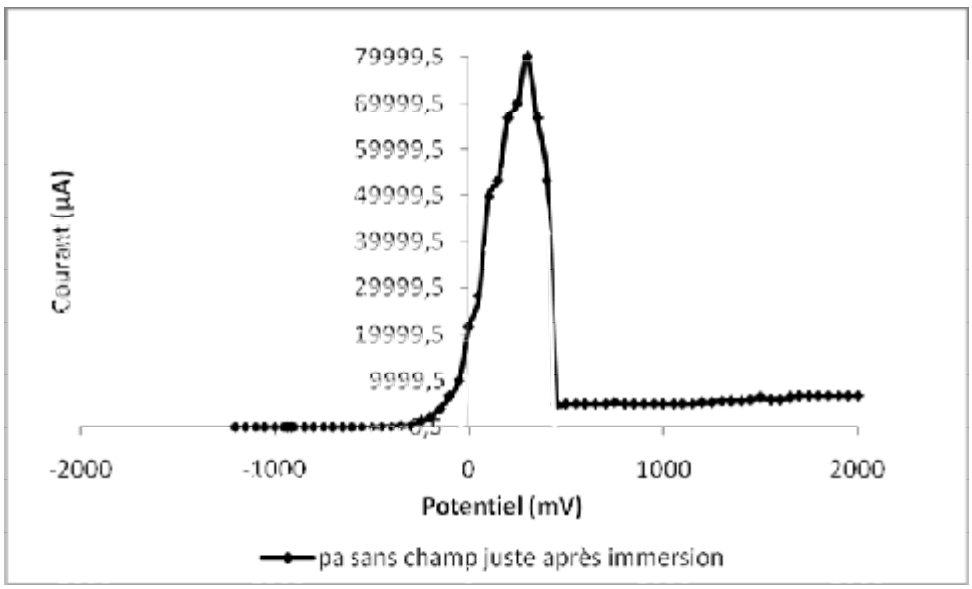
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



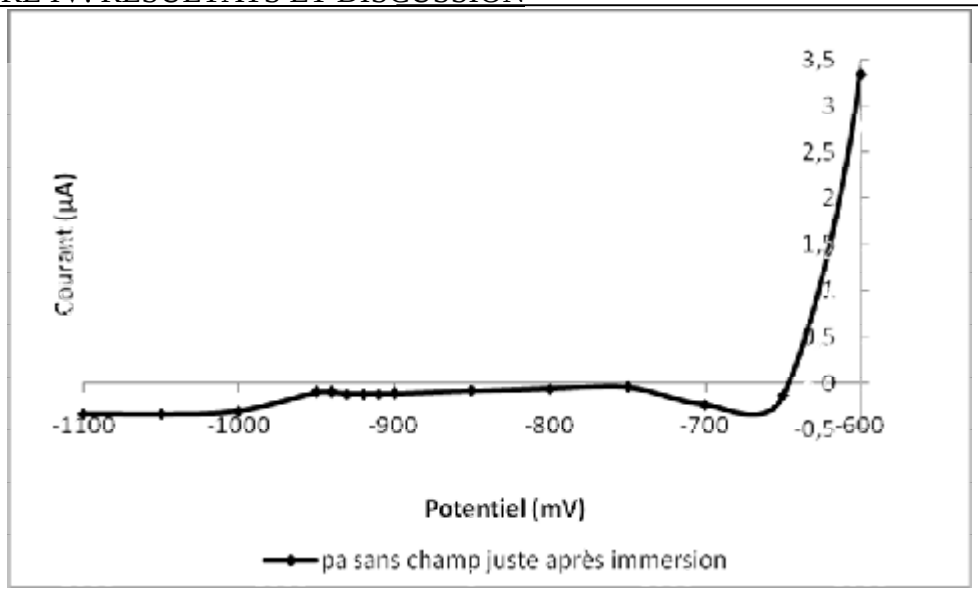
(b)

Figure IV-23 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'aluminium en rouleaux en présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion



