

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° :



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

**OPTION : TECHNIQUES DE PRODUCTION
INDUSTRIELLE**

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master professionnel

Par: BENKIHOU L HICHAM et BARKA TAHAR

Intitulé

Méthodes de protection contre la corrosion

Soutenu devant le jury composé de:

IHADDADEN RAZIKA	Université de M'sila	Président
BENKHERBACHE HOURIA	Université de M'sila	Rapporteur
ROUABHI YUCEF	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciement

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bien ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre directrice de recherche Mme BENKHERBACHE Houria pour ses précieux conseils, son aide et son encouragement.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nous ne pourrions oublier nos parents, frères, sœurs, amis et mes collègues pour leur soutien moral et leur aide précieuse.

Et enfin, nous voulons remercier tous ceux qui de près ou de loin ont tendu leurs bras d'aide pour réaliser ce modeste travail.



Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos chers parents qui nous ont toujours soutenu et encouragé.

Nos mères, la lumière qui nous a toujours éclairé le chemin. A ceux qui ont tout fait pour notre réussite, par leur douceur, leur tendresse, leurs sacrifices et prières.

Nos pères, à qui nous devons le respect et l'amour, leur soutien, leur encouragement et surtout leur confiance.

A nos frères et sœur pour leur présence marquante dans notre vie, leur aide et leur soutien dans les moments les plus difficiles.

A tous nos amis, chacun par son nom, à tous ceux et celles qui nous aiment et que nous aimons.



SOMMAIRE

Introduction General	1
CHAPITRE I : Introduction à la corrosion	2
1. Introduction :	3
2. Généralités su le phénomène de corrosion :	3
2. 1. Définition de la corrosion :	3
2. 2. Cause de la corrosion :	3
2. 3. Facteurs de corrosion :	4
2. 4. Importance économique de la corrosion :	4
3. Classification de la corrosion	5
3. 1. La corrosion chimique :	5
3. 2. La corrosion biochimique :	6
3. 3. La corrosion électrochimique :	6
4. les types de corrosion :	7
4.1. La corrosion uniforme :	7
4. 2. La corrosion galvanique :	8
4. 3. La Corrosion Par Piqûre :	8
4. 4. La corrosion caverneuse :	8
4. 5. La corrosion sélective :	9
4. 6. La corrosion inter granulaire :	10
4. 7. La corrosion-érosion :	10
4. 8. Corrosion frottement :	10
4. 9. La corrosion sous contrainte :	11
4. 10 . Fragilisation par hydrogène :	12
5. Potentiel De Corrosion ;	12
6. Vitesse De Corrosion ;	13
7. Essais de corrosion :	13
7. 1. Méthode potentiodynamique :	13
7. 2. Méthode de la masse perdue :	14
7. 3. Théorie de la masse perdue :	15

CHAPITRE II: Méthodes de protection contre la corrosion	16
1- Introduction	17
2. Catégories d'alliages et domaines d'emploi	17
2.1. Les aciers inoxydables	17
2.2. Les alliages de cuivre	17
2.3. Les alliages d'aluminium	17
2.4. Les alliages de nickel	18
2.5. Les alliages de titane	18
3. Prévention par une forme adaptée des pièces	18
4. Protection par revêtements	19
4. 1. Revêtement métallique	19
4. 2. Revêtement inorganiques non métalliques	19
4. 3. Revêtements organiques	19
5. Protection par inhibiteurs	20
5.1. Définition d'un inhibiteur	20
5. 2. Classification des inhibiteurs	20
5. 3. Propriétés	21
5. 4. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion	23
5. 5 Nature des inhibiteurs	23
5. 6. Choix d'un inhibiteur	24
5. 7. Modes d'expression de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion	25
5. 8. Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion	25
6. Protection électrochimique	25
6.1. Protection cathodique	25
6.2. Protection anodique	26
Chapitre III : Traitement de surface aluminium (Anodisation et thrmolaqage)	27
1.Introduction :	28
2. Généralités Sur L'aluminium	28
2.1. Définition De L'aluminium	28
2.2. Elaboration de l'aluminium	28
2.3. Tenue à la corrosion	29
2.4. Surface De L'aluminium	30
2.4.1. Notion d'oxyde naturel	30

2.4.2. Surface issue de la transformation	30
3. Alliages D'aluminium	31
3.1. Influence Des Eléments D'alliages Sur Les Propriétés De L'aluminium	31
3.2. Recuit Des Alliages D'aluminium	31
3.3. Propriétés Des Alliages D'aluminium	31
3.4. Classification Des Alliages D'aluminium	32
3.5. La Désignation Des Alliages D'aluminium	32
4. L'anodisation De L'aluminium	33
4.1. L'électrolyse De L'eau	33
4.2. L'anodisation	34
4.3. Mécanisme De Formation Des Couches Anodiques	35
4.4. Anodisation De Type Barrière	35
4.5. Anodisation De Type Poreux	36
4.6. Structure Poreuse De L'alumine	37
4.7. Epaisseur De L'alumine	37
4.8. Concentration De L'acide	38
4.9. Température De L'électrolyte	38
4.10. Intensité Du Courant D'anodisation	38
4.11. Le Colmatage	39
5. L'anodisation En Pratique	40
6. Conditions De Travail	41
7. Processus D'anodisation	41
8. ThermoLaquage	47
8.1. Définition	47
8.2. Avantages du thermolaquage	47
8.3. Les Différentes Etapes Du Thermolaquage	48
9. Processus thermo Laquage	48
9.1. Montage des profilés sur le convoyeur	49
9.2. Préparation De La Surface Des Profilés	49
9.3. Thermo laquage Proprement Dit	50
9.4. Control de qualité	51
10. Conclision Général	52
BIBLIOGRAPHIE	53

Liste Des Figures

N°	Nom des figures	Page
Figure I-1	- Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.	5
Figure I-2	- Mécanisme de la corrosion atmosphérique.	6
Figure I-3	- Corrosion humide d'un métal bivalent M dans une électrolyte qui contient l'oxygène.	7
Figure I-4	- La corrosion uniforme exemple d'une d'une porte et d'un véhicule corrodés.	7
Figure I-5	- Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents.	8
Figure I-6	- Corrosion par piqûre de l'aluminium.	9
Figure I-7	- Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.	9
Figure I-8	- Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage, cuivre, zinc).	10
Figure I-9	- Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.	10
Figure I-10	- Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.	11
Figure I-11	- La tribocorrosion.	11
Figure I-12	- Corrosion sous contrainte.	12
Figure I-13	- La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique.	12
Figure I-14	- Détermination de la densité de courant de corrosion à partir du diagramme d'Evans.	14
Chapitre : II		
Figure II -1	- Exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des Pièces.	18
Figure II -2	- Classement des inhibiteurs de corrosion.	20
Figure II -3	- Principe de la protection cathodique.	25
Figure II -4	- protection par anode sacrificielle	25
Figure II -5	- Exemple de protection cathodique.	26
Figure II -6	- Principe de la protection anodique d'un métal passivable : déplacement du potentiel dans le domaine passif correspondant à : $E_{pass} < E < E_{pit}$.	26
Figure II -7	- Exemple de protection anodique	26

Chapitre : III		
Figure III-1	- Représentation schématique de la « surface » de l'aluminium. Electrolyse de l'eau .	30
Figure III-2	- Au début de l'expérience (image de gauche) des bulles s'échappent des électrodes. Ensuite, on constate une baisse du niveau d'eau dans chacun des tubes (image de droite). On mesure deux fois plus de gaz dans le tube qui recouvre la cathode (c'est l'électrode reliée à la borne négative de l'alimentation électrique).	34
Figure III -3	- Anodisation d'une pièce en alliage d'aluminium.	36
Figure III-4	- Variation de l'intensité en fonction du temps.	38
Figure III -5	- Représentation schématique de l'initiation d'une couche poreuse.	38
Figure III-6	- Couche poreuse non colmatée structure.	39
Figure III-7	- Coupe schématique de la Poreuse d'une couche d'oxyde.	39
Figure III-8	- Vue en coupe de la structure de l'alumine obtenue par anodisation à la surface d'une pièce en alliage d'aluminium.	40
Figure III-9	- Alimentation régulée en tension.	42
Figure III-10	- Alimentation régulée en courant.	42
Figure III-11	- Alimentation redressée.	42
Figure III-12	- Pores de la couche d'alumine remplis de colorant puis colmatés par hydratation.	43
Figure III-13	- Dangers lors de l'utilisation de l'acide sulfurique ou de la soude caustique.	43
Figure III-14	- Le schéma d'un processus d'anodisation.	44
Figure III-15	- Processus d'anodisation	45
Figure III-16	- Le schéma d'un processus thermo Laquage	48
Figure III-17	- Processus Thermo Laquage	49

Liste Des Table

N°	Nom Des Tableaux	Page
Tableau III -1	- la tenue de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages (sans couche de protection) pour les différents milieux.	29
Tableau III -2	- Désignation classique et symbole abrégé de métal	33
Tableau III -3	- Epaisseur de la couche barrière pour différents oxydes anodiques	39
Tableau III -	- Densité surfacique des pores de diverses couches anodiques	39
4Tableau III -5	- Paramètre De Solution D'un Processus D'anodisation	44
Tableau III -6	- Paramètre De Solution D'un Processus laquage	48

INTRODUCTION GENERAL

L'histoire complète de la corrosion n'est pas encore écrite. Mais il est certain qu'elle va de pair avec les découvertes des matériaux. En se reportant aux premiers âges de l'homme sur la terre, on se rend compte que les premiers matériaux utilisés étaient ceux qui se trouvaient à l'état naturel ou qui n'exigeaient qu'une simple transformation. L'or, l'argent et le bronze ont été utilisés, depuis les temps les plus reculés, tandis que le fer météorique a été employé au début de l'âge de bronze. Cependant, il devait se corroder très rapidement, car on a utilisé presque exclusivement le bronze par la suite.

La corrosion donc est connue depuis longtemps, mais son étude scientifique a dû attendre les essais de Delerive, à l'université de Grenoble, et ceux de Faraday sur l'électricité et la pile de courant en 1830. Ces chercheurs ont alors découvert que la corrosion des métaux était un phénomène électrochimique. Cependant, cette explication ne s'applique pas à toutes les formes de corrosion, la corrosion sèche fait intervenir la réaction chimique du milieu extérieur directement sur le matériau, elle est typique de la corrosion par les gaz et se rencontre à haute température.

L'importance économique de la corrosion dans notre vie quotidienne, domestique ou industrielle, n'est plus à démontrer. Les dégâts causés par ce phénomène entraînent dans le monde des pertes qui se chiffrent chaque année à des milliards de dollars et sans méthodes de prévention et protection ces chiffres peuvent être plus élevés. De ce fait, le développement de technologies de protection plus sûres, économiques et non nuisibles à l'environnement représente un nouveau défi pour l'ingénieur qui devra posséder des connaissances scientifiques approfondies dans les domaines de l'électrochimie et de corrosion des métaux, il devra se familiariser avec les méthodes expérimentales modernes ainsi que les nouveaux matériaux.

Dans cette mémoire, nous verrons phénomène de corrosion et la protection des métaux avec beaucoup de simplicité. et avec un côté appliqué méthodes pour protection l'aluminium en particulier Il regroupe des connaissances sur le phénomène de corrosion (définition, type, causes, etc.) Il présente également des connaissances de base sur les différentes techniques de prévention et de protection contre ce phénomène de dégradation qui semblent utiles voire nécessaires pour une insertion professionnelle rassurante et protection notamment de l'aluminium par le procédé de traitement de surface (anodisation et thermo laquage).

Chapitre

I : *Introduction*
à la corrosion

1. Introduction :

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état original d'oxyde, carbonate, plus stable par rapport au milieu considéré, et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés. Le problème de la corrosion a pris de nos jours une importance considérable, étant donnée l'utilisation de plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne [1]. L'étude de la corrosion se situe à croisée de divers domaines : Electrochimie, physique du solide, métallurgie, chimie, physique, thermodynamique... outre son intérêt scientifique interdisciplinaire, elle répond à un enjeu industriel important.

2. Généralités su le phénomène de corrosion :

2. 1. Définition de la corrosion :

La corrosion est le phénomène d'interaction entre un métal ou alliage métallique et son environnement et qui entraîne une détérioration des propriétés utiles du métal permettant ainsi un retour à la situation stable de sulfure, d'oxyde [2] qui était la sienne avant les opérations d'élaboration et d'extraction. Les composés non métalliques ne sont pas inclus dans la présente définition, les plastiques peuvent être gonfler ou craquer, le bois peut se fondre ou s'ouvrir, le granit peut s'éroder et le ciment portland peut se lessiver mais le terme corrosion est ici limité à l'attaque chimique des métaux [3].

Le nom « corrosion » vient du latin « corroder » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés (physicochimiques, mécaniques, etc.) par interaction chimique avec le milieu environnant. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible car il détruit le matériau et réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Mais d'un autre point de vue la corrosion est un phénomène bien venu, voir souhaité, car elle détruit et élimine un nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion (anodisation de l'aluminium, polissage électrochimique, etc.)[8]

2. 2. Cause de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont complexes et varient selon les industries. Voici quelques exemples propres à des industries spécifiques :

- Dans la construction, la corrosion se produit souvent en raison de l'exposition des métaux aux éléments extérieurs et à des températures extrêmes.
 - L'exploitation minière souterraine se caractérise par un milieu aquatique acide (souvent riche en chlorures et sulfates), combiné à une humidité et à des températures élevées.
 - Dans l'industrie forestière, la corrosion se manifeste fréquemment dans des endroits éloignés : l'équipement étant stationné sur l'herbe ou sur le sol est exposé à une grande quantité d'humidité pendant la nuit. Cela risque de corroder les systèmes mécaniques et les composants intégrés.
- Les conditions environnementales influent également sur les taux de corrosion et la propagation. En

CHAPITRE I : Introduction à la corrosion

présence d'humidité, les métaux se corrodent beaucoup plus rapidement qu'ils ne le feraient dans des conditions sèches.

Un environnement corrosif se caractérise par un ou plusieurs éléments suivants :

- Humidité
- Températures extrêmes
- Humidité de surface
- Particules en suspension dans l'air
- Sel
- Lubrifiants industriels [7]

2. 3. Facteurs de corrosion :

Le phénomène de corrosion dépend d'un nombre de facteurs généralement en relation les uns avec les autres. Ces facteurs peuvent être d'origine interne ou externe, à savoir :

-Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque : T, P, pH, teneur en O₂, teneur en impuretés, etc.

- Facteurs métallurgiques : composition chimique du matériau (alliage métallique), traitements thermiques, etc

-Facteurs définissant les conditions d'emploi (du service) : état de surface, forme des pièces, sollicitation, etc.

-Facteurs dépendant du temps : vieillissement, mode de diffusion d'oxygène ou d'autres gaz (CO₂), modification des revêtements protecteur (peintures). [8]

2. 4. Importance économique de la corrosion :

Les conséquences de la corrosion sur le plan économique et social peuvent être résumées dans les points suivants :

-Pertes directes : remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés

-Pertes indirectes : couts des réparations et pertes de production (temps),

-Mesures de protection : inspections, entretiens, etc.

La diversité des coûts rend toute estimation des charges économiques dues à la corrosion difficile et incertaine. Cependant, il s'agit sans aucun doute de montants assez élevés. [8].

3. Classification de la corrosion

3.1. La corrosion chimique :

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement.

L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO_2 et sulfureux SO_2 , hydrogène sulfureux H_2S etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO_2 .

On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire.

L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :

$$\text{A solide} + \text{B gaz} \rightarrow \text{AB solide}$$

Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique.

On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl_4) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température. [2].

