

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



THESE DE MAGISTER

Présentée

A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Métallurgie
Laboratoire Génie des Matériaux

Par

MR. Abdallah SADKI

Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en Métallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Sujet :

ETUDE DE LA PROTECTION DU MATERIAU
AERONAUTIQUE A-U4G

Soutenu le 11 octobre 1998 devant le jury composé de MM :

E. SALHI	Maitre de conférence	Président	E.N.P
N. MESRATI	Maitre de conférence	1 ^{er} Rapporteur	E.N.P
D. N'GUYEN	Maitre de conférence	2 ^{ème} Rapporteur	E.C LYON
M. LARIBI	Chargé de cours	Examineur	E.N.P
A. BETTAYEB	Docteur	Examineur	URD-MA
K. NECIB	Docteur	Examineur	E.M.P
M. DAMOU	Docteur	Invité	E.M.P

ETUDE DE LA PROTECTION DU MATERIAU AERONAUTIQUE A-U4G

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

M.A. SADKI, M. N. MESRATI

LABORATOIRE, DE GÉNIE DES MATÉRIAUX, DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

ملخص

هذه الدراسة تشتمل على إنجاز حماية بواسطة الأنودية فوق المادة المتكونة من A-U4G الذي يستعمل في الطيران، عن طريق القطب-الحراري الذي يتم إنجازه بالقوس الكهربائي. تنجز هذه الحماية للرفع من متانة و شدة المقاومة ضد الإلتام و التآكل. و الهدف من هذا العمل هو حصر المشاكل المتعلقة بحماية A-U4G، الذي يستعمل خاصة في بعض الأجزاء التي تحتاج للحماية ضد التآكل و الإلتام معا، فهذه الطريقة تعتمد على تمييز فيزيو كيميائي و ميكانيكي للسطح البينية بين المادة المودعة و المادة الأساسية مما يسمح بالفهم الجيد لطواهر الإلتام و الإلتام، فهنا نقترح نموذج تقريبي مناسب لتعيين القيم المثلى للثوابت.

RÉSUMÉ

Cette étude consiste à réaliser sur le matériau aéronautique A-U4G des protections par anodisation (ou anodisation dure), et par projection thermique à l'arc électrique afin d'augmenter sa résistance à la corrosion et à l'usure.

Le but de ce travail est de cerner les problèmes de protection de ce matériau utilisé, en particulier, sur certaines pièces nécessitant à la fois un traitement contre la corrosion et l'usure. L'approche est basée sur la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'interface dépôt/substrat.

Une approche mathématique est proposée pour l'optimisation des paramètres.

ABSTRACT

This study consists to realize on the aeronautical material A-U4G some protections by anodisation (or hard anodisation) and by thermal projection with the electric arc, in order to increase its resistance to the corrosion and to the wearing.

The object of this work is to determine the problems of protection of this material used, in particular, on some parts which require at once a treatment against the corrosion and wearing. The approach is based on physico-chemical and mechanical characterization of the interface depot/substrate, what permit a best comprehension of phenomena of adherence. A mathematical approach is proposed for optimising some parameters.

MOTS CLES : A-U4G, Anodisation, Projection thermique, Adhérence, Frottement-Usure, Modélisation mathématique.

REMERCIEMENTS

Cette humble étude a été effectuée dans le laboratoire de Génie des Matériaux (Département Métallurgie) de l'École Nationale Polytechnique D'Alger.

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur E. SALHI, Maître de conférences à l'École Nationale Polytechnique D'Alger, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de ma thèse.

Ce travail est le fruit d'un travail effectué sous la Direction de Monsieur Nadir MESRATI, Maître de conférences à l'École Nationale Polytechnique D'Alger. Je tiens à le remercier pour toute la confiance qu'il m'a témoignée ainsi que pour tous les conseils utiles et le soutien qu'il m'a apporté tout au long de cette étude.

Je tiens à exprimer à Monsieur Merzak LARIBI, Chargé de cours à l'École Nationale Polytechnique D'Alger, toute ma gratitude pour m'avoir permis de bien mener cette étude. Je le remercie vivement pour ses précieux conseils et l'intérêt particulier qu'il a manifesté à cette thèse, et qui, aujourd'hui encore a bien voulu accepter d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Ali BETTAYEB, Docteur et chercheur à l'Unité de Recherche-Développement en Mécanique Aéronautique-Dar-El-Beida, pour tous ses conseils et sa précieuse aide. Je ne le remercierai jamais assez, pour tout le temps qu'il a bien voulu me réserver à chaque fois qu'il a été jugé nécessaire et ce malgré sa grande charge de travail. Enfin, je le remercie d'avoir bien voulu s'intéresser de près à ce travail et d'avoir accepté de le juger.

Je suis également très reconnaissant envers Monsieur K.NECIB, Docteur et enseignant chercheur à l'E.M.P./Bordj-El-Bahri Alger, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en acceptant de faire partie du jury de cette thèse.

Que Monsieur M.DAMOU, Docteur à l'E.M.P./Bordj-El-Bahri Alger, trouve ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour l'intérêt qu'il a toujours porté à la recherche. Qu'il me soit permis de lui exprimer encore une fois ma profonde reconnaissance, ma gratitude pour sa bienveillante attention et ses multiples conseils qui m'ont permis de mener à bien ma carrière professionnelle. Encore une fois de plus, malgré la très grande charge de son calendrier de travail, il a tenu à accepter de juger ce travail et de faire partie du jury. C'est un grand honneur pour moi.

Deuilcares

A la mémoire de mon père et de mon oncle

Aux êtres qui me sont les plus chers:

Ma mère, pour tous ses sacrifices,

Ma sœur et mes frères pour leurs dévouement,

Mes beaux parents, pour leur compréhension,

Saâda H. pour tout ce qu'elle a fait,

A ma femme

A mes enfants

A MOQRAN et sa petite famille

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL



ABDALLA ASADKI

السادة
عبدالله السادكي

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
<u>Chapitre I</u> : HISTOIRE DE LA PROTECTION DES SURFACES	3
<i>I.1.Introduction</i>	
<i>I.2.Evolution de la notion de revêtement décoratif à la notion de revêtement protecteur.</i>	
<i>I.3.Les revêtements et les placages métalliques</i>	4
<i>I.4.La galvanoplastie</i>	5
<i>I.5.La fin de l'empirisme et "l'éclatement" des procédés de revêtements et de traitements de surfaces.</i>	5
<u>Chapitre II</u> : ALLIAGES D'ALUMINIUM, CORROSION, USURE ET FROTTEMENTS	
<i>II.1.Aluminium, histoire et propriétés</i>	6
<i>II.2.Classification des alliages d'aluminium</i>	7
<i>II.3.Les différents alliages d'aluminium</i>	7
<i>II.4.L'alliage d'aluminium A-U4G</i>	9
<i>II.5.Corrosion</i>	13
<i>II.6.Usure et frottements</i>	20
<i>II.7.Conclusion</i>	27
<u>Chapitre III</u> : TRAITEMENT DE SURFACE PAR ANODISATION ET PAR PROJECTIONS THERMIQUES	
<i>III.1.Préparation des surfaces</i>	28
<i>III.2.Anodisation des alliages d'aluminium.</i>	34
<i>III.3.Anodisation dure</i>	48
<i>III.4.Projection thermique.</i>	51

Chapitre IV : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

IV.1. Matériaux et équipements utilisés 61

IV.2. Traitements de surface par anodisation 65

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Chapitre V : RESULTATS

V.1. Caractérisation physico-chimique des traitements de surfaces réalisée 68

V.2. Etude de la dureté et de la microdureté 77

V.3. Tests d'arrachement 80

V.4. Usure et frottements 82

Chapitre VI : MODELISATION MATEMATIQUE

VI.1. Introduction 85

VI.2. Contraintes résiduelles 85

VI.3. Modélisation mathématique 88

VI.10. Conclusion du chapitre 90

CONCLUSION GENERALE 91

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 93

Thèse de **MAGISTER** : **ÉTUDE DE LA PROTECTION DU MATÉRIAU AÉRONAUTIQUE A U4G**

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

En construction aéronautique, l'impératif de légèreté fait que les conditions d'emploi des matériaux aéronautiques sont telles que toute modification dans la nature de l'alliage, de processus d'élaboration et de transformation et la gamme de mise en œuvre, se traduit par une variation importante du comportement en service de la cellule du moteur. Bien souvent, en règle générale, toute amélioration d'une propriété d'emploi se "paye" par l'abaissement d'une autre propriété tout aussi importante.

La multiplicité des paramètres à prendre en compte fait donc que le choix du compromis des propriétés aboutissant à un bon comportement en service est un problème technique délicat. En l'état actuel des choses, il a été constaté, d'après une enquête effectuée sur près de 1000 incidents majeurs (c'est à dire ayant entraîné une indisponibilité de l'appareil) que les matériaux concourent encore pour une part importante aux problèmes rencontrés en service. L'aluminium (ou plutôt l'ensemble des alliages d'aluminium) qu'utilise l'industrie aéronautique, occupe une part importante dans ce domaine (caractéristiques moyennes mais résistant bien à la corrosion et de mise en œuvre facile : par exemple une bonne tenue à la soudabilité).

Le but de ce travail est de cerner les problèmes des traitements de surface et de revêtement de l'alliage d'aluminium (A-U4G) utilisé dans l'aéronautique, en particulier, sur certaines pièces importantes nécessitant à la fois un traitement de protection contre la corrosion et l'usure.

Depuis toujours, l'aluminium et ses alliages ont été considérés comme des matériaux singulièrement résistants à la corrosion. Ils résistent notamment aux intempéries, à l'eau douce, à l'eau de mer et à de nombreux produits alimentaires et chimiques, à condition toutefois qu'on ait choisi convenablement le matériau, les traitements thermiques et le procédé d'assemblage. Néanmoins, et principalement en aéronautique, des protections sont effectuées sur les pièces utilisées. Il s'agit des protections cathodiques, chimiques, par peintures et bien sûr par le procédé d'anodisation (ou anodisation dure).

La surface de l'aluminium et ses alliages est recouverte d'une mince couche d'oxyde d' Al_2O_3 qui constitue en soi une protection naturelle (environ 0,2 à 0,4 μm) du métal contre l'action des agents atmosphériques. Selon le cas, un traitement d'anodisation permet d'édifier la couche de protection jusqu'à environ 25 μm pour la décoration et la protection contre la corrosion, et à plus de 100 μm par le procédé d'anodisation dure pour la protection contre la corrosion et l'usure. Ce procédé de traitement de surface est le plus utilisé, suite aux différentes modifications et améliorations subies et ce depuis sa découverte en 1857 [1].

Actuellement, les multimatériaux prennent une place importante dans le monde industriel. Ceci est dû à leur apport de solution spécifique aux nombreux problèmes posés par les phénomènes d'usure, de frottement et de corrosion. Néanmoins, leur élaboration reste un procédé complexe du fait que les matériaux de base présentent, au départ de très grandes incompatibilités.

Cependant, la complexité de structures des alliages utilisés alliée à la complexité des poudres rend difficile la maîtrise de tous les paramètres intervenant dans la qualité de la liaison.

Cette union, s'effectue par projection thermique qui procure à l'ensemble des propriétés et qualités insoupçonnées et extraordinaires. La projection thermique est devenue, ainsi une technique mondialement appliquée. Son développement est dû à une industrie de pointe et elle est appliquée dans de nombreux domaines (aéronautique, isolants électriques, instrument de coupe etc...). Par ailleurs, la réalisation de cette union est fonction de la nature des matériaux utilisés : c'est à dire, alliages et poudres, de la possibilité d'une adhésion entre les matériaux et de la nature de cette adhésion.

L'objet de notre travail repose sur les considérations suscitées et consiste d'une part, à élaborer des multimatériaux par projection thermique et de choisir le produit (la poudre ou le fil) le mieux adéquat au phénomène de protection contre la corrosion et l'usure, et d'autre part à analyser le mode de protection par traitement de surface de ce matériau à savoir l'anodisation ou l'anodisation dure. Ceci permettra sans nul doute une meilleure compréhension des phénomènes connexes liés à la nature physico-chimique et mécanique des matériaux. Ainsi, afin de donner un aperçu global de ce travail, il a été jugé nécessaire et indispensable de le scinder en plusieurs chapitres.

La première partie consiste en l'étude bibliographique. Elle englobe le **chapitre I** qui retrace l'histoire de la protection à travers les âges et les temps. Le **chapitre II**, traite des alliages d'aluminium ainsi que de la corrosion, usure et frottements. Enfin, le **chapitre III** consiste en la présentation du principe de la projection thermique tout en développant en général l'ensemble des équipements et matériels utilisés ainsi que les différentes étapes à suivre pour un meilleur emploi de ce procédé (préparation de la surface, paramètres de projection à respecter...) d'une part, et d'autre part, sera consacré à l'anodisation (anodisation dure) où avantages et inconvénients seront exposés.

Dans la partie expérimentale, il sera exposé dans le **chapitre IV**, d'abord la technique de la projection thermique à l'arc électrique ainsi que les processus relatifs à l'élaboration des multimatériaux, ensuite, l'ensemble des étapes à suivre pour une anodisation c'est à dire du dégraissage à la finition. Elle traitera également dans le **chapitre V** de la caractérisation physico-chimique et mécanique où seront présentés les phénomènes interfaciaux dans la zone substrat-interface-dépôt et ce dans les deux cas des protections réalisées. Enfin, dans le **chapitre VI**, il sera proposé une approche mathématique de modélisation des phénomènes intervenant dans les deux cas de traitement de protection au niveau de l'interface.

L'ensemble du travail sera clôturé par une **conclusion générale** englobant à la fois ce qu'il y a lieu de retenir des différentes interprétations des résultats expérimentaux par rapport à la recherche bibliographique et surtout l'ensemble des axes de recherche ou recherche-développement traitant des problèmes quotidiens des industries et des entreprises de réparation et de maintenance.

Thèse de MAGISTRE ETUDE DE LA PROTECTION DU MATERIAU AERONAUTIQUE A-04G

CHAPITRE 1

HISTOIRE DE
LA PROTECTION DES SURFACES

CHAPITRE I

HISTOIRE DE LA PROTECTION DES SURFACES

I.1 INTRODUCTION.

De tout temps, l'Homme a cherché à protéger sa santé et à prolonger sa vie, mais aussi à conserver sa maison ses outils de travail, ses armes, ses moyens de locomotion ou de transport et plus récemment l'avion, la navette spatiale....

Pour protéger ses biens contre les injures du temps et la corrosion, il a dû constamment choisir entre :

- utiliser un matériau noble,
- recevoir ceux-ci par un revêtement, un matériau plus résistant

C'est dans le cadre de ce dernier objectif que se place le travail de ce projet. Nous ne voulons pas retracer l'historique de l'ensemble des revêtements et des traitements de surface car c'est un travail beaucoup trop ambitieux, compte tenu du nombre considérable de travaux et progrès effectués dans ce domaine depuis l'aube de l'humanité et de la grande dispersion des documents qui les rapportent. Nous voulons nous limiter à souligner quelques points de repères qui nous apparaissent très intéressants, qui jalonnent l'histoire de la protection des surfaces et qui par conséquent placeront ce travail demandé en coordonnées bien précises.

I.2 EVOLUTION DE LA NOTION DE REVETEMENT DECORATIF A LA NOTION DE REVETEMENT PROTECTEUR.

Dès les temps les plus anciens, l'Homme a su utiliser les colorants naturels qu'il ait cherchés à agglutiner avec les substances les plus diverses. Son principal objectif était d'ordre "esthétique". Ainsi, l'utilisation des premiers placages (dorure : alliage Au-Ag-Cu) sur bois remonteraient à 1500 ans avant J.C. De la Bible, nous pouvons relever "Fais-toi une arche en bois résineux et en roseaux et tu l'enduiras de bitumes en dehors et en dedans". Cette première application de revêtement et de protection remonterait à 3 000 ans avant J.C.[2].

En fait, dès l'antiquité, qu'elle soit égyptienne, grecque ou romaine, les procédés artisanaux de décoration mais aussi de protection des surfaces à base de peintures, lacques et vernis étaient en plein développement. Alors tout était peint.

Après la chute de l'empire romain, la fabrication de la céruse (type de peintures) a été reprise par les Arabes avant de passer en Hollande, en Angleterre, en Allemagne puis la France et a permis pendant longtemps de réaliser une excellente protection contre la rouille, du moins jusqu'en 1909 où son emploi a été interdit pour des raisons d'hygiène.

1.3 LES REVÊTEMENTS ET LES PLACAGES METALLIQUES.

1.3.1 Dépôts d'or et d'argent.

Si le placage sur bois date des milliers d'années avant J.C. vers le XI^{ème} siècle, l'argenteure quant à elle, reste d'origine indéterminée malgré ses multitudes utilisations à travers les âges : nous pouvons citer les décorations des édifices corporatifs, sanctuaires, armes, objets en bronze... Le colaminage d'aujourd'hui n'est autre que l'utilisation du cuivre entre deux lames d'argent (procédé travaillé au XIII^{ème} siècle puis repris, amélioré et développé de nos jours) [2].

1.3.2 Dépôts de cuivre.

Le cuivre est l'un des métaux les plus anciens (4 000 ans avant J.C./ Egypte). Il a été utilisé par placage. On pense même que les Egyptiens ont été les premiers à utiliser "la galvanoplastie". Dans les civilisations qui suivirent, le cuivre fut plus ou moins utilisé comme revêtement. Ce n'est que beaucoup plus tard (début du XIX^{ème} siècle) qu'il a été montré l'efficacité des composés cuivreux dans la lutte contre l'adhérence de la faune et de la flore sous-marine, justifiant ainsi l'intérêt des placages de cuivre sur bois utilisés depuis des siècles (voir surtout la marine anglaise). Ces travaux furent à la base de recherches importantes et de mise au point de peintures pour la protection des carènes de fer qui progressivement au XIX^{ème} siècle remplacèrent les bateaux en bois [3].

1.3.3 Dépôts d'autres métaux.

1.3.3.1 L'antimoine : il a été confirmé lors des travaux de recherche sur l'Egypte Ancienne que les Egyptiens connaissaient non seulement l'art de déposer de l'or et de l'argent, mais aussi de l'antimoine sur les objets en cuivre et en laiton.

1.3.3.2 L'étain : l'art de l'étamage remonterait à la plus haute antiquité. A travers les âges, le procédé était utilisé soit pour la fabrication de la fausse monnaie (par trempage dans l'étain en fusion) soit pour la fabrication des miroirs (dépôts d'étain poli sur plaques de cuivre).

L'étamage n'avait pas seulement un but décoratif mais aussi un caractère hygiénique pour empêcher la formation de vert de gris et après dans un but d'anticorrosion pour éviter la formation de rouille sur les ustensiles d'usage journalier.

1.3.3.3 Le zinc : dès 1742, il a été confirmé que les tôles revêtues par immersion dans le zinc fondu résistaient mieux à la corrosion que les tôles étamées mais en raison d'une toxicité reconnue des sels de zinc, ce n'est qu'en 1836 qu'il a été entrepris des revêtements industriels de zinc.

I.4 LA GALVANOPLASTIE.

C'est aussi à cette époque que les recherches et les "recettes" sur les dépôts électrolytiques se sont considérablement développées (DANIELL en 1836, VOLTA en 1799 et GALVANI en 1789). Ce n'est cependant qu'en 1837 que JACOBI découvrait le principe de l'anode soluble en cuivre et créait la première usine et le nom de galvanoplastie. La dorure et l'argenture apparurent vers 1840 en utilisant des bains de cyanure. Le nickelage électrolytique pratique a vu son jour vers 1869 puis amélioré.

En fait, depuis 1840, de très nombreux travaux sanctionnés par des brevets ont marqué la progression des dépôts électrolytiques et son extension à de nombreux métaux et alliages. De nos jours, le nombre de "recettes" est considérable, chacune ayant pour objet d'obtenir des caractéristiques particulières des dépôts : pureté, brillance, adhérence, action nivelante, contraintes déterminées, dureté ou souplesse mécanique, résistance à l'usure, porosité, rendement.... [2] et [4].

I.5 LA FIN DE L'EMPIRISME ET "L'ECLATEMENT" DES PROCÉDES DE REVÊTEMENTS ET DE TRAITEMENTS DE SURFACES :

Avec le XIX^{ème} siècle et en particulier au cours des dernières décennies, l'éventail des techniques de protection s'est considérablement élargi et permet actuellement d'offrir à l'utilisateur un large choix de procédés dont certains, peut-être même la majorité, n'ont probablement pas encore atteint tous leurs domaines d'applications. Ces procédés résultent, entre autre :

- soit de nouvelles conquêtes de la chimie organique qui relèvent de la préparation de résines synthétiques thermodurcissables et la réalisation de résines glycérophthaliques [2].

- soit des progrès de la technique du vide, de la métallurgie moderne et de la physique à savoir la métallisation par projection puis sous vide, dépôts ioniques, pulvérisation cathodique, dépôt chimique en phase vapeur, traitement de diffusion et traitement par faisceau à haute énergie. Ces procédés continuent de se développer dans plusieurs directions et pour des applications nouvelles [5].

I.6 CONCLUSION DU CHAPITRE.

Il ressort à travers cette brève revue des différentes étapes qu'a traversé l'histoire de la protection des surfaces que pour l'étude de la protection du matériau aéronautique A-U4G, notre choix s'oriente vers d'abord la caractérisation du ou des traitements de surface couramment appliqués à ce jour et ensuite faire la comparaison avec la métallisation par projection qui est d'actualité.

CHAPITRE 2

ALLIAGES D'ALUMINIUM,
CORROSION,
USURE ET FROTTEMENTS.

CHAPITRE II

ALLIAGES D'ALUMINIUM, CORROSION, USURE ET FROTTEMENT.

II.1 ALUMINIUM HISTOIRE ET PROPRIETES.

L'aluminium est un métal jeune. C'est lors de l'exposition universelle de 1855 à Paris qu'il a été pour la première fois en public, comme un enfant prodige.

L'apparition, si tardive, de l'aluminium parmi les métaux d'usage courant est due à la difficulté de son extraction. L'aluminium est lié de façon intime à l'oxygène et ne peut pas, de ce fait, être extrait à l'aide du carbone, comme cela est le cas pour le fer et le cuivre.

La production de l'aluminium dans des conditions économiques, nécessite de grandes quantités d'énergie électrique.

La première extraction de l'aluminium en laboratoire eut lieu en 1825, d'abord par le Danois ORSTEDT puis peu après par l'Allemand WÖHLER. Quelques décennies plus tard, aux environs de 1855, le Français Sainte-Claire Deville produisit de l'aluminium en quantité plus importante par un procédé chimique, qui fut cependant abandonné par la suite, car trop coûteux.

La découverte de la dynamo par Werner Von Siemens en 1866 ouvrit la voie à l'extraction rentable et industrielle de l'aluminium. En 1886, Hall aux Etats-Unis et Héroult en France, développèrent, de façon tout à fait indépendante, un procédé d'extraction de l'aluminium à partir d'un sel fondu. Ce procédé est encore aujourd'hui à la base de l'extraction de l'aluminium [1] et [6].

L'aluminium est un élément du III^{ème} groupe de la classification de Mendélièv, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26,98 et sa température de fusion est 660°C. L'aluminium possède un réseau cubique à faces centrées à équidistance $a = 4,0412 \text{ \AA}$. Sa caractéristique la plus importante est la faible densité 2,7 ; alors que la densité du fer est 7,8 et celle du cuivre 9. L'aluminium a une conductibilité électrique élevée $2,6548 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$, ce qui correspond à 65% de celle du cuivre. Sa conductibilité thermique est de $0,57 \text{ cal} / \text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$. Les nuances du métal pur ainsi que les propriétés mécaniques du métal recuit sont présentées dans le tableau II.1.

	Pureté spéciale (%Al)	Haute pureté (%Al)	Pureté industrielle (%Al)
Designation	A999	A995, A99, A97, A95	A85, A8, A7, A6, A5, A0
Re (daN/mm ²)		1.5	3
R (daN/mm ²)		5	8
A (%)		50	35

Tableau II.1: Nuances du métal pur et propriétés mécaniques du métal recuit [7].

La désignation de l'aluminium de pureté spéciale A999 signifie 99,999% Al, ainsi que les écritures dans l'aluminium de haute pureté A995 (99,995% Al) ; A99 (99,99% Al), A97 (99,97% Al), A95 (99,95% Al) et qu'il en est de même dans le cas de l'aluminium de pureté industrielle A85, A8, A7, A6, A5, A0 (99,0% Al).

L'aluminium industriel est élaboré sous forme de tôles, profilés, barres, fils et autres demi-produits. Il contient comme inclusions le fer, le silicium, le cuivre, le manganèse, le zinc, le titane. L'aluminium se distingue par sa tenue à la corrosion élevée du fait de la formation à la surface d'une pellicule très fine et très résistante d'alumine (Al_2O_3). Plus l'aluminium est pur, plus sa tenue à la corrosion est forte. Les propriétés mécaniques du métal recuit sont données dans le tableau II.1. Le module d'élasticité de l'aluminium vaut $7\ 100\ daN / mm^2$.

Une déformation plastique à froid de l'aluminium industriel augmente la charge de rupture jusqu'à $15\ daN / mm^2$, mais l'allongement baisse alors jusqu'à 6 %. Sa plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, son usinage étant difficile et mal aisé. L'aluminium se prête bien à toutes les modalités du soudage. Au chauffage, il présente une aptitude au grossissement du grain, ce qui altère la plasticité et l'aspect antérieur des pièces.

II.2 CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.

Les alliages les plus répandus sont Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. Les états d'équilibre de tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques $CuAl_2$ (phase θ), Mg_2Si , Al_2CuMg (phase σ), Al_2CuMg_4 (phase θ), Al_3Mg_2 , $Al_2Mg_2Zn_3$ (phase θ).

Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

II.2.1 Alliages de forge et de laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, profilés, tubes, etc...), ainsi que les pièces de forge et estompées produites par laminage, pressage forgeage et estompage.

II.2.2 Alliages de fonderie, ils sont prévus pour le moulage de forme.

II.2.3 Alliages élaborés par frittage, ils sont élaborés par frittage suivant la méthode de la métallurgie des poudres.

II.3 LES DIFFERENTS ALLIAGES D'ALUMINIUM.

II.3.1 Principaux alliages d'aluminium

Pour la fabrication des semi-produits, on utilise trois types de matériaux :

- l'aluminium raffiné (99,99 %),
- l'aluminium pur (99,0 à 99,9 %),
- les alliages d'aluminium dont la plupart sont obtenus à partir d'aluminium ou de déchets refondus.

Les principaux éléments qu'on allie à l'aluminium sont dans l'ordre alphabétique, le bismuth (Bi), le bore (B), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le magnésium (Mg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le silicium (Si), le titane (Ti), le zinc (Zn) et le zirconium (Zr).

La résistance mécanique est augmentée par l'addition de Mg (jusqu'à 7%) et pour les alliages à résistance mécanique élevée, de Mg+Si, Mg+Cu, Zn+Mg, Zn+Mg+Cu (jusqu'à 8% dans tous les alliages). Une bonne résistance mécanique à chaud s'obtient par l'addition de cuivre (jusqu'à 4%) et/ou de Ni, Fe, Mn(1%) [6].

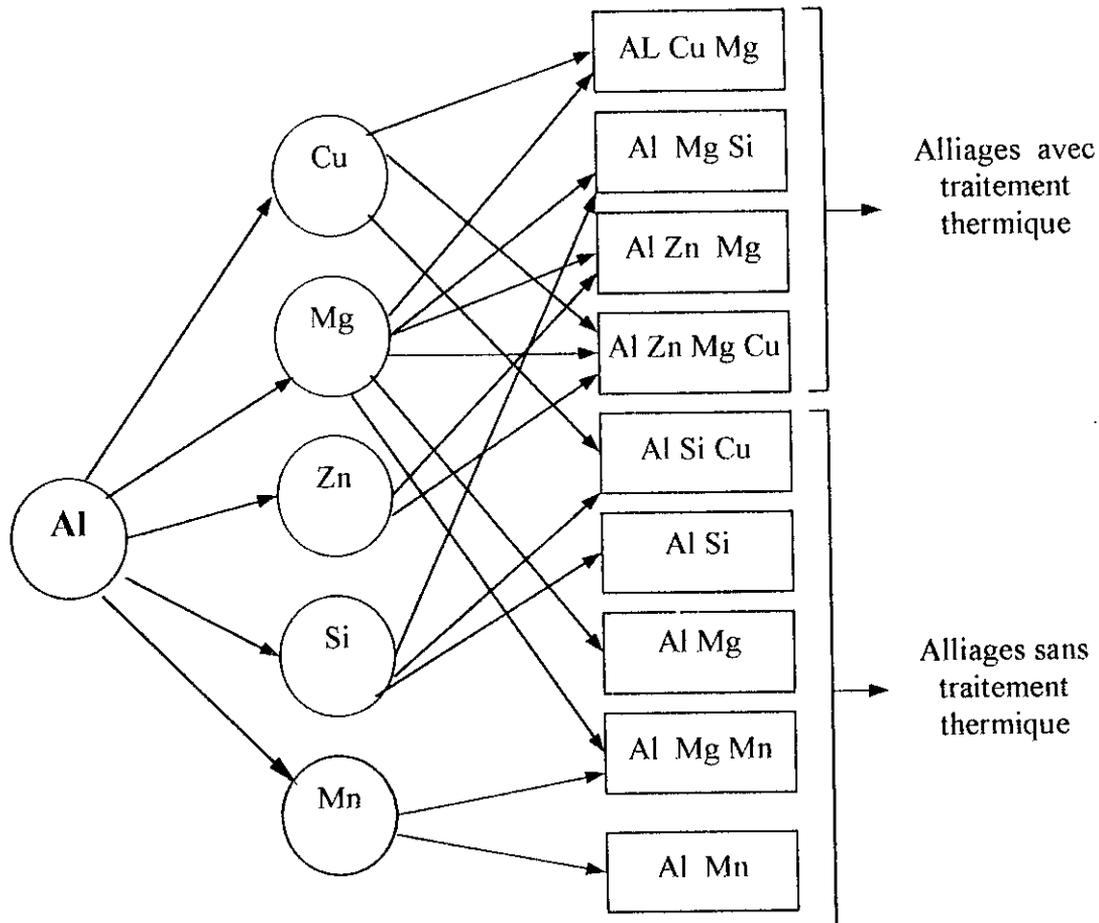


Figure II.1 : Principaux alliages d'aluminium [6].

