

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de master

**De fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master en génie
mécanique option science des matériaux**

Thème

***Effet de la déformation par compression sur la
dureté et la corrosion de l'aluminium 1370***

**Dirigé par : M^{er} ZAZI Nacer
M^{er} HAGJ ALI Youcef**

**Réalisé par : M^{eme} KASDI Djamil Ep
YEFSAH**

Les membres de jury :

**M^{eme} MENDIL
M^{er} SALHI**

**maitre de conférences B (MCB)
maitre assistant A (MAA)**

**(présidente)
(examinateur)**

Année universitaire : 2018/2019

REMERCIEMENT

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

« Aucun travail ne s'accomplit dans la solitude »

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

Je remercie profondément mon promoteur Monsieur **Nacer ZAZI professeur** à université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et Monsieur Hadj Ali mon co-promoteur d'avoir accepté de diriger mon travail, par leur soutien et conseils pertinents qui m'ont donnés le courage et l'espoir de travailler tranquillement.

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

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

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

Je remercie énormément tous mes enseignants.

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

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- *Mes chers parents.*
- *Ma famille KASDI.*
- *Mon mari Samir.*
- *Mon fils ARIS.*
- *Ma belle famille YEFSAH.*
- *Mes copines*

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1: Structure cristalline de l'aluminium.....4

Chapitre II :

Figure II. 1 : Mécanisme de corrosion par crevasse.....25

Figure II.2 : Corrosion filiforme de l'aluminium.....25

Figure II.3 : mécanisme de la corrosion par piqûre.....26

Figure II.4 : Répartition uniforme des contraintes.....29

Partie expérimentale :

Figure III.1 : fil d'aluminium 1370 utilisé avant de le coupé.....30

Figure III.2 les échantillons avant compression.....31

Figure III.3 : Machine utilisée pour la compression des échantillons.....31

Figure III.4 : l'échantillon après compression.....31

Figure III.5 : polisseuse utilisé.....32

Figure III.6 : schéma de principe du microscope optique utilisé.....33

Figure III.7 microscope optique utilisé.....33

Figure III.8: Microscope électronique à balayage (MEB).....35

Figure III.9: Appareil de micro dureté.....35

Figure III.10: Principe de l'essai Vickers.....35

Figure III.11 : Empreinte obtenue par micro dureté (G40).....36

Figure III.12 : montage essai de corrosion libre de l'aluminium 1370.....37

Figure III.13 : montage essai de corrosion sous une tension imposée de l'aluminium 1370.....37

Résultats et discussions :

Figure IV.1 : microstructure de l'échantillon sans compression avant la corrosion....38

Figure IV.2 : microstructure de l'échantillon comprimé avec 2KN avant corrosion....39

Figure IV.3 : microstructure de l'échantillon comprimé avec 4KN avant corrosion....39

Figure IV.4 : microstructure de l'échantillon comprimé avec 6KN avant corrosion....40

Figure IV.5 : microstructure de l'échantillon sans compression après sept (7) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....40

Figure IV.6 : Microstructure de l'échantillon sans compression après vingt quatre (24) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	41
Figure IV.7 : Microstructure de l'échantillon comprimé avec 2KN après vingt quatre (24) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	41
Figure IV.8 : Microstructure de l'échantillon comprimé avec 2KN et après sept (7) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	42
Figure IV.9 : Microstructure de l'échantillon comprimé avec 4KN après vingt quatre (24) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	43
Figure IV.10 : Microstructure de l'échantillon comprimé avec 4KN et après sept (7) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	43
Figure IV.11 : Microstructure de l'échantillon comprimé avec 6KN après vingt quatre (24) jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl.....	44
Figure IV.12 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 6 kN après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl.....	44
Figure IV.13 : Microstructure prise par microscope électronique à balayage, de l'échantillon comprimé avec 2 KN après la corrosion de sept (7) jours.....	45
Figure IV.14: potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium sans compression.....	46
Figure IV.15: Potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 2kN après 24 heures de corrosion dans la solution de 0.3 % NaCl.....	46
Figure IV.16 : potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 4kN après 24 heures de corrosion dans la solution de 0.3 % NaCl.....	47
Figure IV.17 : potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 6KN après 24 heures de corrosion.....	48
Figure IV.18 : Comparaison de potentiel libre de l'aluminium 1370 non comprimé et comprimés avec 2/4/6KN.....	49
Figure IV.19: courbe de polarisation pour l'échantillon non déformé.....	50
Figure IV.20 : courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 2 KN.....	50
Figure IV.21 : Courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 4kN.....	51
Figure IV.22 : courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 6 KN	51

Liste des tableaux:

Chapitre I :

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante.....	6
Tableau I.2 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion.....	13
Tableau I.3 : Désignations des états des alliages d'aluminium et leurs applications.....	15
Tableau I.4 : correspondance entre désignation numérique et alphanumérique de l'aluminium et des alliages corrodés.....	18
Tableau I.5 : composition chimique d'aluminium 1370.....	19

Partie expérimentale :

Tableau III.1 : mesures des dix(10) échantillons.....	30
--	----

Résultats et discussions :

Tableau IV.1 : résultats d'essai de dureté.....	52
--	----

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : l'aluminium et ses alliages :

I.1-L'aluminium.....	2
----------------------	---

I.2-LA PRODUCTION DE L'ALUMINIUM.....	2
---------------------------------------	---

1.2.1Extraction du minerai : la bauxite.....	3
--	---

1.2.2 Production de l'aluminium.....	3
--------------------------------------	---

1.2.3 Production de l'alumine.....	3
------------------------------------	---

1.2.4 Solidification de l'aluminium en fonderie.....	3
--	---

1.2.5 La seconde fusion.....	3
------------------------------	---

1.3 PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE DES ALLIAGES	
--	--

1.3.1 Structure atomique.....	4
-------------------------------	---

1.3.2 Structure cristalline	4
-----------------------------------	---

I.3.3 Température de fusion de l'aluminium.....	5
---	---

I.3.4 Point d'ébullition.....	5
-------------------------------	---

I.3.5 Masse volumique.....	5
----------------------------	---

I.3.6 l'enthalpie de vaporisation.....	5
--	---

I.3.7 Propriétés optiques.....	5
--------------------------------	---

I.3.8 Propriétés mécaniques.....	5
----------------------------------	---

I.3.9 Propriétés chimiques	6
----------------------------------	---

I.4 Atouts de l'aluminium et de ses alliages	6
--	---

I.4.1 Légèreté (faible densité)	6
---------------------------------------	---

1.4.2 Conductivité thermique	6
------------------------------------	---

1.4.3 Conductivité électrique	7
-------------------------------------	---

1.4.4 Tenue à la corrosion.....	7
---------------------------------	---

1.4.5 Aptitude aux traitements de surface.....	8
--	---

1.4.6 Diversité des alliages d'aluminium.....	8
---	---

1.4.7 Recyclage.....	8
----------------------	---

1.4.8 Facilité de mise en œuvre.....	9
--------------------------------------	---

1.5 ALLIAGES D'ALUMINIUM	9
--------------------------------	---

1.5.1. Classification des alliages d'aluminium.....	9
---	---

1.5.1.1Les alliages de corroyage.....	9
---------------------------------------	---

Sommaire

1.5.1.2 Mise en forme de l'aluminium et les alliages de corroyage	9
a) Laminage.....	9
b) Filage	10
c) Tréfilage.....	10
d) Emboutissage.....	11
a) Alliage avec durcissement structural.....	11
b) Alliages sans durcissement structural.....	12
1.5.1.3 Alliages de moulages.....	13
1.5.1.4 Alliages élaborées par frittage.....	13
1.5.2. Désignations des états des alliages d'aluminium.....	14
1.5.3 Désignations normalisées des alliages d'aluminium.....	15
1.6 influence des éléments addition sur les propriétés de l'aluminium.....	19
1.8 Aluminium 1370.....	19
1.7 Les alliages de la série 1000.....	19
Chapitre II : corrosion	
II.1 Introduction	20
II. 2 corrosions.....	21
II.1.1 Le potentiel d'équilibre.....	22
II.1.2 Le potentiel de corrosion.....	22
II.1.3 courbe de potentiel de la corrosion libre.....	22
II.1.4 courbe de polarisation.....	22
II. 3 Resistance à la corrosion.....	22
II.4 Rôle du film d'oxyde.....	23
II.5 influence de pH.....	24
II.6 les différents modes de corrosion.....	24
II.6.1 Corrosion générale (uniforme).....	24

Sommaire

II.6.2 corrosion localisée.....	24
II.6.2.1 Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse).....	24
II.6.2.2 La corrosion filiforme.....	25
II.6.2.3 La corrosion caverneuse.....	25
II.6.2.4 La corrosion inter granulaire.....	26
II.6.2.5 Corrosion par piqûre.....	26
Condition de corrosion par piqûres.....	26
II.6.2.6 Corrosion-érosion.....	27
II.6.2.7 Corrosion feuilletante.....	27
II.6.2.8 Corrosion bactériologique.....	27
II.6.2.9 Corrosion sous contrainte.....	27
II.6.2.10 corrosion galvanique.....	27
II.7 Passivité de l'aluminium.....	27
II.8 – Déformation et la contrainte.....	27
II.9 Contraintes en traction-compression.....	28

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1 introduction.....	30
III.2 Travail effectué.....	30
III.2.1 Prélèvement des échantillons.....	30
III.2.2. Déformation par compression.....	31
III.3. Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et micro dureté.....	32
III.3.1 l'enrobage	32
III. 3.2 Polissage	32
III.3.3 Analyse de la structure	32
III.3.3.1 Microscope optique.....	32
III.3.3.2 Microscope électronique à balayage (M E B)	34.
III.3.3.3 Essai de micro dureté.....	35

Sommaire

III.4 Préparation des échantillons pour les essais de corrosion (préparation des électrodes de travail)	36
III.4.1 préparation du bain de corrosion	36
III.4.2. préparation l'électrode de référence	36
III.4.3. préparation de l'électrode auxiliaire.....	36
III.4.4. Montage pour l'essai de corrosion.....	37

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction.....	38
IV. 1-Caractérisation microstructurale, par microscopie optique des différents échantillons de l'aluminium 1370 ont été subit des différentes déformations par comprissions de 2,4 et 6 KN et sans compression avant et après la corrosion.....	38
IV.1.1 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon sans compression avant la corrosion.....	38
IV.1.2 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 2 KN avant la corrosion.....	38
IV.1.3 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 4 KN avant la corrosion.....	39
IV.1.4 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 6 KN avant la corrosion.....	39
IV.1.5 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon sans compression.....	40
V.1.6 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 2 KN après la corrosion.....	41
IV.1.7 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 4 KN après la corrosion.....	42
IV.1.8 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon comprimé avec 6 KN après la corrosion.....	43
IV. 2-Caractérisation microstructurale, par microscope électronique à balayage, l'échantillon comprimé avec 2 KN après la corrosion.....	45

Sommaire

IV.3 cinétique de la corrosion.....	45
IV.3.1 Potentiel de la corrosion libre.....	45
IV. 3.1.1 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon non déformé.....	45
IV.3.1.2 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 2KN.....	46
IV.3.1.3 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 4KN.....	47
IV.3.1.4 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 6KN	47
IV.3.1.5. Comparaison de potentiel libre de l'aluminium 1370 non comprimé et comprimés avec 2/4/6KN	48
IV.3.2 Courbe de polarisation.....	49
IV.3.2.1 Polarisation de l'échantillon non déformé.....	50
IV.3.2.1 Polarisation de l'échantillon déformé avec 2KN.....	50
IV3.2.1 Polarisation de l'échantillon déformé avec 4KN	51
IV.3.2.1Polarisation de l'échantillon déformé avec 6KN.....	51
IV.4 Essai de dureté.....	52

Introduction générale

Les alliages d'Aluminium de série 1000 sont des alliages à durcissement par écrouissage, ils travaillent dans de fortes contraintes thermiques et mécaniques. Par conséquent, leurs propriétés changent au cours de leurs mises en forme et utilisations.

L'obtention d'aluminium dont les propriétés de résistance mécanique et résistance à la corrosion adéquates, nécessite la connaissance, des phénomènes intervenants lors de leurs, élaboration, traitements, mises en forme et utilisations.

L'objectif de notre travail est l'étude par la caractérisation chimique du comportement Aluminium AA1370

Le comportement mécanique, l'endommagement et la dégradation de cet alliage dépendent, de sa constitution, de son état de contraintes internes. Ces alliages présentent, selon leur histoire thermomécanique, une présence de particules intermétalliques continue ou discontinue aux et en dehors des joints grains. Ces particules jouent un rôle essentiel dans les processus de la dégradation et corrosion localisée.

L'aluminium ont un potentiel moyen très négatif, il tend naturellement et rapidement à se passiver, donc à se protéger par une couche d'oxyde ou hydroxyde. La décomposition de la couche passive se fait par les ions halogénures qui dans la plus part des cas amorce la corrosion localisée.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres et une conclusion:

La première traite des alliages d'aluminium en générale et les alliages d'aluminium, le second chapitre étale la corrosion des alliages d'aluminium, troisième résume les différentes techniques expérimentales utilisées. Et enfin le dernier chapitre présente les résultats et discussion et on termine avec une conclusion générale.

I – L'aluminium et ses alliages :

I.1-L'ALUMINIUM :

L'aluminium est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. Cependant, il a fallu attendre la généralisation de l'électricité pour voir la production d'aluminium se développer réellement. En effet, les procédés d'électrolyse de l'alumine, issue de la bauxite, sont relativement coûteux en énergie. A l'heure actuelle, l'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs comme les transports, l'emballage, la construction ou encore les biens de consommation. Sa généralisation vient des propriétés remarquables du métal mais aussi de la variété de ses alliages. Sans être exhaustif, quelques unes de ses propriétés peuvent tout de même être appelées. Sa masse volumique est de 2700 kg/m³, il est donc environ 3 fois plus léger que l'acier. Il possède une bonne conductivité électrique (environ deux tiers de celle du cuivre), et peut donc être utilisé comme câblage électrique aérien. L'aluminium et ses alliages, suivant leur composition, ont une bonne conductivité thermique (60% de celle du cuivre). Cette propriété est mise à profit par les équipementiers de l'automobile pour les échangeurs thermiques. Enfin, une autre propriété remarquable, qui lui vaut certainement son renom avec sa légèreté, est sa tenue à la corrosion dans son état pur ou faiblement allié. Cette propriété lui vient des caractéristiques de l'oxyde d'aluminium, l'alumine. Cet oxyde est l'un des plus stables (son enthalpie de formation est très négative contrairement à celle de l'oxyde de fer), il se forme donc quasi instantanément. De plus l'alumine forme une couche compacte et peu conductrice, jouant le rôle de véritable protecteur du métal contre la corrosion. La résistance à la corrosion est cependant très dépendante du type d'alliage. [1]

I.2-LA PRODUCTION DE L'ALUMINIUM:

En 2015, la production d'aluminium primaire approchait les 60 millions de tonnes au niveau mondial. Quelques repères pour la production d'aluminium primaire : il faut environ 4 tonnes de bauxite pour obtenir 2 tonnes d'alumine, desquelles on extrait par électrolyse 1 tonne d'aluminium. [2]

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

I.2.1 Extraction du minerai : la bauxite :

L'aluminium constitue 8% de la masse de l'écorce terrestre, il n'apparaît pas sous forme pure, mais comme minerai composite appelé bauxite. La bauxite est équitablement répartie à la surface de la planète. Ce minerai contient entre 40 et 60 % d'oxyde d'aluminium hydraté, mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer.

