



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Modélisation numérique

Thème :

---

---

## Effet du double traitement sur le comportement à la corrosion de l'alliage 6060

---

---

Proposé et dirigé par :

Mr : DEBIH Ali

Présenté :

NAOUI Hadjer

*Année Universitaire : 2015 / 2016*

N° d'ordre : GM/...../2016

## *Remerciement*

*Avec une profonde gratitude, Je remercie le professeur encadré mon mémoire qui était le lien et le fondement de la réussite de ce travail Monsieur **DEBIH Ali**, Maître de Conférences à l'Université Med Boudiaf de M' Sîla Département de Génie Mécanique.*

*Il est avec plaisir que je remercie responsable de laboratoire universitaire à faculté de technologie M'sîla Monsieur **BOUCHAREB Khaled**, Qui m'a aidé dans toute la partie pratique et m'a conseillé en vertu de son expérience.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à mes parents et mes frères ceux qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs aides précieuses tout au long de mes recherches.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à l'université Med Boudiaf de M' Sîla En particulier, le Département de génie mécanique Récepteurs afin de compléter mes études.*

*Je souhaite exprimer ma reconnaissance et mes remerciements aux personnes qui m'ont soutenu à la réalisation de ce travail, les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter ce travail.*

*Enfin merci, à tous mes camarades de promotion et amis.*





## *Dédicace*

*Pour le succès de m'a appris la patience*

*Mon père **Tahar.***

*Et à ceux qui sont en compétition pour sortir des mots  
exprimant le même plus à l'intérieur  
Qui m'a enseigné et a souffert des difficultés pour arriver à ce  
que je suis  
Lorsque soucis infectés nager dans la mer d'affection pour  
soulager les souffrances*

*Maman **Yamna.***

*Pour ceux qui étaient ce tour-moi le chemin Et Pour répondre  
à mes demandes et toujours debout à côté de moi et de vivre  
dans béate  
Je vous aime aimer si elle est adoptée sur terre stérile Pour  
qui a éclaté fontaines d'amour*

*Mes frères **mohamed, Amar (yassine).***

*En plus pratique pour Consacrer mon grand-père et grande  
mère et toute la famille **NAOUI** et la famille **TAOUATI***



*En plus de dédier ce succès à arrêter à côté de moi m'a donné  
tout au long de mon travail*

*Pour ceux qui l'ont manqué face à des difficultés*

*Basse et resta il ne sature d'affection*

*Consacrer tout mon travail le plus cher, sans laquelle il a  
atteint cet arrêt de niveau à côté de moi défié les gens le plus  
proche, il a pour moi*

*Mon grand-père **Amar.***



## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Etudes bibliographique</b>	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Historique.....	4
I. 2. 1. Les découvertes du XIXe siècle.....	4
I. 2. 2. Fabrication de l'aluminium.....	8
I.3.Alliage d'aluminium.....	11
I. 4. Elaboration des alliages d'aluminium.....	11
I. 4. 1. Bauxite.....	11
I. 4. 2. L'alumine.....	12
I. 4. 3. L'aluminium.....	13
I. 4. 4. Le procédé Bayer.....	13
I. 5. Désignation des alliages d'aluminium.....	16
I. 5. 1. Les alliages de corroyage.....	16
I. 5. 2. Les alliages de moulage.....	16
I.5. 3. Désignation des alliages corroyés.....	17
I. 5. 4. Désignation des alliages de moulage.....	19
I.7.Les alliages d'Aluminium de la série 6000 (Al-Mg-Si).....	23
I.8.Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6XXX.....	23
I. 9. Spécificité de l'alliage 6061.....	36
I. 9. 1. Principales caractéristiques de l'aluminium.....	25
I. 9. 2. Caractéristiques de l'alliage d'aluminium 6061.....	28
I. 10. Conclusion.....	29

## Chapitre II : corrosion d'alliage d'aluminium

II.1.Introduction.....	30
II.2.les formes de corrosion des alliages d'aluminium.....	32
II.2.1.Corrosion uniforme.....	32
II.2.2.La corrosion par piqûres.....	33
II.2.3.La corrosion galvanique.....	35
II.2.4.La corrosion caverneuse.....	37
II.2.5.Corrosion érosion.....	38
II.2.6.La corrosion filiforme.....	38
II.2.7.La corrosion intergranulaire.....	39
II.2.8.Corrosion feuilletante (exfoliante).....	40
II.2.9.La corrosion sous contrainte.....	41
II.3.Les facteurs influant sur la corrosion des alliages d'aluminium.....	42
II.3.1. Les ions chlorures.....	42
II.3.2. Le PH.....	43
II.3.3. Les éléments d'alliage.....	44
II.3.4. Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	44
II.3.5. Température.....	46
II.4.Prevention de la corrosion des alliages à base d'aluminium.....	47
II.5.Les inhibiteurs de corrosion des alliages d'aluminium.....	47
II.6.Protection des alliages d'aluminium.....	49
II.6.1.L'anodisation.....	49
II.6.2.Conversion chimique.....	51
II.6.3.Les revêtements organiques.....	51
II.6.4.Les revêtements inorganiques.....	51
II.7. conclusion.....	52

## Chapitre III : Partie expérimentale

III.1.Introduction.....	53
III.2.Alliages étudiés.....	53
III.3. Techniques Expérimentales.....	53
III.3.1.Préparation des échantillons.....	54
III.3.2. mesure du PH.....	55
III.4. Démarche Expérimentale.....	56
III.5.Résultats.....	57
III.5.1.Résultats du PH.....	57
III.5.2. perte en poids et dureté.....	58
III.5.3. analyse métallographique.....	62
III.4.Interprétation.....	64
III.5.Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67
Référence bibliographique.....	68



## Liste de tableau

Tableau I.1. Production mondiale d'aluminium. (Source : Larousse de l'industrie).....	6
Tableau I.2. Familles d'alliages d'aluminium .....	16
Tableau I.3. famille d'alliages d'aluminium corroyés .....	17
Tableau I.4. Indique les groupes de l'alliage d'aluminium.....	18
Tableau I.5. indique Désignation des états métallurgiques des produits corroyés .....	19
Tableau I.6. famille d'alliages d'aluminium moulé.....	20
Tableau I.7. Indique les renseignements complémentaires .....	21
Tbleau.I.8. composition des alliages 6060-6082-6101.....	24
Tableau.I.9. caractéristiques physique des alliages 6060-6082.....	25
Tableau II.10. Série galvanique des métaux exposés à l'eau [16].....	37
Tableau. III.11. Composition chimique de l'alliage étudié.....	52
Tableau. III.12. Mesure du PH.....	56

## Liste de figure

Figure.I.1. Friedrich Wöhler (1800-1882).....	4
Figure.I.2. Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881).....	5
Figure.I.3. Mines de bauxite de Bédarieux dans l'Hérault, 1926.(Source : Larousse de l'industrie).....	7
Figure .I.4. Coulée de l'aluminium fondu, 1924.(Source : Larousse de l'industrie).....	8
Figure .I.5. Machine à mouler l'aluminium, vers 1925.(Source : Larousse de l'industrie).....	9
Figure .I.6 .Usine de fonte de l'aluminium, 1913.(Source : Larousse de l'industrie).....	10
Figure .I.7 .les roche alumineuses .....	12
Figure .I.8.Les étapes de l'élaboration de l'aluminium extraction de l'alumine .....	13
Figure.I.9. Karl Joseph Bayer en 1888.....	14
Figure .I.10. Principaux stades et flux dans la fabrication de produits en aluminium .....	15
Figure.II.11.Couches du film d'oxyde .....	31
Figure.II.12. Corrosion uniforme.....	33
Figure II.13.Corrosion localisée dans un alliage d'Al-Mg .....	34
Figure II.14.Propagation autocatalytique d'une piqûre .....	35
Figure II.15.Micrographie optique de l'interface d'un couple galvanique .....	36
Figure II.16.Zone d'amorçage de la corrosion caverneuse .....	38
Figure II.17.corrosion érosion .....	38
Figure II.18.corrosion filiforme .....	39
Figure II.19.Corrosion intergranulaire de l'alliage 5083.....	39
Figure .II.20.Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium sensibles .....	40
Figure II.21.Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium non sensibles .....	40

Figure. II.22. Photomicrographie MEB d'un alliage 2024 T351 développant de la corrosion feuilletante .....	41
Figure .II.23.Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage Al-Mg .....	42
Figure .II.24.Diagramme E/pH de l'aluminium pur dans l'eau à T=25°C .....	43
Figure II.25. Influence des éléments d'addition sur la dissolution des alliages d'aluminium .....	44
Figure.II.26. Moyens de prévention de la corrosion .....	47
Figure .II.27. Organigramme de classification des inhibiteurs de corrosion .....	48
Figure .II.28.Anodisation de l'aluminium .....	49
Figure.III.29. Machine polisseuse.....	53
Figure .III.30. Cycle de traitement de durcissement appliqué.....	54
Figure .III.31. PH-mètre : mesure de l'acidité.....	55
Figure .III.32. Pénétrateur et l'empreinte d'indentation.....	55
Figure .III.33. Balance de mesure de perte en poids.....	56
Figure .III.34. Valeur du PH Mesure pratiquement.....	56
Figure .III.35. Effet de l'acidité sur l'aspect de l'échantillon.....	57
Figure. III.36. Variation perte en poids en fonction du PH.....	58
Figure. III.37. Variation de la dureté en fonction du PH.....	59
Figure .III.37. Variation de la perte en poids en fonction du PH sous l'action du temps. .....	60
Figure. III.38. Variation de la dureté en fonction du PH sous l'action du temps.....	61
Figure.III.39. Microscope optique.....	61
Figure. III.40. structure alliage 6060 (a) état recuit, (b) état traité.....	62

Figure. III.41. (a, b,c,d,e) changement d'aspect en fonction du PH (a référence traite).....	63
Figure. III.42. (A,B,C,D,E) changement d'aspect en fonction du PH (A référence non traite).....	63
Figure .III.43. Changement structural de l'aluminium en deux états traite et non traite en fonction du PH pour 15 jours d'immersion.....	63

# Introduction générale

---

## Introduction Générale

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique. Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherches sont en cours pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères...etc, mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

L'aluminium à l'état pur présente de faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments d'addition et l'application de traitements thermiques provoquent la précipitation de certaines phases dans la matrice d'aluminium. L'alliage est alors généralement plus résistant mais aussi moins ductile que l'aluminium pur. Il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium corroyés qui diffèrent par leurs éléments d'addition principaux; Al-Cu (série 2000), Al-Mn (série 3000), Al-Si (série 4000), Al-Mg (série 5000), Al-Mg-Si (série 6000) et les alliages Al-Mg- Zn (série 7000). La faible masse volumique des alliages d'aluminium associée à leurs bonnes caractéristiques mécaniques intéresse l'industrie du transport (ferroviaire, navale, routière, aéronautique). Ainsi actuellement, les alliages Al-Mg-Si filés (série 6000) sont fortement utilisés pour réduire le poids des véhicules et par conséquent faire des économies d'énergie.

La corrosion est un phénomène de dégradation des matériaux (métalliques en général) par l'environnement. Il s'agit donc d'un phénomène qui concerne la plupart des secteurs industriels notamment l'industrie aéronautique, marine, le secteur nucléaire, l'automobile et les industries chimique et pétrochimique. Les enjeux économiques sont donc considérables.

A cet effet, nous sommes allés à étudier et à parvenir à une corrosion problématique de solution a été mon travail repose sur trois chapitres, dont la répartition est la suivante :

**Chapitre I :** ce chapitre aborde le coté matériau concernant l'évolution de l'aluminium et les zones d'utilisation et ainsi que les caractéristiques l'alliage d'aluminium série 6000 type 6060.

**Chapitre II :** il se concentre sur la corrosion d'alliage d'aluminium et les forme de corrosion, Les facteurs influant sur la corrosion, Prévention, .Les inhibiteurs Protection des alliages d'aluminium, Comment protéger l'aluminium.

## Introduction générale

---

**Chapitre III :** cette partie expérimentale L'importance de leur rôle dans le traitement et d'aluminium pour réduire la corrosion et de voir la différence de poids et la dureté entre les échantillons traité et non traité.





## I. 1. Introduction

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, en quantité. La production annuelle mondiale de ce métal représente 25 millions de tonnes. Son abondance dans la croûte terrestre vient au troisième rang, derrière l'oxygène et le silicium (éléments non métalliques) et au premier rang des métaux. Le principal minerai d'où est extrait l'aluminium est la bauxite.

L'aluminium élément chimique, appartient au groupe III A (colonne 13) du tableau périodique. Sa position de premier métal non ferreux repose bien évidemment sur ses propriétés particulières.

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. Les principaux atouts de l'aluminium sont [1]:

- ❖ sa légèreté (le plus léger des matériaux usuels :  $\rho_{Al}=2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ ),
- ❖ sa conductivité thermique (environ 60% de celle du cuivre)  $237 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,
- ❖ sa conductivité électrique  $0,0265 \mu\Omega \cdot \text{m}$  à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ❖ sa facilité de mise en œuvre,
- ❖ son recyclage (entre 65% et 85% de l'aluminium est recyclé),
- ❖ son aptitude aux traitements de surface,
- ❖ sa résistance à la corrosion.

L'aluminium est l'un des principaux composants des alliages communs utilisés dans différentes applications. Lorsqu'il est allié avec des petites quantités d'autres matériaux, il devient essentiel et valable en raison de sa haute résistance spécifique et sa faible densité. Il est classé en tête de la liste des métaux les plus utilisés dans l'industrie d'aujourd'hui. Sa légèreté par rapport à l'acier est l'un de ses principaux atouts. Sa solidité et sa résistance mécanique, bien que légèrement inférieures à celle de l'acier, permettent de l'utiliser dans de nombreuses applications à savoir : l'aérospatial, l'aéronautique, l'automobile, les câbles électriques, l'agroalimentaire, les réacteurs nucléaires et le bâtiment.

## I. 2. Historique [2]

### I. 2. 1. Les découvertes du XIXe siècle

A l'état naturel, l'aluminium pur n'existe pas. Très abondant dans la nature, ce métal se présente sous forme de silicates, argiles, kaolin, feldspaths, micas, de fluorures, cryolithe, d'oxydes, émeri, corindon, de sulfates, alunite, de chlorures et surtout d'hydroxydes. Après sa découverte en 1808 par le physicien anglais Humphry Davy (1778\_1829), l'aluminium fut isolé pour la première fois par Friedrich Wöhler en 1827, par action du potassium sur le chlorure d'aluminium.

Le chimiste allemand obtint par ce procédé une poudre noirâtre ne présentant aucun intérêt industriel. Après des semaines de labeur, Whöler obtint le premier kilogramme d'aluminium pur, une bizarrerie comme le canard à trois pattes ou la femme à barbe. On put analyser les propriétés physiques et chimiques du nouveau corps.

Chimiquement pur, ce métal, possède une densité inhabituelle : 2,7. Trois fois moindre que le fer ! Plus tard, on isole le silicium et le magnésium, encore plus légers, deux produits qui n'existent pas non plus à l'état pur dans la nature.



*Figure.I.1. Friedrich Wöhler (1800-1882).*

Disciple de Marcelin Berthelot, le chimiste français Henri Saint-Claire Deville, dans son laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure à Paris, prépara en 1854 de l'aluminium en quantité, susceptible d'être utilisable industriellement. Son procédé consistait à partir du chlorure double d'aluminium qu'il attaquait par du sodium. Jusqu'en 1886, cette méthode de laboratoire fut sa seule utilisée pour produire de l'aluminium



*Figure.I.2. Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881).*

Selon le procédé de Saint-Claire Deville, une exploitation industrielle commence en 1856 dans une usine située à Paris, quai de Javel, puis à Nanterre. On y produit chaque année quelques kilos d'aluminium, 500 kg en 1860, 742 kg en 1861. Quand en 1860 l'ingénieur Berthier ouvre l'usine de Salindres (Gard), berceau de la Compagnie d'Alès, Froges et Camargue, la production augmente sensiblement, pour atteindre 4 150 kg en 1888. Ces trois usines en France sont pendant trente ans les seules à produire, en très petites quantités, de l'aluminium. Le prix du nouveau métal ultra léger est si élevé qu'il n'est utilisé qu'en orfèvrerie : 200 francs le kg en 1860, 150 francs en 1870.

Un lingot du métal précieux est montré à l'Exposition universelle de Londres en 1853 et à celle de Paris en 1855.

La bauxite d'où on tire l'aluminium doit son nom à la localité des Baux de Provence, près d'Arles où le minerai d'hydroxyde d'alumine fut découvert en 1821 par Berthier. Cet hydrate d'alumine impur ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) contient de l'alumine, de la silice, de l'oxyde de fer et de l'acide titanique.

Le 23 avril 1886, le jeune chimiste français Paul Louis Toussaint Héroult (1863-1914) dépose un brevet permettant d'obtenir de l'aluminium par un nouveau procédé, l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe, en même temps que l'Américain Charles Martin Hall (1863-1914) utilisant le même procédé. En deux ans, dans toute l'Europe, aux Etats-Unis et au Canada des brevets sur les procédés d'obtention de l'aluminium sont déposés (Figure. I.3).

En 1887, Carl-Joseph Bayer fait breveter un procédé de transformation du minerai de bauxite et alumine. A partir de 1890, toute l'Europe produit le métal précieux, la France dans différentes usines dans l'Isère (Société Electrométallurgique Française), en Suisse aux usines de Martigny, Chippis et Neuhausen, aux Etats-Unis, dans les usines de Badin,

Tennessee, Alcoa, Niagara-Falls et Massena, en Allemagne dans les usines de Lauta (Lautawerke) et Grevenbroich (Erftwerk), en Angleterre à Dollgarog en Ecosse à Kinlochleven, en Italie dans les usines de Mori, Borgofranco et Porto-Marghera. A partir de 1890, la production mondiale fait un bond en avant spectaculaire et le prix au kilo s'effondre (Tableau .I.1).

*Tableau I.1. Production mondiale d'aluminium. (Source : Larousse de l'industrie).*

<b>Production mondiale d'aluminium</b>	<b>En tonne</b>	<b>Prix du kg</b>
1880	12	150 F
1890	165	5 F
1900	7 800	4 F
1910	43 800	2,85 F
1920	158 000	2,6 F
1930	280 000	2 F anciens

En 1930, moment où la construction d'avions passe au tout métal, les pays qui produisent l'aluminium sont, par ordre d'importance les Etats-Unis (90 000 tonnes), le Canada (35 000 tonnes), la France (32 000 tonnes), l'Allemagne (30 000 tonnes), la Norvège (25 000 tonnes) et la Suisse (20 000 tonnes). La France où cette industrie est née n'occupe plus que la troisième place.