II.3.2 Propriétés et domaines d'application des alliages d'aluminium.

Enumérons tout d'abord quelques-unes des propriétés de l'aluminium qui ont particulièrement contribué à sa rapide expansion:

1. **L'aluminium est léger** (pour les mêmes dimensions 1/3 de l'acier)

2. L'aluminium résiste aux intempéries, il est inaltérable au contact des produits alimentaires et d'un grand nombre de liquides ou de gaz d'emploi quotidien.

3. L'aluminium possède un pouvoir réflecteur élevé et de ce fait un bel aspect décoratif. Grâce à sa surface argentée, il convient mieux que tout autre métal à l'architecture extérieure ou intérieure, ainsi qu'à l'emballage. L'éclat de l'aluminium peut être protégé durablement par une couche d'oxyde ou de laque appropriée. Souvent, la couche d'oxyde naturelle, transparente comme de l'eau, suffit à protéger une surface brillante.

4. Certains alliages d'aluminium atteignent et dépassent la résistance mécanique de l'acier ordinaire de construction.

5. L'aluminium présente une grande élasticité, qualité appréciée pour les constructions exposées aux chocs. A basse température, la résilience ne diminue pas de manière appréciable, comme c'est le cas des aciers au carbone par exemple.

6. L'aluminium peut être facilement usiné et mis en forme. On peut par exemple le laminier en feuilles très minces d'épaisseurs inférieures à 1/100 mm.

7. L'aluminium est un bon conducteur d'électricité et de la chaleur, en tous cas très supérieur au fer et à l'acier et presque comparable au cuivre.

Des propriétés énumérées ci-dessus [6-10], on peut déduire les domaines d'utilisation de l'aluminium (transport, architecture, emballage, machines et appareils, chimie et alimentation). Pendant la guerre, la plus grande partie de la production de l'aluminium fut consacrée à la construction aéronautique.

II.4 L'ALLIAGE D'ALUMINIUM A-U4G.

L'A-U4G est un alliage d'aluminium dont les principaux éléments sont l'aluminium (métal de base), le cuivre et le magnésium. Cet alliage possède une résistance mécanique élevée, une bonne résistance à la fatigue, une remarquable malléabilité et une faible densité ($2,7 \text{ g/cm}^3$) d'où son utilisation en aéronautique. L'A-U4G fait partie du groupe d'alliage d'aluminium de forge. Il a été découvert par Alfred WILM en 1906 [6].

Désignation	% Cu	% Mg	% Si	% Mn
A-U4G	3,8 – 4,8	0,4 – 0,8	≤ 0,7	0,4 – 0,8

Tableau II.2 : Composition chimique de l'A-U4G [7].

Cet alliage présente les propriétés physiques suivantes:

- ⇒ Densité..... 2,7
- ⇒ Module de Young..... 7 500 daN / mm²
- ⇒ Conductivité thermique..... 0,5 cal / cm.s.°C
- ⇒ Coefficient de dilatation linéaire (20 – 100°C)..... $24 \cdot 10^{-6}$

L'alliage d'aluminium A-U4G, présente une bonne tenue ou résistance à la corrosion par piqûres, mais est sensible à la corrosion intergranulaire et galvanique. Le diagramme d'équilibre de ce matériau est présenté par la figure II.2.

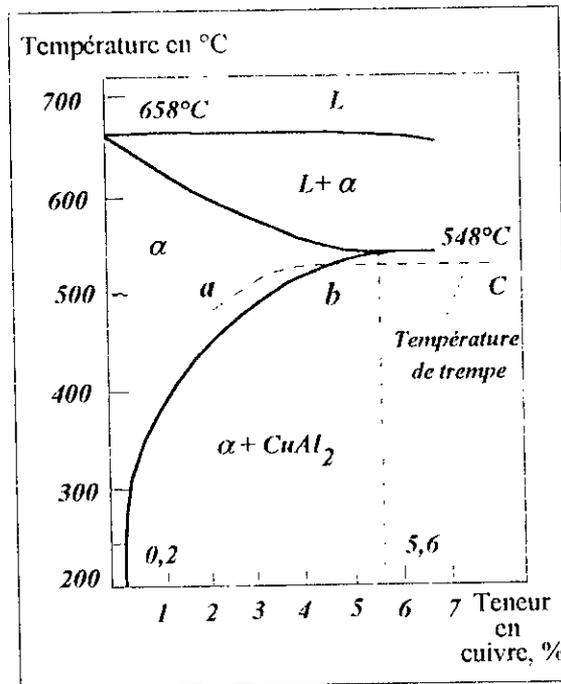


Figure II.2 : Diagramme d'équilibre Al-Cu [7].

II.4.1 Traitement thermique.

Pour assurer le durcissement des alliages d'aluminium, on a recourt à la trempe et au vieillissement.

Vieillessement des alliages trempés : La trempe est suivie de vieillissement [5-7] qui est un maintien à la température ambiante pendant quelques jours (maturation) ou un maintien pendant 10 à 24h à une température accrue (vieillessement artificiel ou par revenu). Le vieillissement s'accompagne de décomposition de la solution solide sursaturée, qui va de paire avec le durcissement de l'alliage.

Si la distribution des atomes de cuivre dans le réseau de l'alliage est statistiquement uniforme, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température de la durée du vieillissement.

Le vieillissement naturel (maturation à 200°C) ou artificiel (durcissement par revenu) à basse température (inférieure à 100°C ou 150°C) ne révèle pas la décomposition de la solution solide avec isolation de la phase en excès à ces températures.

Les atomes de cuivre se placent seulement à l'intérieur du réseau cristallin de la solution solide α à de très faibles distances et s'écoulent suivant les plans $\{100\}$ en agrégats bidimensionnels lamellaires ou disques dits zones de Guinier Preston (GP-1). Au sein de chaque cristal, ces zones longues de quelques dizaines d'Angströms (30 à 60 Å) et de 5 à 10 Å d'épaisseur se répartissent plus ou moins régulièrement. La concentration du cuivre dans les zones de Guinier Preston est plus faible que dans CuAl_2 (54%).

En portant l'alliage après maturation en quelques secondes ou minutes à 230°C ou 270°C et en le refroidissant rapidement, on supprime totalement le durcissement et l'alliage acquiert à nouveau les propriétés qu'il avait directement après trempe. Ce phénomène a reçu le nom de restauration. L'adoucissement à la restauration est dû au fait qu'à ces températures les zones de Guinier Preston sont instables et c'est pourquoi elles se dissolvent dans la solution solide, alors que les atomes de cuivre se redistribuent de nouveau plus ou moins régulièrement dans le volume de chaque cristal de la solution solide tout comme après trempe.

Le maintien ultérieur de l'alliage à l'ambiante conduit de nouveau à la formation des zones de Guinier Preston et à son durcissement. Le séjour de grande durée à 100 °C ou pendant quelques heures à 150°C, conduit à la formation de grandes zones de Guinier Preston (10 à 40 Å d'épaisseur et 200 à 300 Å de diamètre) à structure ordonnée différente de celle de la solution solide α . La concentration du cuivre dans ces zones correspond à sa teneur dans CuAl_2 .

Le maintien pendant plusieurs heures aux températures élevées (150 à 200°C), conduit les zones GP-2 à la formation des particules dispersées (lamelles fines) de la phase θ' intermédiaire (CuAl_2 tétragonale) dont les compositions chimiques ne se distinguent pas de celles de la phase θ (CuAl_2 cubique). L'augmentation de la température jusqu'à 200 ou 250°C, provoque la coalescence de la phase métastable et la formation de la phase stable θ [11-12].

De la sorte, la maturation ne donne lieu qu'à la formation des zones GP-1. Dans le cas du vieillissement par revenu, la succession des transformations structurales peut être schématisée de la façon suivante:



Solubilité d'éléments d'addition dans l'aluminium : Il est possible d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium, comme celles des autres métaux d'usage courant par écrouissage et par formation d'alliages.

D'une manière générale, les alliages à traitement thermique s'obtiennent par adjonction d'éléments dont la solubilité [6] dans l'aluminium solide augmente avec la température. Certains métaux, tel que le cuivre ou le magnésium, ont une solubilité notable dans l'aluminium à l'état solide.

Comme le montre la figure II.3, on voit qu'un grand nombre de métaux sont solubles dans l'aluminium à l'état solide, la proportion du métal augmentant avec la température.

Si l'on introduit simultanément deux éléments d'addition dans un rapport déterminé, la courbe de solubilité peut prendre une allure très différente de celle qu'on a en présence d'un seul de ces éléments.

Tous les métaux (ou paires de métaux) de la figure II.3 peuvent être alliés à l'aluminium pour donner des alliages à traitement thermique.

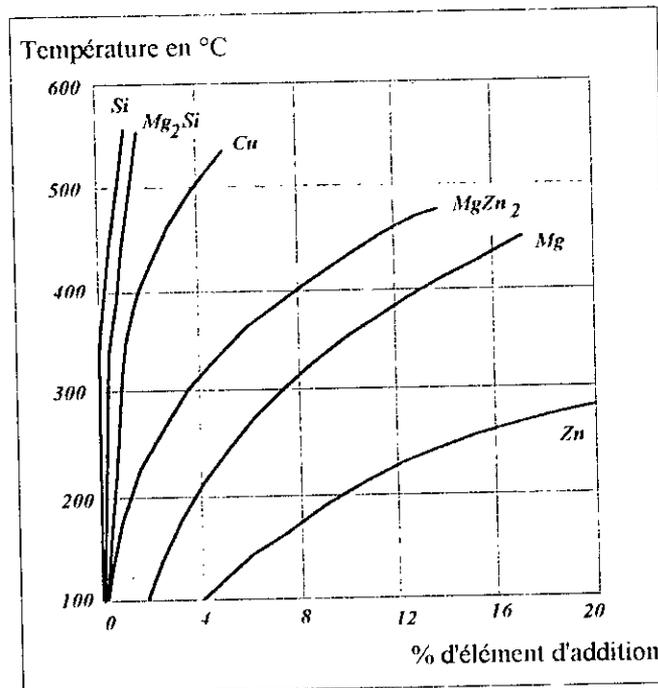


Figure II.3 : Solubilité d'éléments d'addition dans l'aluminium en fonction de la température [6].

Sur la figure, à droite de chaque courbe se trouve le domaine hétérogène, et à gauche le domaine homogène à l'intérieur duquel l'élément d'addition considéré est dissous dans l'aluminium. C'est surtout le cuivre qui est responsable du durcissement. L'addition de magnésium, favorise le vieillissement et accroît en outre la résistance mécanique maximale citées auparavant.

II.4.2 Utilisation de l'alliage d'aluminium A-U4G.

Le duralumin est l'alliage aéronautique le plus répandu sous forme de tôles et/ou de profilés. Il entre dans la construction du fuselage et voilures d'avion, sous forme forgée, dans la confection des pièces massives, semelles de longerons, revêtements structuraux, pales d'hélices, carters de moteur et bielles [13-18].

II.4.2.1 Constitution d'une aile d'avion : Des panneaux plans ou courbes sont constitués par deux tôles de revêtement en A-U4G maintenues écartées par un réseau de nids d'abeilles. Le développement important de la fabrication des hélicoptères a introduit un type particulier de construction. Les pâles et le rotor sont en alliages d'aluminium, trains d'atterrissage et le carénage de l'habitacle.

II.4.2.2 Autres : Du fait de sa bonne résistance à la corrosion et de ses facilités de décoration (dans la construction du bâtiment), la bonne conductibilité électrique (conducteur), thermique (ustensiles de mécanique) il est en abondance dans ces domaines.

II.5 CORROSION.

Depuis le début, l'aéronautique fait appel aux traitements de surfaces afin d'améliorer autant que possible les propriétés superficielles des matériaux. Parmi les améliorations visées, les plus importantes sont :

- La résistance à la corrosion,
- Le comportement au frottement,
- Le comportement à l'abrasion / érosion,
- La résistance à la fatigue,
- L'aptitude au collage,
- L'aspect de surface.

La grande variété des matériaux utilisés sur les cellules d'aéronefs, entraîne un nombre relativement important de traitements de surface et notamment les alliages d'aluminium [18-27] qui malgré la part de plus en plus importante prise par les matériaux composites, ces alliages constituent encore à l'heure actuelle la plus grande partie du poids de la cellule. Il s'agit la plupart du temps, d'alliages dits à durcissement structural, c'est à dire, contenant notablement des composés durcissant hors solution qui rendent la structure hétérogène et le métal sensible à la corrosion. Les principaux modes de dégradation observés sont :

II.5.1 La corrosion par piqûres.

Elle est redoutée à cause des risques d'amorçage de criques de fatigue. Elle est souvent dite perforante "PITTING". Il s'agit d'attaque très ponctuelle et très localisée. Elle est particulièrement dangereuse puisqu'elle peut conduire à la perforation de la structure métallique comme le montre la figure II.4.

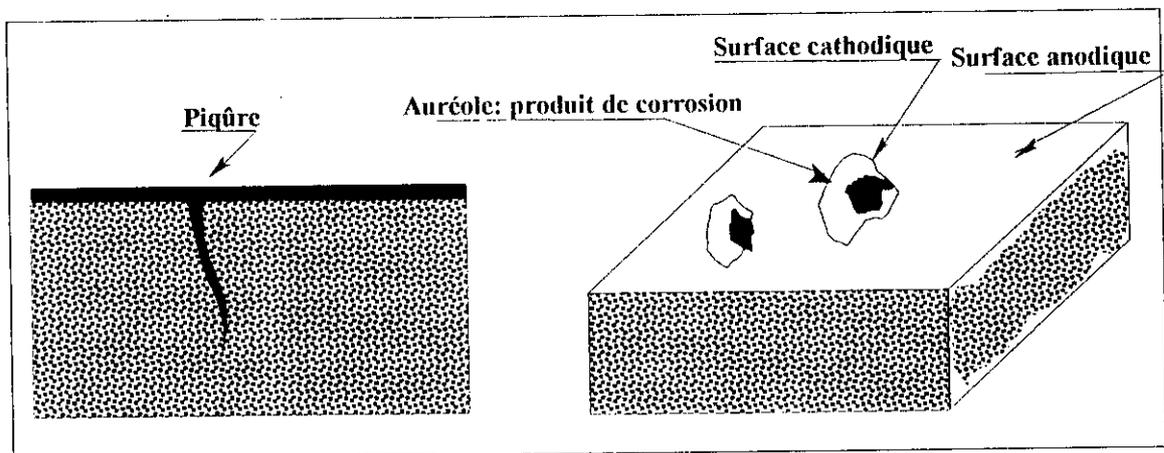


Figure II.4 : Corrosion par piqûre [19-25].

II.5.2 La corrosion intercrystalline.

Elle est en forme particulièrement spectaculaire qui est la corrosion exfoliante. Il s'agit d'une dégradation, pouvant prendre naissance à partir d'une surface, à priori propre, mais elle se propage en dessous, nous assistons alors à une disparition du métal par plaques. L'aspect d'une pièce ayant subi ce mode de corrosion est tout à fait comparable à une pièce de gâteau "mille feuilles".

II.5.3 La corrosion sous contraintes (C.S.C.).

Les conséquences peuvent être très importantes. Elle est provoquée par l'action combinée d'un milieu corrosif et d'une contrainte statique pouvant être interne, résiduelle ou appliquée. Etant donné que, ce phénomène est la conjugaison des sollicitations physico-chimiques et mécaniques, il est appelé phénomène synergique. Cette action simultanée, produit plus de dommage que les actions successives initiatrices séparément. La zone affectée est difficile à détecter surtout que la corrosion se manifeste selon des fissures, qui peuvent être soit transgranulaires soit intergranulaires, ramifiées ou non. C'est le cas de la figure II.5.

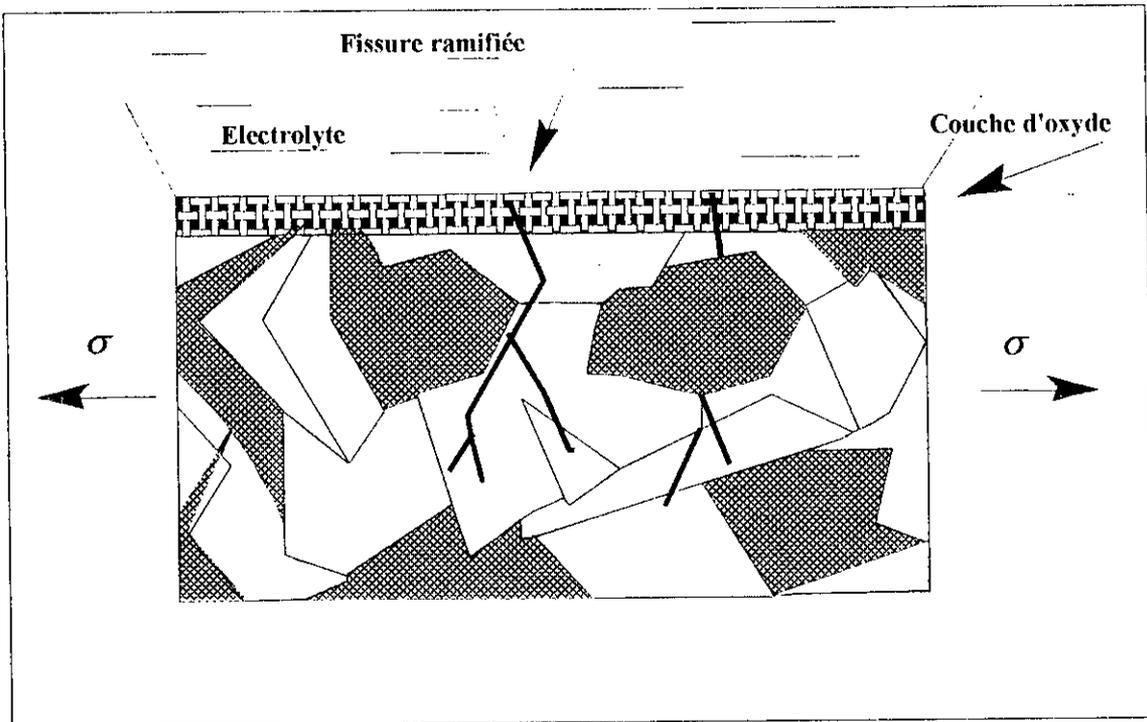


Figure II.5 : *Corrosion sous contrainte* [19-25].

II.5.4 La corrosion filiforme.

Elle est préjudiciable à l'aspect des surfaces. C'est une forme de corrosion particulière, puisqu'elle peut se développer lorsqu'un matériau métallique est protégé par une couche de peinture (matières organiques). Cette corrosion obéit aux concepts électrochimiques, elle se présente sous forme de filaments parfois ramifiés.

II.5.5 La corrosion uniforme ou généralisée.

C'est la forme la plus classique. Elle envahit, sensiblement avec la même vitesse, toute la surface métallique en contact avec le milieu corrosif. On estime que la surface est constituée de microanodes et de microcathodes qui s'alternent au fur et à mesure de la dissolution. Cette forme de corrosion n'est pas particulièrement dangereuse puisqu'elle n'altère pas les propriétés mécaniques (voir la figure II.6).

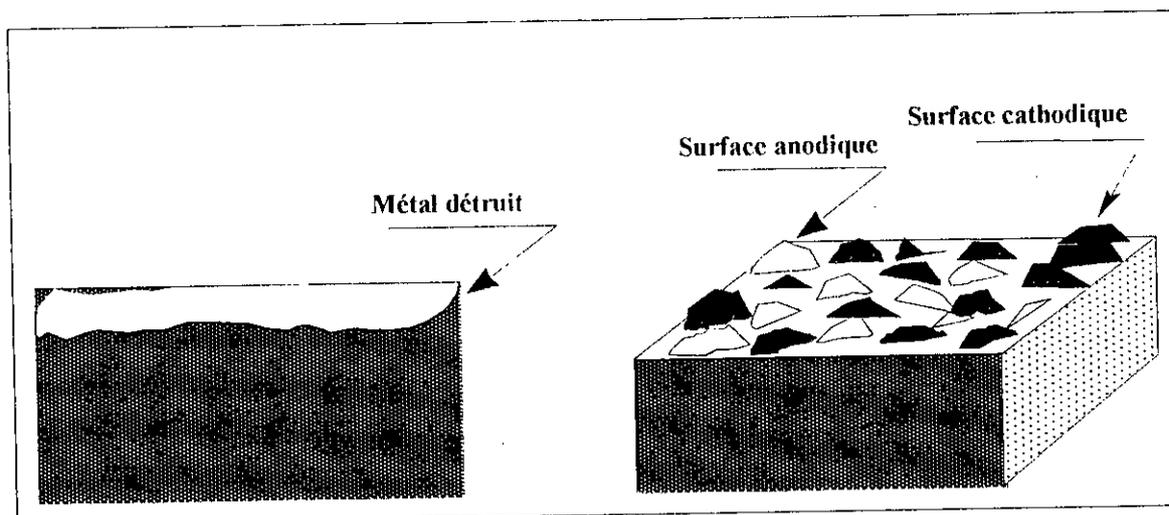
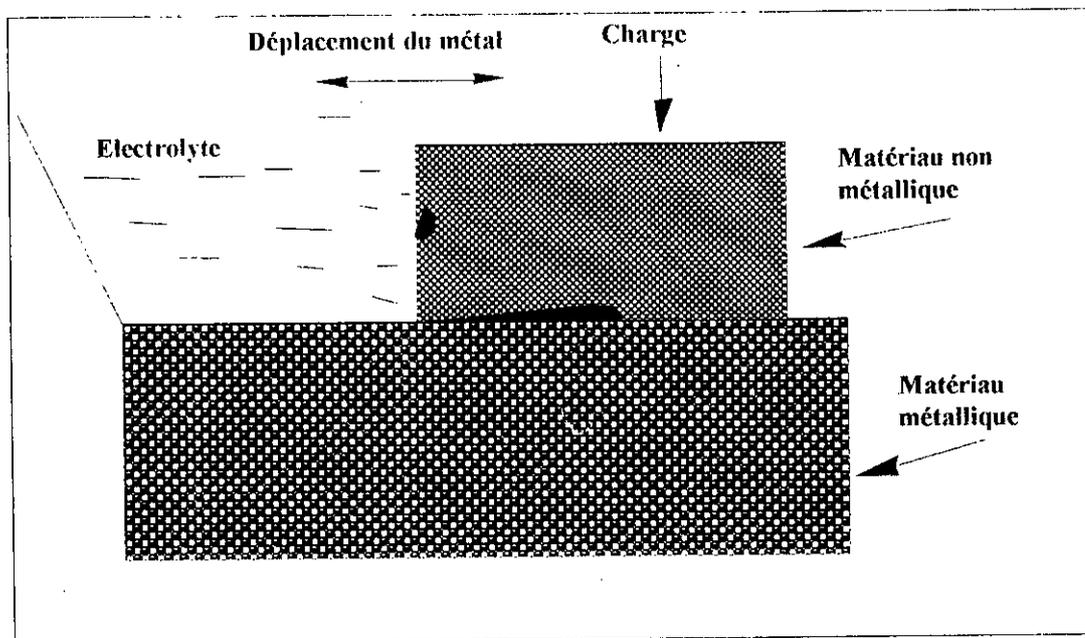


Figure II.6 : Corrosion uniforme ou généralisée [19-25].

II.5.6 La corrosion par frottement.

Elle est aussi appelée «**FRETTING-CORROSION**». C'est un mode de détérioration superficielle. Il se développe à la suite d'un mouvement entre deux surfaces dont l'une au moins est métallique. Le mouvement est de très faible amplitude. Ce phénomène, peut apparaître lorsqu'un serrage mécanique entre deux pièces intimes est insuffisant pour éviter des faibles vibrations comme l'illustrent les deux cas de la figure II.7.

a) *Corrosion par frottement plan-plan.*



b) *Corrosion par frottement en rotation.*

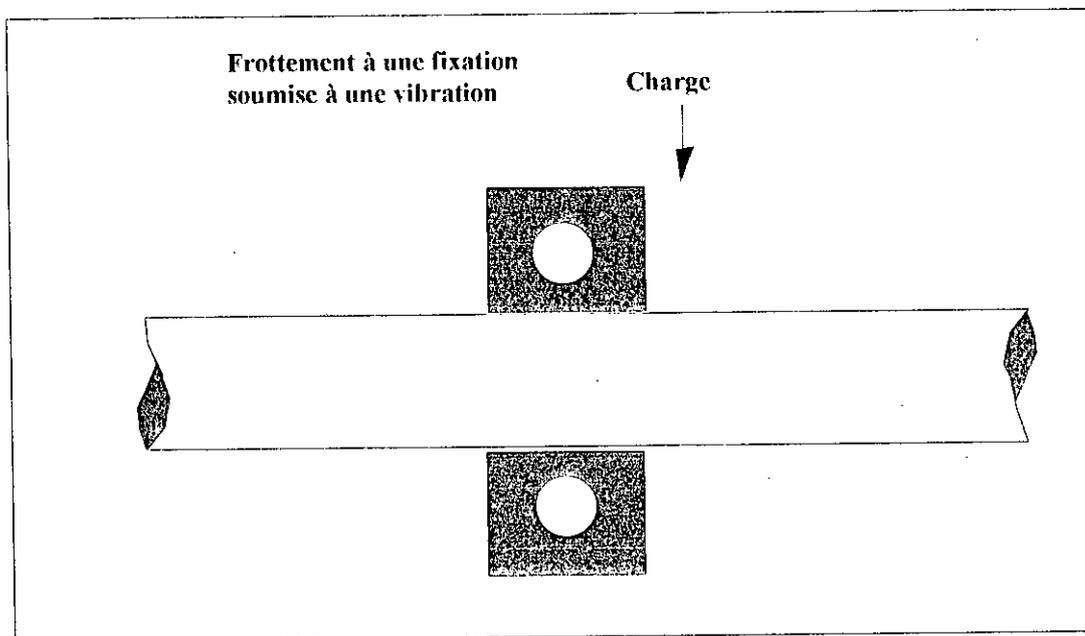


Figure II.7 : Corrosion par frottements [19-25].

II.5.7 La corrosion intergranulaire.

Cette corrosion se développe en profondeur en empruntant les joints de grains comme trajectoire. Elle se traduit par une décohésion des grains de la structure métallique alors que la surface reste pratiquement intacte. Cette attaque, conduit à une altération des propriétés mécaniques du métal (figure II.8).

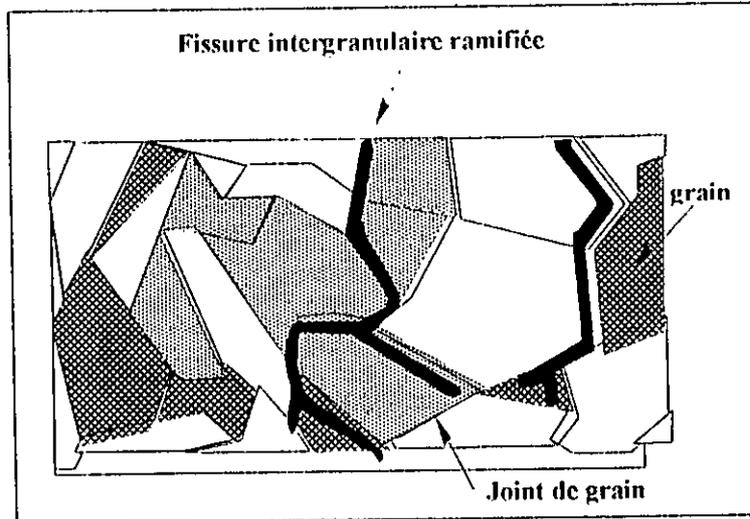


Figure II.8 : Corrosion intergranulaire. [19-25]

II.5.8 La corrosion caverneuse ou par crevasses.

Corrosion sous joints, elle se développe surtout en milieu stagnant sous les dépôts, des joints non étanches, sous les écrous, les têtes de rivets et dans les interstices (figure II.9).

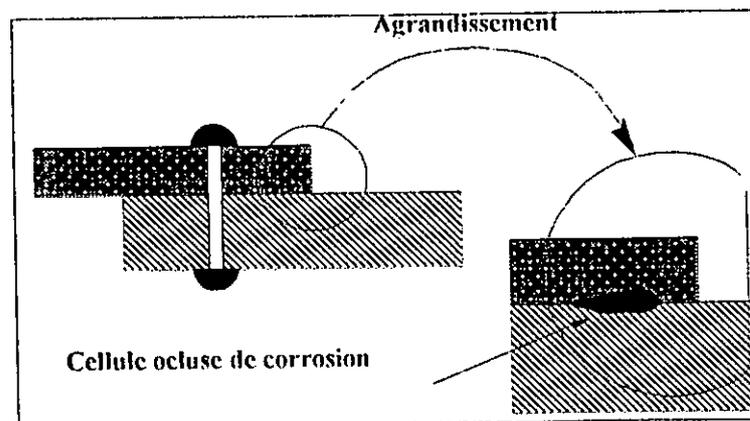


Figure II.9 : Corrosion caverneuse ou par crevasse [19-25].

La figure II.10 schématise les principaux types de corrosion susceptibles d'être rencontrés lors de l'utilisation de l'aluminium et de ses alliages.