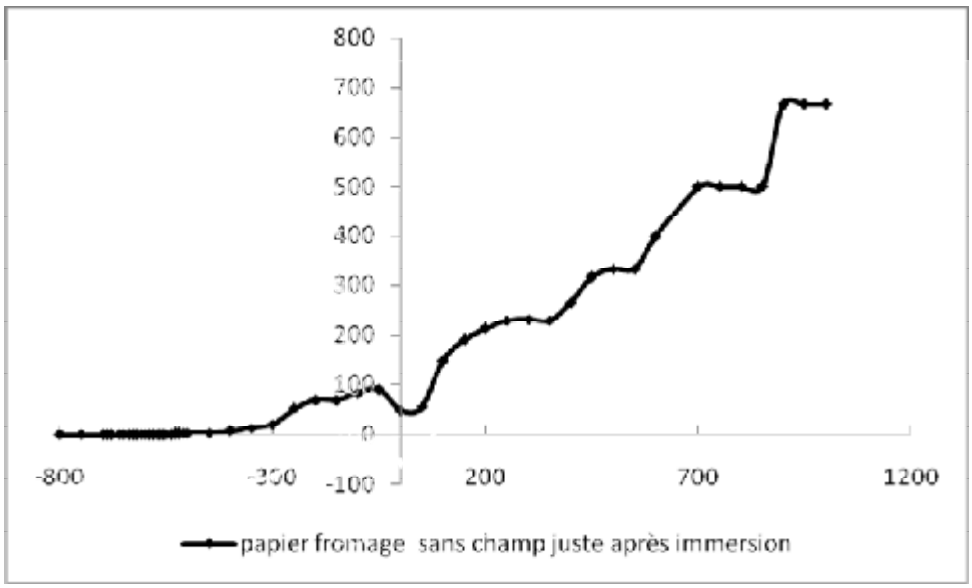
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



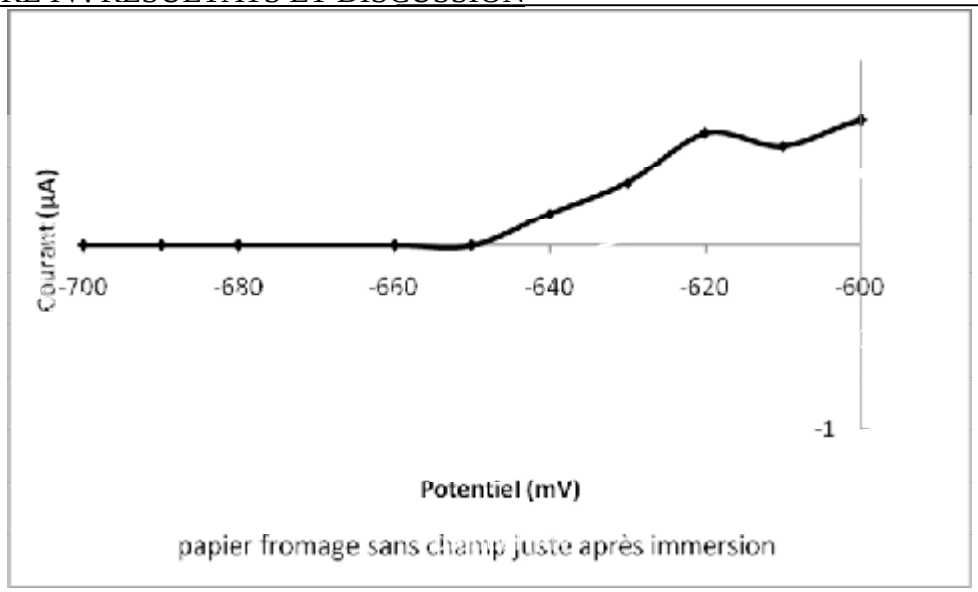
(b)

Figure IV-24 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'aluminium en rouleaux en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion



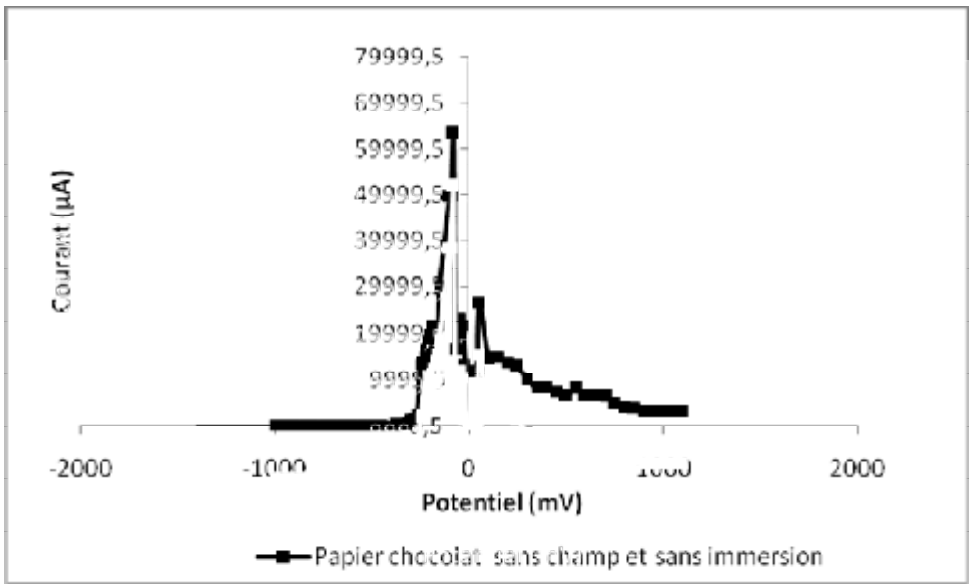
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