*Figure.I.3. Mines de bauxite de Bédarieux dans l'Hérault, 1926.  
(Source : Larousse de l'industrie).*

La production de l'aluminium en France s'est développée entre 1890 et 1930 dans les départements montagneux, pourvus de puissantes installations hydrauliques par suite de l'énergie nécessaire à sa fabrication.

Dans les années vingt, la Savoie produit annuellement 12 000 tonnes d'aluminium, devant les Hautes-Alpes, 5 000 tonnes, la Haute-Savoie, 3 000 tonnes et les Hautes-Pyrénées, 2 200 tonnes. L'Ariège (Auzat) et l'Isère (Frogès) berceaux de cette industrie viennent ensuite.

Commencée en Savoie en 1891, dans l'usine de Calypso, la fabrication du métal précieux s'est développée le long de la vallée de l'Arc, dans les usines de La Praz (Péchiney, 1892), Prémont, La Saussaz, Saint-Jean-de-Maurienne (Les Plans), puis à Chedde (Haute-Savoie). Ensuite sont ouvertes des usines dans le Dauphiné, à l'Argentière (Hautes-Alpes), Frogès, Rioupéroux, les Clavaux (Isère), Beyrede (Hautes-Pyrénées) et Auzat (usine Péchiney, 1907) dans l'Ariège, puis Salin-de-Giraud dans les Bouches-du-Rhône (usine Péchiney).

### I. 2. 2. Fabrication de l'aluminium

La seule méthode utilisée entre 1900 et 1930, c'est-à-dire lors de l'essor de la construction aéronautique, nécessite deux phases, qui sont réparties entre les usines : la transformation de la bauxite et alumine pure, d'une part, réalisée dans des usines situées près des mines d'extraction de la bauxite, ravitaillées par des wagonnets, et ensuite la phase d'électrolyse de cette alumine dissoute dans un bain de cryolithe fondue. Cette seconde opération s'effectue dans des usines placées près des sources d'énergie. Entre les deux types d'usines, le minerai doit être transporté par rail. Cette contrainte fait que les usines ne peuvent pas être implantées partout (Figure I.4).

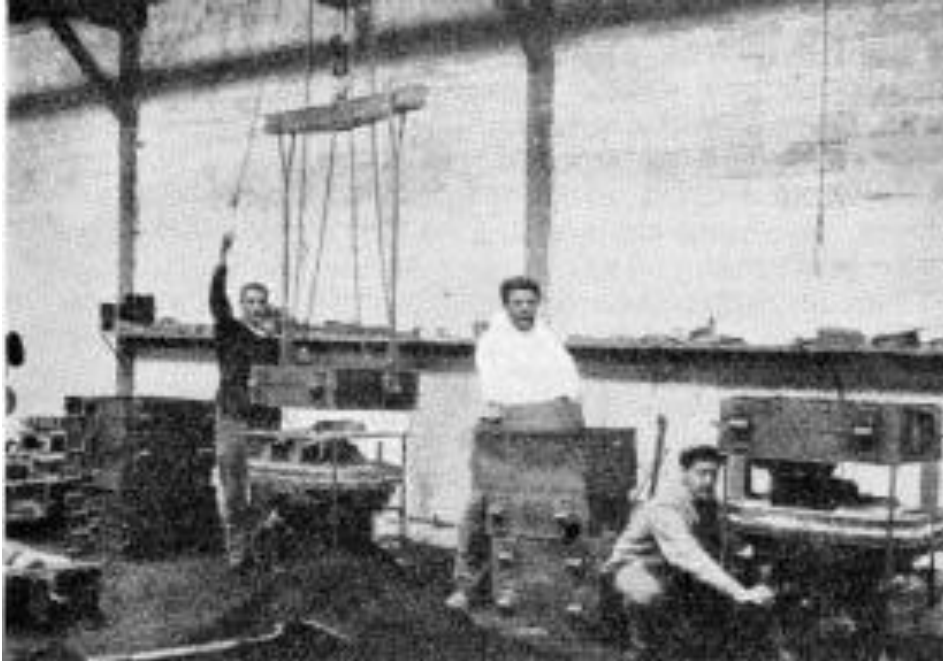


*Figure .I.4. Coulée de l'aluminium fondu, 1924.  
(Source : Larousse de l'industrie).*

La méthode de Saint-Claire Deville est abandonnée peu à peu entre 1900 et 1930 au profit de la méthode Bayer, plus simple, moins dangereuse et surtout moins coûteuse. Dans les deux procédés, l'alumine est mise en solution aqueuse, sous forme d'aluminate de sodium, tandis que les principales impuretés demeurent insolubles et sont séparées par filtration : le fer est extrait sous forme d'oxyde, la silice sous forme de silicate double d'aluminium et de sodium.

Cette dernière, si elle est trop présente dans le minerai, le déprécie fortement. Après son extraction, il faut donc « préparer » l'aluminium. Le danger vient de la manipulation de produits dangereux, toxiques, très combustibles (le sodium et l'aluminium sont très combustibles), dans des fours électriques géants, portés à des températures élevées. Dans le

procédé Deville, la bauxite est attaquée par le carbonate de sodium en four à réverbère, à la température du rouge (350°C), et le résultat de l'attaque est mis en solution dans l'eau, puis filtré. La solution d'aluminate de sodium est enfin décomposée par un bain d'acide carbonique provenant de la décomposition du carbonate de chaux ; l'alumine filtrée est calcinée.



*Figure .1.5. Machine à mouler l'aluminium, vers 1925.  
(Source : Larousse de l'industrie).*

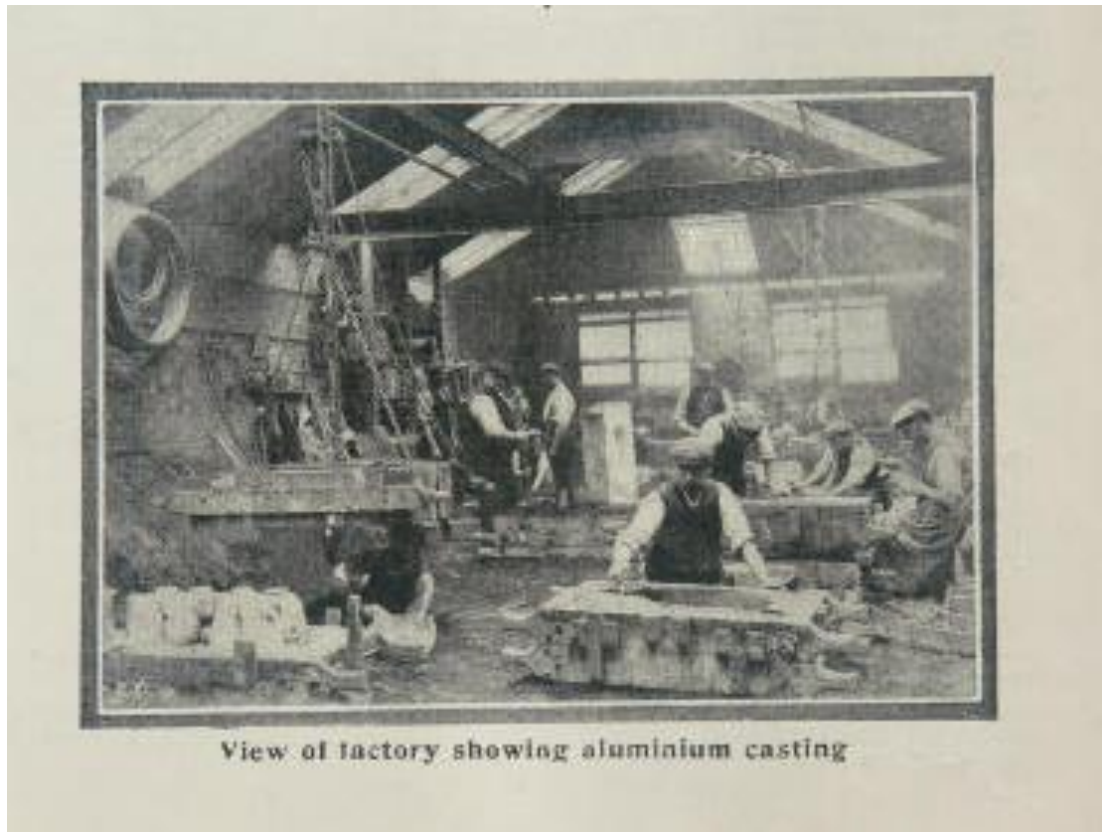
Dans le procédé Bayer, la bauxite est attaquée en four autoclave à 160°C par une solution de soude caustique ; le résultat est filtré et l'alumine est précipitée par addition du même corps provenant d'une opération précédente.

Elle est séparée par filtration et calcinée à 1000°C dans un four tournant. L'électrolyse n'est pas une opération moins dangereuse.

L'alumine est mise en solution dans la cryolithe fondue (fluorure double d'aluminium et de sodium). La cryolithe ne doit théoriquement intervenir dans la réaction chimique que comme solvant ; l'électrolyse ne doit pas la dégrader si l'opération est bien menée. Dans le bac électrolytique, l'alumine est décomposée en aluminium, plus dense que le bain, et en oxygène, qui se combine malheureusement avec le carbone des anodes pour donner de l'oxyde de carbone qui brûle. Dans ce bain, il se passe en réalité diverses opérations chimiques, plus ou moins contrôlées et contrôlables, mais toutes dangereuses.

Par exemple, il se dégage des gaz inflammables, autres que l'oxyde de carbone, comme le fluorure de silicium, malgré le fait que l'opération ait lieu dans une cuve non

chauffée. Le courant électrique produit sur le bain une chaleur permanente de 850°C à 900°C, suffisante pour enflammer ces gaz.



*Figure .I.6 .Usine de fonte de l'aluminium, 1913.  
(Source : Larousse de l'industrie).*

La cuve d'électrolyse est donc réalisée avec soin, à double paroi avec calorifuge, évitant les pertes de chaleur et les accidents. Ses parois sont garnies de briques de carbone ; le fond de la cuve constitue le pôle négatif (cathode) ; c'est là que se dépose l'aluminium. Peu profondes, ces cuves sont généralement de grandes dimensions, trois mètres sur deux pour 30 cm de hauteur de bain. Ouverte sur le dessus, la cuve reçoit les électrodes en carbone qui forment les anodes. L'alimentation électrique des cuves se singularise par un très fort ampérage, 10 000 ampères avant la première guerre mondiale, 20 000 ampères après. Les électrodes se corrodent rapidement et véhiculent des impuretés. On les réalise donc en carbone très pur avec si possible du coke de pétrole aggloméré au goudron, le tout cuit en fours fermés à 1200°C. Leur prix influe sur le prix de revient du métal.

En 1920, un kilogramme d'alumine fournit 500 grammes d'aluminium. Pour constituer un kilogramme d'aluminium, on use 900 grammes de cryolithe, 900 grammes d'anodes et 25 Kw/h d'électricité. La fabrication de l'aluminium est donc une opération technique lourde et coûteuse.

### **I.3. Alliage d'aluminium**

La nuance de l'alliage est déterminée selon les principaux éléments additionnés à l'aluminium. Ces éléments sont généralement le cuivre, le magnésium, le silicium, le zinc, le manganèse. A côté de ceux-là, d'autres éléments qu'on retrouve sous forme de trace vu leur limite de solubilité dans l'aluminium sont: le chrome, le cadmium, le bismuth, le titane, le fer, le zirconium, le cobalt, le lithium, l'étain et les terres rares.

Chaque nuance d'alliage impose un mode d'élaboration et de transformation spécial, parmi lesquels on distingue deux modes d'élaboration. Les alliages de moulage et les alliages de corroyage, ces derniers peuvent être subdivisés en deux catégories, les alliages à durcissement structural et sans durcissements structural.

### **I. 4. Elaboration des alliages d'aluminium**

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal [3].

Aujourd'hui, grâce au procédé Bayer, les usines d'alumine dans le monde produisent plusieurs millions de tonnes par an. On distingue une version européenne et une version américaine du procédé Bayer. La différence dans l'utilisation du procédé Bayer original s'explique par les différences de qualité de la bauxite utilisée.

#### **I. 4. 1. Bauxite**

A l'origine le terme bauxite désigne un ensemble de roches alumineuses et ferrugineuses analogues à celles qui furent découvertes aux Baux de Provence d'où le nom actuel de bauxite (ancien nom beauxite) [4] (Figure .I.7).

Selon la composition de celle-ci, on trouve des bauxites de couleurs variées.



Les roches alumineuses



extraire des roches alumineuses

*Figure .I.7 .les roche alumineuses [4].*

#### **I. 4. 2. L'alumine**

Le procédé utilisé pour obtenir l'alumine à partir de la bauxite est le procédé Bayer. Après broyage, la bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par la soude, ce qui permet d'obtenir une liqueur d'aluminate de soude avec insolubles en suspension. Cette liqueur est ensuite décantée : les oxydes de fer et de silicium forment une boue rouge, chimiquement inerte, qui est évacuée vers un site de déversement approprié, la liqueur restante est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine, qui est ensuite récupérée par filtration et calcinée [3] (Figure .I.8).

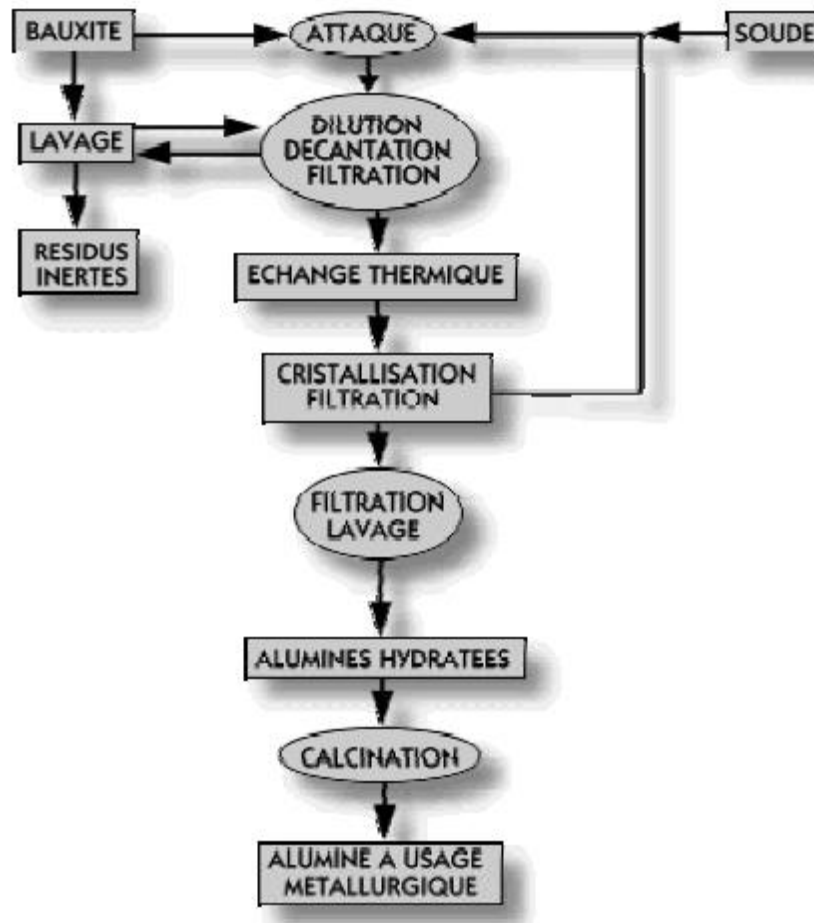


Figure .I.8. Les étapes de l'élaboration de l'aluminium extraction de l'alumine [4].

### I. 4. 3. L'aluminium

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis à la pointe par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et carbone et du gaz carbonique [3].

### I. 4. 4. Le procédé Bayer

Le docteur Karl Joseph Bayer développe en 1888 un procédé d'extraction d'alumine de la bauxite qui, encore aujourd'hui, reste le principal moyen de production industrielle de l'alumine [4].



*Figure.I.9. Karl Joseph Bayer en 1888.*

Le procédé Bayer consiste tout d'abord à attaquer la bauxite, à chaud (105 à 270°C) et sous pression (35-40 bars) par de la soude, qui dissout l'alumine sous forme d'aluminate  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . Puis la liqueur d'aluminate de sodium est séparée par dilution des résidus inertes (oxydes de fer et silico aluminates insolubles). Durant l'étape de décomposition, un refroidissement entraîne la précipitation de l'hydrargillite sur des germes de cristallisation ajoutés massivement à l'aluminate. Après séparation, l'aluminate appauvri est recyclé à l'attaque. Une partie du trihydroxyde formé sert de germe à la précipitation [4] (Figure .I.10).