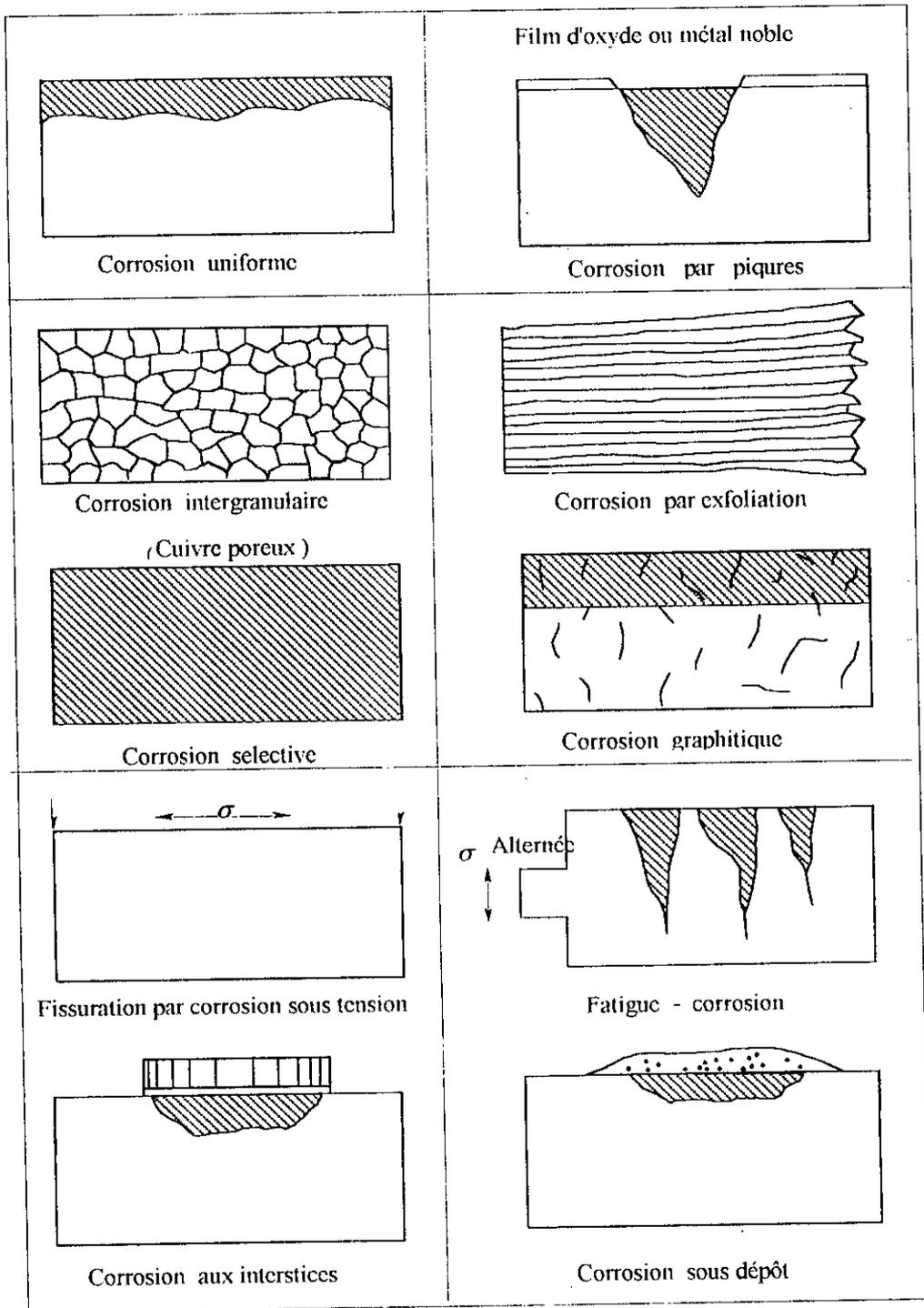


Figure II.10 : Schémas des principaux types de corrosion [19-25].

Les causes d'initiation les plus fréquentes sont :

- Les effets de confinement,
- Le couplage galvanique avec le métal plus noble,
- La bio-corrosion.

L'apparition entre autres de chacune de ces formes de corrosion, dépend de la combinaison d'un ensemble de conditions liées au matériau, au milieu, et à leur contact. L'étude de la corrosion fait ainsi intervenir des notions de chimie, d'électrochimie, parfois de biologie, ainsi que des notions de métallurgie et de mécanique. Si les caractéristiques de frottement des alliages d'aluminium sont assez mauvaises et que certains traitements de surface provoquent une diminution de leurs caractéristiques de fatigue, il y a lieu alors d'effectuer une restauration de cette propriété qui est des plus nécessaires et indispensables.

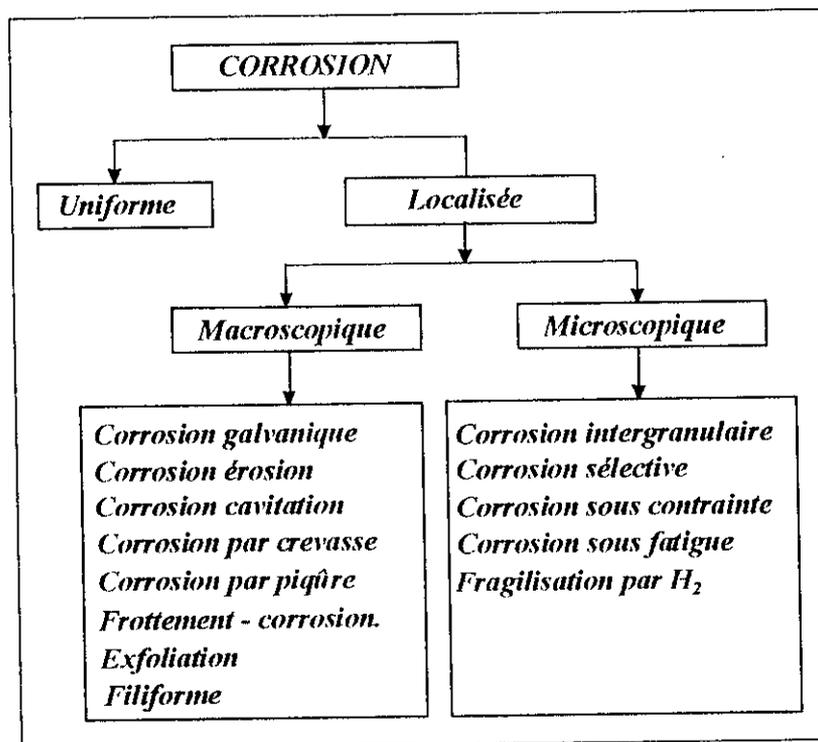


Figure II.11 : Classification des différents types de corrosion [19-25].

II.6 USURE ET FROTTEMENT

Il s'agit de donner les paramètres qui paraissent indispensables pour comprendre la tribologie moderne centrée autour des rôles des films intercalaires ou troisièmes corps et moins sur les propriétés des corps frottants ou premiers corps. Une tribologie décrite à partir de concepts simples basés essentiellement sur le parti - pris "**Mécanique – Matériaux**".

De très nombreux traitements de surface ou revêtements sont proposés comme remèdes aux problèmes de frottements et d'usure rencontrés dans la pratique industrielle. A en croire les très nombreux traitements de surface ou revêtements proposés, il pourrait sembler qu'il ne s'agit plus d'un véritable handicap. Toutefois, deux gros problèmes guettent les utilisateurs potentiels : soit rencontre surprise entre les essais de laboratoire ou banc d'essai et les applications industrielles, soit le problème mal posé et son approche reposant sur des concepts éculés.

Beaucoup de travaux et peut-être même trop sur l'usure reposent sur une connaissance insuffisante du phénomène et négligent de nombreux paramètres oubliés qui pourtant conditionnent l'usure. Il est clair que la grande diversité des traitements de surface et de revêtements rend encore plus crucial la définition de ces paramètres tribologiques. Il faut rappeler que la résistance à l'usure n'étant pas une propriété intrinsèque des matériaux ou des couples des matériaux, " la notion de bon traitement de surface ou de revêtement améliorant l'usure doit être refusée avec rigueur".

II.6.1 Les paramètres d'usure.

Depuis quelques années, des mécaniciens s'emploient à mettre en avant les généralisations qu'il devient difficile d'ignorer lorsqu'il faut décrire le comportement d'un couple de matériaux en tribologie. La sélection de traitement de surface ou de revêtement ne peut se faire sans avoir à l'esprit ces notions élémentaires et sans perdre compte tout l'environnement de la mécanique du contact.

Le consensus :

On sait, d'une part, que les surfaces sont rugueuses et que la rugosité est mesurable. Toutes les études récentes tiennent compte en plus de la hauteur des aspérités, de leur longueur d'onde et de l'étendue de contact et d'autre part, que les surfaces (films d'oxydes, films adsorbés, ...) **écrantent** les solides et limitent ainsi l'adhérence entre ces solides. Ces écrans statiques sont fragiles et peuvent être détruits par le frottement. Ils se reconstituent par interaction entre les solides et l'atmosphère.

L'usure peut être :

- Soit régulière et douce, ce qui correspond à l'élimination de films de surface ou écrans,
- Soit destructrice quand les écrans ne peuvent plus jouer leur rôle.

Le troisième corps, dans les faits, et dès le premier déplacement relatif, cette vue statique doit être abandonnée au profit d'une vue dynamique du problème. La destruction de l'**écran** entraîne la formation de débris d'usure qui se déposent nécessairement dans l'espace confiné que constitue le contact. Les approches modernes de frottement et d'usure insistent

sur le rôle essentiel de ces débris piégés. La notion d'**écran dynamique** doit s'ajouter à celle de l'**écran statique**. Le résultat des écrans est appelé **troisième corps**. Les premiers corps sont les massifs en contact.

Propriétés du troisième corps, l'utilisation des matériaux loupes telle que la craie, a permis de bien préciser le rôle déterminant des débris d'usure. L'expérience a montré que :

- Deux mécanismes d'usure coexistent dans le contact (abrasion à l'entrée du contact et polissage à la sortie),
- La longueur du contact gouverne l'usure,
- Les débris protègent les surfaces en créant une séparation ou mieux une portance.

Cette notion de portance est très ancienne dans le domaine de la lubrification (1886) [mais nouvelle et même d'actualité en frottement et usure. Cette notion mérite bien une analyse très approfondie. Ainsi, il a été dit et vu que les débris piégés à l'intérieur du contact forment un troisième corps qui diminue l'interaction entre les premiers corps et les protège au moins partiellement contre l'usure. Ce phénomène d'**autoprotection** va donc dépendre du temps pendant lequel les particules sont actives c'est à dire piégées dans le contact.

En résumé, il y a lieu de retenir que le processus d'usure dans le cas du frottement à deux corps est régi essentiellement par l'enchaînement suivant :

- La destruction de la surface,
- La déformation plastique et écrouissage des premiers corps,
- La formation et le piégeage des particules d'usure,
- La formation du troisième corps,
- La vie propre du troisième corps.

La vie propre du troisième corps dépend de son maintien ou de son élimination du contact. On retiendra, entre autres, l'adhérence entre les premiers et troisième corps, l'auto-adhérence des particules, la forme, l'environnement vibratoire et l'impédance mécanique du contact ainsi que la rhéologie du troisième corps.

Exemple 1 : Le contact ouvert (sphère / plan) piège très peu de débris donc s'use plus.

Exemple 2 : Le contact fermé (rotule) piège beaucoup de débris donc s'use très peu.

Pour conclure, il y a lieu de retenir qu'un système tribologique doit être capable de former des débris et de les maintenir dans le contact afin d'assurer la séparation des premiers corps et donc de créer une **portance**. Il s'en suit que :

- Un bon matériau tribologique est un matériau prêt à sacrifier sa surface pour protéger son volume,
- Il est donc illusoire de vouloir définir un bon couple de frottement ou un bon revêtement de surface,
- Il est impossible de caractériser dans l'absolu une résistance à l'usure,
- Un tribomètre n'est pas une balance susceptible de fournir des résultats (frottement et usure) intrinsèques aux matériaux et transposables à d'autres conditions d'utilisations.

La courbe $F D N$ obtenue dans le cas d'un contact métal – métal (figure II.12) montre l'évolution tangentielle (F) en fonction du déplacement (D) et du nombre de cycles (N). On remarque qu'en aucune façon, le coefficient de frottement ne peut être considéré comme une constante.

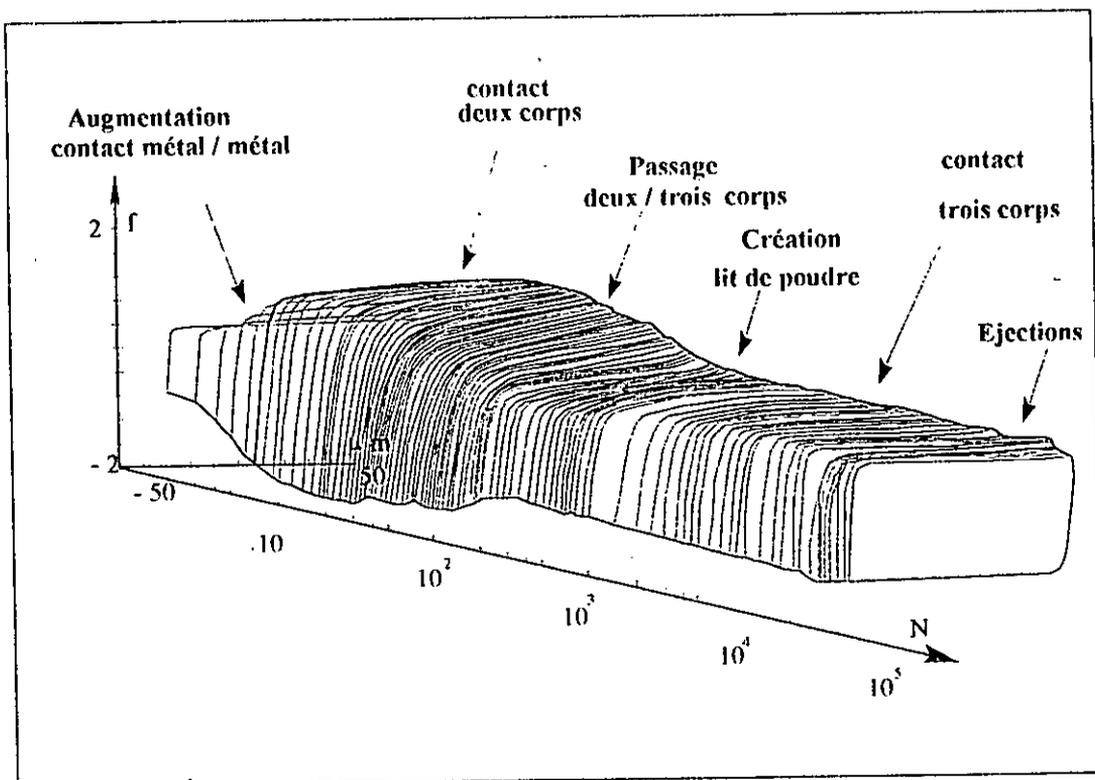


Figure II.12 : Courbe $F D N$ obtenue dans le cas d'un contact acier sur acier [2].

II.6.2 L'usure.

La plupart des ouvrages et des documentations scientifiques et techniques font des distinctions entre l'usure par adhérence, l'usure par abrasion, l'usure par fatigue, et l'usure par corrosion.

Indépendamment des mécanismes, le processus d'usure comprend le détachement de matière ou formation de débris, le séjour de ces débris dans le contact, l'élimination des débris du contact, et l'élimination des débris des pistes de frottement.

Pour détacher un débris ou une particule, il faut avoir créé au voisinage de la surface un champ de contraintes susceptible d'arracher cette particule. Ce champ de contrainte résulte de l'application de la charge normale et de la création de l'effort tangentiel issu du mouvement relatif. Une **forte adhérence** au sens physique du terme entre les premiers corps se traduira par un effort tangentiel important qui selon la ductilité ou la fragilité de ces premiers corps provoquera des ruptures avec ou sans déformation plastique. L'adhérence est (pour une part) à l'origine du détachement des particules mais n'est ni un mécanisme du détachement et encore moins un mécanisme d'usure. **La corrosion** n'est pas une usure, tout au plus peut-elle créer en surface une pellicule ou un film facile à détacher par frottement. Donc, dorénavant il est plus qu'important de bien distinguer les termes détachement et usure pour ne pas créer de confusion. Quel que soit le mode ou le processus de détachement ou d'usure, les dimensions des particules ou des débris sont infiniment petites. Elles résideront pendant un certain temps dans le contact avant d'être éliminées. Il est aussi très important de préciser si en quittant le contact :

- Les particules ou débris restent dans la piste de frottement auquel cas ils peuvent, au cours d'une passe suivante, être recirculés dans le contact,

- Ou si pour une raison ou une autre, ils sont projetés en dehors de la piste et perdus pour le contact.

La caractérisation de l'usure peut se traduire par la somme des particules ou débris projetés en dehors du contact, somme qui peut être différente, sauf en état stationnaire, de la somme des particules ou débris détachés.

La présentation classique de l'usure (l'usure par l'adhérence) comme résultant du premier des quatre mécanismes cités précédemment reste très incomplète car elle n'évoque que le premier stade du processus tout en ignorant les trois autres. Elle est dangereuse sur le plan fondamental car elle trompe les lecteurs en suggérant que l'usure soit essentiellement gouvernée par les propriétés physiques du matériau. Elle prive le chercheur pour le développement de la science dans ce domaine d'un degré de liberté dans l'analyse de ses résultats sur les phénomènes liés à la capacité des contacts de piéger ou non leurs propres particules ou débris, phénomènes qui peuvent entraîner des différences de plusieurs ordres de grandeurs dans les taux d'usure. Il semble préférable de présenter l'usure comme phénomène de débits avec ses sources, les zones de génération de débris, ses conduits larges ou étroits selon la forme des contacts qui accélèrent (contacts ouverts) ou freinent (contacts fermés ou étranglement) le débit, ses puits gouvernés par la dynamique des machines et la forme des pistes et d'expliquer comment chaque source, chaque conduit, chaque puits, gouverne à sa manière le taux d'usure dans une application donnée. Sachant qu'il n'existe pas d'appareillage universel d'étude expérimentale du comportement tribologique des matériaux, de grandes précautions sont à observer :

- La rigidité et l'élasticité du dispositif d'essai,
- Le comportement dynamique du dispositif d'essai,
- L'environnement,
- La variation de configuration.

II.6.3 La corrosion de contact:

La corrosion de contact est un type particulier de dégradation qui apparaît entre deux surfaces soumises à un mouvement oscillatoire de faible amplitude. Elle se manifeste dans toutes les liaisons mécaniques, concerne et pénalise de très nombreux secteurs industriels. Ce domaine a fait l'objet de plusieurs travaux mais les résultats sont restés en deçà de l'espérance attendue malgré quelques solutions satisfaisantes. Cette usure se manifeste par :

- L'usure des matériaux entraînant selon le cas un blocage ou un jeu important entre les pièces,
- La diminution importante de la tenue en fatigue des pièces. On utilise le terme de Fretting - Fatigue ou mieux encore souvent Fissuration Induite en Petits débattements (F I P).

Le processus de la dégradation peut être décomposé en trois stades comme le montre la figure II.13 :

1-Stade de prédisposition du matériau à créer des débris : Ce stade est conditionné par l'apparition des déformations plastiques internes. On observe toujours un fort écrouissage et souvent des modifications structurales en sous - couches.

2-Stade de création de débris : Le matériau écroui n'accommode plus les déformations, il se fissure et produit les premières particules d'usure.

3-Stade d'évolution des débris : Une fois dans le contact, les débris séparent les deux surfaces et modifient la suite du processus. Ils continuent à s'écrouir et sont broyés de plus en plus finement. C'est à ce stade que les processus de corrosion ou d'oxydation liés à l'environnement entrent en jeu. L'influence de l'environnement qui entraîne une modification du comportement rhéologique du troisième corps est d'autant plus importante que la surface spécifique du matériau augmente.

II.6.4 Traitement de surface, revêtement et usure.

La grande diversité des traitements de surface et des revêtements que l'on peut trouver et rencontrer sur la multitude de substrats utilisés rend toujours très délicate une classification de leur rôle en usure. Un même traitement de surface a pu être considéré comme excellent vis-à-vis de la résistance à l'usure dans le cas d'un contact plan / plan et se situer parmi les plus mauvaises dans le cas du frottement d'un cylindre dans son logement [2].

La recherche de solution en usure peut se faire en intervenant sur les trois stades du processus d'usure. Le traitement de surface ou le revêtement peut être recherché afin de retarder au maximum le contact entre les premiers corps ou au contraire pour favoriser l'apparition des débris d'usure et donc utiliser les propriétés de portance du troisième corps.

La formation des débris initiaux dépend de l'aptitude à la fissuration des premiers corps. Ainsi, l'utilisation en surface des matériaux ductiles conduit à un retard important dans le contact des débris. Il faut cependant noter que ce retard s'accompagne obligatoirement d'une augmentation de la profondeur de dégradation au niveau des zones écrouies. Si, au contraire on utilise un revêtement fragile, les premiers débris se montrent dès le premier cycle et les dégradations restent très superficielles.

- dans le cas où le type de liaison peut tolérer la présence de débris, un revêtement de type fragile sera intéressant dans la mesure où l'on sera capable de piéger les débris formés. Mais, l'utilisation de revêtements non fragiles n'est pas pourtant à rejeter.

- une autre façon de diminuer l'usure est de retarder le contact entre les premiers corps et donc d'introduire dans le contact un troisième corps artificiel (lubrifiants solides, films intercalaires, inserts...). Ainsi, des revêtements à base de téflon ont permis d'atteindre plus du demi-million de cycles sans que les premiers corps rentrent en contact.

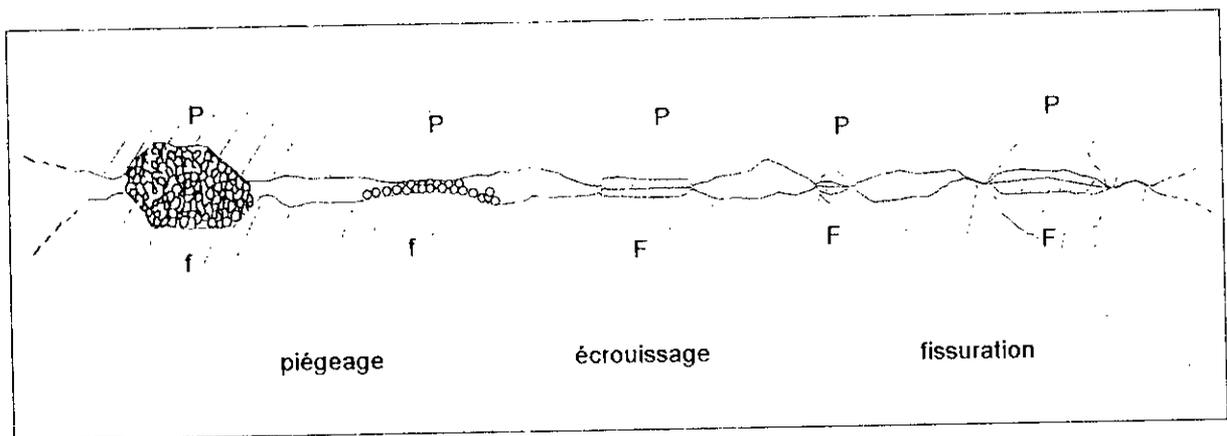


Figure II.13 : Schématisation globale d'un contact réel [2].
(f: début de la fissuration; F: ouverture de la fissuration).

Des travaux entrepris par CHIVERS et GORDELIER [2], il a été signalé que toute recherche bibliographique exaspérante non pas à cause d'un manque de solutions, mais bel et bien à cause d'un nombre pléthorique de remèdes mal définis [2] et [36]. On peut observer un écrouissage superficiel intense / ou des fissures qui se propagent en profondeur. La maîtrise de dégradation passe obligatoirement par la prise en compte pour le fait qu'un même contact peut présenter simultanément l'écrouissage, l'usure et la finition.

Un classement des traitements de surface et revêtements, utilise pour lutter contre la FIP, le traitement mécanique de la surface, le traitement chimique superficiel, le dépôt métallique, et le revêtement non métallique ou insert.

On rappelle tout simplement que tout traitement superficiel peut entraîner des modifications de la composition chimique des couches superficielles (avec ou sans gradient), des propriétés mécaniques (taux d'écrouissage), de l'état des contraintes internes ainsi qu'au niveau de la géométrie de la surface, des propriétés et de la structure du volume.

La figure II.14 représente la résistance à l'usure de différents matériaux avec ou sans protection. On remarque bien que le traitement de surface par le procédé d'anodisation dure surplante l'ensemble des autres protagonistes par sa résistance à l'usure au nombre très élevé du nombre de cycles et ce en comparaison même au chromage dur.

II.7 Conclusion du chapitre.

La conclusion principale de cette partie est que la tribologie est devenue une science en elle-même qui fait toujours appel à la mécanique et aux matériaux. Quant aux traitements de surface et revêtements appelés à remédier aux avaries d'usure, il y a lieu toujours de bien définir les différents éléments de base de la tribologie pour une approche d'un choix plus ou moins judicieux.

Ce chapitre a permis de mieux connaître le matériau de base notamment son histoire, ses propriétés, ses différents comportements vis à vis de la corrosion, de l'usure et du frottement. Cette partie nous a bien montré l'utilité du traitement de surface en l'occurrence l'anodisation ou l'anodisation dure. Ce point constituera l'objet du chapitre suivant.

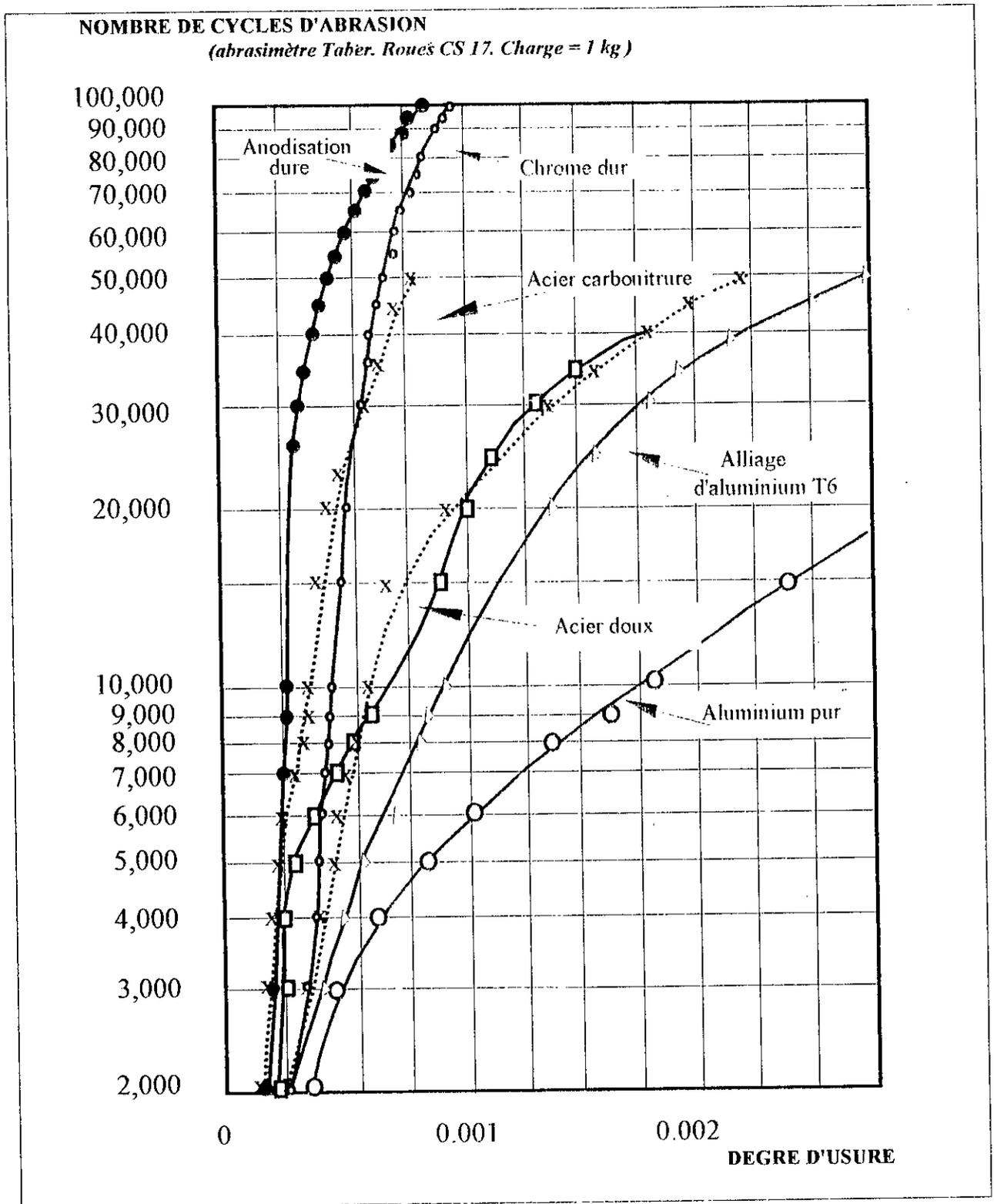


Figure II.14 : Résistance à l'usure de différents matériaux à l'aide de l'abrasimètre TABER [2].

THÈSE DE MAGISTÈRE ÉTUDE DE LA PROTECTION DU MATÉRIAU AÉRONAUTIQUE A U4G

CHAPITRE 3

TRAITEMENT DE SURFACE
PAR ANODISATION ET PAR
PROJECTIONS THERMIQUES.

