

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme en Master Académique

**Spécialité :** Génie Mécanique

**Option :** Génie des Matériaux

# Thème

**ETUDE DE L'EFFET DE LA LUMIERE DU JOUR SUR  
LA CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM  
D'EMBALLAGE DANS UN MILIEU DE CHLORURE**

- **Proposé et dirigé par :** Docteur ZAZI Nacer      UMMTO
- **Co-promoteur :** Doctorant HADJ ALI Youcef

- **Réalisé par :** M<sup>elle</sup> SAIL Assia

Promotion : 2017/2018

Mémoire de Master Académique

**Spécialité** : Génie Mécanique

**Option** : Génie des Matériaux

**ETUDE DE L'EFFET DE LA LUMIERE SUR LA  
CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM  
D'EMBALLAGE DANS UN MILIEU DE CHLORURE**

SAIL Assia

Promotion 2017/2018

# Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant pour m'avoir attribué la capacité de comprendre et d'analyser des problèmes, pour m'avoir prédestiné à étudier et d'arriver là où je suis aujourd'hui.

Mes remerciements vont au professeur **ZAZI Nacer** qui m'a proposé ce thème, qui a dirigé et qui a participé activement à mon encadrement tout au long de ce travail et qui m'a guidé pour atteindre mes objectifs tracés, ainsi que le doctorant et co-promoteur **HADJ ALI Youcef** pour m'avoir aussi aidé lors de la réalisation de mes expériences et de m'avoir orienté du mieux qu'il pouvait.

Je tiens aussi à remercier les ingénieurs du laboratoire SDM et RDM **M<sup>me</sup> Yakoubi Milyada épouse SETBEL** et **M<sup>r</sup> SETBEL IDIR** d'avoir mis à ma disposition tout le matériel nécessaire pour mon étude.

Je remercie tous les membres de jury pour avoir accepté de lire mon travail, de le juger et de débattre sur son contenu.

Je remercie tous les auteurs de mes références bibliographiques pour le lôt d'informations que j'ai pu acquérir, les personnes qu'on oublie souvent de remercier mais qui nous facilite chaque jour l'existence.

# Dédicace :

Je dédie ce mémoire :

A **mon père** qui nous a quitté le 15 décembre 2016, qui a longtemps mené un combat contre sa maladie, il a toujours été un exemple pour moi, il respirait la joie de vivre, il aimait la vie, il a toujours tout fait pour que je ne manque de rien, aujourd'hui je lui dédie ce mémoire, car sans lui, je ne serai pas là où je suis aujourd'hui, je suis fière d'avoir été sa fille et de l'avoir eu comme papa, **Allah yerrahmek.**

A **ma mère**, ce phare qui me ramène toujours au port, pour m'avoir ouvert beaucoup de portes que ça soit pour le savoir ou bien autres choses.

A mon grand frère **SAIL MOURAD** et ma petite sœur **SAIL KENZA** dont je suis très fière, que malheureusement sont très loin de moi, mais qui sont avec moi avec la pensée et le cœur.

A mon mari **FEREDJ MOUHAMED NAZIM** qui a toujours été là à mes côtés dans les moments les plus difficiles de ma vie, qui m'a toujours soutenu et aidé du mieux qu'il pouvait.

A mémé **FEREDJ SAADIA** un véritable ange, que dieu la protège.

A mes beaux parents **FEREDJ AZIZ** et **FEREDJ HAYAT**

A mes beaux frères **FEREDJ LAMINE**, **RABAH** et **KRIMO**.

A ma deuxième famille qui nous a toujours soutenu et aidée durant un long moment, **AZOUANI LYES**, sa femme **AZOUANI DJAMILA**, leurs trois enfants que je considère comme mes frères et sœurs **AZOUANI AMINE**, **AZOUANI FERROUDJA ALICIA**, et **AZOUANI LITITIA TAWES**, et à leur grand-mère **TAWES**.

A mes amies **DAHIM NADJET** et **OUMESSAOUD DYHIA** et leurs adorables familles.

Au meilleur ami de papa **HAMMOUCHE M<sup>d</sup> Arezeki** qui est comme un 2<sup>ème</sup> père pour moi.

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : L'aluminium et ses alliages</b>	
I-1. Production de l'aluminium.....	2
I-1-1. Extraction de la bauxite.....	2
I-1-2. Production de l'alumine.....	2
I-1-3. Obtention de l'alumine.....	3
I-2. Propriétés de l'aluminium.....	4
I-2-1. Propriétés physico-chimiques.....	4
I-2-2. Carte d'identité de l'aluminium.....	5
I-2-3. Traitements thermiques.....	5
I-2-3-1. Trempe.....	5
I-2-3-2. Vieillessement.....	6
I-2-3-3. Recuit.....	6
I-3. L'aluminium et ses alliages.....	7
I-4. Désignation des alliages d'aluminium.....	8
I-5. Le choix d'un alliage.....	9
I-5-1. Le choix de la famille d'alliages.....	9
I-6. Fabrication emballage d'aluminium.....	10
I-6-1. Fabrication de la canette.....	10
I-6-2. Fabrication de l'emballage de médicament.....	13
I-6-3. Fabrication de l'aluminium en rouleau.....	13
I-7. Recyclage de l'aluminium.....	17
Références bibliographique du chapitre I.....	18

**CHAPITRE II : Corrosion des alliages**

II-1. Les réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium ..... 20

II-2. Le comportement électrochimique de l'aluminium ..... 20

II-3. Les facteurs de corrosion ..... 21

II-4. Corrosion de l'aluminium et de ses alliages..... 22

    II-4-1. Les formes de corrosion de l'aluminium et de ses alliages..... 22

        II-4-1-1. Corrosion généralisée (uniforme) ..... 22

        II-4-1-2. Corrosion par piqûres..... 22

        II-4-1-3. Corrosion caverneuse..... 23

        II-4-1-4. Corrosion érosion ..... 23

        II-4-1-5. Corrosion galvanique..... 24

        II-4-1-6. Corrosion feuilletante..... 25

II-5. Potentiel de corrosion libre ..... 25

II-6. Courbes de polarisation ..... 25

    II-6-1. La résistance de polarisation..... 25

    II-6-2. Le potentiel de corrosion ..... 26

    II-6-3. La densité du courant de corrosion ..... 26

II-7. Protection de l'aluminium et de ses alliages ..... 26

II-8. Interactions matière-lumière ..... 27

    II-8-1. Définition de l'effet photoélectrique ..... 27

    II-8-2. Effet photoélectrique ..... 28

    II-8-3. Expérience de Hertz ..... 28

        II-8-3-1. Interprétation de l'expérience de Hertz..... 29

        II-8-3-2. Conclusion de l'expérience de Hertz ..... 30

    II-8-4. L'absorption de la lumière ..... 30

    II-8-5. Les applications de l'effet photoélectrique ..... 31

Références bibliographiques du chapitre II ..... 32

**CHAPITRE III : Méthodes expérimentale**

III-1. Introduction..... 34

    III-1-1. Organigramme.....34

III-2. Matériaux étudiés .....	35
III-3. Caractérisation microscopique .....	37
III-3-1. Préparation micrographique .....	37
II-3-1-1. Enrobage.....	37
III-3-1-2. Microscope optique.....	38
III-3-1-3. Réalisation d'une boîte noire .....	39
III-4. Caractérisation chimique .....	39
III-4-1. Corrosion libre.....	39
III-5. Test du potentiel de circuit ouvert (OCP) .....	40
III-6. Le tracé de la courbe de polarisation.....	41
III-7. La microdureté Vickers .....	42
III-8. Essai de traction .....	45
III-8-1. La machine de traction.....	46

## **CHAPITRE IV : Résultats et discussions**

IV-1. Les microstructures des échantillons bruts .....	48
IV-2. Les microstructures des échantillons corrodés 24 heures en absence de la lumière du jour et en présence de la lumière du jour.....	49
IV-3. Les microstructures obtenues après sept (07) jours de corrosion en absence de la lumière du jour et en présence de la lumière du jour .....	52
IV-4. Les microstructures obtenues après quinze (15) jours d'exposition à la corrosion en présence de la lumière du jour .....	55
IV-5. Effet de la polarisation après exposition pendant quinze (15) jours à la corrosion de l'aluminium en rouleau .....	56
IV-6. Le potentiel de corrosion libre.....	57
IV-7. Les courbes de polarisation du papier aluminium en rouleau .....	58
IV-8. La microdureté.....	62
IV-9. Essai de traction.....	63
<b>Conclusion.....</b>	<b>65</b>

## Liste des figures

### CHAPITRE I : L'aluminium et ses alliages

<b>Figure (I-1)</b> : Cuve d'électrolyse d'aluminium à anodes précuites .....	4
<b>Figure (I-2)</b> : Etapes de fabrication de la canette.....	12
<b>Figure (I-3)</b> : Petit moule pour tester et vérifier l'alliage préparé .....	16
<b>Figure (I-4)</b> : Rouleau de papier en aluminium qu'on amincit.....	17

### CHAPITRE II : Corrosion des alliages d'aluminium

<b>Figure (II-1)</b> : Principe des tourbillons turbulents à la formation de creux de corrosion par érosion .....	23
<b>Figure (II-2)</b> : Schéma montrant l'émission d'électrons depuis une plaque métallique .....	28
<b>Figure (III-3)</b> : Expérience de l'effet photoélectrique .....	29

### CHAPITRE III : Méthodes expérimentales

<b>Figure (III-1)</b> : Electrode pour le test de corrosion obtenue à partir de l'emballage des canettes pour boissons .....	36
<b>Figure (III-2)</b> : Electrode pour test de corrosion obtenue à partir de l'aluminium en rouleau .....	36
<b>Figure (II-3)</b> : Electrode pour test de corrosion obtenue à partir de l'aluminium emballage pour médicaments .....	37
<b>Figure (III-4)</b> : Echantillons enrobés .....	37
<b>Figure (III-5)</b> : Microscope optique HUND WETZLAR.....	38
<b>Figure (III-6)</b> : Boîte noire en carton .....	39
<b>Figure (III-7)</b> : Corrosion libre de l'aluminium dans une solution NaCl .....	40
<b>Figure (III-8)</b> : Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl .....	41
<b>Figure (III-9)</b> : Potentiostat de marque AUTOLAB .....	42
<b>Figure (III-10)</b> : Microduromètre de marque ZWICK Roell Indentec .....	44
<b>Figure (III-11)</b> : L'écran affichant la microdureté HV .....	45
<b>Figure (III-12)</b> : Eprouvette de traction selon la norme ASTM E8.....	46

<b>Figure (III-13) :</b> Eprouvettes de traction utilisées .....	46
<b>Figure (III-14) :</b> Machine de traction de marque Ibertest.....	47

## CHAPITRE IV : Résultats et discussions

<b>Figure (IV-1):</b> Echantillons avant corrosion : (a) aluminium destiné pour l’emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) l’aluminium destiné pour fabrication des canettes de boissons .....	49
<b>Figure (IV-2) :</b> vingt quatre (24) heures de corrosion en absence de la lumière du jour : (a) aluminium destiné pour emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) l’aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons .....	51
<b>Figure (IV-3) :</b> vingt quatre (24) heures de corrosion en présence de la lumière du jour : (a) aluminium destiné pour l’emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) l’aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons .....	52
<b>Figure (IV-4) :</b> sept (07) jours de corrosion en absence de la lumière du jour : (a) aluminium destiné pour emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) l’aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons .....	54
<b>Figure (IV-5) :</b> sept (07) jours de corrosion en présence de la lumière du jour : (a) aluminium destiné pour emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) l’aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons .....	55
<b>Figure (IV-6) :</b> quinze (15) jours de corrosion en présence de la lumière du jour : (a) aluminium destiné pour emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleau, (c) aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons .....	56
<b>Figure (IV-7):</b> Effet de la polarisation après quinze (15) jours de corrosion de l’aluminium en rouleau .....	57
<b>Figure (IV-8) :</b> Potentiel de corrosion libre : (a) pour les canettes de boissons, (b) l’aluminium en rouleau .....	58
<b>Figure (IV-9) :</b> Courbes de polarisation de l’aluminium en rouleau, la courbe après une (01) heure d’immersion .....	60
<b>Figure (IV-10) :</b> Courbes de polarisation pour l’aluminium utilisé pour la fabrication des canettes de boissons .....	61
<b>Figure (IV-11) :</b> Effet loup dans la zone du passage par une intensité de courant nul ou bien dans la zone du potentiel de corrosion de la courbe de polarisation pour l’aluminium utilisé pour les canettes .....	62

**Figure (IV-12)** : Dureté de l'aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons en fonction du temps d'immersion dans la solution NaCl en présence et en absence de la lumière du jour ..... 63

**Figure (IV-13)** : Essai de traction : échantillon non corrodé(en vert), échantillon corrodé quinze (15) jours en présence de la lumière du jour(en rouge), échantillon corrodé quinze (15) jours en absence de la lumière du jour(en bleu) ..... 64

## Liste des Tableaux

### CHAPITRE I : L'aluminium et ses alliages

<b>Tableau I-1</b> : Carte d'identité de l'aluminium .....	5
<b>Tableau I-2</b> : Familles des alliages d'aluminium. Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes des corrosions généralement observées ..	8
<b>Tableau I-3</b> : Critères de choix .....	10

### CHAPITRE II : Corrosion de l'aluminium et ses alliages

<b>Tableau II-1</b> : Facteurs de corrosion .....	21
<b>Tableau II-2</b> : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer 25°C.....	24

### CHAPITRE III : Méthodes expérimentales

<b>Tableau III-1</b> : Composition de l'alliage 8011.....	35
---	----

# INTRODUCTION

## Introduction

Il y a cent cinquante ans, on ne connaissait pas l'aluminium en métal. Aujourd'hui, le monde utilise trente mille millions de tonnes d'aluminium par an dans plusieurs domaines (alimentaires, automobiles, aérospatiales, du batiments, de la médecine...etc.)

L'aluminium et ses alliages sont très employés en raison de leur légèreté, leur rigidité, et leur résistance à la corrosion dans l'environnement naturel.

Notre travail s'intéresse à l'effet de la lumière sur la morphologie et la cinétique de la corrosion de l'aluminium, d'emballage alimentaire et des médicaments, par la comparaison de l'évolution de la corrosion des échantillons en immersion dans une solution de chlorure en présence de lumière du jour à celle des échantillons en immersion dans une solution de chlorure de même concentration en absence de la lumière du jour.

Plusieurs tests ont été réalisés, tests du potentiel de corrosion libre, tests potentiodynamiques, tests de traction, tests de microduretés. Tous ces tests ont été réalisés sur des échantillons pris sur des canettes de coca, des emballages des médicaments et du papier aluminium alimentaire.

Les tests de tractions sont réalisés sur des éprouvettes extraites des canettes de coca suivants la norme ASTM E8 (American Society of Testing and Materials).

Il est bien à noter que les matériaux étudiés ont subi dans l'industrie un laminage à chaud, un laminage à froid, et certains un emboutissage profond, ces traitements modifient les propriétés physico-chimiques des matériaux.

Le manuscrit traite sur l'aluminium et ses alliages en général, son extraxion et sa production, et sa mise en service.

Ce travail comporte, une introduction, quatre (04) chapitres se présentant comme suit :

- L'aluminium et ses alliages ;
- Corrosion des alliages d'aluminium ;
- Techniques expérimentales ;
- Résultats et discussions.

et enfin une conclusion.

# **CHAPITRE I**

# **L'aluminium et ses alliages**

## ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un élément important sur la terre avec une proportion de 1,5 % de la masse totale.

C'est un métal léger, argenté et malléable. Il a une résistance à l'oxydation élevée en raison de la formation d'une couche de son oxyde ou de son hydroxyde à sa surface.

### I.1- Production de l'Aluminium

La source de l'aluminium est les bauxites qui sont des roches contenant entre 45 à 60% d'aluminium. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour l'extraction de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à l'élaboration de l'aluminium. La production de l'aluminium se fait par électrolyse d'alumine dans la cryolithe ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) fondue, à une température d'environ  $1000^\circ\text{C}$  dans une cuve comportant un garnissage intérieur en graphite. [1,2]

#### I.1.1- Extraction de la bauxite

Une terre rouge dans une réserve a été découverte par Pierre Berthier en 1812, celui-ci la nomma BAUXITE. Celle-ci est équitablement répartie sur la planète. La Bauxite est une argile tendre, de densité allant de 2.3 à 2.7 à surface Pulvérulente [1,2]

#### I.1.2- Production de l'alumine

La Bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression de 30 à 40 bars est portée à la température allant de  $200$  à  $240^\circ\text{C}$ , l'alumine contenu [1,2] :



Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "boues rouges" sont retirés par décantation et la filtration. Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium [1,2].

La solution d'aluminate de sodium obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30 m de haut dans lesquels, on ajoute du tri-hydrate d'alumine pure très fin, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le tri-hydraté d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée.



L'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est déshydratée par chauffage à  $1100^\circ\text{C}$  en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche de concentration de 99%.

### I.1.3- Obtention de l'Aluminium

Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Héroult", du nom de leurs inventeurs, l'américain Charles Martin Hall et le français Paul Héroult. Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre  $900$  et  $1000^\circ\text{C}$  (**Figure.1**) [1,2].

