



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

BENDJEDDOU Bilal

ALLAL Mohammed

Thème

**Contribution à l'étude de certains paramètres de
l'anodisation**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BOUDILMI Aissa	MCA	Président
BENARIOUA Younes	PROF	Encadreur
BEDDA Abdelmalek	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/... /2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons avant tout à remercier notre Bon
Dieu tout Puissant de nous avoir donné le
Courage, la force et de la volonté pour achever ce Travail.
Nous voulons particulièrement remercier notre encadreur, monsieur
Pr.BENARIOUA Younes pour nous avoir encadrés, Dirigé
et conseillé.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres
de jury, pour juger notre travail.

Nos remerciements tous l'équipe de service de
l'unité d'**ALGAL+** de M 'sila.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	I
CHAPITRE I : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	
INTRODUCTION	2
I. 1 FABRICATION DALUMINIUM	2
I. 2 ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	3
I. 3 UTILISATION	4
I. 4 CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	4
I.4.A) LES ALLIAGES SANS DURCISSEMENT STRUCTURAL (ALLIAGES NON TREMPANT)	5
I.4.B) LES ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL.....	5
I.4.C) LES ALLIAGES CORROYES.....	5
I.4.D) LES ALLIAGES DE FONDERIE.....	5
I.4.E) ALLIAGES OBTENUS PAR METALLURGIE DES POUDRES.....	6
I.4.F) ALLIAGES DE MOULAGE.....	6
I. 5 LES DIFFERENTES SERIES D'ALLIAGE D'ALUMINIUM.....	6
I. 6 LES PRINCIPALES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM.....	8
I. 7 DEFERENTS PROPRIETES D'ALUMINIUM	9
I. 7 A) PROPRIETES MECANIQUES.....	9
I. 7 B) PROPRIETE PHYSIQUE.....	9
I. 7. C) PROPRIETE CHIMIQUE	9

CHAPITRE II TRAITEMENT DES ALLIAGES D'ALUMINIUM PAR ANODISATION

II.1. INTRODUCTION	12
II. 2 LE PROCESSUS D'ANODISATION.....	13
II. 3. L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 6063.....	16
II.3. 1. CARACTERISTIQUES GENERALE 6063.....	16
II. 4 PRINCIPE DE L'ANODISATION.....	16
II .5 ANODISATION DE TYPE BARRIERE.....	18
II. 6 ANODISATION DE TYPE POREUX.....	18
II. 7. PRETRAITEMENT ELECTROLYTIQUE OU CHIMIQUE.....	20
II .7.1. POLISSAGE ELECTROLYTIQUE.....	20
II .7. 2. DECAPAGE CHIMIQUE.....	20
II. 7.3. DEGRAISSAGE.....	21
II 7.4. SATINAGE.....	22
II 7.5. BLANCHIMENT.....	22
II.7.6. RINÇAGE.....	23
II.7.7. SECHAGE.....	24
II.7.8. PRINCIPE DU COLMATAGE.....	25
II. 8. CARACTERISTIQUES DES COUCHES ANODIQUES.....	26
II 8. 1 EPAISSEUR.....	27
II 8. 2 RESISTANCE A L'ABRASION.....	27
II 8. 3 RESISTANCE THERMIQUE.....	27
II 8. 4 RESISTANCE A LA CORROSION.....	27

CHAPITRE III PROCEDERES EXPERIMENTALES RESULTAT ET DISCUSSIONS

III.1- PROCEDERES EXPERIMENTALES.....	29
III.1.1. INTRODUCTION.....	29
III.1.2. MATERIAUX ETUDIES.....	29
III.1.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	30
III.1.4. TECHNIQUES D'ANODISATION.....	30
III.1.5. MESURE DE L'EPAISSEUR DE LA COUCHE D'ANODISATION.....	31
III.1.6. CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE.....	32
III.1.6.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	32
III.1.6.2. POLISSAGE.....	33
III.1.6.3. ATTAQUE CHIMIQUE.....	33
III.1.6.4. ANALYSE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE.....	34
CARACTERISATION MECANIQUE	
III.1.6. 1. TEST DE DURETE.....	35
III.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	37
III.2.1. STRUCTURE METALLOGRAPHIQUE.....	37
III.2.2. EPAISSEUR DE LA COUCHE D'ANODISATION.....	40
III.2.3. DURETE.....	40
III.3. CONCLUSION.....	42
CONCLUSION GENERALE	44
BIBLIOGRAPHIE REFERENCES.....	45
RESUME.....	48

LISTE DE FIGURES

FIGURE I.1 PROCEDE DE FABRICATION DE L'ALUMINIUM.....	3
FIGURE. II.1 UNE COUCHE D'OXYDES EN SURFACE.....	12
FIGURE. II.2 LE PROCESSUS D'ANODISATION.....	13
FIGURE. II.3 BAIN DE L'ANODISATION	13
FIGURE. II.4 ANODISATION DE L'ALUMINIUM.....	16
FIGURE II.5 : DENSITE DE PIQUES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR D'ANODISATION SUR UN ALLIAGE 1100 EXPOSE 8.5 ANNEES EN ATMOSPHERES INDUSTRIELLE.....	17
FIGURE. II.6: VARIATION DU COURANT D'ANODISATION EN FONCTION DU TEMPS.....	18
FIGURE II- 7 : A) REPOSE EN TENSION OU EN DENSITE DE COURANT POUR UNE ANODISATION DE TYPE POREAUX.....	19
B) REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA CROISSANCE D'UNE COUCHE ANODIQUE DE TYPE POREUX.....	19
FIG. II.8 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE EN COUPE D'UNE COUCHE ANODIQUE POREUSE.....	20
FIGURE II.9 L'OPERATION DE DEGRAISSAGE.....	22
FIGURE II.10 : SORTIE DE PROFILS DU BASSIN D'ACIDE SULFURIQUE.....	23
FIGURE II. 11 : OPERATION DE RINÇAGE.....	24
FIGURE II. 12 : PLAN D'AVANT ET APRES L'ANODISATION.....	24
FIGURE II.13: MECANISME DE COLMATAGE A L'EAU BOUILLANTE D'UNE COUCHE ANODIQUE	25
FIGURE II. 14 : TECHNIQUE DE COLMATAGE.....	26

FIGURE CHAPITRE III

FIGURE III.1: MACHINE DE COUPE A FROID.....	30
FIGURE III.2: APPAREIL DE MESURE D'EPaisseur D'OXYDE.....	32
FIGURE III .3: ECHANTILLONS MONTES POUR LE POLISSAGE.....	32
FIGURE III.4: POLISSEUSE MECANIQUE UTILISEE.....	33
FIGURE III.5 : MICROSCOPIE OPTIQUE UTILISE CONNECTER A UN ORDINATEUR	
FIGURE III. 6. MICRODUROMETRE UTILISE.....	36
FIGURE III.7: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ESSAI DE VICKERS.....	37
FIGURE III.8 : MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE ANODISE POUR DEUX TEMPS DE MAINTIEN (5) MIN ET (10) MIN.....	38
FIGURE III.9: MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE ANODISE POUR TEMPS DE MAINTIEN (15) MIN ET (20) MIN	39
FIGURE III.10 : EMPREINTES DE DURETE SUR L'ECHANTILLON ANODISE (COUCHE-SUBSTRAT).....	42

LISTES DES TABLEUX

TABLEAU I.1 LES SERIES D'ALLIAGE D'ALUMINIUM	6
TABLEAU II.1 INFLUENCE DE LA NUANCE D'ALLIAGE D'ALUMINIUM.....	15
TABLEAU III.1 COMPOSITION CHIMIQUE DES DEUX ALLIAGES D'ALUMINIUM...29	
TABLEAU III.2 : LES DIFFERENTES ETAPES DE L'ANODISATION AINSI LES PARAMETRES UTILISES POUR CHAQUE ETAPE.....	31
TABLEAU III. 3 : EPAISSEUR DE LA COUCHE D'ANODISATION.....	40
TABLEAU III.4 : VALEURS DE DURETE AVANT ET APRES L'ANODISATION SOUS 200 G.....	41

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'aluminium et ses alliages ont acquis depuis le milieu du XX^{ème} siècle, une place importante dans un certain nombre de domaines tels que le conditionnement alimentaire (canettes de boissons, emballages,...), le transport (automobile et plus particulièrement aéronautique) et dans les constructions des bâtiments (notamment les profilées) leur grande résistance à la corrosion dans les atmosphères naturelles, les solutions aqueuses et dans d'autres environnements, a permis à ces derniers d'acquérir une grande importance technologique. La mise en forme facile de l'aluminium et ses alliages et leur faible densité ont en fait des matériaux de choix pour ces diverses applications.

Pour assurer la tenue à la corrosion, il n'est d'autre moyen pour protéger ces éléments ou ces pièces que de les revêtir d'une couche protectrice, c'est en particulier le rôle de l'anodisation qui permet de développer des couches d'oxyde d'épaisseur bien plus importante que celle de la couche d'alumine qui se forme naturellement à la surface de ces alliages.

L'anodisation est un procédé qui consiste à produire un dépôt d'oxyde sur la surface d'un métal en utilisant l'électricité. La pièce est habituellement immergée dans un bain d'acide où un courant électrique circule entre la pièce (qui sert d'anode) et une cathode. Cela entraîne la formation d'une couche d'oxyde sur la surface de la pièce à traiter. Cette couche d'oxyde, plus dure que le métal de base, possède une épaisseur habituellement de l'ordre de 5 à 70 micromètres dépendamment du procédé utilisé. Elle permet de mieux protéger le substrat contre l'usure et la corrosion.

Dans ce mémoire, composé de trois chapitres, l'étude de notre travail sur traitement des alliages d'aluminium 6061 et 6063 par anodisation. Ce traitement a été effectué à l'unité d'ALGAL+ à la zone industrielle de M'sila. Cette dernière a produit aussi des alliages de type 6060 local par un système de recyclage de certains déchets de l'unité et matériau importé.

Le mémoire de ce travail comporte deux parties théorique et expérimentale. Ces parties regroupent trois grands chapitres dont :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur l'aluminium et ses alliages, les différentes séries d'aluminium ont été mentionnées en détail, et parmi ces séries nous avons retenu deux types d'alliages d'aluminium qui appartiennent à la série 6000.

Le deuxième chapitre présente une étude de Traitement des alliages d'aluminium par anodisation

Le troisième chapitre présente d'une part la procédure expérimentale effectuée concernant la préparation des substrats, revêtement des couches d'alumine et d'autre part la présentation des résultats avec une discussion sur les effets des paramètres choisis sur l'épaisseur et les propriétés des couches d'anodisation.

Nous terminerons notre étude par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques dans le cas général traduisant l'actualité du sujet proposé et étudié.

CHAPITRE I

ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

INTRUCTION :

L'aluminium est un élément du III^{-ème} groupe de la classification de Monde, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique 26,98 (environ 27). L'aluminium possède un réseau cubique à faces centrées à équidistance : $a = 4,0412 \text{ \AA}$, sa caractéristique la plus importante est la faible densité $2,7 \text{ g/cm}^3$ (celle du fer $7,8 \text{ g/cm}^3$ et celle du cuivre 9 g/cm^3). L'aluminium représente environ 7,5 % en masse dans l'écorce terrestre.

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 qu'il présente :

- Légèreté et bonne résistance, ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne conductivité de chaleur et d'électricité.
- Bonne tenue à la corrosion grâce à la formation en surface d'une pellicule très fine, $\approx 0,7 \text{ \mu m}$, et très résistante de Al_2O_3 , (plus l'aluminium est pur plus sa tenue à la corrosion est élevée).

L'aluminium, en contact avec l'oxygène de l'air, forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 qui protège le métal contre les attaques chimiques. Cette pellicule est non soluble dans l'eau, donc l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et il est très utilisé surtout dans l'industrie chimique et alimentaire.

- Possibilité facile de déformation et de soudage.

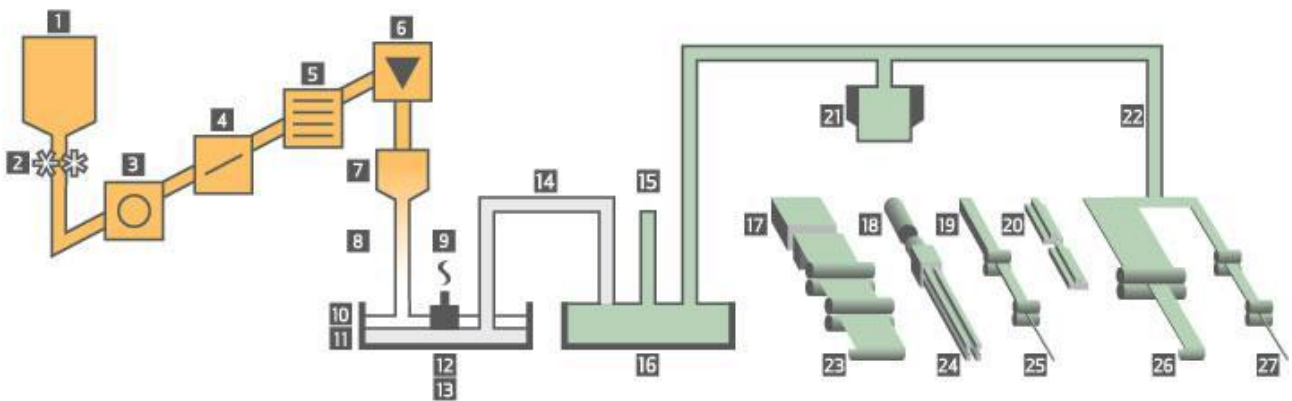
I – 1 FABRICATION DALUMINIUM

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un métal pauvre, malléable, de couleur argentée, qui est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. L'aluminium est trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel : on le trouve au contraire sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, son **mineraï** principal étant la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine.