CHAPITRE III

TRAITEMENTS DE SURFACES PAR NODISATION ET PAR PROJECTION THERMIQUE

III.1 PREPARATION DES SURFACES.

Généralement, il est nécessaire, avant de traiter ou d'observer une **surface** de préparer celle-ci. La nature de la préparation dépend de l'objectif à atteindre. De plus, l'état de surface est lié à l'**histoire** des produits et des matériaux à préparer. De ce fait, les modes et les processus de préparation peuvent être très variables [41-42]. Il y a lieu alors de distinguer deux (02) cas principaux :

- **La préparation de la surface dans le but de l'obtenir la plus propre possible** afin d'analyser ses propriétés intrinsèques (cristallographie de surface, état électronique de surface, travail de sortie...). Il est alors nécessaire d'éliminer toutes les impuretés et polluants pouvant fausser les éventuelles mesures ultérieures. Cependant, il faut être conscient que la décontamination d'une surface et sa mise à nu la rendent très active chimiquement et peuvent conduire à de nouvelles réactions de recouvrements. En fait, nous ne devons pas dire et penser en termes de métal ou substrat nu, mais beaucoup plus en termes de surfaces pouvant présenter la contamination superficielle la plus faible possible pour l'usage auquel nous avons l'intention de la destiner.

- **La préparation de la surface dans le but de la recouvrir ultérieurement.** L'idéal d'une bonne préparation est alors de permettre un contact aussi intime que possible entre la surface à recouvrir et le revêtement ou le traitement de surface à exécuter ou encore de rendre la surface suffisamment **active** afin que des réactions chimiques puissent se développer (par exemple lors des traitements de conversion).

Les principales techniques de mise en œuvre pour la préparation d'une surface peuvent être classées en deux (02) catégories:

- *Les techniques de nettoyage et de mise à vif de la surface* (décapage mécanique, décapage chimique, dégraissage...).

- *Les techniques qui consistent à améliorer l'aspect de la surface* (polissage mécanique, polissage chimique, traitements de restauration...)

Ainsi, selon le but et l'objectif assignés, la majorité ou une partie de ces opérations est nécessaire.

III.1.1 Nettoyage et mise à vif de la surface.

a) Décapage.

Le but essentiel et principal de cette opération est d'éliminer les couches chimiques adhérentes à la surface telles que les oxydes, produits de corrosion, revêtements de protection anciens...

Le décapage mécanique peut être réalisé :

- Soit par voie sèche (exemple le grenailage) où le métal ou le substrat est mis à nu, c'est à dire le rendre très réactif vis-à-vis de l'atmosphère environnante. Par conséquent, il y a lieu de poursuivre automatiquement et obligatoirement le plus rapidement possible cette opération par celle du revêtement car sinon des produits de corrosion se forment à la surface et nuisent à l'adhérence du revêtement ou du traitement de surface ultérieur,

- Soit par voie humide où l'utilisation d'un passivant ajouté généralement à de l'eau crée à la surface un film mince continu qui conduit à une meilleure adhérence du revêtement ultérieur.

Le décapage ionique, analogue au décapage mécanique de microbillage, se présente comme des plus intéressants mais pouvant conduire à une modification structurale de la surface.

Le décapage chimique, d'une façon générale, il est utilisé pour l'ensemble des matériaux une solution acqueuse (mélange d'acide sulfurique, chlorhydrique, nitrique, fluorhydrique...). Pour le cas de l'aluminium et de ses alliages, il s'effectue avec une solution basique (10 à 20% de soude). Le décapage chimique s'effectue de diverses manières: au trempé, par projection pour de petits objets, à la pâte pour de gros objets, à la mousse lorsque les volumes à traiter sont très importants et par voie chimique.

Le décapage thermochimique s'effectue dans les bains de sels et principalement pour les aciers. Cette opération permet une transformation des oxydes superficiels, soit par réduction à l'état métallique, soit au contraire en d'autres oxydes plus solubles dans une solution acide.

b) Dégraissage.

Cette technique est utilisée essentiellement et principalement pour éliminer les corps gras, graisses animales ou végétales saponifiables ou huiles minérales non saponifiables qui souillent la surface. Il faut remarquer que très et même **trop** souvent, c'est la seule méthode de traitement de surface avant revêtement. Il peut être exécuté soit chimiquement soit électrolytiquement et soit par action combinée ultraviolet / ozone.

Le dégraissage chimique est très souvent utilisé, mais pour qu'il s'avère efficace, il doit être parfaitement adapté au matériau à dégraisser, car son rôle n'est pas uniquement de nettoyer la surface, mais aussi de la conditionner au traitement ultérieur.

Comme dans le cas précédant, le choix du **dégraissage électrolytique** est lié à la nature du substrat à nettoyer. Les dégagements gazeux aux électrodes (générateurs d'agitations locales), associés aux propriétés dégraissantes du bain, assurent un excellent nettoyage de la surface et des microfissures sous jacentes.

L'action combinée de **dégraissage ultraviolet / ozone** permet la rupture des liaisons organiques et contribue à leur oxydation sous forme d'eau (H_2O) et de dioxyde de carbone (CO_2) qui deviennent plus facilement éliminable.

Aussi, les conséquences d'un mauvais dégraissage peuvent être plus catastrophiques que celles de la pollution initiale.

III.1.2 Amélioration de l'aspect de la surface.

a) Polissage.

Il a pour but de donner à une surface initiale quelconque une finition qui dépendra de l'usage que nous désirons faire de cette surface.

Le **polissage mécanique** peut être soit décoratif (aspect agréable à l'œil) ou scientifique (pour des travaux de recherche). A savoir qu'il y a lieu de formation d'une mince couche fortement écrouie sur le substrat.

Le **polissage électrolytique** permet la dissolution des aspérités de la surface. Malgré l'absence de couche mince écrouie et le gain de temps, des inconvénients sont à enregistrer (apparition de piqûres et aggravation de porosités...).

Le **polissage chimique** est une attaque chimique contrôlée de la surface du substrat.

b) Restauration physico-chimique de la surface.

Il a été remarqué qu'après un traitement de dégraissage, décapage ou polissage, la surface n'est pas tout à fait représentative du substrat : présence de contraintes, textures... Aussi, il est possible d'éliminer ces défauts par un traitement thermique de recuit dont le rôle principal est de :

- Homogénéiser un alliage tant du point de vue chimique que micrographique,
- Modifier sa structure micrographique,
- Restaurer sa structure après écrouissage,
- Diminuer les contraintes internes.

Ce traitement de restauration rend un grand service pour l'étude des surfaces, à condition de l'effectuer dans de bonnes conditions (atmosphère inerte ou réductrice, vide...) pour ne pas oxyder la surface. Le dégazage thermique est aussi très souvent utilisé dans le cadre des méthodes modernes d'analyse de surface.

III.1.3 Choix d'un traitement de surface ou d'un revêtement.

Au fait, l'utilisateur final n'a pas à choisir un revêtement, mais un matériau revêtu, c'est à dire un système complet associant les propriétés d'un substrat, les propriétés d'une surface et les propriétés de l'ensemble qui en résultent. En effet, le choix d'un matériau revêtu ne se fait pas nécessairement par opposition à d'autres matériaux revêtus mais par opposition à tous les matériaux. Ainsi donc l'opposition matériau revêtu / matériau massif, mérite une attention toute particulière. Enfin, il y a lieu de retenir que le revêtement ou le traitement de surface sont souvent parmi les dernières opérations de la gamme de fabrication d'une pièce. Il en résulte que cet aspect de la technologie de fabrication se trouve par nature très proche des problèmes de l'utilisateur final contrairement aux matériaux massifs.

Il existe une bonne variété de la justification des matériaux revêtus. Un procédé de revêtement n'est jamais une opération simple ni gratuite, et la tendance **naturelle** serait plutôt à l'emploi des matériaux massifs. Il faut en effet de bonnes raisons pour justifier les efforts et les soucis inhérents à un matériau revêtu. Ces justifications peuvent être de toute nature :

- technique (possible / impossible) ou économique,
- positive (solution) ou négative (exclusion),
- priorité au substrat ou à la surface.

Les manières d'améliorer le rapport performances / prix apparaissent ainsi très variés. Dans chaque usage, il est alors très important de bien analyser les motivations profondes des choix effectués, au travers desquelles on pourra peut-être définir la **vraie** fonction d'un revêtement.

Les facteurs techniques à prendre en compte.

Ces facteurs sont différents selon qu'il s'agit d'un traitement de préparation ou d'une opération de finition.

- **Le traitement de préparation** ne concerne d'abord que le substrat et a pour objectifs :
 - l'élimination des contaminants superficiels,
 - l'amélioration des propriétés géométriques (méthodes mécaniques, chimiques, électrochimiques...),
 - la modification de formes et dimensions (usinages non conventionnels, usinages chimiques, électrochimiques, étincelage, plasma...).

Beaucoup de problèmes dans le domaine de la préparation des surfaces sont susceptibles être développés. Il s'agit notamment de :

- l'action sur la structure des matériaux,
- des caractéristiques superficielles après traitement,
- l'hygiène et sécurité dans l'emploi des solvants industriels.

- *Le traitement de finition* a, quant à lui, l'objectif de conférer au substrat des propriétés nouvelles susceptibles de satisfaire une utilisation particulière où les principaux procédés utilisés sont :

- les couches de protection temporaire représentées par les inhibiteurs (huiles, graisses, peintures et vernis...),
- les traitements de conversion représentés par la phosphatation, l'oxalation, la chromatisation, le brunissage...
- l'anodisation,
- les revêtements de nature minérale représentés soit par la voie humide (procédés chimiques, procédés électrochimiques, slurry coating...) soit par voie sèche (métaux fondus, **projections**, céramiques, P.V.D., C.V.D).

Beaucoup de propriétés sont à prendre en considération et principalement la nature, la pureté, l'état géométrique, la structure, la porosité, l'adhérence et l'épaisseur. Une attention toute particulière doit être observée aux propriétés mécaniques et tribologiques ainsi qu'aux maladies (fragilisation par l'hydrogène, contraintes).

L'influence du substrat est très importante et qu'il y a lieu de prendre impérativement en considération. Il s'agit de la nature, la pureté (inclusions), la température de transformation, la tension de vapeur ainsi que la structure, les contraintes et le coefficient de dilatation. Le potentiel électrochimique, le coefficient de dégazage et les propriétés mécaniques (dureté, ductilité, résilience...) sont également à prendre en considération.

Comme dans le cas précédent beaucoup de problèmes rencontrés quotidiennement dans l'industrie sont susceptibles être développés. Il s'agit de l'influence de l'état géométrique du substrat sur la croissance du dépôt, des couches barrières de diffusion et des contraintes internes. Il y a lieu de tenir compte aussi de l'influence des paramètres opératoires sur les propriétés mécaniques du dépôt, des traitements thermiques et mécaniques après dépôt qui ont des conséquences sur les propriétés mécaniques et tribologiques et du comportement en fatigue des pièces revêtues.

S'agissant de revêtements et de traitements de surfaces contre le frottement et l'usure, nous pouvons dire que la dégradation est l'un des phénomènes industriels les plus usuels, en dehors de la fatigue et de la corrosion, qui conduisent au remplacement des pièces dans l'industrie mécanique. Il s'agit d'un phénomène rarement catastrophique.

C'est pour répondre aux exigences de fiabilités de nombreux secteurs d'activités économiques (aéronautique, armement, nucléaire, industrie automobile) que se sont développés, au cours des années, des modes de traitements de surfaces ou de revêtements de surface susceptibles d'accroître la longévité d'organes critiques de machines ou d'installations spécifiques.

Si l'on tente de dresser une synthèse de filières de traitements de surface en vue d'applications mécaniques, nous pouvons considérer que celles-ci font appel à divers conditionnements rassemblés en quatre catégories distinctes :

- les traitements avec transformation structurale d'origine mécanique ou thermique,
- les traitements thermochimiques avec diffusion,
- les traitements par conversion de surface,
- les dépôts obtenus par voie humide ou par voie sèche.

Au choix du substrat puis du traitement de surface ou du revêtement vient s'ajouter un paramètre important et non des moindres: il s'agit du facteur économique où les conditions d'exploitation englobent le bilan énergétique, la main d'œuvre, la rusticité (la maintenance), la capacité de travail (la charge unitaire, la durée du cycle opératoire) et le coût de l'ensemble de la matière première selon le procédé.

III.2 ANODISATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.

L'aluminium ainsi que la plupart de ses alliages ont un bon comportement dans les diverses atmosphères car ces derniers se recouvrent d'une mince pellicule naturelle d'oxyde, cette couche d'alumine (Al_2O_3), a une épaisseur de l'ordre de $0,01\mu m$ et peut même atteindre $0,2$ à $0,4\mu m$ mais toujours est-il que cette dernière n'empêche nullement la formation de piqûres.

Pour cela, cette pellicule protectrice peut être obtenue artificiellement en recouvrant les surfaces exposées d'une mince couche inaltérable, imperméable, de telle manière à isoler le métal du milieu corrosif, par des procédés chimiques ou électrolytiques, tels que l'anodisation, le cadmiage, le zingage, le cuivrage, le nickelage le chromage et l'étamage.

Ces couches ainsi obtenues sont non seulement supérieures du point de vue mécanique, mais aussi plus résistantes à la corrosion et forment une couche de base très appropriée à l'adsorption des colorations résistant à la lumière.

Ces techniques qui consistent à obtenir par voie électrolytique sur une surface conductrice ou rendue conductrice, un ou plusieurs métaux, relèvent de la galvanotechnique.

Les trois propriétés les plus importantes de l'aluminium sont son poids spécifique très faible ($\cong 2,7$) lorsqu'il est amélioré par des additions d'éléments appropriées et des traitements thermiques et sa grande résistance à la corrosion, à l'état pur. L'aluminium possède aussi une grande conductibilité thermique et électrique et un excellent pouvoir réfléchissant.

La mise au point d'une large gamme d'alliages contenant une certaine quantité de métaux lourds tels que le cuivre, le zinc, le nickel, etc...et afin qu'ils puissent être utilisés dans certaines applications telle que l'aéronautique, affectent considérablement la sensibilité de l'alliage à la corrosion d'où la nécessité de procéder à un traitement de surface.

Le diagramme de POURBAIX représenté sur la figure III.1 et où est également représenté le domaine de stabilité de l'eau (entre les droites a et b en pointillé, qui correspondent aux équilibres des électrodes à hydrogène et oxygène), montre l'impossibilité pratique d'effectuer une protection cathodique de l'aluminium et de ses alliages dans le domaine de l'immunité.

On constate sur ce diagramme que pour obtenir l'immunité, c'est à dire l'absence de possibilité de corrosion, il faut abaisser le potentiel du métal à une valeur suffisamment négative, qui dépend de la nature du métal et du pH. Ainsi, si la protection cathodique est un moyen couramment utilisé pour lutter contre la corrosion des alliages à base de fer, elle est beaucoup plus délicate à envisager pour un métal tel que l'aluminium.

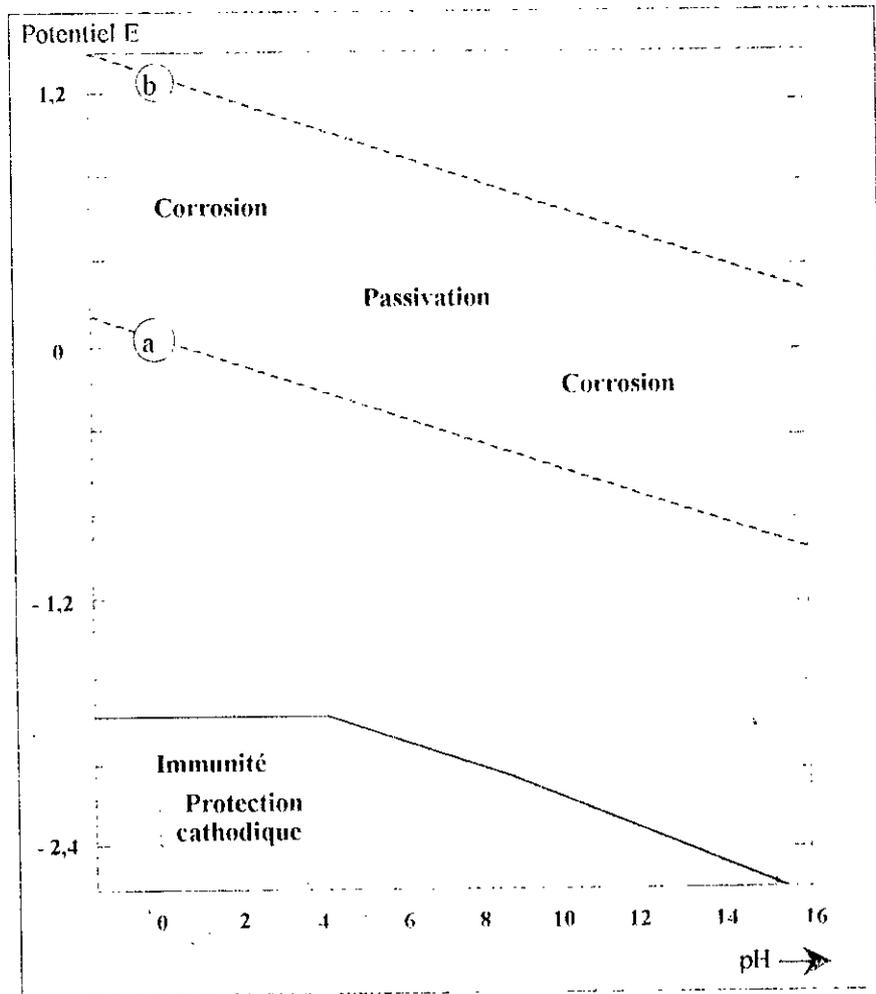


Figure III.1 : Diagramme de POURBAIX (E,pH) de l'aluminium [2]

III.2.1 Historique.

L'aptitude de l'aluminium à se recouvrir d'une pellicule d'oxyde dans une cellule d'électrolyse a été découverte par BUFF en 1857 [1].

C'est d'abord, le Français DE SAINT MARTIN [1] qui, en 1911, donnait les principes de base de l'oxydation électrolytique des alliages d'aluminium en milieu sulfurique. Par la suite, de nombreuses expériences ont été menées dans divers pays, différents les uns des autres par la nature du milieu électrolytique. C'est ainsi qu'en 1923, BENGOUGH et STUART [1] en Grande-Bretagne, développèrent l'anodisation en milieu chromique dans le but de protéger les éléments en alliages Al-Cu d'avions et hydravions.

Enfin, les Japonais SETOH et MIYATA mirent au point l'anodisation en milieu d'acide oxalique, en vue de résoudre un problème d'isolement électrique. Par la suite l'anodisation en milieu sulfurique fût mise au point d'une manière industrielle par GAVER ET O'BRIEN 1937 [1] et s'est avérée la plus adéquate aux traitements décoratifs.

III.2.2 Principe de l'anodisation.

Le principe de l'anodisation est le même que celui de l'électrolyse de l'eau. Si l'on remplit une cuve avec de l'eau rendue conductrice par addition d'un acide, de base ou de sel, et on met deux électrodes, une anode en aluminium et une cathode (pôle négatif) inattaquable en nickel ou en plomb, les deux électrodes sont reliées à un générateur, on constate alors, un dégagement d'hydrogène au niveau de la cathode en plomb selon la réaction



Par contre, sur l'anode en aluminium, on constate la formation d'une couche d'alumine anhydre Al_2O_3 isolante, par combinaison de l'oxygène provenant de dissociation électrolytique de l'eau utilisée pour oxyder l'aluminium de l'anode selon la réaction suivante:

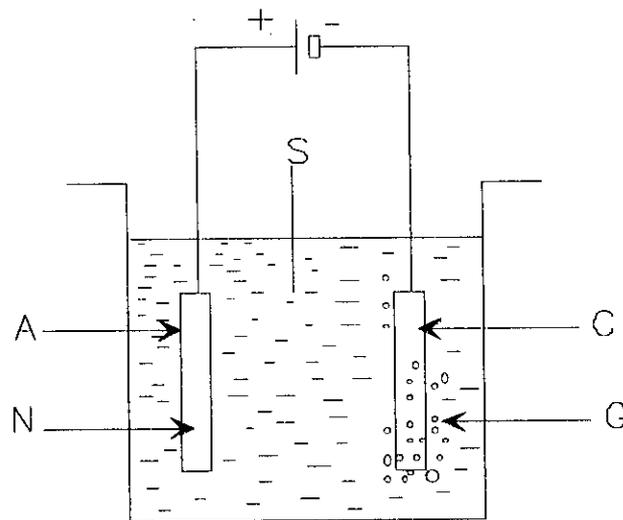


Figure III.2 : Schéma du procédé d'anodisation.

- A: anode en aluminium
- N: couche d'alumine anodique
- C: cathode
- S: solution diluée d'un acide
- G: dégagement d'hydrogène

Cette couche, qui se forme aux dépens du métal, aura tendance à empêcher le passage du courant du fait de son caractère isolant. La nature de l'électrolyte, joue un rôle capital sur les phénomènes qui se développent à la surface anodique, c'est-à-dire l'action plus ou moins dissolvante de l'électrolyte sur l'alumine ainsi formée. Ainsi, trois cas peuvent se présenter :

- **L'électrolyte n'a pas d'action dissolvante sur la couche d'alumine formée.** C'est le cas des solutions à base d'acide borique, tartrique, du carbonate de sodium etc... Il se forme un film très adhérent et non conducteur. La croissance du film s'effectue jusqu'à ce que sa résistance empêche le courant d'atteindre l'anode. On obtient alors *une couche très fine dite de barrière* dont l'épaisseur ne dépend que de la tension appliquée.

- **L'électrolyte a une action dissolvante moyenne sur l'alumine.** C'est le cas des solutions d'acides oxalique, chromique, sulfurique... La dissolution conduit à la formation de nombreuses petites piqûres dans la couche de barrière qui permettent au courant de continuer à passer et par conséquent à la couche de croître en épaisseur en prenant une structure poreuse.

- **L'électrolyte a une action dissolvante très marquée sur le film d'alumine.** Le film d'alumine est dissout à la même vitesse que celle à laquelle il s'est formé. Son épaisseur est alors faible et peu compacte. De tels films sont utilisés pour l'obtention d'un polissage électrolytique de la surface, ou comme base d'accrochage de revêtements galvaniques sur des alliages d'aluminium. Ces derniers sont obtenus dans des électrolytes d'acides forts tel que l'acide sulfurique. C'est le procédé le plus utilisé.

III.2.3 Mécanismes de formation et structure de la couche d'oxyde.

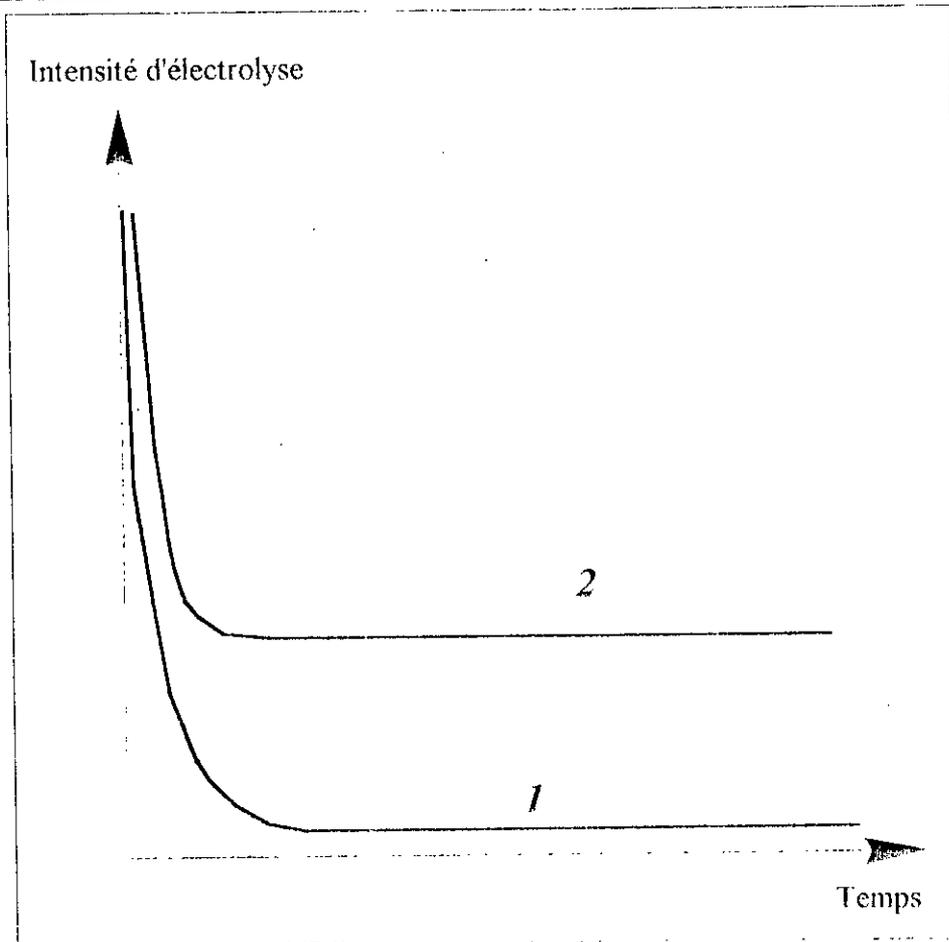


Figure III.3 : Courbes de l'intensité (A) en fonction du temps (s) et selon la nature de l'électrolyte [1].

Si une pièce en aluminium est oxydée dans une solution ayant une action dissolvante moyenne sur la couche d'alumine, la dissolution conduit à la formation de nombreuses petites piqûres dans la couche barrière.

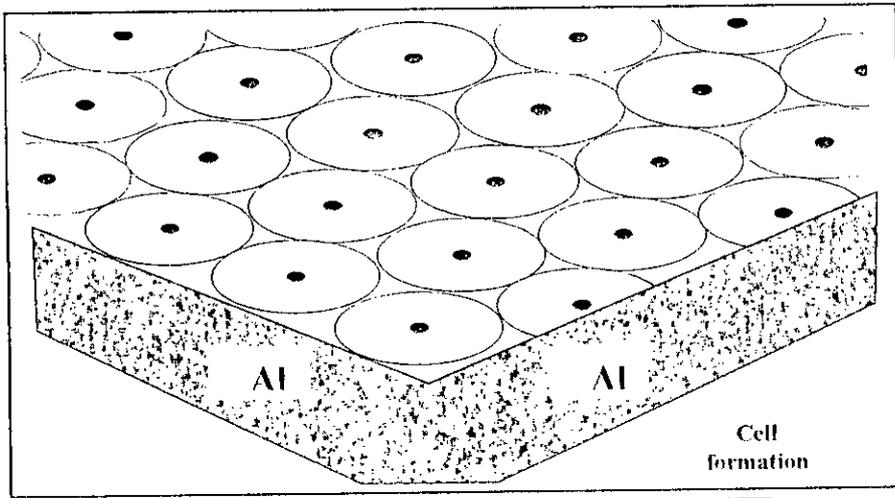
Lors de l'édification des couches barrières, le palier est atteint en quelques secondes comme le montre la figure III.3.

La **courbe-1** représente l'électrolyte ayant sur la couche d'alumine une action non dissolvante et la **courbe-2** l'électrolyte ayant sur la couche d'alumine une action dissolvante.

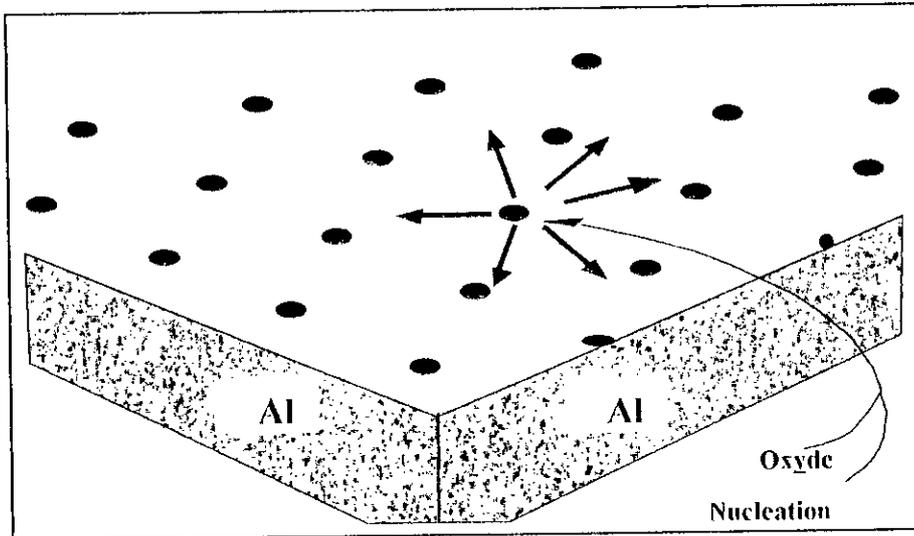
D'après EDWARDS, KELLER, HUNTER et ROBINSON [1], il se forme une véritable couche barrière dont l'épaisseur est de valeur limite d'environ 14 A/ V. C'est de l'alumine anhydre, soit amorphe, soit dans l'état γ Al₂O₃.

Cette étude a montré que cette couche est constituée par un entassement de cellules de forme hexagonale, juxtaposées et le centre de ces cellules serait de l'alumine amorphe peu résistante aux acides alors que la périphérie serait formée d'alumine γ cristalline qui est par contre très résistante aux acides (figure III.4). Aussi, au niveau de la surface de cette couche barrière (c'est à dire la couche d'oxyde), il apparaît une multitude de points d'attaque, au centre de ces cellules correspondant aux piqûres qui constituent les pores.