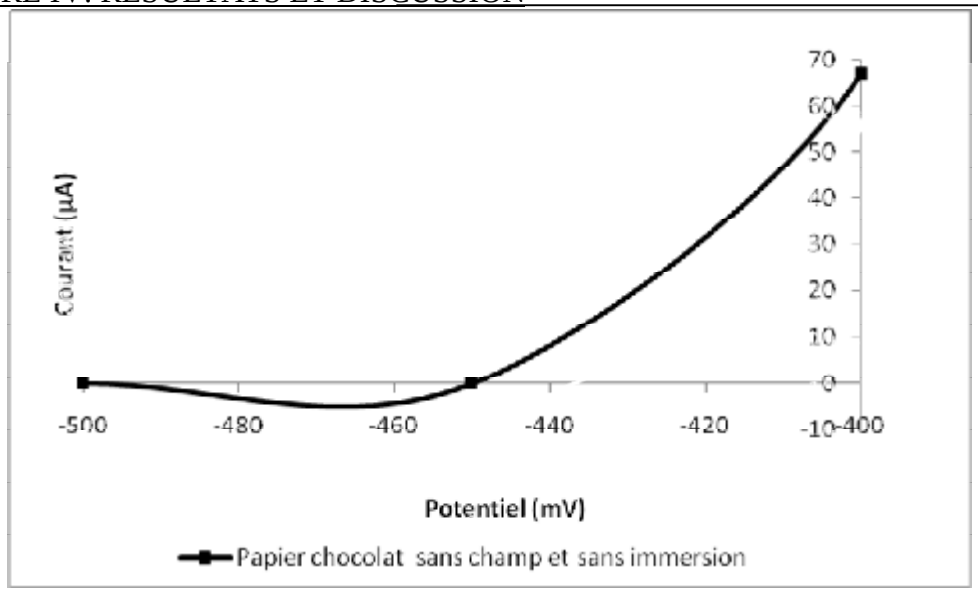
(b)

Figure IV-25 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du fromage en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion.



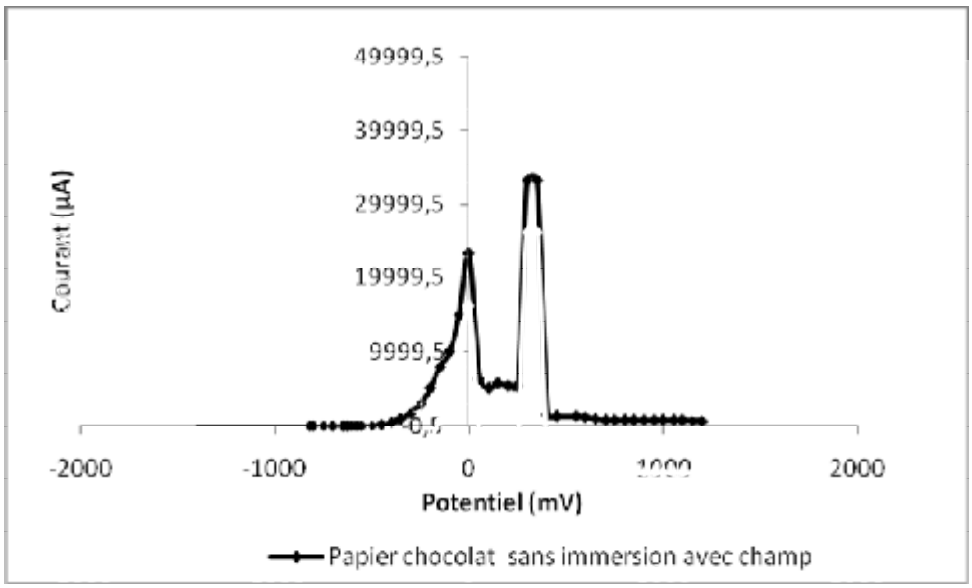
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