L'alumine est extraite de la bauxite qui est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium, est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode)

UN PROCÉDÉ DE FABRICATION MULTIDIMENSIONNEL



ALUMINIUM DE PREMIÈRE FUSION

ALUMINIUM DE DEUXIÈME FUSION

EXTRACTION DE L'ALUMINE À PARTIR DE BAUXITE	PROCÉDÉ D'ÉLECTROLYSE TRANSFORMANT L'ALUMINE EN ALUMINIUM	FONDERIE/RECYCLAGE ET TRANSFORMATION DE L'ALUMINIUM
1 BAUXITE	8 ALUMINE	15 MÉTAUX D'ALLIAGE
2 BROEUR	9 ANODE	16 FOUR D'ATTENTE
3 AUTOCLAVE	10 ÉLECTROLYTE EN FUSION	17 LINGOT DE LAMINAGE
4 DÉCANTEUR	11 ALUMINIUM DE FUSION	18 LINGOT D'EXTRUSION
5 FILTRE-PRESSE	12 CATHODE	19 LINGOT DE TRÉFILAGE
6 DÉCOMPOSEUR	13 CUVE D'ÉLECTROLYSE	20 LINGOT DE REFONTE / FONDERIE
7 FOUR DE CALCINATION	14 ÉTAUX D'ALLIAGE	21 COULÉE EN LINGOTS
		22 COULÉE EN CONTINU
		23 TÔLE
		24 PROFILÉS
		25 FIL MACHINE
		26 TÔLE
		27 FIL MACHINE

FIGURE I 1 : procédé de fabrication de l'aluminium

I – 2 ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM

Bien que l'aluminium soit parfois utilisé tel quel, on lui ajoute généralement de petites quantités d'autres métaux pour obtenir des alliages aux propriétés particulières. L'aluminium produit est utilisé en grande partie (85 à 90 %) pour la fabrication d'alliages (Alpax, Duralumin). Certains éléments d'alliage augmentent la résistance mécanique ou la résistance à la corrosion. D'autres améliorent l'aptitude à l'usinage, la malléabilité, la soudabilité et la résistance aux températures élevées.

Des exemples

- Les canettes d'aluminium sont faites d'un alliage renfermant du magnésium et du manganèse, qui leur procurent plus de résistance et plus de malléabilité

- L'aluminium augmenté de magnésium et de silicium a une résistance améliorée à la corrosion, ce qui en fait un matériau apprécié pour les portes et les cadres de fenêtres et pour les bateaux de plaisance

-L'ajout de cuivre et de zinc à l'aluminium produit des alliages d'une résistance mécanique remarquable. L'ajout de chrome, de manganèse et de titane à l'aluminium modifie la dimension des grains du métal

Dans le domaine de l'architecture, qui exige des surfaces alliant esthétique et résistance à la corrosion, on emploie des alliages aluminium-magnésium-silicium L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles.

L'amélioration des caractéristiques mécaniques de l'aluminium est possible en agissant non seulement sur la composition chimique par ajout d'éléments d'alliages définissant ainsi les huit grandes familles d'alliages industriels (Tableau I.1), mais aussi dans certains cas en effectuant des traitements thermiques

I -3 UTILISATION :

L'aluminium est un excellent matériau d'emballage, en raison de son innocuité, de son imperméabilité et de son opacité aux rayons ultraviolets. Il est surtout utilisé dans la fabrication de profilés laminés : cornières, profils en U, en double T, tubes de sections ronde ou rectangulaire une grande quantité d'alliages d'aluminium est dépensée à la fabrication de rivets et de boulons dans le bâtiment, l'aluminium présente de nombreux atouts en termes de développement durable :

- sa légèreté permet d'alléger les structures,
- la rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des réalisations techniques performantes pour longtemps : profilés à coupure thermique, fenêtres ou menuiseries durablement étanches, garantissant une parfaite isolation thermique et acoustique, **intégration** aux façades de châssis de panneaux solaires pour la production d'électricité renouvelable, etc.

I – 4 CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les alliages d'aluminium sont classés de plusieurs manières : [1].

- Alliage corroyés et alliage de fonderie ;
- Alliage à durcissement structural et alliage sans durcissement ;
- Classification suivant la nature de l'addition principale ;
- Classification suivant les domaines d'utilisation, ...etc.

I - 4 -a) LES ALLIAGES SANS DURCISSEMENT STRUCTURAL (ALLIAGES NON TREMPANT) :

Dans ces alliages le durcissement est obtenu par l'effet combiné des éléments d'addition (durcissement par solution solide) et de l'écroutissage. Si on combinant l'effet de durcissement par écroutissage et l'effet d'adoucissement par traitement de restauration ou de recuit on obtient pour chaque alliage une plage étendue de dureté allant de l'état recuit O à plasticité maximale et résistance mécanique minimale jusqu'à l'état extra dur H19 à résistance maximale mais plasticité minimale. Ils regroupent les familles suivantes:[2].

- Série 1000 : Aluminium pur
- Série 3000 : Alliages aluminium –manganèse
- Série 5000 : Alliage aluminium- magnésium

I -4 - b) LES ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL

Ce sont les alliages trempant qui sont des familles suivantes :

- Série 2000 : Alliage aluminium –cuivre ;
- Série 4000 : Alliage aluminium –silicium ;
- Série 6000 : Alliage aluminium –magnésium-silicium ;
- Série 7000 : Alliage : aluminium –zinc –magnésium (soit avec cuivre ou sans cuivre).

I -4 - c) LES ALLIAGES CORROYES

Le corroyage est une déformation à chaud : après la coulée de ces alliages en plaques ou billettes, ils subissent une transformation à chaud par laminage, filage, forgeage, matriçage...etc.

Les principales propriétés de ces alliages sont une bonne résistance mécanique, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue (efforts alternés), résistance aux multiples formes de corrosion, conductibilité électrique Le corroyage est défini par le rapport S/s avec :

S : section avant déformation

s : section après déformation.

Le corroyage diffère de l'écroutissage en ce sens que ce dernier est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée [2].

I – 4 -d) LES ALLIAGES DE FONDERIE

Les alliages de fonderie sont obtenus en fondant les lingots et en le coulant dans des moules ayant les formes désirées du produit final. Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont très différentes de celles d'un alliage corroyé. Ces alliages ne subissent pas les déformations plastiques, leurs propriétés découlent donc des opérations de fonderie. Les alliages d'aluminium de fonderie ont des teneurs plus élevées en éléments d'alliages. Ce qui permet,

dans la mesure du possible, d’obtenir une proportion non négligeable d’eutectique, d’abaisser leur point de fusion et diminuer leur intervalle de solidification [1].

I – 4 -e) ALLIAGES OBTENUS PAR METALLURGIE DES POUDRES

La technique du frittage est très prometteuse pour l’obtention d’alliages d’aluminium à Performances élevées et à faible coût. Elle comprend comme étapes la préparation de mélanges, dégazage et compression à basse ou haute température suivie d’un frittage (consolidation) et mise en forme [2].

I – 4 -f) ALLIAGES DE MOULAGE

Ce sont des alliages coulés dans des moules et obtenus, généralement, à l’état fini ou semi-fini. Ils ne subissent donc pas de déformation importante mais présentent d’autres qualités : bonne coulabilité, faible retrait à la solidification, etc. Une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé refondu [2].

I – 5 LES DIFFERENTES SERIES D'ALLIAGE D'ALUMINIUM

Tableau I.1 les séries d’alliage d’aluminium

Série	Principaux éléments d’alliage	Etendue de la teneur (% massique)
1000	Aucun	-
2000	Cuivre	2 à 6
3000	Manganèse	0,5 à 1,5
4000	Silicium	0,8 à 1,7
5000	Magnésium	0,5 à 5
6000	Magnésium et silicium	-
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 à 7 Mg : 1 à 2
8000	Fer et silicium	Fe : 0,6 à 2 Si : 0,3 à 1

Parmi ces différentes séries d’alliages d’aluminium, certaines sont plus utilisées pour les constructions aéronautiques et spatiales : ce sont les alliages des séries 2000 et 7000. Les principaux critères de choix pour ce domaine d’application sont : la légèreté, les caractéristiques mécaniques, la mise en forme, l’usinage.

Série 2000

Les alliages de la série 2000, à durcissement structural, forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par : une résistance mécanique relativement élevée à l'état trempé revenu, une bonne tenue à chaud mais une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive. Les teneurs massiques en cuivre des alliages de la série 2000 sont comprises généralement entre 2 et

6 %. Les teneurs massiques en magnésium peuvent varier de 0,3 à 1,5 %. Le durcissement structural de ces alliages est dû à la précipitation de composés transitoires Al_2Cu et $CuMgAl_2$ [3-5]. Ces phases leur confèrent de bonnes propriétés mécaniques.

Dans la famille d'alliages de la série 2000, on distingue l'alliage 2214 dont les principaux avantages résident dans sa résistance mécanique relativement élevée à l'état T6 et son bon comportement en fatigue [3] sous réserve d'une élaboration et d'un traitement dans l'état solide adéquat. Les analyses EDX au MEB de l'alliage 2214-T6 révèlent trois types de précipités dit "hors solution") [6] :

- les précipités aux formes allongées dont la taille peut varier entre 3 et 40 μm ($-Al_2Cu$),
- les précipités aux formes irrégulières dont la taille peut atteindre 30 μm , qui sont riches en Al, Mn, Fe, Cu et Si
- Les précipités sombres de Mg_2Si .

Les analyses MET révèlent :

- des précipités sous forme d'aiguilles d'une longueur comprise entre 25 et 50 nm, riche en Al et Cu ; il s'agit probablement de la phase durcissante $-Al_2Cu$ ou $S-(Al_2CuMg)$
- des précipités de forme ronde au sein de la matrice de diamètres compris entre 100 et 200nm ; ces derniers sont riches en Al, Mn, Si, et Cu.

Série 3000 :

C'est un alliage au manganèse qui conserve une bonne durabilité dans une atmosphère marine ou dans l'eau de mer.

Série 4000 :

Composé d'aluminium et de silicium, cet alliage est principalement utilisé comme métal d'apport lors du soudage.

Série 5000 :

Cet alliage d'aluminium et de magnésium, d'un coût relativement élevé, présente une exceptionnelle résistance à la corrosion, surtout à l'eau de mer qui en fait tout l'intérêt, malgré une qualité mécanique somme toute assez moyenne.

Série 6000 :

Au composé précédent de la série 5000, aluminium et magnésium, il suffit d'ajouter un peu de silicium comme additif secondaire pour obtenir l'alliage léger le plus couramment employé en application structurale. Après un traitement thermique de trempé puis de revenu, ces métaux présentent une bonne résistance mécanique, une remarquable inertie chimique vis-à-vis

d'agents corrosifs divers et une soudabilité très correcte. Il faut toutefois noter une chute notable de résistance à même le cordon de soudure.

Série 7000

De tous les alliages d'aluminium, ceux de la série 7000 présentent, après traitements thermiques, les meilleures propriétés mécaniques. Leur teneur massique en zinc varie généralement de 5 à 7 % et en magnésium de 1 à 3 % [3-4-6].

Les alliages de la série 7000 comprennent différentes sous-familles : les alliages avec cuivre (Al-Zn-Mg-Cu) auxquels appartient l'alliage 7050, et les alliages sans cuivre (Al-Zn-Mg). Les alliages à haute résistance mécanique (Al-Zn-Mg-Cu) ont été spécialement mis au point afin de présenter différents compromis de propriétés suivantes : résistance mécanique fonction de l'épaisseur des produits en agissant sur les éléments d'addition principaux et secondaires ; résistance à la corrosion sous tension en jouant sur les traitements thermiques T6, T76, T74, T73 ; ténacité et comportement en fatigue en ajustant les teneurs de certains éléments d'addition secondaire (Fe, Si) et en optimisant les traitements thermiques [3-5].

En ce qui concerne l'alliage 7050-T74, les analyses EDX réalisées au MEB ont permis d'identifier les précipités hors solution : [6]

- les précipités en forme de bâtonnet dont la longueur peut varier entre 2 et 10 μ m principalement composés d'Al, Cu et Fe (Al_7Cu_2Fe),
 - les précipités aux formes arrondies dont la taille varie de 6 à 20 μ m riches en Al, Cu, Mg et Zn en plus faible proportion (Al_2CuMg),
 - les précipités aux formes arrondies d'une taille moyenne de 4 μ m, apparaissant en sombre, riches en Mg et Si (Mg_2Si).
- Les analyses MET ont permis d'identifier les précipités durcissant comme étant la phase ζ - $MgZn_2$.

De façon générale, les alliages d'aluminium contenant un pourcentage en cuivre assez élevé présentent une mauvaise tenue à la corrosion en atmosphère corrosive. Pour cela, on a souvent recours aux traitements de surface que sont : PVD, CVD..