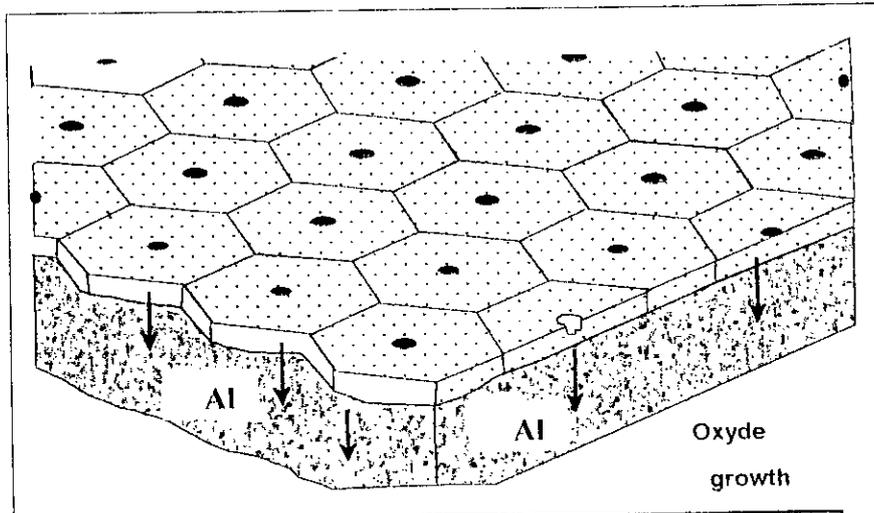
Des examens au microscope électronique, ont permis de montrer que le nombre et le diamètre des pores, dépendent de la nature et de la concentration de l'électrolyte, alors que la dimension des cellules et l'épaisseur de la couche barrière ne dépendent que de la tension.



FORMATION DES CELLULES



FORMATION DES SITES DE NUCLEATION A LA SURFACE DE L'ALUMINIUM



PROCESSUS DE CROISSANCE DES CELLULES

Figure III.4 : Mécanismes de formation d'une couche d'oxyde [2].

III.2.4 Anodisation en milieu sulfurique.

Les surfaces à protéger, donc à anodiser, doivent être préparées car elles doivent être exemptes de toute matière grasse ou d'oxyde. Le décapage peut être effectué mécaniquement, chimiquement ou électriquement, ainsi qu'un dégraissage qui peut être obtenu par immersion des pièces dans un bain chaud de soude caustique étendue d'eau ou de trichloroéthylène.

L'anodisation en milieu sulfurique est un procédé très utilisé en raison des résultats satisfaisant qu'il permet d'obtenir. De ce fait il existe deux facteurs qui jouent un rôle important au cours de l'édification des couches d'oxydes poreuses à savoir ;

- *Premier facteur* : croissance de la couche d'oxyde de l'extérieur vers l'intérieur par un phénomène électrochimique pur d'où il résulte une vitesse d'oxydation

- *Deuxième facteur* : dissolution de la couche d'oxyde à mesure de sa formation par un phénomène purement chimique d'où il résulte une vitesse de dissolution.

Le principe de l'anodisation, consiste à maintenir l'ensemble des paramètres du traitement de telle manière que la vitesse d'oxydation reste constamment supérieure à la vitesse de dissolution et ceci est une condition nécessaire.

III.2.5 Influence des paramètres opératoires sur l'oxydation et la dissolution.

Les quatre paramètres essentiels agissant sur les deux facteurs d'édification de la couche d'oxyde sont la concentration de l'électrolyte, la température, la densité de courant et la durée de l'anodisation.

III.2.5.1 La concentration de l'électrolyte.

La vitesse d'oxydation est proportionnelle au taux de dissociation électrolytique qui peut lui-même se mesurer par la conductibilité de l'électrolyte.

Afin de maintenir la vitesse résultante d'édification constante, dans la pratique, il est convenu d'utiliser un bain dont la concentration en acide sulfurique est à 20% soit 180 g/l et maintenir une densité de courant constante (16 à 18A/dm²) [1].

La concentration de l'électrolyte change au fur et à mesure du vieillissement du bain (apports d'eau de rinçage, enrichissement en sulfate d'alumine (SO₄)₃ Al₂...). Donc il est conseillé de surveiller la concentration du bain afin d'y apporter les rectifications nécessaires au bon déroulement de l'opération.

III.2.5.2 La température

C'est un facteur très important même si elle n'a aucune influence sur la vitesse d'oxydation. Par contre, dès que nous augmentons la température du bain de quelques degrés, nous assistons à la pulvérisation de la couche d'oxyde. Ce phénomène, conduit à un effritement au simple contact du doigt car, les entrées de pores largement ouvertes en raison d'un taux de dissolution élevé, sont devenues fragiles à leurs sommets.

C'est l'un des paramètres primordiaux vu le rôle qu'elle a dans l'édification de la couche d'oxyde, car non seulement elle agit sur sa morphologie mais aussi sur son aspect, d'où il est permis d'anodiser dans la plage de 16 et 24 °C.

Pour maintenir la température constante, qui est une opération très délicate, on peut placer un dispositif d'évacuation des calories qui consiste à envoyer de l'eau froide dans un serpentin ou dans les plaques échangeurs de température, ou encore faire circuler l'électrolyte dans un groupe frigorifique, tout en respectant le volume de ce dernier qui est de 4 à 5 l/Ampère[1].

III.2.5.3 La densité de courant.

La vitesse d'oxydation est proportionnelle à la densité de courant. D'après les études théoriques, la densité de courant n'a aucune action directe sur la vitesse de dissolution mais d'une manière indirecte car les ions, véhiculés à travers les pores jusqu'à la couche barrière, possèdent une résistance fixée par leurs dimensions et la résistivité de l'électrolyte dont ils sont remplis.

Donc plus le courant est important, plus les pertes par effet joule sont importantes (provoquant ainsi une augmentation de la température). Ainsi il a été démontré que la densité de courant agit sur la température, ce qui favorise alors la dissolution de la couche barrière [1].

III.2.5.4 La durée de l'anodisation.

La durée de l'anodisation dépend de l'épaisseur de la couche désirée, mais l'inconvénient est que, plus la couche est épaisse, et plus les pores (conducteurs) s'allongent devenant ainsi plus résistants, et plus la température au niveau de la couche augmente, favorisant ainsi l'augmentation de la vitesse de dissolution. On constate que la vitesse d'édification de la couche, qui est la résultante des vitesses d'oxydation et de dissolution, n'est constante en général jusqu'à trois heures de traitement, mais au-delà, la vitesse de dissolution prend le pas sur la vitesse d'oxydation.

III.2.6. Conditions pratiques de traitement.

III.2.6.1 L'agitation.

Une agitation de l'électrolyte est nécessaire afin que ce dernier arrive frais au contact de la surface. On dispose alors dans le bain d'un barbotage d'air comprimé dont le débit est entre 10 et 15 m³ /h.m² [1] de surface extérieure de la cuve.

III.2.6.2 Les réglages électriques.

Nous savons que la densité de courant influe directement sur la vitesse d'anodisation. Pour cela, dans la pratique, il est recommandé de travailler avec une valeur moyenne entre 12 et 18 A/dm², car d'une part c'est amplement suffisant pour ce genre d'opération, et d'autre part cela facilite l'évacuation des calories qui en résultent, et l'épaisseur obtenue est proportionnelle à la quantité de courant fournie.

III.2.6.3 La vitesse d'édification de la couche.

L'expérience a montré [1] [21] qu'avec les conditions à savoir :

- la concentration de l'électrolyte : 180 ± 20 g/l SO_4H_2 .
- la température du bain : 20 ± 2 °C .
- la densité de courant : $1,5$ A/dm² .
- un bon refroidissement et une agitation de l'électrolyte, avec une vitesse moyenne de $0,45$ µ/mn, on obtient alors une épaisseur de $0,30$ µ.

III.2.6.4 La durée de l'anodisation.

La durée de l'anodisation dépend de la couche d'oxyde souhaitée. Selon la valeur de la vitesse d'édification de cette dernière, l'expérience a montré [1-2] et [6] qu'il fallait une durée de traitement de :

- 10 à 20 mn pour les couches de 5 à 10 µm utilisées dans les traitements de décoration,
- 30 à 40 mn pour les couches de 10 à 15 µm utilisées dans les traitements de protection contre les intempéries moyennes,
- 40 à 60 mn pour les couches de 15 à 25 µm exigées dans les traitements de protection contre les intempéries sévères et la résistance à l'usure.

III.2.6.5 Les principales propriétés des couches d'oxyde.

Les propriétés des couches telles que la couleur, la brillance, la continuité, le pouvoir de protection et la densité sont influencées par la composition de l'alliage.

Il est difficile d'obtenir dans le cas de l'A-U4G une couche supérieure à 8 ou 9 µm.[26] L'aspect de la couche d'oxyde, obtenue en bain sulfurique, en ce qui concerne cet alliage, a une teinte blanche et légèrement opalescente, sur une surface polie.

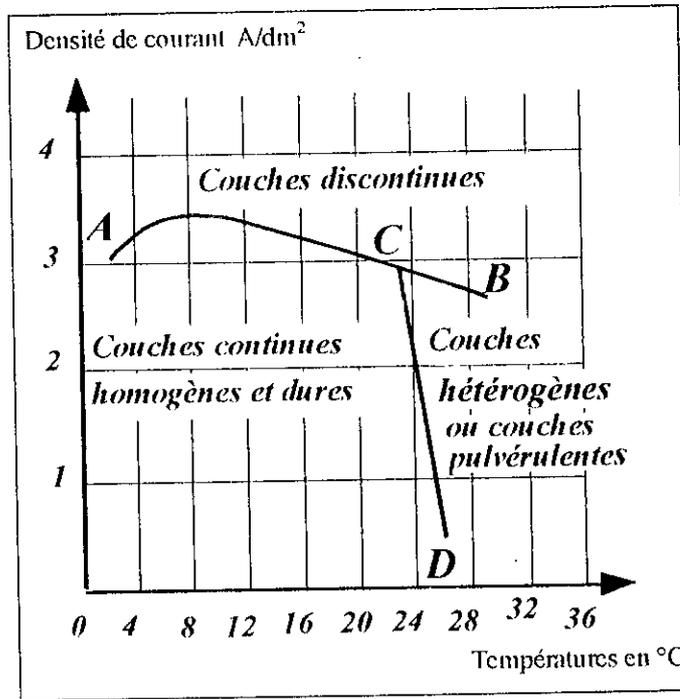


Figure III.5 : Conditions d'obtention d'une pellicule d'alumine homogène et dure [1].

III.2.7 Traitements postérieurs à l'anodisation

III.2.7.1 Coloration

Il existe trois méthodes de coloration utilisées couramment après anodisation :

La coloration chimique : Elle est utilisée généralement après anodisation sulfurique. Elle s'effectue par immersion de l'alliage anodisé dans des bains contenant des pigments organiques ou minéraux.

Afin d'obtenir des teintes régulières, il est indispensable que les pièces anodisées soient bien rincées dès la sortie du bain d'anodisation. Par la suite, cette pièce est plongée dans une solution d'acétate de nickel puis colmatée en eau déminéralisée bouillante afin de fixer la couleur et avoir une bonne résistance aux intempéries.

L'auto-coloration : Dans ce procédé, le film anodique se colore au fur et à mesure de sa formation. A la fin de l'anodisation, la couleur est répartie uniformément sur toute l'épaisseur du film car ce sont les éléments d'addition contenus dans l'alliage, spécialement élaboré dans ce but, qui participent au processus de coloration. Les couleurs ainsi obtenues sont très solides à la lumière et recommandées pour les applications extérieures.

La coloration minérale électrolytique : Ce troisième procédé, mis au point ces dernières années, permet par le moyen d'une électrolyse de faire pénétrer des pigments métalliques jusqu'au fond des pores de la couche. Ce procédé s'applique principalement sur des couches d'oxydes obtenues en milieu sulfurique.

III.2.7.2 Colmatage

Le colmatage a pour but de refermer les pores de la couche afin d'obtenir le meilleur pouvoir de protection contre la corrosion. Ce traitement s'effectue toujours en milieu aqueux.

Pour cela, deux procédés sont souvent utilisés. Ce sont l'immersion à l'eau bouillante très pure, déminéralisée par passage sur résines échangeuses d'ions et le colmatage à la vapeur. Le premier cas de traitement est utilisé particulièrement pour les pièces en alliages Al-Cu destinées à l'aviation.

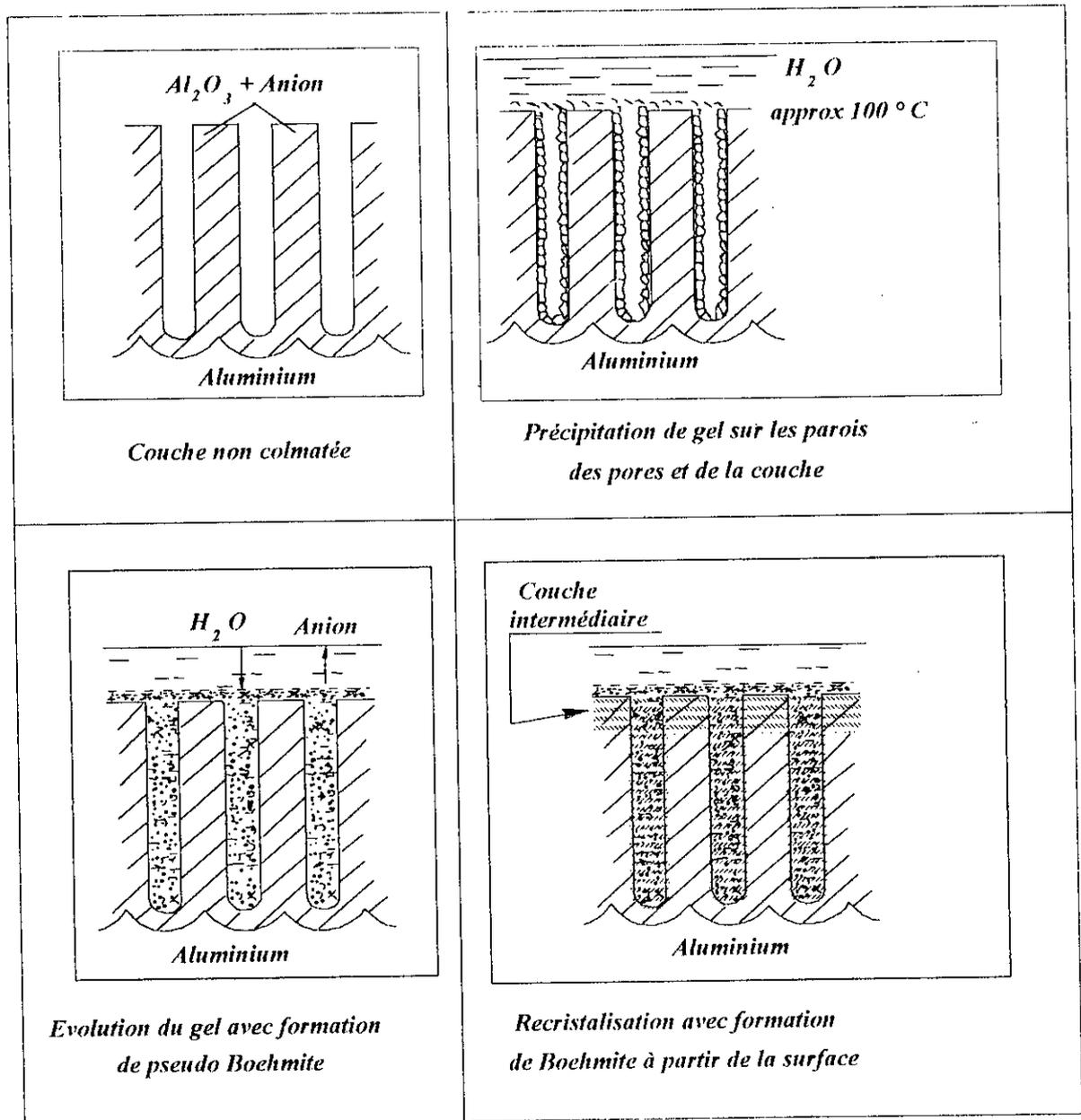


Figure III.6 : Mécanismes de colmatage des oxydes anodiques [2].

III.2.8 Anodisation en milieu chromique.

Le procédé à l'acide chromique, exploité en 1923 par BENGOUGH-STUART [1] est le plus ancien, utilisé principalement pour le traitement des pièces destinées à l'aéronautique lorsque ces dernières sont de formes complexes où l'électrolyte peut être retenu dans les criques ou replis de métal.

III.2.9 Anodisation à l'acide oxalique.

Les électrolytes d'acide oxalique qui ont donné le nom au procédé ELOXAL furent employés pendant de nombreuses années. Ils donnent des films assez durs et résistants à l'abrasion mais ce procédé a tendance à disparaître au profit de l'anodisation en milieu sulfurique de meilleur marché.

III.2.10 Anodisation à l'acide borique.

Une couche étanche et non absorbante, donc possédant un grand pouvoir diélectrique, peut être obtenue dans un bain tel que l'acide borique qui ne dissout pas l'alumine pendant sa formation. Un tel type d'anodisation trouve son application dans les condensateurs électrolytiques.

III.2.11 Anodisation aux acides organiques.

Les bains constitués d'acides organiques (dicarboxyliques ou sulfonique) avec de faibles additions d'acide sulfurique permettent d'obtenir des couches d'oxyde directement colorées dans la masse. Ces couches ont une structure très dense et une dureté nettement plus élevée que celles obtenues en milieu sulfurique. Ce qui leur confère une protection supplémentaire contre les agents atmosphériques

III.2.12 Contrôle des pièces anodisées.

Les méthodes de contrôle ont été normalisées au cours des années 1966 et 1967 par AFNOR. Elles se rapportent principalement aux mesures d'épaisseur des couches, au contrôle du colmatage et de la bonne tenue des colorants à la lumière.

III.2.12.1 Méthode destructive : Afin de contrôler l'épaisseur des couches il existe deux méthodes :

- par coupe micrographique : c'est la méthode de référence car elle donne une valeur exacte de l'épaisseur
- par dissolution et pesée : cette méthode nous donne une valeur de la masse de la couche et nous permet d'apprécier l'épaisseur moyenne de cette couche connaissant la surface ainsi que la densité de l'oxyde.

$$e = (M_2 - M_1) / \rho \cdot S \tag{III.3}$$

e: épaisseur de la couche d'alumine,
 M₁: masse de l'échantillon sans revêtement,
 M₂: masse de l'échantillon avec revêtement,
 ρ: masse volumique de la couche de revêtement,
 S: surface anodisée.

III.2.12.2 Méthode non destructive.

- A l'aide d'un microscope à coupe optique, cette méthode est facile et rapide à appliquer. Elle est très sollicitée dans les ateliers d'anodisation, mais reste difficile à réaliser sur chantier et est inapplicable sur des couches sombres ou élaborées sur des surfaces rugueuses,

- Par emploi de courant de Foucault, la méthode est facile à appliquer même sur chantier, mais nécessite un étalonnage de l'appareil avec l'alliage à étudier [35].

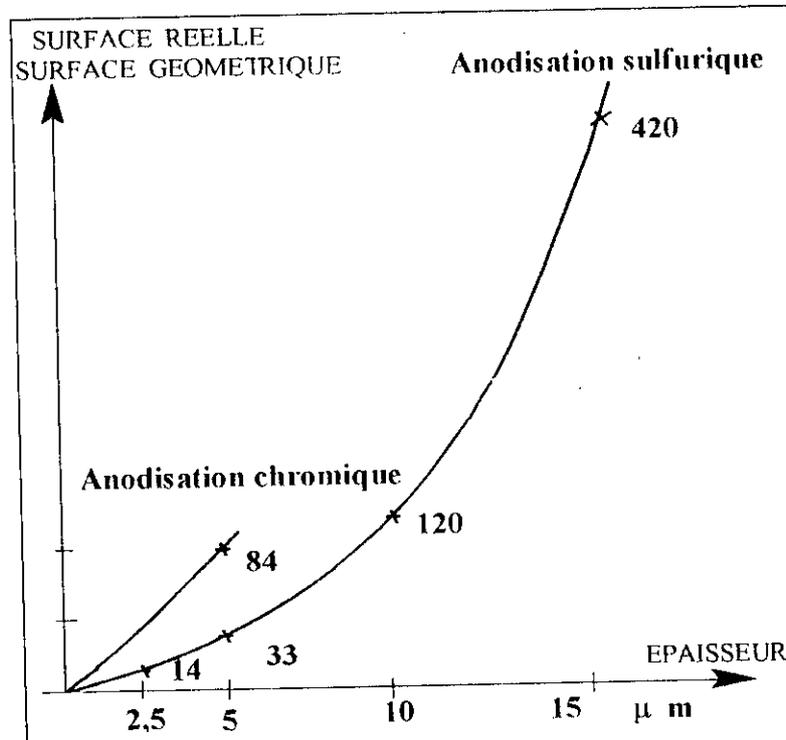


Figure III.7 : Surface spécifique des couches anodiques [2].

Les dimensions des cellules (épaisseur des parois), lors de la formation d'une couche d'oxyde, sont liées directement à la tension de l'électrolyse. Toute dérive dans les conditions d'anodisation modifie la structure de la couche dont les propriétés en sont affectées : dureté, porosité et, par conséquent, résistance à la corrosion, à la rayure et à l'environnement.

III.2.13 Autres procédés de revêtement.

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe d'autres procédés électrolytiques qui consistent à recouvrir la surface du métal par électrolyse d'une couche de métal insensible à l'action oxydante. Ces procédés donnent les meilleurs résultats pour une protection complète contre les oxydes alcalins, l'eau de mer etc... Les procédés les plus couramment utilisés sont :

- Le cuivrage : le bain est composé soit de sulfate de cuivre et de l'acide sulfurique, soit d'un mélange de cyanure de potassium, de sulfate de soude et de sulfate de cuivre. Les anodes sont en cuivre pur,

- Le nickelage : il se fait soit directement sur pièce préparée soit après cuivrage de la pièce utilisée comme couche intermédiaire. Les bains contiennent du sulfate de nickel d'ammonium et du chlorure de sodium. Les anodes sont en nickel pur,

- Le chromage : il a relativement au nickelage certains avantages. Il ne ternit pas, résiste à la chaleur et donne une surface dure. Le chromage donne un aspect blanc bleuté. Les bains sont à base d'acide chromique et d'acide sulfurique. Ils sont chauffés vers 50°C. Il est recommandé de déposer le chrome sur un dépôt intermédiaire de cuivre au lieu de nickel.

Les dépôts électrolytiques de chrome dur et du nickel permettent outre la protection contre la corrosion d'augmenter la résistance à l'usure, par "fretting" dans les assemblages soumis à vibrations.

- Le cadmiage : Le dépôt de cadmium est imperméable et a une inaltérabilité supérieure à celle du nickel.

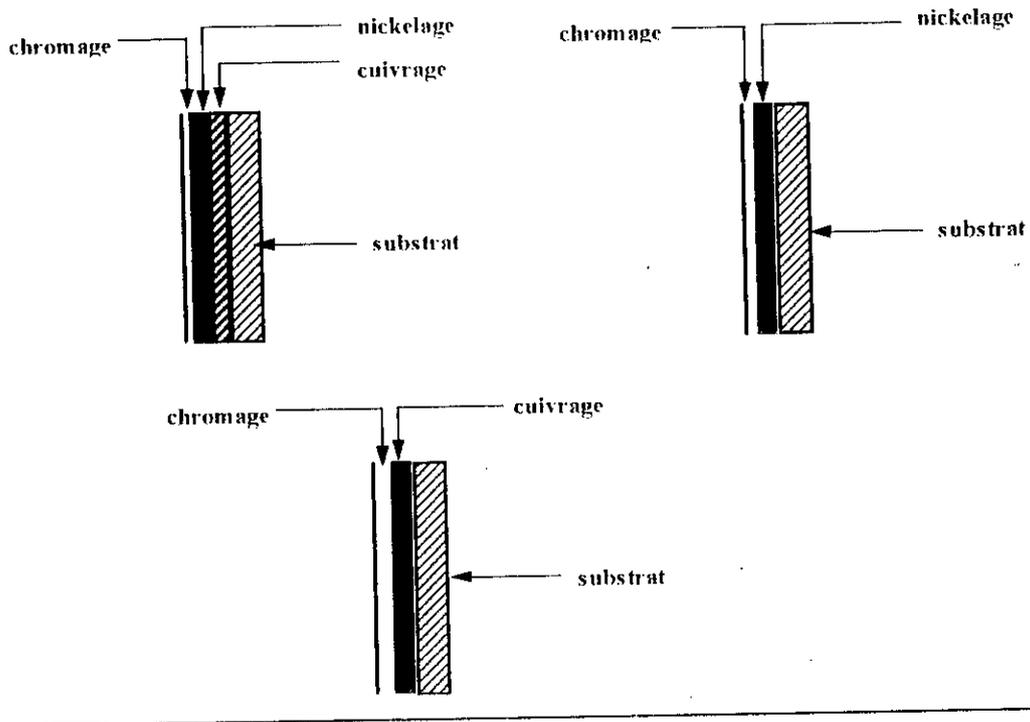


Figure III.8 : Utilisation de couches intermédiaires (dans notre cas le Cu et / ou le Ni).

L'anodisation permet d'augmenter l'épaisseur de la couche d'oxyde et de modifier sa structure. Les principaux buts poursuivis sont les suivants :

- augmenter la résistance à la corrosion,
- procurer une bonne isolation thermique,
- assurer une bonne isolation électrique,
- augmenter la résistance à l'abrasion,
- améliorer l'adhérence d'une peinture ou d'un vernis.

L'anodisation sulfurique, qui tire son nom de l'acide utilisé, est certainement le procédé d'anodisation le plus répandu. Le point important est de réaliser un équilibre judicieux entre la formation et la redissolution de l'oxyde. Les principaux paramètres intervenant dans cet équilibre sont :

- la concentration de l'acide sulfurique,
- la densité de courant,
- la température,
- le temps d'anodisation.

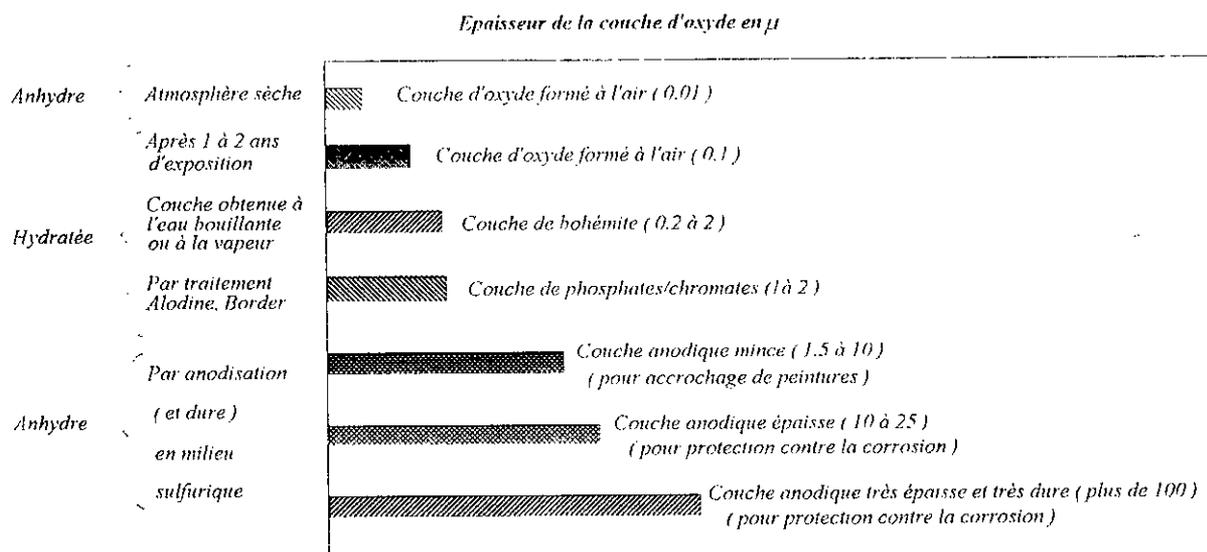


Figure III.8A : Tableau synoptique indiquant l'épaisseur des diverses couches d'oxyde se formant sur l'aluminium et ses alliages

L'anodisation dure a pour but essentiel de conférer aux surfaces traitées une meilleure résistance à l'usure et une meilleure aptitude au frottement. L'épaisseur du film sera généralement la suivante :

- 20 à 30 μ pour les pièces très fines, angles vifs, cannelures, dentures.
- 40 à 60 μ pour les cas usuels sans reprise d'usinage ultérieur.
- 60 à 80 μ pour les cas avec reprise d'usinage ultérieur par rectification, rodage ou polissage.
- 200 à 250 μ pour les réparations de côtes.

III.3 ANODISATION DURE.

TOMASHOV [1] a montré qu'en refroidissant l'électrolyte à l'acide sulfurique et en ralentissant ainsi la vitesse de dissolution de l'oxyde, on pouvait obtenir de couches allant jusqu'à 0.25 mm avec une perte de métal d'environ 3 mg/cm². Il a aussi montré que ces couches présentaient une excellente résistance à l'usure et une excellente isolation de la chaleur.

TOMASHOV a travaillé avec une solution d'acide sulfurique à 20% à une température de 1 à 3 °C et avec 20 à 50 mA/cm² en 4 heures]. Il a obtenu des couches d'oxyde de 0,2 mm sur l'aluminium, en augmentant progressivement le voltage de 23 à 120 volts à mesure que l'épaisseur augmentait.

L'épaisseur limite du film est atteinte quand la vitesse de dissolution chimique du film dans l'électrolyte, qui augmente proportionnellement à la zone exposée des pores de surfaces, est égale à la vitesse de croissance du film qui diminue à mesure que la résistance ohmique du film augmente et par l'effet de réaction secondaire.