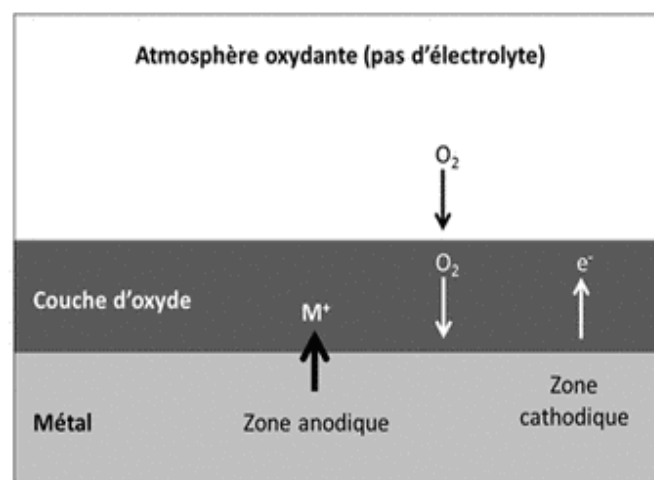


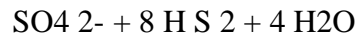
Figure I-1 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

3. 2. La corrosion biochimique :

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

a. Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂, H₂S, H₂SO₄, NH₃ ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

b. Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe²⁺ aux anodes.



c. Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène. [2].

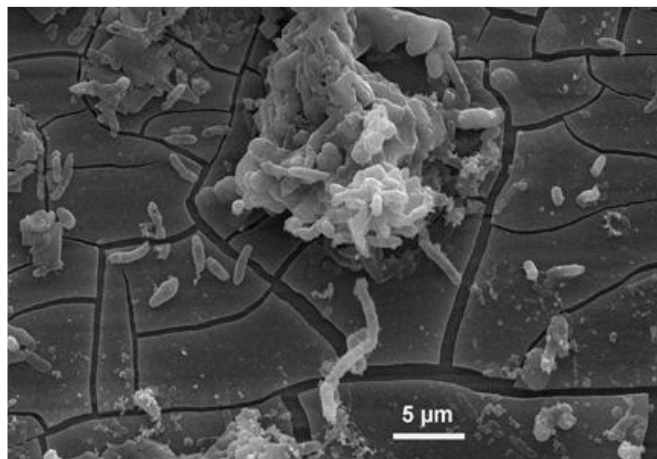


Figure I-2 : Exemple de bactéries responsables de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.

3. 3. La corrosion électrochimique :

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes. La corrosion électrochimique fait appel à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H₂O, O₂, H₂, etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction, dont :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique»,

- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction «cathodique».

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables. [2].

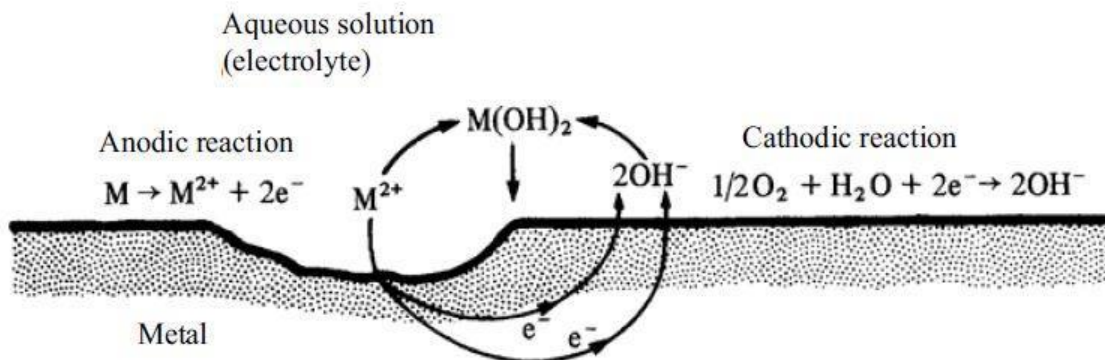


Figure I-3 :corrosion humide d'un métal bivalent M dans un électrolyte qui contient l'oxygène

4. les types de corrosion :

4.1. La corrosion uniforme :

C'est une forme de corrosion dans laquelle la perte de métal est à peu près uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu. Elle peut se produire sur une surface "nue" et l'on parle alors de surface active ou de métal actif. La dégradation peut alors être rapide. Elle se produit souvent sur une surface protégée par une couche superficielle d'oxydes (film passif). La vitesse de dégradation du matériau est alors faible voire négligeable mais non nulle[4]. La corrosion uniforme est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques .



Figure I-4 : La corrosion uniforme exemple d'une d'une porte et d'un véhicule corrodés.

4. 2. La corrosion galvanique :

Elle est due à un contact entre des matériaux de nature différente exposés au même milieu conducteur appelé électrolytique. Cette situation est appelée "couplage galvanique", la corrosion galvanique fonctionne comme une pile qui constituée de deux électrodes plongent dans une solution électrolyte qui est en général une solution diluée d'acide. Les deux électrodes sont reliées extérieurement par un circuit électrique qui assure la circulation des électrons.

Par exemple : dans la figure suivante :

L'électrolyte \rightarrow H₂SO₄.

Anode \rightarrow Zn.

Cathode \rightarrow Cu.

L'anode en Zn est oxydée: $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2 e^-$.

Sur la cathode en cuivre il y a réduction des H⁺ : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Donc la réaction globale est : $Zn + 2 H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + H_2$

Cette pile produit de l'électricité en consommant du zinc (moins noble) par rapport au cuivre (plus noble). Les conditions de cette corrosion :

- Métaux de nature différente (potentiel différent).
- Présence d'un électrolyte.
- Continuité électrique entre les deux métaux.[4]

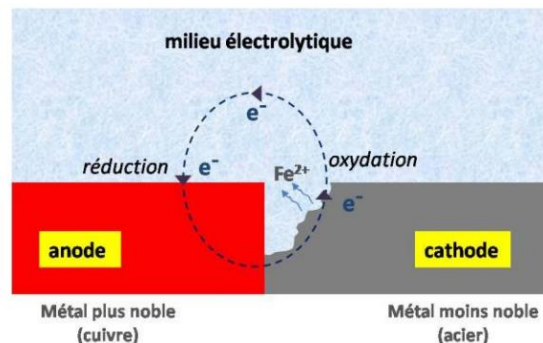


Figure I-5 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.

4. 3. La Corrosion Par Piqûre :

La piqûration est une autre forme de corrosion très localisée, qui se manifeste par de petites piqûres ou de petites cavités sur le métal. Elle s'amorce habituellement sur la partie supérieure d'une surface horizontale et se propage presque verticalement vers le bas. Cette forme de corrosion est extrêmement insidieuse puisqu'elle peut passer inaperçue et ne causer qu'une très faible perte de matériaux avant que ne survienne la défaillance. **Figure I-6** donne un exemple de piqûration. Le mécanisme de la piqûration est probablement le même que celui de la corrosion caverneuse, car l'oxydation se produit dans la cavité elle-même et est assortie d'une réduction complémentaire à la surface. On suppose que la gravité favorise la croissance de piqûre devient de plus en plus

CHAPITRE I : Introduction à la corrosion

concentrée et dense à mesure que la piqûre s'étend. Celle-ci s'amorce souvent sur un défaut de surface localisé tel qu'une rayure ou une légère variation de composition. De fait, on a constaté que les échantillons à surface polie résistaient mieux à la piqûration. Les aciers inoxydables sont quelque peu sujet à cette forme de corrosion, mais l'ajout d'environ 2% de molybdène en accroît beaucoup la résistance. [4]

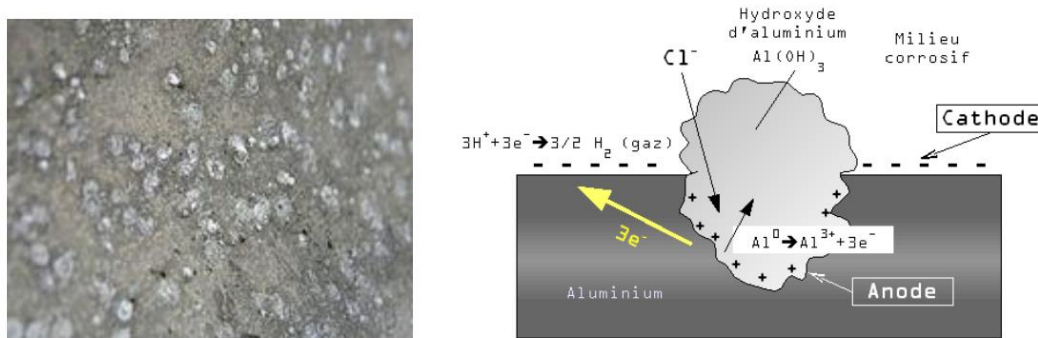


Figure I-6 :Corrosion par piqûre de l'aluminium.

4. 4. La corrosion caverneuse :

La corrosion caverneuse est un type de corrosion qui se produit dans des interstices entre matériaux de même nature, dépôt diverse, des zones de recoin ou des matériaux métalliques se trouve localement en contact avec un milieu corrosif confiné. Le processus de développement de la corrosion caverneuse n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûre, cependant la cinétique et la morphologie de l'attaque s'étend en largeur a la surface de l'interstice ou sous le dépôt et non pas en profondeur comme corrosion pour les piqûres. [4]

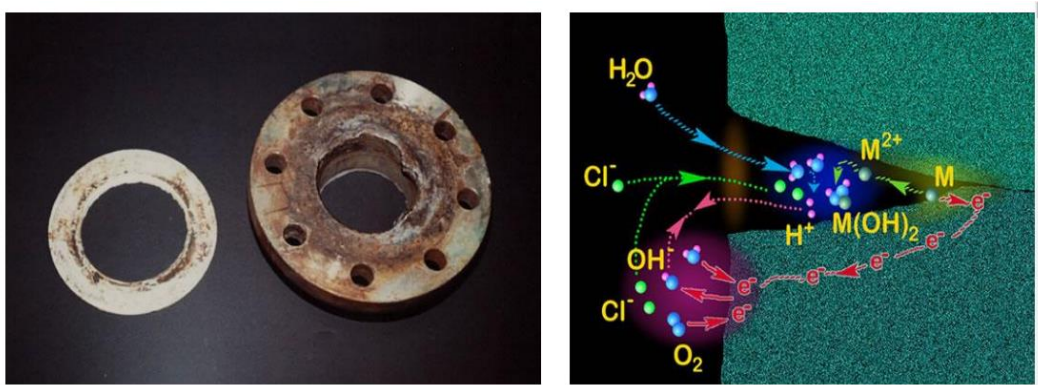


Figure I-7 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.

4. 5. La corrosion sélective :

Avec certains alliages exposés à des ambiances agressives, un des constituants peut se subir une attaque préférentielle. L'attaque peut être localisée et conduire à des perforations ou répartie uniformément et aboutir à une chute des caractéristiques mécaniques. Dans le second cas, les dégradations peuvent échapper à l'observation visuelle, la pièce conservant sa forme et son état de surface initial. Les différents cas de corrosion sélective sont classés suivant la nature des alliages considérés : délignification des laitons : Corrosion sélective du zinc (ou corrosion de l'alliage puis réexposition du cuivre). Le laiton prend la teinte rouge du cuivre. Graphitisation des fontes : corrosion du fer, le graphite n'étant pas attaqué. Avec les fontes à graphite lamellaire, l'attaque progresse en profondeur sans dégradation visible à l'œil nu. [4].

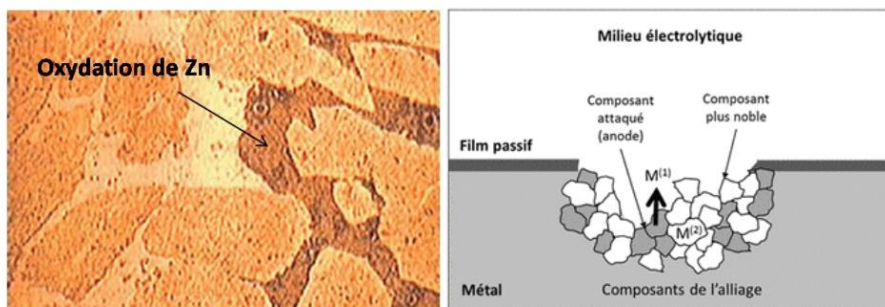


Figure I-8 : Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc).

4. 6. La corrosion inter granulaire :

La corrosion inter granulaire est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion est due soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants ou bien à la précipitation des phases et combinaisons chimiques lors d'un traitement thermique (martensite, nitrures, carbures, etc.). [4].

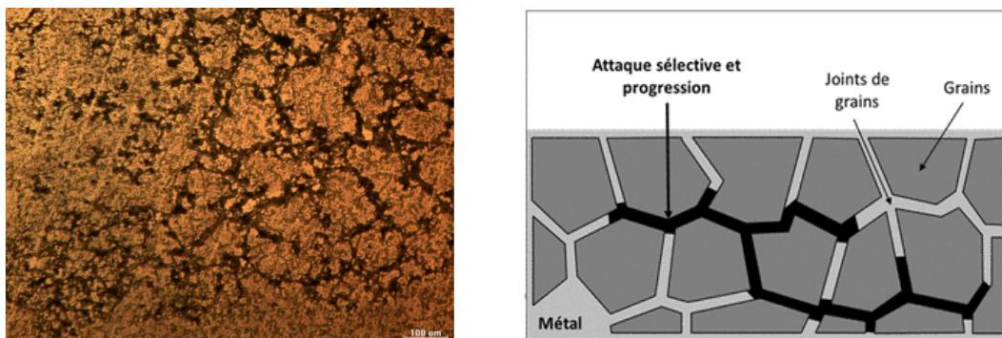


Figure I-9 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique

4. 7. La corrosion-érosion :

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a lieu, souvent, sur des métaux exposés à un écoulement rapide d'un fluide (air, eau, etc.). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb, etc.) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables).[4].

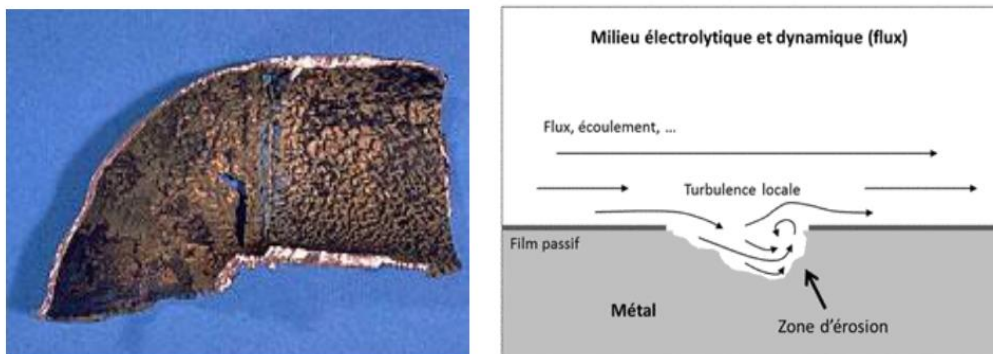


Figure I-10 : Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.

4. 8. Corrosion frottement:

La corrosion-frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression. En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion.



Figure I-11 : La tribocorrosion

4. 9. La corrosion sous contrainte :

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique ;

La corrosion sous contrainte est caractérisée par un temps d'incubation. Plus la contrainte est élevée, plus le temps d'incubation est court. Les fissures s'amorcent ensuite et se propagent alors d'une façon relativement rapide. Les fissures sont initiées par des défauts de surface, elles peuvent être inter granulaires ou Trans granulaires, simples ou branchées suivant l'environnement et la structure du métal. Leur propagation est perpendiculaire à la direction de la contrainte. La corrosion sous contrainte est influencée par certains facteurs métallurgiques [2].

- Composition du métal - Orientation des grains - Composition et répartition des précipités
- Dislocations, traitement thermique On peut citer aussi : la corrosion par érosion, corrosion par fatigue, la corrosion par frottement, la corrosion bactérienne...[4].