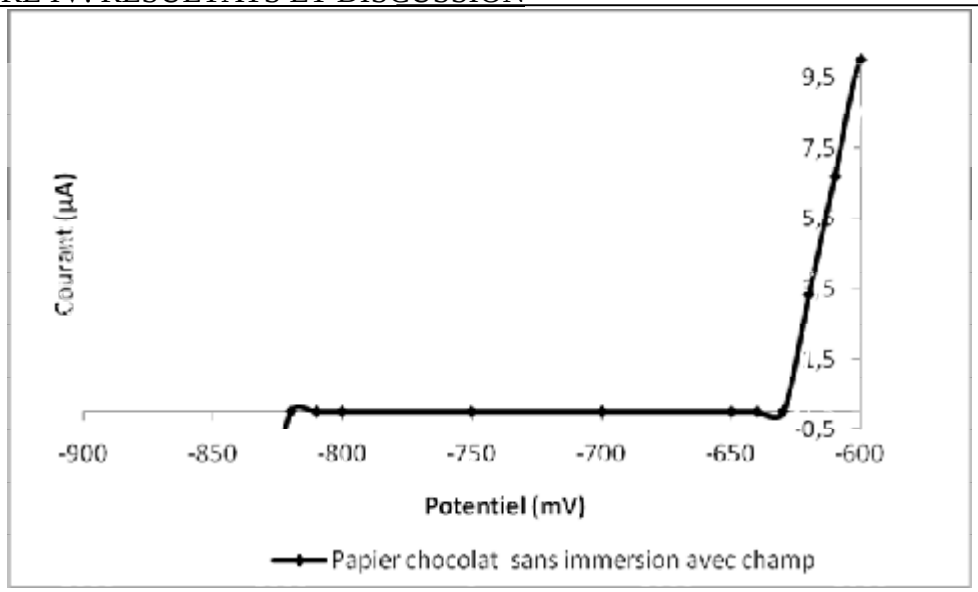
(b)

Figure IV-26 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du chocolat en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion.



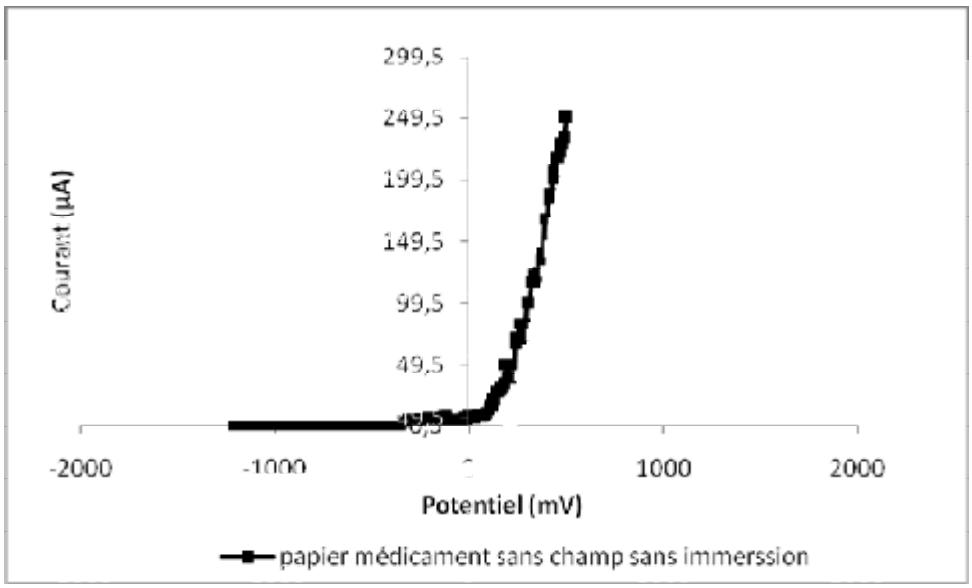
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



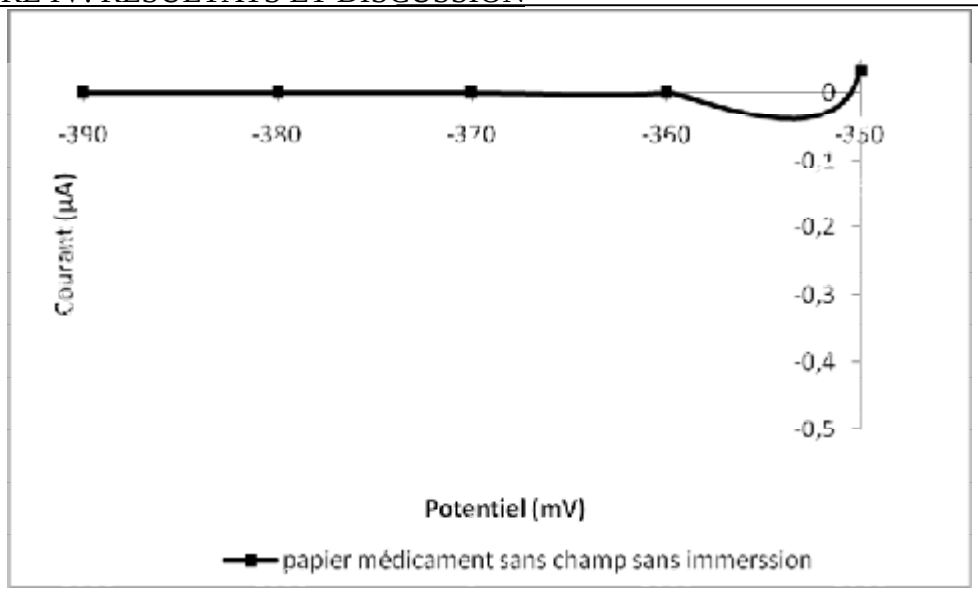
(b)