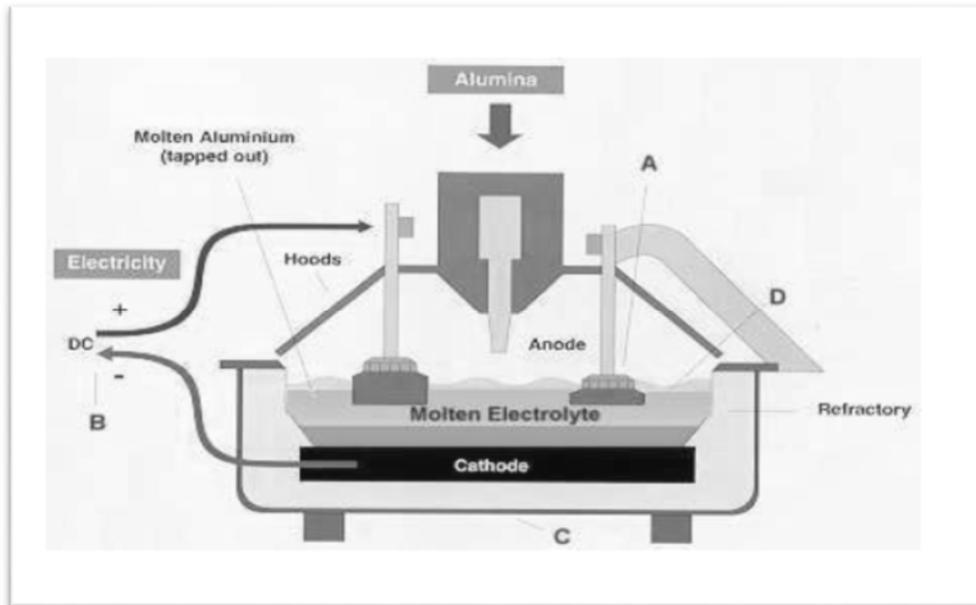


Figure (I-1) : cuve d'électrolyse d'aluminium à anodes précuites.

## I.2- Propriétés de l'aluminium

### I.2.1- Propriétés physico-chimiques [3]

L'Aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. C'est un métal blanc brillant, de densité  $2,7 \text{ g/cm}^3$  fondant à  $660^\circ\text{C}$ . Il est assez mou, malléable et léger. C'est entre  $100$  et  $150^\circ\text{C}$  qu'il se laisse le mieux travailler, ce qui permet de confectionner avec facilité des pièces de profilés, les plus variées et très compliquées.

L'aluminium est pratiquement inaltérable à l'air car il est recouvert d'une fine couche d'alumine. L'eau distillée, l'eau de pluie, la vapeur d'eau ont une action peu sensible sur l'aluminium. En revanche, l'eau de Mer, les acides l'attaquent, l'eau oxygénée a peu d'action sur l'aluminium. Par contre, la soude en solution, le carbonate de soude, les chlorures l'attaquent fortement.

## I.2.2- Carte d'identité de l'aluminium [3]

Tableau I.1 : Carte d'identité de l'aluminium [3]

<b>Réseau cristallin</b>	<b>Cubique à faces centrées</b>
<b>Symbole chimique</b>	<b>Al</b>
<b>Numéro atomique</b>	<b>13</b>
<b>Distribution atomique</b>	<b><math>1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1</math></b>
<b>Masse molaire atomique</b>	<b><math>27 \text{ g.mol}^{-1}</math></b>
<b>T° de fusion</b>	<b><math>660^\circ\text{C}</math></b>
<b>Point d'ébullition</b>	<b><math>2\ 056^\circ\text{C}</math></b>
<b>Densité</b>	<b><math>2,7\text{g/cm}^3</math></b>
<b>Résistivité électrique</b>	<b><math>2,7 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}</math></b>
<b>Conductivité thermique</b>	<b><math>220 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}</math></b>
<b>Capacité thermique massique</b>	<b><math>9,102 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}</math></b>
<b>Coefficient de dilatation</b>	<b><math>24 \cdot 10^{-6} \text{k}^{-1}</math></b>
<b>Module d'élasticité</b>	<b><math>69\ 000 \text{ MPa}</math></b>

## I.2.3- Traitements thermiques [4]

Lorsqu'on cherche à durcir un tel type de matériau, on a recours à un durcissement structural, ou/et au durcissement par l'écrouissage, ou bien durcissement par addition des éléments d'alliage. Le traitement de durcissement structural représente un traitement thermique constitué d'une trempe suivi d'un vieillissement.

### I.2.3.1- Trempe

La trempe d'un aluminium, n'est guère pareille à une trempe martensitique des aciers au carbone, celle-ci comportant les cycles suivants :

- Chauffage jusqu'à la température de la mise en dissolution des phases présentes en excès dans l'Aluminium.
- Maintien à cette même température.
- Refroidissement rapide jusqu'à température ambiante.

Suite à la trempe on peut appliquer : un maintien isotherme (vieillissement naturel) ou à une température supérieure (vieillissement artificiel).

La trempe a pour objectif de figer la distribution des éléments d'addition ou en impuretés en solution, obtenus à la température de mise en solution, jusqu'à la température ambiante.

### **I.2.3.2- Vieillissement**

Une trempe est toujours suivie d'un vieillissement qui désigne un maintien d'une durée nécessaire à une température allant de la température ambiante jusqu'à 350°C, on parle de maturation (vieillissement naturel) quand il s'agit d'un maintien à une température ambiante, ou d'un vieillissement artificiel lorsqu'il s'agit d'un maintien à une température supérieure ou inférieure à la température ambiante.

### **I.2.3.3- Recuit**

Selon les conceptions expérimentales (températures conditions sont le recuit d'homogénéisation, de recristallisation et d'adoucissement.

#### **Recuit d'homogénéisation**

Pour un cycle thermique comportant un chauffage à température élevée (450°C à 520°C), un maintien de 4 h à 40 heures et plus, puis un refroidissement lent ou dans le four même. La température de chauffage dépend des éléments d'alliage de l'aluminium.

### **Recuit de recristallisation**

Pour ce cas, on chauffe l'alliage déformé, jusqu'à une température égale à  $0.4 T_f$ , pour supprimer l'écroutissage et obtenir de nouveaux grains, la taille des grains dépend du temps de maintien pendant ce recuit.

### **Recuit d'adoucissement**

Pour une température variant entre  $350^\circ\text{C}$  et  $450^\circ\text{C}$ , selon l'alliage, et un temps de maintien de 1h à 2 heures, celui-ci assure la décomposition et/ou la coalescence des phases qui le durcissent.

### **I.3- L'aluminium et ses alliages :**

L'Aluminium est capable de s'associer avec un grand nombre d'autres éléments d'alliages donnant ainsi naissance à beaucoup d'alliages différents ayant un faisceau de propriétés très large et permettant de satisfaire un grand nombre d'applications. Les alliages d'Aluminium sont classés en sept familles, selon l'élément d'alliage principal, et la huitième famille pour les alliages qui ne peuvent pas figurer dans les sept premières séries [5,6,7].

Dans chaque famille, les différents alliages ont des caractéristiques communes mais ont aussi chacun leurs propres caractéristiques (**Tableau I-1**).

Les éléments d'alliage les plus courants sont le Magnésium, le Silicium, le Cuivre, le Manganèse et le Zinc, seuls ou en combinaison. Les teneurs sont en général de l'ordre de quelques pourcents (%) Il existe plusieurs centaines d'alliages commerciaux dont on distingue deux grandes catégories d'alliages d'aluminium, les alliages de corroyage et les alliages de moulage [6,7].

#### I.4- Désignation des alliages d'aluminium [8]

- Le premier chiffre de 1 à 8 indique la famille d'alliage, il est déterminé par l'élément principal d'alliage.
- Le second chiffre correspond aux variantes de l'alliage de base, brevetées pour des applications particulières.
- Les deux derniers chiffres indiquent la pureté de l'alliage dans les alliages de la série 1xxx (1050=99,5% Al, 1070=99,7% Al, 1100=99% Al). L'alliage de la série dont la composition chimique est précisé dans les registres de désignation de l'aluminium.
- Dans la série 8xxx sont rassemblés des alliages divers qui ne peuvent pas figurer dans les sept premières séries.

**Tableau I.2 :** Classement des familles d'alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées [9].

Séries	Éléments d'alliage	Phases secondaires	Formes de corrosion	classement
1 000	Aucun	Al <sub>3</sub> Fe, Al <sub>6</sub> Fe, Al <sub>12</sub> Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	Piqûres, généralisée	6
2 000	(Cu)	CuFeMnAl <sub>6</sub> , Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte, inter granulaire, feuilltante	1
3 000	(Mn)	Al <sub>6</sub> Mn, Al <sub>6</sub> MnFe	Piqûres, généralisée	4
4 000	(Si)	Si	Piqûres, généralisée	3
5 000	(Mg)	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> , Al <sub>8</sub> Mg <sub>5</sub>	Piqûres, généralisée, sous contraintes	7
6 000	(Mg+Si)	FeSiAl <sub>5</sub> , Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub> , Al <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> Mg <sub>3</sub> Fe, Mg <sub>2</sub> Si	Piqûres, généralisée	5
7 000	(Zn)	MgZn <sub>2</sub>	Piqûres, généralisée, sous contrainte, inter granulaire (Cu), feuilletante	2
8 000	Divers			

Les éléments d'addition (éléments alliages) principaux et secondaires, quel que soit leurs teneurs, influent sur les caractéristiques physico-chimiques de l'alliage. [6,8]

Les éléments d'alliages, ou impuretés existent sous deux formes dans l'aluminium :

1. Soit en solution solide,
2. Soit sous forme de particules de combinaisons chimique définie ou non définie.

Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques, il peut être retenu d'une manière générale que certains éléments sont néfastes (les éléments cathodiques), d'autres sont sans effet, ceux qui ont un potentiel proche de celui de l'aluminium, et enfin d'autres sont anodiques. Dans ces éléments, pour éviter la corrosion dans le cas de la présence des éléments d'alliages anodiques ou cathodiques, on peut prévoir des protections spécifiques. [6,8]

### **I.5- Le choix d'un alliage**

Le choix d'un alliage est une adéquation entre ses propriétés, ses aptitudes technologiques et les conditions de services. Les critères de choix les plus fréquents sont :

- Les caractéristiques mécaniques ;
- L'aptitude à la déformation ;
- L'aptitude à l'usinage ;
- L'aptitude au soudage ;
- L'aptitude à l'anodisation ;
- La tenue à la corrosion.

#### **I.5.1- Le choix de la famille d'alliages**

L'un des premiers critères de choix doit se faire sur la famille d'alliage, compte tenu que les performances et la mise en œuvre sont assez différentes suivant qu'il s'agit d'alliages à durcissement par écrouissage ou d'alliages à durcissement structural (**voir Tableau I.3**) .

Tableau I.3 - critères de choix [8]

Critères	Alliages à durcissement par écrouissage			Alliage à durcissement structural		
	1 000	3 000	5 000	6 000	2 000	7 000
<b>R<sub>m</sub>(en MPa)</b>	50 à 150	100 à 260	100 à 340	150 à 310	300 à 450	320 à 600
<b>Soudage TIG ou MIG</b>	Possible	Possible	Possible (2)	Possible	Non (3)	Non(3)
<b>Anodisation décorative</b>	Possible	Non	Possible	Possible	Non	Non
<b>Tenue à la corrosion (1)</b>	Bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne	mauvaise	Mauvaise
<b>Aptitude au filage</b>	bonne	bonne	faible	Très bonne	faible	Faible

## I.6- Fabrication des emballages en aluminium

### I.6.1- Fabrication de la canette [10]

L'aluminium de base servant à cette fabrication arrive sous forme de lingot qui par la suite passera entre deux laminoirs à une température allant de 455°C à 540°C. Pour éviter tout chauffage lors de cette opération, les rouleaux sont refroidit essentiellement par de l'eau (95% d'eau et 5% d'huile) et continuellement. A chaque passage entre les cylindres de laminoirs, le lingot devient de plus en plus fin et donc plus long jusqu'à atteindre une épaisseur d'un demi centimètre et une longueur de plus de neuf mètre.

Cette étape du laminage à chaud enfin inachevée, la plaque est enfin prête à être enroulée sur elle-même pour former une bobine qui à son tour passera au laminage à froid afin de réduire d'avantage son épaisseur.

Les canettes en aluminium sont tellement légères qu'il est difficile de croire qu'elles ne sont autres qu'un produit obtenu à partir d'un énorme rouleau embobinant une feuille d'aluminium extrêmement fine et qui pèse neuf tonnes par lequel on pourra obtenir un nombre de 750 000 canettes.

- **Découpage**

Comme première étape, une presse coupe des disques que l'on appelle des flans depuis le rouleau portant la feuille d'aluminium et subi un pré-emboutissage pour former des coupelles.

- **Emboutissage**

Les coupelles obtenues passent sur une presse d'étirage ou des opérations d'emboutissage et d'étirage y sont appliquées pour pouvoir obtenir la hauteur désirée. A cette étape se joint le façonnage du fond de la canette en forme de dôme inversé de sorte à résister à la pression intérieure.

- **Cisailage**

Avec un mouvement rotatif, une cisaille coupe les produits semi-finis de l'intérieure à la hauteur recherchée.

- **Nettoyage**

Sachant que ces canettes sont destinées à porter un produit alimentaire à l'intérieur, elles sont préalablement nettoyées avec un rinçage à l'eau puis par un détergeant commercial, puis passage à l'eau froide, rinçage à l'eau déminéralisée et enfin elles seront séchées et aptes à recevoir un revêtement interne.

- **Impression et vernissage**

Les boîtes sont pressées contre un rouleau encreur leur imprimant ainsi les couleurs et les écrits que doivent avoir celles-ci, puis un vernis protecteur y est appliqué spécialement sur le fond.

- **Cuisson**

Pour traverser le four, les boîtes sont placées sur un convoyeur afin de sécher l'encre à chaud.

- **Revêtement intérieur**

Ce revêtement est spécialement étudié en tenant compte de tous les paramètres pouvant l'influencer, puis les boîtes repassent une autre fois sur le convoyeur afin d'atteindre le four où ce revêtement sera cuit et séché pour qu'enfin le contrôle de porosité de ce dernier soit effectué.

Un bordage est effectué sur la partie supérieure de la canette pour réduire le tour du diamètre car une fois cette étape achevée, la canette est prête à être envoyée chez le demandeur qui se chargera lui-même du remplissage de celle-ci et aussi de la pose du couvercle qui est toujours en aluminium par prévention d'une quelconque corrosion ou détérioration.



**Figure (I.2)** – Etapes de fabrication de la canette [11]

### **I.6.2- Fabrication de l'emballage des médicaments**

Dans l'industrie pharmaceutique, la feuille d'aluminium est utilisée pour transporter et stocker des médicaments en toute sécurité.

L'aluminium est particulièrement adapté, pour cela car il garantit une isolation complète contre la lumière, les gaz, l'humidité et les germes.

L'emballage dans le secteur pharmaceutique est régi par une réglementation stricte qui impose des paramètres de sécurité, de propreté et de précision, ainsi qu'une qualité extrêmement élevée, visant à protéger le consommateur.

Les machines d'emballage pharmaceutiques sont soigneusement conçues pour répondre aux besoins spécifiques de l'industrie pharmaceutique. La fiabilité des machines se traduit par la répétition de la production des emballages conformes.

Ces machines peuvent facilement être nettoyées et désinfectées, une telle conception permettant de prévenir la contamination du produit emballé par des agents externes ; ceci est obtenu grâce à la facilité de démontage et de remontage de toutes les pièces nécessitant un lavage entre les deux emballages de deux lots différents.

### **I.6.3- Fabrication de la feuille d'aluminium alimentaire en rouleau [12]**

La fabrication de la feuille d'aluminium exige l'amincissement à plusieurs reprises d'un gros bloc d'aluminium. Et passe par plusieurs étapes :

- **Etape 1 :**

On commence par faire fondre une dizaine de lingots d'aluminium purs à 100% dans un four chauffé au gaz naturel, ce lingot aux alliages dont lequel on trouve du zinc, du titane et de la silice.

Il faut entre 3 et 8 heures pour faire fondre 27 000 kg d'aluminium dans le four à refonte qui fonctionne à la température de fusion de 750°C. Sachant que la température de fusion de l'aluminium est de 660°C.

- **Etape 2 :**

Dans un petit moule (**voir figure I-3**) on colle une portion d'aluminium afin de fabriquer un échantillon, en seulement quelques secondes, cet échantillon permet de tester et de vérifier le contenu de l'alliage préparé.

Une dalle sert au transfert de l'aluminium depuis le four de refonte jusqu'à la pointe de coulée.

- **Etape 3 :**

L'aluminium en fusion coule dans une dalle de coulée, c'est à cette étape qu'on filtre les impuretés dans des récipients spéciaux.

- **Etape 4 :**

Les moules sont refroidis à l'eau afin d'accélérer la solidification de l'aluminium liquide.

Les lingots sont démoulés et prêts à être usinés.

Chaque lingot mesure 4m40 de longueur, 1m40 de large et 45 cm d'épaisseur, et pèse 7 500 kg.

Chaque lingot doit être manipulé par des grus et déplacé sur des plaques spéciales.

- **Etape 5 :**

Cette étape servira à éliminer les impuretés et à obtenir une surface parfaitement lisse, en enlevant une épaisseur de 3mm au lingot.

- **Etape 6 :**

Cette étape permettra d'amincir le lingot.

Le bloc d'aluminium est écrasé par les rouleaux du laminoir à chaud, la température des rouleaux est comprise entre 455 et 540°C.

Quand à la pression, elle est dirigée par un technicien, si elle est trop forte, ce technicien ajuste la pression.

La chaleur dégagée est tellement élevée que le lingot risque d'être collé aux rouleaux du laminoir, pour empêcher ce phénomène, on refroidit le tout avec un liquide composé de 95% d'eau et de 5% d'huile.

- **Etape 7 :**

Au départ d'une épaisseur de 45 cm, le lingot devient de plus en plus mince, selon les besoin.

Si le lingot passe dans la machine entre 12 et 16 fois, le lingot aura une épaisseur de 5 cm et une longueur d'un peu plus de 9 m.

Le convoyeur équipé de rouleaux transporte la plaque durant les étapes de laminage.

Le lingot devient une feuille d'une épaisseur de 5mm, il est suffisamment mince pour qu'on procède à l'opération de bobinage. C'est-à-dire, on l'enroule sur lui-même avant de l'envoyer au laminoir à froid. Ou son épaisseur sera réduite d'avantage.

- **Etape 8 :**

La feuille étant très mince et risquant de se briser sous la tension requise pour le laminage à froid, on la double.