I.2.2 Production de l'aluminium :

La bauxite est attaquée par de la soude, à haute température et sous forte pression. La liqueur obtenue, l'aluminate de sodium, est débarrassé de ses impuretés, puis diluée et refroidie, ce qui provoque la précipitation d'oxyde d'aluminium hydraté. Une poudre blanche, l'alumine, est ensuite récupérée. L'essentiel de l'alumine (~90%) est utilisé pour produire le métal aluminium. Les 10% restants, parfois appelés alumine de spécialité, ont des usages non métallurgiques variés comme : traitement de l'eau, fabrication de produits réfractaires, céramiques, abrasifs, verres spéciaux, etc.

I.2.3 Production de l'alumine :

L'alumine est ensuite versée dans un bain de cryolite et de divers sels, porté à 960°C, afin d'être parfaitement dissoute. La cuve est traversée par un courant électrique de haute intensité. Par ce procédé d'électrolyse, l'aluminium – ion positif – se dépose sur la cathode – électrode négative. L'aluminium liquide se dépose au fond de la cuve. Il est régulièrement prélevé par siphonage et conduit en fonderie pour être traité et mis en forme.

I.2.4 Solidification de l'aluminium en fonderie :

A l'aide d'éléments d'addition (magnésium, silicium, manganèse, cuivre, fer, etc.), on crée différents alliages pour accroître sa résistance et lui permettre d'acquérir ses futures propriétés (mécaniques, mise en forme, résistance à la corrosion, etc.). Les dosages de ces alliages varient en fonction des caractéristiques qui souhaitent être données à l'aluminium, la quantité d'éléments se situe en général de quelques % à 15%.

I.2.5 La seconde fusion :

Une grande part de l'aluminium produit chaque année est issue du recyclage (60% en France).

Deux filières distinctes sont utilisées pour le recyclage :

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

- l'affinage consiste à refondre, après tri, des déchets, débris, résidus d'aluminium récupérés sur des objets en fin de vie (bâtiment, automobile, emballages...) ou provenant des usines de production et de transformation d'aluminium ;
- la récupération des chutes neuves d'industrie, provenant de la fabrication ou de l'usinage de produits en alliages d'aluminium, assure aux transformateurs un complément à leur approvisionnement en métal.

I.3 PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE DES ALLIAGES :

Les propriétés indiquées sont généralement celles de l'aluminium non allié dont le degré de pureté est de 99.99%. [3]

I.3.1 Structure atomique :

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

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

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

I.3.2 Structure cristalline :

L'aluminium est un métal dont la structure cristalline est cubique à face centrée (CFC), figure I-1, a un paramètre de maille $a = 0,4049596$ nm à 298 K. son rayon atomique est de 0,125 nm.

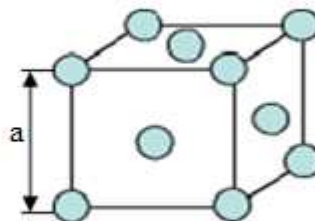


Figure I.1: Structure cristalline de l'aluminium

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

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

I.3.3 Température de fusion de l'aluminium ;

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

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

I.3.4 Point d'ébullition :

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

I.3.5 Masse volumique :

Parmi les métaux usuels, c'est l'aluminium qui est le plus léger. La masse volumique mesurée à partir des paramètres cristallins, et à 20 °C : 2.7g/cm³.

I.3.6 l'enthalpie de vaporisation :

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

I.3.7 Propriétés optiques :

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

I.3.8 Propriétés mécaniques :

L'aluminium est trois fois moins rigide que les aciers, son module de Young est de 70 000 MPa contre 210 000MPa pour les aciers de construction. Les caractéristiques de

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à température ambiante

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

traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique.

➤ **Coefficient de poisson :**

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

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

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

I.3.9 Propriétés chimiques :

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

I.4 Atouts de l'aluminium et de ses alliages :

I.4.1 Légèreté (faible densité) :

La légèreté est l'une des atouts de l'aluminium auquel on pense spontanément, au point qu'on a très longtemps utilisé l'expression « alliages légers » pour désigner ce qu'on appelle maintenant alliages d'aluminium. L'aluminium est le plus léger des métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg /m³, soit presque trois fois moindre que celle des aciers. Il consiste de ce fait 80% des poids des avions actuels. Il est très utilisé dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobiles. Bien que, en tonnage, la production de l'aluminium ne présente qu'un peu plus de 2% de celle des aciers. Ce métal et ses alliages occupent la seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'expérience montre que l'allègement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

ordinaire ou en acier inoxydable. [4]

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

I.4.2 Conductivité thermique :

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

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

Dés qu'il est question d'échange thermique, l'utilisation de l'aluminium est toujours envisagée, pourvu bien sûr que le milieu s'y prête quand il s'agit d'échange liquide-liquide ou liquide-gaz. Les applications des échangeurs en aluminium sont très nombreuses : automobiles, véhicules industriels, aéroréfrigérants, climatisation, dessalement de l'eau de mer, énergie solaire, refroidisseurs dans l'électronique. [4]

I.4.3 Conductivité électrique :

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

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

I.4.4 Tenue à la corrosion :

La bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et ses alliages lui confère une place importante dans l'industrie. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes ; aussi bien dans les édifices publics (pyramides du Louvre, toiture d'une église à Rome) que pour les habitations individuelles. [5]

Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité explique le développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi d'une longue

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

durée de vie, facilité d'entretien même sans protection et d'un aspect esthétique du fait que les produits d'oxydation de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture.

I.4.5 Aptitude aux traitements de surface : [4]

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

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

I.4.6 Diversité des alliages d'aluminium : [4]

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

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

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

I.4.7 Recyclage :

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

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

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

ferrailles. [6]

I.4.8 Facilité de mise en œuvre :

La mise en œuvre de l'aluminium et de ses alliages s'inscrit dans les pratiques habituelles de mise en forme, de pilage, emboutissage et emballage.

Pour travailler les alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaire, dans la plus part des cas, de disposer d'équipements ou de machine et outils spécifiques. En revanche, il est recommandé d'affecter un atelier au travail des alliages d'aluminium, séparé de celui des aciers et surtout de celui des alliages cuivreux. [4]

I.5 ALLIAGES D'ALUMINIUM :

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes pour l'utilisation, on est conduit, pour améliorer ces propriétés, à ajouter des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure du métal. [7]

Les alliages d'aluminium sont classés comme suit :

I.5.1. Classification des alliages d'aluminium : Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium :

I.5.1.1 Les alliages de corroyage :

Ils sont coulés en fonderie sous forme de plaque ou de billettes ensuite transformés par laminage ou par filage tôles, ou profilés. Ces demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique, architecturale, électrique,...où ils sont assemblés par soudage, rivetage, visage etc...[8]

I.5.1.2 Mise en forme de l'aluminium et les alliages de corroyage : [9]

a) Laminage :

Au cours du laminage, la tôle d'aluminium est happée par les cylindres. Ceux-ci sont rugueux et vont plus vite que le métal à l'entrée de l'emprise. Il se crée donc des forces de frottement qui entraînent l'aluminium par ses deux faces et le forcent à passer entre les cylindres. L'effort appliqué est supérieur à la résistance à la déformation du métal, ses grains s'allongent, son épaisseur diminue et il s'écroute. Sa résistance à la déformation augmente, sa limite d'élasticité aussi.

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Pour l'aluminium et ses alliages, qui ne connaissent pas de transformation allotropique, l'effet des passes de laminage sur l'érouissage est additif. Une réduction produit le même état métallurgique, qu'elle soit réalisée en une ou plusieurs fois avec un laminoir puissant ou plus ancien. Le coût de fabrication ne sera, bien sûr, pas identique. Lorsque l'érouissage atteint une valeur critique, propre à chaque alliage, apparaît le risque de criques et de casse de la bande sous l'effet des tractions appliquées. Il n'est donc plus possible de diminuer l'épaisseur par simple laminage.

b) Filage :

Le filage à chaud - procédé de mise en forme par déformation plastique - consiste à introduire un bloc de métal en aluminium ou alliage d'aluminium (billette) réchauffé (350 à 500 °C) dans un conteneur creux, lui-même chauffé, et, par l'intermédiaire d'un piston, à pousser la billette à l'aide d'un pilon ou fouloir à travers l'ouverture pratiquée dans un outillage de forme (filière) obturant l'autre extrémité du conteneur.

Le sommier de la presse à filer est relié rigidement par des colonnes au pot de presse. Ce dernier est alimenté en eau ou en huile, à des pressions allant jusqu'à 30 MPa, par un jeu de pompes à débits fixes et/ou variables qui communique au piston et par suite au fouloir une vitesse d'avance plus ou moins rapide pouvant aller jusqu'à 50 mm/s et plus.

La filière, qui donne au produit la section souhaitée, est en appui sur le sommier de presse par l'intermédiaire d'une contre-filière et autres cales d'appui.

Le conteneur est généralement cylindrique mais peut être rectangulaire pour le filage de profilés larges. Il est construit de manière à résister aux pressions développées lors du filage et comporte son propre dispositif de réchauffage (par résistance ou induction). Il est fortement bridé contre la filière au moyen de vérins. Son diamètre intérieur varie, selon la presse, de 100 à 500 mm pour des longueurs de billette allant de 400 à 1 200 mm. La capacité des presses varie, en France, entre 8 et 60 N.

c) Tréfilage :

Connu depuis la plus haute antiquité, le tréfilage permet d'obtenir des fils métalliques de section et de forme bien déterminée.

Le principe du tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil ». Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant à faire passer le métal à travers un orifice calibré, appelé « filière », sous l'action d'une traction continue.

Cette technique utilise l'aptitude à la déformation plastique du métal.

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Les mécanismes structuraux de cette déformation et les lois de comportement de la mise à froid sont examinées dans ce traité [10] et [11].

Nous rappelons brièvement que la déformation plastique se fait à « volume constant » et qu'elle est « inhomogène ».

Nous précisons aussi que les aciers sont des alliages comportant diverses impuretés et inclusions, et qu'il s'agit donc de systèmes hétérogènes dont les propriétés varient fortement d'un point à un autre.

Il importe donc, lors de la mise en œuvre, de connaître la structure du matériau de départ et l'histoire antérieure de la déformation, éléments jouant sur la « contrainte d'écoulement ».

Enfin, il faut noter que, selon les conditions opératoires lors du tréfilage, des structures différentes en résulteront.

Les fils obtenus par tréfilage (diamètre couramment compris entre 0,10 et 20 mm) ayant :

- une forme définie et régulière ;
- une section précise ;
- des caractéristiques mécaniques adaptées.

d) Emboutissage :

L'emboutissage des tôles est une opération qui permet d'obtenir des pièces de formes complexes non développables, contrairement aux opérations plus simples que sont le pliage, le roulage ou le profilage à froid. Ce procédé, d'utilisation très générale, permet de fabriquer les pièces de carrosserie automobile, des appareils électroménagers ou des ustensiles de cuisine, des emballages métalliques, des pièces mécaniques...

Les alliages de corroyage sont :

a) Alliage avec durcissement structural : [8]

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

- Les alliages aluminium-cuivre de la série 2000 se caractérisent par une résistance mécanique élevée après revenu, une bonne tenue à la chaleur, une résistance chimique moins bonne que celle des alliages sans cuivre et des disponibilités de

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

soudage limitées. Parmi ces alliages on trouve les 2014 et 2024 qui sont très utilisés en aéronautique, armement, mécanique et sport.

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

b) Alliages sans durcissement structural :

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

- L'aluminium non allié de la série 1000 qui se caractérise par une résistance mécanique relativement faible, une excellente résistance à la corrosion atmosphérique et une très bonne aptitude au soudage et à la mise en forme. Les nuances 1080A (Al 99,80%), 1050 (Al 99,50%) et 1100 (Al 99,00%) sont très utilisés dans le bâtiment, l'industrie chimique et dans l'emballage. L'aluminium raffiné 1199 (Al 99,99) est réservé à la décoration et aux condensateurs électrolytiques.
- les alliages –silicium de la série 5000 ayant une résistance moyenne, une bonne aptitude à la déformation et au soudage, un excellent comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. Parmi ces alliages on cite: Les nuances 5005 et 5083. Leurs applications sont très importantes et variées comme le transport terrestre l'industrie chimique.
- les alliages aluminium-manganèse de la série 3000 qui ont les propriétés voisines de la série 1000 avec une résistance élevée (par exemple l'alliage 3003 qui tend à remplacer l'aluminium non allié).

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

I.5.1.3 Alliages de moulages :

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

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

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

Tableau I.2 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion [4]

Série	Eléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al_3Mg_2 , Al_6Mg_5	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al_3Fe , Al_6Fe $Al_{12}Fe_3Si_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	$FeSiAl_3$, Fe_2SiAl_6 $Al_6Si_6Mg_3Fe$, Mg_2Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al_6Mn , Al_6MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg	$MgZn_2$	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuilletante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Ajout de Cu Cu	$CuFeMnAl_6$, Al_2Cu Al_2CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuilletante

I.5.1.4 Alliages élaborées par frittage :

Elaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

I.5.2. Désignations des états des alliages d'aluminium :

Les alliages subissent des traitements métallurgiques qui permettent d'obtenir de meilleures caractéristiques. Un système de notation approprié pour toutes les formes d'alliage de corroyage et de fonderie, sauf pour les lingots prévus pour le moulage. Chaque série d'alliage est suivie des lettres F, Q, H, W et T qui désignent l'état de l'alliage. Le tableau regroupe les désignations des alliages d'aluminium et leurs applications. Les états Q et F n'ont pas de subdivision contrairement aux états H et T les subdivisions de l'état H sont décrites au moins par deux chiffres : le premier indique le traitement par écrouissage et le second l'état de dureté de l'alliage (par convention le chiffre (8) est attribué état le plus dur). [10]

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Le tableau I.3 : Désignations des états des alliages d'aluminium et leurs applications (10).