Figure IV-27 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du chocolat présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion.



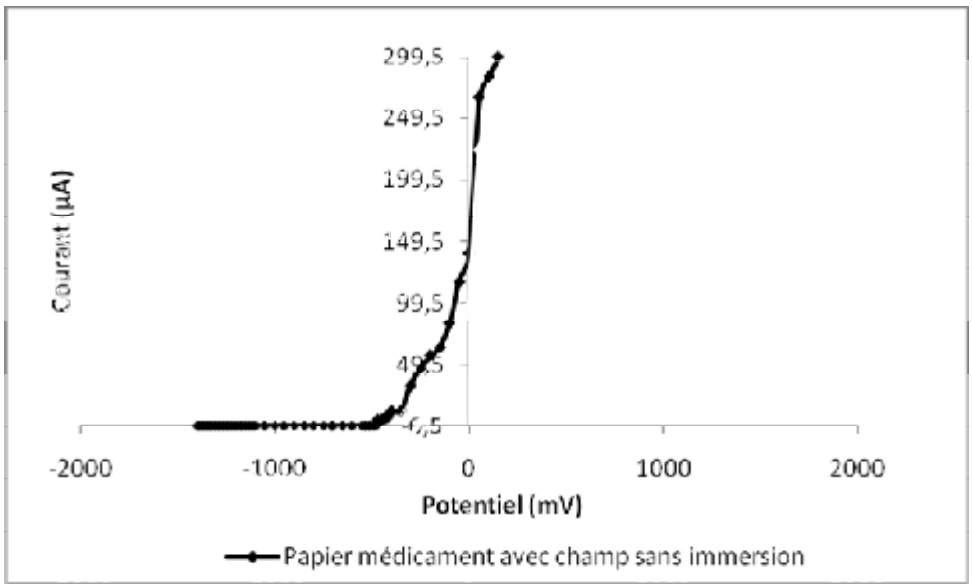
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



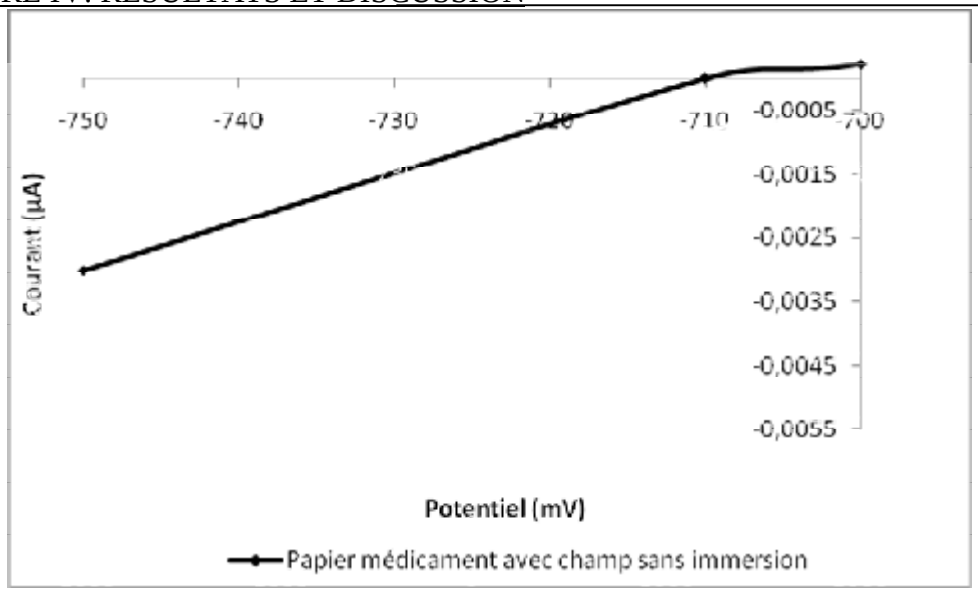
(b)

Figure IV-28 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du médicament en absence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion.