Une dernière réduction par le laminage à froid et la feuille aura l'épaisseur requise par le client.

Puisque les bords de la feuille seront légèrement abîmés, un couteau lui enlève une bande de 1 cm.

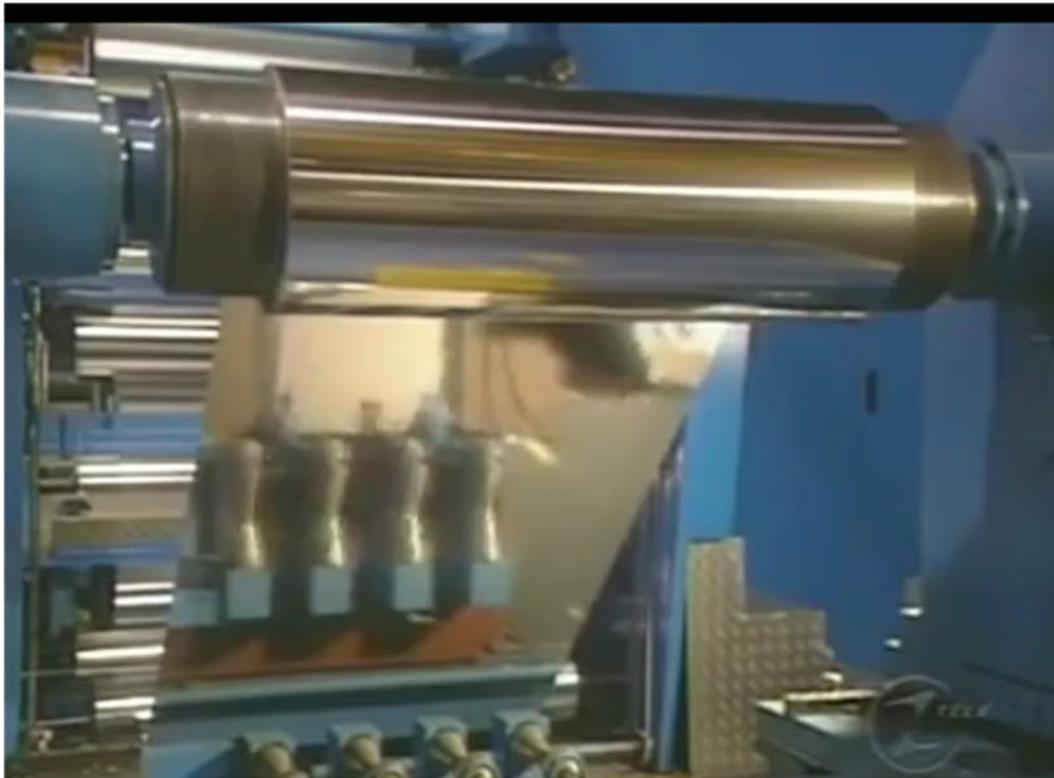
- **Étape 9 :**

Cette étape permet de couper le rouleau à la largeur exigée, la feuille d'aluminium sera enfin prête.

Un énorme lingot permet d'obtenir 850 boîtes d'aluminium de 15 m chacune soit l'équivalent d'une seule feuille longue de 12,700 km



**Figure (I-3) :** Petit moule pour tester et vérifier l'alliage préparé [12]



**Figure (I-4) :** Rouleau de feuille en aluminium qu'on aminci [12]

### **I.7- Recyclage de l'aluminium**

L'aluminium est 100% recyclable presque à l'infini, sans altération de ses propriétés.

L'aluminium de seconde fusion (recyclé) ne demande que 5% de l'énergie nécessaire à son extraction à partir du minerai de bauxite.

Le recyclage des canettes dans le monde permet à deux (2) canettes sur trois (3) d'avoir une deuxième vie contrairement aux feuilles en aluminium pour emballages ou bien aux feuilles en aluminium étant très fin, ils ne contiennent pas assez de matière pour être valorisés.

## Références bibliographiques du chapitre I :

[1] : Altnepoh /D, un regard à l'intérieur de l'aluminium, une introduction à la métallurgie et à la transformation de l'aluminium-ALUMINIUM VERLAG-Paris 1976.

[2] : Métallurgie générale, J.Bernard, J.Philibert, J.Tablot, éd Masson, (1969,1984 pour la 2<sup>ème</sup> éd), 607p, ISBN 978-2-225-82347-3.

[3] : Dr GHOMARI Fouad. Université Aboubekr Belkaid. Faculté des sciences de l'ingénieur, département GC. Sciences de matériaux de construction.

[4] : M<sup>elle</sup> DEBIANE Ferroudja. Etude de l'effet de l'anisotropie sur la microstructure, les propriétés mécaniques et chimiques des canettes en aluminium, Université mouloud mammeri de tizi-ouzou, mémoire Master, 2015-2016.

[5] : Edward Ghali, corrosion résistance of aluminium and magnésium alloy, WILEY, USA, 2010.

[6] : Roger DEVELAY, propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés, M440, techniques de l'ingénieur, Paris, France.

[7] : Michel colombié et coll, Matériaux métalliques, Edition 2, L'USINE NOUVELLE, DUNOD, Paris, France, 2008.

[8] : Max REBOUL, corrosion des alliages d'aluminium, cor 325, techniques de l'ingénieur, Paris, France, 2012.

[9] : Elena Luminita DIN-STRIBU, comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur, de chauffage, thèse de doctorat, Université de PITESTI, Roumanie, 2005.

[10] : Comment c'est fait canette aluminium

<https://www.youtube.com/watch?v=EXwGcxGuVd4&feature=share>.

[11] : <https://thelifeofacanofcoke.yolasite.com/production.php>. 02 septembre 2018.

11h09.

[12] : Comment c'est fait papier aluminium

<https://www.youtubecom/watch?V=ac6zQv11j3w&feature=share>.

[13] : ZAZI Nacer. Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium. Thèse de doctorat.2011

# **CHAPITRE II**

## **Corrosion des alliages d'aluminium**

## Corrosion des alliages d'aluminium

La corrosion est un phénomène connu depuis la découverte des métaux.

Les premiers essais de corrosion connus sur l'aluminium ont commencés vers 1890, à partir du moment où ce métal fut disponible en quantité suffisante pour envisager des applications dans le bâtiment et dans les ustensiles de cuisine. C'est ainsi que les premiers essais de tenues à l'eau de pluie, au contact de plusieurs liquides alimentaires : bière, café, thé, furent entrepris dès le début de la décennie 1890 [1].

La corrosion des métaux et de leurs alliages témoigne de leur tendance à revenir à leur état originel de minerais (oxydes, sulfures, carbonates,...etc) sous l'action des agents atmosphériques.

### II-1. Les réactions électrochimiques de la corrosion de l'aluminium

Les réactions fondamentales électrochimiques de la corrosion de l'aluminium en milieu aqueux ont fait l'objet de plusieurs études.

L'oxydation de l'Aluminium dans l'eau a lieu suivant la réaction :



### II-2. Le comportement électrochimique de l'aluminium

Le comportement électrochimique de l'aluminium est influencé par le film d'oxydes naturel qui régit la tenue à la corrosion de l'Aluminium.

Le potentiel qu'on mesure sur l'Aluminium n'est pas celui du métal. Il n'est pas possible de mesurer celui du métal du fait que le film d'oxyde se reforme instantanément en milieu oxydant, dont l'eau, en une fraction de seconde, le millième et même moins [2].

La corrosion se propage sous forme de piqûres dans les milieux proches de la neutralité. La mesure d'un courant de corrosion donne des indications sur la vitesse globale de corrosion mais il ne renseigne pas sur ses aspects morphologiques : diamètre, densité, localisation des piqûres [2].

### II-3. Les facteurs de la corrosion [3]

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre (04) groupes principaux, tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaques ;
- Facteurs métallurgiques ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi ;
- Facteurs dépendant du temps ;

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau II-1: Facteurs de la corrosion**

Facteurs définissant les modes d'attaques	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Additions d'inhibiteurs -Température -Pression	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration -Impureté -Traitements thermiques -Traitements mécaniques -Additions protectrices	-Etat de surface -Forme des pièces -Sollicitations mécaniques -Emploi d'inhibiteurs -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Température -Modification des revêtements protecteurs

## **II-4. Corrosion de l'aluminium et ses alliages [4]**

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-4-1. Formes de corrosions de l'aluminium et ses alliages [4]**

La corrosion de l'aluminium et ses alliages peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu : Corrosion généralisée, corrosion localisée : par piqûre, cavernreuse, érosion, galvanique, et feuilletante.

#### **II-4-1-1. Corrosion généralisée (uniforme)**

Pour les alliages d'aluminium, les problèmes de corrosion généralisée sont intimement liés au pH du milieu. Lorsque le pH s'écarte en effet du voisinage immédiat de la neutralité ( $4 < \text{pH} < 9$ ), 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 l'exemple, l'acide nitrique fumant). De même, l'aluminium et ses alliages peuvent résister en milieux alcalins grâce à certains effets d'inhibition (par exemple, l'ammoniaque concentrée, les bases organiques faibles, les silicates, le béton).

Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion générale des alliages d'aluminium passifs est certes très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de  $5\mu\text{m}$  par an, ce qui peut entraîner à la longue une évolution progressive de l'état de surface vers un aspect inesthétique du à une variation de la rugosité (peau d'orange) [5].

#### **II-4-1-2. Corrosion par piqûre**

La corrosion par piqûre se développe dans tous les milieux naturels, sous forme de cavités de profondeurs variables. Les conditions d'initiation et de la propagation de la

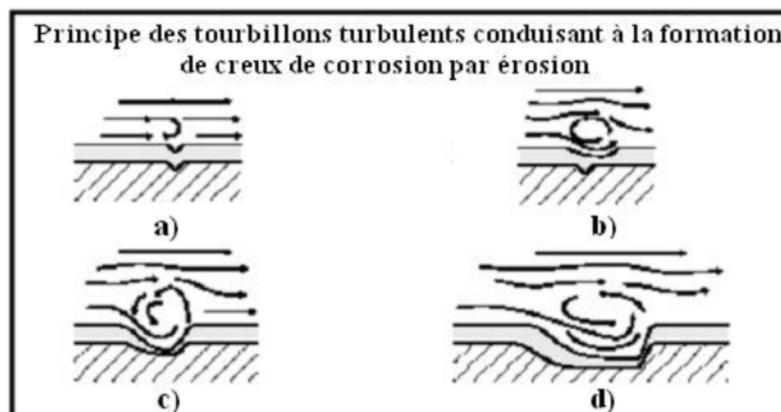
piqûration sont bien connues, même si il s'agit d'un phénomène très complexe, dont le mécanisme n'est pas totalement déterminé [5].

#### II-4-1-3. Corrosion caverneuse

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûre. 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 [6].

#### II-4-1-4. Corrosion par érosion

La corrosion par érosion se produit dans un fluide en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientés dans une même direction. **(La Figure II.1):** illustre le mécanisme de déformation des creux par érosion.



**Figure (II-1) :** Principe des tourbillons turbulents conduisant à la formation de creux de corrosion par érosion.

Ce type de corrosion étroitement lié à l'hydrodynamique du fluide peut être rencontré dans le cas des circuits de chauffage. Le meilleur moyen de lutte contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes.

### II-4-1-5. Corrosion galvanique

En raison de la présence d'un courant électrique et de deux métaux différents qui sont en contact indirect il s'établit une différence de potentiel entre ces deux métaux ainsi la corrosion s'accroît sur le métal le moins résistant à ce milieu corrosif et l'attaque diminue sur le plus résistant [7].

Pour chaque solution, il est possible d'établir une "série galvanique" (classement des différents métaux et alliages en fonction de leur potentiel de corrosion mesuré).

(Le **Tableau II.4.1.5.1**) présente une classification des métaux de quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer (les métaux sont classés ici par ordre croissant d'activité)

**Tableau II-2** : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer 25°C [8]

Matériau protégé (cathodique ou plus noble)	
	Platine
	Or
	<b>Graphite</b>
	Acier inoxydable
	Titane
	Argent
	Nickel
	Alliages de cuivre
	Etain
	Bronze
	Laiton
	Cuivre
	Fer
	Acier à bas carbone
	<b>Alliages d'Aluminium, série 2 000</b>
	Cadmium
	<b>Aluminium, série 1 000</b>
	<b>Alliages d'Aluminium, 5 000, 3 000, 6 000</b>
	Acier galvanisé
	Zinc
	Magnésium et alliages de magnésium
Matériau corrodé (anodique ou moins noble)	

↑

Ecorr Inconel base 600

Plomb

#### II-4-1-6. Corrosion feuilletante [2]

La corrosion feuilletante est une forme de corrosion sélective qui se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du laminage ou du filage.

Entre ces plans, il subsiste de minces feuillets de métal qui ne sont pas attaqués mais qui sont écartés les uns des autres par les produits de corrosion comme les feuilles d'un livre, c'est la raison pour laquelle on l'a appelée "corrosion feuilletante".

#### II-5. Potentiel de corrosion libre [9]

La potentiométrie est une méthode qui consiste à suivre l'évolution du potentiel à l'abandon (ou du potentiel de corrosion :  $E_{\text{corr}}$ ) en fonction du temps.

C'est la tension d'un métal ou d'un alliage métallique mesurée par rapport à une électrode de référence lorsque aucun courant ne s'écoule de ou vers cet échantillon. L'unité de mesure est le (V/réf).

Les courbes potentiel/temps permettant d'apprécier les modifications de la surface de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans le milieu. Les variations de potentiels de corrosion enregistrées renseignent sur la dégradation, la passivation ou l'immunité d'une surface métallique. Cependant, le déplacement du potentiel de corrosion d'un métal vers des valeurs plus nobles n'est pas toujours corrélé avec une augmentation de résistance à la corrosion. Il est donc indispensable de mesurer parallèlement la valeur de l'intensité de courant de corrosion.

#### II-6. Courbe de polarisation

##### II-6-1. La résistance de polarisation [9] :

Aucune condition cinétique particulière n'est requise pour déterminer la résistance de polarisation qui est déterminée à partir de la courbe  $E=f(i)$  au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de l'échantillon.

La résistance à la polarisation est la pente ( $\Delta E/\Delta i$ ) au voisinage du potentiel de corrosion sur la courbe de polarisation. de la courbe de polarisation, l'unité de mesure est  $i'(\Omega/\text{cm}^2)$ .

La résistance de polarisation est l'inversement proportionnelle au courant de corrosion. Plus la valeur de la résistance de polarisation est élevée, plus l'intensité du courant de corrosion est faible.

### **II-6-2. Le potentiel de corrosion**

La connaissance de la variation du potentiel de corrosion est insuffisante pour déterminer le sens dans lequel évolue le phénomène de corrosion et il est indispensable de mesurer parallèlement la valeur de l'intensité du courant de corrosion.

### **II-6-3. La densité du courant de corrosion [9]**

Elle est déterminé graphiquement à partir de courbe  $\log i=f(E)$ , elle est exprimée en intensité, l'unité de mesure qui est ( $A/\text{cm}^2$ ). C'est la différence entre la densité du courant cathodique et du courant anodique. La valeur de l'intensité du courant de corrosion  $i_{\text{corr}}$  peut alors être obtenu en extrapolant la droite de Tafel, cathodique et/ou anodique, jusqu'au potentiel de corrosion  $E_{\text{corr}}$ . Cette méthode n'est exacte que pour les métaux purs.

### **II-7. Protection de l'Aluminium et ses alliages**

Pour remédier à l'attaque que subit l'aluminium ou ses alliages, on a recours à plusieurs procédés visant cet effet comme :

- Anodisation,
- Revêtements,
- Prévention par études des formes adaptées des pièces,
- Prévention par affinage lors du choix du matériau.
- Protection anodique ;
- Protection cathodique ;

- Application d'inhibiteurs de corrosion.

Pour les alliages d'aluminium, leur comportement à la corrosion ne diffère pas trop de celui du métal pur néanmoins certains éléments accentuent ce phénomène car selon les conditions de traitements, les phases intermétalliques précipitent aux joints de grains causant ainsi une corrosion inter granulaire [10].

## II-8. Interaction matière / lumière

L'action de la lumière pour changer le courant électrique circulant dans un métal, et la différence de potentiel entre les électrodes éclairées et les électrodes non éclairées est un phénomène bien connu.

Le changement de la différence de potentiels qui se produit lors de l'interaction d'une électrode avec la lumière est appelée l'effet BECQUEREL ou bien effet PHOTOELECTRIQUE.

### II-8-1. Définition de l'effet photoélectrique [11]

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, qui dépend du matériau.

Dans l'effet photoélectrique, on éclaire une plaque de métal, et celle-ci émet des électrons.

L'effet photoélectrique est la définition des phénomènes électriques qui sont provoqués par l'action de la lumière (bleue ou UV) sur la matière.

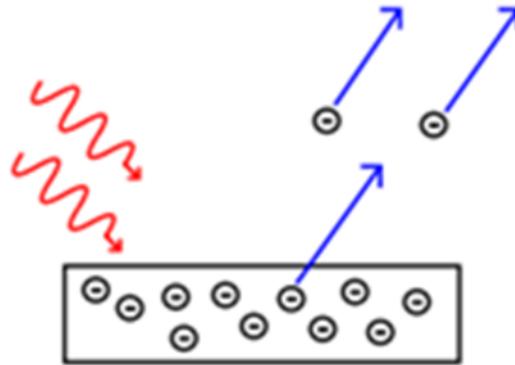
Cet effet se produit sur plusieurs matériaux, si sa longueur d'onde est assez courte. Plus la longueur d'onde est courte plus l'intensité de l'onde est importante et plus elle apporte de l'énergie.

Longueur d'onde :  $\lambda = c/f$  ..... 1

$\lambda$  : longueur d'onde

$c$  : vitesse de la lumière

$f$  : fréquence



**Figure (II-2) :** Schéma montrant l'émission d'électrons depuis une plaque métallique

L'émission de chaque électron (lignes bleues) requiert une quantité minimale d'énergie, laquelle est apportée par un photon (lignes rouges).