Symbole	Etat de base	Application
F	Brut de fabrication	Produits transformés sur lesquels aucun traitement chimique ou écrouissage n'est effectué
Q	recuit	Alliages de corroyage recuits pour obtenir l'état le plus doux. Alliage de fonderie pour améliorer leurs ductilités, leurs stabilités dimensionnelles
W	Mise en solution (trempé et non stabilisé)	Seulement aux alliages qui vieillissent à la température de la pièce. une des rares applications de cet état concerne les rivets utilisés dans l'industrie de l'aviation.
T	Traité thermiquement pour produire des états stable autres que F, O et W	Alliage traités thermiquement avec ou sans écrouissage supplémentaire pour produire ses étas stable
H	Ecroui (alliage de corroyage seulement)	Produits à propriétés mécanique augmentées par écrouissage avec ou sans traitement thermique visant à réduire leurs Resistances mécaniques.

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

I.5.3 Désignations normalisées des alliages d'aluminium :

La norme NF EN 573 définit deux systèmes européens de désignation des alliages d'aluminium qui tous deux font référence à la composition chimique : un système numérique et un système alphanumérique [10].

- a) Le système numérique : il met en jeu un code de 04 chiffres et fait référence à la composition.
- b) Le système alphanumérique ; il permet de distinguer l'aluminium non allié et les alliages d'aluminium.
 - Aluminium non allié : sa désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi de la teneur minimale en % du métal exprimé avec une ou deux décimales.
 - Alliage d'aluminium ; leur désignation débute par le système chimique de l'aluminium Al suivi du ou des symboles chimique ou des principaux éléments d'alliage suivi chacun par le nombre représentant la teneur moyenne en % arrondie de l'élément indiqué

Le tableau 1.3 donne la correspondance entre les désignations suivant les systèmes numérique et alphanumérique.

Tableau I.4 : correspondance entre désignation numérique et alphanumérique de l'aluminium et des alliages corrodés [10].

Série	Désignation numérique (NF A 026104)*	Désignation alphanumérique (NF A 02-004)
1000 (Al 99.00)	1050A	A5
	1070A	A7
	1080A	A8
	1090	A9
	1100	A45

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

	1199	A99
	1200	A4
	1370	A5/L
2000 (Al-cu)	2001	A-U6MGT
	2011	A6U5PbBi
	2014	A-U4SG
	2017A	A-U4G
	2024	A-U4GI
	2030	A-U4Ph
	2117	A-U2G
	2218	A-U4N
	2618A	A-U2GN
3000(Al-Mn)	3003	A-M1
	3004	A-M1G
	3005	A-MG0,5
4000(Al-Si)	4032	AS12UN
	4043	A-S5
	4045	A-S10
	4343	A-S7
5000(Al-Mg)	5005	A-G0,6
	5050	A-G1,5

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

	5056A	A-G5M
	5083	A-G4?5M
	5086	A-G4MC
	5150	A85-GT
	5251	A-G2M
	5454	A-G2,5M
	5754	A-G3M
6000(Al-Mg-Si)	6005A	A-SG0.5
	6060	A-GS
	6081	A-SGM0.3
	6082	A-SG0.7
	6101	A-GS/L
	6180	A-SG
7000(Al-Zn-Mg)	7020	A-Z5G
	7049A	A-Z8GU
	7051	A-Z3G2
	7075	A-Z5GU
La lettre A indique que la l'alliage présente une légère modification par rapport à la nuance normalisée par l'aluminium association.		

I.6 influence des éléments addition sur les propriétés de l'aluminium :

L'aluminium non allié présente des propriétés réduites améliorées par éléments d'alliage. Le nombre d'éléments susceptibles d'addition avec l'aluminium est élevé. de ces alliage est qu'il permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique. Du point de vue comportement à l'oxydation, certains éléments d'addition ont un effet positif [10]

Le chrome, le manganèse, et le magnésium renforcent les propriétés protectrice du film d'oxyde tandis que d'autre, tel le cuivre, le nickel, l'étain et le plomb affaiblissant cette propriété.

I.7 Les alliages de la série 1000 :

L'aluminium possède une excellence résistance à la corrosion, une grande conductivité électrique, une très bonne conductibilité thermiquement, mais une faible résistance mécanique qui le rend très malléable. Les principales impuretés sont le fer et le silicium. [11]

I.8 Aluminium 1370 :

Pour la famille 1000, les deux derniers chiffres indiquent la teneur maximale en impuretés : l'alliage AA1370 contient au moins 99.70% d'aluminium. La conductivité électrique de l'aluminium dépend principalement des teneurs en impuretés. Des éléments tels que le Cr, Ti, V, Mn, qui ont un effet fort sur la conductivité, sont limités à des teneurs très basses. Le chiffre « 3 » de 1370 indique un contrôle spécial de ces impuretés pour les applications électriques. [12]

: Composition chimique de l'aluminium étudié.

Tableau I.5 : composition chimique d'aluminium 1370.

Al	Fe max	Si max	Cu max	Zn max	Ti max	V max	Ga max	Mg max	Mn max	Cr max	B max
99.70	0.25	0.10	0.020	0.040	0.020	0.020	0.03	0.020	0.010	0.010	0.020

II. Corrosion :

II.1 Introduction :

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

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

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

Mais sa définition par rapport à notre centre d'intérêt n'est pas simple. Il s'agit de la détérioration lente, progressive ou rapide des propriétés d'un métal : l'aspect, l'état de surface, les caractéristiques mécaniques, etc., suite à son interaction avec l'environnement dans lequel il est placé : atmosphère, eau, eau de mer, solutions diverses, milieux organiques, etc. ainsi que la dissolution induisant la contamination de la solution en contact avec le matériau (aliments, médicaments). [13]

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

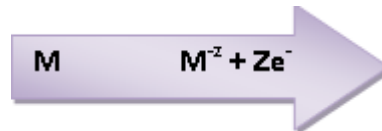
Parfois la corrosion est un phénomène bienvenu, voire souhaitée. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion. Par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique. [13]

Chapitre II : corrosion

II. 2 corrosions :

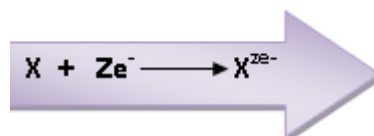
La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement métallique avec l'environnement qui l'entour l'entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

- **Oxydation** : est une destruction d'un matériau qui perd des électrons



Le processus est dit anodique, pôle (-).

- **Réduction** : réduction d'un moins constituant du milieu avec un gain des électrons



Le processus est dit cathodique, pôle (+).

Ces deux réactions se produisent simultanément de sorte que le courant électrique total est en apparence nul, il est nommé courant de corrosion.

Lorsqu'un métal de valence n est plongé dans un milieu conducteur des ions M^{n+} passent dans la solution tandis que dans le métal apparaissent des charges négatives. Le passage des ions M^{n+} est limité dans le temps car pour quitter le métal ces ions doivent vaincre la répulsion des ions qui sont déjà dans la solution et l'attraction des électrons en excès qui sont chargés négativement. Le potentiel pris par le métal par rapport à la solution tend donc vers une valeur stationnaire appelée potentiel d'électrode.

II.2.1 Le potentiel d'équilibre :

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

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \log \left(\frac{[Ox]}{[Red]} \right)$$

Chapitre II : corrosion

Avec:

- E : le potentiel à une température donnée.
- E° : le potentiel standard.
- R : constante d'équilibre (8.314j/k.mol).
- F : constante de faraday (96500)
- Ox/Red : l'activité des ions M^{n+} .

II.1.2 Le potentiel de corrosion :

Est le potentiel que prend le métal ou un alliage par rapport à un électrolyte donné. Celui-ci dépend des conditions de travail est mesurée par rapport à une électrode de référence.

L'électrode de référence dont la tension est choisie égale dans les conditions standards est l'électrode de référence à hydrogène. [14]

II.1.3 courbe de potentiel de la corrosion libre :

C'est la courbe représentant l'évolution de potentiel de la corrosion en fonction du temps E(t). [14]

II.1.4 courbe de polarisation :

La courbe de polarisation est la courbe de la variation de la densité du courant en fonction du potentiel imposé à partir des valeurs inférieures au potentiel de corrosion jusqu'à des valeurs supérieures au potentiel de corrosion. La résistance à la polarisation est $(\Delta E/\Delta i)$ sur la courbe aux alentours d'E=0. [14]

II. 3 Resistance à la corrosion : [15]

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

La tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

- Le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface.
- Les caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé : humidité, température, présence d'agents agressifs...etc.
- Les conditions de service prévues.

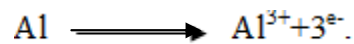
Chapitre II : corrosion

- Le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives.
- La durée de vie espérée, la fréquence d'entretien.

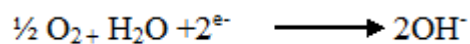
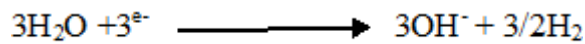
Il n'y a pas de métal ou l'alliage universel du point de vue à la corrosion.

Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion.

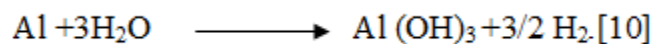
La corrosion de l'aluminium en milieu aqueux se fait suivant la réaction électrochimique :



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



Globalement, la corrosion de l'aluminium dans le milieu aqueux électrolytique neutre s'écrit :



II.4 Rôle du film d'oxyde :

L'aluminium a la propriété de s'oxyder au contact de l'air et de former, sur toute sa surface, une mince couche d'oxyde qui le rend passif à l'entérinement, c'est-à-dire imperméable aux attaques d'atmosphères corrosives. La bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages, est due à la présence permanente, sur le métal, de cette couche d'oxyde de l'aluminium communément appelée *alumine*. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant, tel l'air ou l'eau, et il se reforme instantanément après des opérations de mise en forme ou de soudage.

La stabilité physico-chimique de l'alumine a donc une très grande importance dans la résistance à la corrosion de l'alumine. Elle dépend, en particulier, des caractéristiques de milieu, dont le pH, ainsi que la nature de l'alliage. [11]

II.5 influence de pH :

La vitesse de dissolution du film s'oxyde dépend de pH. Elle est très forte en milieu acide et en milieu alcalin, mais elle est faible dans les milieux neutralité, soit pour des valeurs de pH oscillant entre 5 et 9. Les eaux naturelles de rivières et de pluie ont un pH voisin de 7, alors que l'eau de mer a un pH de l'ordre 8. Le film d'oxyde est donc stable dans ces milieux, ce qui explique la grande longévité constaté, à ce jour des toitures, bardage, matériel de signalisation routières, etc., en alliages d'aluminium non protégés, exposés aux intempéries. [11]

II.6 les différents modes de corrosion :

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.6.1 Corrosion générale (uniforme) :

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

Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion générale des alliages d'aluminium passifs est très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de 5 micromètres par an, ce qui peut entraîner à la longue une évolution progressive de l'état de surface vers un aspect inesthétique du à une variation de la rugosité. [16]

II.6.2 corrosion localisée :

II.6.2.1 Corrosion caverneuse (ou corrosion par crevasse) :

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

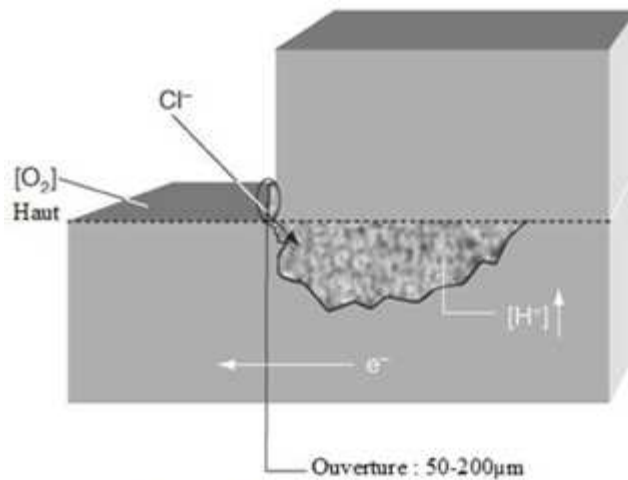


Figure II. 1 : Mécanisme de corrosion par crevasse [18]

II.6.2.2 La corrosion filiforme :

Peut être observée pour les matériaux revêtus (protection par peinture) ou recouvert d'un film épais et peu adhérent, comme c'est le cas pour le magnésium par exemple. Elle s'initie au niveau d'un défaut du revêtement et progresse sous forme de filaments. La propagation est due à une hétérogénéité du milieu entre la tête active et la queue inerte d'un filament. Elle est expliquée soit par des processus de dissolution anodique soit de délaminage cathodique. [1]

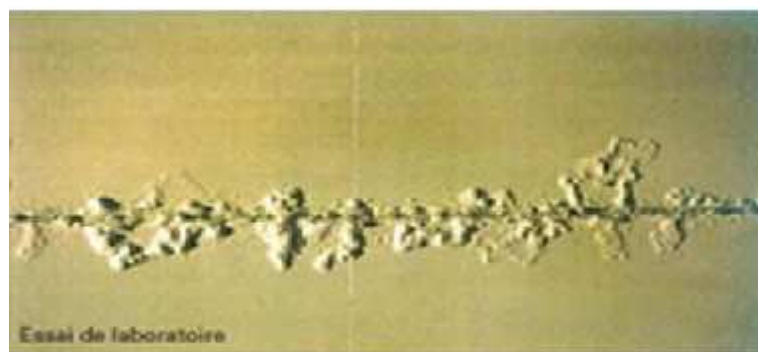


Figure II.2 : Corrosion filiforme de l'aluminium peint [19]

II.6.2.3 La corrosion caverneuse :

Est due à la formation d'une pile à aération différentielle entre un milieu confiné (appelé « crevasse » ou « caverne ») et la solution extérieure. L'aluminium et en général les alliages d'aluminium sans cuivre sont peu sensibles à la corrosion caverneuse. [1]

Chapitre II : corrosion

II.6.2.4 La corrosion inter granulaire :

Est, au même titre que la corrosion exfoliante et sous contrainte, une forme de corrosion structurale. Ce sont les hétérogénéités de microstructure qui en sont le moteur. En ce qui concerne les alliages de la série 2000, la sensibilité à la corrosion inter granulaire peut être induite par la précipitation aux joints de grains de particules riches en cuivre. Cette précipitation, se faisant à partir des atomes de cuivre de la solution solide, va induire une diminution de la concentration en cuivre de la zone adjacente aux joints de grains. Cette zone est dépourvue en cuivre et a donc un potentiel plus cathodique que les particules riches en cuivre des joints de grains mais aussi plus cathodique que la matrice d'aluminium elle-même. Un couplage galvanique peut donc avoir lieu, et aura donc comme conséquence la dissolution préférentielle et accélérée de cette zone adjacente.