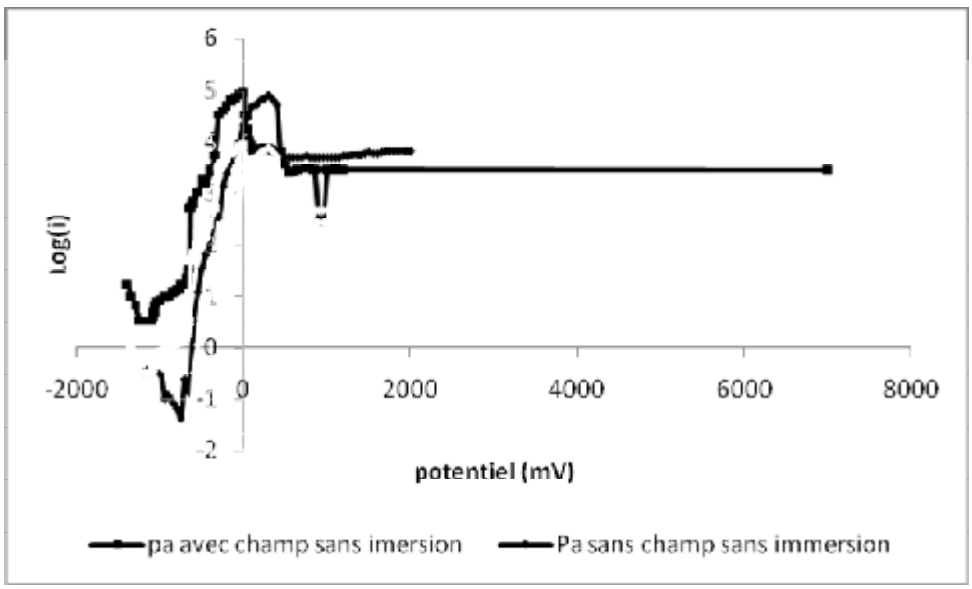
(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



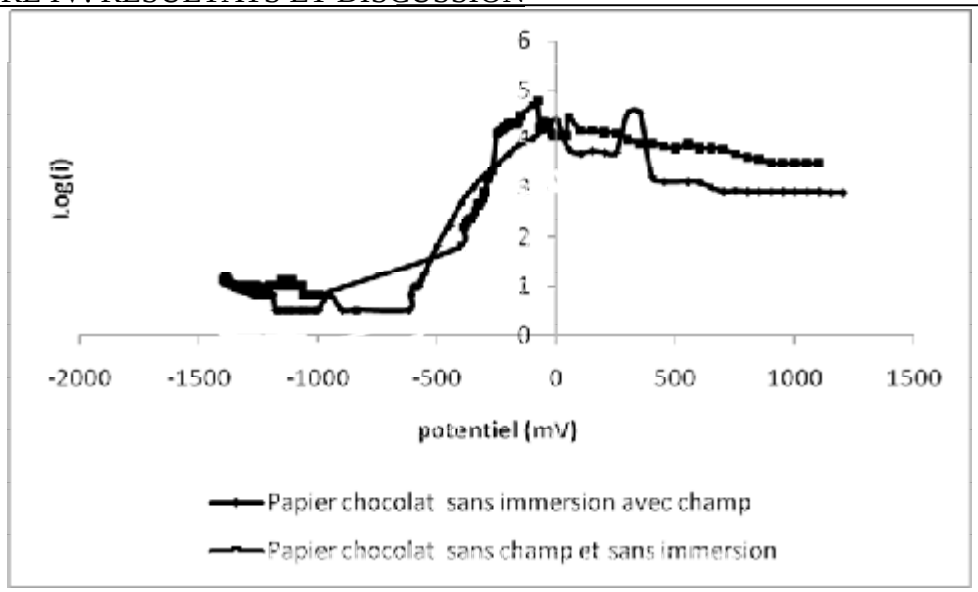
(b)

Figure IV-29 : (a) courbe de polarisation et de passivation pour le papier d'emballage du médicament en présence du champ magnétique permanant, (b) effet loupe sur la zone du potentiel de corrosion.