### II-8-2. Effet photoélectrique [12]

En 1839, une expérience d'Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond Becquerel, présentée à l'académie des sciences, permet d'observer pour la première fois que si on illumine une électrode d'un dispositif composé de deux électrodes identiques plongées dans un électrolyte, il peut apparaître une différence de potentiels (ou tension électrique) entre ces deux électrodes d'environ  $10^{-4}$  V.

### II-8-3. Expérience de Hertz [13]

En 1886, Heinrich Hertz réalise l'expérience intitulée « effet photoélectrique » : une plaque de zinc, décapée, montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure (émettant un rayonnement riche en UV, visible et IR) ou par une lampe à UV, (**Voir figure III-1**).

L'expérience comporte trois étapes:

- **Etape 1 :**

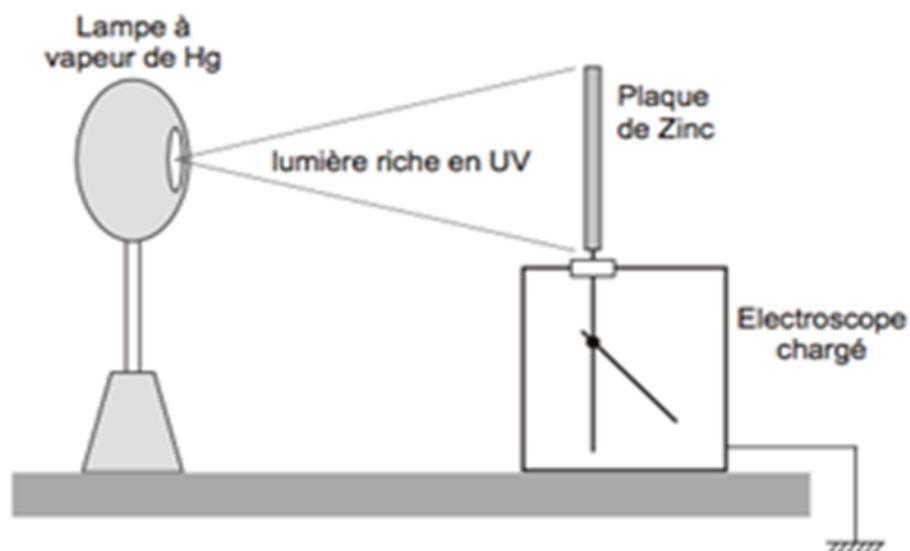
Initialement, la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie. Puis, la plaque de zinc est éclairée.

- **Etape 2 :**

La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre est interposée entre la lampe et le zinc.

- **Etape 3 :**

La plaque de zinc est chargée positivement, puis éclairée.



**Figure (II-3) :** Expérience de l'effet photoélectrique [13]

### III-8-3-1. Interprétation de l'expérience de Hertz [13]

La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal : c'est l'effet photoélectrique.

- **Etape 1 :**

Les électrons, une fois extraits de la lame, sont repoussés par la lame qui se charge positivement. Les charges négatives de l'électroscope viennent neutraliser les charges positives de la lame : la décharge s'effectue.

- **Etape 2 :**

La lumière ayant traversé le verre n'avait plus l'énergie nécessaire (le rayonnement ultraviolet a été absorbé par le verre) pour extraire des électrons du zinc.

- **Etape 3 :**

La plaque de zinc chargée positivement, attire les électrons émis : la décharge n'est pas observée.

### **III-8-3-2. Conclusion de l'expérience de Hertz [13]**

Heinrich Hertz a alors découvert que la lumière ultraviolette provoque l'émission d'électrons à partir d'une surface métallique comme le zinc.

Ce sont les observations de Hertz qui a permis la constatation de la théorie de la lumière généralement admise à l'époque : la lumière est une onde (c'est la théorie qui permet d'expliquer une grande partie des phénomènes dans lesquels la lumière intervient comme la diffraction, les interférences...).

### **II-8-4. L'absorption de la lumière [14]**

De façon générale, les atomes ont tendance à s'associer pour former des molécules stables par mise en commun d'électrons. Lorsque la lumière arrive sur la matière, ces atomes et molécules peuvent réagir de diverses manières : absorption, fluorescence, transmission, réflexion, diffusion.

**II-8-5. Les applications de l'effet photo-électrique [13]**

Les applications de l'effet photo-électrique sont :

- L'ouverture automatique des portes.
- Les cellules des appareils photos.
- Le réglage automatique d'une photocopieuse.
- Les panneaux solaires et les cellules photovoltaïques utilisent l'effet photo-électrique pour générer directement de l'énergie électrique à partir de la lumière du soleil, cette énergie sert également aux navettes spatiales pour leur fournir une pile au silicium.
- Le CDD (Charged Coupled Device) est un dispositif qui assure en même temps les fonctions de conversion photo-électrique.

## Références bibliographique du chapitre II :

- [1] : Reboul M., Warner T., Mayet H, Baroux B., A ten step mechanism for the pitting corrosion of Al alloys, corrosion reviews, vol.15, nos 3-4, p.471-496.
- [2] : Christian Vargel, CORROSION DE L'ALUMINIUM, DUNOD, Industries techniques, techniques et ingénierie, série matériaux.
- [3] : S.BENSAADA- Cours de corrosion. Office des publications universitaires.
- [4] :S.Payan, comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium, renforcée par des fibres de carbone haut module. Thèse sciences chimiques. Bordeaux ; université Bordeaux, 2001.
- [5] : C.Vergel, corrosion de l'aluminium, Paris : DUNOD, 1999, 501p.
- [6] :Thèse. Université de PITESTI (Roumanie) et institut national des sciences appliquées (Lyon-France), 2005.
- [7] :Joseph F. BOISCH. Ingénieurs praticiens. Prévention de la corrosion. Entreprise Moderne d'Édition. P40-41. 1977.
- [8] :E.C.W. Perryman, S.E.Hadden, Relation between the aging and stress corrosion properties of aluminium-zinc alloys. Journal of the Institute of Metals , 1950.
- [9] Pr.P.COLON, Dr.B. GROSGOGÉAT-BALAYRE. Campus odontologie.  
Société Francophone des biomatériaux dentaires (SFBD).
- [10] : DIETER Landolt, traité des matériaux. 12. Corrosion et chimie des surfaces des matériaux. Ed, press polytechniques et universitaires romandes. P 332.
- [11] : Daili Fatima Zohra, Atoussi Sarah, l'effet photoélectrique, université Mentouri constantine, faculté des sciences de l'ingénieur, département électronique, Master I électronique biomédicale, 2010-2011.

[12]: <http://www.physique.edunet.tn/kef/chapitre1effet/I-%20EXPERIENCES%20%20HERTZ.htm>.

[13]: vidéo

<http://vidéo.yahoo.com/watch/616757/2931071>.

# CHAPITRE III

## Techniques expérimentales

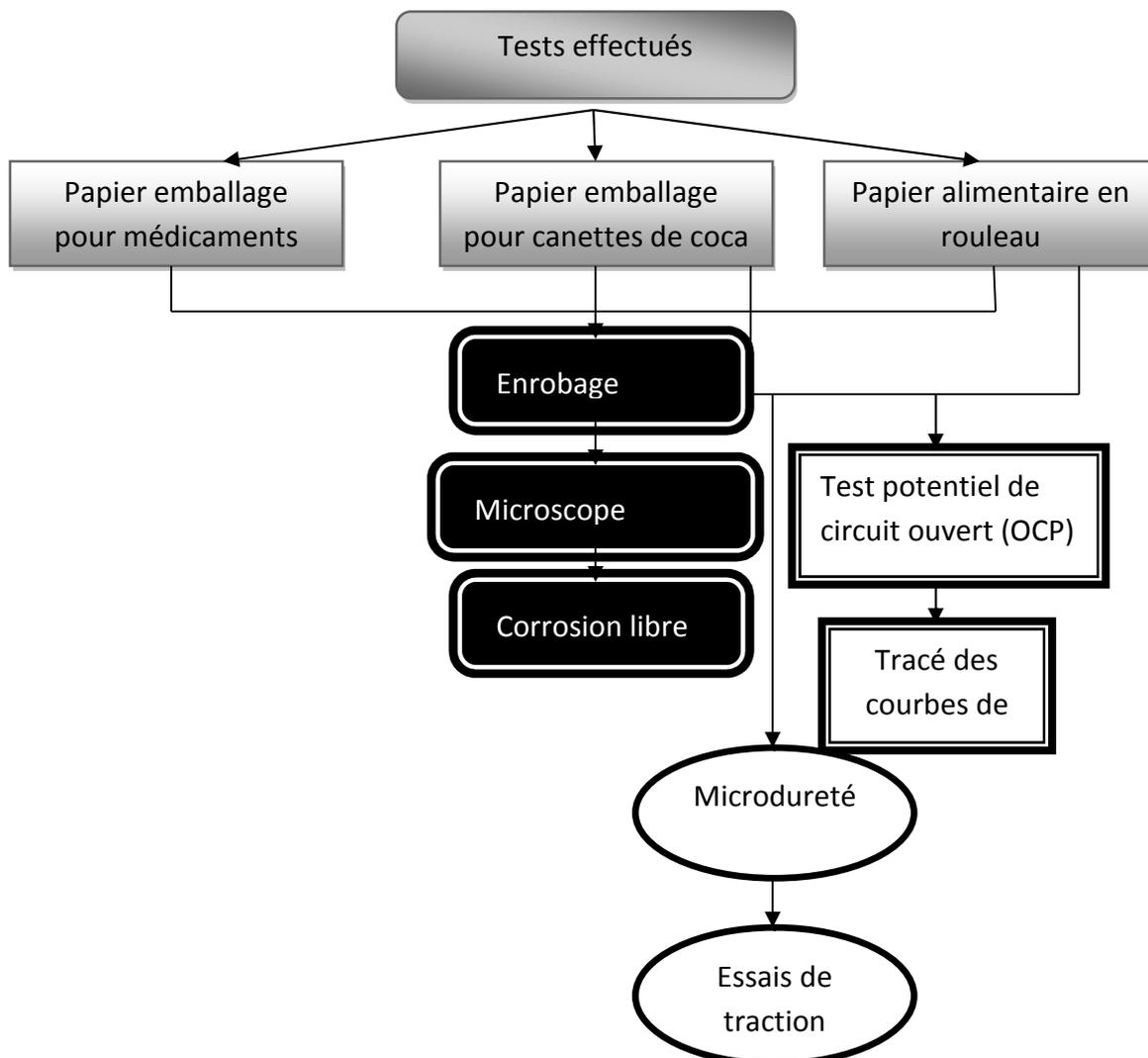
### III-1. Introduction

Le présent chapitre traite sur les techniques expérimentales qu'on a usé lors de la réalisation de cette étude.

Le but de ce travail est l'étude de la photo-corrosion, celui-ci nous a permis de comparer l'évolution de la corrosion en présence de la lumière à celle sans lumière du jour.

Nous avons étudié le comportement chimique et électrochimique de l'aluminium pour l'emballage, par le biais des tests d'immersion libre et sous tensions variables imposées, pour voir l'évolution de la morphologie ainsi que la cinétique de sa corrosion en faisant varier les conditions d'essais.

#### I-1-1. Organigramme



### III-2. Matériaux étudiés

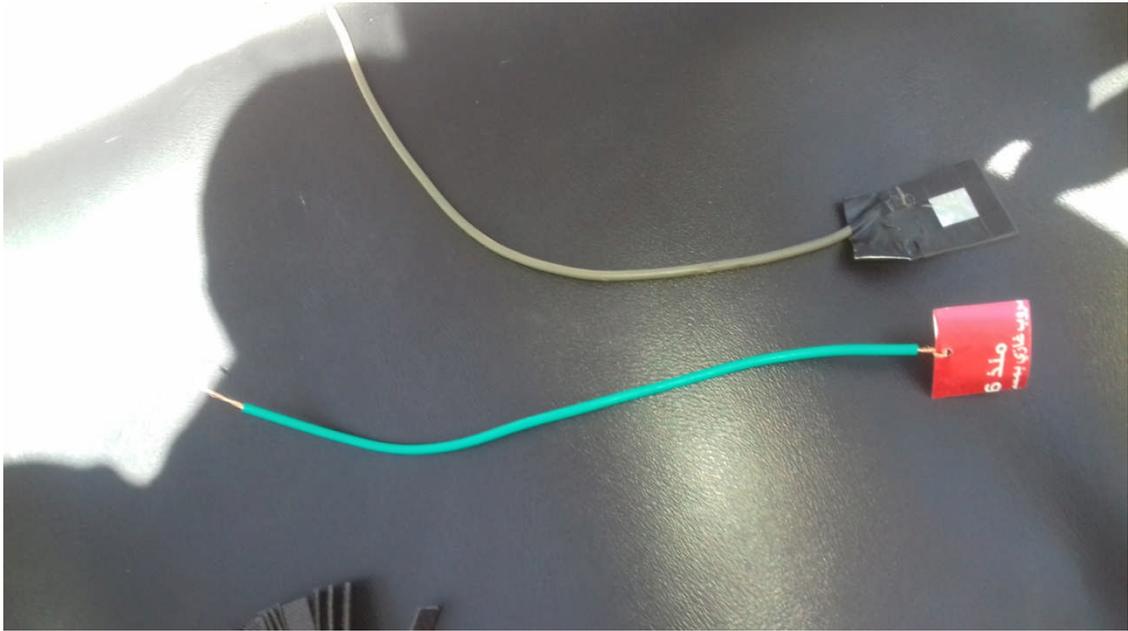
Les essais sont réalisés sur des feuilles d'aluminium obtenues à partir de canettes pour boissons gazeuses ou non gazeuses, de feuilles aluminium alimentaire en rouleau et de feuilles d'aluminium pour emballage des médicaments, provenant elles-mêmes des lingots d'aluminium laminés, à chaud et à froid, et préformés pour subir un emboutissage dans le cas de la fabrication de canettes de boissons.

Pour la fabrication de ces canettes, la nuance d'aluminium la plus utilisée est l'alliage 8011 qui est utilisé également pour la production des emballages alimentaires et médicaux. Cette nuance est favorisée pour sa pureté commerciale, sa concentration en aluminium variant de 97,3 à 98,9% et pour son aisance au recyclage, sa composition chimique de cet alliage est comme suit :

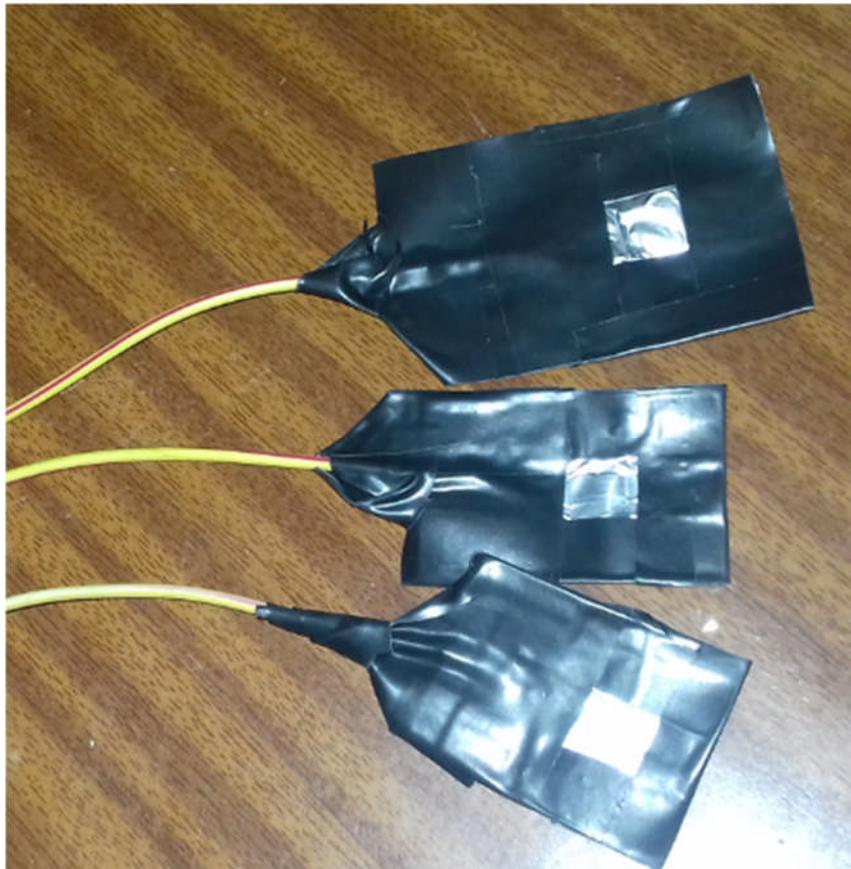
**Tableau III-1** : composition de l'alliage 8011

<b>Eléments</b>	<b>Concentration %</b>
<b>Silicium (Si)</b>	<b>0,50 à 0,90</b>
<b>Fer (Fe)</b>	<b>0,60 à 1,0</b>
<b>Cuivre (Cu)</b>	<b>≤0,10</b>
<b>Manganèse (Mn)</b>	<b>≤0,20</b>
<b>Magnésium (Mg)</b>	<b>≤0,05</b>
<b>Chrome (Cr)</b>	<b>≤0,05</b>
<b>Zinc (Zn)</b>	<b>≤0,10</b>
<b>Titane (Ti)</b>	<b>≤0,08</b>
<b>Autres, chaque</b>	<b>≤0,05</b>
<b>Autres au total</b>	<b>≤0,15</b>

Les échantillons destinés pour l'immersion sont représentées par les **Figures III (1et 2)** ces échantillons ont une surface de travail de 1x1 cm<sup>2</sup>. Le choix d'une surface de 1 centimètre est important. Ceci dit pour le tracé de la courbe de polarisation nous avons besoin d'une densité de courant, cette dernière a pour unité A/cm<sup>2</sup>.