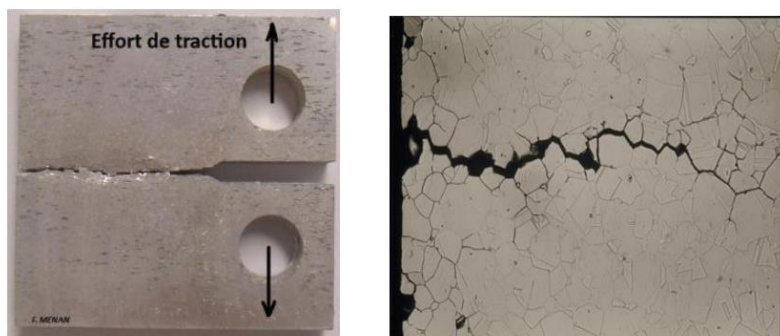


Figure I-12 : Corrosion sous contrainte

4. 10 . Fragilisation par hydrogène :

La présence d'hydrogène dans un réseau métallique génère de très fortes pressions à l'intérieur du métal pouvant aboutir à une rupture différée. Ces atomes d'hydrogène ont pour origine : l'atmosphère environnante, les procédés d'électrolyse et la corrosion électrochimique. [4].

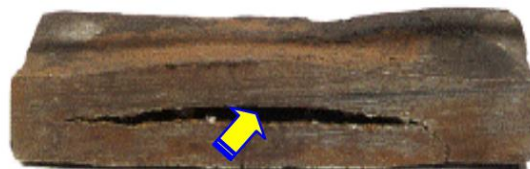


Figure I-13 : La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique

5. Potentiel De Corrosion ;

C'est le potentiel mixte pris par un métal plongeant dans un électrolyte qui est le milieu corrosif. C'est une grandeur cinétique qui dépend de l'élément métallique, mais aussi des paramètres du milieu corrosif. On peut accéder à sa valeur par la loi de Butler–Vollmer ou sous certaines conditions par la loi de Tafel appliquée au système métal – électrolytique[4].

6. Vitesse De Corrosion ;

La vitesse de corrosion, soit la vitesse à laquelle un matériau se dissout par suite d'une action chimique, constitue un important paramètre à cet égard. Elle renvoie à la perte d'épaisseur d'un matériau par unité de temps et de surface. La formule de la vitesse de corrosion est :

$$v_c = \frac{KM}{St\rho}$$

Où M est la perte de masse après le temps d'exposée de l'échantillon, et K est une constante. La vitesse s'exprime en millimètres par an (mm/an), M en milligrammes, ρ en grammes par centimètre cube, S en centimètre carrés, t en heures, et $K = 87,6$. Dans la plupart des applications, une vitesse de corrosion inférieure à environ 0,50 mm/an est acceptable. Dès lors qu'un courant électrique est associé à des réactions électrochimiques de corrosion, la vitesse de corrosion peut aussi s'exprimer en fonction de ce courant ou, plus précisément, de la densité de courant électrique (J), c'est-à-dire, le courant par unité de surface corrodée. La vitesse de corrosion v_c , ici en mol/dm².S, se calcule au moyen de l'équation suivante :

$$v_c = \frac{j}{nF}$$

Où n est le nombre d'électrons associés à l'ionisation de chaque atome de métal et F est la constante de Faraday (96500 C.mol⁻¹)[4].

7. Essais de corrosion :

Comme tout autre essai, les essais de corrosion sont d'une importance vitale aux yeux des spécialistes dans le domaine. D'une façon générale, Ils permettent d'évaluer différents métaux et alliages vis à vis de la corrosion pour différents milieux considérés. Il existe plusieurs types d'essais de corrosion allant d'une observation visuelle simple à l'utilisation de la microscopie électronique, mais une chose importante à retenir c'est qu'il n'existe pas un essai unique pour évaluer un alliage ou un milieu donné. Le plus souvent, on doit recourir au moins à deux essais différents.

Dans ce présent travail, deux techniques ont été utilisées à savoir la méthode électrochimique et la méthode dite « de masse perdue ».

7. 1. Méthode potentiodynamique :

La méthode la plus utilisée pour le phénomène de corrosion électrochimique est la méthode du potentiel constant (stable) ou méthode potentiodynamique.

La polarisation anodique dans les tests potentiodynamiques est utilisée pour accélérer la vitesse de corrosion des métaux et peut être considérée comme des tests accélérés de corrosion.

Lorsqu'un courant est appliqué, le débit des réactions anodiques et cathodiques change de façon à amener la différence de potentiel à la même valeur que celle du courant appliqué, le potentiel varie du potentiel naturel fixe, cette différence de potentiel favorise les réactions d'oxydo-réduction [5].

Cette méthode est extrêmement utile pour étudier le phénomène de corrosion ; elle est basée sur le fait que dans le domaine compris entre 10mV et 20mV autour du potentiel de corrosion E_{cor} , ce dernier varie linéairement avec le courant appliqué, **Figure I-14** ; La pente de la courbe ($\Delta E / \Delta I$) représente la résistance de polarisation, qui peut être liée à la densité du courant de corrosion, représenté par les droites de Tafel D et D' pour les processus anodique et cathodique respectivement.

Les valeurs b_a et b_c peuvent être déterminées à partir des courbes expérimentales de polarisation. Dans le cas d'un transfert de masse contrôlé, par exemple : réduction de l'oxygène, la théorie ci-dessus a été extrapolée afin d'inclure la détermination de la vitesse de corrosion sous diffusion

contrôlée, c'est à dire $b_c \rightarrow \infty$ et $i_{cor} = i_{Lim}$ ainsi : $i_{cor} = \frac{b_a}{(2,3)R_p}$

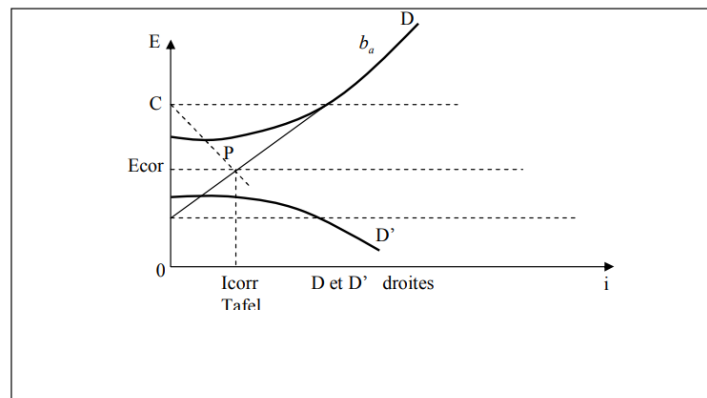


Figure I-14 : Détermination de la densité de courant de corrosion à partir du diagramme d'Evans.

7. 2. Méthode de la masse perdue :

La pesée avant et après immersion prolongée dans un milieu corrosif devait donner une indication sur le degré de corrosion. A priori, c'est une méthode simple, elle donne des informations très rapides à des prix relativement bas et sans perturbation des systèmes ; cependant elle est limitée, car :

- le processus est très lent et difficilement perceptible,
- Les cations métalliques libérés lors de l'oxydation réagissent avec les anions provenant de l'électrolyte et forment des composés insolubles qui peuvent adhérer à la surface du matériau.

Le milieu d'immersion doit être en permanence renouvelé de façon à garder une vitesse de réaction constante [6].

7. 3. Théorie de la masse perdue :

La formule suivante exprime le taux de corrosion :

$$\text{Taux} = \frac{\Delta m}{S.t} . 365$$

Le taux de corrosion est exprimé en g/cm² .an

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

m₁ : masse de l'échantillon avant le test en (g)

m₂ : masse de l'échantillon après le test en (g)

S : surface de l'échantillon en (cm²)

t: temps de l'exposition en (jours)

La corrosion [6] du métal est la détérioration du matériel et sa dispersion dans la solution ; les mesures fondamentales qui doivent être réalisées sont celles des masses perdues. Ces mesures sont converties en termes électrochimiques par la loi de Faraday.

$$i_{\text{corr}} = nF \cdot \frac{\Delta m}{M.t}$$

Où

i_{corr}: densité de courant de corrosion ; A / cm²

n: nombre d'électrons transférés pendant la réaction

F : le nombre de Faraday ; 96500 C / mol

Δm: différence de masse en (g)

M : masse moléculaire en (g / mol)

t: temps en secondes.[6]

Chapitre II :

*Méthodes de
protection
contre la
corrosion*

1- Introduction :

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement. La lutte contre la corrosion englobe plusieurs méthodes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces métalliques,
- Prévention par un choix judicieux des matériaux,
- Protection par revêtements,
- Protection par inhibiteurs,
- Protection électrochimique.

Avant d'aborder ces différentes méthodes, nous commencerons d'abord par une revue des principales catégories d'alliages et de leurs domaines d'emploi [9]

2. Catégories d'alliages et domaines d'emploi :

2.1..Les aciers inoxydables :

Ce sont des alliages fer-chrome contenant au moins 12% de chrome dont la structure dépend des éléments d'addition : ainsi, le nickel (élément gamma gène) stabilise la structure austénitique, alors que le chrome et le molybdène favorisent la structure Ferritique (éléments alpha gènes). Il en existe de nombreuses nuances et leur domaine d'utilisation est étroitement lié à leur composition et à leur structure. [9]

2.2. Les alliages de cuivre :

Le cuivre résiste bien à la corrosion dans l'eau de mer, l'eau douce froide ou chaude, et les acides non oxydants désaérés et dilués. Son utilisation doit être évitée en présence d'acides oxydants, d'ammoniaque et Acides aminés, d'eau à grande vitesse de circulation (érosion-corrosion), d'acide sulfhydrique, de soufre et de sulfures. [9]

2.3. Les Alliages D'aluminium :

L'aluminium est un métal très actif qui doit sa résistance à la corrosion à la formation d'une couche d'alumine (Al_2O_3) protectrice. Il est couramment utilisé en présence d'ammoniaque, d'eau distillée, d'atmosphère industrielle ou urbaine, de soufre, de sulfures, et de fréons. Il faut éviter de l'employer dans les acides forts et les milieux caustiques, le mercure et ses sels, l'eau de mer ou l'eau contenant des métaux lourds comme le fer ou le cuivre. [9]

2.4. Les alliages de nickel :

Le nickel résiste bien aux milieux caustiques (soude, potasse, etc.) et aux acides non oxydants dilués. Son utilisation est à éviter en présence d'acides et sels oxydants, d'hypochlorites, d'eau de mer, et d'environnements soufrés ou sulfureux. Certains éléments d'alliage, notamment le chrome et le molybdène, permettent d'obtenir d'intéressantes propriétés de résistance à la corrosion. [9]

2.5. Les alliages de titane :

Comme l'aluminium, il doit sa résistance à la formation d'un oxyde protecteur (TiO_2). Il est très utilisé en aéronautique et dans l'industrie en présence d'eau de mer, d'acide nitrique, de solutions oxydantes ($FeCl_3$, $CuSO_4$), et d'hypochlorites. Il faut par contre éviter de l'employer dans des milieux comme HF, F_2 , H_2SO_4 , les acides organiques, les solutions alcalines chaudes, les halogénures fondus, et, à haute température, dans l'air, l'azote ou l'hydrogène. Très sensible à l'endommagement par ce dernier, la formation d'hydrures de titane apparaît rapidement au dessus de $250^\circ C$ (ou moins dans le cas d'un chargement cathodique) et fragilise le métal. [9]

3. Prévention par une forme adaptée des pièces :

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter. Voici quelques recommandations :

- Dans le cas des pièces en contact avec un liquide (eau, etc.) il faut prévoir un bon drainage pour éviter le problème d'accumulation (toitures métalliques, récipients métalliques, etc.)
- Faciliter l'écoulement des fluides dans les conduites pour éviter le risque de corrosion-érosion et corrosion par cavitation,
- Choix adapté des matériaux en contact pour éviter le risque de la corrosion galvanique (attaque du métal le moins noble) ou séparation des différents métaux par des isolants électriques. [9]

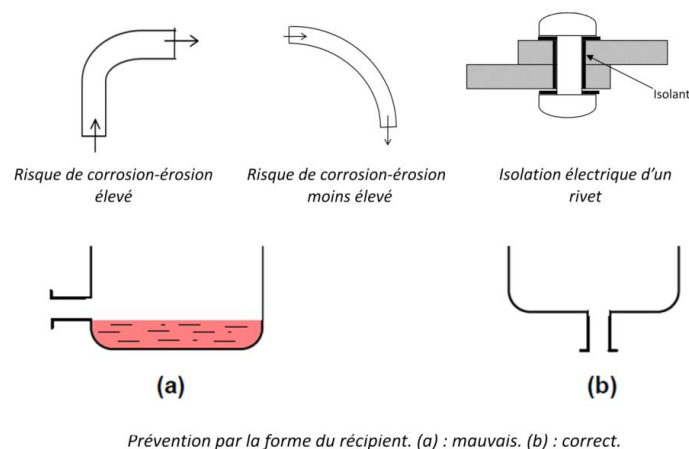


Figure II -1: Exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des pièces.

4. Protection par revêtements :

4. 1. Revêtement métallique :

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques : [9]

a- Les revêtements anodiques : Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc) que nous avons déjà évoqué. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Plus que l'absence de défaut, c'est donc l'épaisseur qui est un élément important de ce type de revêtement. En général, elle est comprise entre 100 et 200 μm . [9]

b- Les revêtements cathodiques : Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial. [9]

4. 2. Revêtement inorganiques non métalliques

Il s'agit des couches obtenues par conversion chimique de surface et des couches étrangères au substrat. Les couches de conversion sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi (phosphatation, anodisation et chromisation), tandis que les couches étrangères au substrat sont fabriquées par des procédés de déposition qui n'impliquent pas une réaction du substrat (émaillage, etc.), la composition chimique dans ce cas est indépendante de celle du substrat. [9]

4. 3. Revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le métal et le milieu électrolytique. Ils sont classés en trois familles :

- Les revêtements en bitume (protection des structures enterrées),
- Les revêtements polymériques,
- Les peintures et vernis.

Les revêtements polymériques sont appliqués par différents procédés : par poudre, par pistolet, par laminage, par immersion ...etc. Leur efficacité dépend de leur résistance chimique intrinsèque dans le milieu et de l'absence de défauts. Les peintures constituent des liquides biphasés opaques. Certaines peintures contiennent des pigments qui agissent comme inhibiteur de corrosion. Ils protègent le substrat par différents mécanismes : effet barrière, suppression des piles électrochimiques, inhibition des réactions électrochimiques... etc. L'importance des peintures dépasse de loin celle des autres méthodes de protection contre la corrosion. La plus part des objets en acier et de nombreux objets en d'autres matériaux sont protégés par des peintures. [9]

5. Protection par inhibiteurs :

5.1. Définition d'un inhibiteur :

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. [9]

5.2. Classification des inhibiteurs :

Les inhibiteurs peuvent être classés de plusieurs façons :

- Par domaine d'application,
- Par réaction partielle,
- Par mécanisme réactionnel é du revêtement est donc le facteur primordial.