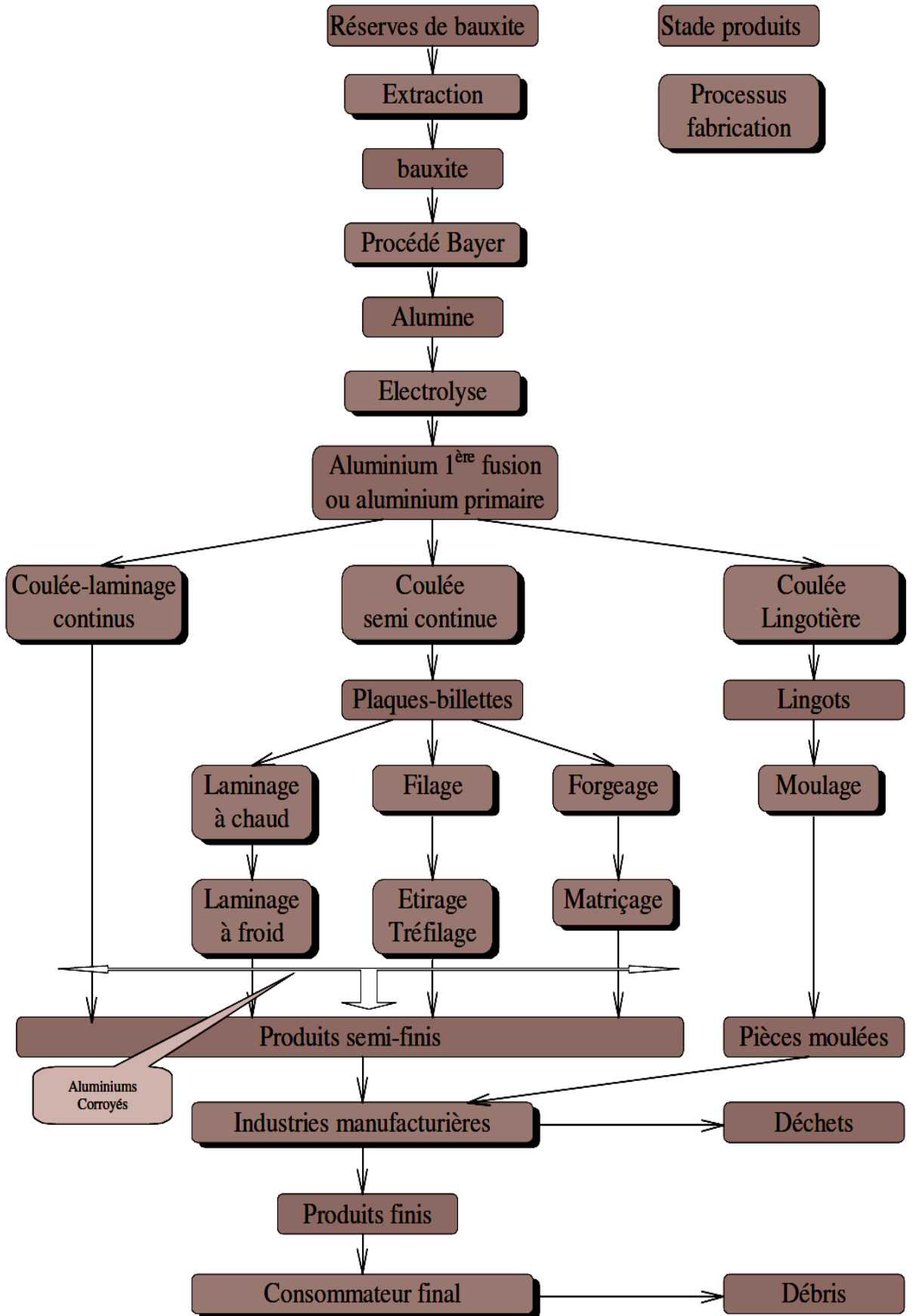


Figure .I.10. Principaux stades et flux dans la fabrication de produits en aluminium [3].

## I. 5. Désignation des alliages d'aluminium

On distingue les deux grandes familles d'alliages d'aluminium suivantes [3] (Tableau .I.2) :

Tableau .I.2.Familles d'alliages d'aluminium [5].

<i>Elément d'alliages</i>	<i>Famille des moulés</i>	<i>Famille des corroyés</i>
<b>Aucun</b>	10000	1000
<b>Cu</b>	20000	2000
<b>Mn</b>	/	3000
<b>Si</b>	40000	4000
<b>Mg</b>	50000	5000
<b>Mg+Si</b>	/	6000
<b>Zn</b>	70000	7000

❖ **Les alliages corroyés**, produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que filage, le laminage.

❖ **Les alliages de moulage**, obtenus directement par fonderie.

### I. 5. 1. Les alliages de corroyage.

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

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

- Résistance mécanique
- Ductilité
- Résistance à la propagation des fissures
- Résistance à la fatigue (efforts alternés)
- Résistance aux multiples formes de corrosion
- Conductibilité électrique [6], [7].

### I. 5. 2. Les alliages de moulage.

Obtenus par coulés dans des moules d'où sortent des produits (presque) finis. Ils ne subissent donc pas de déformation importante mais doivent présenter, selon les applications, certaines des autres propriétés ci-dessus, et aussi d'autres qualités bonnes

telles que coulabilité, retrait faible à la solidification, aucune formation de criques... une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé fondu [7], [8].

### I.5. 3. Désignation des alliages corroyés

#### ▪ Composition

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dans la première chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium [3] (Tableau I.3).

Tableau I.3 - famille d'alliages d'aluminium corroyés [1].

Élément d'alliage	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium + silicium	6000
Zinc (et cuivre)	7000

#### I. 5. 3. a. Désignation numérique (Norme européenne EN 485-2)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre W qui représente les produits corroyés
- un tiret -
- quatre chiffres représentant la composition chimique :
- **1<sup>er</sup> chiffre** : indique le groupe d'alliage selon le tableau ci-dessous :
- **2<sup>ème</sup> chiffre** : pour le groupe 1 : les limites de certaines impuretés, pour les autres groupes, les modifications successives de l'alliage
- **3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> chiffres** : indiquent pour le groupe 1 le pourcentage d'aluminium au-delà de 99% et pour les autres groupes, l'identification de l'alliage [9] (Tableau .I.4).

Tableau .I.4. Indique les groupes de l'alliage d'aluminium.

Groupe	Aluminium ou alliages
1	Aluminium non allié
2	Aluminium – cuivre
3	Aluminium – manganèse
4	Aluminium – Silicium
5	Aluminium – Magnésium
6	Aluminium – Magnésium – Silicium
7	Aluminium – Zinc
8	Autres alliages d'aluminium

### I. 5. 3. b. Désignation symbolique (Norme européenne)

Elle est destinée à compléter la précédente.

La désignation de l'aluminium non allié destiné au corroyage est constituée du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales [9].

*Exemples* : EN AW-1199 [Al 99,99] ou EN AW-1070A [Al 99,7].

Pour les alliages d'aluminium corroyés alliés, la désignation est constituée du symbole Al suivi d'un espace et du symbole des éléments d'addition respectivement suivi de leur teneur par ordre décroissant.

*Exemples* : EN AW-6061 [Al Mg1SiCu] ou EN AW-2014 [Al Cu4siMg].

### I. 5. 3. c. Désignation des états métallurgiques des produits corroyés

Cette désignation est ajoutée aux précédentes, elle comporte un groupe de lettres et de chiffres et indique la séquence de traitements utilisés pour obtenir les différents états [9] (Tableau .I.5).

Tableau .I.5.indique Désignation des états métallurgiques des produits corroyés [9].

Etat de base	Lettres	Chiffres	Autres
Etat brut de fabrication	F	-	-
Etat recuit	O	-	-
Etat Ecroui	H	1 - 2 - 3	dureté 1-9 (3 <sup>o</sup> chiffre pour variances de trait)
Etat traité thermiquement	T	1 – 12	1 ou 2 chiffres pour variétés de traitement
Mis en solution (trempé)	W	-	-

La désignation de ces alliages est faite suivant des règles très précises que nous rappelons ci-après.

#### I. 5. 4. Désignation des alliages de moulage

##### ➤ Compositions

La désignation alphanumérique, autre fois en usage en France, a été remplacée par une désignation numérique, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres, suivant la norme Afnor NF EN 1780-1. On trouvera au (tableau.I.6) la correspondance entre le premier chiffre et l'élément d'alliage [3].

Pour faciliter la compréhension du texte concernant les alliages de moulage, nous avons indiqué les deux désignations : l'ancienne alphanumérique et la nouvelle, numérique, en vigueur depuis 1998.

Tableau .I.6.famille d'alliages d'aluminium moulé.

Élément d'alliage	famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
silicium	40000
magnésium	50000
Zinc et cuivre	70000

**I. 5. 4. a. Désignation symbolique** (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret -
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci.

**Exemple** : EN AC-AlCu4MgTi : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane.

**I. 5. 4. b. Désignation numérique** (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret -
- cinq chiffres représentant la composition chimique :
- 2 premiers indiquent le groupe d'alliage
- 3 derniers indiquent la composition chimique.

**Exemple** : EN AC-21000 : alliage d'aluminium à 4% de cuivre avec des traces de manganèse et de titane.

**I. 5. 4. c. Renseignements complémentaires**

A la suite des désignations données ci-dessus, il est possible d'indiquer le mode d'obtention et le traitement donné à l'alliage. Une lettre désigne le procédé de moulage, et un groupe de lettre, le traitement (Tableau .I.7).

*Tableau .I.7. Indique les renseignements complémentaires [9].*

<b>Procédé de moulage</b>	<b>Lettre</b>	<b>Type de traitement</b>	<b>Lettre</b>
Moulage en sable	S	Brut de fonderie	F
		Recuit	O
		Refroidissement contrôle après solidification et vieillissement naturel	T1
Moulage en coquille	K	Mise en solution et vieillissement naturel (maturation)	T4
		Refroidissement contrôle après solidification et vieillissement artificiel ou sur-revenu (stabilisation)	T5
Moulage sous pression	D	Mise en solution et vieillissement artificiel (maturation) maximum	T6
Moulage de précision	L	Mise en solution et sous vieillissement artificiel (sous revenu) T64	T64
		Mise en solution et sur vieillissement artificiel (sur revenu stabilisation)	T7

**I. 5. 4. d. Anciennes normes de désignation**

Les alliages d'aluminium de fonderie sont encore souvent désignés par leurs anciennes normes.

**➤ Composition**

La désignation est alphanumérique

**\* Cas des aluminiums non alliés :**

A suivie d'un indice de pureté chimique représenté par un chiffre dont la valeur augmente avec la pureté

**Exemple:** A4 = aluminium de pureté <sup>3</sup> 99,0%

A5 = aluminium de pureté <sup>3</sup> 99,5%

**\*Cas des alliages:**

A suivie du symbole des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes

**\*Etat de livraison**

La lettre Y qui signifie alliage moulé est suivie de deux chiffres [3]:

- le premier chiffre indique le mode de moulage

2: moulage en sable

3: moulage en coquille

4: moulage sous pression

8: moulage par centrifugation

9: moulage suivant prescriptions

- le deuxième chiffre indique le traitement thermique

0: pas de traitement

1: recuit

3: mis en solution, trempé revenu

4: mis en solution, trempé et mûri

5: stabilisé

9: suivant prescription

**Exemple:** A-U5GT-Y24

Alliage de moulage contenant 5% de cuivre, du magnésium et du titane, moulé en sable, mis en solution, trempé et mûri.

### **I.7. Les alliages d'Aluminium de la série 6000 (Al-Mg-Si)**

La série 6000 contient des additions de magnésium et de silicium et parfois un peu de cuivre, de chrome ou de manganèse. Les alliages sont faits pour obtenir les plus grands niveaux de résistance par la précipitation de la phase  $Mg_2Si$ . Leurs propriétés mécaniques ne s'étendent doucement que ceux de l'acier de construction. L'expulsion est généralement très bonne, les alliages sont soudables et ont une bonne résistance à la corrosion, ils sont bien adaptés à la plupart des processus de traitement de surface, et ils ont des propriétés de résistance au-dessus de  $100^\circ C$ . Gamme typique d'application des armatures de fenêtre à des structures fortement chargées [13].

### **I.8. Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6XXX**

Les éléments d'addition les plus importants de la série 6000 sont le magnésium et le silicium. Ils sont d'une grande importance industrielle. Leur durcissement est dû à la précipitation des formes transitoires de composé  $Mg_2Si$ . Ils ont une très bonne aptitude à la mise en forme à froid et à la déformation. Ils présentent un bon comportement aux basses températures mais une résistance à chaud limitée, aussi un bon niveau de caractéristiques mécaniques. Ils ont une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et leurs beaux aspects de surface après brillantage [10].

Les alliages de la série 6000 peuvent être classés en deux catégories :

1) La première c'est là où les compositions sont plus chargées en magnésium et silicium (6061, 6082 par exemple). Ils sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...), ainsi qu'en aéronautique (liaisons électriques, boîtiers électroniques embarqués..).

2) la deuxième, catégorie moins chargée en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. C'est le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. Il sera utilisé par exemple en décoration et ameublement, menuiserie métallique. Il faut également noter l'existence du 6101 anciennement appelé Almelec (tableau II.8). Cet alliage a été énormément utilisé pour ces aptitudes de conducteur électrique. Il a notamment été utilisé pour la fabrication de lignes moyenne et haute tension en France (tableau II.9) [09].

Tbleau.I.8.composition des alliages 6060-6082-6101[9].

Composition														
Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr+Ti	Autres chaque	Autres total	Al
6060	Min.	0.03	0.10	/	/	0.35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0.60	0.30	0.10	0.10	0.60	0.05	/	0.15	0.10	/	0.05	0.15	
6082	Min.	0.70	/	/	0.40	0.60	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	1.30	0.50	0.10	1.00	1.20	0.25	/	0.20	0.10	/	0.05	0.15	
6101	Min.	0.30	/	/	/	0.35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0.70	0.50	0.10	0.03	0.80	0.30	/	0.10	/	/	0.05	0.15	

Les concentrations sont en pourcentage massique.

Tableau.I.9.caracristiques physique des alliages 6060-6082[9].

Caractéristiques physiques		
/	6060	6082
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	2.71
Intervalle de fusion	615-655	570-645
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C <sup>-1</sup> .10 <sup>6</sup> )	23.4.10 <sup>-6</sup>	23.5.10 <sup>-6</sup>
Module d'élasticité (MPa) (1)	69500	69500
Coefficient de Poisson	0.33	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	État T5 : 200	État T6 : 174
Resistivity à 20°C (μΩcm)	État T5 : 3.3	État T6 : 4.2
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	945	935
Limite élastique RP0.2 (MPa)	110 (2)	240 (3)
Limite à la rupture Rm (MPa)	150 (2)	300 (2)
Allongement (%)	14 (2)	8 (3)

- (1) Moyenne des modules de traction et de compression  
 (2) barre étirée état T5 diamètre inférieur à 100 mm  
 (3) Barre étirée état T6 diamètre compris entre 60 et 150 mm.

## I. 9. Spécificité de l'alliage 6061

### I. 9. 1. Principales caractéristiques de l'aluminium

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières [10].

**I. 9. 1. a. Masse volumique**

La masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m<sup>3</sup>. L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

**I. 9. 1. b. Résistance à la corrosion**

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion.

On peut rendre cette couche d'oxyde protectrice plus épaisse par anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs dans le bâtiment. Par, dans contre les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium sont sujets à la corrosion par piqûre, la corrosion sous contrainte, la fatigue corrosion, voire la corrosion généralisée. Le degré de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

**I. 9. 1. c. La conductibilité électrique**

La conductibilité électrique de l'aluminium commercial atteint 62 % de celle du cuivre. Par ailleurs, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium. Un conducteur en aluminium dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins.

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité. La forme sous laquelle ces éléments sont intégrés dans la matrice d'aluminium modifie ses propriétés.

**I. 9. 1. d. Propriétés mécaniques**

L'aluminium commercial possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois les améliorer considérablement par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas.

**I. 9. 1. e. Propriétés optiques**

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre du visible, il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage. Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle

d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

#### **I. 9. 1. f. Module d'élasticité**

Le module d'élasticité est égal à 66,6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et d'éléments d'addition. D'un point de vue commercial il est admis pour 69 GPa. Dans le cas des alliages, ce module est compris entre 69 et 72 GPa. La teneur en silicium l'augmente sensiblement de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18%. Le module de torsion est de 25 GPa pour l'aluminium pur; il est de 26 GPa pour l'aluminium commercial. Les caractéristiques mécaniques de traction varient en fonction de:

- Conditions de transformation et de moulage
- Sensibilité à la trempe
- Conditions de moulage
- maintient à chaud.

#### **I. 9. 1. g. Ténacité**

La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures.

#### **I. 9. 1. i. Résistance à la fatigue**

La résistance à la fatigue à 10<sup>8</sup> cycles est donnée pour chaque alliage dans les tableaux de caractéristiques mécaniques. On détermine le rapport d'endurance comme étant le rapport entre la limite à la fatigue à 10<sup>8</sup>, en contraintes alternées et la charge de rupture en traction:

- 0,35 à 0,45 dans le cas des alliages sans durcissement structural
- 0,25 à 0,35 dans le cas des alliages avec durcissement structural

#### **I. 9. 1. j. Propriétés à chaud**

Les propriétés mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. La nature de l'alliage, la durée du maintien à chaud et la température de maintien sont les paramètres les plus sensibles.

**I. 9. 2. Caractéristiques de l'alliage d'aluminium 6061****I. 9. 2. a. Alliage Aluminium 6061**

L'alliage AA6061 appartient à la série 6000. Sa composition nominale (en poids %) est 1% de magnésium, 0.6% de siliciums(Si), 0.23% de cuivre (Cu), 0.16% fer (Fe), 0.12% Chrome (Cr), 0.05% manganèses et le reste c'est de l'aluminium. L'alliage 6061 est très ancien et encore universellement utilisé dans [11]:

- les transports (structures, panneautages, caravanes, conteneurs...);
- les structures au sol (charpentes de bâtiment, de matériel de manutention, pylônes, paravalanches, coffrages de travaux publics);
- les pièces chaudronnées soudées;
- Comme matériaux de gainage des éléments de combustible des réacteurs nucléaires de recherche.

**I. 9. 2. b. Propriétés de l'alliage 6061**

Les principales propriétés de l'alliage 6061 sont les suivantes:

- Caractéristiques mécaniques moyennes à la température ambiante et ses caractéristiques de traction augmentes notablement aux basses et très basses températures;
- Bonne aptitude à la mise en forme;
- Résistance à la fatigue moyenne;
- Bonne aptitude au soudage à l'arc;
- Excellente résistance à la corrosion dans des atmosphères même relativement agressives; de plus, l'alliage 6061 n'est pas sensible à la corrosion sous tension [11].

**I. 10. Conclusion**

L'Aluminium présente donc une grande variété d'alliages répondant ainsi à une multitude d'applications.

Ces applications sont dominées par les impératifs suivants : résistance à la corrosion, légèreté, résistances mécaniques correctes.

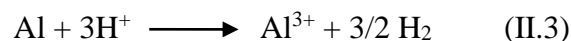
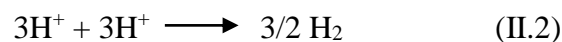
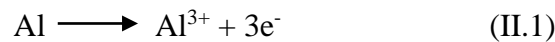
La légèreté notamment lui offre des débouchés dans l'automobile et les transports en général. Cependant, la concurrence des matières plastiques sur les composants non sollicités en température est active.

Un des inconvénients de l'Aluminium est ses relativement faibles propriétés mécaniques. Il existe des techniques de durcissement pour les renforcer. Nous allons étudier ces techniques en nous limitant à celles par traitements thermiques et/ou mécaniques. Sont donc exclues de cet exposé, les techniques par mise en solution solide d'autres éléments, l'affinage du grain et les composites [12].