**Figure (III-1) :** Electrode pour test de corrosion obtenue à partir de l’emballage des cannettes pour boissons



**Figure (III-2) :** Electrode pour test de corrosion obtenue à partir du papier aluminium en rouleau.



**Figure (III-3) :** Electrode pour test de corrosion obtenue à partir du papier aluminium d'emballage de médicaments

### III-3. Caractérisation microscopique :

#### III-3-1. Préparation micrographique des échantillons

##### III-3-1-1. Enrobage :

Les feuilles d'aluminium de fine épaisseur sont difficile à enrobé par la technique d'enrobage classique. Pour cela, nous avons réalisé un enrobage à l'aide du papier adhésif, nous avons caché les surfaces non concernées par le test de corrosion (**Figure III-4**).



**Figure (III-4) :** Echantillons enrobés

### III-3-1-2 : Microscope optique :

Lors de cette étude une analyse microscopique, au microscope optique est réalisée sur tous les échantillons avant la corrosion, et après corrosion à des temps d'immersion différents, en présence de lumière et en absence de lumière dans une solution NaCl.

Pour se faire, on utilise un microscope optique, de marque HUND WETZLAR relié à un ordinateur permettant la transmission de l'image observée grâce à une caméra accolée à ce microscope permettant aussi d'aller jusqu'à un grossissement Gx400 et l'acquisition de cette image se fait au logiciel de traitement Piced CORA.



**Figure (III-5):** Microscope Optique HUND WETZLAR

### III-3-1-3: Réalisation d'une boîte noire:

Pour réaliser les essais de corrosion en absence de lumière du jour, on a du réaliser une boîte noire faite à partir du papier carton pour empêcher la lumière de pénétrer dans la solution.



**Figure (III-6) :** Boite noire en carton

#### **III-4. Caractérisation chimique :**

##### **III-4-1. Corrosion libre :**

L'évolution de la morphologie de corrosion des échantillons est suivie tout au long de 15 jours, les examens micrographiques pour l'étude de la morphologie de corrosion sont effectués à des temps d'immersion différents.

Pour cet essai, trois (03) types d'échantillons, échantillons prélevés de canettes de boisson gazeuse, échantillons prélevés du papier aluminium alimentaire, et échantillons prélevés du papier emballage pour médicaments, ont été immergés dans des solutions de NaCl de 0.3% en masse, en présence de la lumière et en absence de lumière (dans une boîte noire). Le suivi de la morphologie de corrosion a été effectué par le biais du microscope optique.



**Figure (III-7) :** Corrosion libre de l'aluminium dans une solution de NaCl

### III-5. Test du potentiel de circuit ouvert (OCP) :

Pour effectuer ce test, on a utilisé une cellule de corrosion à montage de 2 électrodes, électrode de référence Ag/AgCl obtenue par l'immersion du fil d'Argent dans l'Hypochlorite de Sodium par contre l'électrode de travail est l'alliage étudié.

Les deux électrodes étés immergées dans une solution de NaCl (0,3% de concentration en masse) pour les trois (03) types d'échantillons.

L'unité de mesure du potentiel de corrosion libre (OCP) est le V ou le mV par rapport au potentiel de l'électrode Ag/AgCl.

On immerge dans la solution électrolytique l'électrode de référence et à l' instant où la deuxième électrode est immergée, on prend les valeurs du potentiel affichées sur le multimètre relié aux deux électrodes ainsi, on pourra caractériser l'évolution du potentiel libre de corrosion de l'alliage étudié en fonction du temps et de la lumière du jour, chaque 24h pendant 15 jours.les tests ont été fait au mois de juin.



**Figure (III-8) :** Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl

### III-6. Le tracé de la courbe de polarisation :

Une courbe polarisation de chaque échantillon de chaque type a été tracée à l'aide d'un Potentiostat de marque AUTOLAB reliée à un ordinateur utilisant un logiciel NOVA.

NOVA est le nouveau logiciel d'électrochimie de Autolab. Cette application est utilisée pour contrôler tous les instruments accessoires Autolab compatibles.

NOVA combine la puissance et de flexibilité des versions précédentes avec une interface utilisateur simple et moderne. La conception de NOVA repose sur des représentations graphiques simples et efficaces des tâches communes pouvant être effectuées par l'instrument.

NOVA fournit une liste complète de caractéristiques uniques :

- Une présentation simple, cohérente et claire.
- Un tableau de bord pour toutes les informations pertinentes.
- Navigation par onglets tout au long de l'application.
- Une vaste bibliothèque de méthodes prédéfinies.

- Un éditeur de processus facile à utiliser pour les méthodes personnalisées.
- Puissance option de traçage 2D et 3D.
- Une large gamme d'outils d'analyse de données et de traitements de données.
- Une transition en douceur de procédures.
- Multi Autolab prend en charge jusqu'à 128 instruments à partir d'un seul ordinateur.
- Options de contrôle manuel de tous les instruments pris en charge.



**Figure (III-9) :** Potentiostat de marque AUTOLAB

### III-7. La microdureté vickers :

La microdureté se fait sous une charge de quelques grammes à une centaine de grammes. De même que dans ce cas, la dureté est donnée sur l'écran de l'appareil ce qui n'est pas le cas du duromètre ou la dureté HV doit se calculer par la loi suivante :

$$HV=F/S \quad \dots\dots(1)$$

Ou HV : la dureté Vickers et F : la force appliquée [N].

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

Ou A : l'angle au sommet du pénétrateur et d : la diagonale de l'empreinte [mm].

Pour cet essai, nous usons d'un microduromètre de marque ZWICK Roell Indentec doté d'une lunette permettant de visualiser l'empreinte laissée par le pénétrateur qui a une forme en diamant à base carrée avec un angle au sommet formant  $136^\circ$  pour ainsi sélectionner la diagonale pour laquelle l'appareil nous donnera la valeur de la dureté HV.

Plusieurs essais sont faits pour un même échantillon sur une même ligne pour qu'on puisse calculer la moyenne pour des résultats plus sûrs.

La force appliquée est de 1 kgF pour les échantillons de canettes de coca, 0,1 kgF pour les échantillons de papiers aluminium et 0,2 kgF pour les échantillons de papiers médicaments, ou le pénétrateur touche la surface pendant 20 secondes.



**Figure (III-10) :** Microduromètre de marque ZWICK Roell Indentec



**Figure (III-11) :** l'Ecran affichant la microdureté HV

### **III-8. Essai de traction :**

L'essai est réalisé sur des éprouvettes de boissons coca cola, suivant la norme ASTM E8 voir (**figure III-10**)

On a réalisé l'essai de traction sur neuf éprouvettes : trois éprouvettes qu'on a immergé dans une solution NaCl pendant 15 jours en absence de lumière, trois autres qu'on a immergé 15 jours dans la même solution mais en absence de lumière et les trois dernières on les a laissé tel quel.

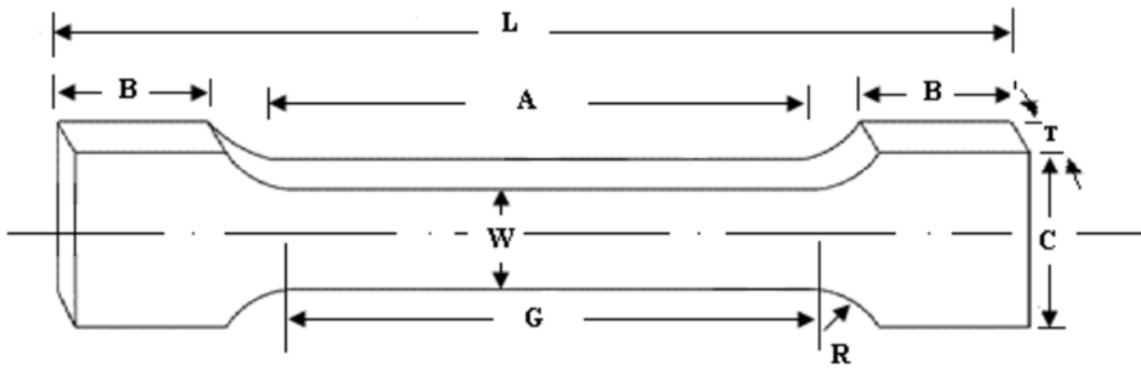


Figure (III-12) : Epreuve de traction selon la norme ASTM E8

$B=20\text{ mm}$ ,  $A=32\text{mm}$ ,  $G=25\text{mm}$ ,  $L=76\text{mm}$ ,  $C=21\text{mm}$ ,  $T=1\text{mm}$ ,  $W=14,14\text{mm}$



Figure (III-13) : Epreuves de traction utilisées

### III-8-1. La machine de traction :

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du laboratoire de résistance des matériaux du département de génie mécanique. Nous avons utilisé une machine de traction de type Ibertest modèle UIB-100/W avec une capacité de 100KN (figure III-11).

Cette machine est pilotée par un ordinateur utilisant un logiciel d'acquisition et de traitement des données.

Les dimensions des neuf éprouvettes sont enregistrées dans le logiciel pour chaque éprouvette à tester. La vitesse est fixée à 10mm/min pour tous les essais.



**Figure (III-14) :** Machine de traction de marque Ibertest

# CHAPITRE IV

## Résultats et discussions

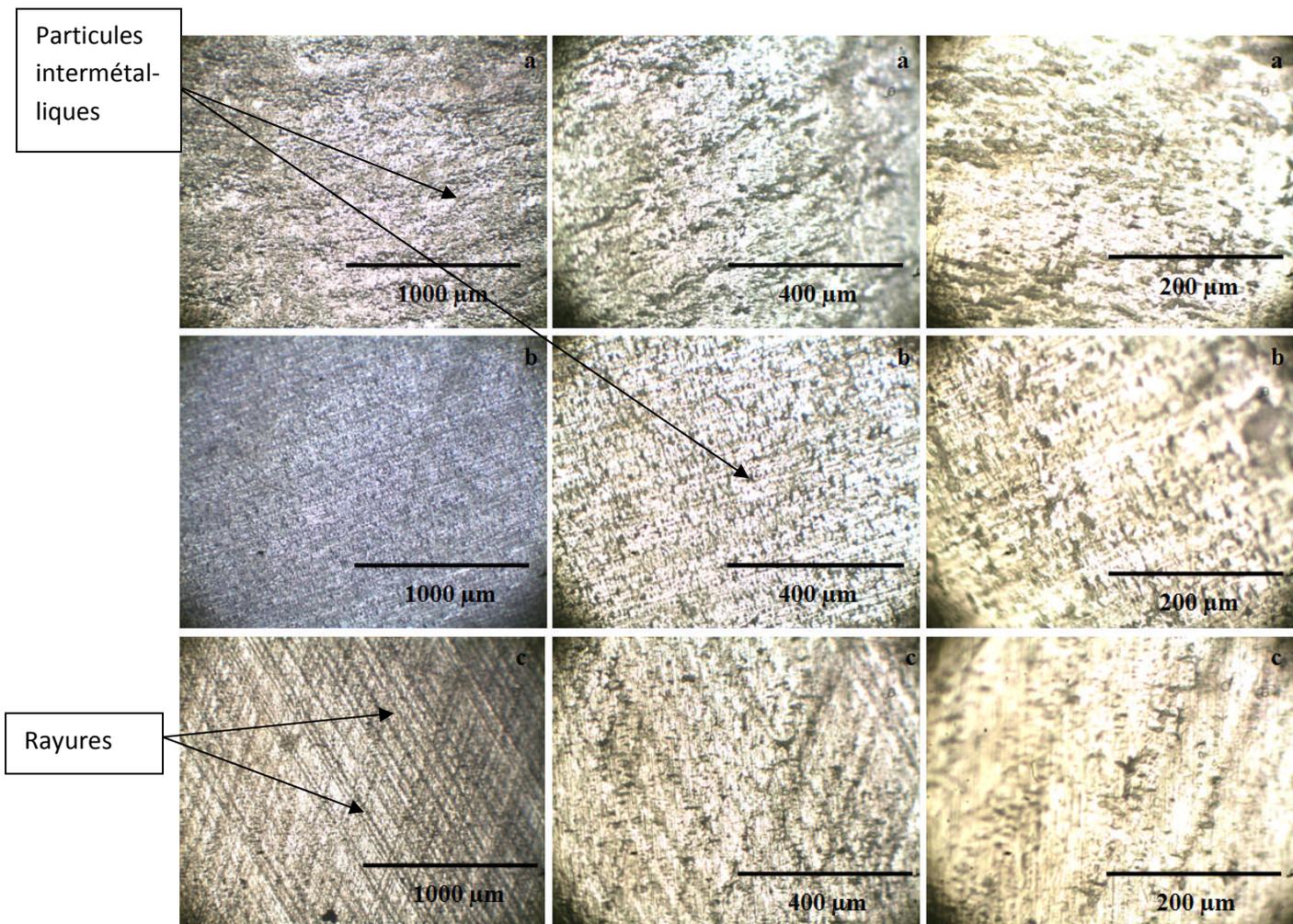
#### IV-1. Les microstructures des échantillons bruts

Les microstructures des échantillons bruts, découpés des emballages alimentaires et de médicaments, montrent une présence d'un type de particules intermétalliques sur la surface des trois (03) échantillons, et la tailles de ces particules intermétalliques est presque la même sur les trois (03) types d'emballage d'aluminium (**Figure IV-1**).

Les rayures provoquées par l'usure du laminoir à froid sont plus visibles sur les canettes de boissons (**Figure IV-1c**).

Les rayures provoquées par le laminoir favorisent la corrosion par crevasses (corrosion caverneuse). Cette corrosion est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux (02) zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène. Chaque rayure représente une crevasse, le fond de la rayure représente la zone de stockage de la solution, ceci-dit cette région est peu aérée.

Nous tenons à rappeler que la boisson emballée dans les canettes est à l'abri de la lumière, ainsi la surface intérieure des canettes est aussi à l'abri de la lumière.



**Figure (IV- 1). Echantillons avant corrosion :** (a) Emballage destiné pour les médicaments, (b) aluminium en rouleaux, (c) Aluminium destiné pour les cannettes de boissons.

#### **IV-2. Les microstructures des échantillons corrodés vingt quatre heures (24h) en absence et en présence de la lumière du jour**

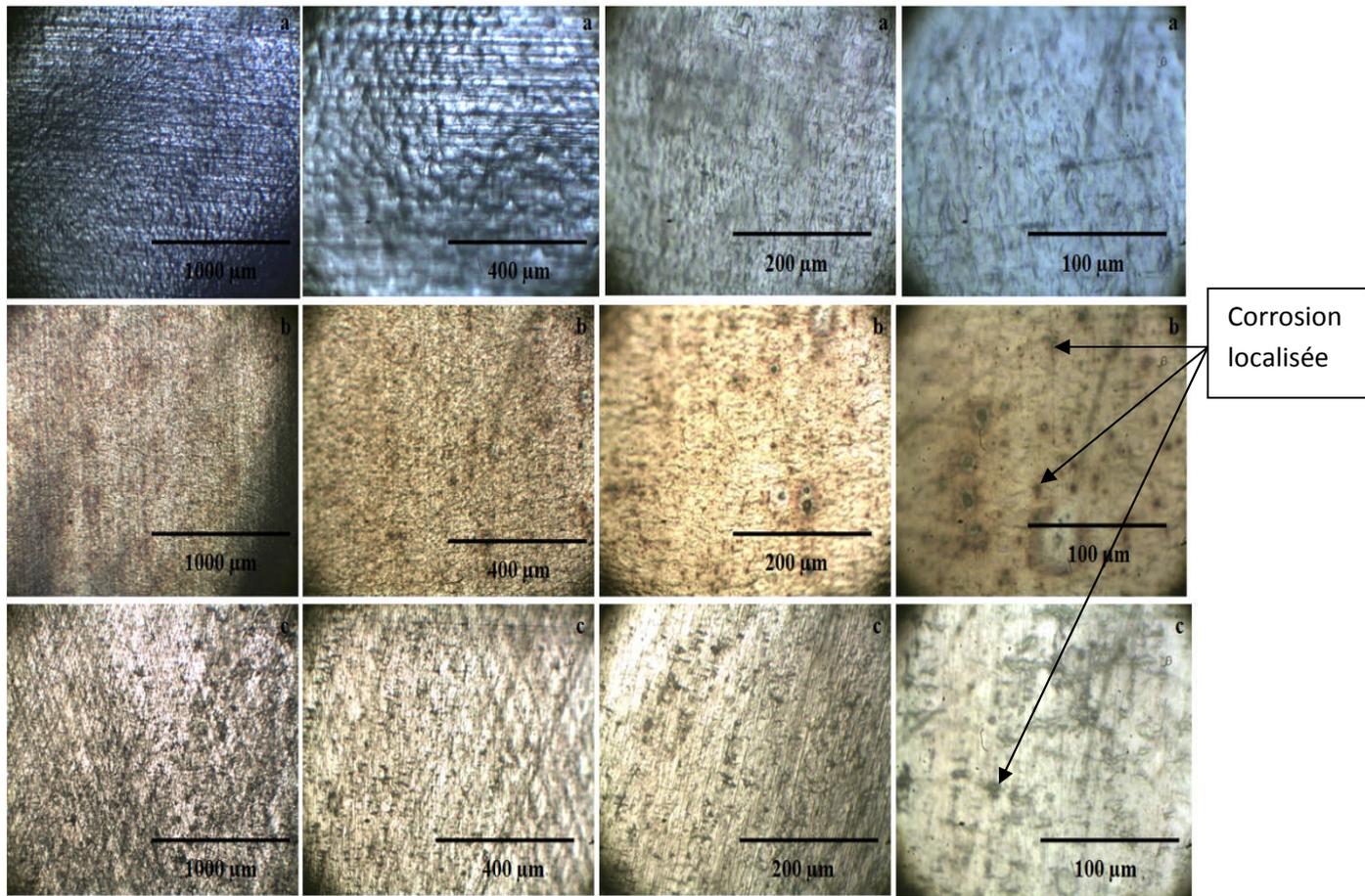
En absence de lumière du jour, on observe une corrosion localisée (**Figure IV-2**), elle n'est pas uniformément répartie sur la surface, mais se concentre dans des zones qui ressemblent aux joints des grains, elle est due à plusieurs facteurs, et elle peut prendre différentes formes, telles que une corrosion par piqûres, une corrosion par crevasses, et une corrosion intergranulaire,... etc.). Par contre dans le cas de la corrosion en présence de la

lumière du jour, on observe une corrosion localisée qui tend vers une corrosion généralisée (**Figure IV-3**).