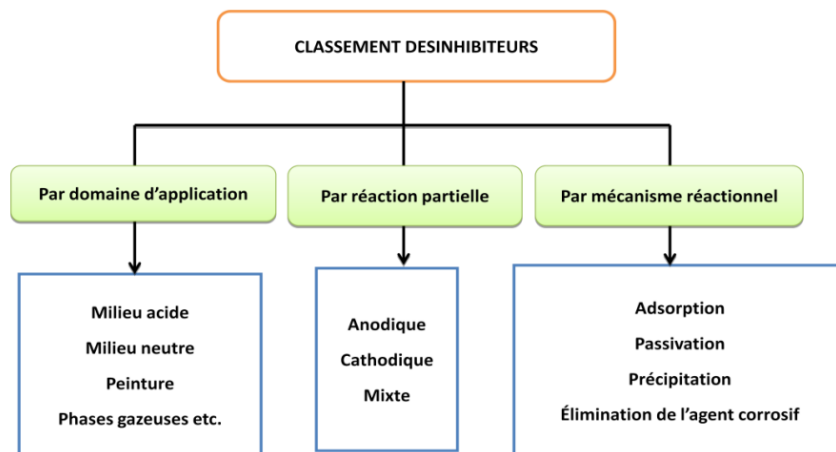


Figure II -2: Classement des inhibiteurs de corrosion.

a- Par domaine d'application :

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer : les Inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. [9]

b- Par réaction électrochimique partielle :

D'après leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles, on différencie trois types d'inhibiteur :

1-Les inhibiteurs anodiques : ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de

CHAPITRE II: Méthodes de protection contre la corrosion

la densité de courant sur ces surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier. [9]

2- Les inhibiteurs cathodiques : induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH⁻ sur les cathodes. [9]

3- Les inhibiteurs mixtes : ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques.

c- Par mécanisme réactionnel :

D'après le mécanisme réactionnel, on distingue l'inhibition :

- par adsorption, par passivation,
- par précipitation d'un film,
- par élimination de l'agent corrosif.

La corrosion peut ralentir suite à l'adsorption d'un inhibiteur à la surface du métal. Le degré d'inhibition dépend alors de l'équilibre entre espèces dissoutes et adsorbées, exprimé par une isotherme d'adsorption. Ce mécanisme est particulièrement important en milieu acide. Certains inhibiteurs oxydants provoquent une passivation spontanée du métal diminuant ainsi la vitesse de corrosion. D'autres inhibiteurs provoquent la formation de films superficiels par précipitation de sels minéraux ou de complexes peu solubles. Ces films réduisent l'accessibilité de la surface vis-à-vis de l'oxygène et, en plus, ils bloquent partiellement la dissolution anodique. L'inhibiteur par élimination de l'agent corrosif n'est que dans des systèmes fermés. Elle se pratique notamment dans les circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques. [9]

5.3. Propriétés :

D'une manière générale un inhibiteur de corrosion doit abaisser la vitesse de corrosion d'un métal sans affecter les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique de ce dernier. Il doit être non seulement stable en présence des autres constituants du milieu, mais également ne pas influencer sur la stabilité des espèces contenues dans ce milieu. Un inhibiteur est définitivement reconnu comme tel s'il est stable à la température d'utilisation et efficace à faible concentration. Il peut être utilisé en vue d'une protection permanente (surveillance primordiale du dispositif) ou plus couramment en vue d'une protection temporaire : durant une période où le matériau à protéger est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage, etc.) ou encore lorsque il est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage, etc.). [9]

5. 4. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :

Le mode d'action des inhibiteurs a fait l'objet de nombreuses hypothèses et reste encore assez mal connu. L'inhibition n'est probablement pas un phénomène simple, mais une suite de processus plus ou moins bien identifiés. En effet, il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion. Un même composé aura d'ailleurs souvent un mécanisme d'action qui sera en fonction du système de corrosion (métal + solution) en présence duquel il se trouvera. On peut concevoir l'action de l'inhibiteur comme : L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif ; dans ce cas, qui est essentiellement celui des milieux acides, le rôle de l'adsorption du composé à la surface sera primordial ;

- Le renforcement d'une barrière préexistante, en général la couche d'oxyde ou d'hydroxyde formée naturellement en milieu neutre ou alcalin. Ce renforcement pourra consister en une extension de l'oxyde à la surface, ou en la précipitation de sels aux endroits faibles de l'oxyde, ces sels étant des produits de corrosion ;
- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur et une ou plusieurs espèces du milieu corrosif, ce type de mécanisme étant également spécifique des milieux neutres ou alcalins ;
 - La stabilisation de films d'oxyde protecteurs (anodiques) par les nitrites, chromates, silicates, phosphates, borates ...etc.
 - La participation aux réactions d'électrode en jouant le rôle de « catalyseur »
- Il est clair, en considérant ces notions générales, que le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être considéré sous deux aspects : Un aspect mécanique (intervention dans les processus fondamentaux de la corrosion) et un aspect morphologique (intervention de la molécule d'inhibiteur dans la structure inter faciale).

L'action des inhibiteurs dépend des conditions telles que :

- La température: l'adsorption décroît quand la température augmente,
- Le pH du milieu,
- La concentration en inhibiteur. [9]

5. 5 Nature des inhibiteurs

a- Inhibiteurs organiques :

Il existe de très nombreux composés organiques susceptibles d'être utilisés comme inhibiteurs. A partir d'une molécule mère manifestant une certaine activité inhibitrice, il est toujours possible de synthétiser d'autres composés dans le but d'améliorer l'efficacité inhibitrice ou encore certaines propriétés physiques tel que : solubilité, pouvoir mouillant, densité ou température d'ébullition ...etc.

Selon la nature de l'hétéroatome, représentant le centre actif susceptible d'échanger les électrons avec le métal, on peut classer les inhibiteurs organiques en trois grandes classes:

CHAPITRE II: Méthodes de protection contre la corrosion

- **Les composés azotés:** Ce sont essentiellement les amines, les pyridines et les sels quaternaires basiques (dérivés de bases comme l'ammoniaque, la pyridine, ...etc). En plus de leurs rôles important par l'adsorption à la surface des métaux, ces composés peuvent avoir des effets spécifiques tels que la neutralisation ou l'alcalinisation du milieu corrosif, l'action filmant à la surface du métal et l'hydrophilisation de la surface du métal.

- **Les composés soufrés :** Ces composés sont d'une utilisation moins courante que les précédents, quoiqu'ils puissent être largement aussi efficaces, notamment à température élevée. L'inconvénient majeur résultant de leurs emplois en milieu acide est le risque de décomposition avec formation de sulfure d'hydrogène favorisant la pénétration d'hydrogène et la fragilisation des aciers en particulier.

- **Les composés oxygénés :** Ces composés, où l'oxygène est le centre actif responsable des propriétés inhibitrices, sont peu nombreux au regard des composés azotés ou soufrés cités précédemment. [9]

b. Inhibiteurs inorganiques (minéraux) :

D'une manière générale, les inhibiteurs inorganiques ou minéraux sont utilisés dans les milieux voisins de la neutralité ou alcalins. Les produits se dissocient en solution et ce sont leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Suivant qu'ils nécessitent plus ou moins d'oxygène dissous dans les milieux corrosifs pour être efficaces, on les classe en inhibiteurs passivant (composés du type MeO ($x=1, 2$ ou 3), nitrites, les molybdates, les chromates...etc.) et non passivant (Phosphates et poly phosphates, Phosphorâtes, sels de zinc...etc.). Les inhibiteurs minéraux (inorganiques) peuvent agir : en passivant le métal, c'est-à-dire en formant ou stabilisant la couche d'oxyde à la surface du métal, en formant des films protecteurs insolubles ou en alcalinisant le milieu. [9]

5. 6. Choix d'un inhibiteur :

Le choix de l'inhibiteur doit être conforme aux normes et aux réglementations concernant la toxicité et l'environnement. Cela remet en cause l'utilisation de certains inhibiteurs, en particulier les chromates de sodium et de potassium. Ils ont été utilisés par ce qu'ils sont parmi les inhibiteurs les plus efficaces. Il en est de même de l'usage des inhibiteurs volatils. Depuis des années, des recherches ont été menées pour les remplacer par d'autres sels minéraux tels que les vanadates, les molybdates, les silicates ... etc. [9]

5. 7. Modes d'expression de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion :

Quel que soit le type de mécanisme par lequel agit l'inhibiteur, le pouvoir protecteur de ce dernier caractérise le ralentissement de la corrosion, c'est-à-dire la diminution du courant de corrosion (ou de la vitesse de corrosion). Le pouvoir protecteur d'un inhibiteur s'exprime par l'équation suivante :
$$\eta = (V_0 - V) / V_0$$
 Où :

CHAPITRE II: Méthodes de protection contre la corrosion

V_0 et V désignent respectivement la vitesse de corrosion en l'absence et en présence de l'inhibiteur. [9]

5. 8. Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion :

Les méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion sont celles de la corrosion d'une manière générale, qu'elles soient électrochimiques ou non. Les essais électrochimiques apportent d'intéressantes indications quant au mécanisme d'action de l'inhibiteur, et, dans la mesure où elles sont correctement interprétées, sur la vitesse des processus de corrosion à l'instant où est faite la mesure, ce qui rend de toute façon nécessaire une étude en fonction du temps. Parmi ces méthodes, on peut citer Mesure du potentiel de corrosion, tracé des courbes stationnaires intensité potentiel, Spectroscopie d'impédances électrochimiques (EIS). [9]

6. Protection électrochimique :

6. 1. Protection cathodique :

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable. En pratique, cette méthode sert surtout à protéger les structures lourdes en acier, telles que les plateformes de forage pétrolier en mer, les bateaux, les conduites enterrées, Etc.

La protection cathodique est contrôlée par deux paramètres fondamentaux:

le potentiel de protection et la densité de courant de protection.

Le potentiel de protection (E_{prot}) est défini par l'équation de Nernst :

$$E_{\text{prot}} = E^0 + (RT/nF) \frac{RT}{nF} \cdot \text{Ln } 10^{-6}$$

Pour $T=25^\circ\text{C}$:

$$E_{\text{prot}} = E^0 - \frac{0.354}{n}$$

Si le potentiel du métal est égale ou inférieur au potentiel de protection la vitesse de corrosion ne peut dépasser une valeur que l'on suppose négligeable. Ainsi, on peut protéger un métal contre la corrosion en lui imposant un potentiel tel que :

$$E \leq E_{\text{prot}}$$

Le courant de protection (I_{prot}) correspond au courant cathodique nécessaire pour imposer le potentiel de protection. Sa valeur dépend de la surface à protéger A et de la densité de courant de protection i_{prot} :

$$I_{\text{prot}} = i_{\text{prot}} A$$

Le principe de la protection cathodique est schématisé par la **Figure II -3**. Elle montre que le déplacement du potentiel dans le domaine de protection (zone hachurée) correspond à $E < E_{\text{prot}}$. la densité du courant partiel cathodique au potentiel de protection vaut : $i_c = i_{\text{prot}}$ [9]

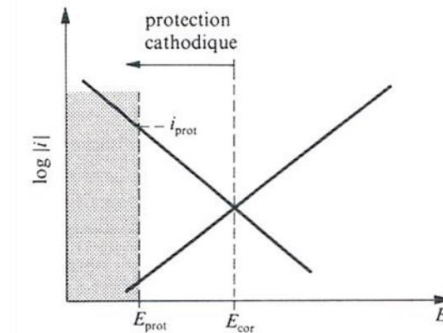


Figure II -3 : Principe de la protection cathodique

a - La protection par anode sacrificielle :

L'anode sacrificielle forme une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. L'anode sacrificielle doit avoir un potentiel réversible inférieur à celui du métal à protéger. Pour protéger l'acier par exemple on utilise des anodes sacrificielles en Zn, Mg ou Al ainsi que leurs alliages.

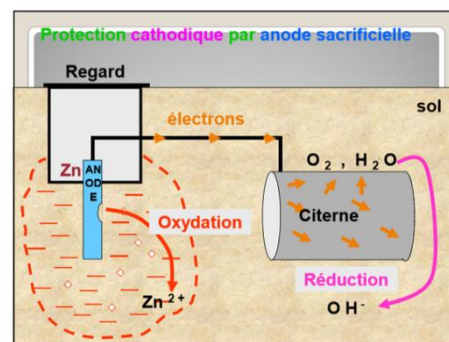
Choix des anodes sacrificielles

Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
- Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel;
- Elles doivent se corroder de manière uniforme dans le milieu considéré, et ne pas être fortement attaquées en l'absence de courant;
- Elles doivent avoir une bonne conductibilité, une bonne résistance mécanique, et pouvoir être obtenues facilement dans des formes et des dimensions variées;
- Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable.

Dans la pratique, seuls trois matériaux satisfont ces critères : ce sont le zinc, l'aluminium, et le magnésium. [9]

Figure II -4 : protection par anode sacrificielle :



b - La protection par courant imposé :

Elle implique l'utilisation d'un redresseur. Cette technique offre l'avantage de pouvoir régler la tension ou le courant selon le besoin.

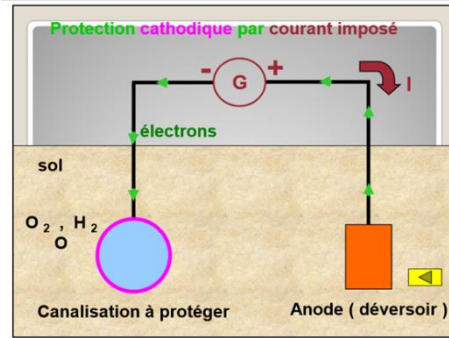


Figure II -5: Exemple de protection cathodique.

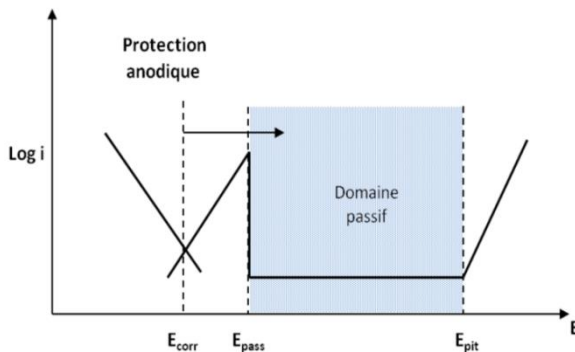
c- Principaux domaines d'application

La protection cathodique est généralement utilisée en association avec un autre mode de protection conventionnel par revêtement ou par peinture, ceci afin de limiter la densité de courant fournie par les anodes ou le générateur. Parmi les principaux domaines d'application on peut citer :

- Les structures enterrées : il s'agit des canalisations, des réservoirs de stockage, etc. La disposition des anodes est fonction de la taille des installations.
- Les structures immergées : carènes ou installations fixes (jetées, appontements, plates-formes de forage offshore) en eau de mer ou en eau douce. [9]

6.2. Protection anodique :

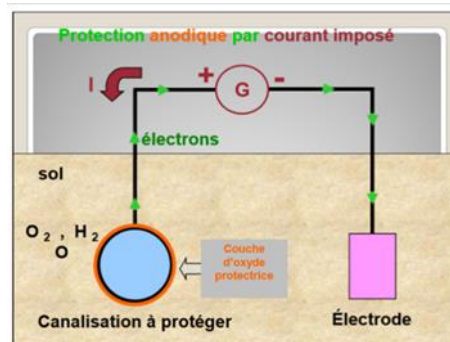
La protection anodique s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{corr} < E_{pass}$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif. Le maintien d'une protection anodique ne nécessite qu'une faible densité de courant. [9]



E_{pass} : potentiel de passivation ; E_{pit} : potentiel de dé passivation ou de piquassons

Figure II -6 : Principe de la protection anodique d'un métal passivable : déplacement du potentiel dans le domaine passif correspondant à : $E_{pass} < E < E_{pit}$.

Figure II -7: Exemple de protection anodique



Chapitre III:

*Traitement de
surface
aluminium*

1. Introduction :

Comme d'autres constructeurs amateurs de télescopes, nous réalisons la plupart des pièces mécaniques de nos instruments en aluminium ou, plus exactement, en alliage d'aluminium. En effet, comme la plupart des autres métaux l'aluminium a des propriétés mécaniques décevantes lorsqu'il est employé pur. Pour améliorer ses caractéristiques on lui incorpore un ou plusieurs éléments en formant ainsi un alliage.

L'aluminium sont légers et faciles à usiner mais leur surface est fragile. Celle-ci est sensible à la corrosion, elle très vulnérable aux salissures, ne serait-ce que par le simple contact des doigts, et son exposition à l'air ternit son aspect.