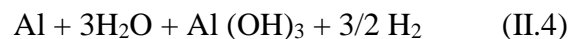
## II.1.Introductin

La corrosion est un processus interfacial, de manière générale entre un métal et son environnement. La corrosion aqueuse met en jeu des réactions hétérogènes entre le métal et l'électrolyte en contact avec celui-ci. Il s'agit dans la plupart des cas de processus électrochimiques. Le potentiel standard de l'aluminium est très électronégatif. Il s'agit donc d'un des métaux les plus faciles à oxyder. En contact avec un environnement oxydant tel que l'air ou l'eau, l'oxyde d'aluminium se forme de manière quasi instantanée. Cet oxyde étant très stable (compact et peu conducteur), il fait de l'aluminium un métal très peu sensible à la corrosion généralisée.

De manière générale, la corrosion de l'aluminium en milieu aqueux se traduit par la somme d'une demi-réaction électrochimique d'oxydation et d'une demi-réaction électrochimique de réduction, telles que :



Ou bien



Il est bien connu que l'aluminium est un métal réactif qui forme facilement une couche d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  à l'air et un film d'hydroxyde lorsqu'il est exposé à un milieu aqueux à température ambiante [13]. Le film d'oxyde naturel est composé de deux couches dont l'épaisseur totale est comprise entre 4 et 10 nm (Figure .II.11) [5].

- La première couche compacte et amorphe est appelée couche barrière à cause de ses propriétés diélectriques. Elle se forme en quelques millisecondes quelle que soit la température, à partir du moment où le métal est en contact avec le milieu oxydant ou l'air ; la température joue un rôle sur l'épaisseur finale ;
- La seconde couche croît sur la première en réagissant avec l'environnement extérieur. L'épaisseur finale de cette couche, poreuse et moins compacte que la couche barrière, ne sera pas atteinte avant des semaines voire des mois, en fonction des conditions physico-chimiques. De plus, elle réagit avec l'environnement extérieur au cours des différentes étapes de mise en forme du matériau ou pendant

son service formant ainsi une couche de contamination superficielle. La composition de la surface est donc complexe.

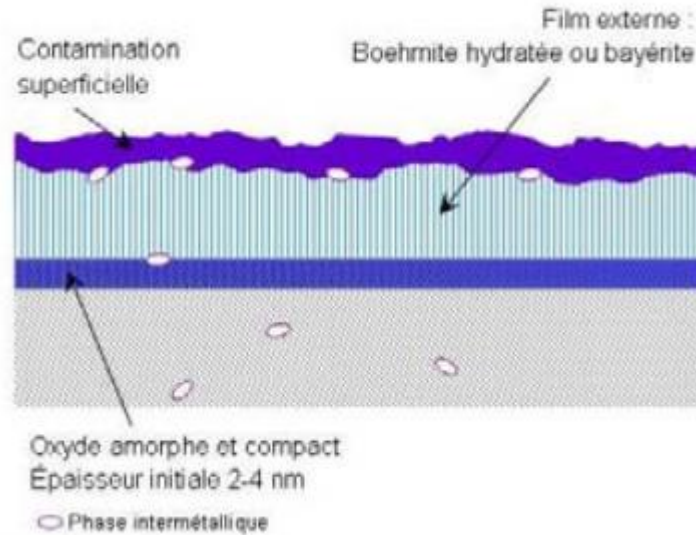


Figure II.11. Couches du film d'oxyde [14].

Lors d'un contact prolongé avec l'eau, la couche externe croît et se transforme en bayérite ou böhmite en fonction de la température du milieu.

Il convient de noter qu'en plus de l'aluminium, les alliages contiennent des impuretés et des éléments d'addition en solution solide et sous forme de composés intermétalliques. Les éléments plus nobles que l'aluminium comme le cuivre vont s'accumuler à l'interface métal/oxyde au cours de l'oxydation. Ils ne passeront dans l'oxyde qu'au-delà d'un certain seuil variable en fonction de l'élément considéré [14].

En outre, en ce qui concerne le comportement à la corrosion, les hétérogénéités de la surface vont localiser l'adsorption des ions Cl sur la surface du film.

La présence de particules à la surface du matériau peut engendrer la formation de défauts dans le film passif lors des étapes de mise en forme pouvant faciliter sa rupture (défauts dus à la différence de ductilité entre la matrice et les particules) [5].

On notera également que, au vu des différences de densité de l'alumine (3,4) avec l'aluminium sous-jacent, le film d'oxyde se trouve en compression.

## II.2.les formes de corrosion des alliages d'aluminium

Les diverses formes de corrosion localisée peuvent être classées en trois groupes selon qu'elles sont liées à des hétérogénéités intervenant au niveau :

- Du milieu : un effet de couplage galvanique se produit lorsqu'il y a une variation locale de composition du milieu ;
- Des conditions physico-chimiques à l'interface : corrosion par crevasse ;
- Du matériau : corrosion galvanique, corrosion intergranulaire et corrosion par piqûres.

De manière générale, il n'existe pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium ou de ses alliages. La prépondérance d'un certain type de corrosion dépendra des propriétés du métal, du milieu et des conditions d'utilisation. Cependant, la présence d'espèces agressives spécifiques (au-delà d'une concentration limite) est nécessaire tels que les ions halogénures et plus particulièrement les ions chlorures (agressivité plus élevée que celles des bromures et des iodures).

Deux grandes formes de corrosion peuvent être distinguées: la corrosion généralisée et la corrosion localisée. La corrosion généralisée (ou uniforme) se traduit par une diminution uniforme et régulière d'épaisseur de toute la surface. Les principales formes de corrosion localisée des alliages d'aluminium les principales caractéristiques sont énumérées ci-après.

### II.2.1. Corrosion uniforme

Pour les alliages d'aluminium, les problèmes de corrosion généralisée sont intimement liés au pH du milieu. Lorsque le pH s'écarte en effet du voisinage immédiat de la neutralité ( $4 < \text{pH} < 9$ ), la corrosion générale se traduit par une attaque rapide.

L'aluminium peut ainsi se passiver en milieu acide si le pouvoir oxydant du milieu est très élevé (par exemple acide nitrique fumant). De même, l'aluminium et ses alliages peuvent résister en milieu alcalin grâce à certains effets d'inhibition (par exemple, l'ammoniaque concentrée, les bases organiques faibles, les silicates, le béton).

Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion générale des alliages d'aluminium passifs est certes très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de  $5 \mu\text{m}$  par an, ce qui peut entraîner à la longue une évolution progressive de l'état de surface vers un aspect inesthétique dû à une évolution de rugosité (peau d'orange) [15].



Figure.II.12. Corrosion uniforme.

### II.2.2.La corrosion par piqûres

L'aluminium et ses alliages sont sensibles à la corrosion par piqûres dans les milieux dont le PH est proche de la neutralité (milieux naturels tels que l'eau de mer). Cette forme de corrosion se développe suivant une phase d'amorçage pendant laquelle les ions Cl sont adsorbés dans le film d'oxyde entraînant sa rupture aux points faibles. A l'endroit des ruptures du film, il y a oxydation rapide de l'aluminium et formation d'un complexe chloruré intermédiaire  $AlCl_4$ . Une partie des piqûres initiées va se propager grâce à deux réactions électrochimiques d'oxydation et de réduction. La formation d'ions  $OH^-$ . Ou la consommation d'ions  $H^+$  va modifier le PH vers un PH alcalin. En fond de piqûre, la dissolution de l'aluminium sous forme d'ions  $Al_3^+$  crée un champ électrique qui déplace des ions  $Cl^-$  vers le fond de la piqûre. Ces ions neutralisent chimiquement la solution et forment des chlorures d'aluminium. L'hydrolyse des chlorures d'aluminium  $AlCl_4$  provoque une acidification du fond de piqûre à  $pH < 3$  causant l'auto-propagation de la piqûre. En diffusant vers l'ouverture de la piqûre, les ions  $Al_3^+$  vont rencontrer un milieu de plus en plus alcalin et vont précipiter sous forme d'hydroxyde  $Al(OH)_3$ . Les microbulles d'hydrogène produites par la réaction de réduction des ions  $H^+$  poussent l'hydroxyde vers l'ouverture de la piqûre où il se dépose.

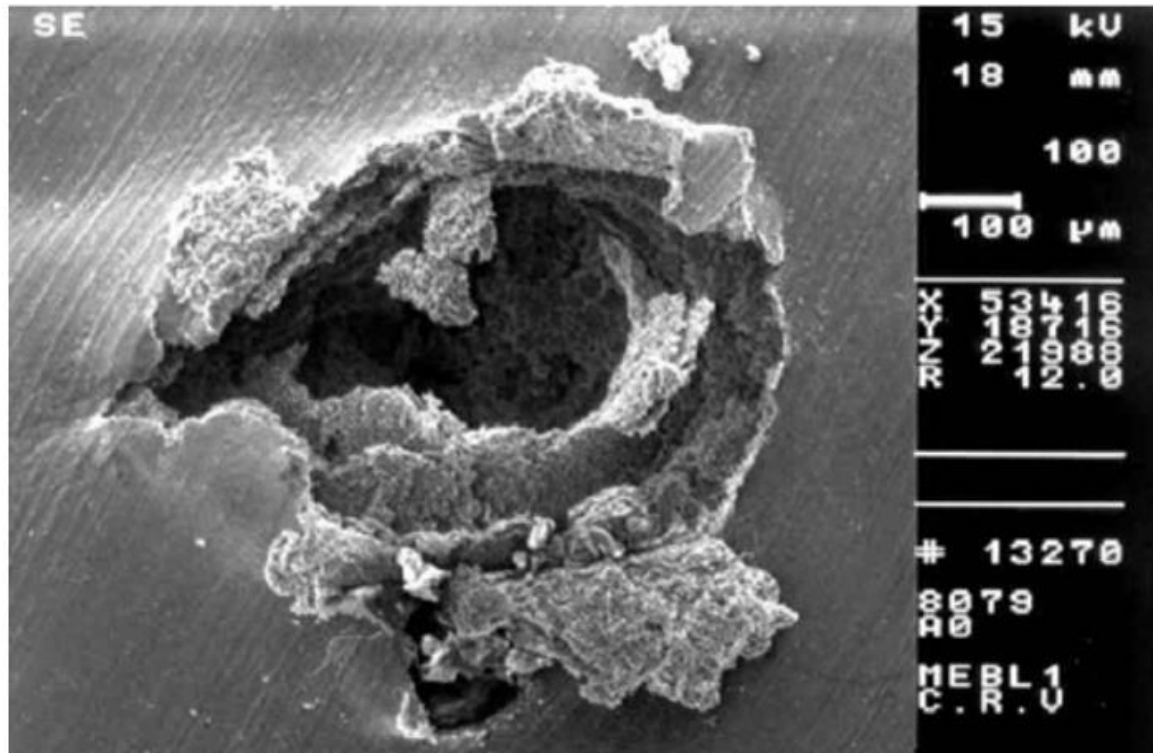


Figure II.13. Corrosion localisée dans un alliage d'Al-Mg [15].

Les étapes de la corrosion par piqûre sont comme suit (voir figure II.14)

Etape 1 : Adsorption des ions chlorures au niveau des défauts du film d'oxyde puis migration dans le film.

Etape 2 : Réduction du dioxygène dissous et charge de la capacité de double couche.

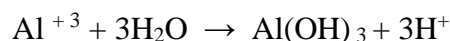
Etape 3 : Rupture du film aux niveaux de défauts.

Etape 4 : Oxydation de l'aluminium et formation de complexes chlorurés ( $\text{AlCl}_4^-$ ) et hydroxy chlorurés ( $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ ).

Etape 5 : Dissolution des complexes chlorurés et repassivation de la piqûre.

Etape 6 : Enrichissement en chlorure en fond de piqûre et formation d'une couche stable de chlorures, oxychlorures.

Etape 7 : Hydrolyse des chlorures d'aluminium et acidification du fond de la piqûre jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 3. La réaction peut être simplifiée ainsi :



Etape 8 : Diffusion des ions  $\text{Al}_3^+$  depuis le fond de la piqûre vers l'ouverture et précipitation en  $\text{Al}(\text{OH})_3$  au contact du milieu plus alcalin (sur les parois latérales sièges de la réaction cathodique et donc d'une certaine alcalinisation).

Etape 9 : Entretien de la piqûre par dissolution de l'aluminium dans la solution acide de chlorure d'aluminium et production d'hydrogène limitant l'accumulation des chlorures et repoussant les produits de corrosion vers l'ouverture de la piqûre.

Etape 10 : Repassivation de la piqûre par obstruction ou perte de stabilité de la couche de chlorure (retour à l'étape 5).

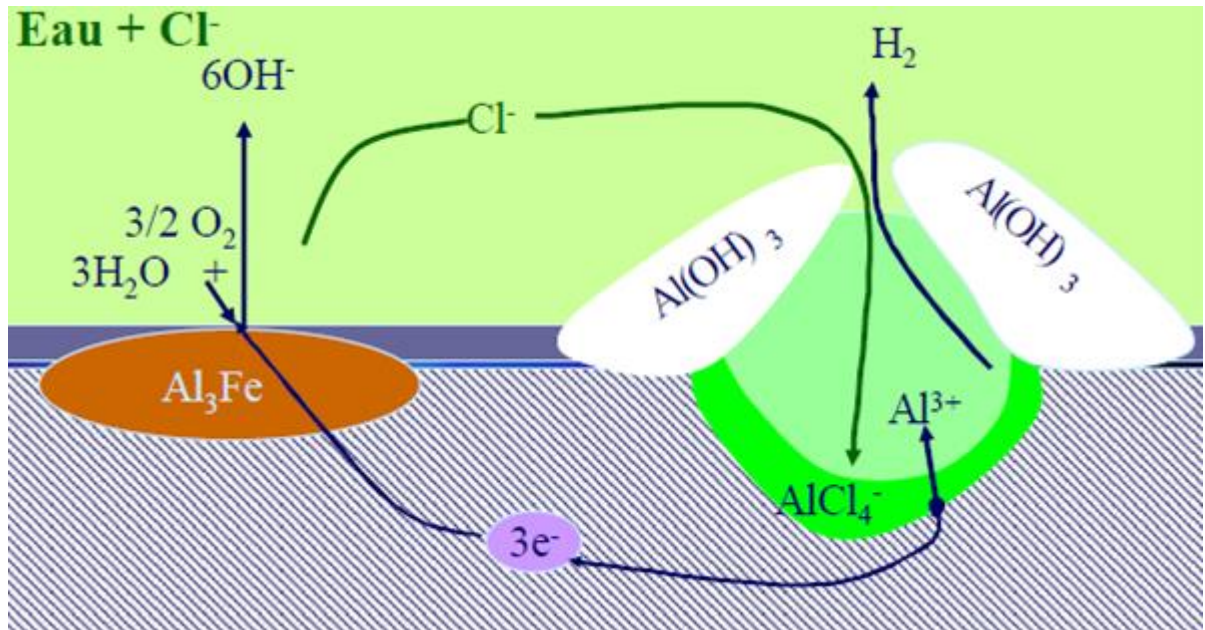
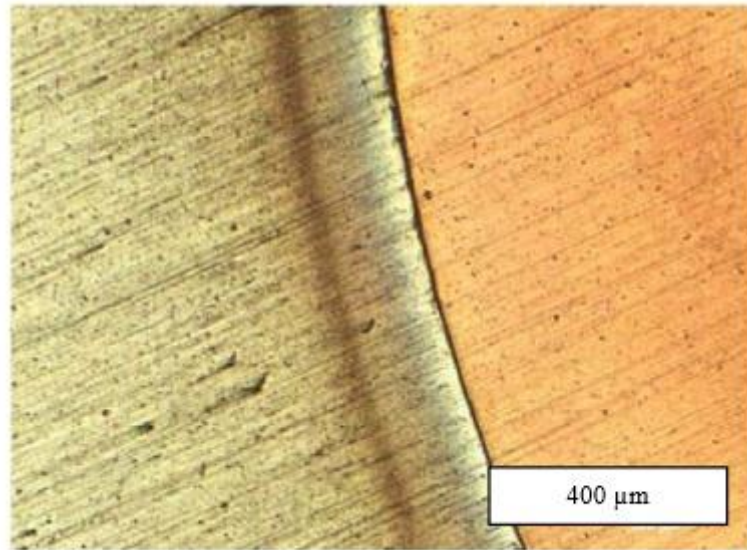


Figure II.14. Propagation autocatalytique d'une piqûre [15].

L'accumulation des produits de corrosion en surface peut obstruer l'ouverture de la piqûre et ainsi ralentir ou arrêter le processus. La corrosion par piqûres peut être caractérisée par trois paramètres principaux à savoir la densité de piqûres par unité de surface, la vitesse de propagation et la probabilité de piqûres.

### II.2.3. La corrosion galvanique

La corrosion galvanique se manifeste du couplage galvanique des particules intermétalliques et des phases secondaires avec la matrice. La matrice composée d'aluminium étant une anode, la couche d'oxyde renforce la résistance de l'aluminium. Le couplage galvanique de l'aluminium avec les phases cathodiques intensifie la réduction de l'oxygène, la dite réaction favorise une alcalinisation locale qui va engendrer une dissolution locale.



*Figure II.15. Micrographie optique de l'interface d'un couple galvanique [16].*

La classification des métaux et quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer sont résumés dans le tableau .II.10 [16].

Tableau II.10. Série galvanique des métaux exposés à l'eau [16].

	Magnésium et ses alliages
	Zinc
	Acier galvanisé
	Alliages d'aluminium, série 5000,3000, 6000
	Aluminium, série 1000
	Cadmium
	Alliage d'aluminium, série 2000
	Acier bas carbone
	Plomb
	Cuivre
	Bronze
	Alliage de cuivre
	Nickel
	Argent
	Titane
	Acier inoxydables
	Graphite
	Or
Platine	

#### II.2.4.La corrosion caverneuse

Elle est l'une des formes de la corrosion généralisée, et elle s'initie dans des coins d'assemblage par des rivets, boulons et des joints de soudure et sous d'autres impuretés accrochées sur la surface du métal. Sous ces zones confinées, qui forment des micropiles, il y aura réaction électrochimique entre le métal et l'eau contenu dans ces zones, donnant lieu à l'oxydation de l'aluminium en cations  $Al^{+3}$  et la réduction de l'oxygène en ions  $OH^-$ . L'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$  se dissout dans l'eau où le pH devient fortement acide ( $pH = 2$  à  $3$ ) à cause du volume de la crevasse, illustrée sur la figure II.16.