[1]

II.6.2.5 Corrosion par piqûre :

La corrosion par piqûres est une forme sérieuse de dommage dans les structures aéronautiques car les alliages d'aluminium, en particulier les alliages d'aluminium de haute résistance, utilisés pour les structures avioniques, sont sensibles à la corrosion par piqûres quand ils sont exposés à un environnement agressif. Ce type est dangereux et difficile à détecter car elle s'initie par piqûre qui se propage à l'intérieur du cœur du matériau où la dissolution devient rapide ce qui fragilise le matériau. [14]

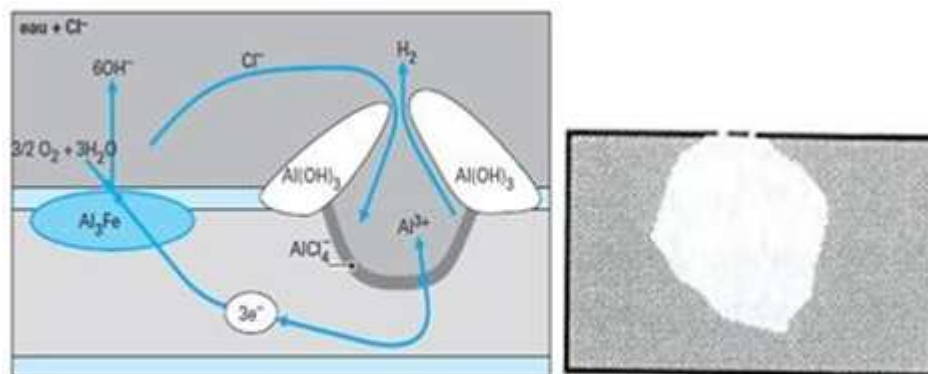


Figure II.3 : mécanisme de la corrosion par piqûre [19]

Condition de corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres désigne une attaque locale d'une surface passive. Elle nécessite la présence d'anions agressifs, notamment les ions Cl^- , Br^- et I^- , et d'un oxydant. Elle se manifeste par la formation de petites cavités (piqûres), alors que la surface passive reste intacte. Le nombre et la forme des piqûres de corrosion varient selon les conditions expérimentales. on trouve des piqûres profondes montrant une attaque cristalline, des piqûres loculeuses et des piqûres hémisphériques

Chapitre II : corrosion

brillantes. La dimension des piqûres varie de quelques micromètres à quelques millimètres. [4]

II.6.2.6 Corrosion-érosion :

Le déplacement rapide d'un fluide sur la surface métallique peut conduire à des dégradations ou des ruptures très rapides comparées à celles qui se produisent si le fluide restait immobile. Une circulation rapide accélère généralement la dissolution des matériaux métalliques, surtout lorsque le liquide est chargé de particules solides. L'érosion –corrosion affecte l'ensemble des métaux et des alliages, particulièrement passivables et les métaux de faible dureté. [17]

II.6.2.7 Corrosion feuilletante :

La corrosion feuilletante des alliages de l'aluminium est une corrosion inter granulaire particulière. Les produits de corrosion ont un volume plus important que le métal de base, donnant à la structure l'aspect d'un livre feuilleté [3]. Elle se produit sur des alliages qui ont une texture fibreuse à la suite d'un laminage par exemple. Elle se manifeste par une attaque des joints de grains suivant l'orientation de la texture. Les grains très plats tels des feuillets. Ce type de corrosion est lié à la participation de phases intermétalliques aux joints de grains et aux sous-grains. [20]

II.6.2.8 Corrosion bactériologique :

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

Des bactéries hétérotrophes qui exigent pour se développer une source organique de carbone. Elles sont capables d'assimiler de nombreuses substances organiques qu'elles transforment en gaz carbonique, en métabolite, acide organique, rejetés dans le milieu où prolifèrent les bactéries. Ce sont des modifications du milieu (et non les bactéries elles mêmes) qui sont à l'origine de la corrosion.

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

Dans le cas de l'aluminium et ses alliages, le cas de la corrosion d'origine bactériologique le plus connu est celui des réservoirs de carburant d'avion à réaction. C'est en 1950 que l'armée américaine a observé pour la première fois la corrosion d'un réservoir d'avion à réaction. Des études ont montré que cette corrosion est due au développement dans le kérosène de la bactérie *Cladosporium Resinae*. Ce type de corrosion n'est qu'un cas particulier de la corrosion électrochimique. [4]

Chapitre II : corrosion

II.6.2.9 Corrosion sous contrainte :

Elle est définie comme l'attaque par un milieu corrosif sur un matériau sous contraintes. Ces contraintes proviennent soit des charges appliquées, soit des contraintes résiduelles. La corrosion sous contraintes se traduit par la présence de deux types de fissures, des fissures inter granulaires qui se propagent en suivant les limites de grains et des fissures trans granulaires qui s'étendent indifféremment à travers les grains. Ces deux types de fissures peuvent se retrouver dans le même alliage suivant l'environnement et la structure métallique. Il est évident que l'action simultanée des contraintes et de la corrosion donne des résultats désastreux même si toutes les combinaisons de métaux et de milieux ne sont pas susceptibles d'entraîner de la corrosion sous contrainte. [21]

II.6.2.10 corrosion galvanique :

Entre deux métaux dissemblables plongés dans un électrolyte, existe une différence de potentiel. Si ces métaux sont en contact (c'est-à-dire connectés électriquement), un courant électrique s'établit. Le métal le moins noble (qui a un potentiel de dissolution moins élevé dans la série galvanique) joue le rôle d'anode et se corrode. C'est ce qui se passe dans une pile sèche avec le zinc. [4]

II.7 Passivité de l'aluminium :

L'Aluminium est un métal passif parce qu'il possède en sa surface une couche mince d'oxyde, le film passif, qui sépare le métal de l'électrolyte, contrairement aux métaux actifs, qui conservent un contact direct avec la solution. La plupart des métaux et des alliages résistant bien à la corrosion sont à l'état passif. [13]

L'Aluminium est habituellement recouvert d'une couche dite protectrice d'alumine amorphe Al_2O_3 de 2 à 4 nm d'épaisseur. [17] L'épaisseur augmente avec la température, par exemple l'épaisseur est doublée pendant un traitement de 500 °C. Le film d'oxyde est très compact ($V_{\text{Al}_2\text{O}_3} / V_{\text{Al}} = 1.4$ avec V volume).

II.8 – Déformation et la contrainte :

Pour décrire l'évolution d'un matériau soumis à une sollicitation quelconque, il faut définir un jeu de paramètres permettant de la définir. La contrainte et la déformation nous permettent de caractériser l'évolution du matériau. Le modèle de comportement le plus simple associé à une sollicitation est le modèle élastique linéaire, limité aux petites déformations pour son applicabilité

Chapitre II : corrosion

au matériau réel. Le comportement élastique est alors caractérisé par une relation linéaire entre les contraintes et les déformations e . Considère un solide auquel on applique une force F . L'intensité de la contrainte subie par ce solide s'exprime comme le quotient de la force sur la surface d'application S de la force $\sigma = F/S$. La contrainte s'exprime alors en Pascal. La déformation est le rapport de la longueur déformée sur la longueur initiale. Elle est sans unité. On définit quelque déformation comme :

- Flexion
- Cisaillement
- Flambage
- Traction et compression

II.9 Contraintes en traction-compression :

Chaque élément de surface supporte un effort de traction parallèle à la ligne moyenne.

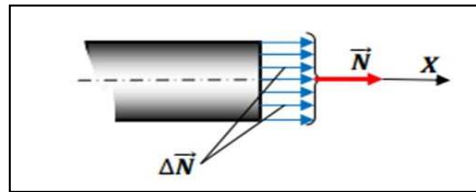


Figure II.4 : Répartition uniforme des contraintes.

Il y a répartition uniforme des contraintes dans la section droite. D'où :

$$C(M, n) = \sigma x \text{ et comme } N = \iint_S \sigma \cdot dS = \sigma \cdot S, \text{ on aura : } \sigma = N/S$$

$$N[N] ; S[mm^2] ; \sigma[MPa]$$

Cette relation peut éventuellement être algébrique. On obtiendra alors :

- une contrainte $\sigma < 0$ en compression.
- une contrainte $\sigma > 0$ en traction.

Condition de résistance : Les contraintes développées dans les poutres doivent rester dans le domaine élastique. En général, on adopte un coefficient de sécurité s .

La condition de résistance pour une contrainte normale d'extension est :

- En extension :
$$\sigma = \frac{N}{S} \leq R_{pe} = \frac{\sigma_e}{s}$$

On pose R_{pe} Contrainte pratique à l'extension en [MPa]

- En compression :
$$\sigma = \frac{N}{S} \leq R_{pc} = \frac{\sigma_e}{s}$$

Chapitre III : partie expérimental

III.1 introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les opérations effectuées pour mener à bien ce travail, avec la description des techniques et des équipements utilisés dans le cadre de l'étude. Les techniques d'analyse utilisées pour la caractérisation des échantillons ; la microscopie optique ; la microscopie électronique à balayage ; la micro- dureté, et la chrono-potentiomètre.

III.2 Travail effectué :

III.2.1 Prélèvement des échantillons :

Pour voir l'effet de la déformation par compression sur la corrosion de l'aluminium de type 1370 nous possédons a faire quelques manipulation. L'aluminium utilisé pour l'étude est un fil de forme cylindrique de diamètre deux (2) mm et de longueur un (1) mètre.

Composition chimique de l'aluminium étudié.

Tableau III.I : composition chimique d'aluminium 1370.

Al	Fe max	Si max	Cu max	Zn max	Ti max	V max	Ga max	Mg max	Mn max	Cr max	B max
99.70	0.25	0.10	0.020	0.040	0.020	0.020	0.03	0.020	0.010	0.010	0.020



Figure III.1 : fil d'aluminium 1370 utilisé avant de la couper

Des échantillons de longueur cinq (05) mm ont été coupés à laide d'une scie mécanique. Les longueurs exactes des dix (10) échantillons sont mesurées à l'aide de pied à coulisse.10 mesures par échantillon ont été effectuées. Le tableau (III.1) résume les mesures des dix échantillons.

Chapitre III : partie expérimental

Tableau III.2 : mesures des dix(10) échantillons.

N°échantillon	Moyenne des mesures (mm)	Force utilisé KN	Volume (mm ³)	L'échantillon est destiné pour :
01	5.15	02	16.18	corrosion
02	5.29	02	16.62	dureté
03	5.36	02	16.84	corrosion
04	5.05	04	15.85	corrosion
05	5.55	04	17.45	dureté
06	5.42	04	17.04	corrosion
07	5.41	06	16.99	dureté
08	5.10	06	16.14	corrosion
09	5.73	06	17.99	corrosion
10	5.22	Sans compression	16.41	corrosion



Figure III.2 les échantillons avant compression

III.2.2. Déformation par compression

Neuf (09) échantillons parmi les dix (représentés par le Tableau III.1) ont subit une déformation par compression à l'aide d'une machine de traction de marque OEHLGASS de force maximale de 120kN, et l'échantillon N°10 n'a pas subit une déformation celle-ci est représentée par la Figure III.3



Figure III.3 : Machine utilisée pour la compression des échantillons



Figure III.4: l'échantillon après compression

III.3. Préparation des échantillons pour la microscopie optique, microscopie électronique à balayage et micro dureté :

La connaissance de la structure métallurgique de matériau étudié est un point essentiel pour la compréhension des divers phénomènes intervenant dans le processus de corrosion

III.3.1 l'enrobage :

Pour faciliter la manipulation des échantillons lors de polissage on a effectué un enrobage à froid en utilisant la pate ABRO se solidifiant à la température ambiante.

III. 3.2 Polissage :

Tous les échantillons ont subi un polissage réalisé sur une polisseuse de type STUERS PEDMAX 2 tournant à 150 et 300 tours/min. Le polissage est réalisé sous lubrification continue (sous une forme jet d'eau) pour éviter l'échauffement local des échantillons suite au frottement avec le papier abrasif, on utilisé des papiers abrasifs de granulométries : 800, 1000, 1200, 2400 et 4000. Ces derniers ont été utilisé successivement dans l'ordre décroissant de granulométrie en prenant le soin de tourner l'échantillon de 90° afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent.



Figure III.5 : polisseuse utilisé

III.3.3 Analyse de la structure :

La connaissance de la structure métallurgique des matériaux étudiés est un point essentiel pour la compréhension des phénomènes intervenant en corrosion. Les techniques d'observation utilisées pour cette étude sont la microscopie optique (MO) et la microscopie électronique à balayage (MEB).

III.3.3.1 Microscope optique :

La microscopie optique (MO) est utilisée afin, d'une part, déterminer la composition en phase de la structure et la texture du matériau étudié, la dimension des grains et les différentes phases présentes, et d'autre part, de caractériser la morphologie de dégradation des échantillons après corrosion.

Le principe du microscope métallographique repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la caméra. L'étalonnage de mesure des dimensions réelles après agrandissement est effectué au moyen d'une réglette, fournie avec le microscope, de 1 mm de taille, divisée en 100 subdivisions. La figure montre le schéma de Principe du microscope utilisé.

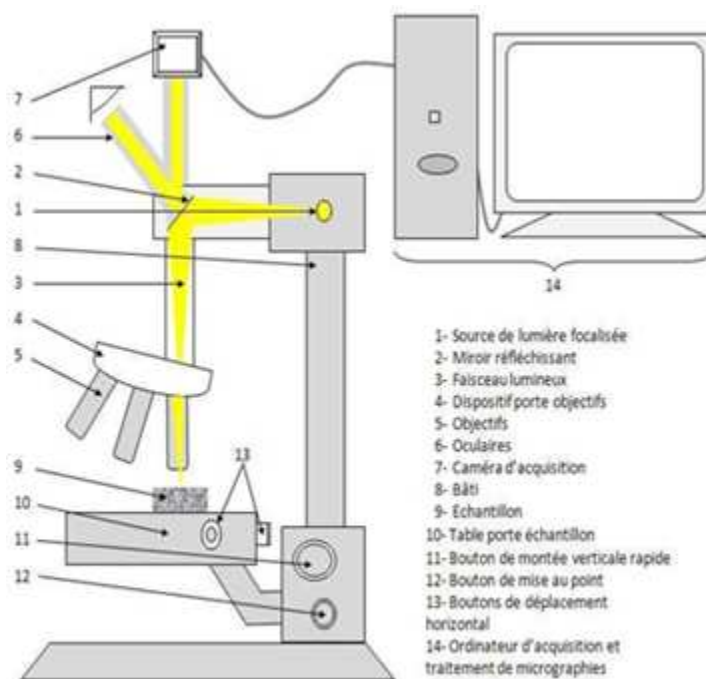


Figure III.6 : schéma de principe du microscope optique utilisé.