Les traitements de surface mécaniques se font par sablage, grenailage, brossage et polissage. Le dégraissage est assuré par des solvants organiques, ou mieux, par des solutions alcalines ou acides. Les autres traitements chimiques de surface nécessaires pour une bonne tenue de la peinture sont le décapage acide ou basique, le brillantage et la conversion qui crée, en surface, une couche chromatée de 1 à 3 μm et oxydation anodique 'alumine'.

La peinture s'effectue ensuite en plusieurs étapes : on applique d'abord un primaire, peinture glycérophthalique, vinylique ou à base de caoutchouc chloré. La peinture de finition se fait ensuite comme sur les autres matériaux. On peut également pratiquer le cuivrage, le laitonnage, le nickelage, le chromage par dépôt électrolytique à condition de bien préparer les surfaces par un dégraissage, un décapage

2. Généralités Sur L'aluminium :

2.1. Définition De L'aluminium :

Après l'oxygène et le silicium, l'aluminium est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre (8% environ). Toutefois, les préoccupations de rentabilité limitent son extraction essentiellement au minerai de bauxite.

Il est produit de façon industrielle seulement depuis la fin du 19^{ème} siècle et pourtant c'est aujourd'hui le métal le plus employé après le fer. L'aluminium est un métal dont la densité est faible, c'est pour cela que ses alliages sont aussi dénommés "alliages légers". L'aluminium est le métal le plus léger après le lithium, le béryllium et le magnésium.

L'aluminium conduit bien l'électricité et la chaleur, il n'est pas magnétique.

Ce métal s'oxyde spontanément au contact de l'air. La couche d'oxyde qui le recouvre est appelée alumine. Il s'agit d'un corps très dur et transparent qui isole le métal et qui ne se propage pas vers l'intérieur comme peut le faire la rouille sur le fer.[10]

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

2.2. Elaboration de l'aluminium :

Le minerai utilisé pour l'élaboration de l'aluminium est la bauxite, c'est un oxyde d'aluminium contenant des impuretés tels que la silice, l'oxyde de fer et l'oxyde de titane. Le constituant essentiel est l'aluminium hydraté sous différentes formes : $Al_2O_3 \cdot H_2O$ et $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$. Les deux types de bauxites sont :

- Les bauxites rouges dont la teneur en oxyde de fer est relativement élevée.
- Les bauxites blanches, qui contiennent peu de fer, mais beaucoup de silice. Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison de leur faible teneur en silice (< 5%). La composition chimique moyenne d'une bauxite rouge est la suivante :

- Al_2O_3 : 53 %
 - SiO_2 : 4 %
 - H_2O : 13 %
 - Fe_2O_3 : 25 %
 - TiO_2 : 3 %

Les bauxites blanches servent à la fabrication de ciment, d'abrasif et de produits réfractaires. [11]

2.3. Tenue à la corrosion :

Le phénomène de la tenue à la corrosion est expliqué par la formation d'une pellicule ($\approx 0,7 \mu m$) non soluble dans l'eau et protégeant le métal contre les milieux oxydants et une éventuelle attaque chimique. L'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et contre beaucoup de produits de l'industrie chimique et alimentaire.

Le tableau ci-dessous donne une idée sur la tenue de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages (sans couche de protection) pour les différents milieux. [11]

Milieu	Al 99,5 %		Al Mg		Al Cu Mg	
Eau de mer	2	3	1	2	3	5
Viande	1		-		-	
glace	1		1		2	
Fréon	1		1		-	
Eau distillée	1	2	1	2	-	
Essence	1		1		1	3
Gasoil	1		1		1	
Plâtre	1	2	-		-	
Matériaux de construction	3	6	-		-	
Atmosphère et industrie	2	3	3	2	3	
Eau de fleuve	1	2	1		3	
Acétylène	1		-		2	3
Ammoniac	1	2	1	2	-	
Alcool éthylique sans eau	5		-		-	
Alcool éthylique avec eau	1	2	-		-	
Ethane	1		1		-	
Produit alimentaire	1		-		-	
Légende						
1. Bon résistant		2. Résistant		3. Peu résistant		
4. Encore utilisable		5. Presque résistant		6. Non résistant		

2.4. Surface De L'aluminium :

2.4.1. Notion d'oxyde naturel :

L'aluminium, au contact de l'atmosphère, se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde mince, dont la partie externe est plus ou moins hydratée, suivant les conditions de température et d'humidité relative lors de sa formation. Cette couche, atteignant généralement 2 à 4 nm, joue un rôle important dans le bon comportement du métal vis-à-vis de la tenue à la corrosion, du fait de son renouvellement spontané.

Il convient toutefois de nuancer cette vision « idéale » de la protection du métal par son oxyde car, dans la réalité industrielle, de nombreux facteurs modifient la structure d'extrême surface de l'aluminium.

Dans la grande majorité des cas, on fait appel à des alliages d'aluminium, dans lesquels sont introduits des éléments d'addition. On retrouvera ces derniers dans la couche d'oxyde naturelle, à des concentrations parfois très différentes de celles à cœur du métal.

D'une manière régénérable, certains éléments, tels le magnésium, auront tendance à renforcer le caractère protecteur de la couche, alors que d'autres, par exemple le cuivre, dégraderont cette propriété. [12]

2.4.2. Surface issue de la transformation :

du métal L'aluminium utilisé industriellement est issu de procédés de transformations divers (filage, laminage, usinage, tréfilage, emboutissage...) laissant en surface des résidus, tels que les lubrifiants, qui vont parfois réagir chimiquement avec le métal.

Par ailleurs, l'aluminium peut subir un certain nombre de traitements thermiques qui, outre le renforcement de l'oxyde naturel, entraîneront la ségrégation de certains éléments vers la surface du métal. C'est en particulier le cas du magnésium et du lithium.

En outre, le conditionnement des demi-produits, leur manutention et leur stockage peuvent être à l'origine de nombreuses contaminations superficielles. Il faut, par conséquent, se représenter la surface brute du métal, non pas en deux, mais en trois dimensions (**Figure III -1**), pour comprendre toute l'importance des préparations de surface (dégraissage, décapage), dont le rôle est multiple :

- éliminer les contaminations superficielles, organiques et salines ;
- éliminer les oxydes qui seront gênants vis-à-vis des opérations de finition ;
- se rapprocher en surface, si nécessaire, de la concentration à cœur du métal.

[12]

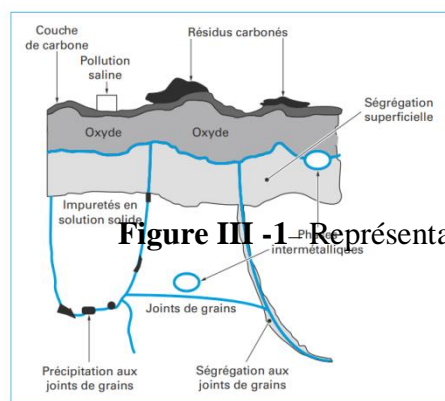


Figure III -1 Représentation schématique de la « surface » de l'aluminium

3. Alliages D'aluminium :

3.1. Influence Des Eléments D'alliages Sur Les Propriétés De L'aluminium :

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d'améliorer ces propriétés, on est conduit à ajouter les éléments d'addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, etc. Ces éléments entrent en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des composition d'alliages industriels. L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique.

a. Addition de Mg : Les alliages formés, possèdent une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, lorsque avec l'aluminium, il s'avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leur poli à cause de la haute résistance chimique.

b. Addition de (Mg + Mn) : Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage.

c. Addition (le (Cu + Si) : Ce sont des alliages de fonderie, présentant une bonne coulabilité et conviennent surtout pour les pièces compliquées.

d. Addition de (Co + Ti + Zn) : Accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité, l'addition de Cu et de Zn facilite l'usinage.

e. Addition de (Mg + Zn + Cu) : Ils sont aptes aux traitements mécaniques et présentent une résistance mécanique maximum. La présence de cuivre les rend durcissables à chaud. [11]

3.2. Recuit Des Alliages D'aluminium

Ses modalités sont :

- Recuit d'homogénéisation.
- Recuit de recristallisation.
- Recuit d'adoucissement (après trempe et vieillissement préalable) [11]

3.3. Propriétés Des Alliages D'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

a. Résistance à chaud : D'une certaine manière, on peut dire que la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C.

b. Résistance aux basses températures : Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles d'où leur application en cryogénie.

c. Résistance à la fatigue : De manière générale, le coefficient d'endurance R_m est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempants et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempants.

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

d. Résistance à la corrosion : Comme pour l'aluminium pur; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule de Al_2O_3 . La protection anti-corrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition.

- Corrosion galvanique à craindre en présence du fer.
- Corrosion de type intergranulaire et sous tension, à craindre en présence d'additions telles que Cu, Mn, Mg + Si et Mg + Zn

e. Mise en forme : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud.

f. Soudage : De manière générale, le soudage est facile grâce à la couche protectrice d'alumine (procédés de soudage sous gaz protecteur TIG ou sous vide). [11]

3.4. Classification Des Alliages D'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques $CuAl_2$, (phase θ), Mg_2Si , Al_2CuMg (phase S), Al_6CuMg_4 (phase T), Al_3Mg_2 , $Al_3Mg_3Zn_3$ (phase T) Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

1. Alliages corroyés : destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres. Profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.

2. Alliages de fonderies : prévus pour le moulage des formes.

3. Alliages frittés : élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.[11]

3.5. La Désignation Des Alliages D'aluminium

La résistance mécanique de l'aluminium est relativement faible mais elle peut être fortement augmentée par l'addition d'autres métaux.

L'élément ajouté influence certaines caractéristiques qui peuvent être :

- Résistance à la rupture
- Limite élastique
- Allongement à la rupture
- Masse volumique
- Conductivité électrique et / ou thermique
- Résistance à la corrosion
- Résistance à la température
- Aptitude au soudage
- Facilité d'usinage
- Aptitude aux traitements de surface
- etc...[13]

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

Métal	Désignation classique	Symbole abrégé
Magnésium	Mg	G
Manganèse	Mn	M
Nickel	Ni	N
Plomb	Pb	Pb
Silicium	Si	S
Titane	Ti	T
Tungstène	W	W
Vanadium	V	V
Zinc	Zn	Z
Zirconium	Zr	Zr
Fer	Fe	Fe

Désignation alphanumérique : L'Association française de normalisation (AFNOR) qui est l'organisme officiel français de normalisation a défini une désignation alphanumérique qui est encore utilisée pour les alliages d'aluminium.

Pour référencer les métaux elle emploie des symboles abrégés qui sont parfois semblables à la désignation classique et parfois très différents comme le montre selon le tableau suivant :
Pour les alliages, la lettre correspondant au métal de base est indiquée en premier. Elle est suivie par un tiret puis par la liste des symboles et leur teneur en %. Si la proportion n'est pas indiquée c'est parce qu'elle est inférieure à 1%.

Exemple : A-U4G est un alliage d'aluminium à 4 % de cuivre et contenant du magnésium. Il était anciennement appelé Duralumin. [13]

Désignation numérique de la norme européenne EN 485-2 : Cette désignation est originaire des Etats-Unis, elle commence par la lettre A (pour aluminium) suivie par un nombre de 4 chiffres (souvent on cite seulement ce nombre en oubliant la lettre A). Cette expression peut être précédée par les lettres EN pour spécifier la norme employée.

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage. A l'exception de la série 1000, les autres chiffres n'ont pas de signification particulière, ils servent seulement à numéroter l'alliage.

A la fin de la désignation on peut avoir un A qui indique qu'il s'agit d'un alliage spécifique à un pays et qui diffère légèrement de ce que prescrit la norme. [13]

Série 1000 : aluminium non allié

La teneur en aluminium est supérieure à 99%. Le deuxième chiffre caractérise l'élément qui constitue la principale source d'impureté, il est égal à 0 si les impuretés ne sont pas définies. Les deux derniers chiffres indiquent le niveau de pureté de l'aluminium.

Exemples :

A-1050 = Teneur minimale en aluminium de 99,50%

A-1070 = Teneur minimale en aluminium de 99,70%

A-1080A = Teneur minimale en aluminium de 99,80%

Série 2000 : aluminium + cuivre

Exemples :

A-2017 = 4 % de cuivre + Mn + Mg + Si. C'est l'A-U4G de l'AFNOR.

A-2024 = 4 % de cuivre + Mg + Mn.

Série 3000 : aluminium + manganèse

Exemples :

A-3003 = 1 % de manganèse + traces de cuivre.

A-2024 = 4 % de cuivre + Mg + Mn.

Série 4000 : aluminium + silicium

Exemples :

A-4006 = 1 % de silicium + Fe.

A-4043 = 5 % de silicium.

Série 5000 : aluminium + magnésium

Exemples :

A-5056 : il correspond à A-G5.

A-5754 : il correspond à A-G3.

Série 6000 : aluminium + magnésium + silicium

Série 7000 : aluminium + Zinc

Série 8000 : aluminium + autres métaux

4. L'anodisation De L'aluminium

4.1. L'électrolyse De L'eau :

Pour comprendre la technique de l'anodisation de l'aluminium, il faut d'abord étudier l'électrolyse de l'eau. Il s'agit d'un phénomène provoqué par le passage d'un courant électrique dans l'eau.

Figure III -2 montre une expérience d'électrolyse de l'eau. Deux électrodes sont plongées dans un récipient d'eau. Elles sont constituées d'un matériel inerte, c'est à dire qui n'intervient pas dans la réaction.

On génère un courant électrique qui traverse le volume d'eau. [14]

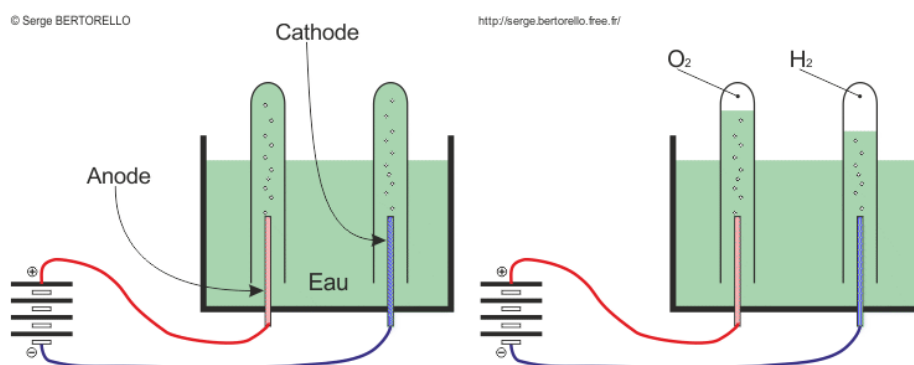


Figure III -2 : Electrolyse de l'eau : Au début de l'expérience (image de gauche) des bulles s'échappent des électrodes. Ensuite, on constate une baisse du niveau d'eau dans chacun des tubes (image de droite). On mesure deux fois plus de gaz dans le tube qui recouvre la cathode (c'est l'électrode reliée à la borne négative de l'alimentation électrique).

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

L'établissement du courant électrique provoque l'apparition de bulles de gaz qui s'élèvent au-dessus des électrodes. On mesure en volume deux fois plus de gaz produit sur l'électrode reliée à la borne négative de l'alimentation.

En fait, l'eau est décomposée par le courant électrique. La réaction de l'électrolyse suit l'équation suivante :



Cette expression indique que les molécules d'eau H_2O sont décomposées en hydrogène H_2 et en oxygène O_2 . Précisément, deux molécules d'eau en se décomposant libèrent deux molécules d'hydrogène et une molécule d'oxygène. Ceci explique que le volume d'hydrogène obtenu est double de celui de l'oxygène.

Dans les conditions normales, les atomes de ces deux éléments se regroupent en molécules de deux atomes. Il est donc plus juste de dire que l'eau est décomposée en dihydrogène et en dioxygène.

Conventionnellement on admet que le courant électrique se déplace dans un circuit depuis la borne positive vers la borne négative de l'alimentation électrique mais ce n'est pas le cas des électrons. Ces particules chargées négativement se déplacent en sens inverse, c'est à dire depuis la borne négative vers la borne positive.