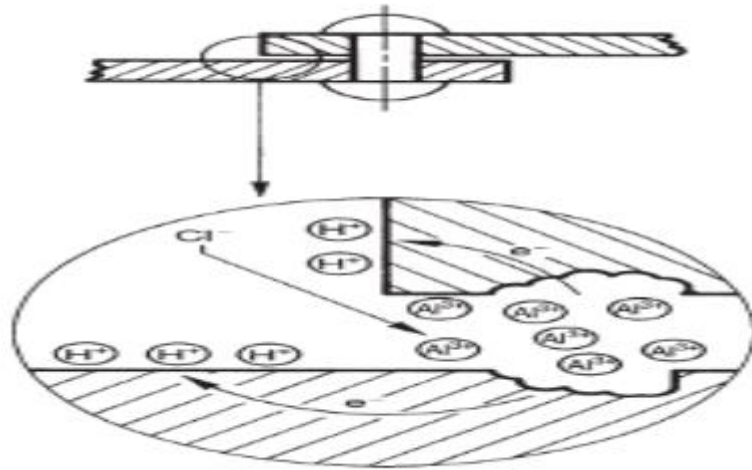


Figure II.16. Zone d'amorçage de la corrosion caverneuse [16].

### II.2.5. Corrosion érosion

La corrosion par érosion se produit dans un fluide en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal sous la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientés dans une même direction [16].

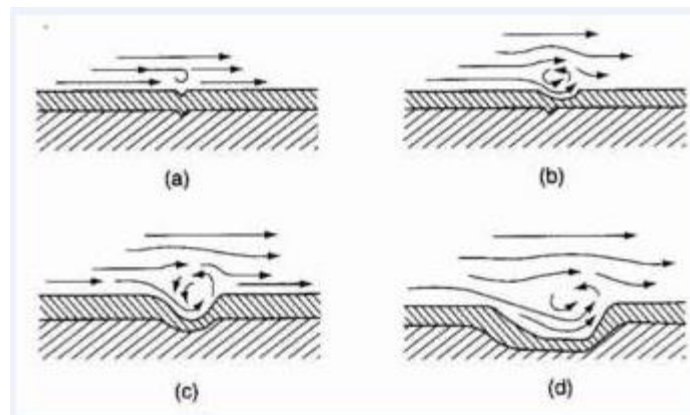


Figure II.17. corrosion érosion [16].

### II.2.6. La corrosion filiforme

S'initie au niveau des défauts d'un revêtement puis se propage à l'interface métal/revêtement (peinture par exemple) en formant de fins filaments [16].



Figure II.18.corrosion filiforme [16].

### II.2.7.La corrosion intergranulaire

Est une forme de corrosion qui se propage dans le métal en consommant uniquement les zones associées aux joints de grains. Elle peut être liée à la structure atomique et à la composition des joints de grains en l'absence de précipitation (corrosion intergranulaire hors précipitation) ou à la décoration des joints de grains par une précipitation (corrosion intergranulaire liée à la précipitation d'une seconde phase) [17]. La corrosion exfoliante ou feuilletante: est une forme de corrosion intergranulaire se propageant suivant une multitude de plans parallèles à la direction de transformation. Des feuillettes de métal inattaquées très minces subsistent entre ces plans et sont repoussés par le gonflement des produits de corrosion et s'écartent de la surface du métal comme les feuilles d'un livre.

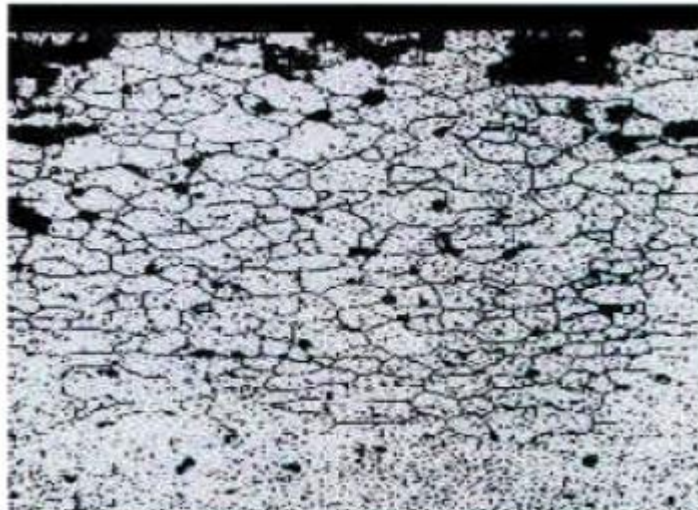


Figure II.19.Corrosion intergranulaire de l'alliage 5083[18].

Pour ce type de corrosion il y a deux cas de figures :

1)-Cas des alliages sensibles, avec des précipités continus aux joints de grains (voir Figure. II.20).

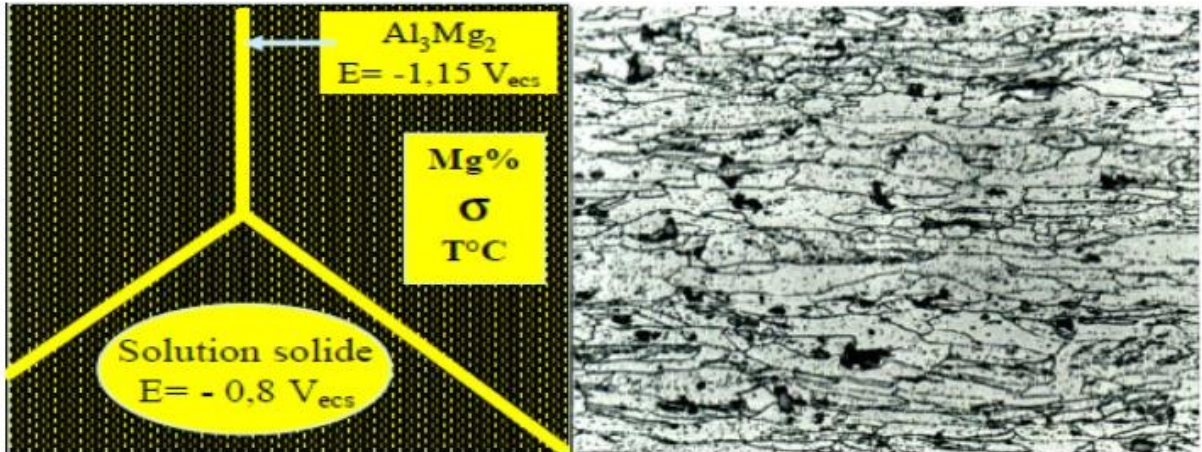


Figure II.20. Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium sensibles [18].

2)- Cas des alliages non sensibles avec des précipités discontinus aux joints de grains voir Figure.II.21.

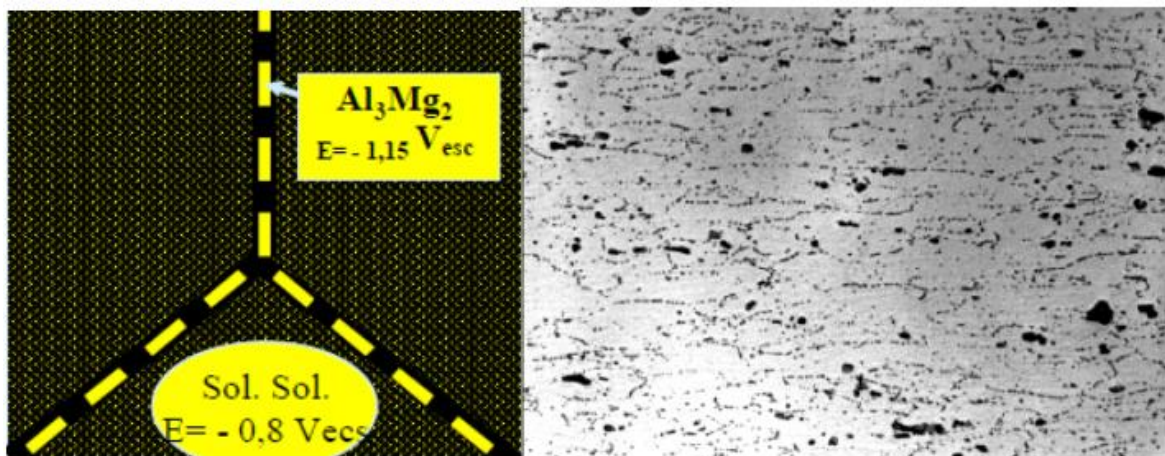


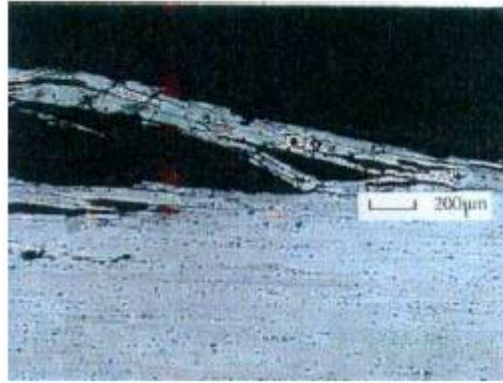
Figure II.21. Corrosion intergranulaire des alliages aluminium-Magnésium non sensibles [18].

### II.2.8. Corrosion feuilletante (exfoliante)

C'est une forme de corrosion qui se propage dans une multitude de plans parallèles à la surface de la pièce. Ces plans sont séparés par des feuillets de métal non attaqués qui sont repoussés de la surface du métal, par le gonflement des produits de corrosion des zones attaquées [5]. La corrosion feuilletante (ou exfoliante) comme la corrosion intergranulaire est une conséquence du «passé» thermomécanique des pièces. Seuls les alliages à haute Caractéristiques mécaniques sont concernés : ces phénomènes sont liés à la structure métallurgique particulière des alliages laminés. Cette forme de corrosion qui

affecte seulement quelques alliages (ceux de la série 2000, 5000 et 7000) se développe si les conditions de traitements thermiques ou de soudage sont mal adaptées.

Le mécanisme de propagation est généralement assimilé à une corrosion intergranulaire, dirigée préférentiellement par des contraintes exercées par les produits de corrosion. Dans certain cas, la propagation est de type transgranulaire [19].



*Figure. II.22. Photomicrographie MEB d'un alliage 2024 T351 développant de la corrosion feuilletante [19].*

### **II.2.9. La corrosion sous contrainte**

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique en tension (Résiduelle ou appliquée) et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures intergranulaires ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte. Cette dernière peut être d'origine résiduelle (cintrage, écrouissage, laminage froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement...) [20].

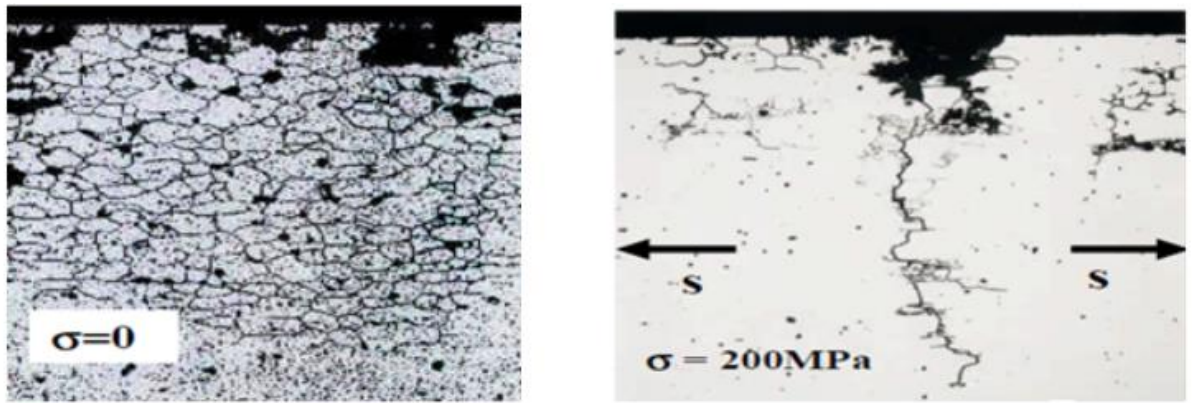


Figure .II.23.Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage A-Mg[20].

## II.3.Les facteurs influant sur la corrosion des alliages d'aluminium

### II.3.1. Les ions chlorures

Les ions  $\text{Cl}^-$  sont omniprésents dans des milieux naturels et industriels où les aciers inoxydables, les alliages de nickel, les alliages d'aluminium ou de titane sont largement utilisés.

Le processus de piqûration réside dans l'adsorption des chlorures sur la surface de l'oxyde. En général les ions  $\text{Cl}^-$  ont tendance à déstabiliser le film passif recouvrant le métal localement ou totalement selon les circonstances, plusieurs mécanismes sont proposés :

1. Transport des ions chlorures à travers les sites vacants d'oxygène ;
2. Transport des ions chlorures à travers les fibres d'hydroxyde d'aluminium ;
3. Amincissement ou dissolution de la couche d'oxyde.

L'amincissement de l'oxyde par une dissolution locale provoquée par des piqûres métastables favorise l'accrochage des chlorures [21].

L'adsorption d'ions  $\text{Cl}^-$  à la surface du film passif sous champ électrique élevé et sa substitution aux molécules d'eau liées aux cations métalliques dans le film s'appuient sur quelques résultats semi quantitatifs.

Une autre hypothèse concerne le fait qu'à un stade très précoce, les ions  $\text{Cl}^-$  peuvent accélérer la dissolution des cations à l'interface film-solution, avec formation d'un complexe transitoire qui se dissout dans le milieu aqueux en libérant les anions  $\text{Cl}^-$  et les cations  $\text{M}^{3+}$

### II.3.2. Le PH

Les diagrammes E-PH développés par Pourbaix, dont la méthode arbore la stabilité de l'alliage ou d'un métal pur en combinant l'activité de l'hydrogène (PH) et le potentiel d'équilibre ( $E^\circ/\text{VENH}$ ). A partir du diagramme d'équilibre E-pH de l'aluminium-eau à 25°C (figure.II.24), on distingue la région où l'aluminium est immune (-1,8 V/SHE). Pour des valeurs de 4 PH 9 il y a formation de l'hydroxyde d'aluminium pour des valeurs de potentiel supérieure à -1,8V/SHE pour des PH 4, la dissolution de l'oxyde s'accroît, on a étudié la transition des phases d'hydroxyde d'aluminium, laquelle dépend du temps d'incubation et l'accroissement du pH de la solution, la précipitation de l'hydroxyde qui est de structure amorphe pour une fraction de 2,9 de OH/Al à 25°C et à 65°C. La migration des ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  dans la solution et à l'interface respectivement a un grand rôle sur la vitesse de dissolution de l'aluminium [21].

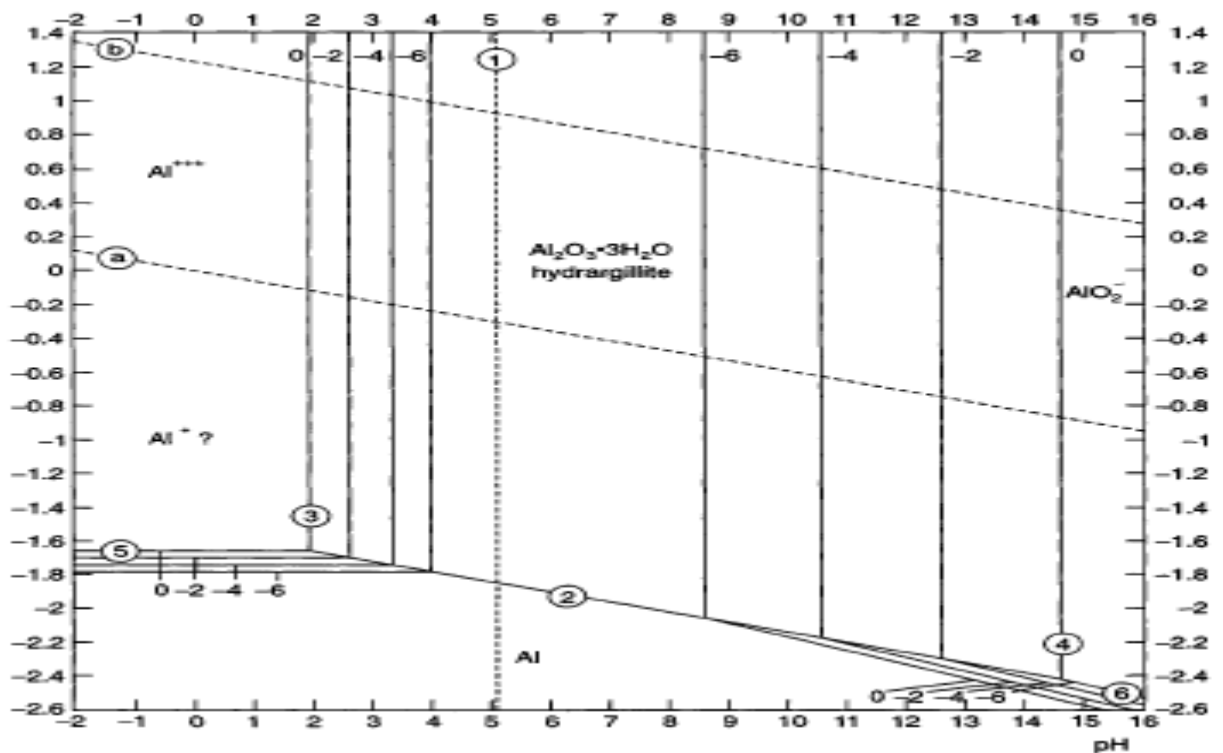


Figure .II.24. Diagramme E/pH de l'aluminium pur dans l'eau à  $T=25^\circ\text{C}$  [21].

L'effet du PH et de la concentration des chlorures sur la corrosion de l'alliage AA6061, dont les résultats de la potentiodynamique montrent que la dissolution de l'alliage dans la solution alcaline à PH 12 est due à la forte concentration en ions  $\text{OH}^-$ . L'alliage exhibe une bonne résistance à PH neutre. Le potentiel de piqûration est indépendant du PH, les valeurs de la densité de courant augmentent avec l'évolution des valeurs du PH, l'amincissement de la couche d'oxyde par les ions  $\text{OH}^-$  facilite la pénétration des ions  $\text{Cl}^-$  [21].

### II.3.3. Les éléments d'alliage

Les éléments d'alliages peuvent modifier le potentiel de dissolution d'alliage dans les directions cathodique ou anodique (figure.II.22). Le potentiel de dissolution des alliages d'aluminium est attribué aux précipités intermétalliques. Le zinc diminue le potentiel de corrosion des alliages de série 7000. Le cuivre déplace le potentiel de corrosion vers les valeurs positives quel que soit l'alliage [5].