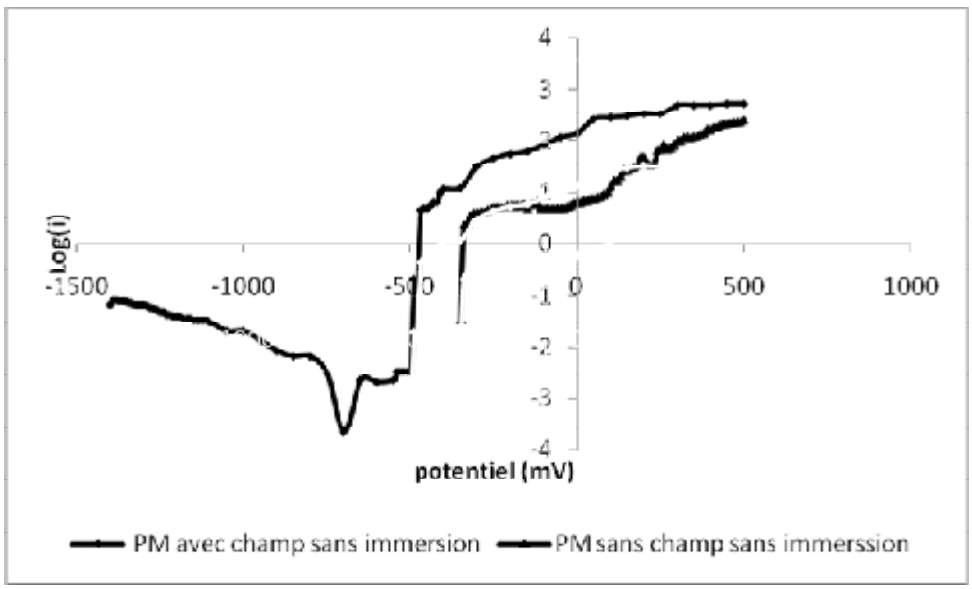


(a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(b)



(c)

Figure IV-30 : effet du champ magnétique sur la courbe de polarisation (Log (i) fonction de E, a) : papier sous forme de rouleau, b) papier chocolat, c) papier médicaments

Les figures (24,30) montrent que la présence du champ magnétique permanant déplace la courbe de polarisation et de passivation à gauche pour le papier d'aluminium pour l'emballage des médicaments et le papier aluminium sous forme de rouleaux. Influe légèrement sur la courbe de polarisation du papier aluminium pour emballage du chocolat.

Les figures qui représentent l'effet loupe montrent que le potentiel de corrosion diminue sous l'effet de la présence du champ magnétique permanant pour papier pour emballage du chocolat (de -450 mV à -625 mV), le papier aluminium pour l'emballage des

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

médicaments (de -355 mV à -710 mV) et le papier aluminium sous forme de rouleaux (de -650 mV à -700 mV). Ceci est dû soit à la diminution du potentiel de la réaction anodique ou bien à la diminution du potentiel de la réaction cathodique. Ceci dit la corrosion du matériau sera soit contrôlé par le phénomène anodique ou bien par le phénomène cathodique.

Ces figures montrent aussi que le phénomène de passivation pour le papier aluminium sous forme de rouleaux et le papier pour l'emballage du chocolat en présence et en absence du champ magnétique.

Résistance à la polarisation	Papier aluminium sous forme de rouleaux	Papier d'aluminium pour emballage du fromage	Papier d'aluminium pour emballage du chocolat	Papier d'aluminium pour emballage des médicaments
En absence du champ	R_P=15625 Ω	R_P=58858,15 Ω	R_P=750 Ω	R_P=303000 Ω
En présence du champ	390Ω		R_P=3000Ω	R_P=15625000 Ω

Tableau IV-1 : Résistance à la polarisation des différents papiers en présence et en absence du champ magnétique permanant

Le tableau IV-1 montre que la présence du champ magnétique permanant provoque une diminution de la résistance à la polarisation pour le papier aluminium sous forme de rouleaux ce qui implique que la corrosion du papier dépend plus par la réaction cathodique que par la réaction anodique, une augmentation de la résistance à la polarisation du papier d'aluminium pour l'emballage du chocolat et des médicaments, ceci implique que la corrosion dépend plus par la réaction anodique que par la réaction cathodique.

Ces valeurs peuvent impliquer une surface vernie.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Micro-dureté Vickers du papier médicament					
Direction X	11	13	13		
Direction X+90°	10	14	12		
Micro-dureté Vickers du papier chocolat					
Direction X	16	18	15	15	15
Direction X+90°	23	20	23	27	22
Micro-dureté Vickers du papier aluminium sous forme de rouleaux					
Direction X	23	26	24	27	
Direction X+90°	22	25	30	23	

Tableau IV-2 : micro-dureté Vickers des différents papiers selon deux directions

Le tableau IV-2 montre tous les papiers d'emballage sont anisotrope et ceci favorise la corrosion de ces papiers d'emballage, car la corrosion en réalité c'est un dégagement de l'énergie libre du matériau, puisque les contraintes résiduelles du matériau différent d'une direction à une autre donc ces énergies différent d'une direction à une autre donc le comportement à la corrosion n'est pas le même d'une direction à une autre.