Dans un circuit électrique, les électrons se déplacent dans le sens opposé au sens conventionnel de propagation du courant électrique.

La borne négative est la cathode, elle émet des électrons qui sont recueillis par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau. Ceux-ci devenus électriquement neutres sont libérés de leur association avec l'oxygène et ils vont se regrouper par deux pour former des molécules de dihydrogène (gazeux dans les conditions normales).

Les atomes d'oxygène ont conservé les électrons que les atomes d'hydrogène avaient apportés à leur association et ils deviennent des ions négatifs. Ils sont alors attirés par l'électrode positive ou anode qui leur arrache ces électrons excédentaires. Ils deviennent eux-aussi électriquement neutres et ils vont à leur tour se regrouper par deux pour former des molécules de dioxygène (gazeux dans les conditions normales).[14]

4.2. L'anodisation :

Il s'agit d'une électrolyse de l'eau comme nous venons de la considérer mais l'objet à traiter (en alliage d'aluminium) constitue l'anode. Dans ce cas l'oxygène s'associe directement au métal en formant une couche d'oxyde d'aluminium que l'on appelle alumine.

Au début du 20^{ème} siècle, ce processus était nommé d'une façon plus expressive "oxydation anodique".

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

La couche d'alumine ainsi formée est très dure, isolante et peut être colorée. Elle protège donc l'aluminium tout en répondant aux préoccupations décoratives.

Précédemment nous avons défini l'électrolyse de l'eau d'une façon "théorique". En pratique, on ne peut pas employer de l'eau pure car elle ne conduit pas l'électricité et il faut utiliser une solution ionique. C'est à dire qu'on dissout dans cette eau un corps qui se décompose en ions (ce sont des atomes ou des groupes d'atomes électriquement chargés). Ce bain conducteur d'électricité dans lequel on traite la pièce est appelé électrolyte.

L'électrolyte que nous allons employer est constitué par une solution d'acide sulfurique. C'est cet acide qui est utilisé le plus souvent pour anodiser l'aluminium bien que d'autres électrolytes peuvent être envisagés. La présence de l'acide sulfurique dans l'eau ne modifie pas la réaction de décomposition de l'eau telle que nous l'avons exposée plus haut. L'acide assure la conductivité électrique et il permet ainsi à la réaction d'être efficace.

En se mélangeant à l'eau, l'acide sulfurique H_2SO_4 se dissocie en ions :



La figure 2 illustre schématiquement une installation d'anodisation.[14]

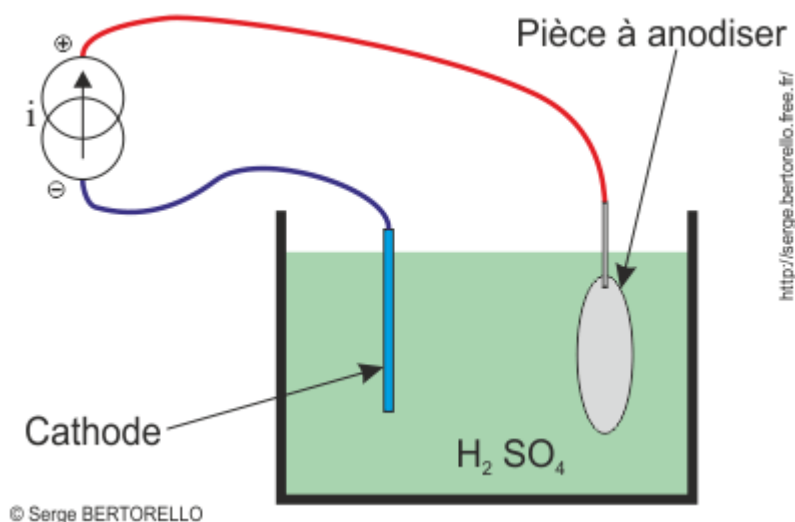


Figure III -3 : Anodisation d'une pièce en alliage d'aluminium.

Il faut noter que tous les alliages d'aluminium ne réagissent pas à l'anodisation aussi bien les uns que les autres, il convient donc de choisir l'alliage avant de réaliser une pièce pour éviter une déception.

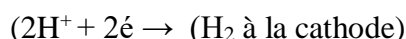
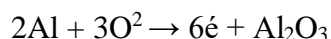
L'anodisation donne d'excellents résultats sur les alliages faiblement alliés des séries 5000 et 6000. C'est pour cela que nous utilisons le 5056 ou le 5774 quand nous nous intéressons à l'esthétique de la pièce et notamment si nous voulons la colorer.

Quand nous ne pouvons pas nous procurer ces métaux, nous choisissons le commun 2017 (= A-U4G). Le résultat est acceptable bien qu'un peu moins flatteur.

D'autres alliages peuvent donner des résultats tout à fait décevants.[14]

4.3. Mécanisme De Formation Des Couches Anodiques

L'électrolyse en milieu aqueux et sous courant continu produit normalement un dégagement gazeux aux deux électrodes (hydrogène à la cathode, oxygène à l'anode). En revanche, si l'on utilise de l'aluminium comme anode, aucun dégagement gazeux n'est observé sur celle-ci, alors que l'hydrogène est toujours visible à la cathode. En première approximation, on peut écrire ce phénomène comme étant une combinaison entre l'aluminium dissous et l'oxygène naissant, selon la réaction :



Cependant, cette description ne peut être que partielle, car elle ne suffit pas à expliquer les différences fondamentales de comportement que l'on observe en modifiant l'électrolyte et les conditions opératoires. En particulier, selon l'action dissolvante du milieu, on obtiendra des couches anodiques à caractère barrière ou à caractère poreux.[12]

4.4. Anodisation De Type Barrière

Si l'on procède, à tension donnée, à une anodisation dans un milieu qui n'a pas d'action dissolvante sur le métal, ni sur son oxyde (solutions à base d'acide borique, d'acide tartrique, d'acide citrique, de tartrate d'ammonium, de carbonate de sodium, de phosphate de sodium...), on constate une chute rapide de l'intensité, qui tend vers une valeur nulle (**Figure III -4**). D'un point de vue pratique, ce type d'opération n'est possible que si le pH de la solution est compris entre 3,5 et 8,5. Sous l'action du courant, les espèces Al^{3+} , O_2 et OH^- sont transportées à travers la couche, la croissance du film se réalisant à l'interface métal/oxyde, voire, en fonction du milieu utilisé à l'interface oxyde/solution, avec incorporation dans la couche des anions issus de l'électrolyte.

Le caractère barrière de la couche formée tient au fait que celle-ci s'oppose rapidement au passage des électrons sous sa tension d'élaboration, au-delà de laquelle on provoque le claquage de l'oxyde. Le processus d'oxydation est par conséquent non évolutif, d'où son appellation. Il convient de souligner que, en réalité, cette propriété barrière n'est valable que si l'alliage d'aluminium utilisé est de pureté élevée. Dans le cas contraire, le courant résiduel est non nul en raison des impuretés du métal qui provoquent des défauts dans l'oxyde. La couche formée est compacte, exempte de porosités et relativement mince. En effet, il a été démontré que son épaisseur finale e (en nm) est fonction de la tension d'anodisation U (en V)[12] :

$$e \text{ (nm) } = 1,25 \text{ à } 1,4U$$

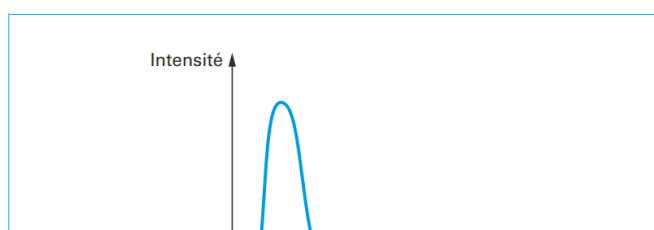


Figure III -4 : Variation de l'intensité en fonction du temps

4.5. Anodisation De Type Poreux

Dans le cas où l'électrolyte choisi possède une action dissolvante sur le métal ou sur son oxyde (milieu acide ou alcalin), le processus d'évolution de la couche anodique relève d'une compétition entre deux phénomènes :

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

Il existe de nombreuses théories et modèles relatifs à l'initiation, à la croissance et à la morphologie des couches poreuses notamment. En intégrant les principaux modèles publiés (Keller, Murphy, école de Manchester...), on peut schématiser le processus comme suit.

Dès la mise sous tension, une couche barrière se forme à la surface ; cette couche possède des propriétés similaires à celles décrites au paragraphe 4.4. et sa formation se traduit par un pic initial de courant. Au moment où l'intensité décroît, la dissolution chimique de l'oxyde commence en de nombreux points. Pendant que l'oxyde croît sous l'action du courant, un processus transitoire voit la naissance dans l'alumine de nombreuses microporosités et irrégularités dont certaines seulement vont évoluer vers la structure poreuse finale (Figure III -5). La croissance poreuse prend par la suite un caractère permanent (sous tension constante) et aboutit à une structure hexagonale (Figure III -6). La couche obtenue est composée d'une partie barrière, qui fait l'interface avec le métal et par laquelle transite le courant (il s'agit donc du front de croissance de la couche), et d'une partie poreuse (Figure III -7).

La dissolution chimique, qui se poursuit lors du processus, concerne la surface de l'oxyde ainsi que les parois des pores. A cet égard, la température du bain joue un rôle prépondérant. [12]

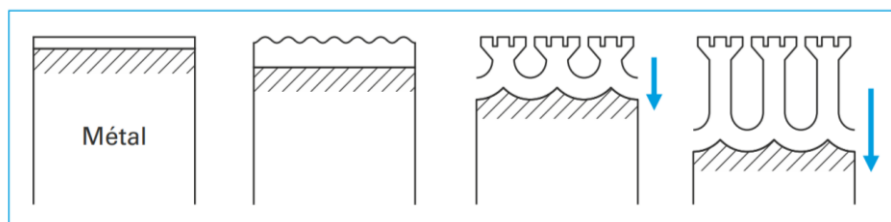


Figure III -5 : Variation de l'intensité en fonction du temps – Représentation schématique de l'initiation d'une couche poreuse

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

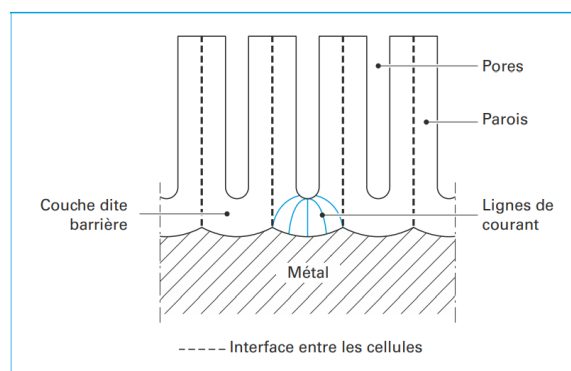
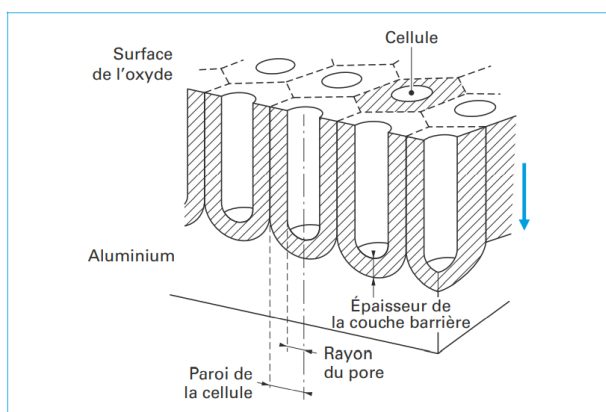


Figure III -6 : Couche poreuse non colmatée **Figure III -7** : Coupe schématique de la structure Poreuse d'une couche d'oxyde

L'épaisseur de la couche barrière, mais également des parois de pores, sont fonction de la tension d'élaboration et de l'électrolyte utilisé. Les tableaux 1 et 2 présentent les principales caractéristiques des couches anodiques obtenues dans différents milieux.

On constate, en particulier, que la modification des conditions opératoires conduit à des différences morphologiques significatives des couches anodiques, ce qui est de première importance, car les propriétés telles macroscopiques (tenue à la corrosion, résistance à la rayure...) s'en trouveront affectées. Par ailleurs, il est généralement admis que l'oxyde formé est anhydre et amorphe, ce qui est néanmoins discuté par certains auteurs, notamment en raison de l'incorporation dans la couche des anions issus de l'électrolyte.

Cette contamination, variable selon le milieu considéré, influence également la structure et les propriétés des couches.[12]

Nature de l'électrolyte	Épaisseur de la couche barrière (en nm.V ⁻¹)
Acide sulfurique 15 % (en masse) à 10 °C	1,00
Acide oxalique 2 % (en masse) à 24 °C	1,18
Acide phosphorique 4 % (en masse) à 24 °C	1,19
Acide chromique 3 % (en masse) à 38 °C	1,25

Conditions d'anodisation		Nombre de pores (en 10 ⁹ .cm ⁻²)
Électrolyte	Tension (en V)	
Acide sulfurique 15 % (en masse) à 10 °C	15	76
	20	52
	30	28
Acide oxalique 2 % (en masse) à 25 °C	20	35
	40	11
	60	6
Acide chromique 3 % (en masse) à 50 °C	20	22
	40	8
	60	4
Acide phosphorique 4 % (en masse) à 25 °C	20	19
	40	8
	60	4

4.6. Structure Poreuse De L'alumine :

L'alumine se forme naturellement sur l'aluminium au contact de l'air mais ce revêtement spontané est très fin et il est donc fragile.

Le traitement électrolytique produit une couche d'alumine beaucoup plus épaisse en progressant de l'extérieur vers l'intérieur. Ce dernier point peut paraître paradoxal puisque l'alumine est un isolant. En fait, sa structure est poreuse et permet ainsi à l'électrolyte de conduire le courant électrique jusqu'au métal.

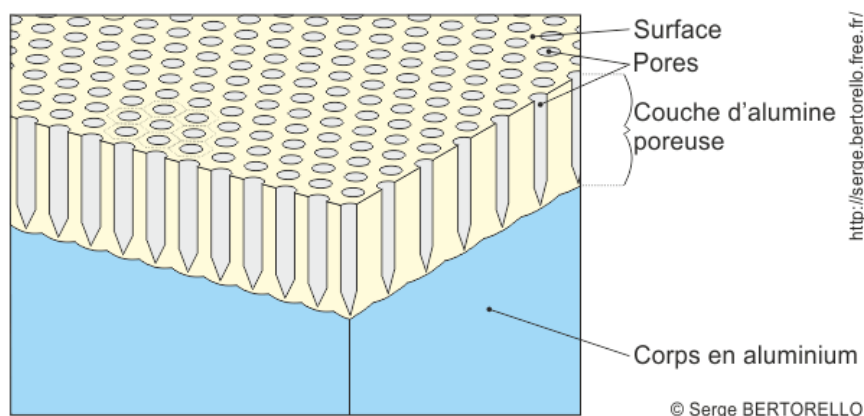


Figure III -8: Vue en coupe de la structure de l'alumine obtenue par anodisation à la surface d'une pièce en alliage d'aluminium.

La silhouette hexagonale de certaines cellules a été tracée autour de quelques pores vers la gauche de l'image. Lors de l'anodisation, l'alumine forme un maillage de cellules hexagonales avec en leur milieu un pore qui se prolonge jusqu'au métal. C'est à la base de ces pores que se forme l'alumine en progressant vers l'intérieur.