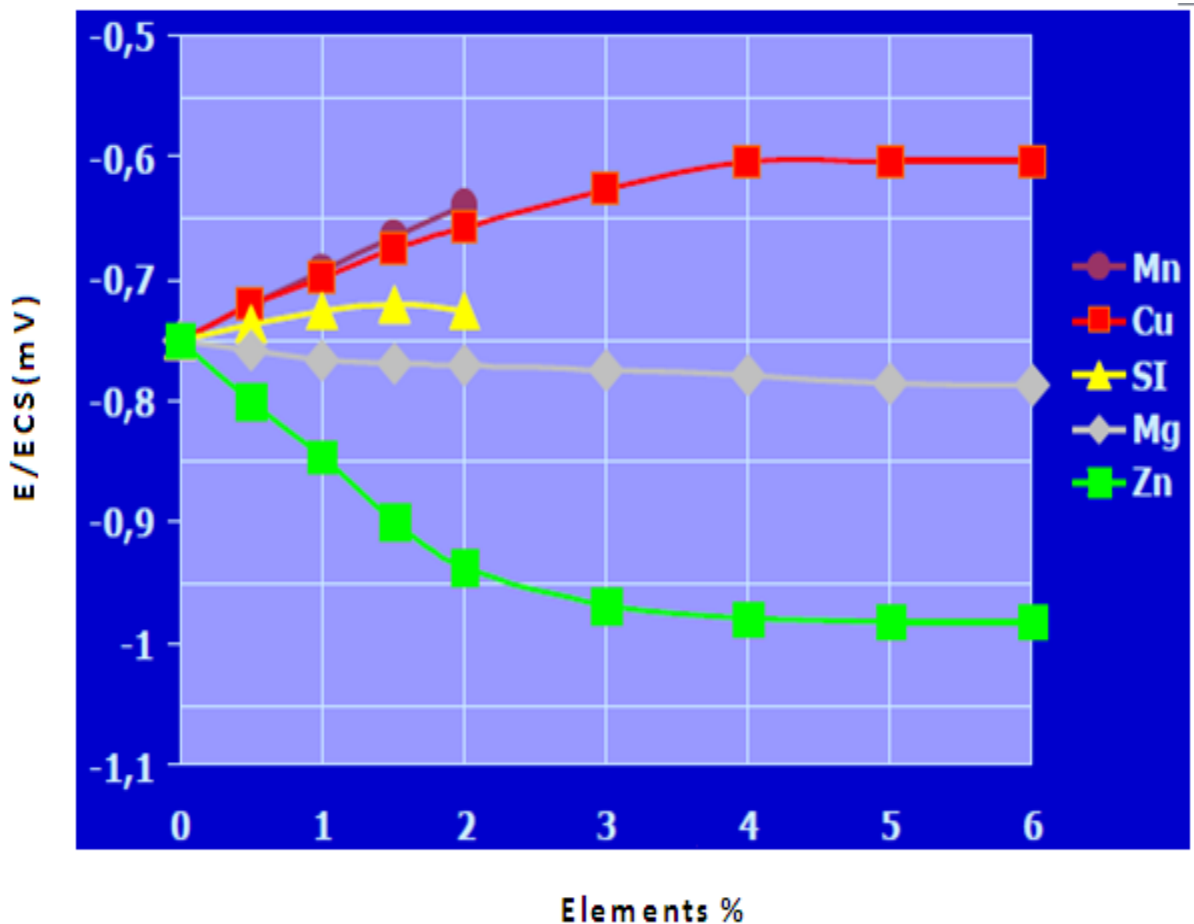


Figure II.25. Influence des éléments d'addition sur la dissolution des alliages d'aluminium [5].

### II.3.4. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium susceptible de durcissement structural, alors que le dernier traitement est très important et très spécifique.

#### II.3.4.1. Traitements d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450°C

à 610°C, qui ont pour but général de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

Le corroyage est une opération consistant à déformer un métal avec allongement, généralement, mais non obligatoirement dans un sens privilégié: il est effectué à chaud, à tiède, à température ordinaire et permet par déformation appropriée (forgeage, matriçage, laminage, filage...) d'obtenir des produits à la forme désirée. Il est défini par le rapport de corroyage  $S/s$  avec :

S : section avant déformation;

s : section après déformation;

Il ne faut pas confondre le corroyage avec l'écrouissage.

L'écrouissage est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire (par fois à tiède). Il est défini par la réduction de section  $[(S-s)/S] \times 100$ . Cette expression doit remplacer celle du taux d'écrouissage qui correspond au rapport :  $[(S-s)/S] \times 100$  [22].

#### **II.3.4.2 .Traitements d'adoucissement**

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans les cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium.

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300°C pendant une à 8 heures; la structure ne se modifie pas, pourtant les caractéristiques mécaniques évoluent d'autant plus que la température est plus élevée et le temps de maintien est plus long. Au niveau atomique il n'y a qu'une réorganisation des dislocations engendrées par l'écrouissage : certains s'annihilent, d'autre se réarrangent au joints et sous joints de grains d'où la malléabilité de l'alliage.
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures ; les atomes se regroupent suivant des nouvelles directions pour former un petit cristal d'orientation quelconque. Avec le temps de nouveaux atomes viennent s'agglutiner autour du petit cristal jusqu'à ce que les nouveaux grains se rejoignent pour donner la structure macrographique de recristallisation primaire. Si l'on augmente la température ou la durée de maintien, on obtient des structures de recristallisation secondaire à très gros grains. Au contraire, Si l'on stoppe ce

traitement de recuit par un temps trop court, on obtient des états partiellement recristallisés.

Dans le cas de la trempe structurale, c'est un recuit de précipitation qui consiste en un chauffage assez prolongé à température comprise entre la température de revenu et la température de mise en solution d'un produit trempé et mûri ou revenu dans le but d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

### **II.3.4.3. Traitements de trempe structurale**

#### **❖ Principe**

Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend une mise en solution solide suivie:

- d'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide existant à des températures plus élevées;
- d'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (=maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

#### **❖ Traitement industriel de trempe structurale**

Ce traitement va être défini par :

- Un traitement de mise en solution: la température de ce traitement est très précise car dans le cas général. Il faut en particulier éviter d'atteindre la température de brûlure pour laquelle l'alliage commence à fondre aux joints de grains. La régénération de l'alliage par traitement thermique ou mécanique est alors impossible. Pour éviter la brûlure due à la ségrégation mineur on évite de dépasser la température TE (eutectique).
- Une vitesse critique de trempe qui est la vitesse minimale permettant d'obtenir à température ambiante la solution solide sursaturée.
- Un traitement de maturation ou de revenu. Certains alliages sont favorablement influencés par un temps d'attente entre trempe et revenu. Un écrouissage entre trempe et revenu est conduit à des effets favorables dans certains cas [22].

### **II.3.5. Température**

La corrosion de l'aluminium dans les solutions aqueuses chlorurées est influencée par la température. La cinétique de corrosion de l'aluminium est marquée par des énergies d'activation supérieures avec l'augmentation de la température. La dissolution de l'oxyde

s'accroît et la passivation de l'aluminium est inversement proportionnelle à la température [22].

#### II.4. Prévention de la corrosion des alliages à base d'aluminium

La corrosion des alliages d'aluminium ne présente pas en générale de réels problèmes en atmosphère, eau douce, eau de mer et pour la plupart des sols. Une «bonne résistance à la corrosion» sous-entend que l'aluminium peut être utilisé de façon durable sans protection de surface. En fonction de l'agressivité de l'environnement et des conditions d'utilisation, des mesures doivent néanmoins parfois être prises afin de limiter ou d'empêcher la dégradation.

Il existe divers moyens de préventions focalisées sur le matériau ou le milieu comme nous pouvons voir le dans la Figure.II.26 [22].

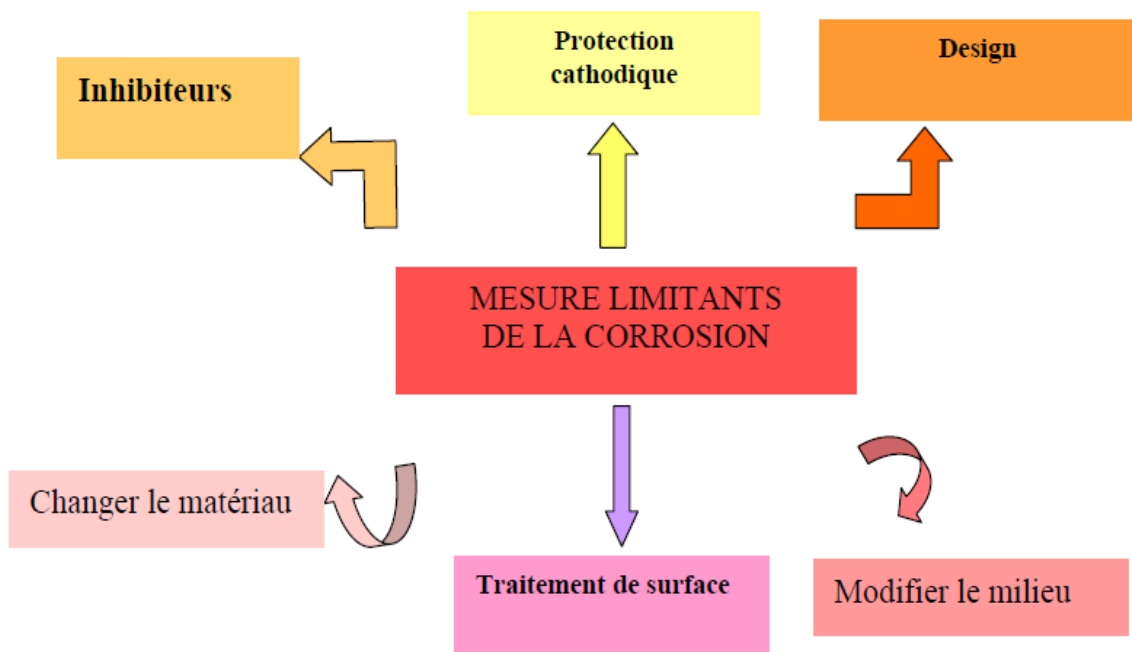


Figure.II.26. Moyens de prévention de la corrosion [22].

#### II.5. Les inhibiteurs de corrosion des alliages d'aluminium

La prévention contre la corrosion ou les méthodes de réduction dudit phénomène de dégradation, pour cela on a recours aux méthodes de contrôle des réactions anodique et/ou cathodique, le changement des variables environnementales ou la rupture du contact électrique entre les sites anodiques et cathodique.

L'ajout d'inhibiteurs à des taux faibles, dont l'efficacité inhibitrice s'améliore d'autant que le mécanisme de diffusion des ions agressifs se réduit d'avantage [22].

#### ❖ Classification des inhibiteurs

Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières. La formulation des produits (inhibiteur organiques ou inorganiques), les mécanismes d'action électrochimique (inhibiteur cathodiques, anodiques ou mixtes), les mécanismes d'interface et principe d'action (adsorption et/ou formation d'un film). Le diagramme illustré sur la figure.II.27. Montre la classification du processus d'inhibition selon les fonctionnalités chimiques de l'inhibiteur :

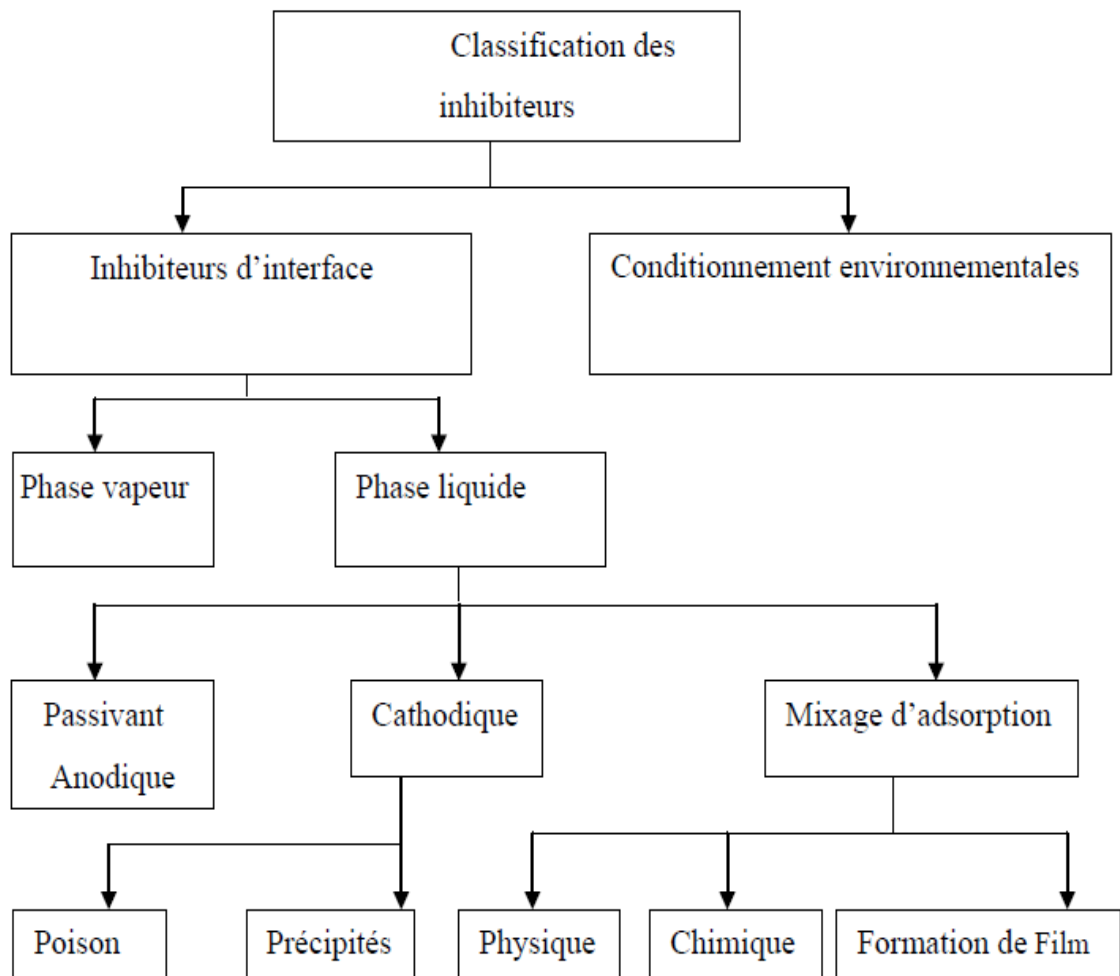


Figure .II.27. Organigramme de classification des inhibiteurs de corrosion [22].

#### a) Les inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des

électrons avec le métal (l'azote, le phosphore ou le soufre). Le processus d'inhibition est influencé par la structure chimique des spécimens, la distribution de charge dans les molécules, la nature et la charge surfacique du métal.

L'inhibition de la corrosion des alliages d'aluminium est introduite avec l'usage de l'hydrazine et les acides aminés. Les grandes chaînes hydrocarbonées s'adsorbent mieux dans des solutions diluées, quoique dans les solutions concentrées la longueur de la chaîne n'influe pas énormément. Ces données sont certes reliées à la tension de surface. La réactivité des alliages d'aluminium laisse le film immuable dans plusieurs environnements. La surface de l'oxyde est amphotère et se dissout graduellement quand le métal est exposé à une solution concentrée d'acides ou de bases [22].

### **b) Inhibiteurs inorganiques**

Le groupe est sous forme de sels tels les chromates de sodium, phosphate ou molybdate. Les anions de ces composés ont le rôle de réduire la corrosion du métal. Une large gamme d'inhibiteur est testés mais sont rares les composés qui peuvent remplacer les chromates.

## **II.6. Protection des alliages d'aluminium**

Après avoir exposé les différents modes de corrosion des alliages d'aluminium, nous allons dans ce qui suit donner brièvement un rappel sur les modes de protection qui peuvent être différents d'un environnement à un autre. Pour remédier à la corrosion des alliages d'aluminium on utilise selon le cas l'un des procédés cités ci-après : l'anodisation, la conversion chimique, les revêtements (organiques et inorganiques), protection cathodique (anode sacrificiel de zinc), et les inhibiteurs de corrosion [23].

### **II.6.1. L'anodisation**

Une des méthodes permettant d'améliorer la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium est l'anodisation. C'est une opération qui, par un processus électrolytique, substitue à la couche d'oxyde (alumine) qui recouvre naturellement l'aluminium, une couche d'oxyde d'épaisseur plusieurs centaines de fois supérieure. En effet, l'épaisseur de la couche d'oxyde naturelle est de l'ordre d'une centaine de nanomètres, alors que la couche obtenue par anodisation est couramment de l'ordre de la dizaine de micromètres. Celle-ci peut même atteindre, dans des conditions particulières, plusieurs centaines de micromètres [23].

L'anodisation, appelée également oxydation anodique, est essentiellement basée sur la propriété suivante : l'aluminium et ses alliages, lorsqu'ils sont placés à l'anode d'une cuve d'électrolyse (figure .II.28) contenant un acide dilué, réagissent avec l'eau pour former à la surface du métal une couche d'oxyde, leur conférant ainsi leur bonne résistance à la corrosion.