I – 6 LES PRINCIPALES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM SONT :

- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité
- Faible masse volumique : 2,7 kg/dm³
- Point de fusion : 658° C
- Faible module d'Young : 70000 N/mm² 70000 Mpa 7000DaN/mm²
- Faible limite élastique
- Fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)
- Bonne conductibilité (67 % de celle du cuivre).

I – 7 DEFERENTS PROPRIETES D'ALUMINIUM**I -7 – A PROPRIETES MECANIQUES****RESISTANCE**

L'alliage dont les possibilités mécaniques se rapprochent le plus de celles de l'acier est un composé d'aluminium additionné de silicium et de magnésium, qui offre une limite élastique de 190 à 280 MPa, tout à fait comparable à celle de l'acier « doux » (série 6000, alliage 6060, 6063). Cette limite, assez élevée, est obtenue par trempe suivie d'un revenu (état T5 ou T6), opération qui réduit assez sensiblement le domaine plastique puisque la rupture se produit vers 300 MPa, ce qui est peu dans la mesure où l'acier ne se rompt qu'à 450 MPa.

L'allongement est alors de 10 % environ, bien inférieur à celui de l'acier qui avoisine 25 %. On en conclut que si la performance mécanique atteint celle de l'acier, c'est tout de même au prix d'une baisse des qualités élasto-plastiques.

Il existe également des séries super-résistantes atteignant 400 MPa, de limite élastique à l'état T5 ou T6, et d'autres aux performances mécaniques plus modestes comme les alliages 5000 dont la limite élastique est d'environ 100 MPa

Élasticité

Le module élastique de l'aluminium et de ses alliages est pratiquement le même, égal à 70 GPa. Il est donc environ trois fois plus faible que celui de l'acier (200 GPa), autrement dit, les flèches des éléments d'alliages légers sont trois fois celles des éléments acier soumis aux mêmes charges.

I – 7 – B PROPRIETE PHYSIQUE

L'aluminium a une densité de 2,7 c'est-à-dire environ trois fois plus faible que celle de l'acier ou du cuivre.

L'aluminium pur est malléable (le second parmi les métaux) et ductile (le sixième parmi les métaux). Les alliages d'aluminium pour corroyage et pour fonderie ont des propriétés mécaniques améliorées par rapport à l'aluminium pur, tout en restant facilement usinables et modulables.

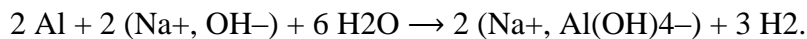
Les produits en aluminium, lorsqu'ils ne sont pas traités en surface, ont un aspect visuel argent-gris. Cette coloration est en partie due à une mince couche d'oxyde (alumine) de cinq à dix nanomètres qui se forme spontanément et rapidement dans un milieu oxydant comme l'oxygène de l'air. Dans des conditions normales d'exposition chimique, cette couche protectrice limite les différentes formes de corrosion (corrosion par piqûres, filiforme, feuille tante, galvanique, corrosion sous contrainte). Il est possible d'augmenter artificiellement l'épaisseur de cette couche d'oxydation — tout en donnant une teinte colorée — par anodisation, ou d'améliorer la résistance à la corrosion à l'aide d'autres traitements de surface l'aluminium est un très bon conducteur électrique et thermique, contrairement à son oxyde qui est un excellent isolant. Il est paramagnétique et ne provoque pas d'étincelles.

L'aluminium est transparent aux neutrons, et devient transparent aux rayons ultraviolets extrêmes lorsqu'il est bombardé par un laser à électrons libres [7]

I – 7 C PROPRIETE CHIMIQUE

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions Al^{3+} . Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine Al_2O_3 . L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de l'aluminium avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (soude) produit de l'aluminate de sodium et de l'hydrogène gazeux, selon une réaction exothermique d'équation :



Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations Al^{3+} à l'aide d'une base. Cette méthode permet de former selon les conditions de précipitation différentes phases cristallographiques telles que la bayérite, la boehmite, la gibbsite.

L'aluminium est aussi utilisé en tant que réducteur fort, notamment pour l'aluminothermie et en pyrotechnie dans les feux d'artifice, où il joue un rôle similaire au magnésium, à moindre coût et avec une puissance plus grande. [8]

CHAPITRE II
TRAITEMENT DES
ALLIAGES
D'ALUMINIUM
PAR ANODISATION

CHAPITRE II : TRAITEMENT DES ALLIAGES D'ALUMINIUM PAR ANODISATION

II – 1 INTRODUCTION

L'anodisation des alliages d'aluminium est pratiquée pour améliorer les performances fonctionnelles des pièces. En effet, l'aluminium non protégé réagit avec son environnement, quel que soit le milieu dans lequel il se trouve (sol, eau atmosphère, produit chimique, aliment, ...). C'est pourquoi une protection de surface est souvent nécessaire. L'anodisation permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques et physiques : augmentation de la dureté superficielle, tenue à l'abrasion améliorée, résistance à la corrosion, ... et coloration des pièces

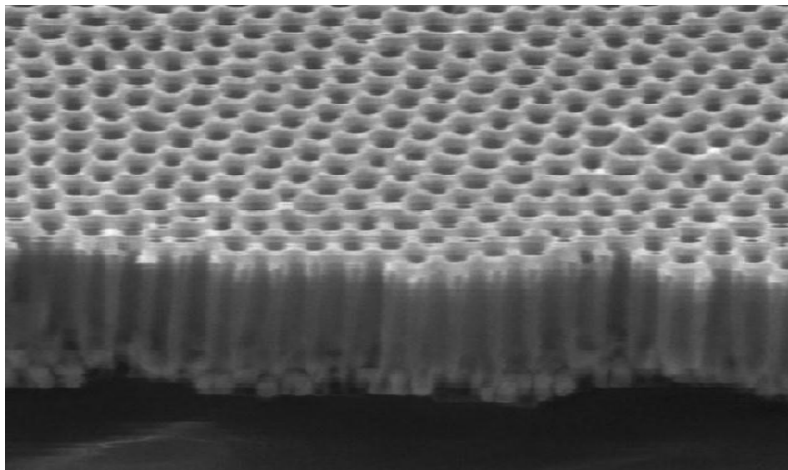


Fig.II.1 Une couche d'oxydes en surface

L'opération d'anodisation forme une couche d'oxyde superficielle en modifiant chimiquement la surface de l'aluminium à partir d'une réaction électrochimique d'oxydation de l'aluminium. La couche d'oxyde d'aluminium est constituée d'alumine poreux (Al_2O_3). Ses caractéristiques sont intimement liées à la nature de l'alliage d'aluminium, qui compte pour beaucoup dans le résultat final du traitement et aux paramètres utilisés lors de l'anodisation (densité de courant, tension, temps de traitement, température ou type de solution utilisée).

La couche d'oxyde poreuse (pores d'une centaine d'Angstrom) permet aussi de faire des traitements supplémentaires. Les pores de la couche anodisée ont une structure hexagonale. L'épaisseur de la couche d'oxyde pour l'anodisation standard est de 1 à 25 microns environ selon le type d'anodisation et la durée de traitement.

II – 2 LE PROCESSUS D'ANODISATION

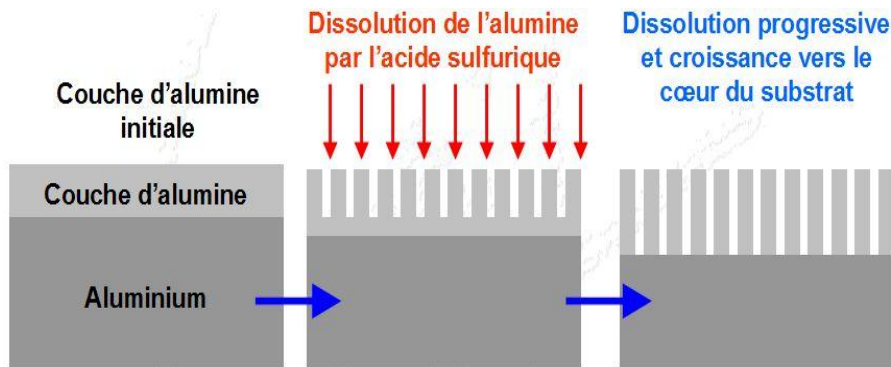


Fig. II.2 Le processus d'anodisation

Le processus d'anodisation d'une pièce comporte plusieurs étapes : une préparation mécanique de la surface des pièces (avant anodisation) puis l'installation des pièces à traiter sur un support, le nettoyage des pièces, l'anodisation proprement dite puis en fonction des caractéristiques recherchées, la réalisation si besoin d'une coloration et le colmatage final.

II -3 LES DIFFERENTS TYPES D'ANODISATION



Fig. II.3 bain de l'anodisation

Plusieurs milieux chimiques peuvent être utilisés pour l'anodisation : l'acide chromique, l'acide oxalique, l'acide phosphorique et l'acide sulfurique. L'oxydation obtenue avec l'acide chromique est de faible épaisseur mais la couche d'oxyde est excellente. Si de l'acide reste présent dans les fentes, il n'y a aucune corrosion, contrairement à l'acide sulfurique. Son coût plus élevé que celui de l'acide sulfurique et surtout ses contraintes environnementales plus grandes sont des freins à son utilisation et ont conduit à sa disparition. L'anodisation borique-sulfurique constitue une alternative à l'anodisation chromique. Relativement coûteux, l'acide oxalique n'absorbe pas de colorant et donne des tons jaunâtres selon les alliages. La couche d'oxyde obtenue ne dépasse pas 10 microns. Pour une épaisseur donnée, la résistance à l'abrasion est le double de celle obtenue avec l'acide sulfurique. Cet acide est utilisé lorsque des pores plus larges que ceux obtenus avec l'acide sulfurique sont requis. La couche d'oxyde ne dépasse pas 6 microns ; cela est dû à la grande solubilité de la couche d'oxyde dans l'acide.

La solution d'anodisation de loin la plus utilisée est à base d'acide sulfurique (OAS pour Oxydation Anodique Sulfurique). C'est la moins onéreuse et la plus versatile. Le procédé d'anodisation est simple. Les pièces d'aluminium faisant office d'anodes sont placées en face de cathodes. Le tout est immergé dans un bassin qui contient la solution servant d'électrolyte. Lorsque le courant est enclenché entre anodes (pièces à anodiser) et cathodes, une réaction électrochimique forcée s'amorce. Cette réaction ne dépose aucun métal en surface. C'est l'aluminium de la pièce qui va réagir avec les molécules d'eau de la solution pour former une couche d'alumine selon la réaction suivante :

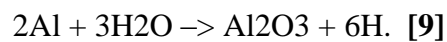


Tableau II.2 Influence de la nuance d'alliage d'aluminium

Alliage	Protection	Coloration
Al 99.5	excellente	excellente
Al Si10Cu2Fe	acceptable	pas souhaitable
Al Si5Cu3	bonne	acceptable
Al Mg5	excellente	excellente
Al Si12	acceptable	pas souhaitable
Al Si12Mg	acceptable	pas souhaitable
Al Mg10	excellente	acceptable
Al Cu10Si2Mg	acceptable	acceptable
Al Si11MgCu	acceptable	pas souhaitable
Al Si5Cu1Mg	bonne	acceptable
Al Si5	bonne	acceptable
Al Si12CuFe	bonne	acceptable
Al Si6Cu4Zn	acceptable	pas souhaitable
Al Si5Cu3Mn	bonne	acceptable
Al Si8Cu3Fe	acceptable	acceptable
Al Si7Mg	bonne	acceptable
Al Si9Cu3Mg	acceptable	pas souhaitable
Al Si7Cu2	bonne	pas souhaitable
Al Si19CuMgNi	pas souhaitable	pas souhaitable
Al Si23CuMgNi	pas souhaitable	pas souhaitable
Al Si17Cu4Mg	pas souhaitable	pas souhaitable

L'anodisation ne permet pas d'améliorer les propriétés de tous les alliages d'aluminium de manière identique. Certains alliages s'anodisent en effet moins bien que d'autres et conduisent à des performances fonctionnelles plus réduites.

L'anodisation offre par exemple une bonne protection à une pièce en aluminium 6063, ainsi que la possibilité de bien la colorer. Le lustre de cette pièce est acceptable et la dureté de sa surface est très bonne. Pour un alliage de fonderie contenant 11 % de silicium, la couche d'oxyde formée lors de l'anodisation offrira une protection acceptable, sans toutefois permettre une coloration de qualité, ni la conservation d'un lustre adéquat. Pour les alliages de fonderie, les nuances AlSi2MgTi et ACu5MgTi offrent les meilleures teintes pour l'anodisation de décoration avec une difficulté de transformation plus importante pour la nuance AlCu5MgTi.

Les alliages à teneur élevée en silicium présentent en effet une aptitude à l'anodisation colorée moindre (teinte grisâtre et sombre). Les résultats de l'anodisation sont satisfaisants sur les alliages d'aluminium faiblement alliés des séries 5000 et 6000. Dans le cas des alliages des séries 2000 et 7000, la présence d'éléments d'alliages, notamment le cuivre et le zinc, peut perturber la croissance et modifier la morphologie des films obtenus.

II. 3. L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 6063:

Cet alliage très demandé appartient à la catégorie des alliages pouvant recevoir un traitement thermique. Avec une structure de grain plus fine que le 6061, l'alliage 6063 présente les meilleures caractéristiques esthétiques après anodisation. Il a une très bonne résistance à la corrosion, une bonne usinabilité et une bonne soudabilité. Il est couramment utilisé pour les tubes cylindriques les conducteurs électriques à barres bus et les applications architecturales.