Nous pouvons aussi augmenter l'épaisseur limite en abaissant la température, en diminuant la concentration de l'acide, le voltage et en augmentant la densité de courant. Le refroidissement de la solution est le principal facteur de production de couches épaisses.

L'anodisation dure a rendu possible l'emploi d'alliages d'Aluminium dans des éléments de construction tels que : piston, cylindre, des manchons de cylindres et l'équipement hydraulique dans lesquels une surface dure et résistante à l'usure est indispensable.

Ce procédé a pour but essentiel de conférer aux surfaces traitées une meilleure résistance à l'usure et une meilleure aptitude au frottement [26].

La majorité de ces traitements, utilisent un courant continu mais certains utilisent un courant périodique ou alternatif superposé à un courant continu. Le procédé DURKALU permet de traiter d'une manière très faible tous les alliages y compris ceux contenant du cuivre (2014, 2017, 2024 ou (A-U4G)...))

III.3.1 Prétraitement.

La préparation de la surface avant l'anodisation comprend essentiellement un dégraissage et un décapage acide nitrique.

III.3.2 Procédé en courant continu.

L'un des procédés d'anodisation dure les plus connus est le procédé MHC exploité par la Glenn L. Martin CO [1]. Ce procédé utilise un électrolyte d'acide sulfurique à 15% employé avec 20 à 25 mA/cm² et à une température de 0°C.

Pour maintenir cette densité de courant, le voltage initial de 20 à 30 volts est augmenté jusqu'à 40 à 60 volts.

L'épaisseur du film est proportionnelle à la durée d'anodisation.

Ce procédé convient particulièrement à la production de couches épaisses. Mais les inconvénients des procédés à courant continu ont tendance à brûler, à moins que l'anode ne soit pourvue d'une agitation efficace.

Notons qu'il est difficile ou impossible de traiter par ces procédés les alliages contenant plus que 3% de Cu ou de 7.5% de Si.

Pour une solution d'acide sulfurique à 10% (vol), une température comprise entre -5 et 5°C contrôlé à 2°C près.

- Une densité de courant de 25 à 100 milliampères/cm²
- Un voltage de 40 à 120 volts,
- Nous utiliserons une eau déminéralisée,
- La teneur en NaCl doit être maintenue en dessous de 0,20g/l.

III.3.3 Procédé en courant alternatif superposé au courant continu.

Le procédé d'anodisation dure utilisant le courant alternatif superposé au courant continu en utilisant comme électrolyte de l'acide oxalique augmentait l'épaisseur du film. Industriellement, cette technique est connue sous le nom de procédé "HARDAS".

III.3.4 Refroidissement et agitation.

Comme tous les procédés d'anodisation dure sont utilisés à basse température, le refroidissement est d'une grande importance avec les courants et voltages élevés qui sont employés.

Exemple : pour le refroidissement d'une cuve travaillant pour 2 100 litres environ d'acide sulfurique à 20%, deux serpentins sont placés dans la cuve revêtue d'une couche de cuivre pour supprimer les 302,400Kcal/h et pour refroidir la solution de 82 °C à 10°C en 32 minutes en employant le "Fréon 12" comme réfrigérant [1].

Comme il y a beaucoup de chaleur produite à l'intérieur de la couche anodique elle-même, il est nécessaire d'assurer une agitation efficace pour maintenir la pièce (objet) à la température désirée.

III.3.5 Equipement nécessaire.

Un générateur de courant continu d'un redresseur assurant automatiquement une densité de courant constante. Il faut plusieurs circuits pour fournir les courants alternatifs et continus superposés (utilisé dans le procédé HARDAS)

III.3.6 Fixage de la couche.

Après l'anodisation, les pièces sont soigneusement rincées et fixées dans l'eau distillée bouillante, une solution de bichromate à 5%, de l'huile ou de la cire à assécher (80°C, 15 à 30 mn). Le fixage au bichromate, améliore les propriétés de fatigue, diminue dans certaines mesures la résistance à l'abrasion et les propriétés isolantes.

III.3.7 Propriétés des couches d'anodisation dure

- Tous les alliages montrent une croissance uniforme jusqu'à environ la moitié de l'épaisseur de la couche,
- La couleur des revêtements dépend des alliages et de l'épaisseur,
- L'épaisseur des couches est déterminée par la méthode destructive : dissolution du revêtement.

Dans cette méthode, on pèse avec précision un échantillon revêtu de surface connue. On enlève le revêtement dans une solution en ébullition, soit de 200 g/l d'acide chromique et 20 cm/l d'acide phosphorique (d = 1,7), soit 20 g/l (qualité pour analyse) + 35 g/l d'acide phosphorique (d= 1,75) jusqu'à un poids constant (≈ 10 mn)

L'échantillon est pesé à nouveau, la différence de poids qui correspond au poids du revêtement permet de calculer l'épaisseur par la formule :

$$T = (400W) / ad \quad \text{(III.4)}$$

- T: L'épaisseur en mm.
- W: Le poids du revêtement en g
- a: La surface du revêtement cm².
- d: Densité du revêtement.

III.3.8 Résistance à la corrosion.

En général, il n'y a pas moins de protection donnée par l'anodisation "dure" que par l'anodisation normale. Il ne faut pas croire que les couches plus épaisses donneront une meilleure protection, car dans les couches épaisses la tendance au craquellement diminue sans aucun doute de la résistance à la corrosion en jouant le rôle de capillaires pour l'entrée de l'humidité. Cela dit, nous pouvons obtenir une bonne résistance à l'usure en utilisant un colmatage partiel du film anodique.

III.3.9 Résistance à l'usure.

L'aluminium est un métal mou qui frotte mal sur d'autres matériaux, l'anodisation dure, en réalisant un film d'alumine compact et épais est le procédé le plus performant concernant la résistance à l'usure.

Dans la pratique un test de dureté est réalisé en frottant la surface deux ou trois fois au papier ou à la toile d'émeri fine du degré 00. Si la couche est satisfaisante, le papier doit patiner sur la surface et ne doit surtout pas éroder la couche, il ne doit rester qu'une légère trace blanche sur l'émeri.

III.4 PROJECTION THERMIQUE.

III.4.1 Introduction.

En 1909, le Docteur **SHOOP** observa l'incrustation du plomb suite au tir d'une balle contre un mur en ciment. Ce dernier essaya de reproduire le même phénomène en projetant du plomb fondu avec un vaporisateur, puis en projetant du plomb en poudre à travers une flamme [5].

En 1914, il se tourne vers la projection du métal en fil. A titre d'exemple, nous citons les deux applications de cette technique :

- Pendant la guerre de 1914, la projection d'étain sur la face arrières des obus de 75 a permis le désencuvrage systématique, coup par coup, des canons de 75.

- A la fin de la première guerre (1914 / 1918), le succès de la vente des bustes d'Alsaciennes a conduit au shoopage en bronze des bustes montés en plâtre.

III.4.2 Principe de la projection thermique.

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt où les particules solides sont injectées dans un gaz à haute température, elles y sont chauffées, fondues, accélérées et projetées à grande vitesse sur le substrat où elles forment un dépôt de gouttelettes étalées.

Les principales caractéristiques de ces techniques sont les suivantes :

- Le processus est dit « froid », c'est à dire que le substrat est chauffé à des températures très inférieures à celles atteintes par les particules projetées. Les particules subissent des transformations physiques, elles sont fondues puis refroidies avec des vitesses de refroidissement élevées. Le revêtement est construit particule par particule et a une structure lamellaire (figure III.9).

- Les propriétés du revêtement dépendent des matériaux de départ, des microstructures obtenues, des contraintes résiduelles produites lors de la projection et de la porosité du dépôt. Cependant, le système revêtement / substrat est un matériau composite dont les propriétés dépendent aussi de la structure et des propriétés des interfaces présentes.

Notons enfin que les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse définie comme suit :

- 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz,

- 300 m/s pour les pistolets à plasma d'arc.

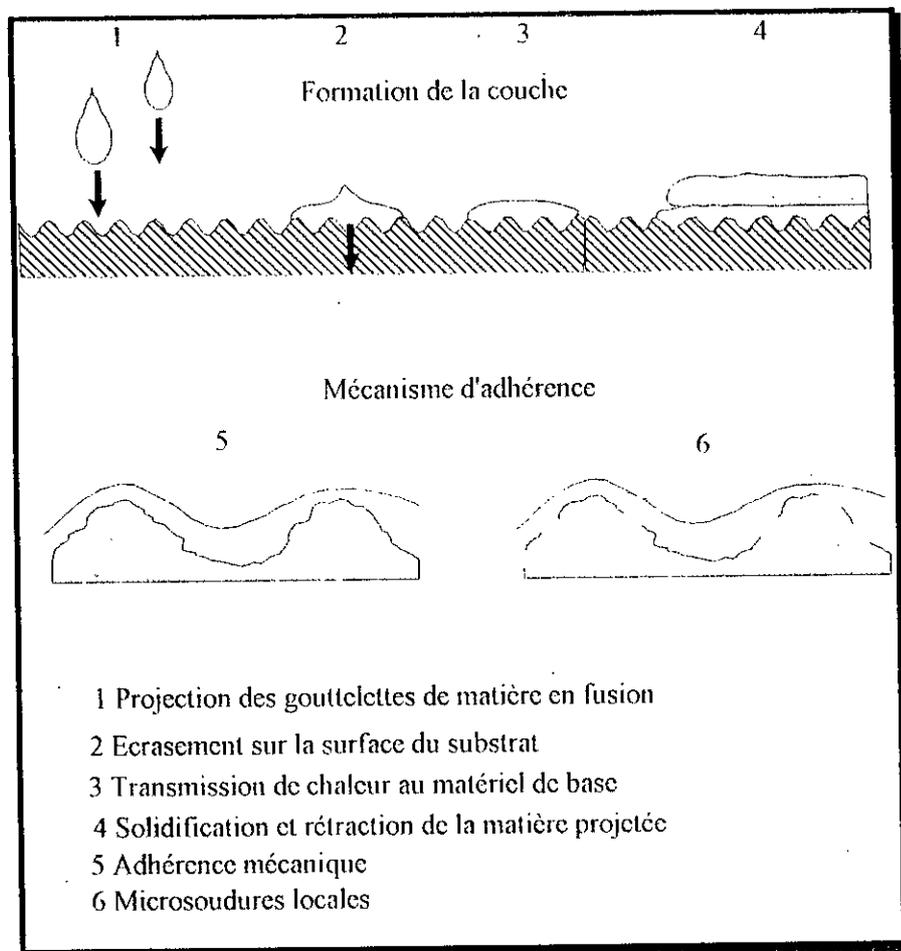


Figure III.9 : Séquence du procédé de projection thermique [5].

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée flamme ou arc électrique.

III.4.2.1 Projection thermique à la flamme.

On distingue trois types de pistolets à flamme.

a) Pistolets à poudre : Le matériau à projeter est introduit, soit sous forme de baguettes, soit sous forme de poudres dans la flamme d'un chalumeau. Cette technique a été utilisée pour la première fois par le Dr **SHOOP** en 1910. Les gaz les plus couramment utilisés sont des mélanges hydrogène - oxygène, cyanogène - oxygène et surtout acétylène - oxygène, qui donnent des flammes à des températures de 2660°C, 4700°C et 3000°C respectivement. Ce paramètre température limite la projection de certains matériaux. Dans le cas de projection à partir de poudres, ces dernières peuvent être introduites dans la flamme soit par gravité, soit par mise en suspension préalable dans l'un des gaz ou encore par mise en suspension dans un courant d'air additionnel (figure III.10).

L'avantage de cette technique par rapport aux autres procédés de projection est son faible prix de revient et sa facilité de mise en œuvre. La présence de porosités importantes dans le dépôt, dues à la faible énergie cinétique des particules et à la faible vitesse d'éjection des gaz, limite l'utilisation de cette technique dans certains domaines.

b) Pistolets à fils : La disponibilité de ce genre d'appareils au niveau de la société "Algérie Métallisation" nous permettra de réaliser tous les échantillons. Ils feront l'objet de plus de détails ultérieurement.

c) Pistolets à détonation : Ce pistolet est monté sur une installation automatique et permet de projeter les matériaux à des vitesses nettement supérieures à celles des pistolets précédents. La projection s'effectue de façon discontinue en utilisant l'énergie d'onde résultant d'un mélange gazeux oxy-acétylénique.

Cette technique de projection consiste à introduire la poudre à projeter et les gaz oxygène-acétylène dans un tube appelé "canon" de 25 mm de diamètre et de 1 m de longueur et d'allumer le mélange au moyen d'une étincelle.

Cette opération est répétée environ 8 fois par seconde. Entre chaque allumage, un balayage est pratiqué avec un gaz neutre (Azote). Ce pistolet est un de ceux qui donnent les meilleurs revêtements du point de vue porosité et adhérence des dépôts[44].

Les matériaux les plus souvent utilisés, sont des carbures de chrome plus nickel-chrome, du carbure de chrome, du carbure de tungstène plus cobalt, de l'alumine etc.. (figure III.11).

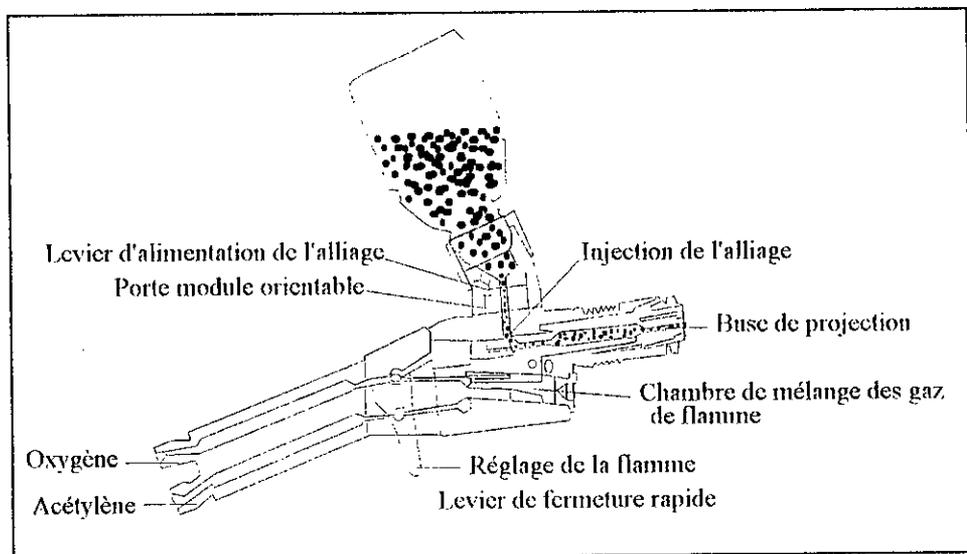


Figure III.10 : Alimentation du pistolet à poudre par gravité [5].

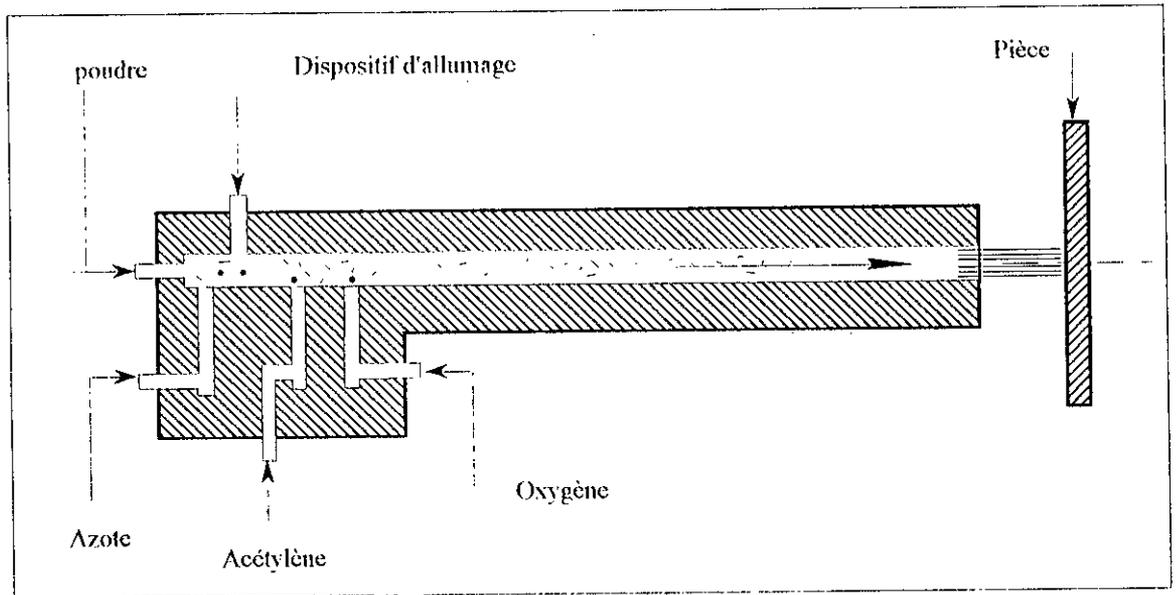


Figure III.11 : Pistolet à détonation [5].

III.4.2.2 Projection thermique à l'arc électrique.

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédés. On trouve deux familles de matériels qui utilisent cette énergie :

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils,
- Le pistolet à plasma.

a) Pistolet à arc électrique entre deux fils : Son principe consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, le métal fondu dans l'arc étant ensuite projeté sur le support à revêtir par un jet d'air comprimé.

Ce pistolet est alimenté par des générateurs de courant continu. Les tensions à l'arc sont comprises entre 25 et 40 V et les intensités entre 100 et 400 A pour des fils de 1.5 à 2 mm de diamètre. L'air comprimé nécessaire à la projection doit être propre et sec, et avoir un débit d'environ 25 m³/h pour une pression d'utilisation de 5 bars. Ces pistolets sont constitués de deux parties, d'ailleurs comme les pistolets fils - flamme, une partie pour l'entraînement des fils et une partie pour la fusion et la propulsion du métal d'apport.

La partie entraînement est décrite dans le précédent paragraphe. Les fils sont connectés aux polarités des générateurs par des tubes contact. L'écartement des fils au niveau de l'arc électrique est tenu constant pour éviter les fluctuations de l'arc, qui font varier la dimension des particules projetées. Une console de contrôle permet d'assurer le suivi des paramètres de projection.

Ce pistolet permet de projeter des quantités de métal plus importantes comparativement aux pistolets fils-flamme. Les principaux métaux d'apport projetés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre et certains aciers à 0.2%C.

b) Pistolet à plasma: Le procédé de projection au plasma, utilise comme source thermique un arc électrique éclatant dans une buse. Cet arc porte un flux de gaz inerte (très souvent de l'argon, de l'azote ou de l'hélium) à une température très élevée. Il se présente des températures de l'ordre de 20 000 °C conduisant ainsi à la fission des gaz moléculaires et à l'ionisation partielle des atomes. Ces hautes températures provoquent une forte augmentation du volume du gaz qui s'échappe de la buse élevée. La vitesse d'écoulement du jet de plasma des installations modernes de projection atteint plusieurs fois la vitesse du son. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie qu'on injecte, au moyen d'un gaz porteur, la matière de revêtement pulvérulente. Les particules fondent et sont projetées sur le matériau de base prétraité. Ce procédé au plasma permet de réaliser des revêtements d'excellente qualité en utilisant comme matériau de projection presque toutes les matières fusibles qui ne se désintègrent pas et dans la granulométrie (configuration, taille, répartition de la granulométrie) est adéquate. La projection au plasma a acquis une grande importance, tant sur le plan technique qu'économique, comme système permettant la réalisation des surfaces fonctionnelles [45] (figure III.12).

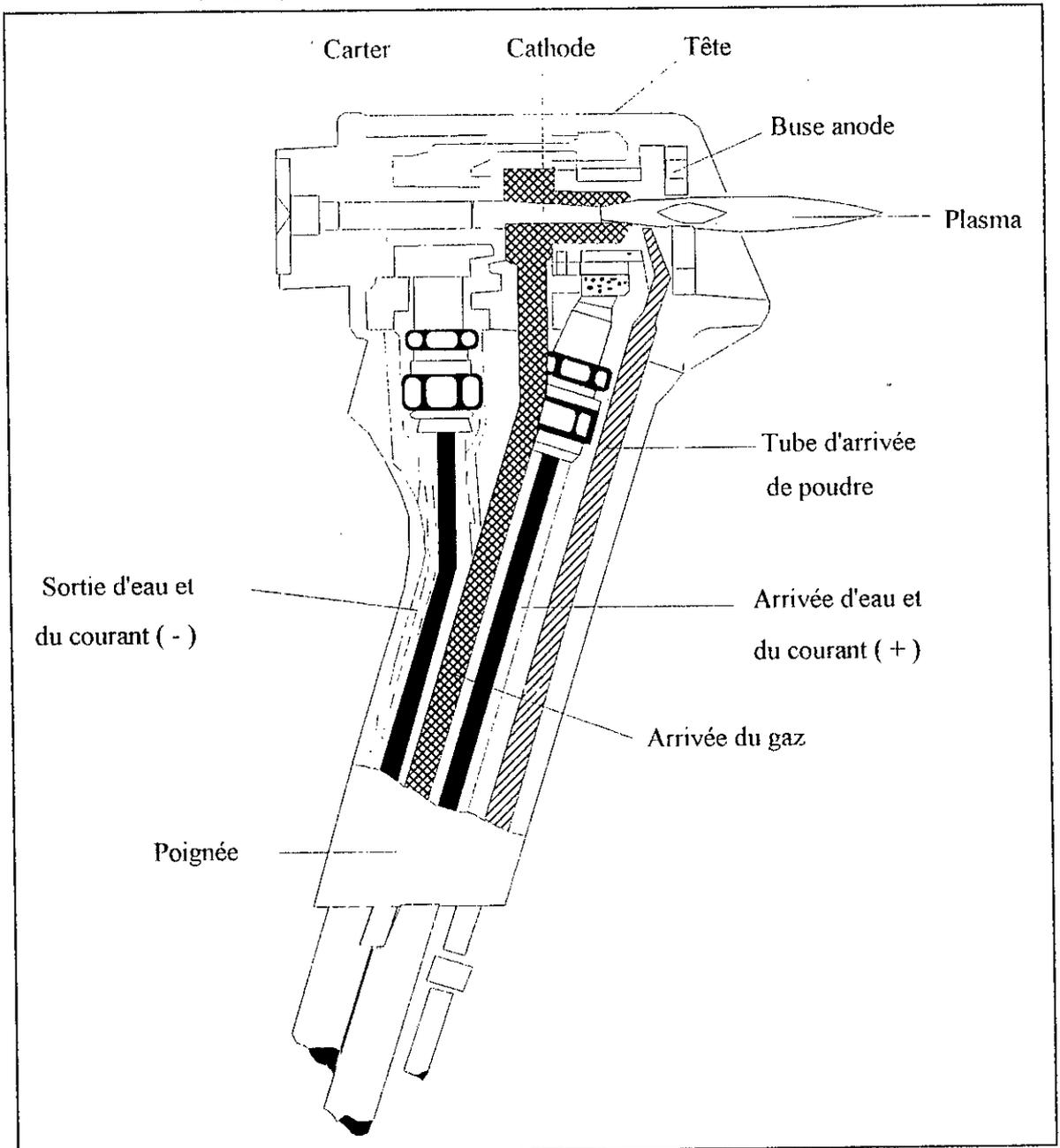


Figure III.12 : Pistolet Plasma [5].

III.4.3 Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés.

III.4.3.1 Matériaux utilisés : Les matériaux utilisés lors de la projection thermique sont très nombreux et leur nombre augmente en fonction de nouvelles applications.

Nous pouvons les classer de la façon suivante :

- les aciers,
- les alliages métalliques à base de cobalt, cuivre, nickel, zinc,
- les nitrures, les carbures et les oxydes,
- les alliages MCRALY (M = Ni, Co, Fe ou une combinaison de deux ou trois d'entre-eux, Cr = chrome, Al = aluminium, Y = yttrium),
- les matières plastiques (polyamide, polyéthylène ...).

Ces différents matériaux ne se présentent pas tous sous la même forme car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également des procédés employés pour les projeter.

Les principales formes commercialisées sont :

- les fils nus massifs ou les fils fourrés,
- les poudres,
- les cordons,
- les baguettes.

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flamme et arc. Ils sont largement diffusés dans les catégories métaux purs et les aciers. Ces types de produits sont définis par le diamètre et leurs compositions.

Les poudres quant à elles, sont tenues à répondre à des critères plus nombreux que les fils.

- composition.
- dimensions des particules et leur répartition granulométrique.
- formes des particules : sphériques, lamellaires, cubiques...
- type d'élaboration : électrofondues, frittées, agglomérées, mélangées, enrobées, composites
- coulabilité.
- densité : tassée ou non tassée

Les poudres sont employées aussi bien pour les techniques flamme que pour les plasmas.

Les cordons permettent de conditionner les matériaux non tréfilables et d'obtenir un produit continu pouvant alimenter des pistolets à fils. Ces types de produits sont définis par leur composition et leur diamètre.

Par contre les baguettes, obtenues par frittage, permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de façon discontinue des pistolets à fils.

Tous ces produits sont utilisés suivant leur besoin et leur type de projection thermique [44-45].

III.4.3.2 caractéristiques des matériaux projetés [46-52].

Les caractéristiques essentielles des matériaux projetés sont :

- la structure
- l'adhérence
- la densité
- la dureté

a) Structure : Lors du contact avec le substrat, les particules sphériques, grâce à leur énergie cinétique élevée, se déforment en forme de cylindre. Le temps de déformation sphère-cylindre a été estimé par **Kudinov** à 10^{-10} - 10^{-5} . Cette déformation a été modélisée par **Madesjski** par la formule suivante, obtenue en négligeant les tensions de surface et en supposant que la goutte liquide s'aplatit avant de se solidifier [44].

$$\frac{D}{d} = \frac{\rho v d^{0.2}}{\mu} \quad (\text{III.5})$$

où ρ : densité du liquide
 μ : viscosité du liquide
 v : vitesse d'impact de la particule.

Pour réaliser la fusion des particules dans le jet de gaz chaud, il faut prendre en compte de nombreuses variables du matériau tels que le coefficient de transfert thermique, la conductivité thermique et la température de fusion.

Les valeurs ont été combinées dans une équation de conduction thermique et de dynamique de gaz pour donner l'équation suivante.

$$\frac{S(K\Delta T)^2}{v \cdot \mu} \geq \frac{(LD)^2}{16\rho} \quad (\text{III.6})$$

où **S**: distance de projection
K: conductivité thermique de la couche
v: vitesse du jet de gaz
 ΔT : gradient de température de la couche
 μ : viscosité de jet de gaz
L: capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion.
D: diamètre moyen de la particule.
 ρ : densité de la particule

D'après l'équation précédente [III.6] le temps de séjour de la particule est déterminé par la vitesse des gaz, l'énergie (conductivité thermique) et la distance de projection.

Nous constatons par ces essais de modélisation que suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts peuvent changer. Nous pouvons facilement vérifier la bonne fusion de la particule en plaçant une lame de verre devant le jet afin d'examiner la façon dont la particule s'est écrasée.

b) Adhérence : Les dépôts projetés adhèrent aux substrats par un phénomène mécanique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir. La particule en fusion épouse plus en moins bien les rugosités du substrat. Néanmoins, en général, l'accrochage du dépôt est seulement mécanique et, suivant les matériaux projetés et les paramètres de projection, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa.

Pour les matériaux comme les oxydes métalliques dont l'adhérence est faible, et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochages connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'aluminate de nickel, le molybdène ou l'alliage 80 Ni - 20 Cr.

c) Densité : les dépôts projetés sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection.

Les dépôts d'aluminium peuvent avoir, suivant la vitesse du dépôt et la température, une porosité de l'ordre de 25 % dans le cas de la projection flamme et de 5% dans le cas de la projection plasma. La densité des dépôts projetés est fonction de la porosité, et sa valeur varie entre 5 et 25 % au dessous de la densité théorique du produit.

d) Dureté : les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées et liées entre elles. Ceci se traduit en général par une dureté sans rapport avec la dureté de chacune des particules, mais représentatives de la compacité du dépôt. La dureté des dépôts obtenus dépend toujours des paramètres de projection.

Notons que les autres caractéristiques que doivent avoir les poudres projetées sont :

- la résistance à l'usure,
- le coefficient de frottement,
- les caractéristiques électriques,
- les caractéristiques thermiques.

III.4.4 Préparation des surfaces.

III.4.4.1. Généralités : la préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à une bonne adhérence des dépôts. Elle est destinée principalement à mettre en condition de réception la couche superficielle des solides. Le but le plus important de cette mise en condition est d'éliminer de la surface tous les corps étrangers qui peuvent le recouvrir (solide ou liquide) et aussi de dissoudre ou de détacher les composés chimiques présents (couche d'oxyde ou autres composés du métal).

L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi intime que possible entre la surface à recouvrir et le revêtement à exécuter ou de conduire à une surface suffisamment active chimiquement pour faciliter les réactions.

La préparation de surface proprement dite a pour but de :

- nettoyer la pièce,
- créer un relief favorisant l'adhérence mécanique du dépôt.

III.4.2.2 Propriétés de la surface : les pièces destinées à être revêtues doivent être propres et débarrassées de graisses, huiles et peintures. Si les pièces sont poreuses, il est nécessaire de diluer les matières contaminantes présentes dans les porosités avec les diluants appropriés, pour éviter que l'échauffement du substrat, dû à la projection ne fasse remonter les matières contaminantes à la surface et nuisent à l'adhérence du dépôt.

Les dégraissages sont effectués, le plus souvent, en utilisant des vapeurs de solvants dans lesquelles les pièces doivent séjourner de 15 à 30 minutes.