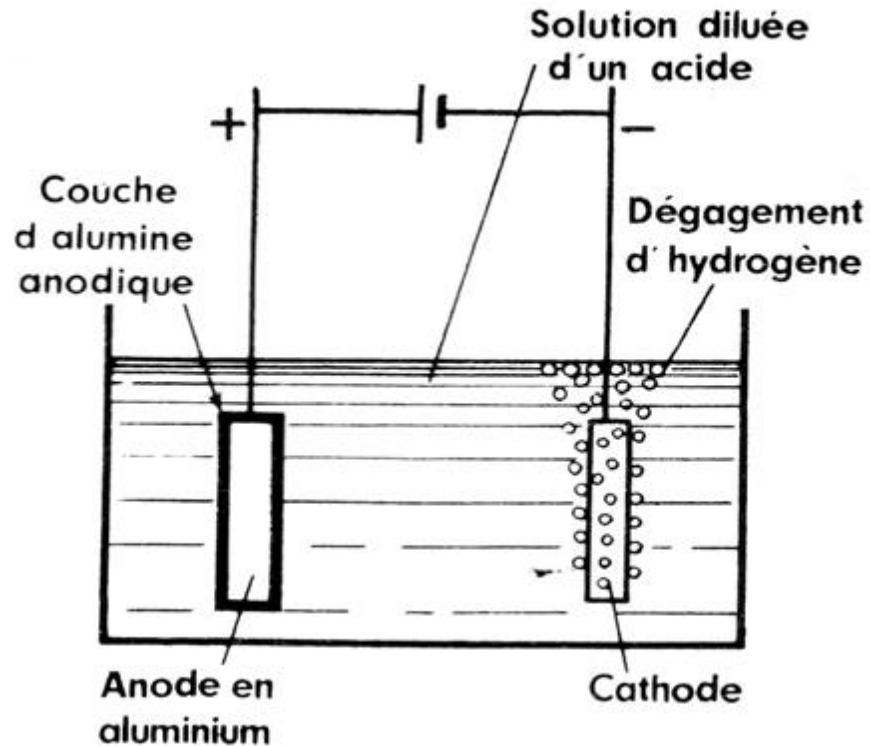
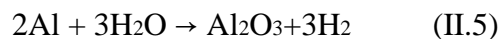


Figure .II.28. Anodisation de l'aluminium [23].

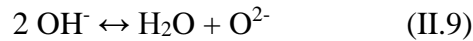
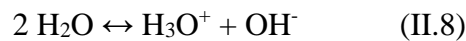
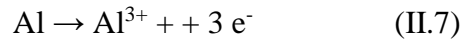
La réaction globale d'oxydation anodique de l'aluminium en milieu acide habituellement avancée est [23] :



A la cathode, un dégagement d'hydrogène provenant de la réduction des protons a lieu selon la réaction :



- A l'anode, plusieurs étapes sont proposées pour former l'oxyde d'aluminium [23]:



L'alumine ainsi formée est peu conductrice.

Cependant, cette description ne suffit pas à expliquer les différences fondamentales de comportement observées en modifiant l'électrolyte et les conditions opératoires. En particulier, selon l'action dissolvante du milieu sur l'oxyde d'aluminium, on obtiendra des couches anodiques à caractère barrière ou à caractère poreux.

### **II.6.2. Conversion chimique**

La conversion chimique se différencie de l'anodisation par la mesure où il n'y a pas apport extérieur d'énergie. Le dépôt de titanate et de zirconium sur l'alliage AA6061 augmente la résistance de l'alliage à un degré moins comparativement aux chromates [23].

### **II.6.3. Les revêtements organiques**

Les revêtements organiques sont souvent utilisés à des fins décoratives et le faible coût du procédé. L'efficacité des revêtements organiques réside dans le choix du revêtement, des traitements de surfaces préalables, des pigments et additifs est important et peuvent renforcer l'action inhibitrice. La couche forme une barrière protectrice vis-à-vis de l'environnement.

Les résines de fluoropolymers sont efficaces contre la corrosion de l'alliage AA6061 dans un environnement chloruré. Le revêtement augmente la résistance à la corrosion par contre l'augmentation du taux de fluorine de 40,5 à 57 diminue les performances du revêtement. Les revêtements nécessitent l'application d'un prétraitement de surface avec le molybdène, vanadium, cérium ou le magnésium pour éviter la corrosion filiforme de l'aluminium [23].

### **II.6.4. Les revêtements inorganiques**

La projection du cérium sur l'alliage AA6061 augmente la résistance à la corrosion en formant une couche barrière bloquant la réduction de l'oxygène sur les sites cathodiques. La couche formée sur l'alliage déplace le potentiel de corrosion vers les valeurs négatives d'ordre de 400 mV comparativement à la solution 3,5 % NaCl. Les tests d'impédance montrent une baisse de la capacité (Cdl) qui indique la bonne tenue du revêtement dans la solution agressive. Les valeurs de la Rp est de 135 k.cm<sup>2</sup> et 5,46 k.cm<sup>2</sup> pour l'alliage avec et sans revêtement respectivement. Des traitements de surfaces au préalable améliorent l'adsorption du cérium [23].

**II.7. conclusion**

Le problème de la corrosion nous conduit à la classification des types et de trouver la raison de l'existence de toutes sortes. Il est pour cela doit être la protection et la prévention des normes spécifiques et sont connus pour éviter la corrosion.

### III.1.Introduction

En particulier, ces alliages présentent un large spectre de caractéristiques mécaniques. Une telle gamme de caractéristiques mécaniques est obtenue en agissant conjointement sur la composition des alliages et en effectuant des traitements thermiques, qui permettent soit :

- de diminuer la résistance mécanique, diminution accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement) ;
- d'augmenter la résistance mécanique (ce sont les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul objectif d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils influencent aussi un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que :

- l'aptitude à la transformation à chaud (ou à froid) ;
- la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage ;
- l'aptitude à l'oxydation anodique ;
- la conductivité électrique ;
- la stabilité dimensionnelle, etc.

Dans cette partie, nous avons étudié et analysé de l'ampleur de la résistance d'aluminium à la corrosion, par caractérisation à la dureté et la perte en poids, entre d'un état pour notre alliage « état écroui commercial et état traité ».

### III.2.Alliages étudiés

Dans ce travail, nous avons utilisé un alliage d'aluminium série 6000 type 6060.

#### ❖ Composition chimique d'alliage d'aluminium

*Tableau. III.11.Composition chimique de l'alliage étudié*

Elément	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Sn	Na	Al%
<b>Taux</b>	0.408	0.199	0.004	0.109	0.690	0.010	0.010	0.001	0.002	0.001	0.001	98.561

### III.3. Techniques Expérimentales

#### III.3.1. Préparation des échantillons

Pour l'étude métallographique, l'observation en microscope optique nécessite une bonne préparation de la surface. L'ensemble des échantillons a subi un polissage mécanique et ensuite une attaque chimique.

##### a) Prélèvement des échantillons

La découpe des échantillons se fait à l'aide d'une scie fine ; on obtient généralement des échantillons dont les dimensions pour les observations au microscope optique.

##### b) Polissage des échantillons

Les échantillons subissent un polissage en utilisant des papiers émeri de granulométrie croissante 320, 500, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000 et 5000 placés sur un disque rotatif et en fin avec la patte diamant. Les échantillons sont lavés à l'eau.



Figure.III.29. Machine polisseuse.

##### c) Traitements thermiques appliqués

Les alliages du système Al-Mg-Si constituent une catégorie importante d'alliages industriels à caractéristiques mécaniques moyennes, qui sont obtenues par application du traitement de durcissement structural (par précipitation). Comme la précipitation joue un rôle primordial dans l'amélioration des propriétés mécaniques de nos alliages, le but de notre travail s'articule essentiellement sur l'étude des réactions de précipitation dans les alliages étudiés lors des traitements thermiques appliqués.

Le traitement de vieillissement comporte deux étapes :

### 1) Trempe

Une trempe à l'eau (refroidissement rapide), où on obtient une solution solide sursaturée à la température 520° pendant 1 heure.

### 2) Le revenu

Le revenu est un chauffage ultérieur à de température inférieure 180° pendant 6 heures. Cette étape permet d'accélérer les phénomènes de décomposition de la solution solide sursaturée et donc la précipitation, responsable du durcissement de l'alliage.

#### ❖ Le cycle de traitement thermique

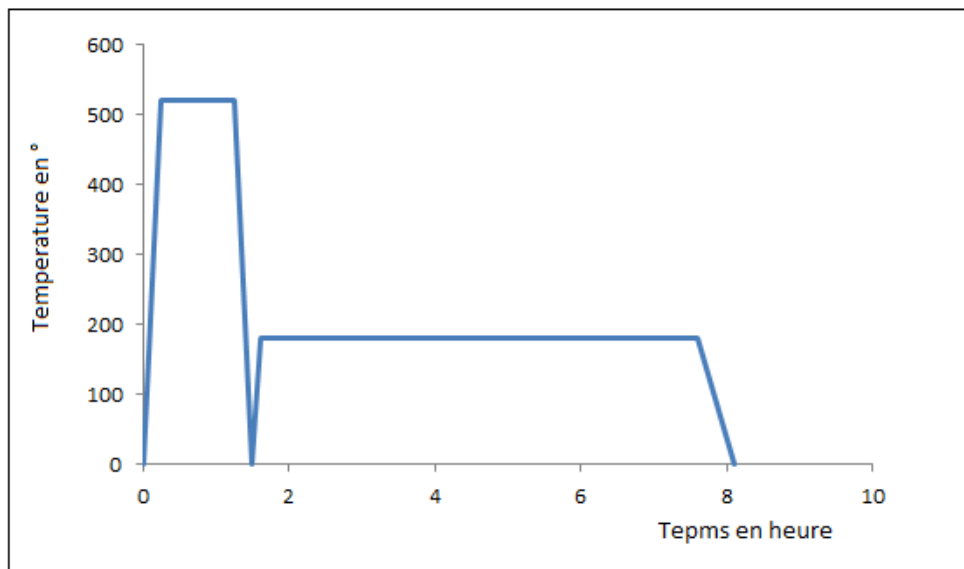


Figure .III.30. Cycle de traitement de durcissement appliqué.

### III.3.2. mesure du PH :

Un Ph mètre a été utilisé pour ma mesure de l'acidité de notre solution d'attaque pour une caractérisation ultérieure de dureté et de perte en poids figure. III.31.

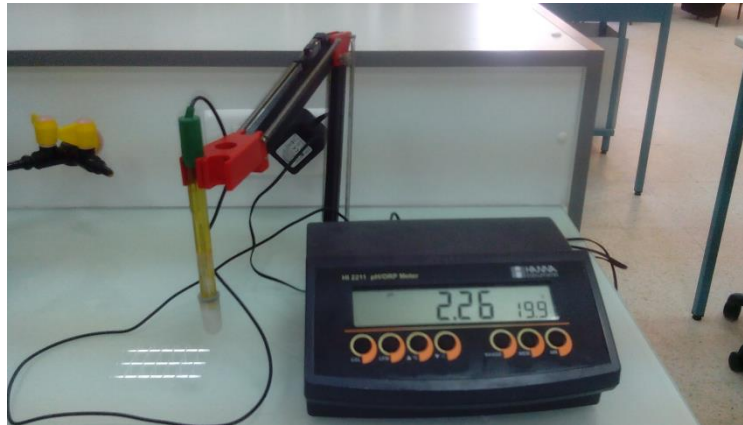


Figure .III.31. PH-mètre : mesure de l'acidité.

### III.4. Démarche Expérimentale

#### a) Essais de dureté

Le principe de l'essai consiste à exercer sur la surface de l'échantillon à étudier une force constante pendant un temps (t) donné à l'aide d'un poinçon en diamant très dur appelé pénétrateur, ce dernier a une forme pyramidale à base carrée figure III.32, la dureté Vickers est alors définie par le quotient de la charge appliquée F par la surface de l'empreinte permanente S, est donnée par la relation :

$$Hv = 1.854F/d^2 \dots\dots\dots (\text{kgf/mm}^2)$$



Figure .III.32. Pénétrateur et l'empreinte d'indentation.

#### b) Perte en poids

Une balance électronique a grande précision a été utilisé pour caractériser la perte en poids, figure III.33, sous l'action de l'acidité de notre solution d'attaque et aussi en fonction du temps d'immersion pour un PH constant.



Figure .III.33. Balance de mesure de perte en poids.

### III.5.Résultats

#### III.5.1. Résultats du PH

Le PH de notre solution initiale constitué de  $H_2SO_4$  « acide sulfurique » a été mesuré à -0.78, suite à une neutralisation avec l'eau distillée, les PH mesurés sont indiqués sur le tableau III.12 et Figure .III.34.

Tableau. III.12. Mesure du PH.

PH1	PH2	PH3	PH4
-0.12	-0.4	-0.5	-0.78

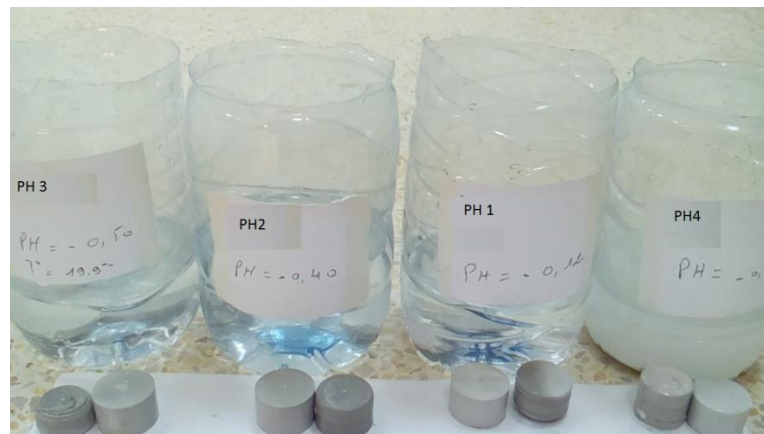


Figure .III.34. Valeur du PH Mesure pratiquement.

L'effet de l'acidité de la solution  $H_2SO_4$  sur l'aspect générale des échantillons est présenté sur la figure III.35.



Figure .III.35. Effet de l'acidité sur l'aspect de l'échantillon.

### III.5.2. Perte en poids et dureté :

Le poids initial moyen des échantillons a été mesuré à 15.90 gramme pour les échantillons non traités et 19.38 gramme pour les traités.

Figure. III.36 présente la variation de perte en poids en fonction de l'agressivité du PH pour les deux états de notre alliage.

#### ❖ La perte en poids relative en fonction de PH (traité) :

PH	PH <sub>1</sub> = -0.12	PH <sub>2</sub> = -0.40	PH <sub>3</sub> = -0.50	PH <sub>4</sub> = -0.78
$\Delta P/P$	0.51 %	0.77 %	2.27 %	3.30 %

#### ❖ La perte en poids relative en fonction de PH (non traité) :

PH	PH <sub>1</sub> = -0.12	PH <sub>2</sub> = -0.40	PH <sub>3</sub> = -0.50	PH <sub>4</sub> = -0.78
$\Delta P/P$	1.32 %	2.26 %	3.83 %	4.27 %

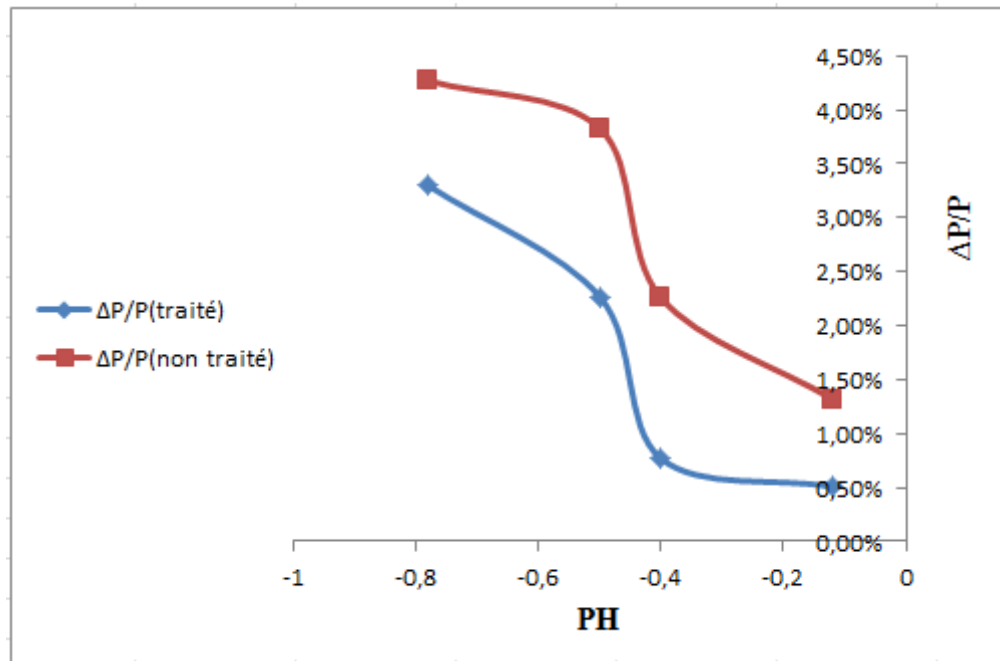


Figure. III.36. Variation perte en poids en fonction du PH.

Figure. III.37 présente la variation la dureté en fonction de l'agressivité du PH pour les deux états de notre alliage.

❖ **La dureté en fonction PH (traité) :**

PH	PH <sub>1</sub> = -0.12	PH <sub>2</sub> = -0.40	PH <sub>3</sub> = -0.50	PH <sub>4</sub> = -0.78
HV	113.96	92.92	83.92	65.17

❖ **La dureté en fonction PH (non traité) :**

PH	PH <sub>1</sub> = -0.12	PH <sub>2</sub> = -0.40	PH <sub>3</sub> = -0.50	PH <sub>4</sub> = -0.78
HV	51.1	34.47	26.69	21.28

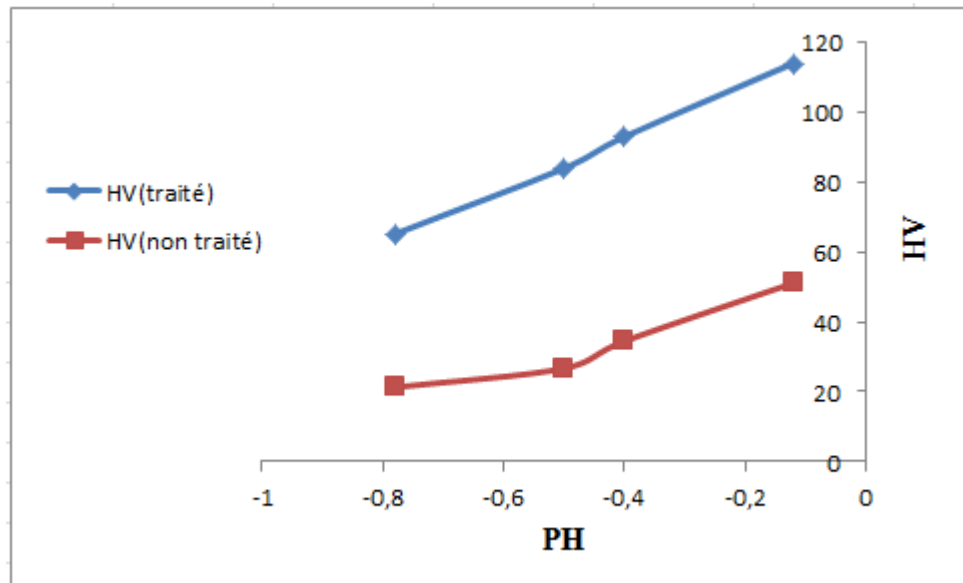


Figure. III.37. Variation de la dureté en fonction du PH.