Figure III.7 microscope optique utilisé.

Observation au microscope optique ;

L'observation micrographique a été réalisée sur un microscope optique de type HUND équipé de 4 objectifs de grossissements 40, 100, 200 et 400 fois. L'acquisition des micrographies a été effectuée au moyen d'une caméra vidéo solidaire au microscope et liée à un ordinateur équipé du logiciel d'acquisition (EYE'S CORA) et de traitement des résultats (PICEDCORA)

IV.3.3.2 Microscope électronique à balayage (M E B) :

La microscopie électronique à balayage permet d'explorer la surface de l'échantillon avec une haute résolution. Il utilise un faisceau d'électrons émis par un filament en tungstène soumis à une haute tension. Elle nous fournit des informations sur la composition chimique de l'échantillon ainsi que sa morphologie. Dans notre étude, le MEB utilisé est de marque Philips ESEM XL30 à filament de tungstène ceci est couplé à un système complet de microanalyse par dispersion d'énergie (EDS X). Lorsque le filament est mis sous haute tension et que le vide nécessaire dans la colonne est atteint, un faisceau d'électrons est produit (électrons primaires) et accéléré par la haute tension vers l'échantillon. Des lentilles électromagnétiques assurent l'orientation du faisceau d'électrons et le balayage de l'échantillon. Le balayage de l'échantillon par les électrons primaires produit alors une rétrodiffusion des électrons primaires (électrons rétrodiffusés), des électrons secondaires éjectés de l'échantillon par les électrons primaires ainsi que des rayonnements X caractéristiques des transitions électroniques. Trois types de détecteurs sont alors disposés dans la colonne du microscope : le détecteur des électrons rétrodiffusés, le détecteur des électrons secondaires et celui des rayons X. Les images obtenues en électrons rétrodiffusés se caractérisent par un contraste de couleur qui traduit la différence de masse atomique des éléments constituant les phases en présence : les zones claires indiquant les phases lourdes.

Chapitre III : partie expérimental

Les images en électrons secondaires donnent une topographie de la surface examinée tandis que l'analyse des rayonnements X caractéristiques fournit une analyse chimique.

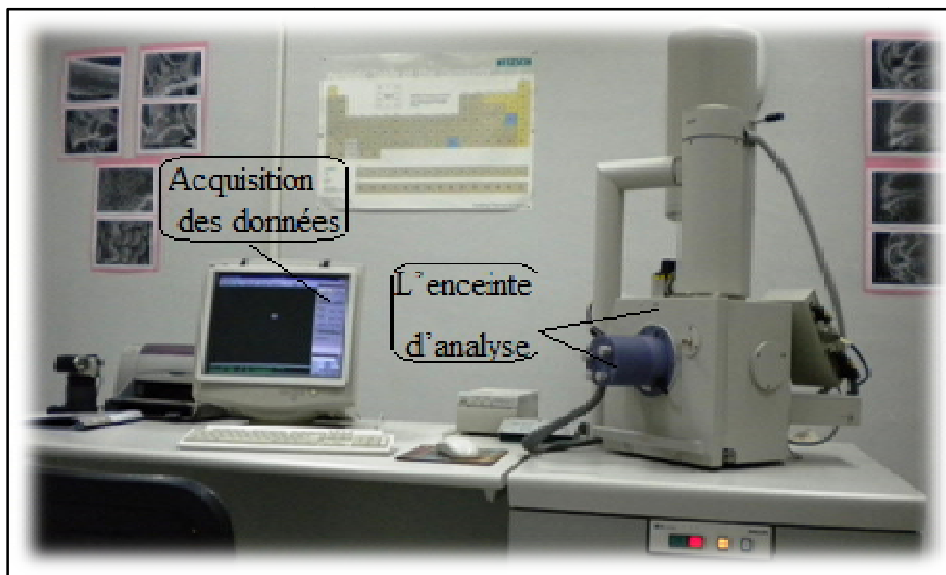


Figure III.8: Microscope électronique à balayage (MEB).

III.3.3.3 Essai de micro dureté

Afin d'estimer l'évolution des caractéristiques mécaniques des échantillons, des mesures de dureté Vickers à charges réduites (25gF) avec un temps de maintien de 20s sont réalisées après un polissage mécanique et une compression de 2KN, 4KN et 6KN des échantillons. Les échantillons N° 2, 4 et 7 respectivement ayant fait l'objet de ces mesures sont des cylindres de diamètre 2mm et 1mm de longueur.



Figure III.9: Appareil de micro dureté

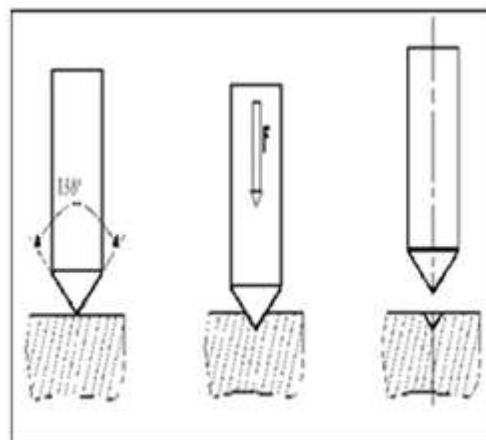


Figure III.10: Principe de l'essai Vickers.

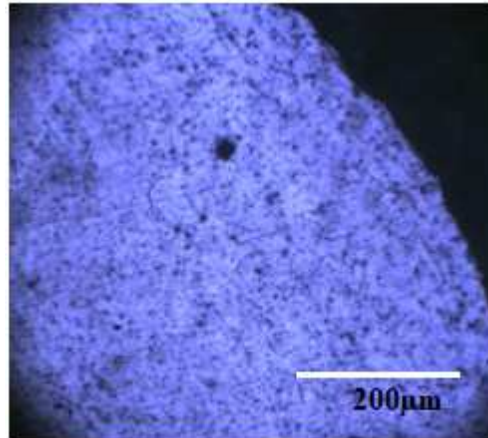


Figure III.11 : Empreinte obtenue par micro dureté

III.4 Préparation des échantillons pour les essais de corrosion (préparation des électrodes de travail) :

L'analyse électrochimique reste un paramètre important pour évaluer le comportement à la corrosion d'un matériau, cette technique consiste à établir un dispositif de mesure bien spécifique.

1^{ère} Etape : les échantillons ont été percés de l'extrémité à l'aide d'une perceuse avec une maiche de un (1) mm de diamètre.

2^{ème} Etape : un fil conducteur a été passé en cuivre de diamètre deux (2) mm à travers le trou percé dans l'étape 01, ensuite le fil à été plié et écrasé autour de l'échantillon pour assurer une bonne conduction électrique.

3^{ème} Etape : une surface de travail de un (1) mm sur l'échantillon a été définie.

Au cours des essais de corrosion l'électrode de travail prendra la position de l'anode et il se corrode.

III.4.1 préparation du bain de corrosion :

Nous avons mélangé dans une fiole 1 litre d'eau déminéralisée avec 3g de NaCl à haut pureté pour obtenir une solution de 0.3% de NaCl.

III.4.2. préparation l'électrode de référence :

L'électrode de référence choisie est une électrode en argent de potentiel $E^{\circ}=197(\text{mV})$.

Pour la préparer on a immergé un fil d'argent dans l'eau de javel et on a rincé l'électrode avec de l'eau déminéralisée.

III.4.3. préparation de l'électrode auxiliaire : l'électrode auxiliaire utilisée est de graphite. Elle a été reliée à un fil conducteur en cuivre. Selon le sens de branchement du dispositif d'alimentation. Cette électrode a pour objectif d'améliorer la lisibilité de courant car il joue toujours un rôle symétrique de celui de l'électrode de travail.

III.4.4. Montage pour l'essai de corrosion :

- Essai de corrosion libre (figure IV.10) cet essai nous permettra de déterminer le potentiel de corrosion libre de l'aluminium 1370. Peut-être résigné aussi sur la passivation de matériau et la densité de courant de corrosion libre. Le montage constitué d'un multimètre relié entre l'électrode de travail et celle de référence dans une solution de 0.3 % de NaCl et il nous donne directement le potentiel de notre matériau à étudier. Les mesures ont été réalisées sur une durée de 24heures. (la figure III.10) montre le montage.
- Essai de corrosion sous une tension continue imposée de potentiel de -1500mV jusqu'à 1500(mV) à l'aide de potentiodynamiques donc on varie la tension on commence avec -1500(mV) et on diminue de 20(mV) jusqu'à 1500(mV) et on enregistre le potentiel donnée par le multimètre. Le montage utilisé est constitué des électrodes de référence, de travail, et contre électrode et deux multimètres l'un mesure le courant imposé et l'autre mesure le potentiel donnée. (La figure III.11) montre ce montage.



Figure III.12 : montage essai de corrosion libre de l'aluminium 1370.



Figure III.13 : montage essai de corrosion sous une tension imposée de l'aluminium 1370.

CHAPITRE III : Techniques Expérimentales

Introduction :

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

Les résultats de caractérisation microscopiques, électrochimiques et la micro dureté, des différents échantillons de fil d'aluminium AA1370 de diamètres de 2 mm et de longueur de 1 mm ont été subit des différentes déformations par comprissions de 2,4 et 6 kN

IV. 1-Caractérisation microstructurale des différents échantillons de l'aluminium AA1370 ayant ou non subit différentes déformations par compressions uni axiale après corrosion :

Les échantillons ont été enrobés à froid dans une résine sous forme de pate (pate ABRO) et subis un polissage mécanique pour l'observation au microscope optique.

IV.1.1 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon n'ayant pas subi de compression avant la corrosion :

La **Fig. (IV.1)** représente des micrgraphiques obtenues par microscopie optique, l'échantillon de l'aluminium AA1370 n'ayant pas subi de compression, cette figure montre les grains et joints de grain de l'aluminium.

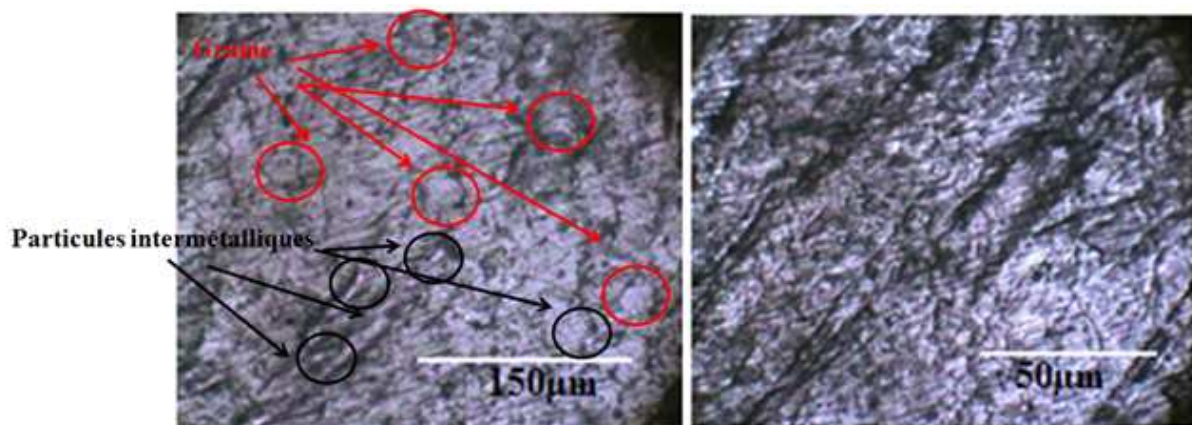


Figure IV.1 : microstructure de l'échantillon n'ayant pas subi ni compression ni corrosion

IV.1.2 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 2 kN avant la corrosion :

La **Fig. (IV.2)** représente des images obtenues par microscopie optique, l'échantillon de l'aluminium 1370 est comprimé avec 2kN et avant corrosion, sur cette figure nous observons une apparition de bandes de glissement, cette dernière est due de compression uni-

axiale appliquée à cet échantillon.

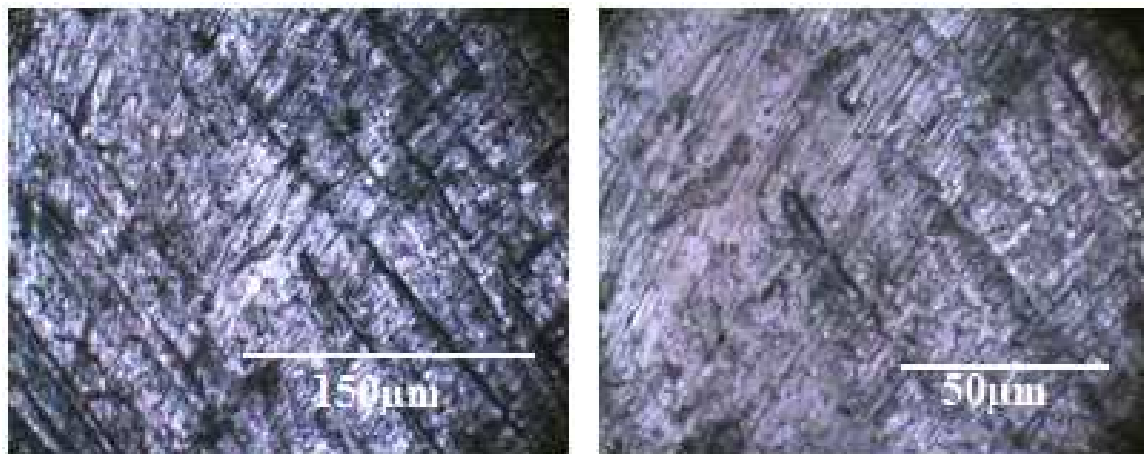


Figure IV.2 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 2 kN avant corrosion.

IV.1.3. Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 4 kN avant la corrosion :

La **Fig. (IV.3)** représente des images obtenues par microscopie optique avant corrosion, d'un échantillon de l'aluminium AA1370 ayant subi une compression uni-axiale de 4 kN, sur cette figure nous observons aussi une apparition de bandes de glissement, cette dernière est due de compression uni-axiale appliquée à cet échantillon.