En absence de lumière, la corrosion observée sur l'aluminium destiné pour l'emballage des médicaments paraît moins marquée (**Figure IV-2a**). Cette observation, nous amène à penser que l'aluminium destiné pour les médicaments comporte une couche qui peut être du vernis. Ceci dit, si cette couche est perméable une corrosion localisée apparaîtra plus tard. Si non, la couche du vernis se dissociera de l'emballage. Cette dernière est toxique.

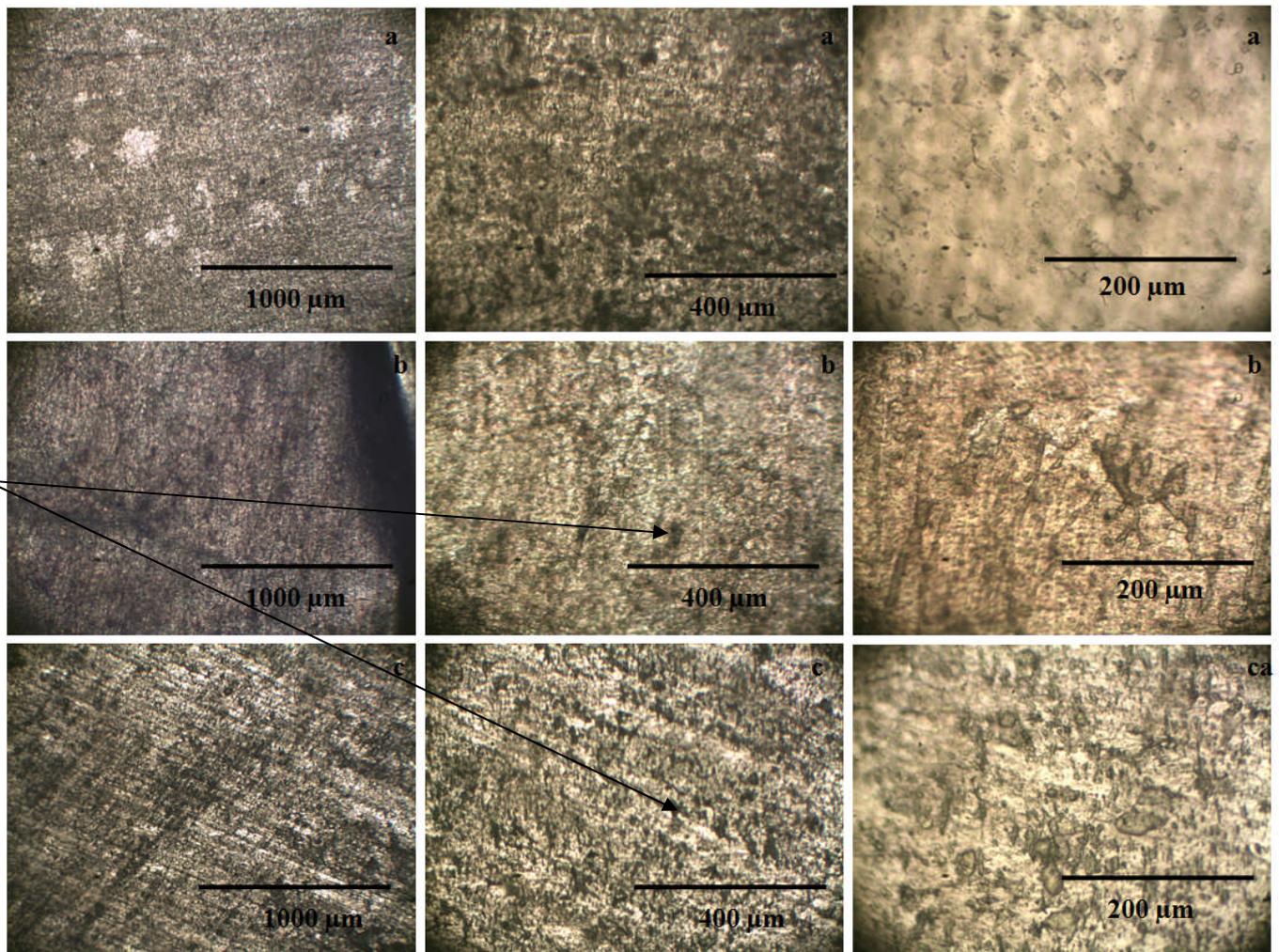
La zone entourée par les rayures, dans le cas de l'aluminium destiné pour la fabrication des canettes de boissons, comporte une corrosion marquée. Cette corrosion est sûrement due à la présence de crevasses (**Figure IV-2c et figure IV-3c**).

Etant donné que la corrosion est une perte d'énergie pour atteindre la stabilité du matériau, un apport d'énergie par le biais de la lumière favorise cette instabilité et le matériau devient plus susceptible à la corrosion.



**Figure (IV-2). Vingt quatre heures (24 h) de corrosion en absence de la lumière du jour :**

(a) Aluminium destiné à la fabrication des médicaments, (b) l'aluminium en rouleaux, (c) l'aluminium destiné pour la fabrication des cannettes de boissons.



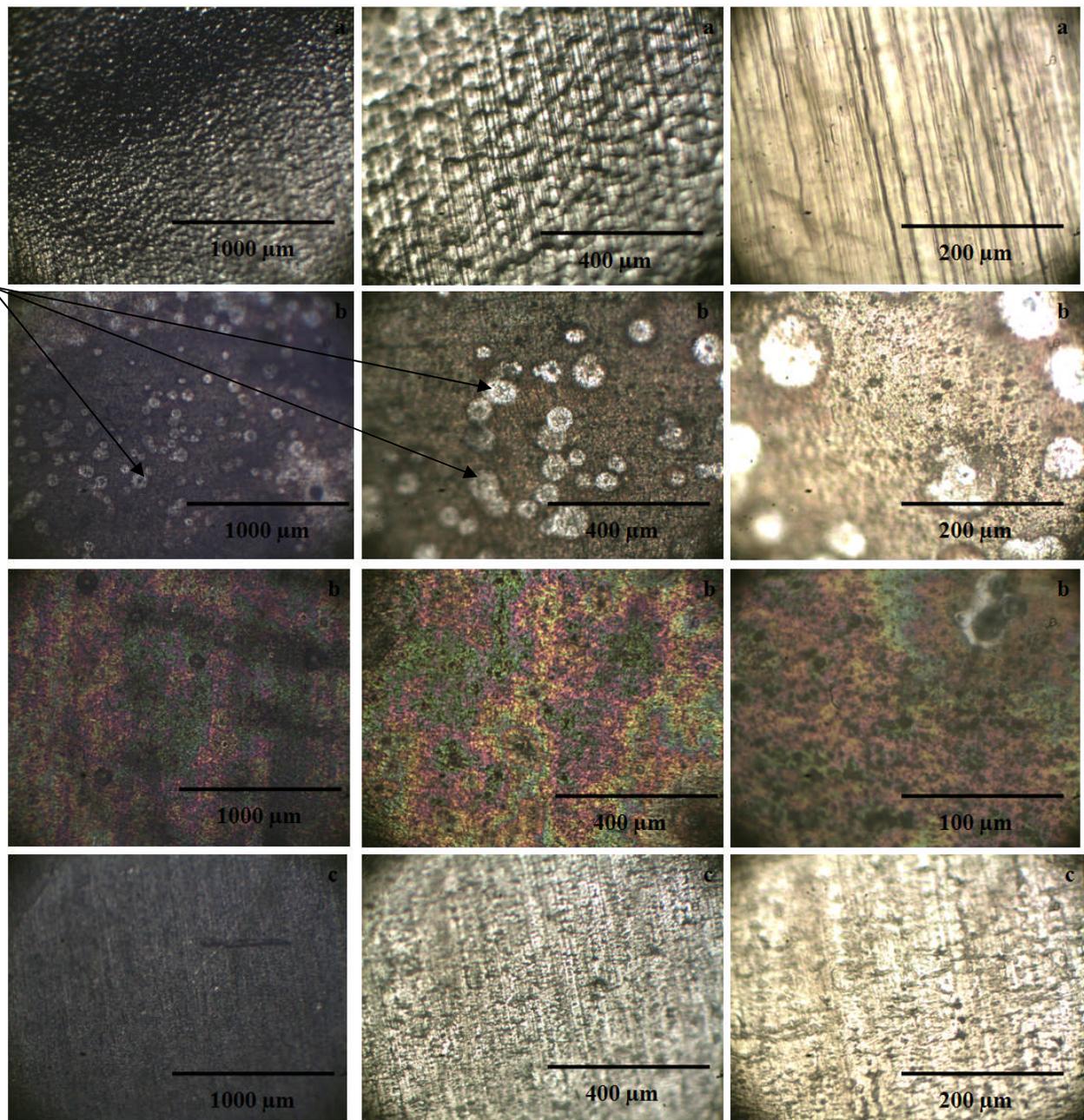
**Figure (IV-3). Vingt quatre heures (24) h de corrosion en présence de la lumière du jour :** (a) Aluminium destiné pour la fabrication des médicaments, (b) l'aluminium en rouleaux, (c) Aluminium destiné pour la fabrication des cannettes de boissons.

### **IV-3. Les microstructures après sept (07) jours de corrosion en absence et en présence de la lumière du jour**

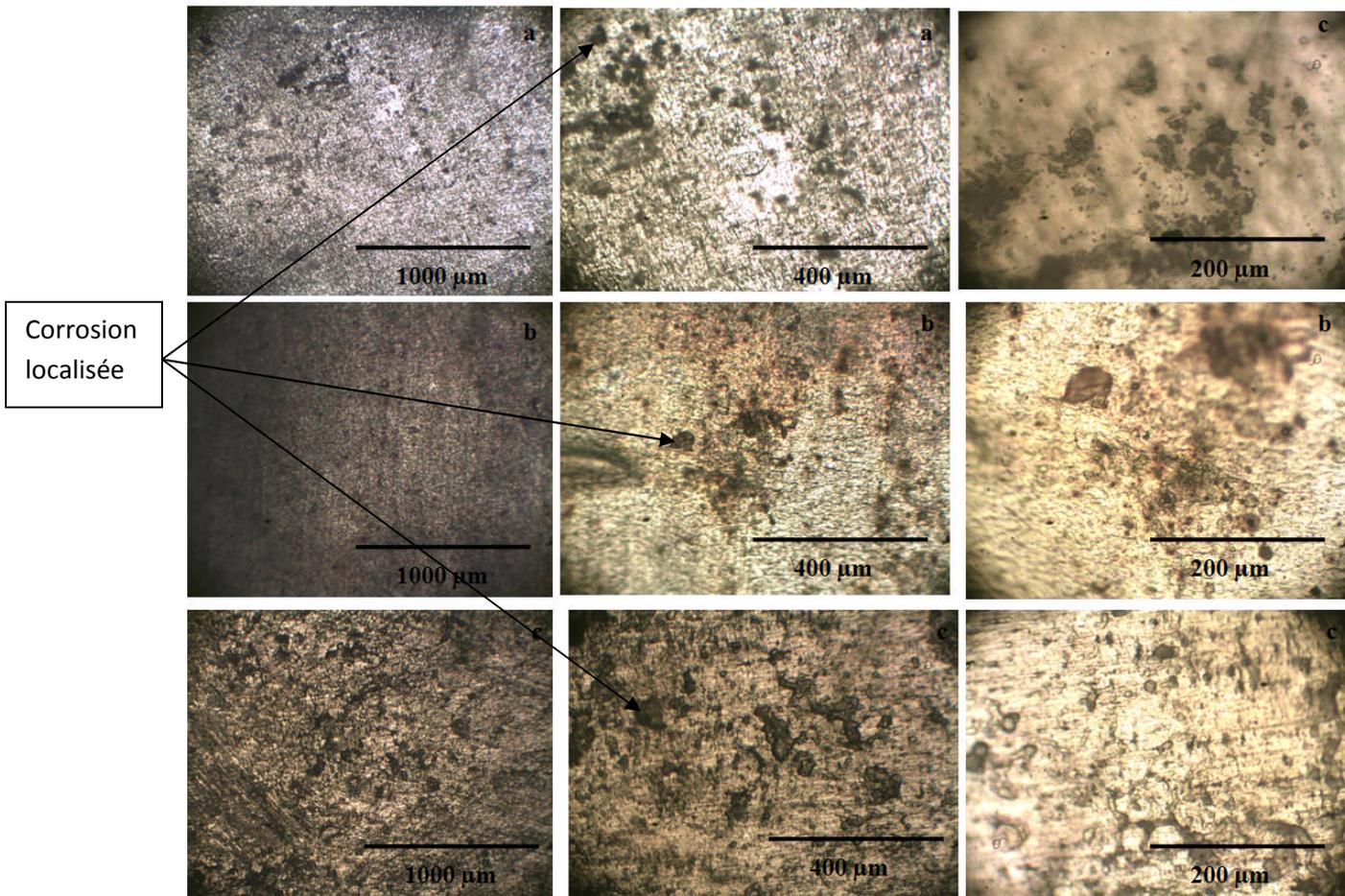
Après (07) jours de corrosion dans une solution à 3% NaCl en absence de lumière (**Figure IV-4**), l'aluminium destiné pour la réalisation d'emballage des médicaments parait toujours moins corrodé. L'apparition d'une corrosion peu marquée est sûrement due à la présence d'une couche de vernis à la surface (**Figure IV-4a**).

Pour l'aluminium en rouleau, une corrosion localisée s'est installée, partout à la surface (**Figure IV-4b**). Cette situation est probablement due à la présence de défauts volumétriques tels que les particules intermétalliques ou bien des porosités et une hétérogénéités de distribution des particules intermétalliques ou bien des éléments d'alliage à la surface de la feuille d'aluminium. Par contre, pour l'emballage destiné pour la fabrication des canettes de boissons, une corrosion généralisée s'est installée sur toute la surface (**Figure IV-4c**). Dans ce cas, on soupçonne une homogénéité de répartition des particules intermétalliques et des éléments d'alliage ou bien un vernissage imperméable. Une microanalyse qui n'est pas à notre portée peut confirmer ou rejeter cette explication. Mais, ce qui est visible, c'est que la corrosion localisée s'installe autour des particules intermétalliques. En ce qui concerne la corrosion généralisée, cette dernière induit une passivation momentanée jusqu'à ce que le chlore fragilise la couche d'oxydes formée ou bien le vernissage.

En présence de la lumière (**Figure IV-5**), on peut observer une corrosion localisée qui s'installe sur les trois (03) types d'échantillons. De ce fait nous pouvons conclure que la présence de la lumière favorise la formation d'une corrosion localisée.



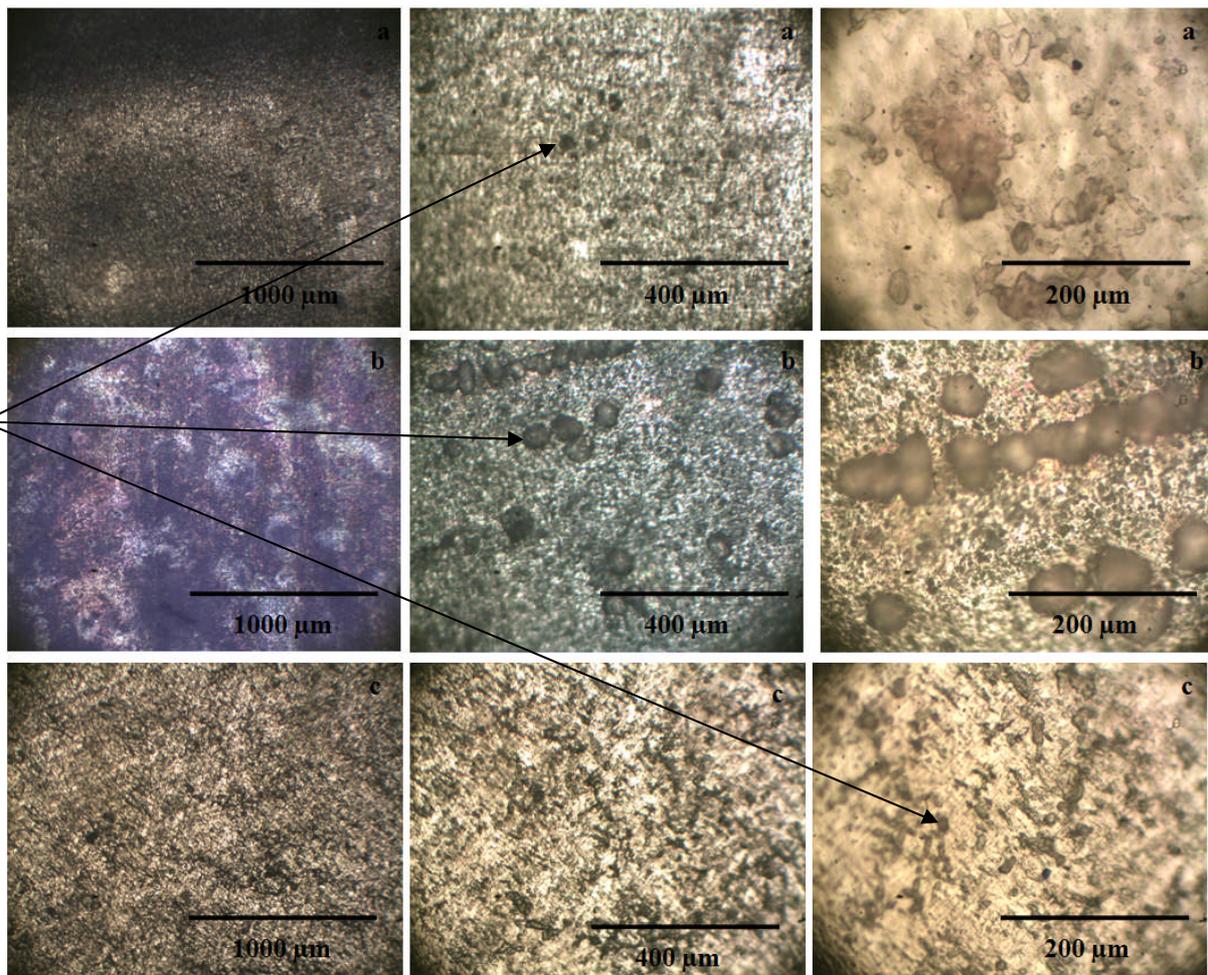
**Figure (IV-4).** Sept (07) jours de corrosion en absence de la lumière du jour : (a) Emballage destiné pour la fabrication des médicaments, (b) l'aluminium en rouleaux, (c) l'aluminium de l'emballage des cannettes de boissons.