II.3 .1. CARACTERISTIQUES GENERALE 6063 :

Puisque le produit 6063 est de la famille d'alliage d'aluminium sérié 6000, alors il a des propriétés de l'alliage (aluminium-magnésium-silicium). Alliage pour extrusion directe avec des caractéristiques mécaniques légères.

Il est utilisé dans la menuiserie métallique le bâtiment, l'ameublement e l'automobile.[10]

II – 4 PRINCIPE DE 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 [PECb]. 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 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.

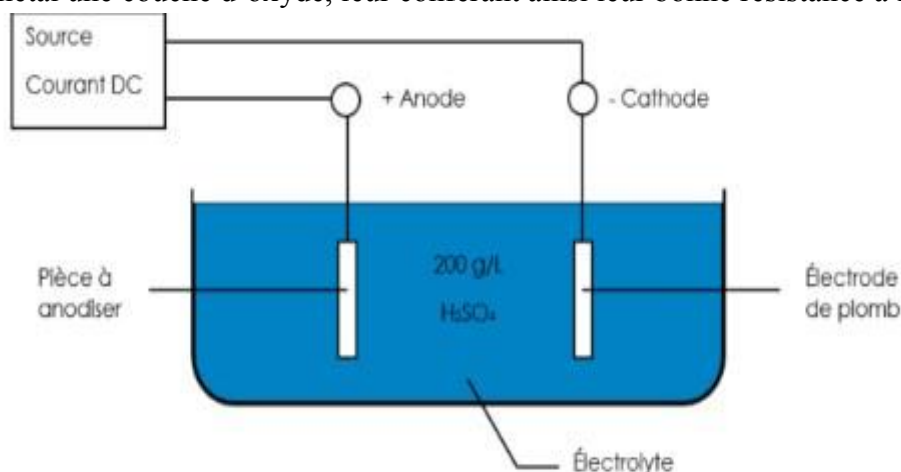
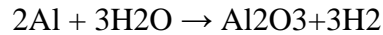
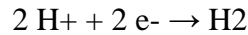


Fig. II.4 Anodisation de l'aluminium

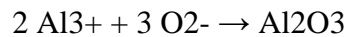
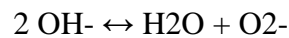
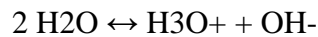
La réaction globale d'oxydation anodique de l'aluminium en milieu acide habituellement avancée:



- 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 [KAW]:



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.

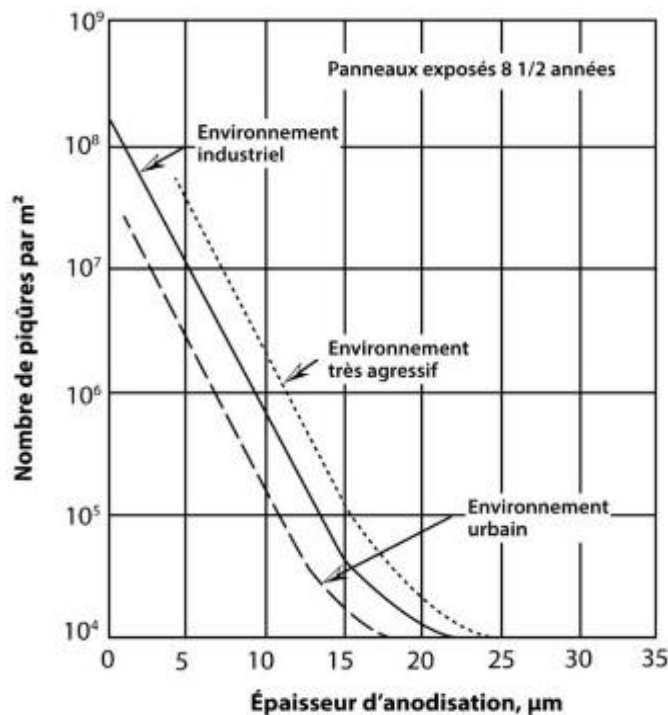


Figure II 5 : Densité de piqûres en fonction de l'épaisseur d'anodisation sur un alliage 1100 exposé 8,5 années en atmosphères industrielles

II -5 ANODISATION DE TYPE BARRIERE

Lorsque l'on procède, à tension donnée, à une anodisation dans un bain électrolytique n'ayant aucune action dissolvante sur le métal ni sur son oxyde (anodisation réalisée dans des solutions à base d'acide borique, d'acide tartrique, d'acide citrique, de tartrate d'ammonium, de phosphate de sodium, de carbonate de sodium), on observe une chute rapide du courant, qui tend vers une valeur nulle (**Fig. II.6**) [10].

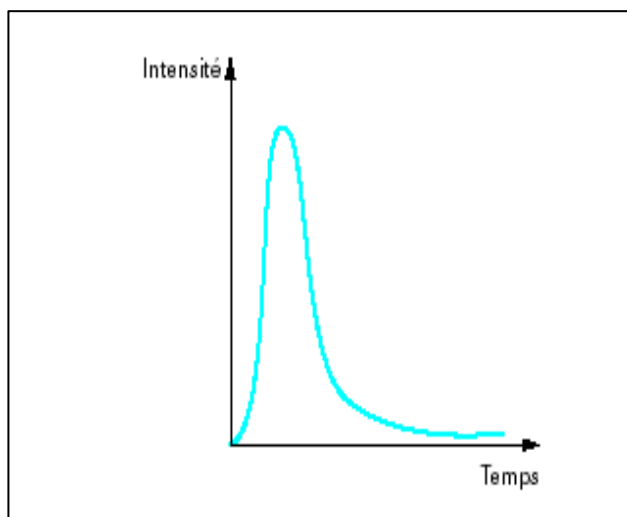


Fig. II.6: Variation du courant d'anodisation en fonction du temps [10]

Sous l'action du courant, les ions O^{2-}/OH^- sont transportés à travers la couche, la croissance du film se réalise à l'interface métal / oxyde. En fonction du milieu (milieu phosphate ou chromate par exemple) la croissance de la couche peut également se réaliser à

l'interface oxyde / solution grâce au déplacement des ions Al^{3+} vers cette interface, avec incorporation dans la couche des anions issus de l'électrolyte [11]. Le caractère barrière tient du fait que cette couche très adhérente se comporte comme un isolant et s'oppose au transfert d'électrons sous sa tension d'élaboration [12]. La couche obtenue est compacte et son épaisseur relativement mince est fonction de la tension d'anodisation U (en volt) appliquée selon la relation : $e \text{ (nm)} = (1,25 \text{ à } 1,4) U \text{ (V)}$.

Cependant, la propriété barrière de la couche n'est obtenue que dans le cas d'aluminium pur. Pour les alliages d'aluminium, les précipités entraînent un courant résiduel non nul qui provoque des défauts dans l'oxyde [13].

II – 6 ANODISATION DE TYPE POREUX

L'action dissolvante de l'électrolyte sur le métal et son oxyde met en compétition deux phénomènes:

- l'élaboration de l'oxyde sous l'action du courant électrique,
- la dissolution chimique de la couche.

Plusieurs modèles et théories ont été avancés pour expliquer la croissance et la morphologie des couches poreuses. Parmi ceux-ci, on en distingue deux qui sont le modèle du pore géométrique connu encore sous le nom de modèle KHR (Keller, Hunter et Robinson) [14] et le modèle du gel colloïdal proposé par Murphy et Michelson et cité en [15]. En intégrant les principaux modèles, il est possible de schématiser le processus comme décrit par les travaux de Parkhutik [16] (Fig.II.7), pour des anodisations réalisées en milieux phosphorique, oxalique et sulfurique [16-17].

- Au point (2) de la courbe $V = f(t)$, il apparaît à la surface de la couche barrière de très nombreux points d'attaque correspondant à un début de dissolution du film par l'électrolyte. Ces points d'attaque seront les amorces des pores.
- Le point (3) (maximum de la courbe) correspond au développement des pores.
- le palier (4) de la courbe correspond à un état stationnaire pendant lequel la croissance poreuse prend un caractère permanent et aboutit à une structure hexagonale.
- Dès les premières secondes de l'électrolyse, il se forme une couche de type barrière qui se traduit par un pic initial de la tension .

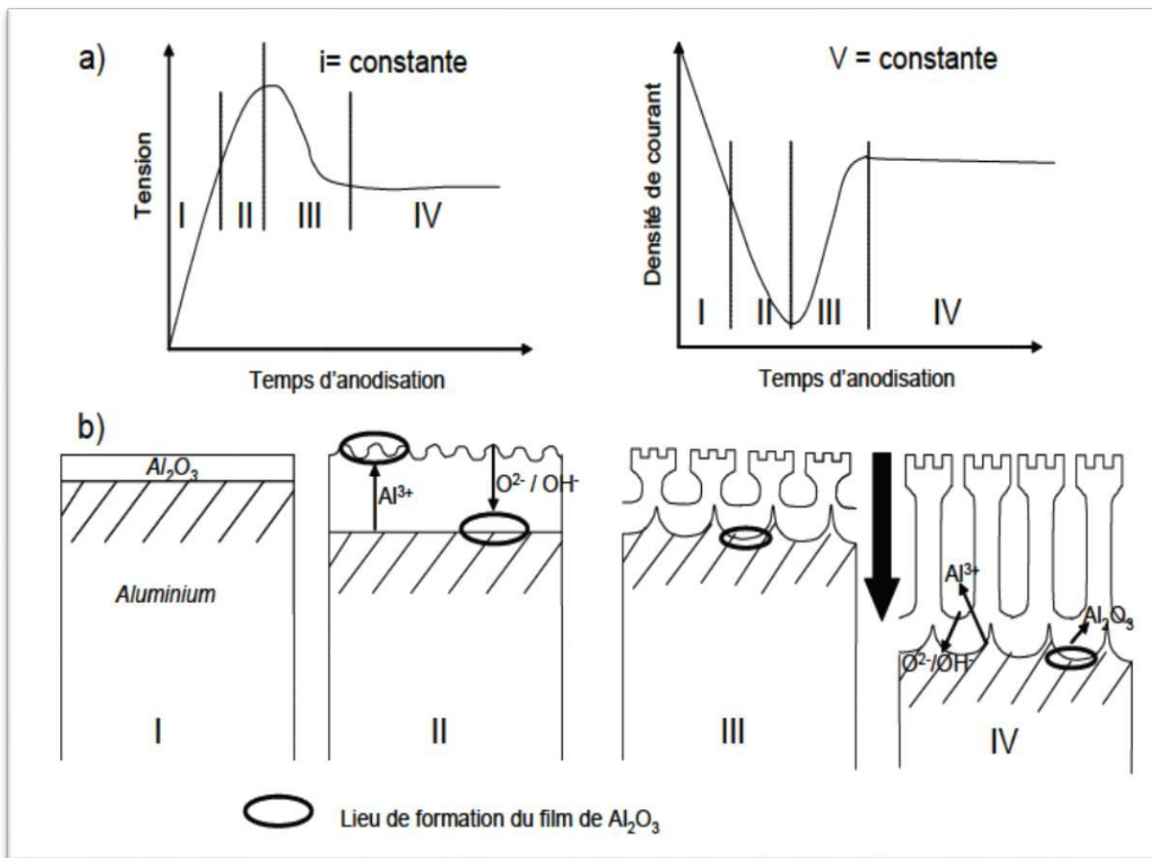


Figure II 7 : a) Réponse en tension ou en densité de courant pour une anodisation de type poreux. b) Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type poreux

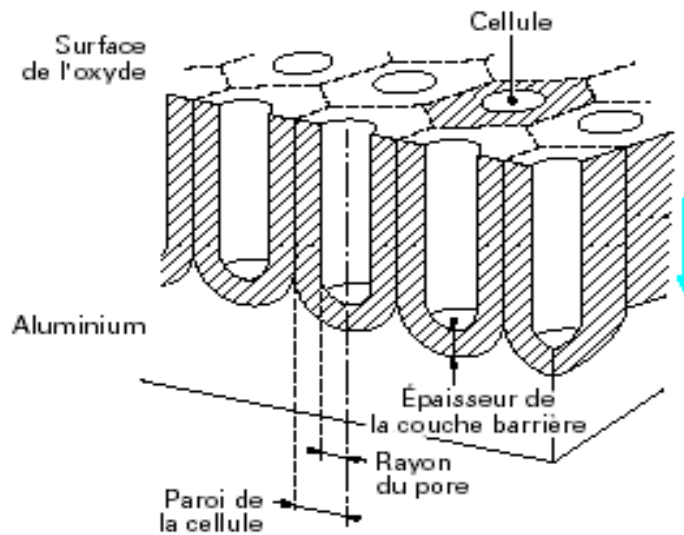


Fig. II.8 : Représentation schématique en coupe d'une couche anodique poreuse

II. 7. PRETRAITEMENT ELECTROLYTIQUE OU CHIMIQUE

II .7.1. POLISSAGE ELECTROLYTIQUE

Le polissage électrolytique est un procédé électrochimique couramment utilisé pour Polir , lisser et nettoyer la surface substrat d'aluminium et ces alliages. Il est souvent utilisé dans des cas dans lesquels des finitions très lisses et très brillantes sont nécessaires. Le polissage électrolytique retire une strate fine de surface. Dans ce processus, le substrat (anode) est immergé dans un électrolyte. Le courant électrique circule entre l'anode et la cathode polarise le substrat et les ions métalliques migrent vers la cathode. On peut contrôler la réaction par l'ajustement des paramètres du bain et du procédé par le choix du métal ou de l'alliage pour le polissage électrolytique. [18-19]

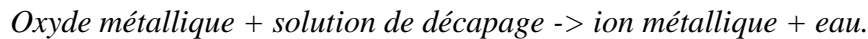
Généralement, dans le polissage électrolytique, on utilise des électrolytes des mélanges de divers acides (sulfurique, chromique, citrique et phosphorique) et parfois des ajouts de composés organiques (tel que de la glycérine ou de l'éther mono butylique dediéthylèneglycol). [20]

II .7. 2. DECAPAGE CHIMIQUE

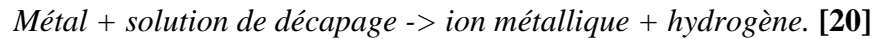
Le décapage chimique est une technique chimique utilisée pour faire enlever le film d'oxyde d'aluminium ou autres produits de la corrosion du substrat de matériaux par réaction chimique avec un agent de décapage à base d'acide. Afin de retirer de manière efficace les couches épaisses d'oxyde, des concentrations spécifiées d'acide (chlorhydriques, sulfuriques, nitrique, fluorhydrique et phosphorique), des températures spécifiées et des durées de décapage spécifiées sont à respecter. [18-19]

La durée de décapage est réduite par l'accroissement de la concentration d'acide l'élévation de la température. Les effets du décapage peuvent également être accélérés par la mise en mouvement du substrat dans la solution de décapage ou par la mise en mouvement de la solution de décapage grâce à l'injection de la solution.