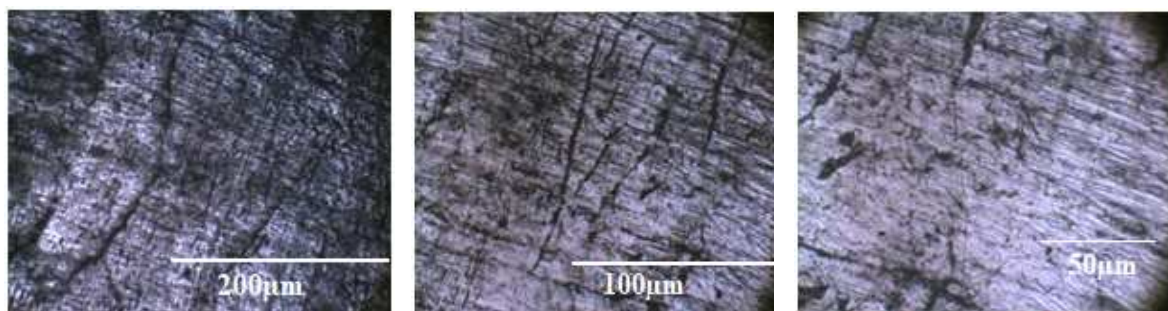


Figure IV.3 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale 4 kN avant corrosion.

IV.1.4.2 Caractérisation microstructurale, par microscopie optique, l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 6 kN avant la corrosion :

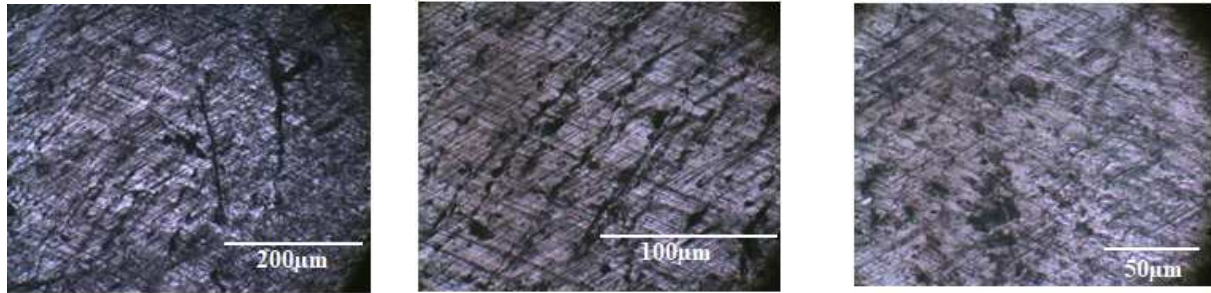


Figure IV.4 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale 6kN avant corrosion.

La **Fig. (IV.4)** représente la microstructure prise par microscope optique, l'échantillon de l'aluminium AA1370 est comprimé avec 6kN et avant corrosion, sur cette figure nous observons aussi une apparition de bandes de glissement, cette dernière est due de compression uni-axiale appliquée à cet échantillon.

IV.1.5 Caractérisation de la morphologie de corrosion de l'échantillon n'ayant pas subi de compression uni-axiale:

La **Fig. (IV.5)** représente une image obtenue par microscopie optique, du fil d'aluminium AA1370 n'ayant pas subi de compression uni-axiale après 24 heures d'immersion, dans une solution de (0.3%) de NaCl, sur cette figure nous observons l'apparition d'une corrosion localisée, nous pensons que cette dernière apparait autour des particules intermétalliques constituant l'aluminium AA1370. Nous pouvons conclure que ces particules sont plus nobles que la matrice en aluminium. Cette corrosion s'est manifestée après que les chlorures ont fragilisé la couche d'oxyde d'aluminium. Après sept jours de corrosion on observe la présence du même type de corrosion sur toute la surface **Fig. (IV.6)**.

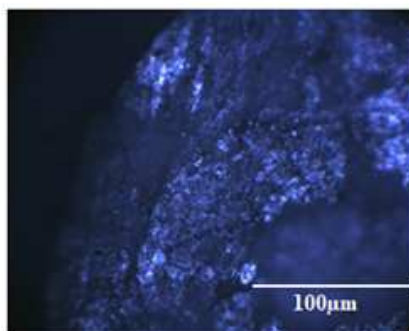


Figure IV.5 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon n'ayant pas subi une compression uni-axiale après vingt quatre heures d'immersion dans une solution de (0.3%) deNaCl

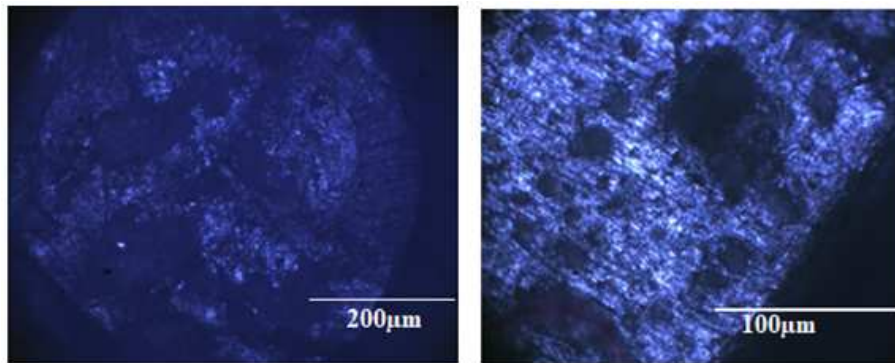


Figure IV.6 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon n'ayant pas subi une compression uni-axiale après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

IV.1.6 Caractérisation de la morphologie de corrosion de l'échantillon ayant subi de compression uni-axiale 2 kN:

La **Fig. (IV.7)** représente une image obtenue par microscopie optique, du fil d'aluminium AA1370 ayant subi de compression uni-axiale de 2 kN après 24 heures d'immersion, dans une solution de (0.3%) de NaCl, sur cette figure nous observons l'apparition d'une corrosion localisée, nous pensons que cette dernière apparaît autour des particules intermétalliques constituant l'aluminium AA1370. on remarque que les surfaces corrodées sont plus petite par rapport à celles des échantillons non déformé, ceci dit nous pensons que les particules intermétalliques ont subis une fragmentation. Pour sept jours d'immersion on observe la même chose **Fig. (IV.8)**.

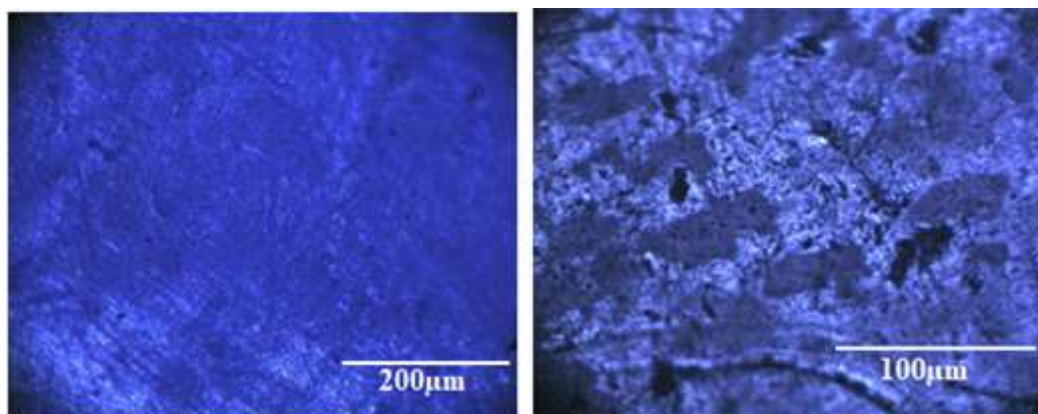


Figure IV.7 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon

Chapitre IV : Résultats et discussion

ayant subi une compression uni-axiale de 2 kN après vingt quatre d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl
2kN et après 24 heures d'immersion dans une solution de (0.3%) de Na Cl

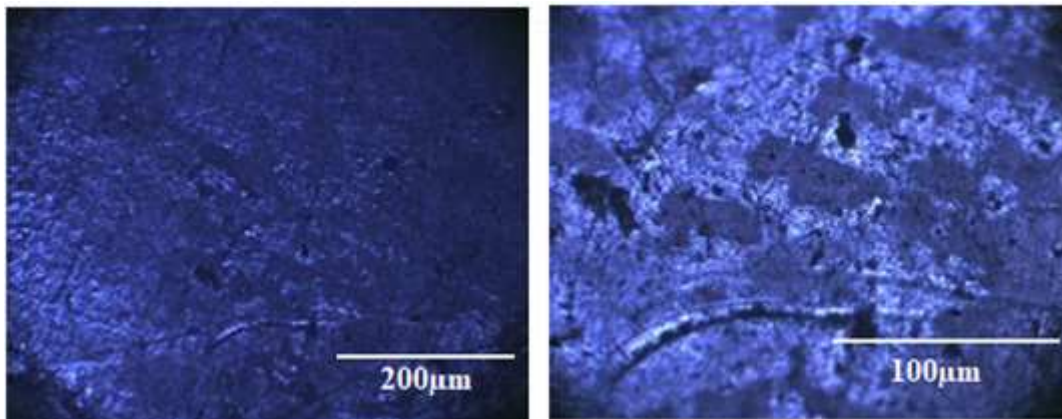


Figure IV.8 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 2 kN après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

IV.1.7 Caractérisation de la morphologie de corrosion de l'échantillon ayant subi de compression uni-axiale 4 kN:

La **Fig. (IV.9)** représente une image obtenue par microscopie optique, du fil d'aluminium AA1370 ayant subi de compression uni-axiale de 4 kN après 24 heures d'immersion, dans une solution de (0.3%) de NaCl, sur cette figure nous observons l'apparition d'une corrosion localisée, nous pensons que cette dernière apparait autour des particules intermétalliques constituant l'aluminium AA1370. Ici aussi on remarque que les surfaces corrodées sont plus petite par rapport à celles des échantillons non déformé, ceci dit nous pensons que les particules intermétalliques ont subis une fragmentation. Pour sept jours d'immersion on observe la même chose **Fig. (IV.10)**. Nous observons aussi que pour cet échantillon la corrosion autour de ces particules apparait bien distribuée sur toute la surface **Fig. (IV.10)**

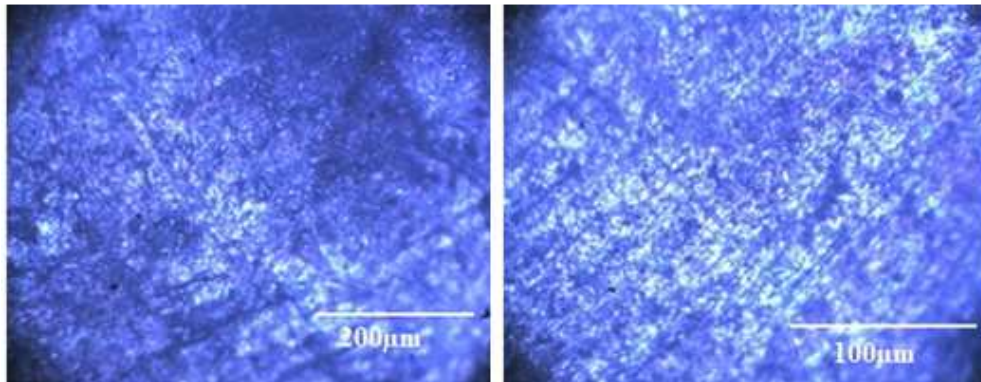


Figure IV.9 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 4 kN après vingt quatre d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

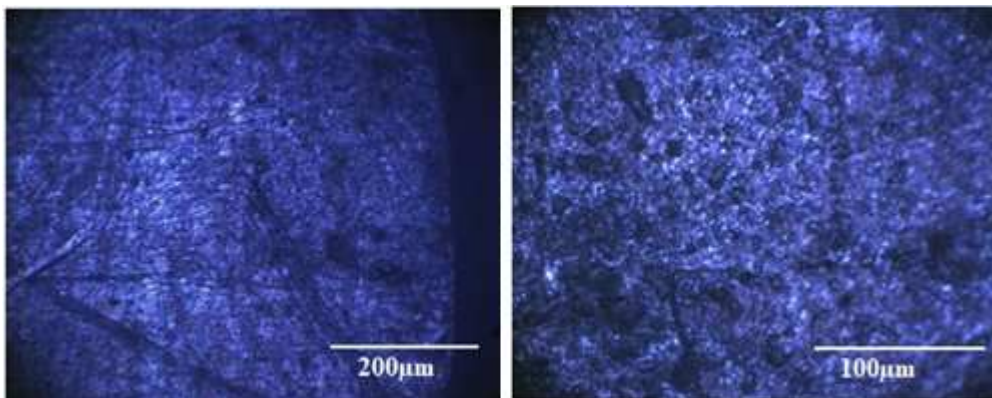


Figure IV.10 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 4 kN après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

IV.1.8 Caractérisation de la morphologie de corrosion de l'échantillon ayant subi de compression uni-axiale 6 kN:

La **Fig. (IV.11)** représente une image obtenue par microscopie optique, du fil d'aluminium AA1370 ayant subi de compression uni-axiale de 6 kN après 24 heures d'immersion, dans une solution de (0.3%) de NaCl, sur cette figure nous observons l'apparition d'une corrosion localisée, nous pensons que cette dernière apparait autour des particules intermétalliques constituant l'aluminium AA1370. Ici aussi on remarque que les surfaces corrodées sont un peu plus grande par rapport à celles des échantillons déformé avec une compression uni-axiale de 2 kN et 4 kN. Pour sept jours d'immersion on observe la même chose **Fig. (IV.12)**. Nous observons aussi que pour cet échantillon la corrosion autour de ces particules apparait bien distribuée sur toute la surface **Fig. (V.11-12)**

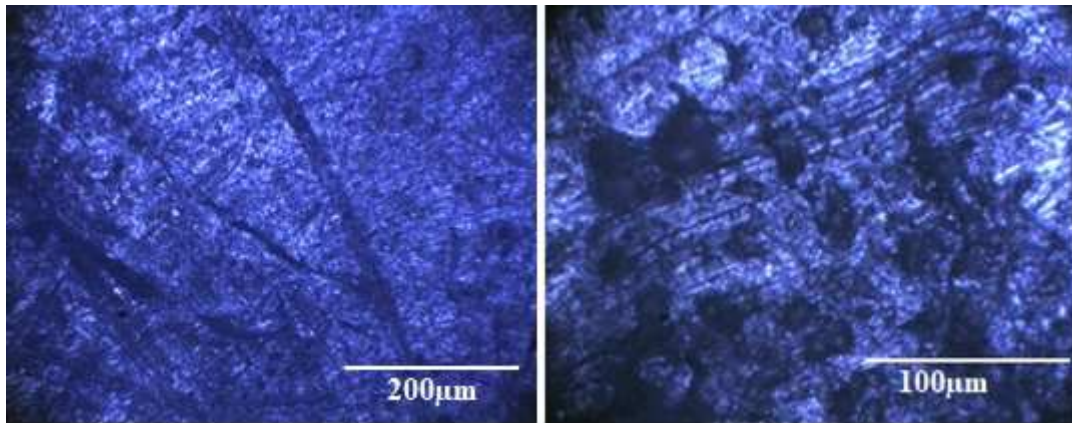


Figure IV.11 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 6 kN après vingt quatre d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