Ces résultats nous ont permet de prouver que le papier d'aluminium d'emballage alimentaire se corrode et ses constituants se dissous dans une solution de 0,3 de NaCl, mais les constituants d'alimentation peuvent être plus acides ou bien plus basique que cette solution, de ce fait la vitesse de corrosion ou bien de dissolution des constituants des papiers d'aluminium est plus grande.

Une question importante doit se poser si parmi les constituants du papier d'aluminium il y a des métaux lourds que se passera-t-il ?

De tous ces faits nous pouvons dire que la santé publique est menacée.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Conclusion

Le résumé de notre travail montre que la morphologie de la corrosion dépend de composition de la microstructure du papier d'emballage en alliage d'aluminium et il se trouve que cette dernière est localisée.

La composition de la surface (surface nue ou bien surface vernie) influe considérablement sur la morphologie et la cinétique de la corrosion.

L'étude de la corrosion de ce papier après polissage mécanique induit des erreurs considérables dans l'estimation de la corrosion en raison de l'arrachement des particules des autres phases.

La cinétique de la corrosion des différents papiers d'emballage en aluminium n'est pas la même et la présence du champ magnétique permanant influe sur la cinétique de la corrosion des différents papiers. .

La présence du champ magnétique permanant modifie la position de la courbe de polarisation, la courbe de passivation, la valeur du potentiel de la corrosion et du potentiel de la corrosion libre, la résistance à la passivation et à la polarisation, et le courant de la passivation.

Et en fin on peut préconiser que l'emballage avec le papier aluminium est nuisible pour la santé publique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Recherche bibliographique

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Références bibliographiques

[1] : Denis Beaulieu, « les caractéristiques de l'aluminium structural » ; Québec : les presses de l'université Laval, 2002.

[2] : Jean BARRALIS – Gérard MAEDER, « Précis de métallurgie »

Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition Nathan 1994.

[3] : C.VARGEL, « Corrosion de l'aluminium », Ed. Dunod, Paris 1999.

[4] : 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.

[5] : E.LUMINITA, Thèse Doctorat, « Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium », Institut national des sciences appliquées, 2005.

[6] : C. VARGEL, « Comportement de d'aluminium et de ses alliages » ;

Paris, Dunod ; 1979.

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

[8] : Max REBOUL, « Corrosion des alliages d'aluminium », Technique de l'ingenieur,

COR 325.

[9] :«Aluminium ou alliages d'aluminium aux contacts des denrées alimentaires »

www.contactalimentaire.com

[10] : Rim KARBOUJ, thèse Doctorat « Transfert d'aluminium : Cas des matériaux pour contact alimentaire », École Française Papeterie et des Industries Graphiques.
Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.

[11] : Matériaux et propriétés magnétiques, Electrotechnique / Editions de la Dunanche /septembre 2000.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[12] : LAMISS-MARAM, MEKROUD, thèse doctorat « Influence du champ magnétique sur le comportement tribologique des couples métalliques glissants acier XC48 / Acier XC 48, Laiton / ACIER XC 48/ ET Aluminium. 2008

[13] : Marie Pierrot, « Champ Magnétique » Lycée du Rempart, 2010.

[14] : Dieter Landolt, « corrosion et chimie de surfaces des métaux », Lausane : presses Polytechniques et Université Romandes, 1997.

[15] : Bernard Pierraggi, "Oxydation des matériaux métalliques" Paris, LAVOIIER, 2003

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

[17] : Sylvain Audisio (INSA), « corrosion des équipements du secteur alimentaire », centre technique des industries mécaniques (INSA Lyon), 2006.

[18] : F.DABOSI, G.BERANGER, B.BAROUX « Corrosion localisée », France, les éditions de physique 1994.

[19] : D.DESJARDIN et R.OLTR A « Corrosion sous contrainte, phénoménologie et mécanisme », France, les éditions de physique 1992.

[20] : L'intoxication par l'Aluminium, http://www.verite-sans-frontiere.org/vaccins-alluminium.htm

[21] : John Christopher SCULLY, « corrosion protection, principes fondamentaux » ; Masson, Paris, 1995

[22] : ATMANI Djamila, Ingénieur d'état en chimie industrielle «Anodisation de l'aluminium pur en milieu sulfurique en présence d'extrait d'origan comme additif »2009.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com