**Figure (IV- 5). Sept (07) jours de corrosion en présence de la lumière du jour :** (a) Emballage destiné pour la fabrication des médicaments, (b) l’aluminium en rouleaux, (c) l’aluminium de l’emballage des cannettes de boissons.

#### **IV-4. Les microstructures après quinze (15) jours de corrosion en présence de la lumière du jour**

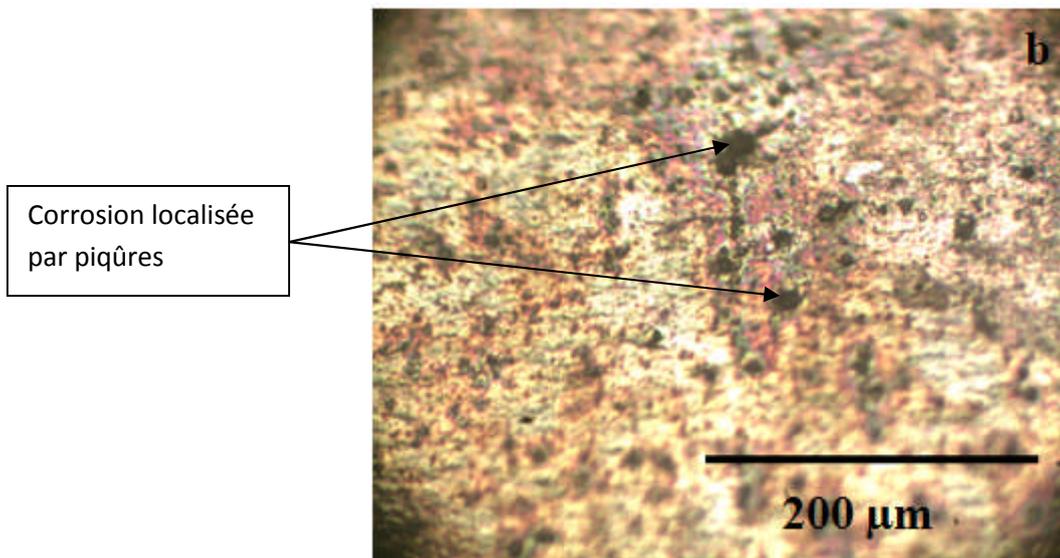
Après quinze (15) jours de corrosion dans une solution à 3% de NaCl, On observe la présence d’une corrosion localisée sur toute la surface des trois (03) types d’échantillons (**Figure IV-6**). Celle-ci est très visible autour des particules intermétalliques. Les rayures observées sur les échantillons destinées pour la fabrication de l’emballage des cannettes ont presque disparues. On, ne les remarque quasiment plus.



**Figure (IV-6).** Quinze (15) jours de corrosion en présence de la lumière du jour : (a) Aluminium d’emballage des médicaments, (b) l’aluminium en rouleaux, (c) l’aluminium de l’emballage des cannettes de boissons.

#### **IV-5. Effet de la polarisation après quinze (15) jours de corrosion de l’aluminium en rouleau**

Un balayage du potentiel imposé, à partir des potentiels cathodiques vers le potentiel anodique, provoque une corrosion localisée par piqûres sur toute la surface, celle-ci se termine par une perforation de la feuille de l’aluminium ayant une faible épaisseur, nous citons le cas de l’aluminium en rouleau destiné pour l’emballage alimentaire (**Figure. IV-7**).



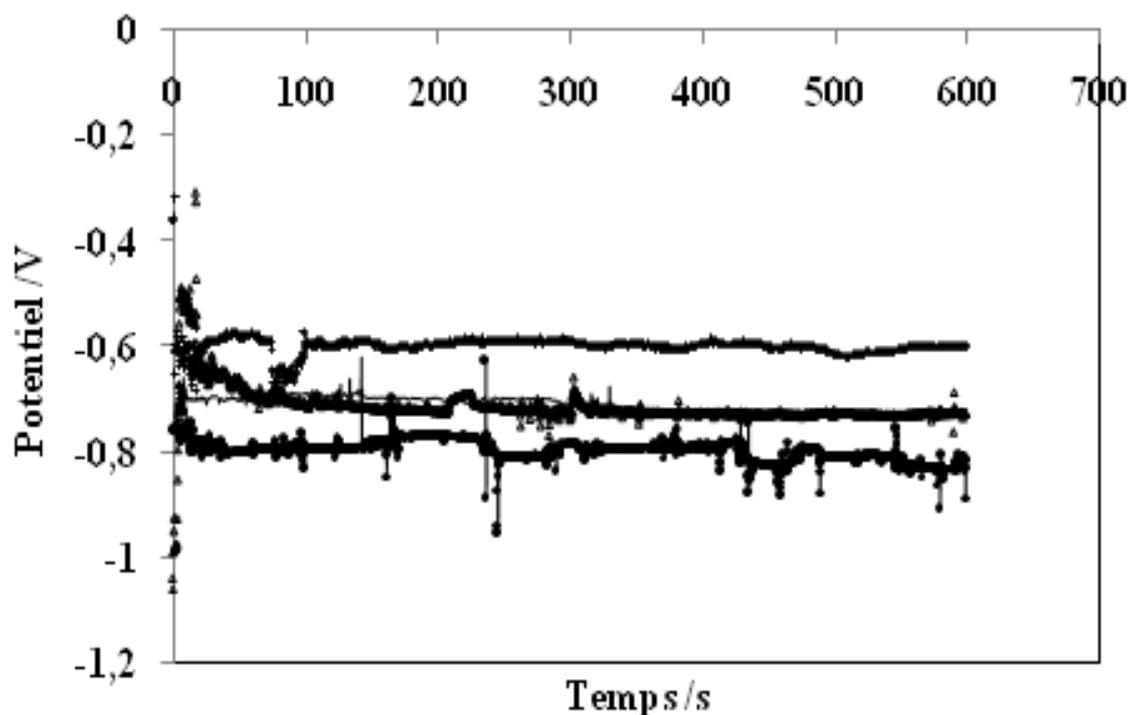
**Figure (IV-7).** Effet de la polarisation après quinze (15) jours de corrosion d'aluminium en rouleau.

#### IV-6. Le potentiel de corrosion libre

Etant donné que l'aluminium d'emballage pour la fabrication des médicaments a paru moins corrodé que les autres papiers on n'a pas fait le test du potentiel de corrosion libre pour l'aluminium d'emballage pour la fabrication des médicaments.

Le potentiel de corrosion libre, de la feuille destinée pour la fabrication des cannettes et de l'aluminium, en absence de lumière, au cours des deux (02) premières secondes prend des valeurs aléatoires comprises entre (-0,3 et -1,1). Par contre, pour les échantillons en immersion en présence de la lumière du jour, le potentiel du papier aluminium en rouleau est de (-0,7) et celui de l'aluminium destiné pour la fabrication des cannettes est de (-0,6). Après deux secondes au cours des cent (100) premières secondes, le potentiel de corrosion libre de tous les échantillons, en immersion dans la solution de NaCl, en présence ou bien en absence de lumière du jour diminue. Par la suite, ce potentiel semble constant au cours du temps.

Nous observons sur cette même courbe, que les valeurs du potentiel de corrosion libre, des deux (02) aluminium, en absence de lumière du jour, sont toujours plus grandes que les valeurs de celui-ci en présence de la lumière du jour. De ce fait, la vitesse de corrosion en présence de lumière du jour est plus grande, ainsi, la corrosion en présence de la lumière du jour est plus rapide.



**Figure (IV-8) :** Potentiel de corrosion libre (a) cannettes : ▲ sans lumière, + avec lumière,  
(b) l'aluminium : trait avec lumière, ● sans lumière

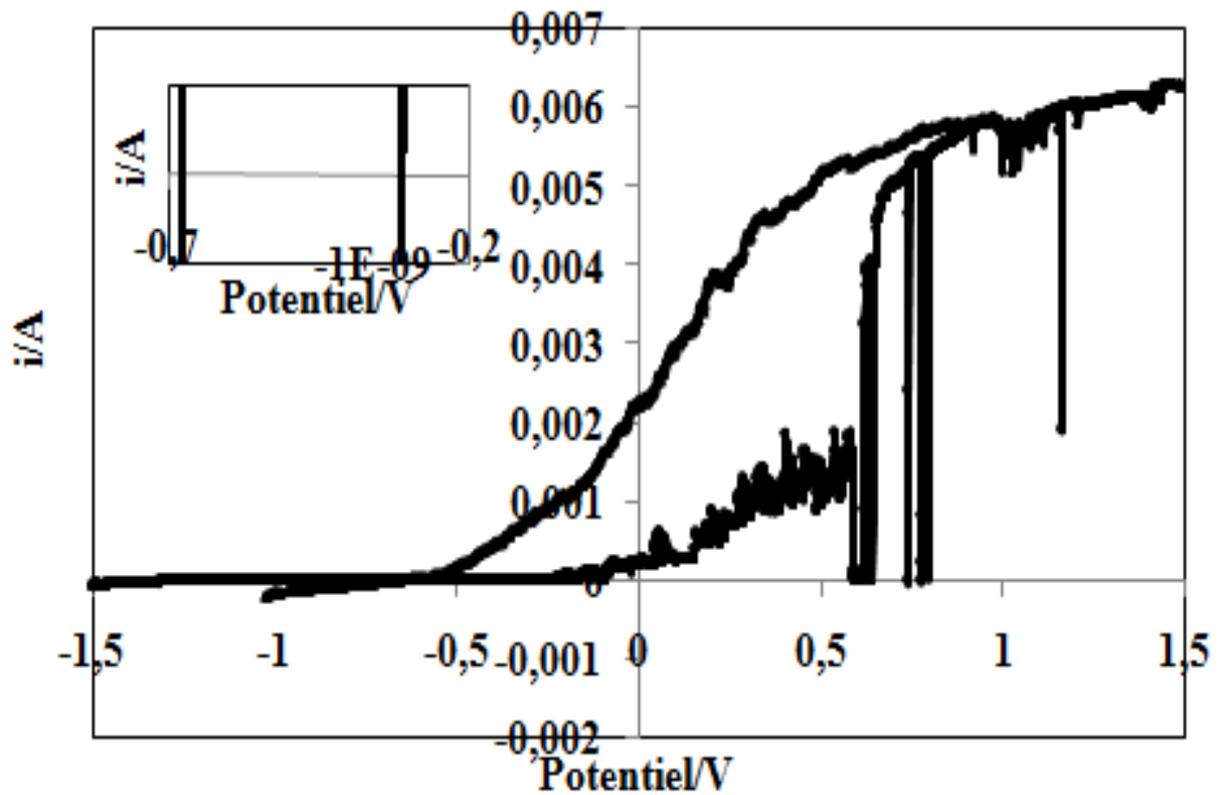
#### IV-7. Les courbes de polarisations de l'aluminium en rouleau

Les courbes de polarisations (Figure IV-9 et Figure IV-10), des deux types d'aluminium, celui sous forme de rouleaux et celui utilisé pour la fabrication des cannettes, en présence et en absence de lumière du jour, après une (01) heure d'immersion, montrent que

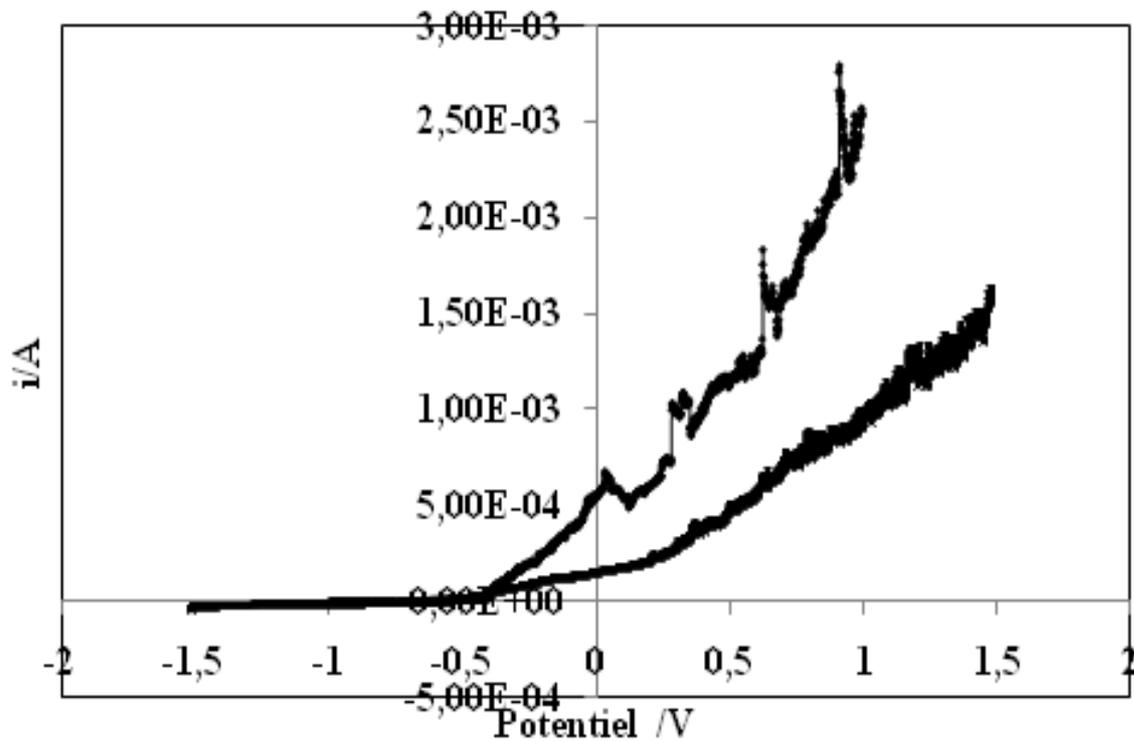
les courbes de polarisation en absence de lumières ont toujours le courant anodique inférieur à celui des courbes en présence de lumière du jour. Ceci dit, la vitesse de corrosion en présence de la lumière du jour est plus grande que celle en absence de la lumière du jour. Ceci est confirmé par la résistance de polarisation, qui est égale à 330,6 k  $\Omega$  et à 13,64 k  $\Omega$  pour l'aluminium en rouleaux en absence et en présence de la lumière ,respectivement, mais, pour l'aluminium utilisé pour la fabrication des cannettes, les résistances de polarisation en présence de la lumière et en absence de la lumière sont proches et égales à 18,2252 k  $\Omega$  et 15,6 k  $\Omega$ , respectivement.

Le potentiel de corrosion de l'aluminium en rouleaux en présence de la lumière du jour égal à (-0,67627 V) est inférieur à celui en absence de la lumière du jour qui est égal à (-0,330353 V). Pour l'aluminium utilisé pour la fabrication des cannettes en aluminium, le potentiel de corrosion en absence de la lumière du jour égal (-0,58V) est supérieur à celui en présence de la lumière du jour qui est égal à (-0,73V).

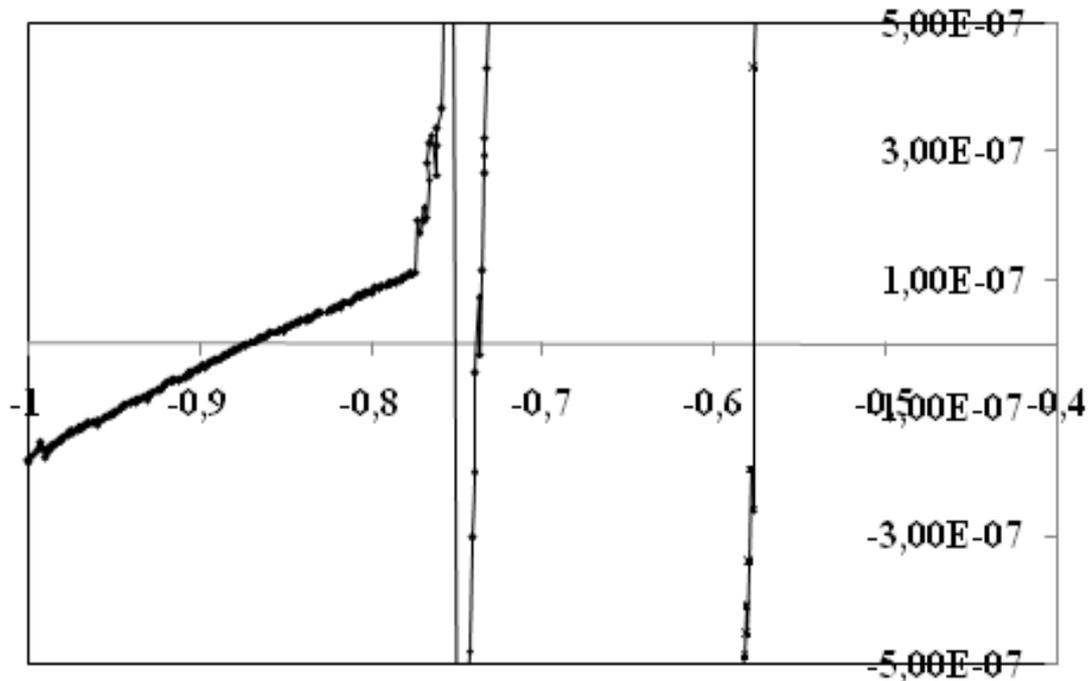
La plupart des résultats montrent que la lumière du jour joue un rôle important sur la cinétique de la corrosion.