Le diamètre des pores dépend notamment de la nature de l'électrolyte mais il ne varie pas en fonction de l'intensité du courant électrique. Par contre, la distance entre les pores est influencée par cette intensité, en augmentant le courant on éloigne les pores. La dimension des cellules est habituellement comprise entre 10 et 50nm.[14]

4.7. Epaisseur De L'alumine :

La formule suivante nous donne la vitesse de formation de la couche d'alumine en $\mu\text{m}/\text{mn}$ (micromètre par minute) :

$$V = 0,029 \cdot I/S \text{ (}\mu\text{m}/\text{mn)}$$

avec : I/S = densité du courant en mA/cm^2

Ainsi, avec un courant électrique de $15\text{mA}/\text{cm}^2$ l'épaisseur de la couche d'alumine se forme à la vitesse de $0,435 \mu\text{m}/\text{mn}$. En une demi-heure (soit 30 minutes), il se forme une couche d'alumine de $0,435 \times 30 = 13\mu\text{m}$.

L'épaisseur de cette couche protectrice influence légèrement les dimensions de la pièce traitée car elle vaut approximativement le double de l'épaisseur de l'aluminium enlevé par le traitement.

Après l'anodisation, une moitié de cette épaisseur se trouve au-dessus de la surface initiale. Notez toutefois qu'il s'agit d'une approximation et il est préférable de faire un essai préalable pour éviter

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

toute surprise sur une pièce de haute précision. En effet, suivant le traitement et le métal choisis, la valeur de cette surépaisseur peut augmenter jusqu'à 70% de l'épaisseur totale de l'alumine. Pour la plupart des pièces que nous réalisons en alliage d'aluminium, nous les anodisons pendant une demi-heure avec un courant de 10mA/cm². [14]

4.8. Concentration De L'acide :

La concentration en acide influence la conductivité électrique et ceci n'est aucunement critique. Par conséquent, la concentration de l'acide n'est pas un critère important.

L'acide sulfurique destiné aux batteries de voiture convient très bien pour l'anodisation de l'aluminium. Le même bain peut être employé pendant des mois, voire des années dans un atelier professionnel. Lorsqu'elle devient importante, c'est la quantité d'aluminium dissous qui rend nécessaire le changement de bain.

Une quantité trop importante d'aluminium dans l'acide est nuisible mais son absence totale n'est pas bonne pour autant. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un bain qui a déjà été employé. C'est pour cela que certains, au moment du renouvellement du bain, conservent une partie (20 à 30%) de l'acide usagé. [14]

4.9 Température De L'électrolyte :

La température optimale pour l'anodisation est 20°C (Il existe bien des procédures qui emploient des basses températures de 1 à 3°C, c'est l'anodisation dure mais il n'est pas question de cette technique particulière dans cet exposé).

En pratique, on procède entre 18 et 22°C et il faut veiller à ne pas dépasser 24°C car au-delà de cette valeur, l'alumine se dissout trop vite dans l'acide. [14]

4.10. Intensité Du Courant D'anodisation :

Le courant électrique doit être constant lors de l'anodisation car sa variation entraînerait une variation de la distance des pores ce qui provoquerait l'obturation de certains d'entre eux et donc une irrégularité du traitement.

Il n'est donc pas question d'employer une alimentation qui serait simplement redressée comme celle qui constitue un chargeur de batterie pour voiture.

Pendant un temps, nous avons utilisé une alimentation régulée en tension. Un ampèremètre indiquait l'intensité du courant et nous intervenions périodiquement sur la tension fournie afin de réguler la valeur du courant. Ce n'était pas une bonne idée car nos résultats étaient irréguliers surtout pour les pièces colorées.

Nous employons maintenant une alimentation régulée en courant et nos résultats sont très satisfaisants.

Bien entendu, il ne faut pas modifier le réglage du courant en cours d'opération. Il faut régler sa valeur avant de l'appliquer et ne plus le modifier ensuite.

La valeur recommandée pour le courant varie selon les auteurs de 8 à 25 mA par cm². Nous-mêmes, nous choisissons habituellement un courant de 10 mA/cm². [14]

Alimentation régulée en courant (continu)

Pour faire bref, un courant électrique est un flux d'électrons (qui se mesure en Ampères) qui se déplacent sous l'influence d'une tension (qui se mesure en volts).

1 Ampère correspond à un flux de $6,241 \cdot 10^{18}$ électrons par seconde.

Le plus souvent, on nomme alimentation un dispositif qui génère une tension continue "u" et qui fonctionne correctement tant que le courant "i" ne dépasse pas une valeur limite. La **Figure III -9** montre l'évolution de la tension fournie par une alimentation régulée en tension. La tension est constante jusqu'à un courant limite à partir duquel la tension diminue d'une façon différente suivant le type d'alimentation. Les lignes pointillées montrent des exemples. Un "retour en arrière" de la courbe peut être voulu en prévention des courts-circuits.

L'alimentation représentée par la ligne verte et continue de la **Figure III -9** peut aussi être considérée comme un générateur de courant constant tant que la tension ne dépasse pas une limite.

Pour ce type d'alimentation, on peut renverser la figure en intervertissant u et i. On obtient la **Figure III -10** caractéristique d'une régulation en courant. Pour être plus complet, une "vraie" alimentation régulée en courant permet d'ajuster finement le courant choisi. Ainsi, elle alimente notre dispositif d'électrolyse avec un courant constant. Il faut toutefois qu'elle puisse délivrer une tension d'une quinzaine de volts.

Pour terminer cet aperçu, la **Figure III -11** illustre l'évolution de la tension que l'on obtient en sortie d'une alimentation simplement redressée comme l'est bien souvent un chargeur de batterie pour automobile.

Elle n'est régulée, ni en tension, ni en courant, et elle ne convient pas à l'anodisation. [14]



Figure III -9: Alimentation régulée en tension.



Figure III -10 : Alimentation régulée en courant.



Figure III -11: Alimentation redressée.

4.11. Le Colmatage :

Après l'anodisation, les pores de l'alumine doivent être refermés pour une meilleure résistance de cette couche protectrice et pour éviter qu'elle ne retienne des corps indésirables qui pourraient être corrosifs ou inesthétiques. C'est l'opération du «colmatage» ou «fixage». La méthode la plus utilisée pour cela consiste à faire séjourner le matériau dans l'eau bouillante.

On peut profiter de ce phénomène pour introduire un colorant avant le colmatage. Le colorant ainsi emprisonné garantit une coloration très résistante au frottement.

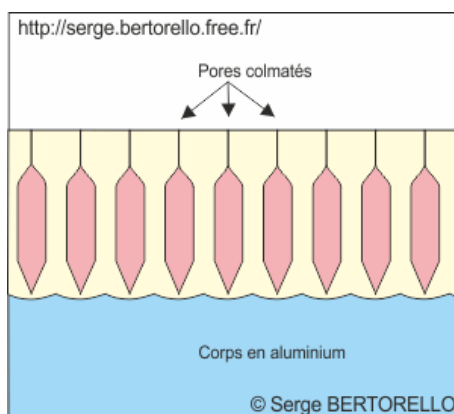


Figure III -12: Pores de la couche d'alumine remplis de colorant puis colmatés par hydratation.

L'alumine formée pendant l'anodisation ne contient pas d'eau et elle s'hydrate au contact de l'eau bouillante. L'eau qui pénètre ainsi dans l'alumine provoque une augmentation de son volume qui referme les pores.

Lors du colmatage, l'eau se combine avec l'alumine pour former un corps stable qui résiste à une température supérieure à 400°C.

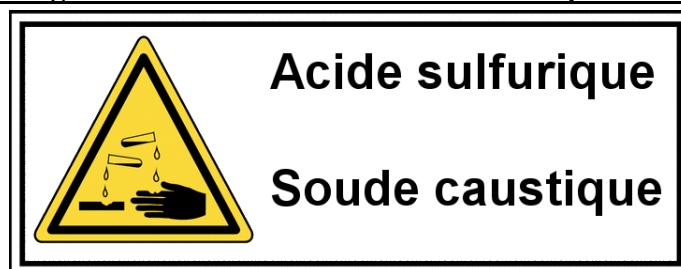
Pour que le colmatage soit efficace, il faut que la pièce séjourne dans l'eau bouillante pendant un temps au moins égal à la durée de son anodisation.

Le colmatage peut être réalisé avec une température inférieure à celle de l'ébullition de l'eau mais alors il faut beaucoup augmenter la durée. En tout cas, au-dessous de 50°C ce n'est plus possible.

Des impuretés dans l'eau même en très faible quantité peuvent contrarier le colmatage, c'est pour cela qu'il faut réaliser cette opération avec de l'eau déminéralisée.[14]

5. L'anodisation En Pratique

Figure III -13 : Dangers lors de l'utilisation de l'acide sulfurique ou de la soude caustique



Pour réaliser une anodisation, nous devons utiliser l'acide sulfurique ainsi que la soude caustique. Ces produits chimiques sont corrosifs et provoquent de graves brûlures, ils doivent être manipulés avec précaution.

Ces produits ne doivent pas être disposés à la portée d'un enfant.

Pour l'utilisation de l'acide sulfurique ou de la soude caustique, il faut porter un vêtement de protection approprié, des gants et un dispositif de protection des yeux ou du visage.

Notez que le code du travail interdit la manipulation de ces produits par les mineurs. Cette loi vaut aussi bien pour les établissements scolaires que pour les entreprises et même pour les associations...

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

Conduite à tenir en cas de contact avec la peau : rincer abondamment avec de l'eau.

Conduite à tenir en cas de contact avec l'œil : rincer à l'eau et consulter un ophtalmologiste.

Si vous tenez à un vêtement qui vient de recevoir de l'acide sulfurique ou de la soude caustique, rincez-l 'immédiatement. [15]

6. Conditions De Travail :

L'anodisation entraîne l'émission d'hydrogène qui est susceptible d'une réaction explosive avec l'oxygène en présence d'une flamme ou d'une étincelle. De plus, les bulles de gaz qui éclosent à la surface de l'acide sulfurique diffusent dans l'atmosphère des gouttelettes microscopiques de cet acide qui vont se déposer sur l'environnement immédiat. Cet aérosol va donc corroder les pièces métalliques placées à proximité (le fer va rouiller) et irriter les voies respiratoires de la personne qui aurait la mauvaise idée de les respirer.

Pour ces raisons, il est impératif d'effectuer l'anodisation dans un lieu bien aéré et éloigné de tout élément métallique (notamment en fer) que l'on souhaite préserver.

Il faut aussi être à proximité immédiate d'un lavabo autant pour des raisons pratiques que pour la sécurité.

Nous espérons que vous comprendrez que la fréquentation du lieu doit être contrôlée. En effet, il ne faut surtout pas laisser la possibilité d'approcher à des enfants ou à des animaux car leur comportement est imprévisible et peut donc être dangereux.[15]

7.Processus D'anodisation :

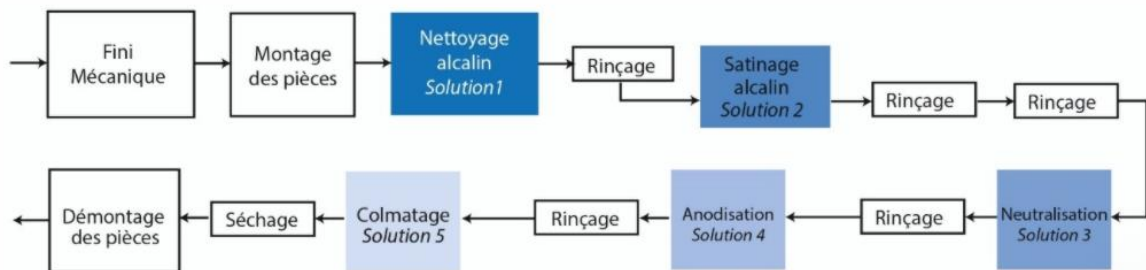


Figure III -14 : Le schéma d'un processus d'anodisation

Solution #	Type de solution	Composition	Température		Temps (min)
			°C	°F	
1	Nettoyage alcalin	-	60-71	140-160	2-4
2	Satinage alcalin	NaOH 5 % en poids	50-71	120-160	2-20
3	Neutralisation	HNO ₃ 25-35 % de volume	Pièce	Pièce	2
4	Anodisation	H ₂ SO ₄ 15 % en poids	21-25	70-75	5-60
5	Colmatage	Eau (pH 5.5-6.5)	100	212	5-20



Figure III -15 : Processus D'anodisation

1. **Préparation superficielle du matériau par**
 - Polissage à la brosse de coton
 - Ponçage au papier abrasif
 - Grattage à la brosse métallique
 - Autres types de polissage
2. **Dégraissage**
 - Acide pour le rodage, grattage, etc.
 - Alcalin pour le polissage
3. **Lavage à l'eau en circulation et sous régénération continue**
4. **Décapage de nettoyage** (à la soude caustique à 5 % dans de l'eau à 45-50 °C) ou décapage pour finition mate directe, ou polissage chimique ou électrolytique
5. **Lavage à l'eau en circulation et sous régénération continue**
6. **Neutralisation** (acide nitrique 60°Be à 50 % dans de l'eau à température ambiante)
7. **Lavage à l'eau en circulation et sous régénération continue**
8. **Oxydation anodique** (acide sulfurique à 20 % dans de l'eau à une température de 19-20 °C et courant continu à 1,5 A/dm²)
9. **Lavage à l'eau en circulation et sous régénération continue**
10. **Coloration** | De par sa structure, la couche d'oxyde formée en milieu sulfurique ressemble aux fibres textiles et peut, tout comme elles, être teintée au moyen de colorants spéciaux dérivés des colorants de l'industrie textile. Comme la couche est transparente, la brillance du métal de base est transmise et permet d'obtenir des aspects qu'aucun autre traitement par peinture ou vernis n'est susceptible d'égaliser. Les colorants utilisés pour la coloration de l'aluminium peuvent être organiques ou minéraux.
 - Coloration organique | Pour ce traitement, de nombreux types de colorants peuvent être utilisés. Leurs différences résident essentiellement dans le mécanisme d'absorption. La plupart sont absorbés par capillarité. Il s'agit en particulier des

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

groupes de colorants acides et de colorants dits « substantifs », comme l'alizarine et l'indigo.

D'autres donnent lieu à une combinaison chimique avec l'aluminium, comme les colorants à base de complexes métalliques, les colorants diazo et les colorants basiques. Ces derniers exigent un traitement à l'aide de substances collagènes et sont peu utilisés en raison de leur faible résistance à la lumière.

Ce type de coloration s'emploie pour les applications générales à colorer et qui ne sont pas exposées aux intempéries.

- Coloration électrolytique | Ce traitement fait usage d'oxydes métalliques, qui se fixent dans les porosités de la couche d'oxyde et sont très résistants à lumière ainsi qu'à la chaleur.

Employée dans des applications générales nécessitant des couleurs solides et exposées aux intempéries.

11. *Lavage à l'eau en circulation et sous régénération continue*

12. *Colmatage ou fixation* | L'expérience a démontré qu'une couche d'oxyde de 20 microns formée sur de l'aluminium et non colmatée disparaît en quelques heures dans une solution déci normale d'acide nitrique. Cette même couche parfaitement colmatée ne subit pratiquement aucune perte au bout de 1200 heures d'immersion. En réalité, la résistance aux acides constitue une des principales caractéristiques de l'alumine formée lors du colmatage ou la fixation.