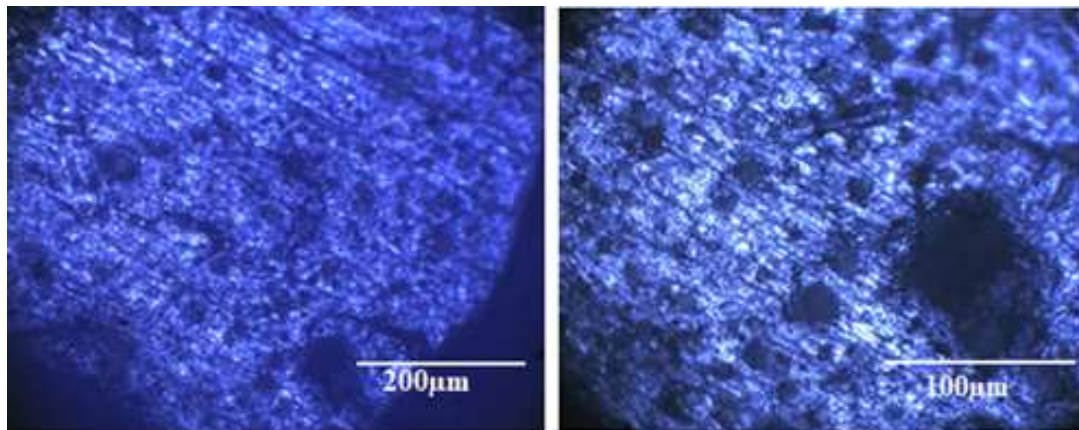


Figure IV12 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 6 kN après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

IV. 2- Caractérisation de la morphologie de corrosion de l'échantillon ayant subi de compression uni-axiale 2 kN, par microscope électronique à balayage :

La **Fig. IV.13** représente des images MEB de l'échantillon ayant subi une déformation par compression uni-axiale de 2 kN est prise par un microscope électronique à balayage pour après sept jours de corrosion, on observe une corrosion localisée par piqûre **Fig. V.13 (b,c,d)**

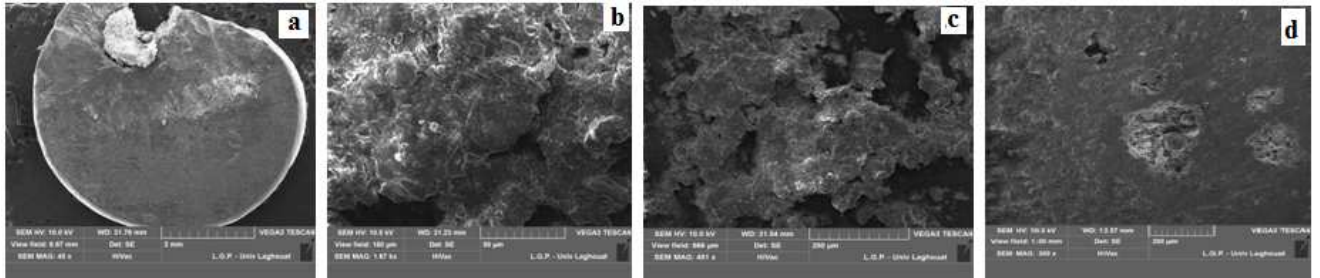


Figure V.13 : Microstructure obtenues par microscopie optique de l'échantillon ayant subi une compression uni-axiale de 2 kN après sept jours d'immersion dans une solution de (0.3%) de NaCl

IV.3 Caractérisation de la cinétique de corrosion et effet de la déformation uni-axiale :

IV.3.1 Potentiel de la corrosion libre :

IV.3.1.1 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon non déformé :

La **Fig. (IV.14)** représente l'évolution du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'échantillon non déformé en fonction du temps, à l'immersion l'OCP est égal à -0,511 V, celui-ci diminue jusqu'à atteindre -0,7724 V après une durée de 23 secondes (**Fig. (IV.14.b)**). Cette diminution est due à la fragilisation de la couche d'oxyde d'aluminium, formée instantanément après élaboration de l'aluminium, cette fragilisation est provoquée par le chlore de la solution corrosive c.-à-d. NaCl. Après 23 secondes d'immersion l'OCP augmente pour atteindre une valeur de -0,659V, par la suite il diminue légèrement pour atteindre une valeur de -0,71 V, nous pensons que cette valeur est celle de la passivation.

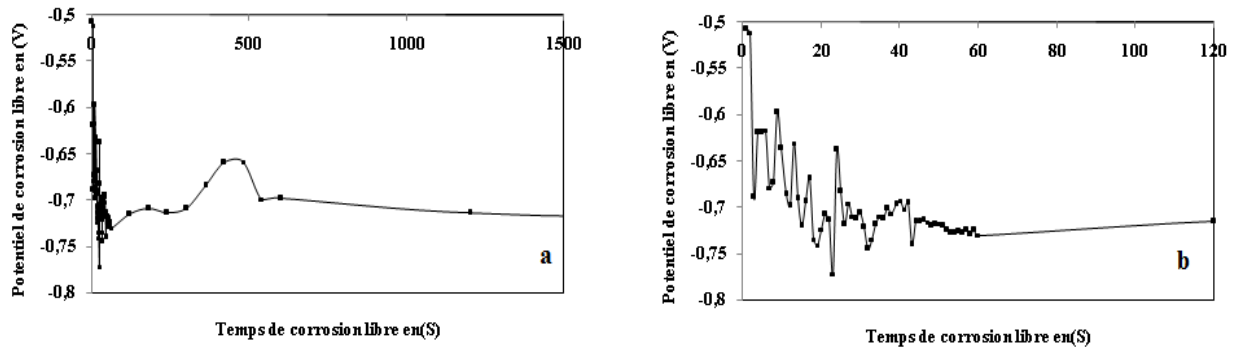


Figure IV.14 : Potentiel de Corrosion libre de l'échantillon non déformé dans la solution de 0.3 % NaCl

IV.3.1.1 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 2kN :

La **Fig. (IV.15)** représente l'évolution du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'échantillon déformé sous une charge de 2 kN en fonction du temps, à l'immersion l'OCP est égal à -1,096 V cette faible valeur de l'OCP peut être due à une destruction de la couche d'oxyde formée après élaboration du fil par l'application de la déformation uni-axiale. L'OCP augmente jusqu'à atteindre -0,768 V après une durée de 120 secondes (**Fig. (V.15.b)**). Cette augmentation est due à la formation d'une couche d'oxyde de nouveau dans la solution de NaCl, par la suite on assiste à une diminution du potentiel de corrosion libre jusqu'à une valeur -0,872, cette diminution est due à la destruction du film formé précédemment, cette fragilisation est provoquée par le chlore de la solution corrosive c.-à-d. Après 540 secondes d'immersion l'OCP augmente pour atteindre une valeur de -0,506 V, par la suite il diminue légèrement pour atteindre une valeur d'environ -0,6 V pour une durée de 1500, nous pensons que cette valeur est celle de la passivation.

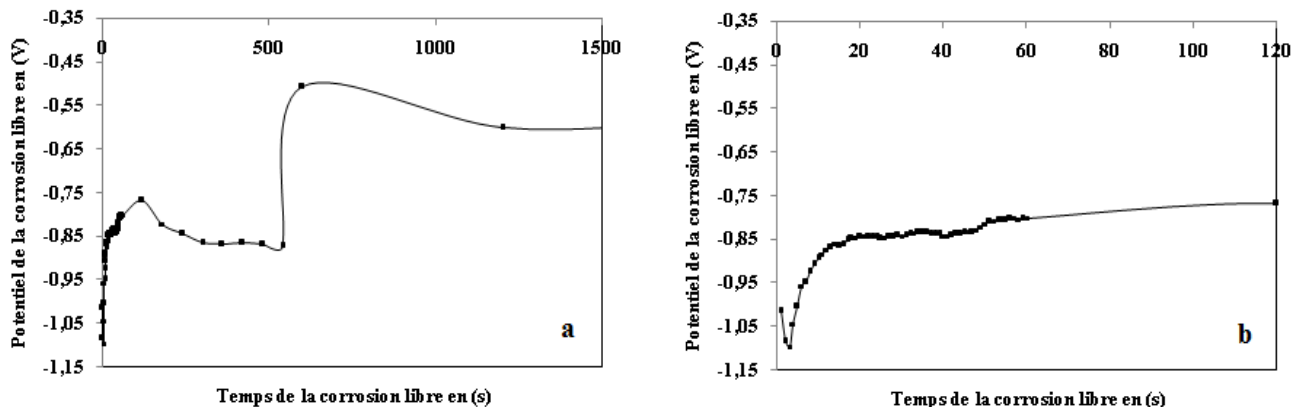


Figure IV.15: Potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 2kN après 24 heures de corrosion dans la solution de 0.3 % NaCl

IV.3.1.2 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 4kN :

La **Fig. (IV.16)** représente l'évolution du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'échantillon déformé sous une charge de 4 kN en fonction du temps, à l'immersion l'OCP est égal à -0,684 V, celui-ci augmente jusqu'à atteindre -0,55 V après une durée de 480 secondes (**Fig. (V.16.b)**). Cette augmentation est due à la formation d'une couche d'oxyde de nouveau dans la solution de NaCl, par la suite on assiste à une diminution du potentiel de corrosion libre jusqu'à une valeur -0,65 V pour une durée de 2000 secondes, cette diminution est due à la destruction du film formé précédemment et au fait que le phénomène de passivation commence à s'installer. Nous pensons que cette valeur de la passivation est proche de cette valeur.

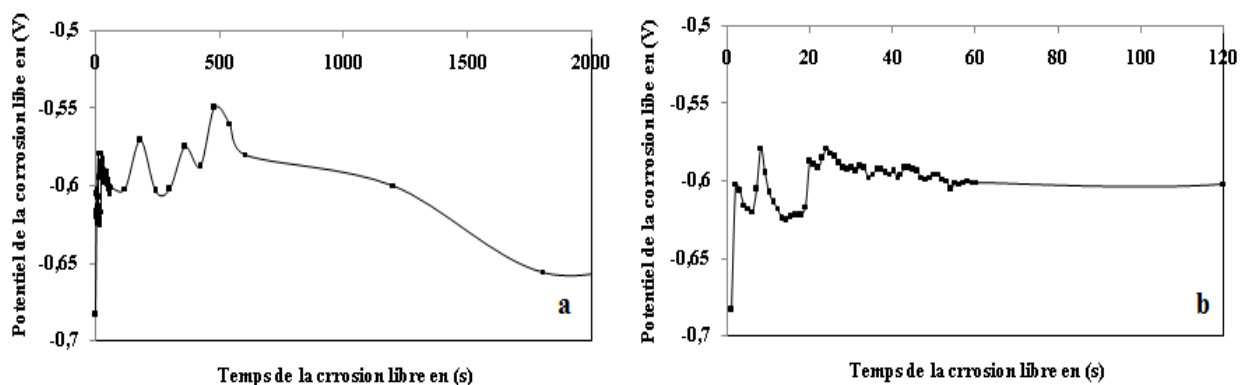


Figure IV.16 : potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 4kN après 24 heures de corrosion dans la solution de 0.3 % NaCl

IV.3.1.3 Potentiel libre de la corrosion de l'échantillon déformé avec 6kN :

La **Fig. (IV.17)** représente l'évolution du potentiel de corrosion libre (OCP) de l'échantillon déformé sous une charge de 6 kN en fonction du temps, à l'immersion l'OCP est égal à -0,71 V, celui-ci augmente jusqu'à atteindre -0,69 V après une durée de 60 secondes (**Fig. (IV.17.b)**). Cette augmentation est due à la formation d'une couche d'oxyde de nouveau dans la solution de NaCl, par la suite on assiste à une diminution du potentiel de corrosion libre jusqu'à une valeur -0,938 V pour une durée de 480 secondes, cette diminution est due à la destruction du film formé précédemment, par la suite une augmentation est observée. Cette dernière est due à l'installation du phénomène de passivation.

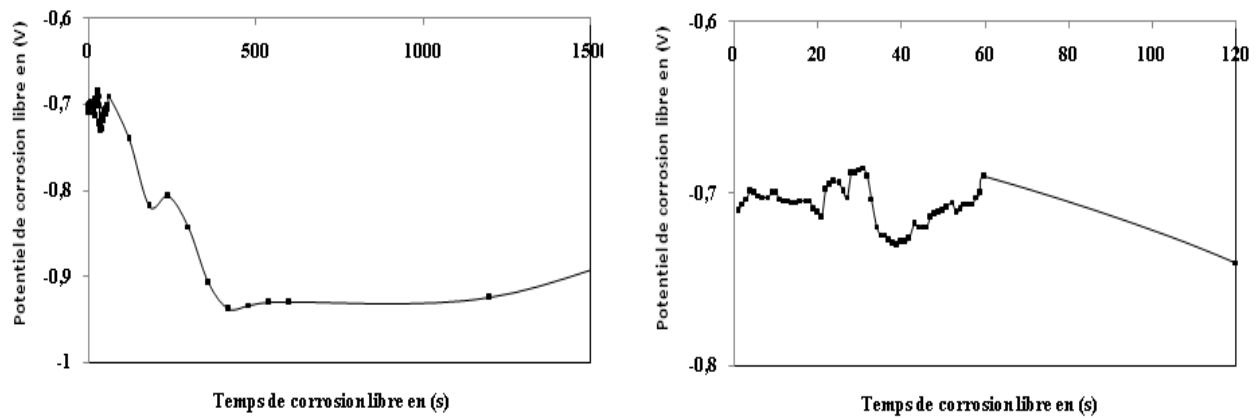


Figure IV.17 : potentiel de corrosion libre de l'échantillon de l'aluminium comprimé avec 6KN après 24 heures de corrosion

IV.3.1.5. Comparaison de potentiel libre de l'aluminium 1370 non comprimé et comprimés avec 2/4/6KN :

La **Fig. (IV.18)** représentant le potentiel des quatre échantillons étudiés durant les 60 premières seconds. Cette figure montre que les échantillons non déformé et les échantillons déformés sous une charge de 4 et 6 kN ont des potentiels de corrosion libres proches, par contre l'OCP de l'échantillon déformé sous une charge de 2 kN est différent. Le potentiel à l'immersion déformé sous une charge de 2 kN est le plus bas. Après une durée de 1500 second et plus, c'est l'OCP de l'échantillon déformé sous une charge de 6 kN qui est le plus bas. Cette situation peut être expliquée par le fait à l'immersion, la composition en phases de la surface de l'échantillon déformé, sous une charge de 2 kN est différente des trois autres surfaces.