Afin d'analyser l'effet ph sur la perte en poids et la dureté sous l'action du temps une série d'essais a mené aux résultats suivants :

Figure III.33 présente la variation la perte en poids en fonction de l'agressivité du PH sous l'action du temps pour les deux états de notre alliage.

❖ **Le poids en fonction de temps (traité) :**

Temps	1 <sup>ère</sup> semaine	2 <sup>ème</sup> semaine	3 <sup>ème</sup> semaine
poids	1.75%	3.30%	3.70%

❖ **Le poids en fonction de temps (non traité) :**

Temps	1 <sup>ère</sup> semaine	2 <sup>ème</sup> semaine	3 <sup>ème</sup> semaine
poids	2.89%	4.27%	4.9%

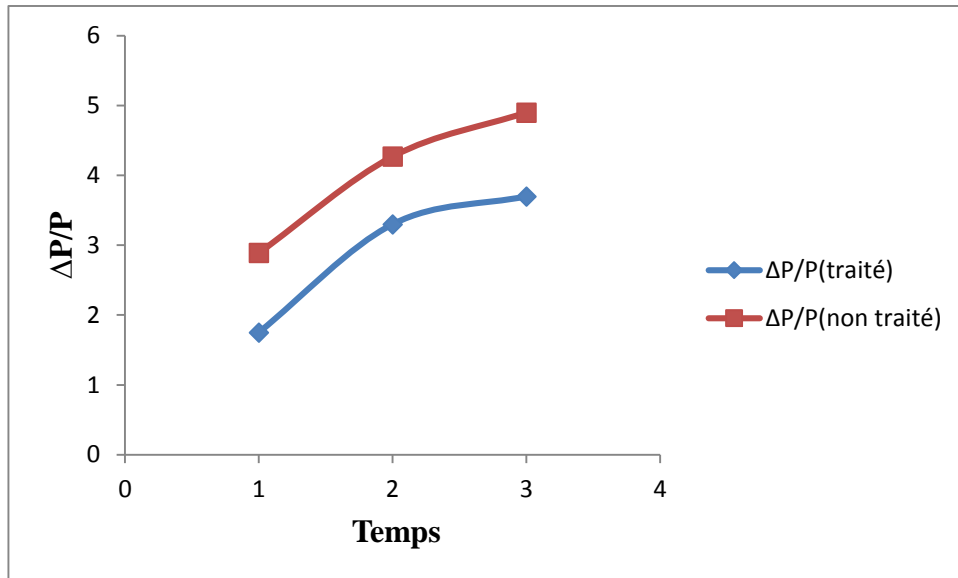


Figure .III.37. Variation de la perte en poids en fonction du PH sous l'action du temps.

Figure .III.38 présente la variation la dureté en fonction de l'agressivité du PH sous l'action du temps pour les deux états de notre alliage.

❖ **La dureté en fonction de temps (traité) :**

Temps	1 <sup>ère</sup> semaine	2 <sup>ème</sup> semaine	3 <sup>ème</sup> semaine
HV	108.13	103.01	101.60

❖ **La dureté en fonction de temps (non traité) :**

Temps	1 <sup>ère</sup> semaine	2 <sup>ème</sup> semaine	3 <sup>ème</sup> semaine
HV	46.22	34.47	26.69

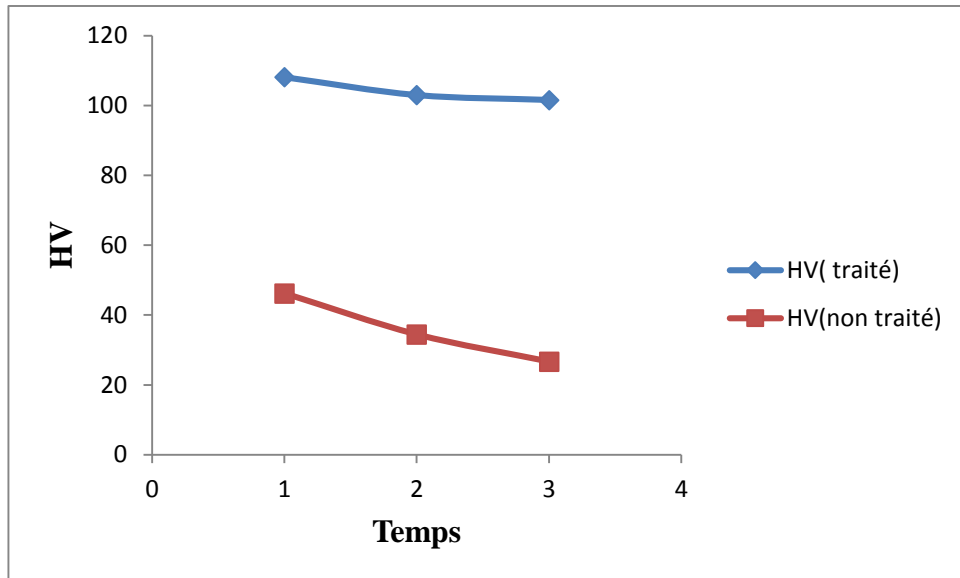


Figure. III.38. Variation de la dureté en fonction du PH sous l'action du temps.

### III.5.3. analyse métallographique

#### a) Attaque chimique

L'attaque chimique a pour but de révéler les joints des grains. La méthode la plus répandue consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif choisi pendant un temps convenable. L'attaque a lieu généralement à la température ambiante.

L'observation des échantillons en microscope optique nécessite une attaque chimique pour révéler sa structure, on utilise un réactif de Keller dont sa composition est la suivante :

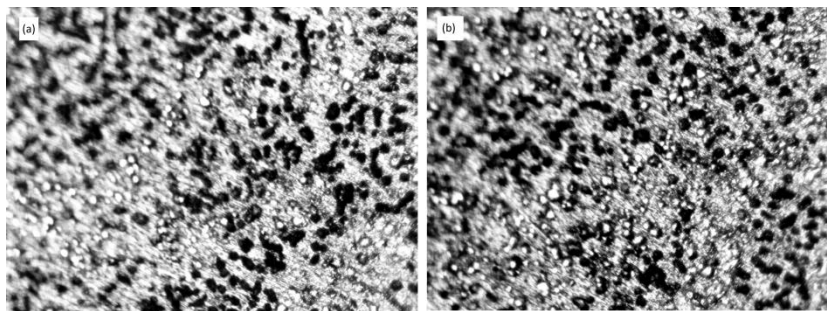
- Acide fluorhydrique (HF) : 2 ml
- Acide chlorhydrique (HCl) : 3ml
- Acide nitrique (NHO<sub>3</sub>) : 5 ml
- Eau distillée (H<sub>2</sub>O) : 180 ml

**b) observations métallographiques :**

*Figure.III.39. Microscope optique.*

**c) État métallographique initial :**

La figure .III.40. Présent le changement structurale de notre alliage suite au traitement thermique avant corrosion :



*Figure. III.40. structure alliage 6060 (a) état recuit, (b) état traitent.*

**III.5.3.1. Changement de la microstructure****a) Changement de la microstructure en fonction du PH**

La figure .III.41 (a, b,c,d,e) montre le changement de la microstructure de notre alliage a partir de l'état initial traite.

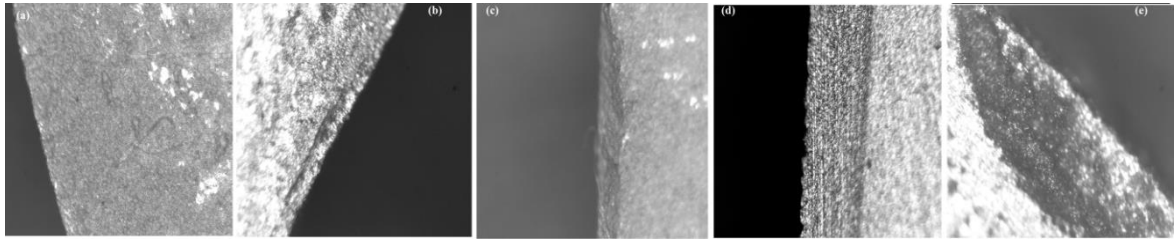


Figure. III.41. (a, b,c,d,e) changement d'aspect en fonction du PH (a référence traitée)

La figure. III.38 (A,B,C,D,E) montre le changement de la microstructure de notre alliage à partir de l'état initial non traité

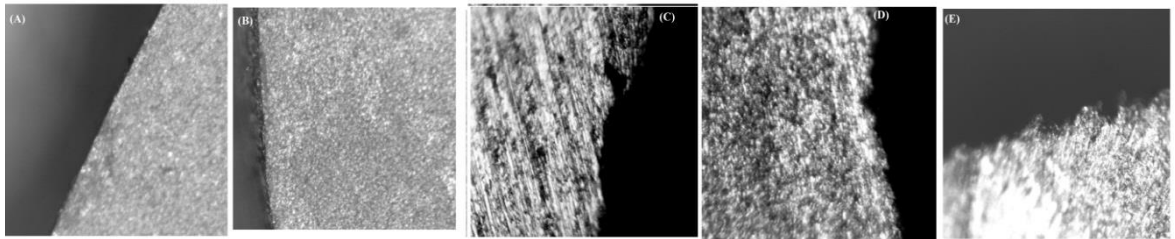


Figure. III.42. (A,B,C,D,E) changement d'aspect en fonction du PH (A référence non traitée).

b) Changement de la microstructure en fonction du temps:

La figure .III.39 montre le changement d'aspect de la matière dans un PH constant de -0.78 pour de semaines d'immersion.



1 etat en PH -0.12 non traité  
2 etat en PH -0.12 traité

3 etat en PH -0.4 non traité  
4 etat en PH -0.4 traité

5 etat en PH -0.5 non traité  
6 etat en PH -0.5 traité

7 etat en PH -0.78 traité  
8 etat en PH -0.78 non traité

Figure .III.43. Changement structural de l'aluminium en deux états traités et non traités en fonction du PH pour 15 jours d'immersion.

### III.4. Interprétation

Une perte exagérée de poids est remarquée pour les échantillons non traités, elle est due à la dégradation des joints de grains constitués de silicium et magnésium arrangés aléatoirement dans la matrice d'aluminium.

La perte en poids est proportionnelle à l'acidité de la solution d'attaque, cela peut être expliqué par l'agressivité de la solution et son effet sur la microstructure grossière. (Figure. III.41 (a –e) et 43).

La perte minimale en poids pour l'état traité est due à la présence de précipités  $Mg_2Si$  bien arrangés dans la matrice d'aluminium et la structure fine de cette dernière;

Une proportionnalité entre la perte minimale en poids et l'agressivité de la solution même pour l'état traité. (Figure .III.42 (A–E) et 43).

Une diminution rapide en dureté est remarquée pour l'état non traité, elle est expliqués par la dégradation rapide des liaisons intermétalliques entre les grains de la même structure.

Une diminution très lente en dureté est remarque pour l'état traité, elle est expliqué par l'interaction intermétalliques entre les précipités et la taille fin de la matrice.

**III.5.Conclusion**

Le traitement de durcissement peut diminuer la perte en poids de l'alliage d'aluminium.

Le traitement de durcissement augmente la dureté ce qui améliore la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium.

L'alliage d'aluminium à l'état recuit présente de caractéristiques améliorées à la mise en forme, mais des mauvaises caractéristiques anti-corrosion suite à son aptitude à la dégradation par réaction chimique entre l'aluminium et l'acide sulfurique.

L'aptitude de l'aluminium à la corrosion à l'état recuit le rend usinable chimiquement "usinage par électrochimie".

L'amélioration de la résistance à la corrosion de l'aluminium par traitement de durcissement, peut élargir les champs d'utilisation de cette famille d'aluminium.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire a pour objectif l'étude effet du double traitement sur le comportement à la corrosion de l'alliage 6060.

Il a été principalement basé sur l'examen du comportement de l'alliage à la corrosion en aluminium, ainsi que l'étude de la protection et de la prévention de la corrosion, pour cela, nous avons parlé à la division de l'alliage d'aluminium en deux alliages de traitement et alliages non traités pour mesurer la dureté et le poids et de l'observation par microscopie optique. Ces opérations sont en fonction de temps, ainsi que en fonction de PH. Le traitement thermique a été un grand rôle car elle vise à :

- Peut diminuer la perte en poids de l'alliage d'aluminium.
- Augment la dureté ce qui améliore la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium.

Le but d'améliorer la résistance à la corrosion est d'étendre les domaines d'utilisation.

### Références bibliographiques

- [1]: Guy Murry. Généralité sur L'aluminium et ses alliages. Aide-mémoire Métallurgie. Dunod, Paris, 2004, 2010.. Page (202-213). (Deuxièmes édition).
- [2]: Gérard Hartmann, L'aluminium historique,  
« <http://www.hydroretro.net/etudegh/aluminiumhistorique.pdf> ».
- [3]: Michelle Colombié, matériaux métallique, Fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343 - 376).
- [4]: Bauxite ,  
« [http://spcfa.spip.acrouen.fr/IMG/nvx\\_prog\\_terms/Chimie%20Sp%E9cialit%E9/S%E9paration%20d'esp%E8ces%20m%E9talliques/Bauxite.pdf](http://spcfa.spip.acrouen.fr/IMG/nvx_prog_terms/Chimie%20Sp%E9cialit%E9/S%E9paration%20d'esp%E8ces%20m%E9talliques/Bauxite.pdf)».
- [5]: C. Vargel, corrosion de l'aluminium, edition Dunod, 1999.
- [6] J.E. Hatch, Aluminium Properties and Physical Metallurgy, Ohio: Metals Park, 319p, 1984.
- [7]: J.P Baïllon, J.M.Dorlot. Des Matériaux, troisième édition, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 480p, 2000.
- [8]: W.S.Miller, L.Zhuang, J.Bottima, A.J.Witterbrood, P De Smet, A.Haszler,A.Vieregge, Recent developpement in aluminium alloys for the automotive industry. Materials science and engéniring , A280, Vol280, pp. 37-49, 2000.
- [9]: Lycée Raymond LOEWY  
«[http://www.educreuse23.ac\\_limoges.fr/loewy/aa/voisin/ALUMINIUM.pdf](http://www.educreuse23.ac_limoges.fr/loewy/aa/voisin/ALUMINIUM.pdf)».
- [10]: M. A. Amin, Corr. Sci, (2010), 52(2010) 3243-3257.
- [11]: S. Gudic, I. Smoljko, M. kliskic, Mater. Chem. and Phys 121 (2010) 561-566.
- [12]: JD. EMBURY. "Strengthening mechanisms in Al alloys - an overview of natural limits and engineering possibilities." Proceedings of the 5th International Conference on Aluminium Alloys, Their Physical and Mechanical Properties (ICAA5), held in Grenoble, France, July 1996 (Suisse, Scientific Net <http://www.scientific.net>) Materials science forum, 217-222 (1996): p. 57-70.
- [13]: W.C. Moshier , G. D. Davis et J. S. Ahearn, Corrosion science, 27(8) (1987) 785-801.
- [14]: M. Reboul, T. J. Warner, Corrosion Reviews, 15, 3-4 (1997) 471-496.

## Référence bibliographique

---

- [15]: Elena DIN-STIRBU, comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobiles pour la fabrication de radiateur de chauffage, thèse de doctorat 2005 Université de Pitesti Roumanie.
- [16]: Baboian, R., "NACE Corrosion Engineer's Reference Book", NACE International the corrosion society, Houston, (2002).
- [17]: Tahar ABID, Etude et caractérisation des toles en alliages Al-Mg-Si-(Cu), Thèse de doctorat, université CONSTANTINE.
- [18]: M.C.Reboul, P.Meyer, intergranular and exfoliation corrosion study of Al-Li-Cu-Mg-Zr.
- [19]: Kuntz-Laguerrre, C : Contribution à l'étude de la compréhension des phénomènes chimiques engendrant la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium et de la quantification de cette corrosion. Thèse de doctorat : Univ. Paris VI, (1997)
- [20]: M.G.Fontana, Moderne theory – principes, in: corrosion engineering, New York:McGraw-Hill, pp. 445-481, 1986.
- [21]: Bockris, J.O. and Minevski L.V., "On the mechanism of the passivity of aluminum and aluminum alloys", Journal of Electroanalytical Chemistry, V. 349, (1993), 375 - 414.
- [22]: Melle MECHERI Sara, Etude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles, thèse de magistère 2007, Université Mentouri-Constantine.
- [23]: J.S. Safrany, *Anodisation de l'aluminium et de ses alliages*, Techniques de l'Ingénieur.

## Résumé

Dans le cadre de ce travail, nous sommes intéressés par l'étude d'alliages d'aluminium (AlMgSi) serie 6000 type 6060. Ce type d'alliages à durcissement structural est demandé d'être utilisés industriellement. Ces alliages ont une importance dans l'industrie et les avions de l'automobile.

A cet effet, nous avons utilisé principalement l'effet du traitement thermique sur le comportement à la corrosion d'alliage d'aluminium traité et non traité par la mesure de la dureté, le poids, observation au microscope.

Après avoir analysé les résultats obtenus nous ne concluons que l'effet du traitement sur le comportement à la corrosion conduit à Améliorer la résistance à la corrosion de l'alliage d'aluminium pour développer les domaines d'utilisation.

**Mots de clés :** Alliage d'aluminium serie 6000 type 6060, corrosion, traitement thermique,

## تلخيص

لقد اعتنينا خلال عملنا في هذه المذكرة بدراسة سببكية من سبائك الالمنيوم التي تنتمي الى المجموعة 6000 نوع 6060. الصناعية ذات التصليد البنيوي. هذه السبائك لها اهمية في صناعة السيارات و الطائرات. لهذا الغرض اعتمدنا اساسا على تأثير المعالجة الحرارية على تآكل سبائك الالمنيوم و ذلك بقياس الصلادة , الوزن و المراقبة بواسطة المجهر الضوئي للسبائك المعالجة و الغير المعالجة. تحليل النتائج نستنتج أن تأثير المعالجة على سلوك التآكل يؤدي إلى تحسين مقاومة التآكل من سبائك الألومنيوم لتوسيع مجالات استخدامه.

**الكلمات المفتاحية :** سبائك الالمنيوم مجموعة 6000 نوع 6060 , التآكل , المعالجة الحرارية.