Si les pièces à traiter ne sont pas poreuses, un décapage humide peut être employé. Ce procédé utilise des abrasifs du type oxyde d'aluminium (de granulométrie de 200 à 500 μm) mélangées à de l'eau. Les additifs du type inhibiteur de rouille peuvent être ajoutés. Ce décapage est destiné principalement à éliminer des surfaces, les produits corrosifs des matériaux déposés antérieurement ou rugosifier les surfaces destinées à être revêtues. Les pièces ainsi traitées doivent être rincées et séchées [44-45] et [49].

III.4.4.3 Rugosité : après nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité en surface de la pièce à revêtir, afin de permettre aux particules en fusion d'épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Cette ultime préparation doit être faite pour la bonne tenue des dépôts. Cette géométrie de surface peut être obtenue par :

- Traitement par impact,
- Préparation mécanique des surfaces suivi d'un traitement par impact.

Le choix de la technique de préparation dépend de la nature du revêtement et de son épaisseur.

a) Traitement par impact : Il permet de préparer la surface par projection d'abrasif. Celui-ci doit être à angle vif. Ce traitement nettoie la pièce et crée une certaine rugosité de la surface. Dans cette phase du traitement, les paramètres de projection de l'abrasif doivent être contrôlés. En particulier, l'orientation du jet qui doit être compris entre 30 et 60° par rapport à la normale. L'abrasif doit être maintenu propre et sa granulométrie contrôlée. En outre, pour des emplois spécifiques, la quantité d'abrasif doit être vérifiée.

b) Préparation mécanique des surfaces : cette technique consiste à effectuer un usinage permettant de:

- Diminuer la dimension des pièces afin de laisser une épaisseur suffisante pour le dépôt sans cependant nuire à la résistance de celle-ci,
- Augmenter les surfaces d'accrochage,
- Dans le cas de réparation, cette technique permet de corriger le profil.

III.4.5. Paramètres de projection [44-45].

Les principaux paramètres à prendre en compte lors de la projection thermique sont les débits des fluides, la vitesse de distribution des matériaux à projeter, la distance de tir et l'angle d'incidence.

a) Débits des fluides : ceux-ci ont une influence importante sur les caractéristiques des dépôts. Les compositions préconisées des mélanges oxy-gaz doivent également être rigoureusement respectées conformément aux abaques. Dans la plupart des cas, les mélanges sont très près de la stoechiométrie en favorisant légèrement, soit l'oxygène, soit le gaz en fonction du produit et des caractéristiques des dépôts à obtenir.

b) Vitesse de distribution des matériaux à projeter : les matériaux à projeter se présentent sous différentes formes (fils, poudres, cordons ou baguettes). Dans tous les cas, l'injection de ces produits dans la flamme se fait en fonction de la puissance du chalumeau, de la nature des produits et des caractéristiques souhaitées du dépôt.

c) **Distance de tir** : ce paramètre varie de 60 à 250 mm. Suivant le mode de projection employé, la fusion des particules et leur vitesse changent. En règle générale, la distance de projection joue un rôle dans les caractéristiques des dépôts telles que porosité, adhérence, cohésion etc...

d) **Angle d'incidence** : la projection sur un substrat est généralement réalisée avec un angle d'incidence de 90° . Dans ce cas, le dépôt s'accroche normalement et est homogène. Si cet angle de projection est inférieur à 45° , la porosité du dépôt augmente ainsi que la cohésion entre les particules.

III.5 CONCLUSION DU CHAPITRE.

Ce chapitre traite directement des traitements de surface appropriés à savoir l'anodisation, l'anodisation dure et la projection thermique sans pour autant omettre l'importance qu'il y a lieu d'accorder à la préparation des surfaces et aux paramètres de choix d'une protection.

CHAPITRE IV

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

IV.1 MATERIAUX ET EQUIPEMENTS UTILISES.

IV.1.1 Alliages d'aluminium.

Nous avons utilisé comme substrat l'alliage d'aluminium A-U4G. C'est le matériau aéronautique par excellence tant ses propriétés indéniables sont recherchées dans ce domaine. Il reste toujours présent dans l'aéronautique et l'espace malgré la grande révolution des nouveaux matériaux tels les matériaux composites, les alliages d'aluminium au lithium...

L'analyse spectrale d'un échantillon de cet alliage sur l'appareil D.V.4 /E.R.M.Aéro, nous a donné la composition chimique suivante :

Eléments	Al	Cu	Mg	Si	Mn
Composition (%)	Reste	4	0,7	0,5	0,5

Tableau IV.1 : Analyse spectrale du substrat A-U4G.

Après traitement thermique de trempe à l'eau froide à la température de 480 à 500°C et un revenu (ou maturation) à la température ambiante, l'A-U4G présente les caractéristiques suivantes :

Re (Mpa)	R (Mpa)	A%	HB
430	270	14	130

Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'A-U4G traité.

IV.1.2 Traitements de surface par anodisation.

IV.1.2.1 Introduction.

Le traitement de protection par anodisation à l'acide sulfurique est le plus utilisé. Comme précédemment, la préparation des surfaces à revêtir reste un paramètre primordial dans l'obtention d'un traitement de surface de qualité. Les échantillons à base de l'A-U4G, dont la forme et les dimensions sont données par la figure IV.4

IV.1.2.2 Dégraissage :

C'est le nettoyage aux solvants. Nous avons utilisé le trichloréthylène en vapeur. Sous cette forme, le résultat de l'opération est meilleur.

IV.1.2.3 Décapage chimique :

C'est la dissolution du métal où l'aspect de la surface change. Pour cette opération, nous avons traité nos échantillons dans un bain de soude caustique en paillettes de 3 à 10% en concentration et à la température d'environ 70°C.

Afin d'obtenir des surfaces aptes d'une part à recevoir un traitement de protection de qualité et d'autre part à faciliter les caractérisations, des opérations préliminaires particulières sont souvent effectuées. Il s'agit du *Polissage (ou brillantage)* qui permet de rendre la surface lisse et brillante. Dans notre cas, nous avons directement utilisé des tampons puis des feutres car les surfaces initiales n'étaient pas trop rugueuses.

IV.1.2.4 Traitement d'anodisation :

Nous avons effectué l'anodisation (un traitement de finition) à l'acide sulfurique sous les conditions suivantes :

- concentration H ₂ SO ₄	180 à 200 g/l
- température	16 à 24°C
- densité de courant	1,2 à 1,8 A/dm ²
- temps	20 à 60 mn

IV.1.2.5 Coloration :

C'est l'imprégnation des couches d'oxyde. Cette opération nous permet de donner un bon aspect de couleur et de décoration. Nous avons réalisé des échantillons sous différentes couleurs.

IV.1.2.6 Colmatage :

C'est une opération presque obligatoire qui a pour but d'hydrater le film d'oxyde anhydre produit par l'anodisation et d'atteindre ainsi le maximum de la résistance à la corrosion. Dans notre cas, nous avons trempé nos échantillons dans de l'eau bouillante déminéralisée.

Le tableau IV.3 illustre l'ensemble des opérations que nous avons réalisées dans le cas de ce traitement de surface.

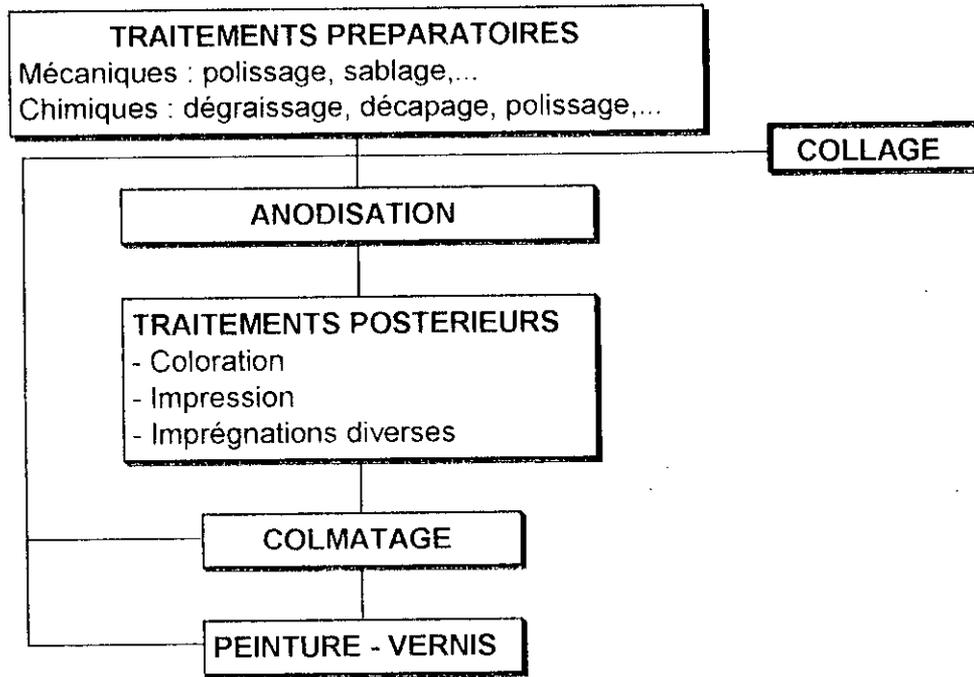


Tableau IV.3 : Les différentes opérations effectuées pour la réalisation du traitement d'anodisation

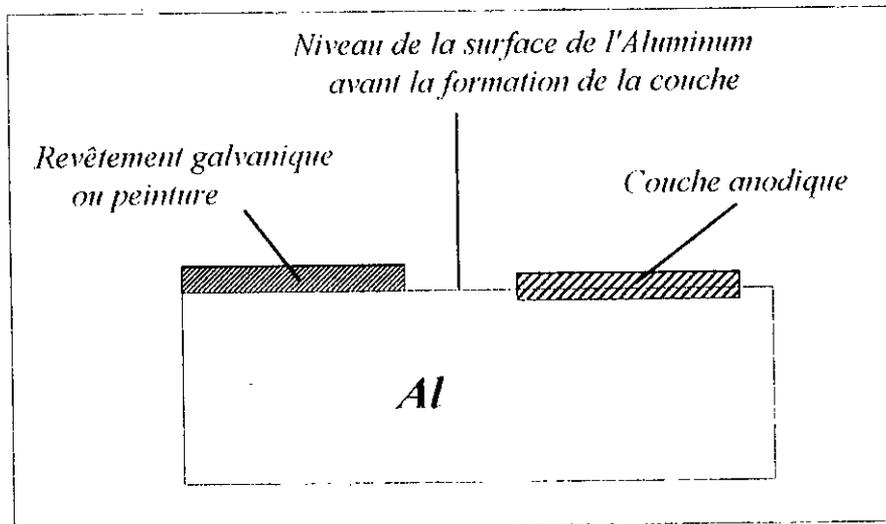


Figure IV.1 : Différence entre un enduit et une couche d'oxyde par rapport à la surface à protéger.

La figure IV.1 schématise clairement le positionnement du traitement d'anodisation par rapport à un autre revêtement notamment les traitements de dépôts ou de peintures.

IV.1.3 Revêtement par projection thermique:

IV.1.3.1 Sous-couches d'accrochage.

La sous-couche d'accrochage a pour objectif principal de faire la jonction complète entre le dépôt et le substrat. C'est un paramètre d'une importance primordiale dans l'amélioration de l'adhérence du dépôt au substrat surtout connaissant les différents alliages d'aluminium qui présentent même naturellement une couche d'oxyde (Al_2O_3) faisant écran et barrière à toute tentative de suppression. Cette sous-couche doit être déposée sur une faible épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,2mm. Dans notre cas précis, on a utilisé la nuance **75 E** qui est un alliage Ni-Al.

IV.1.3.2 Dépôts.

Nous avons réalisé des revêtements composites par projection thermique simultanée de deux fils en acier de nuances respectives **55E** (acier au chrome – molybdène), et **65E** (acier inoxydable 18/5) sur une épaisseur d'environ un (1) mm. Des dépôts combinés avec les nuances **80 E** et **Thermanit** ont aussi été réalisés.

Les résultats détaillés des analyses des différents matériaux de projection sont donnés aux annexes et résumés dans le tableau suivant :

	%C	%Fe	%Cr	%Mn	%Ni	%Al	%Si	%Cu	%Sn
55 E	0,12	65,9	18,4	8,3	5,5	0,51	0,38		
65 E	1,05	89,4	1,84	1,53				5,9	
80 E	0,045	69,9	18	1,17	9,2		0,6		
Cuivre						0,14	0,48	98,2	
Bronze							0,39	91,2	7,5
Thermanit	0,132	66,6	18,5	8,1	5,5				

Tableau IV.4 : Résultats d'analyse des matériaux déposés.

IV.1.3.3 : Pistolet de projection.

C'est un appareil portatif qui présente une souplesse et une manipulation tant mécanique que manuelle des plus remarquable suite à une conception et un développement appropriés. D'origine anglaise, le THERMO-SPRAY 234 utilise l'arc électrique comme source d'énergie [49-50]. C'est un pistolet à fils.

Si, dans le cas des pistolets à poudre, la vitesse initiale des particules est fournie par les gaz utilisés pour fondre les particules. Dans le cas des pistolets à fils, le mélange des fluides comburant / combustible sert uniquement à fondre les matériaux à projeter. Une fois fondu, le matériau est pris en charge et projeté par un violent courant d'air comprimé [45].

Ces pistolets se composent de deux parties : Une partie chalumeau, une partie entraînement de fil. Ils utilisent les mêmes gaz que les pistolets à poudre : oxygène mélangé à de l'acétylène, du propane plus de l'air comprimé à des pressions comprises entre 3 et 5.5 bars.

La partie entraînement du fil peut être effectuée de trois manières :

- entraînement par un système à turbine
- entraînement par un moteur à air comprimé
- entraînement par un moteur électrique

Dans tous les cas, un mouvement de rotation est communiqué à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la base à gaz du chalumeau. Ces pistolets projettent, pratiquement tous les matériaux tréfilables, métaux, alliages ainsi que les matériaux céramiques sous formes de baguettes ou de cordons.

Les matériaux les plus utilisés sont des matériaux anticorrosion : Zinc, Aluminium ou alliage zinc-Aluminium (figure IV.2).

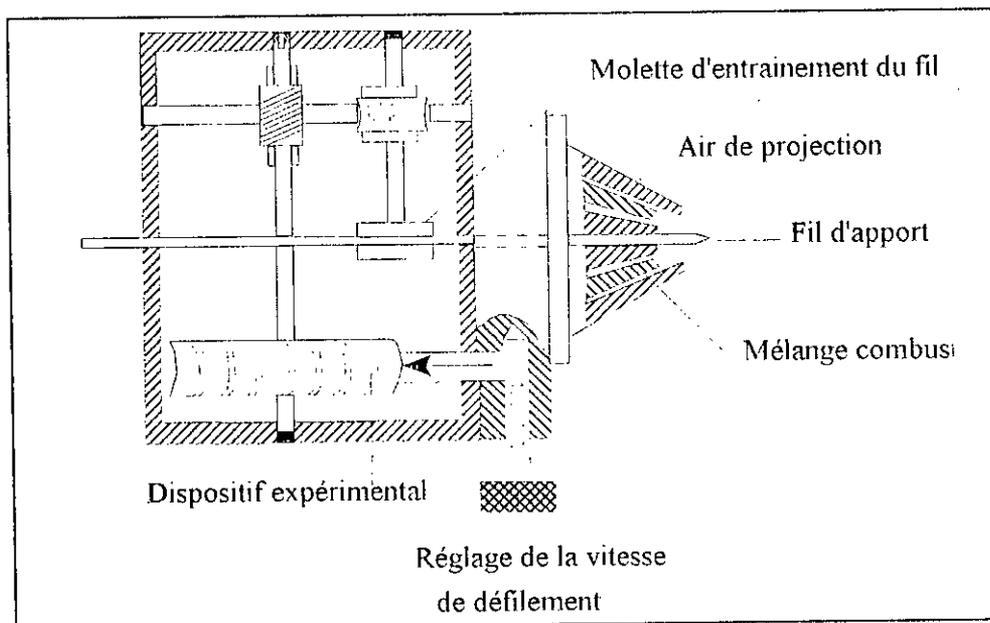


Figure IV.2 : Pistolet à fil [5].

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédés

L'opération de métallisation ne peut aboutir sur un résultat de qualité que si d'une part la préparation des échantillons a été soigneusement effectuée et d'autre part la finition de l'opération elle-même a fait l'objet d'un respect scrupuleux des paramètres de projection.

a) Préparation de la surface

**Lors du dégraissage*, les échantillons de forme indiquée dans la figure IV.4 doivent être exempts de tout élément pouvant avoir des conséquences néfastes sur la suite du traitement (salissures, huiles, graisses, sueurs...).

**Décapage mécanique* : Le passage des échantillons à la meule permettra l'obtention d'une rugosité favorable à l'accrochage du dépôt. Et c'est ce qui est souhaité.

**Sablage* : C'est une opération complémentaire à la précédente. Elle permet l'obtention d'une surface fin prête à recevoir le dépôt projeté. Ce pré-traitement garantit une bonne adhérence.

b) Paramètres de projection

Des indications recommandées par le constructeur des équipements sont à respecter scrupuleusement lors de l'utilisation.

Pression d'air dans le moteur	3,8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0,06m/s
Tension du générateur	30V
Intensité de courant	100A

Tableau IV.5 : Paramètres de mise en service du pistolet.

Les paramètres de projection ont, eux aussi, une grande influence sur la qualité du dépôt. Un compromis entre ces différents paramètres est à respecter:

Distance de projection	140 mm
Vitesse de rotation de la cible	16 tours / mn
Angle de tir	90°
Vitesse d'avance de la buse	4 mm / tour

Tableau IV.6 : Conditions de projection.

De l'étude se reposant sur l'influence des paramètres de projection sur la qualité du multimatériau et particulièrement la distance de projection et la vitesse de rotation de la cible, il ressort que le taux d'oxydation augmente avec la distance entraînant ainsi une élévation de la dureté [32]. Cependant, lorsque la distance est trop grande, il y a un mauvais étalement des particules ce qui entraîne une diminution de la cohésion et donc de la dureté.

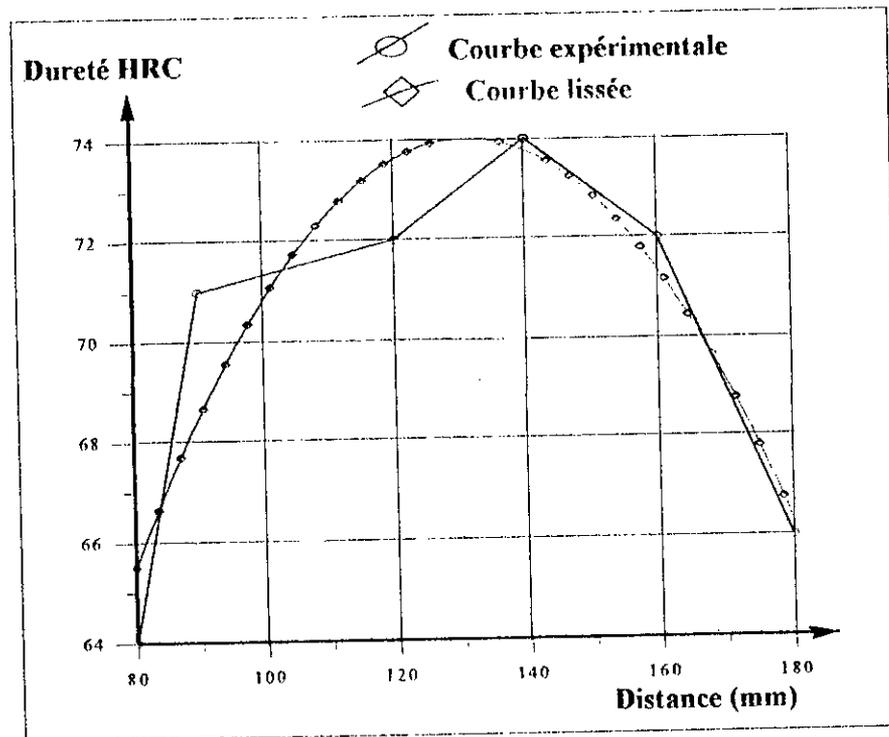


Figure IV.3 : Evolution de la dureté en fonction de la distance de projection.

Il est à noter que toutes les opérations de décapage, rugosification, et de métallisation doivent être faites simultanément pour réduire le risque d'oxydation.

c) Préparation des échantillons

Afin de bien préciser la différence pouvant avoir préalablement lieu, il a été jugé nécessaire et indispensable de préparer des échantillons dont la forme et dimensions sont données par la figure IV.4.

- substrat seul (A-U4G),
- multimatériaux réalisés avec sous couche d'accrochage,
- multimatériaux réalisés sans sous couche d'accrochage.

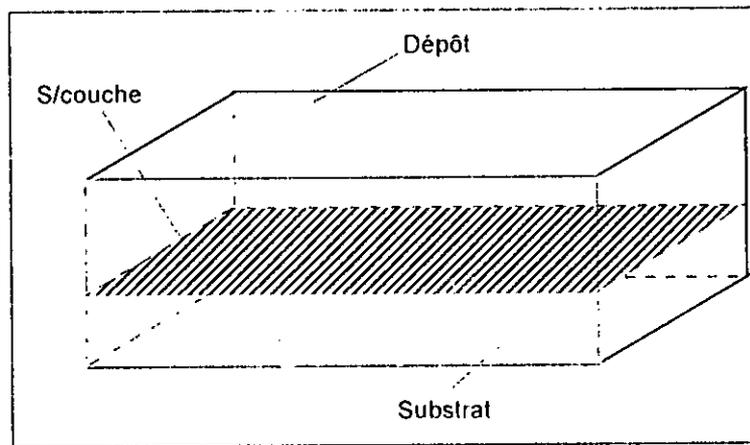


Figure IV.4 : Schéma d'un multimatériau après dépôt.

IV.2 CONCLUSION DU CHAPITRE.

C'est l'application directe des traitements choisis pour la protection de l'A-U4G. Cela passe par une maîtrise de la connaissance du matériau et des équipements utilisés. Il a été question à chaque fois de l'optimisation des paramètres.

CHAPITRE 5

RESULTS.

CHAPITRE V

RESULTATS.

V.1 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES TRAITEMENTS DE SURFACE REALISES.

V.1.1 Introduction.

Afin d'apprécier à bon escient la qualité du dépôt ou plus particulièrement l'interface Dépôt / Substrat, différentes méthodes complémentaires de caractérisations sont utilisées. Il s'agit de la microscopie optique, électronique à balayage, microsonde et de la diffraction des rayons-X sous incidence rasante d'une part, de la dureté, microdureté et d'essais d'arrachement d'autre part. Toutes ces techniques, se complètent les unes aux autres. Elles permettent de fournir des renseignements précieux concernant la microstructure, la morphologie, la composition des différentes couches et bien entendu la formation des composés intermétalliques s'il y a lieu au niveau de l'interface.

Une attention toute particulière est observée afin d'éviter toute confusion soit dans les observations soit dans les interprétations quant à la préparation des différents échantillons devant subir des observations au microscope électronique à balayage (M.E.B.) (du polissage mécanique au feutrage en passant par le nettoyage aux ultra-sons).

Les différentes structures observées ont été effectuées au niveau de l'interface (comprenant l'ensemble Dépôt / Substrat) et au niveau du dépôt seul pour les différents échantillons étudiés traités et non traités.

Dans cette partie, une caractérisation par microanalyse des différents couples élaborés a été effectuée. L'analyse par microsonde est extrêmement sensible. La surface analysée est de l'ordre du diamètre du spot électronique exciteur (1 μ m) et sa profondeur analysée est de quelques microns. L'émission de rayonnement par une substance peut se produire sous l'effet d'un bombardement électronique. Cette émission X est due au réarrangement spontané du cortège électronique des atomes de l'échantillon ionisé par bombardement. Cette réorganisation donne lieu à des raies d'émission caractéristiques en fréquence et en intensité des éléments répartis en plus ou moins grande proportion dans le dépôt analysé. En balayant la surface de l'échantillon avec le spot et en calant le spectromètre sur une raie d'émission d'un élément choisi, on peut obtenir une image X de l'échantillon donnant la répartition de l'élément considéré.

Tous les systèmes, dans le cadre de l'expérimentation, ont été réalisés avec sous-couche d'accrochage suivis d'un post-traitement de deux heures (par expérience).

V.1.2 Traitements de surfaces réalisés par anodisation.

Sur la figure V.1, représentant le système A-U4G / Al_2O_3 , on constate une augmentation de l'épaisseur de la couche d'alumine Al_2O_3 déposée naturellement par traitement de surface d'anodisation en vue d'une protection contre la corrosion. Dans le cas où l'échantillon est ainsi utilisé, une opération de post-traitement lui est appliquée (coloration, colmatage, peinture et vernis...).

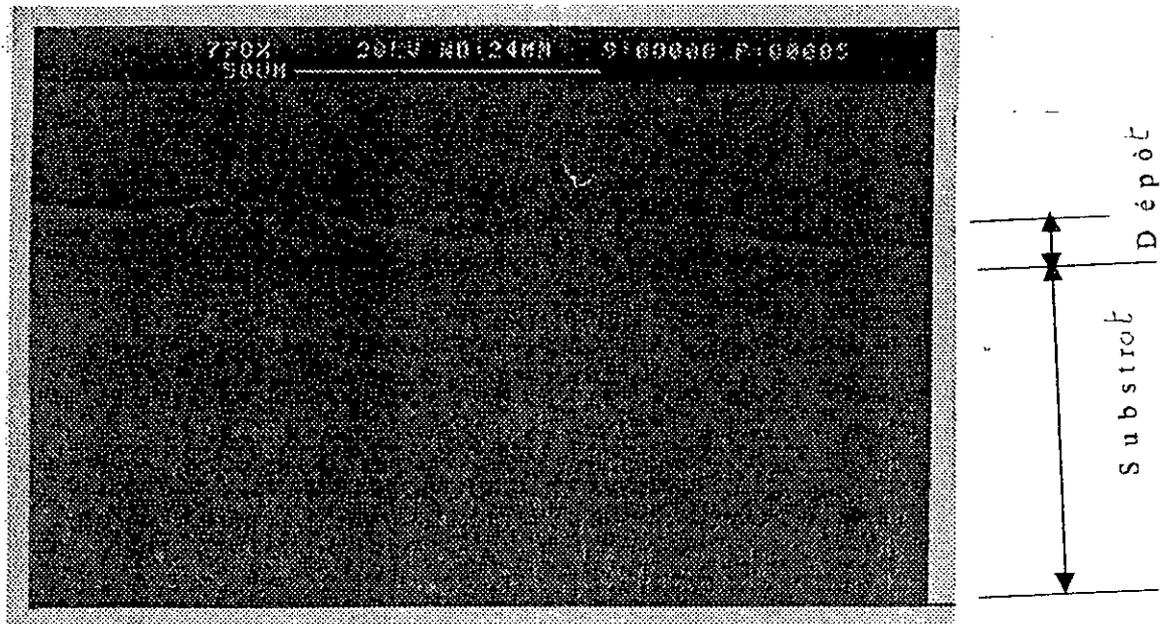


Figure V.1 : Traitements de surface réalisés par anodisation.

V.1.3 Multimatériaux réalisés par projection thermique.

V.1.3.1 Système avec sous-couche d'accrochage à base du dépôt 55E+65 E suivi d'un post-traitement de deux heures.

Dans le système A-U4G / Ni-Al / 55E + 65 E avec post-traitement de deux heures, la visualisation du dépôt seul, montre la bonne stratification et par conséquent l'existence d'une bonne cohésion entre les particules comme le montre la figure V.2.

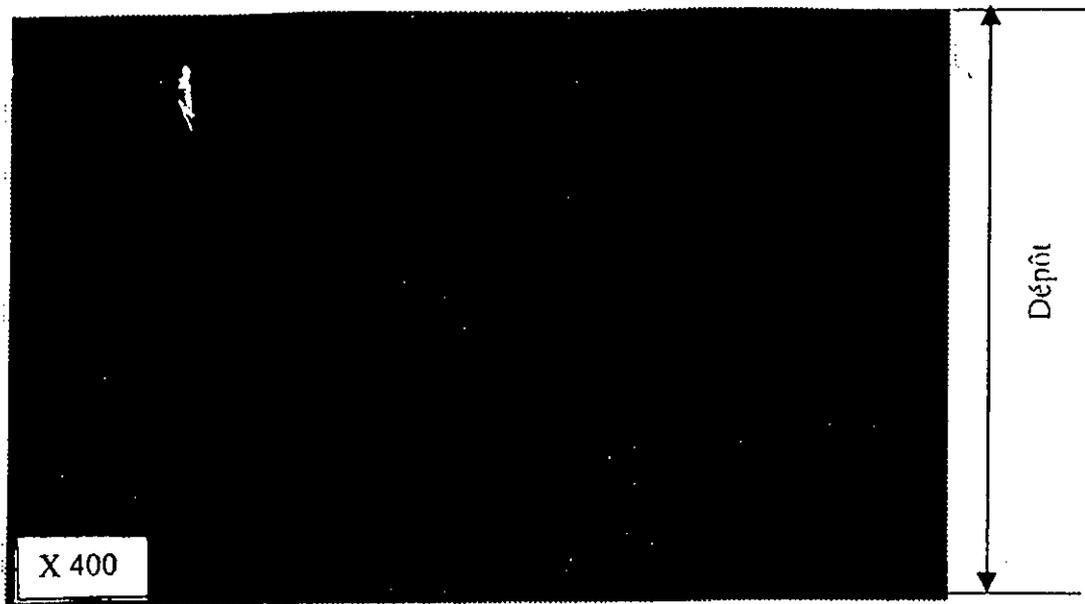


Figure V.2 : Dépôt seul du système A-U4G / Ni-Al / 55 E + 65 E avec un post - traitement de 2 heures.