(Figure IV-9) : Courbes de polarisation de l'aluminium en rouleau, la courbe après une (01) heure d'immersion : la courbe obtenue en absence de lumière du jour est en bas, par contre la courbe obtenue en présence de la lumière du jour est en haut.



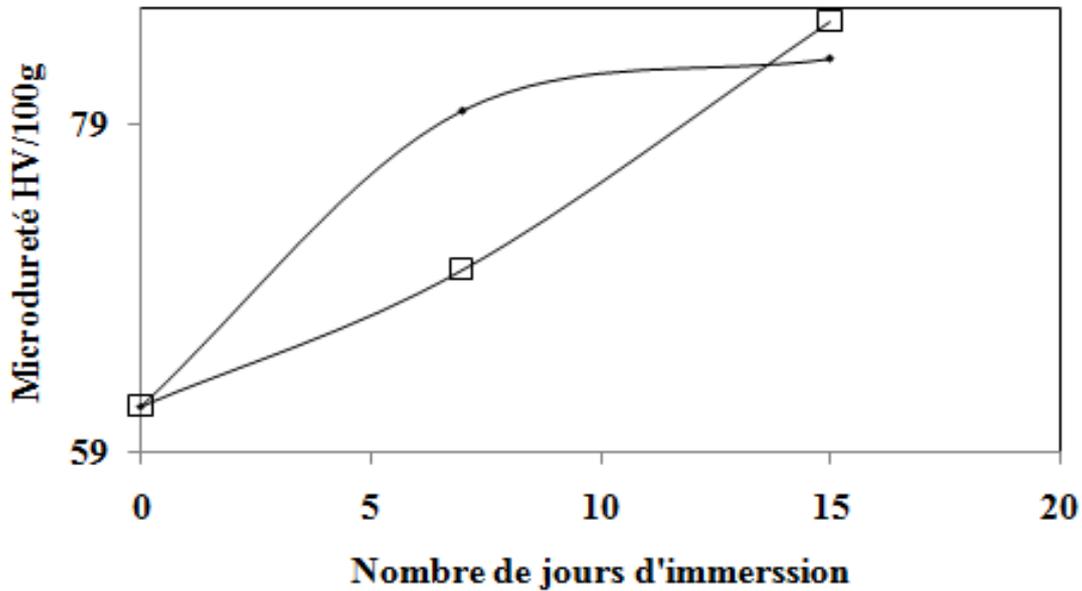
**Figure (IV-10) :** Courbes de polarisation pour l'aluminium utilisé pour la fabrication des cannettes de boissons : la courbe obtenue en absence de la lumière du jour est en bas, par contre, la courbe obtenue en présence de la lumière du jour est en haut



**Figure (IV-11) :** Effet loup dans la zone du passage par une intensité de courant nulle ou bien dans la zone du potentiel de corrosion de la courbe de polarisation pour l'aluminium utilisé pour les cannettes (la courbe en absence de lumière au dessous)

#### IV-8. La microdureté

La courbe de microdureté de la couche superficielle de l'aluminium, en fonction du nombre de jours d'immersion représentée par la (**Figure IV-12**), montre que la dureté du matériau augmente après la corrosion en raison de la formation de la couche d'hydroxyde d'aluminium dans la solution de NaCl, elle augmente presque de la même façon en présence et en absence de la lumière du jour.

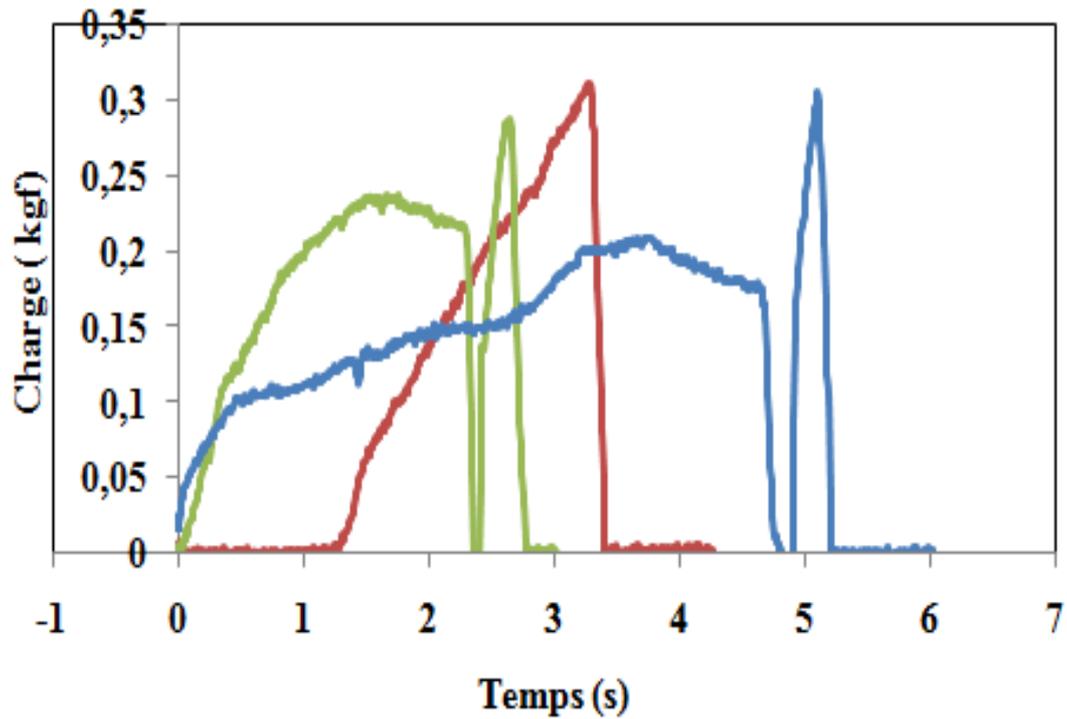


**Figure (IV-12) :** Dureté de l'aluminium destiné pour la fabrication des cannettes de boissons en fonction du temps d'immersion dans la solution de NaCl en présence et absence de lumière du jour (l'échantillon en présence de la lumière du jour est au dessous).

#### IV-9. Essai de traction

La (Figure IV-13) représente les courbes de traction des échantillons après quinze (15) jours d'immersion dans une solution de 3% de NaCl, en absence et en présence de la lumière du jour. Ces courbes montrent que la corrosion modifie les propriétés mécaniques du matériau.

On observe une augmentation de la résistance à la traction pour les échantillons immergés en présence de la lumière et une augmentation de l'allongement du matériau dans le cas de l'absence de la lumière du jour.



**Figure (IV-13) :** Essai de traction : vert échantillon non corrodé, rouge échantillon corrodé quinze (15) jours en présence de lumière du jour, bleu échantillon corrodé quinze (15) jours en absence de la lumière du jour

# Conclusion

## Conclusion

Notre travail, nous a permis de conclure, ce qui suit :

La présence d'un seul type de particules intermétalliques sur la surface des trois (03) types d'aluminium avant immersion.

Une corrosion localisée sur la surface de tous les échantillons ayant subi vingt quatre (24) heures d'immersion dans une solution de NaCl 0.3% en masse en absence de la lumière du jour.

Une corrosion localisée qui tend vers une corrosion généralisée sur la surface de tous les échantillons ayant subi vingt quatre (24) heures d'immersion dans une solution de NaCl de 0.3% en masse en présence de la lumière du jour.

L'aluminium destiné pour la fabrication d'emballage des médicaments paraît moins corrodé après vingt quatre (24) heures et après sept (07) jours de corrosion, en absence de la lumière du jour.

Une corrosion localisée sur les trois (03) types d'échantillons après sept (07) jours de corrosion en présence de la lumière du jour.

Une corrosion localisée sur toute la surface des trois types d'échantillons après quinze (15) jours de corrosion en présence de la lumière du jour.

Les rayures observées sur l'aluminium destiné pour la fabrication d'emballage de cannettes pour boissons ont presque disparues après quinze (15) jours de corrosion en présence de la lumière du jour.

La présence de la lumière favorise une corrosion localisée.

L'effet de la polarisation après quinze (15) jours de corrosion sur l'aluminium en rouleau a provoqué une corrosion localisée par piqûres sur toute la surface.

La corrosion en présence de la lumière du jour est plus rapide.

La plupart des résultats montrent que la lumière du jour joue un rôle important sur la cinétique de la corrosion.

La dureté du matériau augmente presque de la même façon, après corrosion en présence et en absence de la lumière du jour.

Nous avons observé une augmentation de la résistance à la traction après corrosion en présence de la lumière du jour.

Nous avons aussi observé une augmentation de l'allongement du matériau après corrosion en absence de la lumière du jour.

# ANNEXES

Annexe n°1 :

Tableau périodique :

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

PERIODE	GROUPE		NUMÉRO DU GROUPE RECOMMANDATIONS DE L'UPAC (1985)																NUMÉRO DU GROUPE CHEMICAL ABSTRACT SERVICE (1986)		SYMBÔLE	NOM DE L'ÉLÉMENT	MASSE ATOMIQUE RELATIVE (1)																																																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																																												
1	1A	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	VIIIA																																																																											
1	1	<b>H</b>	2	<b>He</b>																	2	4.0026	<b>He</b>	HELIUM	4.0026																																																																					
2	2	<b>Li</b>	<b>Be</b>																	5	10.811	<b>B</b>	CARBONE	12.011	6	12.011	<b>C</b>	CARBONE	12.011	7	14.007	<b>N</b>	AZOTE	14.007	8	15.999	<b>O</b>	OXYGÈNE	15.999	9	18.998	<b>F</b>	FLUOR	18.998	10	20.180	<b>Ne</b>	NEON	20.180																																													
3	3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>																	13	26.982	<b>Al</b>	ALUMINIUM	26.982	14	28.086	<b>Si</b>	SILICUM	28.086	15	30.974	<b>P</b>	PHOSPHORE	30.974	16	32.065	<b>S</b>	SOUFRE	32.065	17	35.453	<b>Cl</b>	CHLORE	35.453	18	39.948	<b>Ar</b>	ARGON	39.948																																													
4	4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>	31	69.723	<b>Ga</b>	GALLIUM	69.723	32	72.64	<b>Ge</b>	GERMANIUM	72.64	33	74.922	<b>As</b>	ARSENIC	74.922	34	78.96	<b>Se</b>	SELENIUM	78.96	35	79.904	<b>Br</b>	BROME	79.904	36	83.80	<b>Kr</b>	KRYPTON	83.80																																													
5	5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>	49	114.82	<b>In</b>	INDIUM	114.82	50	118.71	<b>Sn</b>	ÉTAIN	118.71	51	121.76	<b>Sb</b>	ANTIMOINE	121.76	52	127.60	<b>Te</b>	TELLURE	127.60	53	126.90	<b>I</b>	IODÉ	126.90	54	131.29	<b>Xe</b>	XÉNON	131.29																																													
6	6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	<b>La-Lu</b> Lanthanides	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>	81	204.38	<b>Tl</b>	THALLIUM	204.38	82	207.2	<b>Pb</b>	PLOMB	207.2	83	208.98	<b>Bi</b>	BISMUTH	208.98	84	(209)	<b>Po</b>	POLONIUM	(209)	85	(210)	<b>At</b>	ASTATE	(210)	86	(222)	<b>Rn</b>	RADON	(222)																																													
7	7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	<b>Ac-Lr</b> Actinides	<b>Rf</b>	<b>Db</b>	<b>Sg</b>	<b>Bh</b>	<b>Hs</b>	<b>Mt</b>	<b>Uun</b>	<b>Uuu</b>	<b>Uub</b>	<b>Uuq</b>	<b>Uuq</b>	<b>Uuq</b>	<b>Uuq</b>	<b>Uuq</b>	<b>Uuq</b>	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)	114	(289)	<b>Uuq</b>	UNUNQUADIUM	(289)																																													
																				<b>Lanthanides</b>										<b>Actinides</b>																																																																
																				57	138.91	<b>La</b>	LANTHANE	138.91	58	140.12	<b>Ce</b>	CÉRIUM	140.12	59	140.91	<b>Pr</b>	PRASEODYME	140.91	60	144.24	<b>Nd</b>	NEODYME	144.24	61	(145)	<b>Pm</b>	PROMÉTHIUM	(145)	62	150.36	<b>Sm</b>	SAMARIUM	150.36	63	151.96	<b>Eu</b>	EUROPIUM	151.96	64	157.25	<b>Gd</b>	GADOLINIUM	157.25	65	158.93	<b>Tb</b>	TERBIUM	158.93	66	162.50	<b>Dy</b>	DYSPROSIUM	162.50	67	164.93	<b>Ho</b>	HOLMIUM	164.93	68	167.26	<b>Er</b>	ERBIUM	167.26	69	168.93	<b>Tm</b>	THULIUM	168.93	70	173.04	<b>Yb</b>	YTTÉRIUM	173.04	71	174.97	<b>Lu</b>	LUTÉTIUM	174.97
																				89	(227)	<b>Ac</b>	ACTINIUM	(227)	90	232.04	<b>Th</b>	THORIUM	232.04	91	231.04	<b>Pa</b>	PROTACTINIUM	231.04	92	238.03	<b>U</b>	URANIUM	238.03	93	(237)	<b>Np</b>	NEPTUNIUM	(237)	94	(244)	<b>Pu</b>	PLUTONIUM	(244)	95	(243)	<b>Am</b>	AMÉRICIUM	(243)	96	(247)	<b>Cm</b>	CURIUM	(247)	97	(247)	<b>Bk</b>	BERKÉLIUM	(247)	98	(251)	<b>Cf</b>	CALIFORNIUM	(251)	99	(252)	<b>Es</b>	EINSTEINIUM	(252)	100	(257)	<b>Fm</b>	FERMILIUM	(257)	101	(258)	<b>Md</b>	MÉNDELÉVIUM	(258)	102	(259)	<b>No</b>	NOBELIUM	(259)	103	(262)	<b>Lr</b>	LAWRENCIUM	(262)

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-688 (2001)  
 La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.  
 Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U les masses atomiques relatives les plus précises connues, une masse atomique est indiquée.

## Annexe n°2 : Tableau oxydant-réducteur

Oxydant	$\begin{array}{c} \xrightarrow{\text{réduction}} \\ \xleftarrow{\text{oxydation}} \end{array}$	Réducteur	$E_0$ (V)
$F_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 F^-$	+ 2,87
$S_2O_8^{2-} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 SO_4^{2-}$	+ 2,10
$MnO_4^- + 4 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$MnO_2 + 6 H_2O$	+ 1,69
$ClO^- + 2 H_3O^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$\frac{1}{2} Cl_2 + H_2O$	+ 1,63
$MnO_4^- + 8 H_3O^+ + 5 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Mn^{2+} + 12 H_2O$	+ 1,51
$Au^{3+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Au$	+ 1,50
$ClO^- + 2 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cl^- + 3 H_2O$	+ 1,49
$PbO_2 + 4 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Pb^{2+} + 6 H_2O$	+ 1,45
$Cl_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 Cl^-$	+ 1,39
$Cr_2O_7^{2-} + 14 H_3O^+ + 6 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 Cr^{3+} + 21 H_2O$	+ 1,33
$O_2 + 4 H_3O^+ + 4 e^-$	$\rightleftharpoons$	$6 H_2O$	+ 1,23
$2 IO_3^- + 12 H_3O^+ + 10 e^-$	$\rightleftharpoons$	$I_2 + 18 H_2O$	+ 1,19
$Br_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 Br^-$	+ 1,07
$NO_3^- + 4 H_3O^+ + 3 e^-$	$\rightleftharpoons$	$NO + 6 H_2O$	+ 0,96
$ClO^- + H_2O + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cl^- + 2 OH^-$	+ 0,90
$Ag^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ag$	+ 0,80
$NO_3^- + 2 H_3O^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$NO_2 + 3 H_2O$	+ 0,80
$Fe^{3+} + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Fe^{2+}$	+ 0,77
$I_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 I^-$	+ 0,54
$H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 OH^-$	+ 0,40
$Cu^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cu$	+ 0,34
$CH_3CHO + 2 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$CH_3CH_2OH + 2 H_2O$	+ 0,19
$SO_4^{2-} + 3 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$HSO_3^- + 4 H_2O$	+ 0,17
$S_4O_6^{2-} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 S_2O_3^{2-}$	+ 0,09
$2 H_3O^+ + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$H_2 + 2 H_2O$	0,00
$CH_3CO_2H + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$CH_3CHO$	- 0,12
$Pb^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Pb$	- 0,13
$Sn^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Sn$	- 0,14
$Ni^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ni$	- 0,23
$Fe^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Fe$	- 0,44
$2 CO_2 + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$C_2O_4^{2-}$	- 0,49
$Zn^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Zn$	- 0,76
$2 H_2O + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$2 OH^- + H_2$	- 0,83
$Al^{3+} + 3 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Al$	- 1,67
$Mg^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons$	$Mg$	- 2,37
$Na^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Na$	- 2,71
$Cs^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cs$	- 2,92

## Annexe n°3 : Tableau des chiffres romains

## Chiffres romains

1	I	11	XI	30	XXX
2	II	12	XII	40	XL
3	III	13	XIII	50	L
4	IV	14	XIV	60	LX
5	V	15	XV	70	LXX
6	VI	16	XVI	80	LXXX
7	VII	17	XVII	90	XC
8	VIII	18	XVIII	100	C
9	IX	19	XIX	500	D
10	X	20	XX	1000	M