La réaction de décapage est décrite par l'équation chimique suivante :



L'hydrogène est généralement formé :



La concentration des ions du métal dissous s'accroît dans la solution de décapage tandis que la force de l'acier libre décline. La consommation d'acide associé à la dissolution du métal et de l'oxyde métallique peut être compensée par l'ajout d'une solution de décapage neuve. Cependant, cette technique est limitée par l'accroissement continu du contenu métallique. Un contenu maximum de fer de 8 % est recommandé pour l'acide sulfurique, de 12 % pour l'acide chlorhydrique et de 2,5 % pour l'acide phosphorique. Lorsque les concentrations limites sont atteintes, la solution de décapage doit être éliminée complètement ou partiellement [18-19].

La surface à décapage doit être complètement exempte de graisse, autrement, un décapage inégal se produira car l'acide attaquera uniquement les zones exemptes de graisse. L'utilisation d'agents mouillant accélère les processus de décapage car les pièces sont mieux et plus rapidement mouillées [19-21].

II. 7.3. DEGRAISSAGE

Le dégraissage est l'opération d'élimination des souillures organiques qui empêche toute les transformations superficielles. Il peut être un traitement chimique, électrolytique ou ultrasonique et il est effectué pour rendre la surface physiquement propre afin d'assurer le bon déroulement des opérations ultérieures et par là même, de garantir la qualité du produit fini [19-20].

Les dégraissants sont de types suivants :

- Des solvants qui agissent par dissolution des souillures pour des surfaces très grasses. Ils permettent une mise en œuvre simple et un séchage rapide mais n'ont pas d'action sur les souillures solides.
- Des détergents alcalins qui sont composés de sel alcalin, de solvants hydrosolubles et tensio-actifs pénètrent le film de souillures organiques et fixent les particules de gras et les déplacent en émulsion dans le bain de dégraissage.
- Des détergents acides composés d'acide phosphorique, de solvants hydrosolubles et de tensio-actifs. Leur pouvoir détergent est inférieur à celui des détergents alcalins.



Figure II 9 : l'opération de dégraissage.

II 7.4 SATINAGE:

C'est l'opération d'élimination des oxydes d'aluminium et les défauts métallurgiques superficiels, par des réactions électrochimiques où la surface du métal est attaquée par la soude.

II 7.5. BLANCHIMENT

A l'issue de l'opération de satinage, on retrouve en surface satinée des résidus des métaux constitutifs de métal substrat qui forment un dépôt, d'où la nécessité d'un traitement oxydant les métaux, dissolvant les oxydes et redonnant à la pièce une apparence blanche métallique. généralement pour le blanchiment de surface de matériau, on utilise l'acide nitrique, l'acide sulfo-chromique et l'acide sulfurique avec des additifs oxydants. [22]

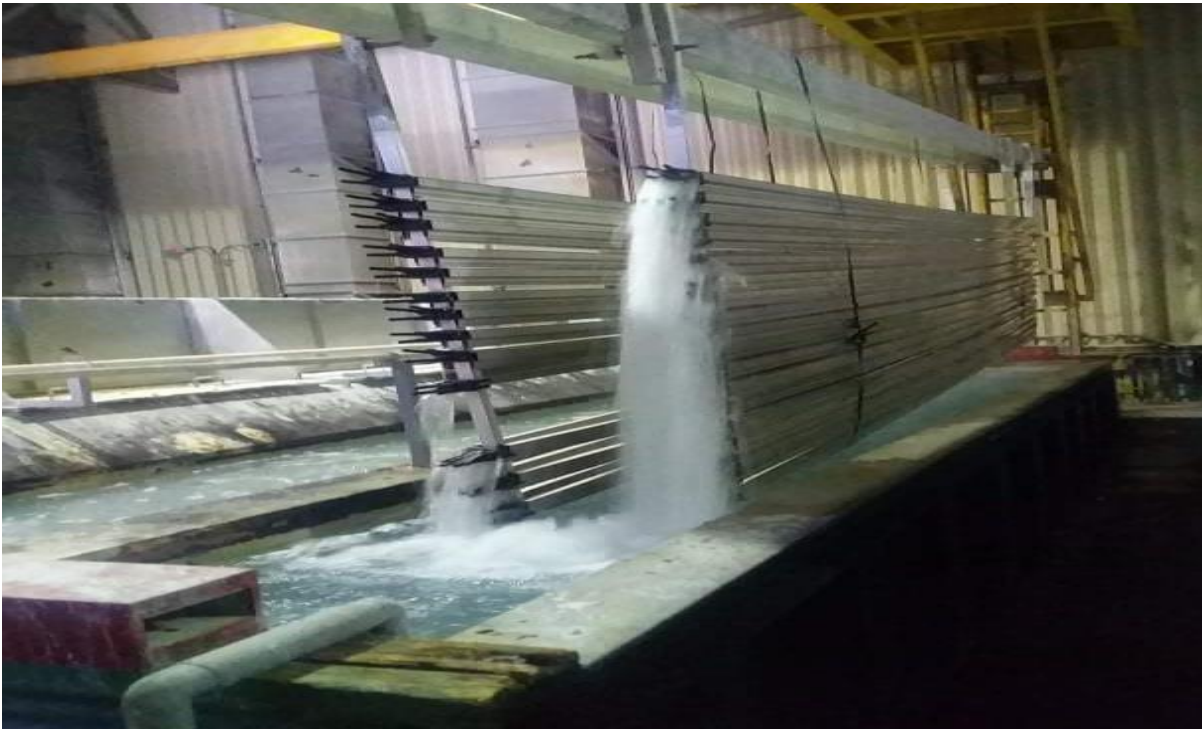


Figure II 10 : Sortie de profilés du bassin d'acide sulfurique

II.7.6. RINÇAGE

C'est l'opération de lavage de surface de matériau à traiter par l'eau, où la surface doit être à l'issue des rinçages exempte de toute impureté, ainsi la qualité d'eau doit être extrêmement importante car au séchage, elle s'évapore et peut laisser apparaître des traces Blanches [21-22]. Le rinçage est effectué dans des bains pour différents objectifs : remettre la surface nettoyée et prête à être traitée par les produits chimiques de l'opération suivante, nettoyer le liquide polluant entourant la surface après un bain de traitement afin d'empêcher la contamination du bain suivant par des produits incompatibles en provenance du bain précédent, stopper la conséquence des réactions chimiques des produits sur la surface pour la rendre manipulable.

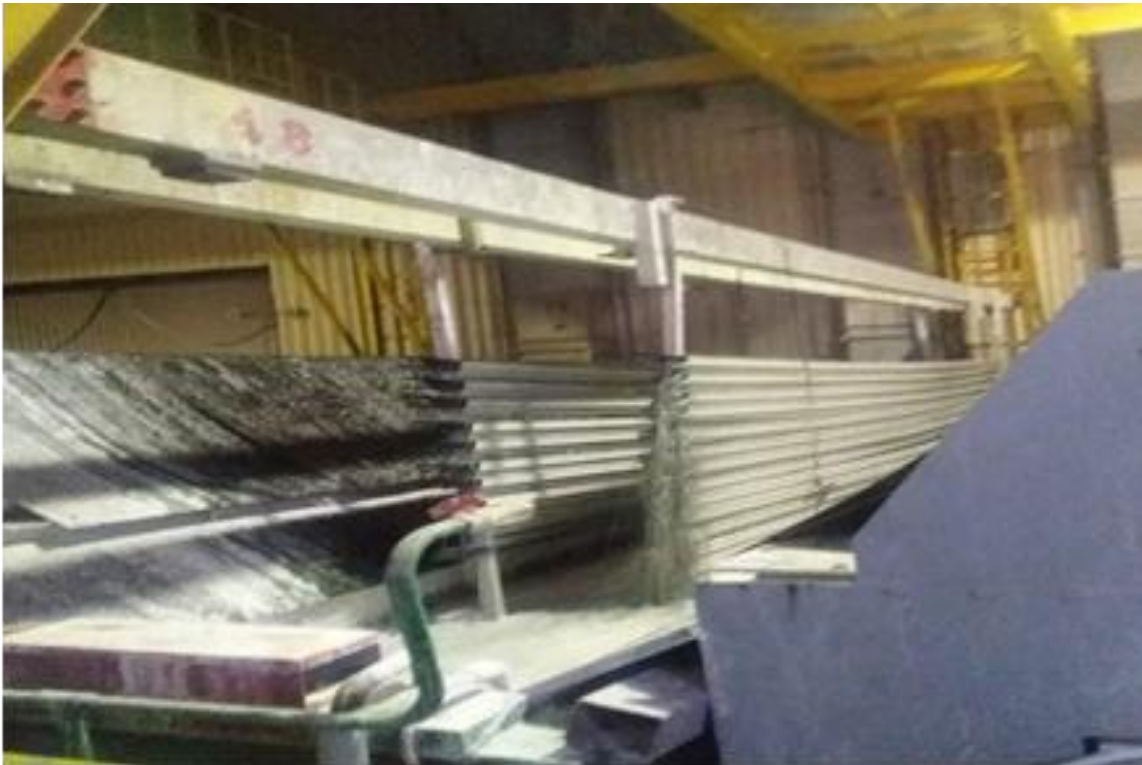


Figure II 11: opération de rinçage

II.7.7. SECHAGE

C'est l'opération d'élimination des traces d'humidité sur la surface du métal par des moyens de séchage [18-21].

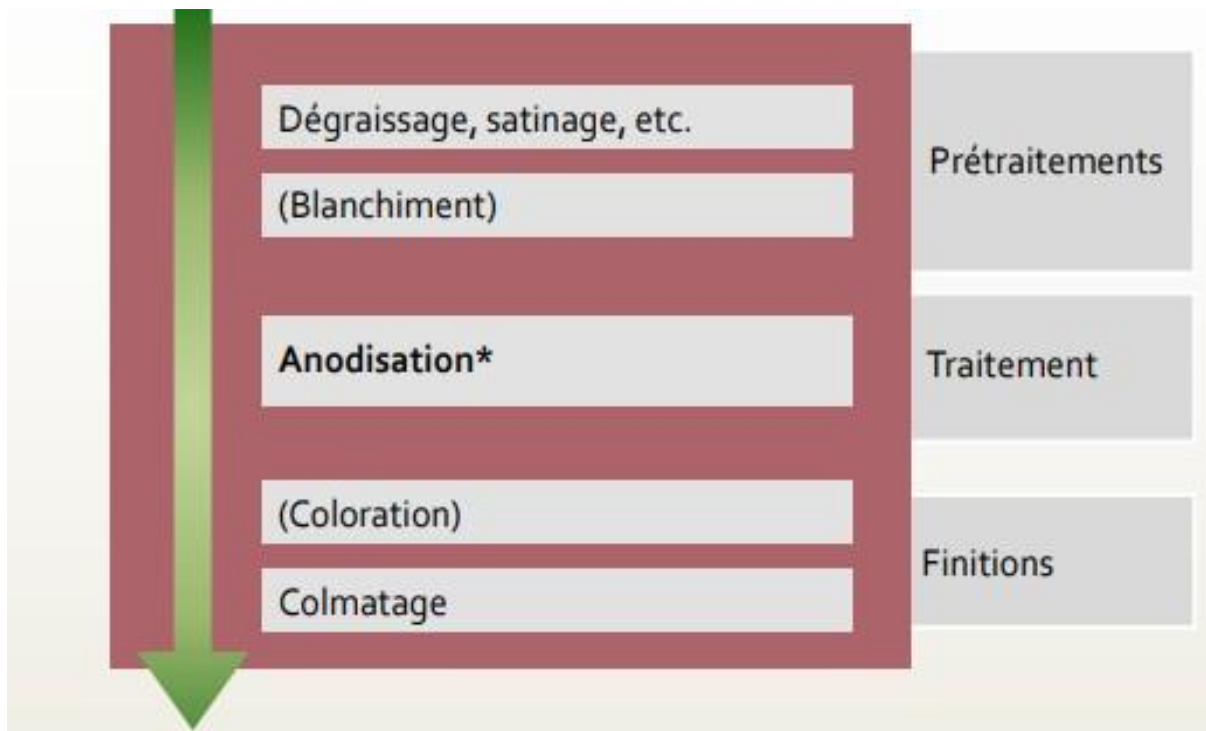


Figure. II. 12 : plan d'avant et après l'anodisation

II.7.8. PRINCIPE DU COLMATAGE

Les films anodiques formés sur l'aluminium sont, malgré leur épaisseur, très sensibles à l'atmosphère environnante du fait de leur forte porosité et sont ainsi sujets aux agressions extérieures qui entraînent une dégradation précoce. Afin d'augmenter la résistance à la corrosion de la couche anodique, il importe de modifier la porosité. Cette opération est appelée colmatage. Le mécanisme de colmatage généralement retenu est l'hydratation de l'oxyde d'aluminium formé au cours de l'anodisation. La modification de la couche généralement évoquée dans la littérature est la transformation de l'alumine anhydre formée lors de l'anodisation en alumine monohydrate (bohémite). Cette opération s'accompagne d'un gonflement de la couche et par conséquent de la fermeture partielle des pore. [23]

la réaction de base du colmatage hydrothermique peut s'écrire de la façon suivante:

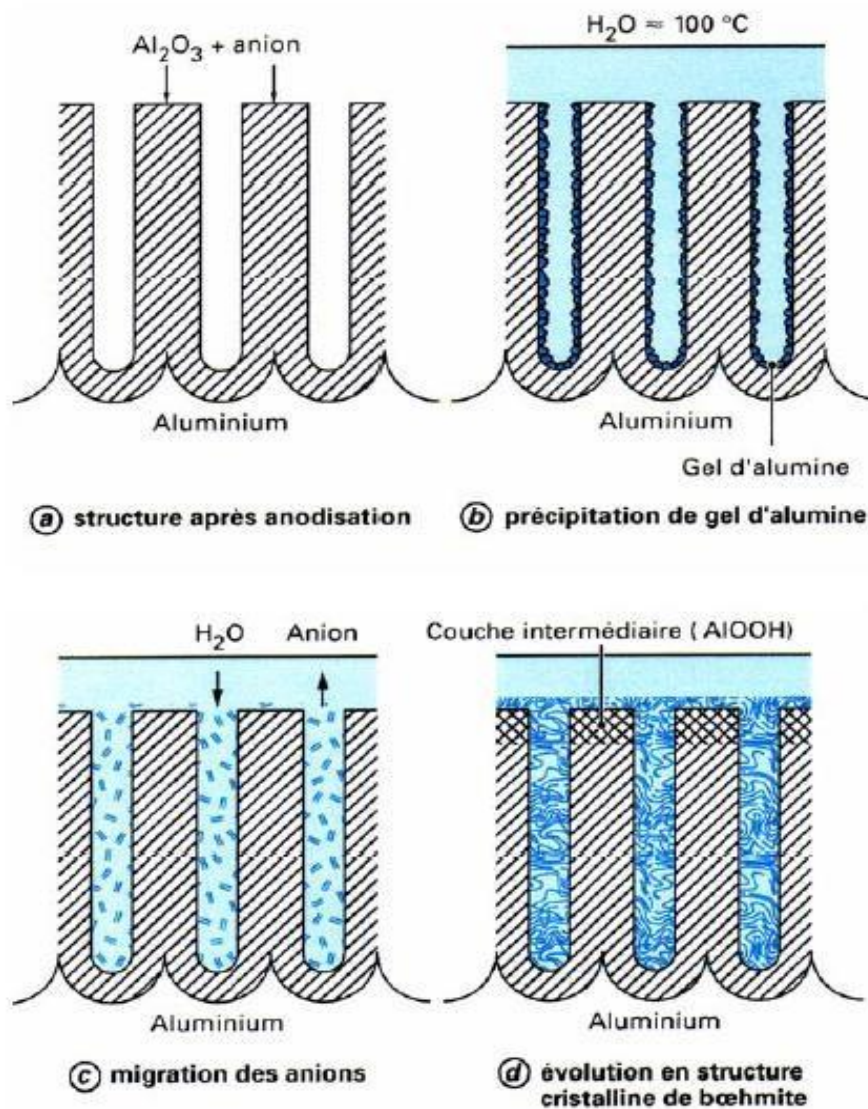


Figure II- 13 : Mécanisme de colmatage à l'eau bouillante d'une couche anodique [24].



Figure II- 14 : technique de colmatage.

Le colmatage de la couche anodisée faisant l'objet de plusieurs travaux, cette technique permet la fermeture des porosités existantes dans chaque cellule de la couche d'alumine. Cette obturation est obtenue par transformation de l'oxyde d'aluminium constituant la couche anodique, entraînant une dilatation et donc une fermeture progressive des pores. Parmi les traitements de colmatage les plus fréquemment utilisés, on peut citer:

- Le colmatage à l'eau bouillante,
- Le colmatage en phase vapeur,
- Le colmatage au bichromate de potassium,
- Le colmatage aux acétates de nickel,
- Le colmatage à froid. [25]

II. 8. CARACTERISTIQUES DES COUCHES ANODIQUES

Les couches d'oxyde obtenues sont reconnues comme étant amorphes [26]. Les propriétés des couches anodisées sont liées aux conditions d'élaboration mais aussi à la nature du matériau de base. Ainsi la présence d'éléments d'alliages, susceptibles de modifier le comportement électrochimique de l'alliage, aura une influence prépondérante sur l'aptitude du matériau à traiter.

II 8. 1 EPAISSEUR

Les épaisseurs des couches anodiques dépendent des conditions expérimentales (nature de l'électrolyte, nature du substrat, durée du traitement, densité de courant, température du bain). Les

couches anodiques peuvent avoir des épaisseurs variant de quelques centaines de nanomètres (couche barrière) à des centaines de micromètres [27].

II 8. 2 RESISTANCE A L'ABRASION

Une couche anodique dure possède une résistance à l'abrasion supérieure au chromage dur ou à l'acier carbonitruré (tout en ayant une dureté nettement inférieure) [10]. Nous pouvons également retenir que les couches formées par O.A.S présentent une résistance à l'abrasion améliorée par rapport à celles formées par O.A.C [10]. L'O.A.D conduit à la formation de couches plus épaisses et plus compactes avec de meilleures performances à l'abrasion.

II 8. 3 RESISTANCE THERMIQUE

La conductivité thermique d'une couche anodique est beaucoup plus faible que celle du substrat. Ceci fait de l'anodisation classique un traitement d'isolation thermique intéressant en particulier pour les couches épaisses obtenues en O.A.D.

II 8. 4 RESISTANCE A LA CORROSION

Pour améliorer la tenue à la corrosion du métal sous-jacent, la couche d'oxyde, généralement poreuse, nécessite une étape de colmatage qui représente l'opération finale dans la gamme d'anodisation. Cependant, si le colmatage conduit à une résistance maximale de la tenue à la corrosion, il n'en est pas de même en ce qui concerne la dureté et la résistance à l'usure de la couche d'oxyde

CHAPITRE
III
RESULTAT
ET
DISCUSSION

III.1- PROCEDERES EXPERIMENTALES

III.1.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre les matériaux étudiés, le mode de préparation des échantillons, les investigations expérimentales utilisées pour l'élaboration des couches d'alumine étudiés, les techniques et les équipements utilisés seront présentés.

On décrira les différentes conditions des expérimentations réalisées et la méthodologie concernant l'obtention de caractérisation des couches d'oxyde d'aluminium : les zones formées lors de traitements d'anodisation et leurs structures, la nature des phases de dépôt. L'étude de caractérisation sera réalisée à l'aide de méthodes expérimentales appropriées. Les couches formées lors de ces traitements seront identifiées par l'analyse métallographique à l'aide d'un microscope optique.

III.1.2. MATERIAUX ETUDIES

On utilise un deux alliages d'aluminium dont leurs compositions chimiques sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1 Composition chimique des deux alliages d'aluminium

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Al
7.15	0.12	0.01	0.03	0.48	0.01	0.03	0.14	Reste
5.2	0.35	0.1	0.1	0.7	0.02	0.1	0.1	Reste

Le matériau utilisé lors de cette étude est provenu de l'étranger sous forme des billettes Après avoir fabriqué au niveau de l'unité de production d'ALGAL + des différents objets d'aluminium destiné aux plusieurs d'application, ces ont subi un traitement de surface par anodisation.

Une surface d'aluminium est toujours recouverte par une pellicule d'oxyde d'aluminium, qui protège le métal contre une oxydation ultérieure et qui se reforme automatiquement lorsqu'elle vient d'être détruite. Il était donc naturel d'essayer de créer artificiellement des couches épaisses et continues d'alumine sur la surface des alliages d'aluminium. En plus de son caractère de protection, cette couche à la propriété d'absorber des matières colorantes, propriété intéressantes pour la décoration.

III.1.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS

La préparation des échantillons destinés au traitement d'anodisation est divisée en deux étapes, le coupage à froid et le polissage. Pour la première étape, On effectue un découpage au jet d'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) de échantillons à l'aide d'une machine de cisailage des métaux. Le but est d'obtenir, après faire la cisaille des éprouvettes.



Figure III.1: Machine de coupe à froid

Le traitement de polissage réalisé sur les pièces est un polissage mécanique manuel. Le polissage proprement dit a pour buts de l'obtention d'une surface plane de rugosité minimale, mais également l'élimination de la couche superficielle de l'échantillon dont la microstructure pourrait être exempt des zones d'écrouissage.

Le polissage est l'action de polir, de rendre la surface de l'éprouvette très lisse. Il comportée la finition comme étape secondaire.

III.1.4. TECHNIQUES D'ANODISATION

L'anodisation utilisée dans notre étude concerne le traitement des profilés d'alliages d'aluminium en vue d'accroître les propriétés chimique et mécanique de région superficielle

de ces objets. La technique est effectuée par voie électrolytique et nécessite des traitements préliminaires et qui sont dégraissage, décapage, rinçage. Après avoir préparé les échantillons ont subi un traitement d'anodisation. Le tableau récapitule les différentes étapes de l'anodisation ainsi les paramètres utilisés pour chaque étape

Tableau III.2 : les différentes étapes de l'anodisation ainsi les paramètres utilisés pour chaque étape.

Traitement	N° de cuve	Analyse	Paramètres
Dégraissage	1	Polytoxal DG 15	23-35 g/l
Décapage	2	Chaux	50-80 g/l
		Polytoxal DA29	20-40 g/l
		Al dessous	100-150 g/l
		Température	50-60 C
Neutralisation	3	HNO3	70-100 g/l
		H2SO4	-
Anodisation	4	H2SO4	180g/l
		Al dessous	Inf. 15 g/l

III.1.5. MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE D'ANODISATION

Un appareil à courant de Foucault a été utilisé afin de mesurer l'épaisseur d'oxyde produit lors des différents essais d'anodisation. Le modèle de l'appareil utilisé est un PosiTector 6000 N90S3. La figure montre une image de l'appareil. Avant de mesurer les d'épaisseurs d'oxyde, l'appareil a dû être calibré sur une surface n'ayant pas été anodisée et possédant un fini de surface semblable à celui des échantillons à évaluer. Trois mesures ont été prises dans chaque zone servant à évaluer les épaisseurs d'oxyde.

La technique de mesure par courant de Foucault fonctionne de la manière est comme suit lorsque le palpeur est apposé sur la surface non conductrice, un courant alternatif à haute fréquence (au-dessus de 1 MHz) est utilisé afin de créer un champ magnétique.

Ce champ magnétique crée alors un courant de Foucault sur la surface du substrat. L'épaisseur du revêtement affecte alors l'intensité du courant de Foucault. Ces courants forment leur propre champ magnétique d'opposition et c'est la variation de ces champs d'opposition qui est utilisé pour déterminer l'épaisseur du revêtement.



Figure III.2: Appareil de mesure d'épaisseur d'oxyde

III.1.6. CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE

III.1.6.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Après avoir préparé par coupement des éprouvettes destinées à l'étude microscopique prismatique la figure III.3.

Les échantillons montés sur deux principales opérations :

- Le polissage
- L'attaque révélatrice de la microstructure.



Figure III .3: Echantillons montés pour le polissage

III.1.6.2. POLISSAGE

Le polissage a pour buts principaux l'obtention d'une surface plane, de rugosité minimale et également l'élimination de la couche d'oxyde superficielle (Al_2O_3) dont la microstructure n'est pas représentative du matériau étudié. Il est effectué en deux étapes:

la première consiste en un polissage grossier de la surface à l'aide de papiers abrasifs de granulométrie décroissante (220, 400, 500, 800, 1000, 1200, 2000 et 3000).

Un polissage de finition à la pâte diamantée de 6 et 3 microns, est effectué en dernier sur un feutre sous une lubrification appropriée. L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie. Les échantillons étaient nettoyés à l'eau.