Pour les applications d'architecture, il est indispensable de colmater dans l'eau très pure, pratiquement avec de l'eau déminéralisée, voire déionisée. La procédure la plus courante pour la déminéralisation est l'échange anionique et cationique avec des résines spéciales échangeuses d'ions. Il s'agit d'obtenir un double échange d'ions (installation de deux corps) et pas uniquement un simple adoucissement de l'eau qui, en raison de la transformation des éléments insolubles en sels solubles, entraîne le risque de produire des corps nocifs pour la qualité du colmatage ou de la fixation. La température de l'eau est déterminée par la température d'ébullition (en pratique 97 à 100 °C) afin que l'hydratation puisse se produire de façon très lente au contact des molécules d'eau à basse température. Il est recommandé de maintenir le pH entre 5,5 et 6,5. Le réajustement s'effectue à l'aide de soude, de carbonate de soude ou d'acides sulfuriques, acétiques et boriques.[16]

8. ThermoLaquage :

8.1. Définition :

La technique du thermolaquage est un traitement spécifique réservé aux matériaux en métal comme des pièces métalliques ou en aluminium brut. On pulvérise une peinture en poudre chargée en électricité statique qui va naturellement se déposer (à la manière de petits aimants) sur toute la surface de la pièce. L'utilisation d'une **pulvérisation en poudre** permet d'atteindre tous les recoins de la pièce de manière uniforme. Cette technique, qui consiste à pulvériser de la poudre, s'appelle **projection électrostatique** ou **poudrage électrostatique**. Ce type de traitement dispense l'utilisation de produits chimiques nocifs pour la santé et l'environnement comme les solvants. Après avoir été recouverte de poudre, la pièce doit passer dans un four où elle sera chauffée pendant 20 minutes à 200°C. On appelle ce procédé la polymérisation.[17]

8.2. Avantages du thermolaquage :

Cette technique utilisée pour le revêtement et la protection des métaux possède des propriétés intéressantes qui ont contribué à sa démocratisation. Comme nous l'évoquons au début de l'article, la peinture prend la forme d'une résine en poudre thermoplastique rendant inutile les produits toxiques que sont les solvants. Outre le gain en matière environnementale ou de santé, d'autres bénéfiques sont à prendre en compte. Le thermolaquage est aussi plus économique et l'absence de solvants réduit le risque d'incendie.

Nous pouvons citer d'autres avantages pour les industriels qui choisissent d'inclure le thermolaquage dans leur procédé de fabrication :

- le poudrage électrostatique permet d'obtenir des effets intéressants et originaux sur les matériaux, comme un **effet métallisé**, un **effet texturé** ou encore un **effet sablé** ;
- la surface peinte possède une dureté supérieure ce qui lui confère une **meilleure résistance aux chocs** ;
- **la surface thermolaquée résiste mieux à la corrosion** si on compare avec une autre surface utilisant une peinture classique avec des solvants ;
- les couleurs tiennent plus longtemps avec la technique de thermolaquage, elles sont moins sensibles aux agressions des éléments extérieurs comme les rayons du soleil, l'humidité ou encore le sel ;
- **une pièce en métal thermolaquée présente une surface uniforme**, il n'y pas de problèmes de coulures souvent rencontrés en utilisant une peinture avec solvant. De même, l'épaisseur de la couche de peinture reste la même sur toute la surface de la pièce en alu ou en métal ;
- L'application d'une laque avec traitement thermique offre un choix de couleurs beaucoup plus important qu'avec les processus d'application plus anciens.[17]

8.3. Les Différentes Etapes Du Thermolaquage :

- Le **Traitement de surface chimique** qui permet de garantir une bonne adhérence de la peinture sur le métal et également une optimisation des performances anticorrosion.
- Le **Poudrage électrostatique ou peinture** qui consiste à appliquer la poudre sur la pièce.
- **La cuisson ou Polymérisation** dans le four qui solidifie la résine de la poudre et confère ainsi les caractéristiques mécaniques et d'aspect de la teinte[17]

9. Processus thermo Laquage :

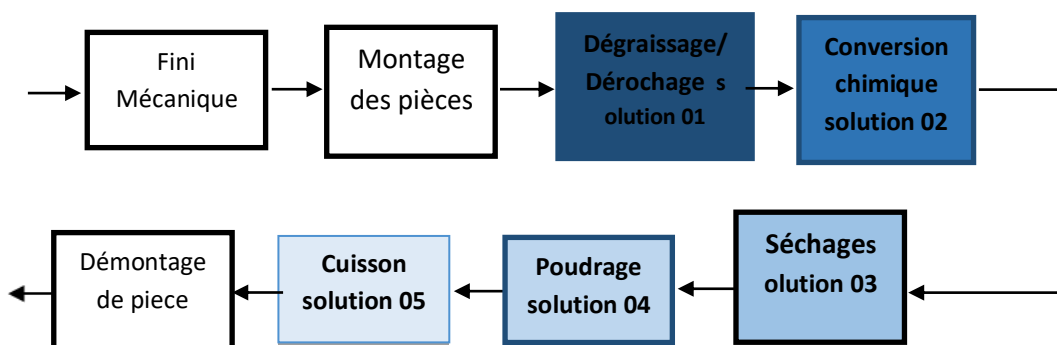


Figure III -16 : Le schéma d'un processus thermo Laquage

Solution #	Type de solution	Composition	Temperature °C	Temps (min)
1	Dégraissage/Dérochage	d'acide dégraissant	25 à 42°C	10 minutes
2	Conversion chimique	—	25 à 42°C	1 a 2 minutes
3	Séchage	—	80 et 100°C	15 minutes
4	Poudrage	Polyester	—	1,4mètre/minute.
5	Cuisson	—	100 °C et 200 °C	15 minutes



Figure III -18 : Processus Thermo Laquage

9.1. Montage des profilés sur le convoyeur :

Les profilés bruts inspectés pour les anomalies de surface, de forme et de dimensions et jugés conformes seront montés sur une table de chargement. Un trou (de diamètre <math><6\text{ mm}</math>) sera percé sur la face la plus exposée à distance de 10 mm de l'extrémité du profilé.

Ce trou permet le passage d'un fil d'accrochage en acier qui suspend le profilé au convoyeur, assurant ainsi la position verticale des profilés pendant toutes les étapes du processus.

- Tout profilé présentant un défaut sera séparé et isolé.

Après montage des profilés, deux sous processus sont nécessaires :

- Préparation de la surface,
- Thermolaquage proprement dit.[16]

9.2.Préparation De La Surface Des Profilés :

- **Dégraissage/dérochage :**

Ce procédé a pour but d'éliminer toutes les graisses et les huiles adhérant aux surfaces des profilés.

La solution de dégraissage/dérochage aspirée à partir d'un bac tombe en cascade sur les profilés suspendus au convoyeur pendant une durée de 5 minutes. La solution devra être maintenue à une concentration d'acide dégraissant de 6 à 12 grammes par litre à une température de 25 à 42°C.

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

- **Dérochage**

Il consiste à rendre la surface du profilé fine et mate, ce qui améliorera la finition de surface finale du profilé.

- Dans ce processus, les profilés seront soumis pendant 5 minutes au produit chimique Alfideox ayant une concentration de 4 à 8 grammes par litre.
- La teneur en aluminium dissout dans le réservoir de la solution de dérochage sera maintenue entre 3 et 4 grammes par litre.

- **Conversion chimique (Chrome free)**

Après dérochage, les profilés subiront un rinçage à l'eau dé-ionisée (DI) aspirée à partir d'une cuve. Cette eau devra être maintenue à une conductivité inférieure à 50 micro siemens.

Puis, les profilés seront soumis à une conversion chimique sans chrome. Le produit de conversion stocké dans un bac, est maintenu à température ambiante. Sa concentration est de 1 à 6 grammes par litre. La durée du traitement est de 1 à 2 minutes.

- Ce traitement améliorera l'adhérence de la poudre à la surface des profilés par attraction électrostatique pendant le processus de revêtement.

- **Séchage (dry off process)**

Un séchage sera effectué après conversion chimique, où les profilés seront enfournés dans un four de séchage pendant 15 minutes à une température comprise entre 80 et 100°C. Pendant ce processus, toute l'humidité et l'eau qui sont accumulées sur la surface complexe du profilé seront évaporées et les profilés seront prêts pour le revêtement en poudre. [16]

9.3. Thermolaquage Proprement Dit :

- **Poudrage (Powder coating) :**

La poudre stockée en atmosphère contrôlée (pour l'empêcher de toute contamination) est transférée par un système automatique lié aux pistolets qui pulvérisent la poudre sur la surface du profilé. La cabine de poudrage devra être nettoyée pour éviter qu'elle ne soit contaminée par la poudre des couleurs précédentes.

La pulvérisation de la poudre est pilotée en ajustant les paramètres selon ce qui suit :

- Tension électrique : Maintenu entre 40 et 80 kilovolts,
- Débit de poudre : Selon les recommandations techniques du fournisseur,
- Pression : Maintenu entre 4 et 5 bars,
- Vitesse maximale du convoyeur : Etant 1,4 mètre/minute.

Chapitre III : Traitement de surface aluminium

• Pendant la pulvérisation de la poudre, celle-ci est attirée vers la surface des profilés par un phénomène électrostatique, ainsi, la poudre sera déposée sur la surface du profilé.

- Cuisson :

Les profilés seront transférés dans un four de cuisson pour assurer la polymérisation de la poudre.

Les profilés séjournent dans le four 15 min à une température comprise entre 100 °C et 200 °C.

- Pour des poudres spécifiques, les recommandations des fournisseurs de poudre devront être respectées.
- La qualité de la surface et l'épaisseur de la couche seront inspectées après la cuisson et les ajustements conséquents seront effectués sur la cabine de poudrage [16]

9.4. ContrôleDe Qualité :

Les éléments à contrôler sont :

- L'épaisseur de la couche de revêtement en poudre : Elle sera inspectée par l'un des appareils suivants : Elcometr, Positector, Isoscope, permascope selon les normes Qualicoat.

- La couleur et la texture du revêtement : Elles seront comparées aux échantillons de référence (cassette de couleur).

- Les anomalies de surface des profilés : Elles seront soumises à une inspection visuelle selon les spécifications Qualicoat / client.

• Hormis les inspections ci-dessus, voici la liste des tests qui seront effectués sur des échantillons revêtus de poudre conformément aux spécifications Qualicoat :

- Test d'adhérence
- Test de choc (impact test)
- Test d'emboutissage (cupping test)
- Test de pliage (bend test)
- Test d'indentation
- Test Machu
- Test de brillance
- Test MEK (test de polymérisation)
- Résistance à l'eau bouillante (Boiling water test)[16]

CONCLUSION GENERAL

L'objectif de ce travail est étudié Le phénomène de corrosion et les méthodes de s'en protéger, Notamment dans l'aluminium Traitez-Traitement de surface par anodisation et thrmolaqage.

L'objet de notre travail est porté sur l'utilisation d'anodisation et thrmolaqage Dans une Entreprise algal+ d'offrir des propriétés inhibitrices de corrosion vis-à-visl'aluminiumSous des conditions normales.

La démarche de cette étude s'est articulée autour de trois axes principaux : le premier AxeIntroduction à la corrosionGénéralités su le phénomène de corrosionClassification et les types CommentEst formé... et combien de temps à son apparition.

Le deuxième axe a été consacré a les méthodes de protection contre la corrosion deMétallique le premier cas Catégories d'alliages et domaines d'emploi (Les aciers inoxydable, Les alliages de cuivre, Les alliages d'aluminium, Les alliages de nickel, Les alliages de titane..) en résumé ,Le deuxième cas Les méthodes de protection essentielles Prévention par une forme adaptée des pièces et Protection par revêtements et Protection par inhibiteurs et Protection électrochimique.

Le Troisième axe Sur lequel nous nous sommes concentrés de notre travail : le premier cas a été connaissance A Généralités Sur L'aluminium ET Alliages D'aluminium Le deuxième CAS L'anodisation etThermo LaquageDe L'aluminium Comment se produire.. Et les conditions.

Nous avons appliqué : Processus D'anodisationIl se déroule à travers par 6 étapes, démarrage du Bain dégraissant nettoyage, Décapage ou satinage chimique + nettoyage À cette étape on élimine l'oxyde naturel, Neutralisé + nettoyage Ici on élimine les restes du décapage antérieur, pour éviter des contaminations dans le suivant processus et avoir une surface neutre, Oxydation anodique + nettoyage Il s'agit d'un bain électrolytique par lequel est créée la couche anodique. Quand on applique un courant électrique entre l'anode+ et la cathode-, les ions de l'eau (H₂O) tendent à oxyder l'aluminium, Nettoyage à eau dés ionisée., Scellement des pores l'hydratation et l'imprégnation.

La Processus thermo LaquageétapesNettoyage de la surface, Attaque de la surface Grâce à ce processus on élimine la couche naturelle d'oxyde de l'aluminium, Conversion de la couche d'ancrage (apprêt), Application de la peinture, Polymérisation dans un four.

Les résultats obtenusIl est évident que la solution la plus courante consiste d'une part à ne pas laisser en contacts matériaux ayant des couples galvaniques actifs et d'autre part à protéger les métaux Par méthodes selon le type de corrosion qui peut survenir.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, Métallurgie générale, 2ème Edition, Masson, Paris, 1991.
- [2] D. Brasher et al, British, corrosion journal, 3, N°, 5,1968.
- [3] Herbert, H .Uhlig, R. Winston Revie, corrosion and corrosion on contrôle, third édition, 1984.
- [4] D. William, Jr. Callister, Science et génie des matériaux, Modulo Editeur, 2001, pp 505-520.
- [5] A. Caprani, Applications des méthodes électrochimiques à l'étude des inhibiteurs de corrosion ; 4ème symposium européen sur les inhibiteurs de corrosion, Ferrare, p .571, 1975.
- [6] L. L Shreir, Electrochemical Principles of corrosion, Department of industry Britain, 1982.
- [7] Article rédigé par Dr. Philipp Wagener, Metals Innovation Center Manager
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- [9] Dr Hakim BENSABRA – Cours Corrosion Et Protection Des Métaux Département de Genire de procèdes- université de Jijel
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>
- [11] SAID BENSADAMETAUX ET ALLIAGES NON FERREUX Editions universitaires européennes (Octobre 7, 2010)
- [12] L'anodisation de D'ALUMINIUM et ses de ALLIAGES par Jean-Sylvestre SAFRANY Ingénieur R&D, traitements de surface Constellium C-TEC, Voreppe, France référence internet M I 630v4
- [13]ALUMINIUM, LE MATÉRIAU DE L'AVENIR / Cahier IBS
- [14] **L'anodisation / J. Laakmann** : Article paru dans la revue Elektor du mois de septembre 1984.
- [15] VADE-MECUM ANODISATION : Ce manuel en téléchargement libre est proposé par adal (Association pour le Développement de l'aluminium Anodisé ou Laqué). Il détaille les conditions d'anodisation en milieu industriel.
- [16] Entreprise algal +
- [17] <http://www.societe-application-plastique.com/articles/quest-ce-que-le-thermolaguage>

Résumé

Dans le domaine industriel, les entreprises doivent mettre en place une politique industrielle efficace afin d'assurer un niveau de production optimal, en termes de quantité et de qualité, tout en prenant en compte l'aspect économique de celle-ci

Dans notre mémoire, les méthodes de protection contre la corrosion dans une institution algal+ ont été discutées, Les traitements de surface car il existe deux méthodes utilisées l'anodisation et ThermoLaquage pour protéger l'aluminium de la corrosion

Quant aux résultats obtenus, ils sont les suivants :

Les résultats obtenus Il est évident que la solution la plus courante consiste d'une part à ne pas laisser en contactes matériaux ayant des couples galvaniques actifs et d'autre part à protéger les métaux Par méthodes selon le type de corrosion qui peut survenir .

mots clés : traitement de surface, thermo laquage , protéger , corrosion , galvanique .

في القطاع الصناعي ، يجب على الشركات وضع سياسة صناعية فعالة لضمان المستوى الأمثل للإنتاج من حيث الكمية والنوعية ، مع مراعاة الجانب الاقتصادي منه

في موجزنا ، تمت مناقشة طرق الحماية من التآكل في مؤسسة الطحالب + ، والمعالجات السطحية لأن هناك طريقتين تستخدمان الأنودة و. طلاء حراري لحماية الألمنيوم من التآكل

:أما النتائج التي تم الحصول عليها فهي كالتالي

من الواضح أن الحل الأكثر شيوعاً هو عدم القيام بذلك

عدم التلامس مع المواد ذات الأزواج الجلفانية النشطة ومن ناحية أخرى لحماية المعادن بالطرق حسب نوع التآكل الذي قد يحدث

الكلمات المفتاحية : المعالجة السطحية، التآكل، الحماية؛الطلاء الحراري، الجلفانية