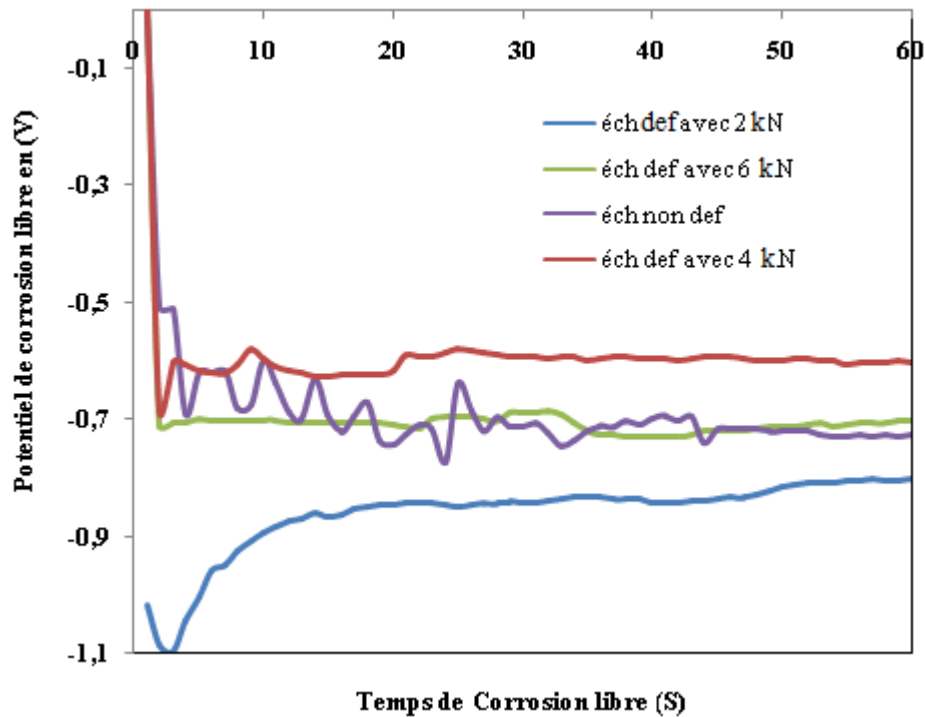


Figure IV.18 : Comparaison de potentiel libre de l'aluminium 1370 non comprimé et comprimés avec 2/4/6kN :

IV.3.2 Courbe de polarisation :

Les fig. (IV.19-22) représentent les courbes d'évolution du logarithme décimale de la densité de courant en fonction du balayage du potentiel de -1,5 V à 1,5 V, ces figures montrent que pour les quatre échantillons on observe la branche cathodique et la branche anodique, ces branches sont présentes dans le même domaine de potentiel du balayage, et elles ont presque la même forme. Le passage de la branche cathodique vers la branche anodique pour l'échantillon non déformé et celui déformé sous une charge de 2kN, se fait rapidement par contre pour les deux autres échantillons elle ne se fait pas rapidement.

Les potentiels de corrosion (E_{corr}) des quatre échantillons, non déformé, déformé sous une charge 2kN, déformé sous une charge 4kN, déformé sous une charge 6kN sont -0.5 V, -0.8, -0.9, -0.8 respectivement la résistance de polarisation pour ces échantillons sont respectivement 31.813 k Ω , 1,66 k Ω , 1,66 k Ω , 34,7 k Ω . Les valeurs du potentiel de corrosion semblent logiques car l'apport de l'énergie par une déformation augmente la sensibilité à la corrosion d'où le potentiel de corrosion diminue. Par contre les valeurs de résistances de polarisations obtenues n'ont pas de sens physiques.

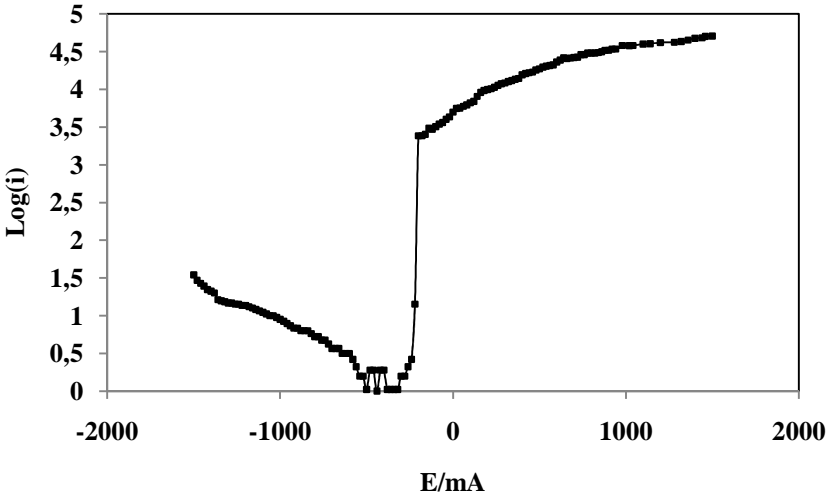


Figure IV.19: Courbe de polarisation pour l'échantillon non déformé.

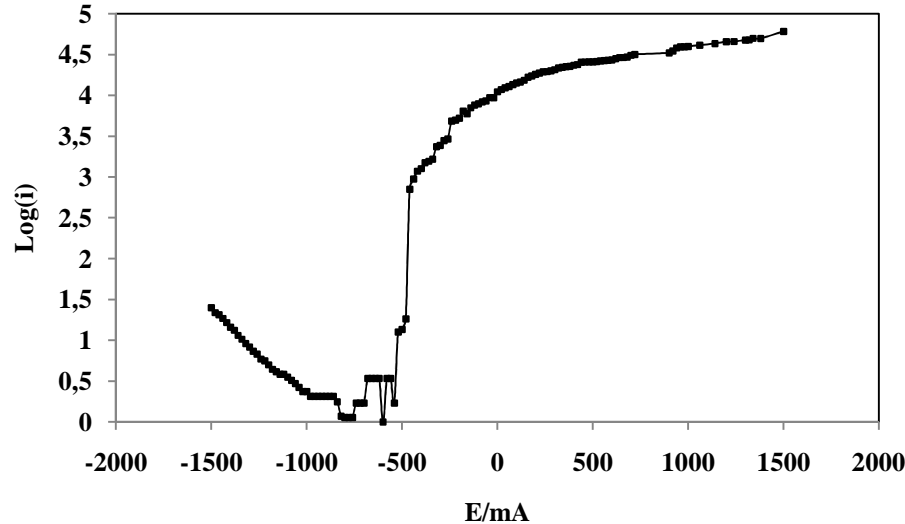


Figure IV.20 : Courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 2 kN

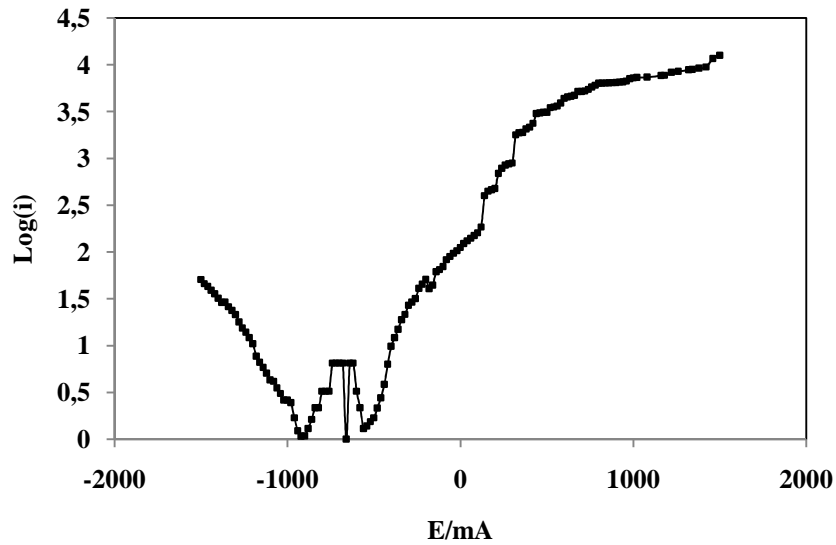


Figure IV.21 : Courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 4kN

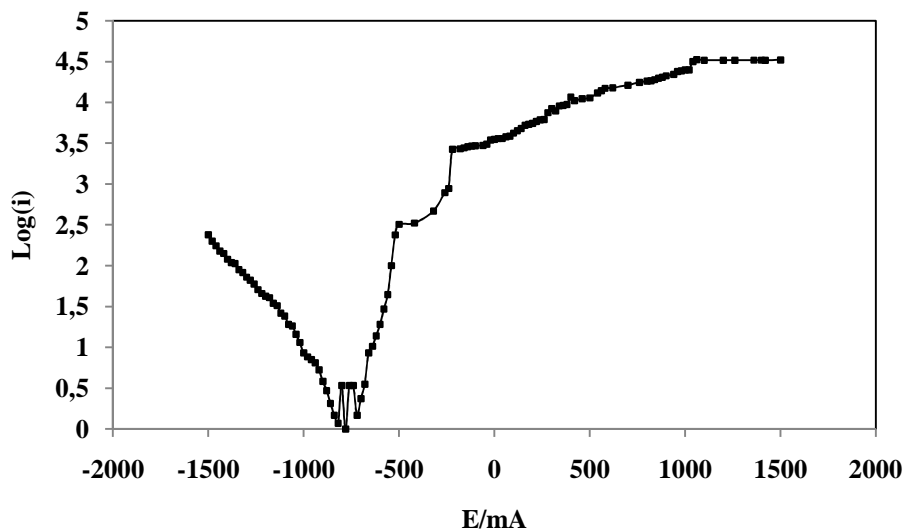


Figure IV.22 : Courbe de polarisation pour l'échantillon déformé avec 6 kN

IV.4 Essai de dureté :

On a fait trois (03) tests de dureté pour chaque type d'échantillon, parce que les échantillons sont de faible dimension. Les résultats sont présentés sur le tableau suivant :

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1 : Tableau représentant les la micro-dureté Vickers :

N° du test	Essai 01	Essai 2	Essai 3	moyenne
Echdef avec 2 kN	37	36	34	35.66
Echdef avec 4 kN	38	45	42	41.66
Echdef avec 6 kN	44	43	41	42.66
Ech non def	34	34	31	33

Les résultats obtenus montrent une augmentation de la micro-dureté Vickers avec l'augmentation de la charge de compression uni-axiale. Ce résultat est logique puisque la déformation par compression à froid favorise l'écrouissage.

CONCLUSION :

L'objectif principal de ce travail concernait une étude d'effet de compression sur la corrosion de l'aluminium AA1370 du comportement de la corrosion à l'aide de mesures électrochimiques (courbes de variation de potentiel et du de courant) et cela au cours d'immersion dans la solution de 0.3% de NaCl

La revue bibliographique confirme aussi l'intérêt de faire appel aux 'analyses microscopique (microscope optique et microscope électronique à balayage) pour l'étude de la corrosion du matériau avant et après l'immersion dans une solution de 0.3% de Na Cl, ainsi à la technique expérimentales récente, le bruit électrochimique.

Si l'on reprend le cheminement suivi au cours de ces travaux de ce travail, les principales conclusions sont les suivantes :

- 1.** Nous avons observé la microstructure de notre aluminium AA1370 (les grains et joint de grain).
- 2.** Apparitions de bande de glissement cette dernière est due de compression uni-axiale appliquée à cet échantillon quelque soit la force 2/4/et 6kN
- 3.** Apparitions d'une corrosion localisé sur l'aluminium AA1370 non déformé et déformés avec différentes force 2/4/et 6kN après immersion dans la solution de 0.3% de NaCl d'une de duré 24H et sept jours.
- 4.** On tire que l'état de l'échantillon influe sur le potentiel de corrosion libre au première minute mais par la suite il y'a un phénomène de passivation.
- 5.** les courbes d'évolution du logarithme décimale de la densité de courant en fonction du balayage du potentiel de -1,5 V à 1,5 V, les quatre échantillons ont observe la branche cathodique et la branche anodique.
- 6.** Augmentation de la micro-dureté Vickers avec l'augmentation de la charge de compression uni-axiale. Ce résultat est logique puisque la déformation par compression à froid favorise l'écrouissage.

Références bibliographiques

- [1] : Loïc Lacroix, «Mécanisme de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie à force atomique (AFM) couplée au mode kelvin (KFM) et des alliages modèles », l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Le 3 octobre 2008.
- [2] : Site web : www.aluminium.fr, vue le 16/09/2018
- [3] : Jean BARRALIS – Gérard MAEDER, « Précis de métallurgie » Elaboration, structure, propriétés et normalisation. Edition Nathan 1994.
- [4] : C.VARGEL, « Corrosion de l'aluminium », Ed. Dunod, Paris 1999.
- [5]: ZAZI NACER, Thèse doctorat «Influence du vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium », Tizi-Ouzou, 2011.
- [6] : : C. VARGEL, « Comportement de l'aluminium et de ses alliages » ; Paris, Dunod ; 1979.
- [7] :Michel Comlobié et coll « matériaux métallique », 2^{ème} édition.
- [8] : M.Redjaimia thèse doctorat université de Biskra « les alliages de l'aluminium ».1998.
- [9] :Technique de l'ingénieur :M650,M651 ,M645
- [10] : J.-P. Baillon & J. M. Dorlor : « Des Matériaux ».
- [11] : « caractéristique de l'aluminium structural»
- [12]: Laurent Cottignies, Bernard Loreau « Les progrès dans les alliages d'aluminium à usages électrique»
- [13] : Dieter Landolt, « corrosion et chimie de surfaces des métaux », Lausanne : presses Polytechniques et Université Romandes, 1997.
- [14] : F.MIOMANDE, S.SADKI, P.AUDEBERT.« Electrochimie des concepts aux applications ». DUNOD, Paris 2005.
- [15] : Brahim Benaissa « la corrosion des structure métallique en mer »
- [16] :John Christopher SCULLY « corrosion protection, principes fondamentaux »;Masson, Paris, 1995.

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

[18] : Yakoubi Myliada mémoire de magister « Effet des petites déformations par compression Sur le comportement à la corrosion de l'alliage d'aluminium de fonderie Al 4%Cu »2005.

[19] : Max Reboul « corrosion des alliages d'aluminium technique de l'ingénieur cor 325.

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

[21] : D.Desjardiin et R.Oltra « corrosion sous contrainte phénoménologie et mécanisme » France, les éditions de physique 1992