Figure III.4: Polisseuse mécanique utilisée

III.1.6.3. ATTAQUE CHIMIQUE

Après le polissage des échantillons, ces derniers ont subi un traitement d'attaque chimique à l'aide d'un réactif pour observer la microstructure de l'échantillon. L'objectif de cette tâche non seulement d'observer la microstructure des échantillons couche et substrat mais de voir et distinguer leurs zones et à partir de ceci on peut arriver à déterminer l'effet de paramètre technologique à changer sur l'épaisseur de la couche d'anodisation. Le type de la nature de l'alliage L'échantillon joue aussi dans ce cas le même que le temps d'anodisation.

Nous avons effectué plusieurs attaques chimiques telles que le réactif nommé au point de vue commerciale Killer dont sa composition chimique est constitué de l'acide de fluore HF de 1ml dilué dans 200 ml d'eau, d'acide chloridrique HCl de 1.5 ml et de l'acide nitrique HNO₃ de 2.5 ml.

L'attaque est menée durant une minute et 40 secondes, Cette attaque permet de révéler non seulement les phases et la structure des échantillons mais aussi les zones constituant la couche d'alumine et le substrat de l'alliage d'aluminium.

III.1.6.4. ANALYSE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable à l'œil nu. Il est utilisé pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information sur l'aspect de la surface observée.

L'analyse métallographique des coupes transversales des alliages d'aluminium anodisés est effectuée à l'aide du microscope de type Toupview indiqué dans la figure III.11 ce type d'appareil permet l'observation des échantillons, avec un grossissement qui varie de 200 à 1000. Les micrographies ont été acquises numériquement à l'aide d'une caméra CCD. Les images sont observées et enregistrées aussi à l'aide d'un PC connecté.



Figure III.5 : Microscopie optique utilisé connecter a un ordinateur

CARACTERISATION MECANIQUE

III.1.6. 1. TEST DE DURETE

La figure III. 6. Représente-le micro uromètre utilisé lors de cette étude. Les surfaces planes et les faces en profils des échantillons ont subi des test de microdureté à l'aide d'un microdurmètre Zwick Roell au niveau du département de physique. La charge d'indentation appliquée est de 200g. Ce type d'instrument de mesure de dureté constitue de microdurmètre à différentes charge d'indentation. Il est conecté à un ordinateur pour observer les images et grace à un logiciel on peut arriver mesurer le diagonale de l'indenteur qui permet de trouver la dureté Vickers par l'application de la formule de dureté de vickers



Figure III. 6. Micro uromètre utilisé

Cette machine de caractérisation permet la mesure de la dureté des matériaux sans les endommager. La dureté d'un métal est définie comme la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible. Les mesures de la micro dureté ont été effectuées, sur les échantillons après observation au microscope, selon la méthode de Vickers.

$$\mathbf{HV = 1,854 (F/d^2)}$$

Avec d (μm) est la moyenne des diagonales de l'empreinte carrée; et F (N) est la force d'indentation appliquée. La microdureté Vickers consiste à enfoncer un pénétrateur en diamant de forme pyramidale droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° comme montré par la figure III.7.

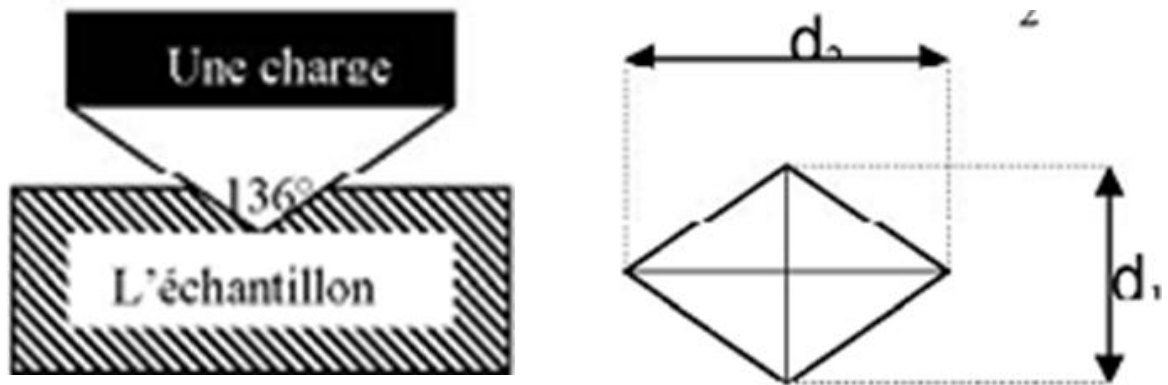


Figure III.7: Représentation schématique de l'essai de Vickers.

La machine d'essai est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et connecté à un microscope. Par la mesure des deux diagonales de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge, on peut avoir les valeurs de la micro dureté directement à partir d'un tableau (chaque micro- duromètre a un tableau de valeurs de la micro dureté propre à lui. Pour nos essais, nous avons utilisé une charge F de 200 g pendant un temps t égal à 10 secondes, sans choc ni vibration.

III.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie de ce chapitre, seront présentés les résultats obtenus et leurs interprétations. Dans un premier temps, nous discuterons les résultats apportés par l'analyse métallographique. Nous examinerons ensuite les résultats obtenus concernant l'épaisseur des couches d'anodisation obtenues par l'appareil de mesure utilisée au niveau de l'unité d'algal et confirmé par analyse métallographique. Les résultats de tests de microdureté sur les faces planes et les surfaces transversale des échantillons d'alliages d'aluminium anodisées (film-substrat) obtenus lors de cette étude d'anodisation seront aussi examinés dans cette partie de cette étude.

III.2.1. STRUCTURE METALLOGRAPHIQUE

Nous allons analyser les changements structuraux de la surface des profilés d'un alliage d'aluminium subissant le procédé d'anodisation pour différent temps de maintien et ceci à l'aide d'un microscope optique cité auparavant dans la première partie de ce chapitre.

Nous allons examiner non seulement la microstructure des deux alliages non anodisés ou anodisés pour différents temps de traitement mais nous distinguerons les différentes zones constituant les couches superficielles correspondent à l'oxyde d'aluminium et le cœur des profilés qui correspondent à des régions non anodisées.

La figure III.9, présentent la structure des échantillons anodisés pour des temps de traitement de 5, 10, 15 et 20 min. Les microstructures sont obtenues sous un grossissement de X20.

Nous constatons que la microstructure de la zone en extrême surface de la des échantillons représentent la couche d'alumine. Cette couche se présente une zone claire qui est déposée sur le cœur du substrat de l'alliage d'aluminium no anodisé présentant une zone de couleur sombre. La microstructure de de l'oxyde d'aluminium qui représentent en extrême surface les couches d'anodisation. Ces zones prennent une couleur blanche par rapport au cœur des substrats présentant une zone un peu sombre et qui exempt l'effet d'anodisation

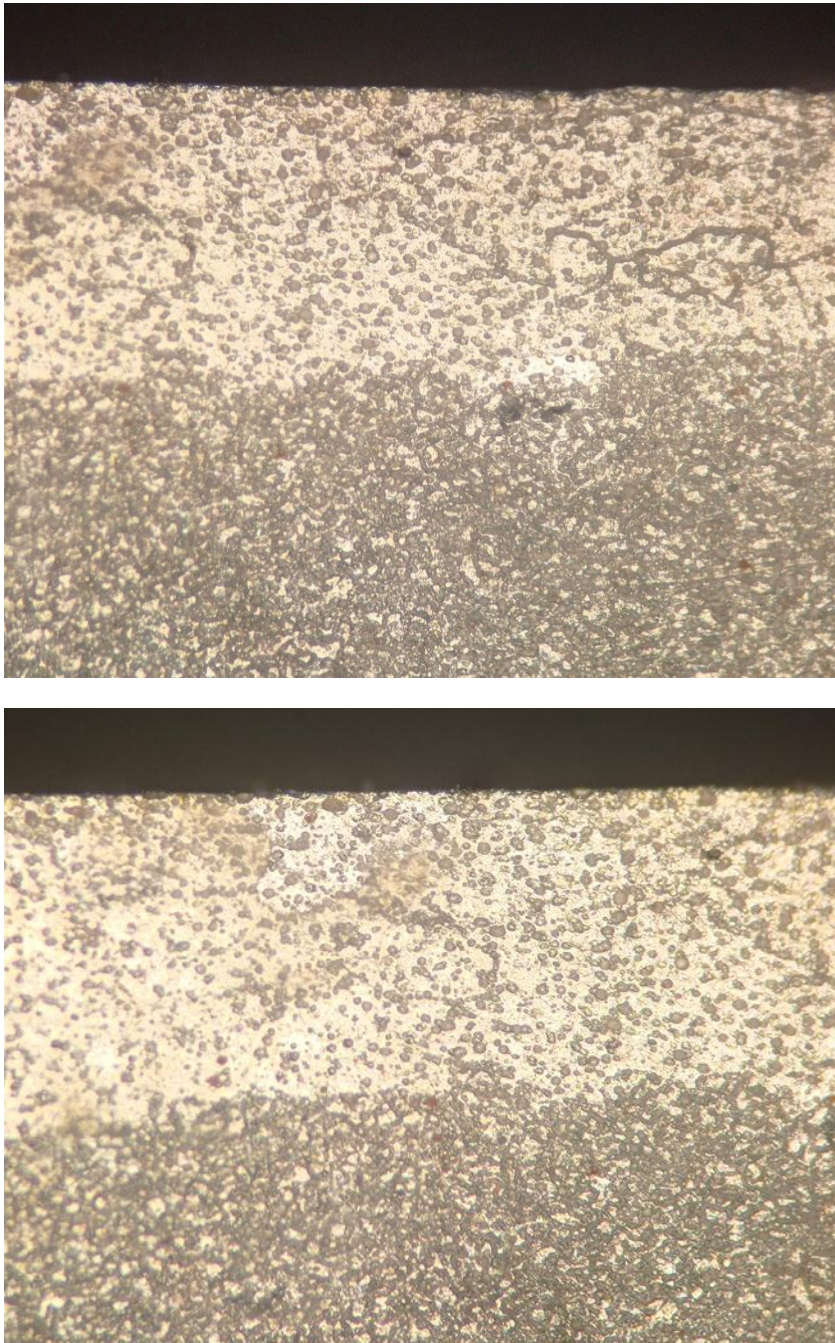


Figure III.8 : Microstructure de l'alliage anodisé pour deux temps de maintien (5) min et (10) min

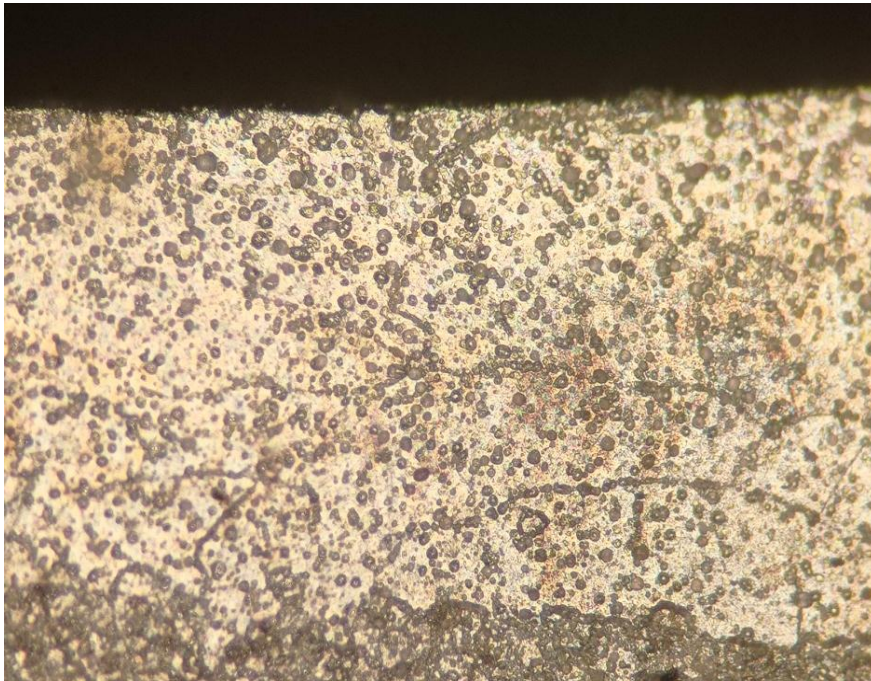
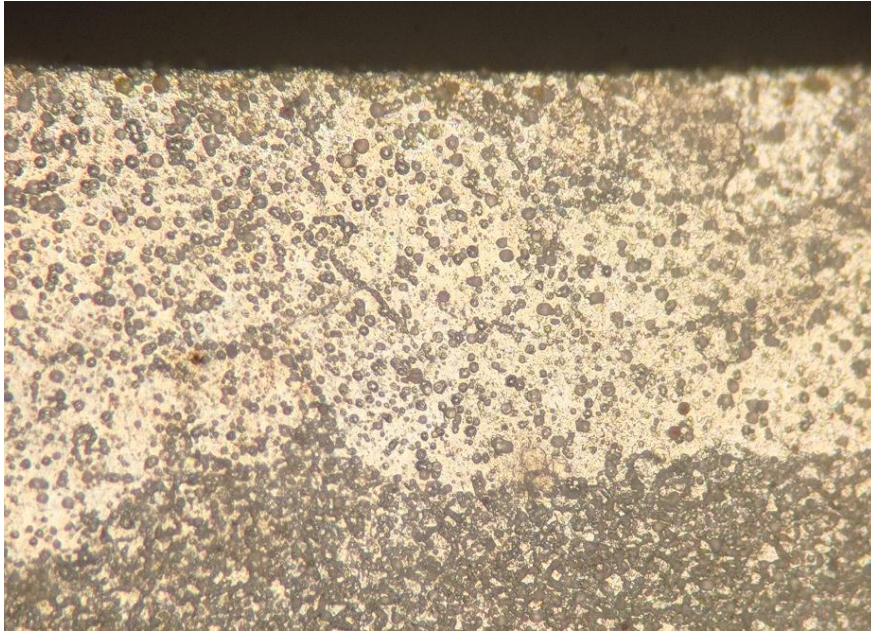


Figure III.9: Microstructure de l'alliage anodisé pour temps de maintien (15) min et (20) min

III.2.2. EPAISSEUR DE LA COUCHE D'ANODISATION

La mesure de profondeurs des couches de l'anodisation par observation métallographique à l'aide de microscopie optique est une autre méthode d'évaluation performante. Des résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons anodisés pour différents temps de traitement d'anodisation. Le tableau 2 représente les valeurs de mesure de l'épaisseur de la couche d'anodisation obtenues à l'aide de l'instrument de mesure utilisé à l'unité de production d'algal pour différents temps d'anodisation 5, 10, 15 et 20 min.

Tableau III 3: Epaisseur de la couche d'anodisation

Temps anodisation (min)	5	10	15	20
Epaisseur (μm)	9	12	14	18

Ces mesures sont les moyennes de trois mesures effectuées sur les deux types d'alliages d'aluminium anodisés en variant les périodes de maintien des échantillons dans le bain de l'anodisation. Les épaisseurs mesurées à l'aide de cet appareil sont confirmés par l'analyse micrographique à l'aide de microscopie

Pour le cas du temps de traitement d'anodisation qui est considéré comme le seul paramètre lors de cette étude, nous remarquons d'après les deux figures enregistrées, les épaisseurs des couches d'anodisation augmentent proportionnellement avec l'augmentation du temps d'anodisation.

III.2.3. DURETE

Après la première étape d'élaboration regroupant la préparation, prétraitement et l'anodisation des deux alliages d'aluminium pour deux temps de maintien, les couches d'alumine ont été obtenues. Donc il est très nécessaire d'examiner et de caractériser les propriétés mécaniques notamment la dureté de ces couches.

Dans ce cadre, des analyses systématiques ont été réalisées sur la surface plane et les faces des coupes transversales des échantillons. Comme nous l'avons mentionné que les essais de dureté de Vickers ont été effectués sur les différents échantillons à l'aide d'un microduromètre sous la charge d'indentation de 200g.

Le tableau III.3 récapitule les résultats de dureté obtenus sur les différents échantillons avant et après l'étape du traitement par anodisation

Tableau III.4 : Valeurs de dureté avant et après l'anodisation sous 200 g

Dureté du substrat	Dureté du composite (substrat + film)			
	5 min	10 min	15 min	30 min
83.5	100	130	169	189

A partir des résultats enregistrés, nous remarquons que la dureté dans la zone surfacique et qui correspond de la couche d'alumine prennent des valeurs plus élevées qu'à celles correspondent au cœur des d'échantillons et qui correspondent aux zones non touchées par le traitement d'anodisation.

Nous notons aussi que la dureté de l'échantillon anodisé pour un temps de maintien élevé présente une dureté élevée par rapport à l'échantillon anodisé pour un faible temps de traitement. Ceci est interprété par la distinction d'épaisseur de la couche d'oxyde d'aluminium obtenue pour les différents temps de traitement.

Les couches d'anodisation sur les deux alliages d'aluminium pour la même période de traitement présentent presque une dureté similaire ou identique. L'épaisseur de la couche qui est presque semblable peut expliquer l'égalité de dureté pour ces deux types d'échantillons. La figure présente les empreintes d'indentation effectuées en profil sur la section de l'échantillon anodisé sous la charge de 200g pour un temps élevé. La taille et la forme des empreintes confirment clairement que la zone de la couche d'oxyde présente une dureté élevée par rapport la zone non anodisée

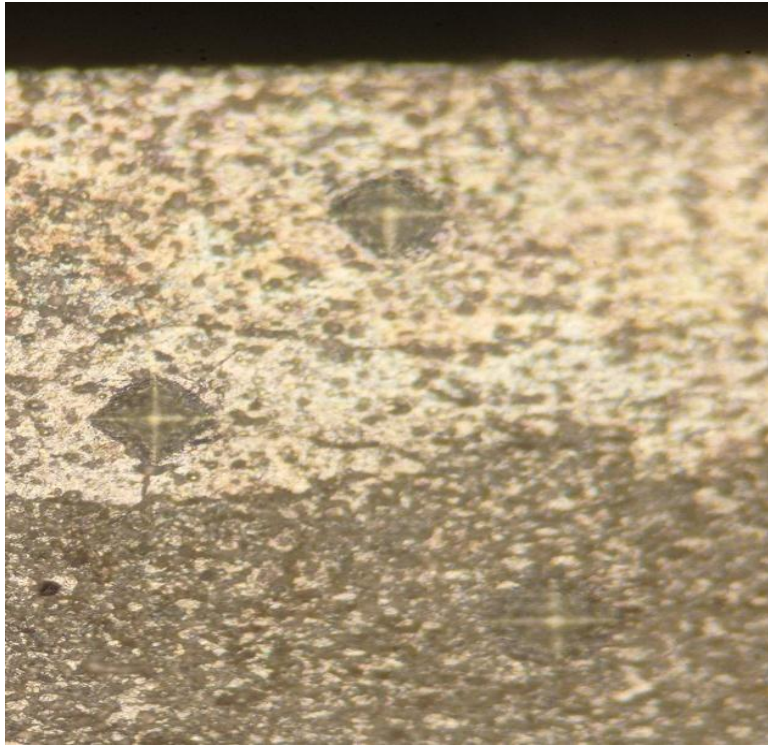


Fig III.10 : Empreintes de dureté sur l'échantillon Anodisé (couche-substrat)

III.3. CONCLUSION

Nous avons présenté, dans ce troisième chapitre, les diverses techniques utilisées pour réaliser le traitement d'anodisation et décrire les moyens de caractérisation pour faire cette étude. Nous avons défini des paramètres utilisés dans le traitement d'anodisation. La microstructure, morphologie, l'épaisseur et la dureté des couches d'oxyde d'aluminium sont caractérisées par différentes techniques. Nous avons enfin présenté une discussion globale à propos de l'effet des deux paramètres technologiques choisis dans cette étude sur les propriétés structurales et mécanique des couches produites au cours du procédé d'anodisation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Jusqu'à présent, l'anodisation est une technique largement pratiquée dans l'industrie surtout dans l'aéronautique, l'automobile et le bâtiment. Cependant, le processus d'anodisation de l'aluminium requiert un certain nombre d'opérations préliminaires (dégraissage, décapage, satinage, polissage chimique ou électrochimique...) puis une étape complémentaire de colmatage et enfin un recouvrement par une peinture. La qualité du revêtement obtenu demande une attention particulière à chacune des différentes étapes dans le processus d'anodisation. De ce fait, l'anodisation de l'aluminium devient un procédé fastidieux et coûteux pour les industriels, d'autant plus que certains produits chimiques utilisés dans les bains de colmatage sont reconnus comme étant dangereux pour l'environnement (notamment le chrome hexavalent Cr^{6+}). De plus, bien que l'anodisation de l'aluminium soit une pratique assez répandue dans le domaine industriel.

Par conséquent, les recherches dans le domaine du traitement de surface ne cessent de se développer pour satisfaire non seulement aux exigences des propriétés des couches mais également à la protection de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE REFERENCES

[1] **K.R Van Horn**, Aluminium : properties, physical metallurgy and phase diagrams, American Society for Metals (1971)

[2] **D.J.Chakrabartia,DavidE.Laughlinb**, Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si Alloys with Cu additions, Progress in Materials Science 49, p.389-410, 2004

[3] : **Develay, R.**

« Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés. », Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M 440, (1992).

[4] : **Develay, R.**

« Traitement thermique des alliages d'aluminium. », Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1290, (1986).

[5] : **B. Dubost, M. Reboul,**

« Nouveau procédé de revenu désensibilisant l'alliage 2214 à la corrosion structurale. », Mém Et. Sc. Revue de Métallurgie, (1984).

[6] : **C. Vargel,**

« Corrosion de l'aluminium. », Ed. Dunod, Paris (1999).

[7] : **F. Snogan,**

« Évaluation de la protection contre la corrosion de couches d'anodisation développées sur les alliages d'aluminium 7050 et 2214 – influence de dépôt de carbone pulvérulent. », Thèse de l'institut national Polytechnique de Toulouse – (2002).

[8] : **H. Ghali,**

« Uhlig's Corrosion Handbook. », 2nd Edition, Ed. R. Winston Review (2000).

[9] **J.S. Safrany,**

Anodisation de l'aluminium et de ses alliages, Techniques de L'Ingénieur Traité des Matériaux métalliques (2008) Section M1630.

• Document de l'unité Algal+ de M'sila.

[10] : **C. Étienne, F. Flusin,**

« Les traitements de surface de l'aluminium et de ses alliages. », (1975).

[11] : **Y. Xu. G.E. Thompson, G.C. Wood, B. Bethune,**

« Anion incorporation and migration during barrier film formation on aluminium. », *Corrosion Science*, 27 (1987).

[12] : J.S.Safrany,

« Anodisation de l'aluminium et de ses alliages. », Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1630, (2001).

[13] : G. Hass, N.W. Scott,

« On the structure and properties of some metal and oxide film. », *Journal of Physic and Radian*,

[14] : F. Keller, M.S Hunter, D.L Robinson,

« Structural features of oxide coatings on aluminium. », *Journal of Electrochemical Society*, 100, (1953).

[15] : P. Csokan,

« Nucleation mechanism in oxide formation during anodic oxidation of aluminium. », *Advances in Corrosion Science and Technology*, 7, (1980).

[16] : V.P. Parkhutik,

«The initial stages of aluminium porous anodization studied by Auger electron spectroscopy.»,*Corrosion Science*, 26 (4), (1986).

[17] : L. Hao, B. Rachel Cheng,

« Sealing processes of anodic coatings-past, present and future. », *Aluminium finishing*, (2000),

[18] J.M cape,

pretreatment of aluminum by cleaning and etching , product finishing London ,v26 N°8 1973

[19] : I. Farnan, R. Dupree, Y. Jeong, G.E. Thompson, G.C Wood, A.J Forty,

« Structural Chemistry of anodic alumina. », *Thin Solid Films*, 173, (1989).

[20] BoudilmiAissa ,

contribution à la caractérisation des revêtements , et des Matériaux stratifiés

[21] JS safrany ,

Anodisation de l'aluminium et de ses alliage , techniques de l'Ingénieur traité des Matériaux métalliques 2008 section M1630 .

[22] J.C Bara ,

Traitement de surface, Environnement et compétitive , éd .Eyrolles 1988 P1930

[23] **L.Lacourcelle** ,

[Traité de galvanoplastique ,Galva –conseil éd Lavoisier paris .1997 P5690

[24] **J. S .Safrany** ,

Anodisation de Aluminium et de ses alliages , techniques de l'ingénieur

[25] **BoudilmiAissa** ,

contribution à la caractérisation des revêtements , et des Matériaux stratifiés
par micro dureté et tenue à l'usure thèse ,GM.unisétif .

Résumé

Dans ce projet de fin d'études, nous avons étudié de certain paramètre de l'anodisation sur aluminium, notre sujet est étudié à ALGAL+ a la zone industrielle de m'sila. L'objectif de mon travail de mémoire a été d'application expérimentalement le procédé d'anodisation d'aluminium série 6000 type (6063) (6061) matériau importé.

Notre étude comporte trois chapitres. Nous avons commencé par les notions et les propriétés sur les alliages d'aluminium, ensuite on a présenté le procédé et les étapes de l'anodisation et en fin on a présenté sur le plan expérimental les moyens, résultats et analyses.

Mots clés : Aluminium, anodisation, épaisseur d'oxyde, dureté

summary

In this graduation project, we studied certain parameter of anodizing on aluminum, our subject is studied at l'ALGAL+ m'sila unit. The objective of my thesis was to experimentally apply the anodizing process of aluminum 6000 series type (6063) (6061) imported material.

Our study has three chapters. We started with the concepts and properties of aluminum alloys, then we presented the process and steps of anodization and finally we presented the means, results and analyzes on an experimental basis.

Key words: Aluminum, anodizing, oxide thickness, hardness

ملخص

في مشروع التخرج هذا، درسنا طبقات أنودة الألومنيوم التي تم الحصول عليها على الألومنيوم عن طريق الأنودة ودرس موضوعنا في + ALGAL المسيلة.

كان الهدف من رسالتنا هو تطبيق عملية أنودة الألومنيوم بسلسلة (6000) نوع (6063) (6061) بشكل تجريبي. فدراستنا من ثلاثة فصول 'بدأنا بمفاهيم وخصائص سبائك الألومنيوم ' ثم قدمنا عملية وخطوات الأنودة وأخيرا قدمنا الوسائل والنتائج والتحليلات على أساس تجريبي.