Aussi, sur l'ensemble substrat / dépôt, on remarque qu'il y a une bonne adhérence à cause de la liaison métallurgique formée de part et d'autre de l'interface. On peut conclure que le post-traitement joue un rôle primordial dans l'amélioration de l'adhérence à cause éventuellement de la formation des composés intermétalliques comme il est illustré sur la figure V.3.

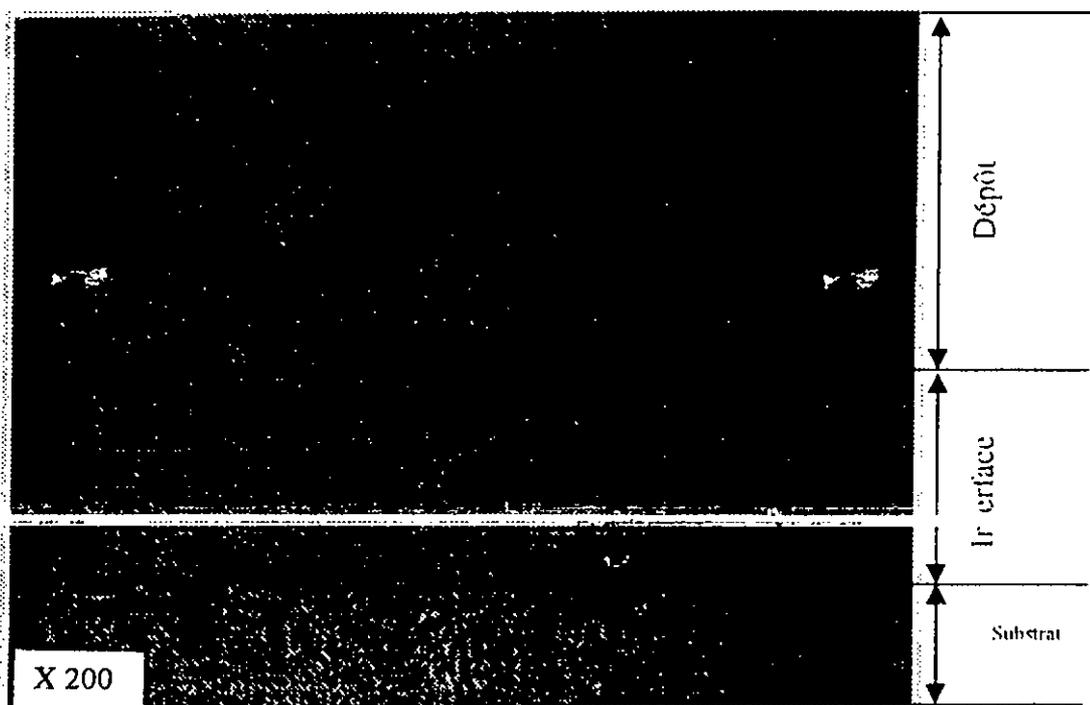


Figure V.3 : Système A-U4G / Ni-Al / 55 E + 65 E avec un post - traitement de 2 heures.

V.1.3.2 Système avec sous-couche d'accrochage à base du dépôt 65E + Thermanit suivi d'un post-traitement de deux heures.

Les figures V.4 et V.5 représentent le système A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit suivi d'un post-traitement de deux heures.

Sur le dépôt, on observe l'existence d'une stratification quelconque, l'existence de particules (noires) mal fondues et la discontinuité entre les particules (les blanches représentent les inclusions) comme le montre la figure V.4.

Du côté dépôt, il n'y a pas de continuité car la liaison est réalisée par un accrochage mécanique, du substrat. La ligne de séparation n'existe pratiquement pas car la liaison est métallurgique comme le montre la figure V.5.

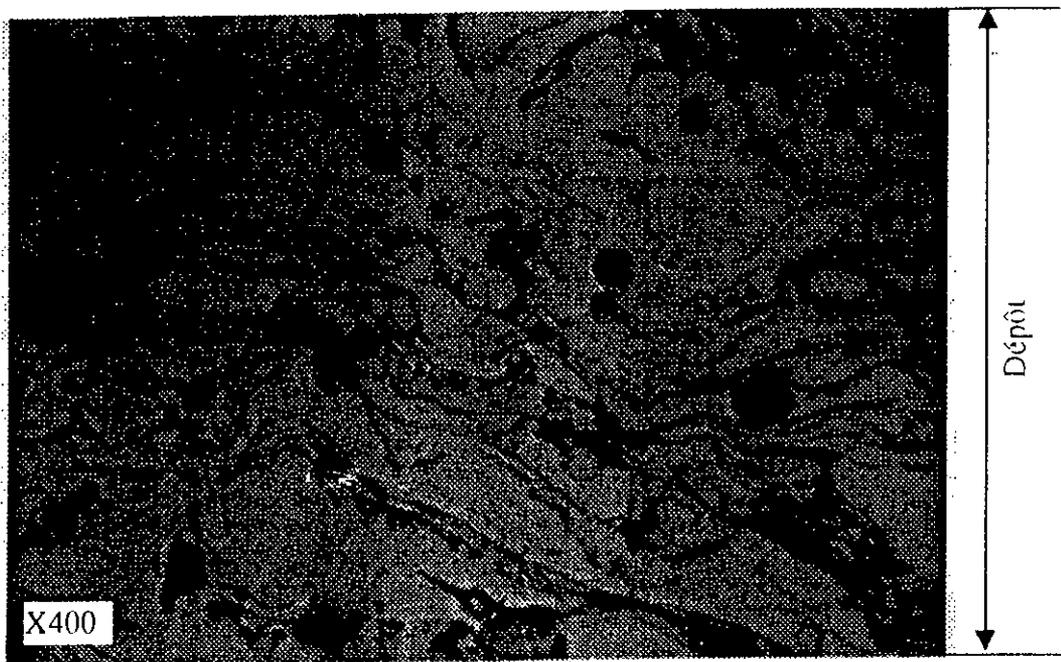


Figure V.4 : Dépôt seul du système A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit avec un Post-traitement de deux heures.

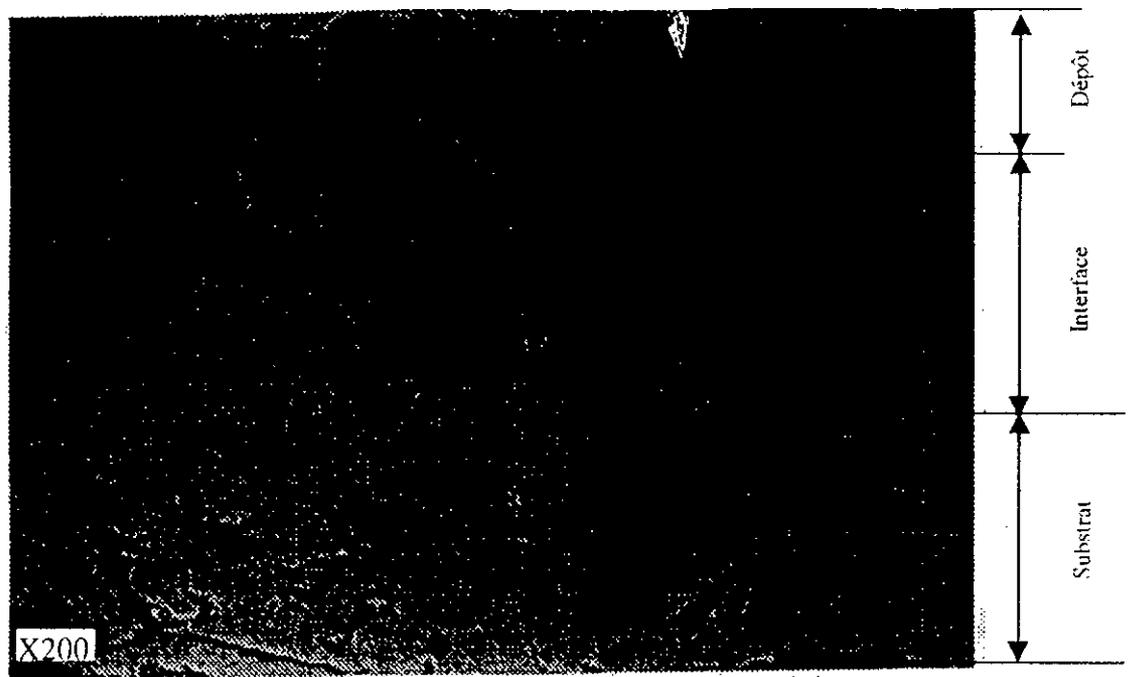


Figure V.5 : Système A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit avec un Post-traitement de deux heures.

Afin de mettre en évidence les éléments prédominants, à savoir le Ni, Al, Mn, Cu, Cr, dans le système élaboré A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit avec un post-traitement de deux heures, une caractérisation par microanalyse a été effectuée. L'image X du nickel montre qu'il ne diffuse ni dans le substrat ni dans le dépôt mais qu'il reste au niveau de l'interface. L'illustration est donnée par la figure V.6 /a.

Quant à l'aluminium, il est présent dans le substrat et l'interface. Il y a même existence d'une diffusion de part et d'autre, par contre on ne note aucune diffusion du côté dépôt. L'image X de cet élément est représentée sur la figure V.6 /b.

L'élément manganèse qui existe dans le dépôt diffuse dans l'interface mais reste absent dans le substrat comme le montre la figure V.6 /c.

Il en est de même pour le cuivre qui, existant dans le substrat, diffuse légèrement dans l'interface. C'est le cas de la figure V.6 /d.

Enfin, on remarque que le chrome, existant dans le dépôt, diffuse dans l'interface mais reste absent du substrat. C'est la représentation de la figure V.6 /e.

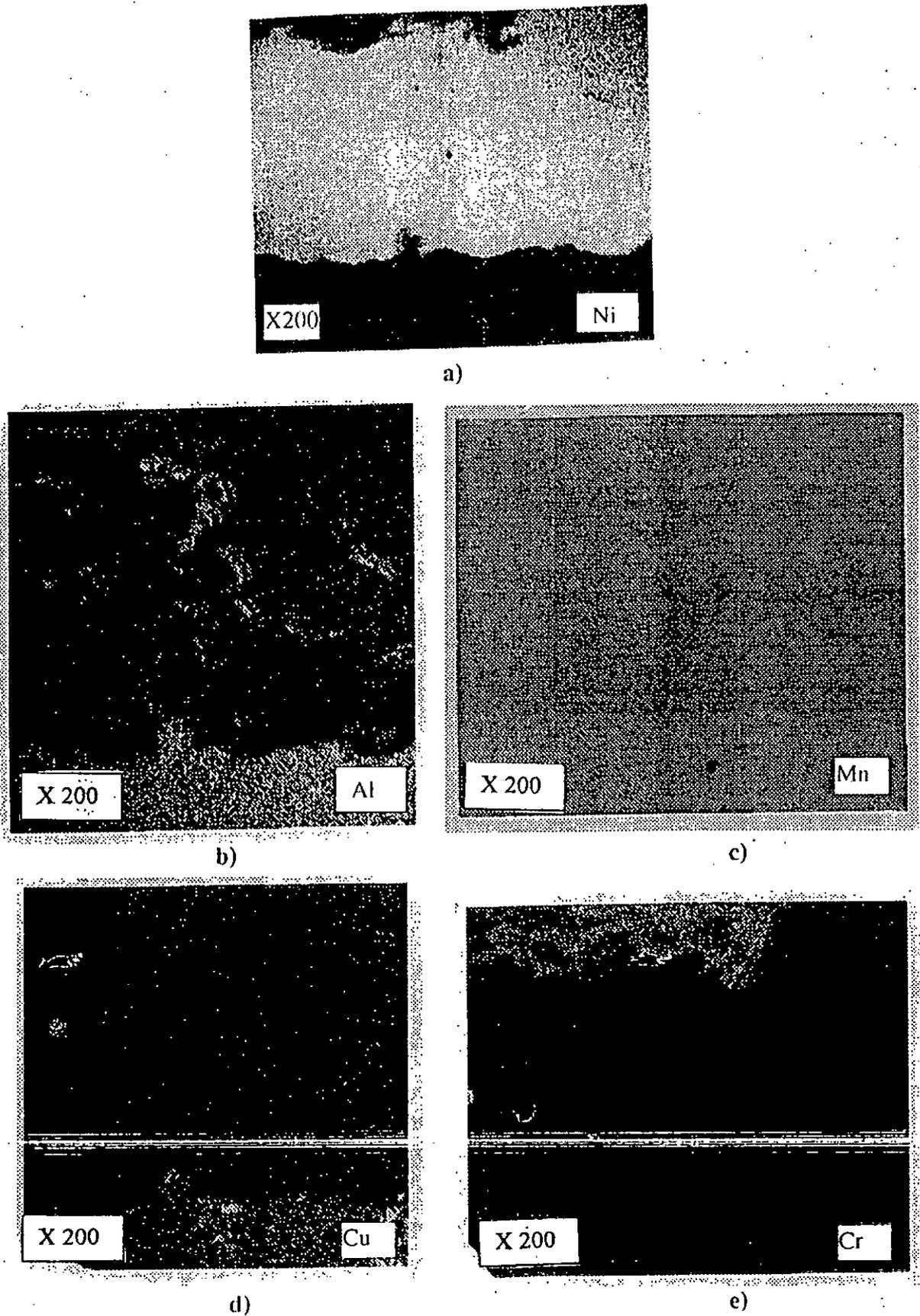


Figure V.6 : Image X des éléments du système A-U4G / Ni-Al / 65E + Thermanit.

Après étude et analyse détaillée des images X des éléments Ni, Al, Mn, Cu, Cr prédominant la constitution du système élaboré A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit suivi d'un post-traitement de deux heures, nous remarquons que le nickel ne diffuse pas dans ce multimatériau réalisé avec sous couche d'accrochage et que le manganèse ainsi que le chrome contenus dans le dépôt projeté diffusent à l'interface seulement. Par contre, le cuivre du substrat diffuse légèrement vers l'interface.

En revanche, l'image X de l'aluminium, est intéressante car elle montre la répartition de cet élément d'une manière uniforme. La présence de celui-ci de part et d'autre de l'interface ne peut être due qu'à sa diffusion.

V.1.3.3 Système avec sous-couche d'accrochage à base du dépôt 80E + Thermanit suivi d'un post-traitement de deux heures.

Dans ce cas, sur le dépôt seul, la mauvaise cohésion des particules et stratification des couches sont mises en évidence. Cela signifie qu'un grand nombre de particules est mal fondu (voir la figure V.7).

Comme on observe une forte continuité de part et d'autre de l'ensemble dépôt / interface, elle est légère sur l'interface / substrat (voir la figure V.8).

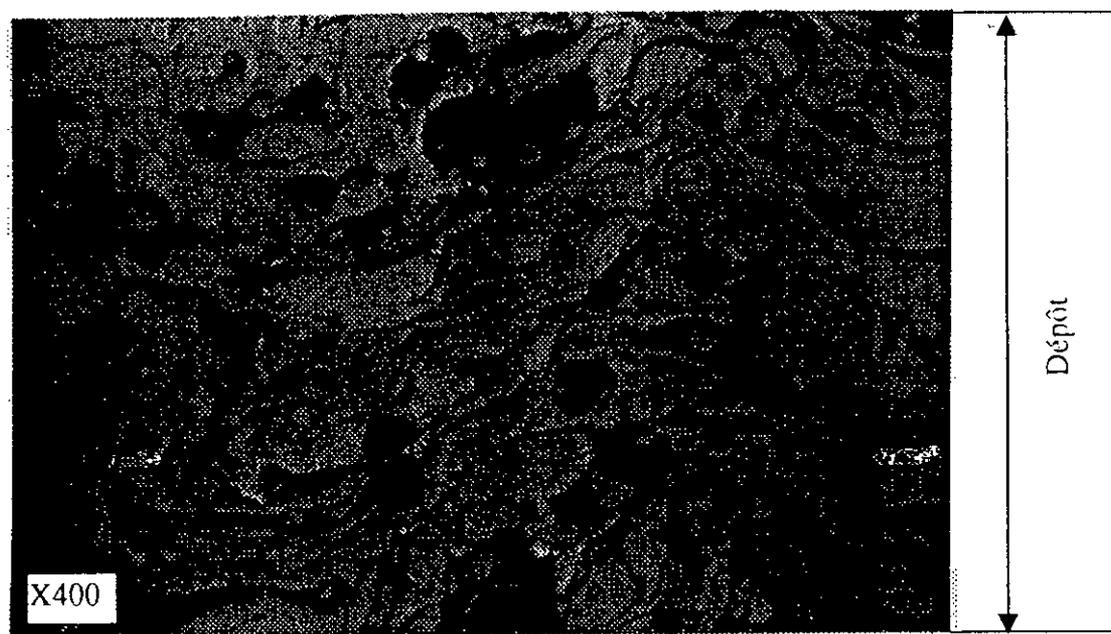


Figure V.7 : Dépôt seul du système A-U4G / Ni-Al / 80 E + Thermanit avec un post-traitement de 2 heures.

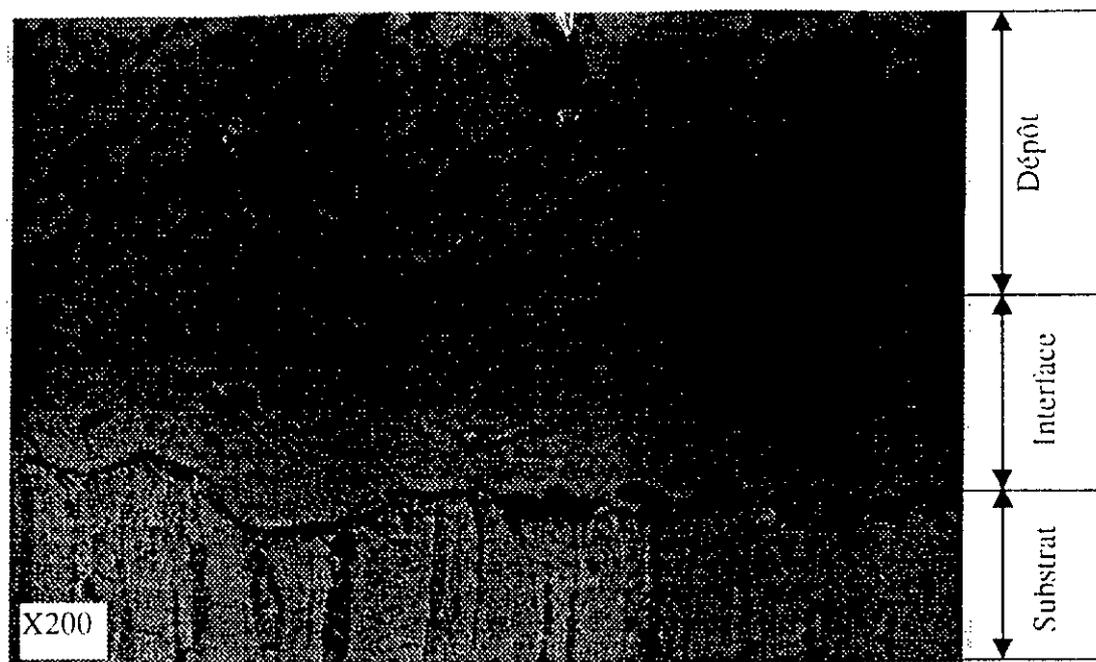


Figure V.8 : *Système A-U4G / Ni-Al / 80 E + Thermanit avec un post - traitement de deux heures.*

Après étude et analyse détaillée des images X des éléments essentiels Ni, Al, Mn, Cu, Cr, Fe constituant le système A-U4G / Ni-Al / 80 E + Thermanit avec un post - traitement de deux heures, il ressort que le nickel existe dans le dépôt et l'interface en très forte quantité et on remarque la diffusion de ce dernier de part et d'autre comme l'indique la figure V.9 /a et que l'aluminium diffuse normalement dans le substrat et l'interface comme le montre la figure V.9 /b.

Par ailleurs, le manganèse existe dans le dépôt et diffuse fortement dans l'interface mais beaucoup moins dans le substrat (voir figure V.9 /c) et que le cuivre existant dans le substrat seulement ne diffuse aucunement (voir figure V.9 /d).

Enfin, les éléments chrome et fer existant dans le dépôt et ne font l'objet que d'une très légère diffusion dans l'interface comme l'illustrent les figures V.9 /e et V.9 /f.

Ce qu'il y a lieu de retenir est que d'une part l'image X du cuivre nous permet de constater que celui-ci ne diffuse pas (figure V.9 /a) et que d'autre part les images X des éléments fer, chrome, manganèse provenant essentiellement du dépôt diffusent fortement à l'interface. Cependant, on note la présence du manganèse en faible proportion dans le substrat (figures V.9 /b, V.9 /c et V.9 /d).

Enfin, Seul l'image X du nickel montre sa diffusion de part et d'autre de l'interface.

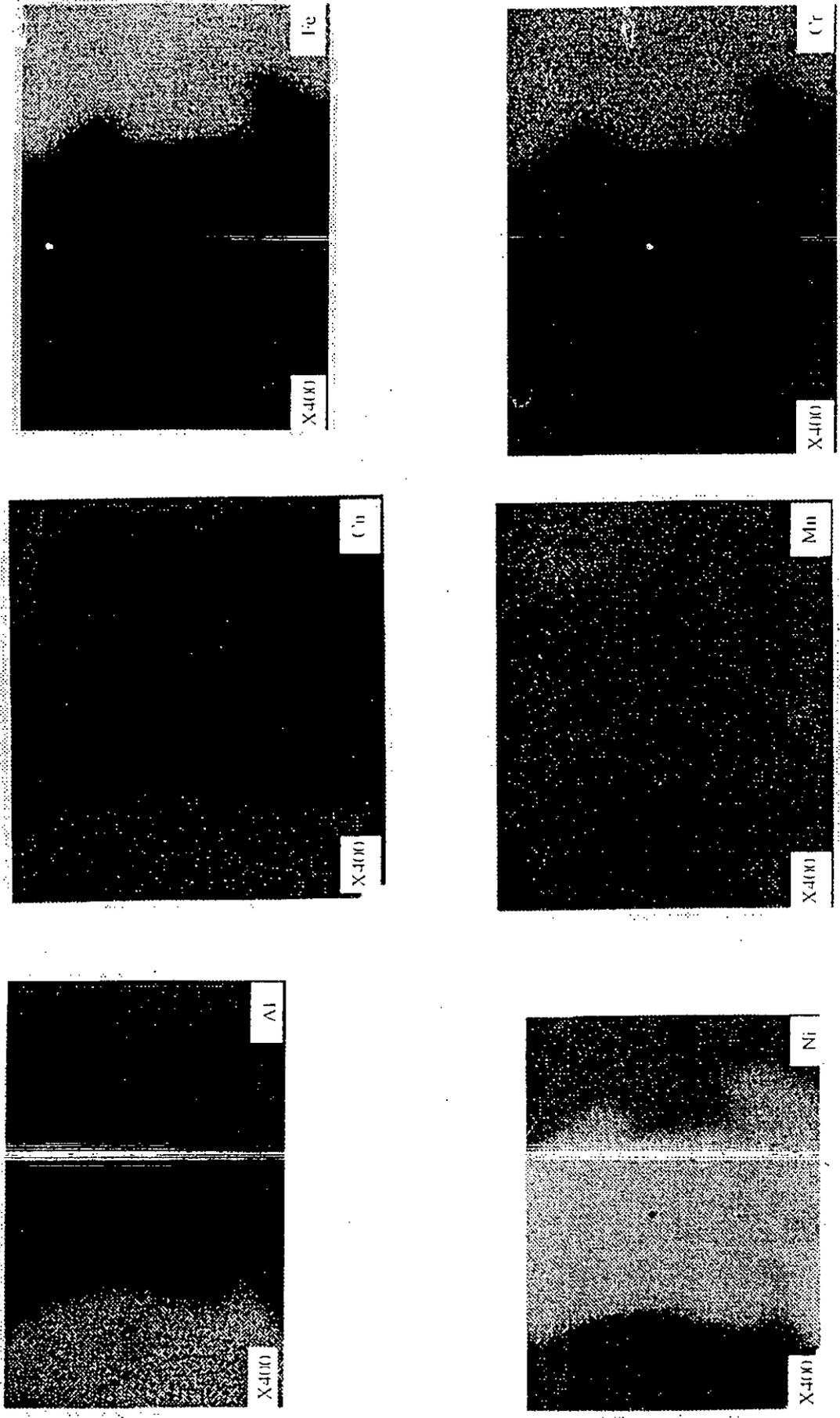


Figure V.9 : Image X des éléments du système A-U4G / Ni-Al / 80E + Thermanit.

V.2 ETUDE DE LA DURETE ET DE LA MICRODURETE.

V.2.1 Essais de dureté.

Malgré l'influence que peuvent avoir en conséquence l'étendue et la cohésion des particules lors de la projection, la porosité, l'épaisseur du dépôt (l'éloignement de l'interface) ainsi que la formation des composés intermétalliques, la dureté reste un paramètre déterminant dans la caractérisation de la qualité d'un dépôt.

Connaissant la dureté des alliages d'aluminium relativement faible par rapport à celle des aciers, il a été jugé nécessaire et indispensable d'utiliser la dureté HRB. Les échantillons sont préparés soigneusement (meulage, polissage aux différents papiers abrasifs et finition à la pâte diamantée).

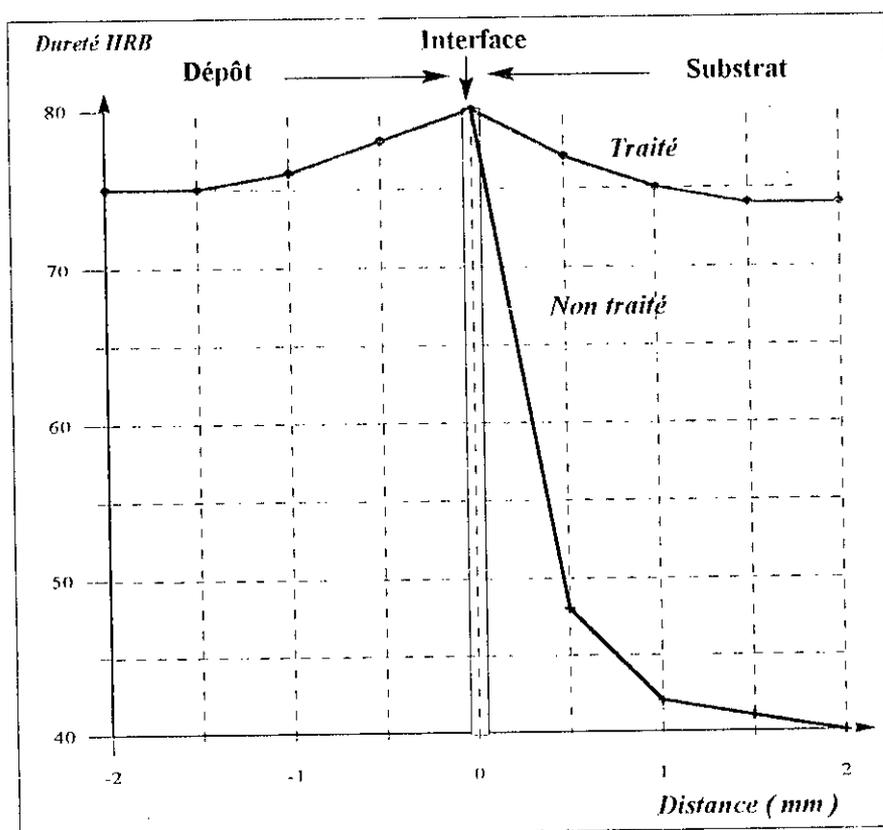


Figure V.10 : Evolution de la dureté dans le multimatériau avec sous couche d'accrochage (traité et non traité).

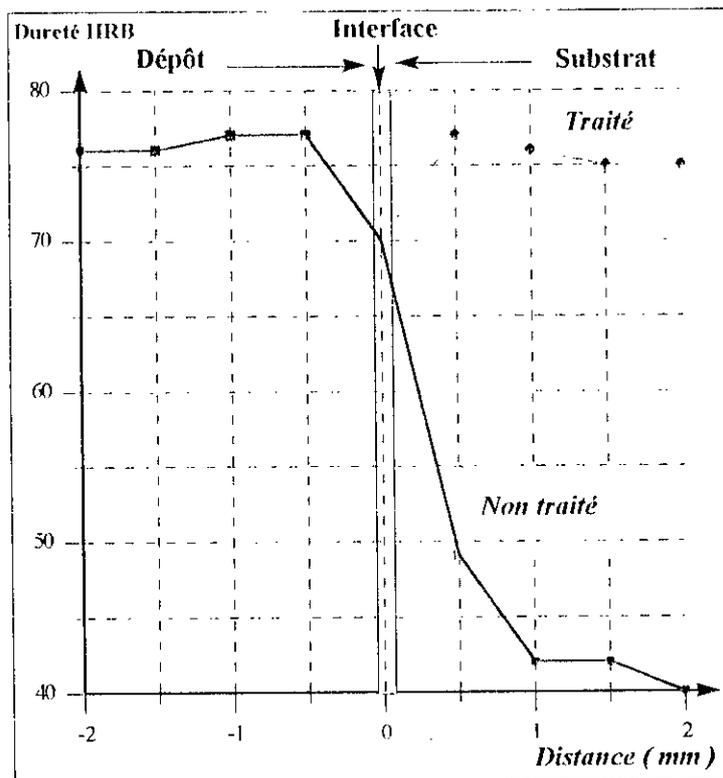


Figure V.11 : Evolution de la dureté dans le multimatériau sans sous couche d'accrochage (traité et non traité).

En général, tout matériau est livré non traité c'est à dire n'ayant subi aucun traitement. Les alliages d'aluminium s'utilisent toujours traités. C'est le cas de l'A-U4G. Le traitement thermique de l'ensemble (dépôt / substrat) a été effectué à la température $t^{\circ} = 480^{\circ}\text{C}$ à 500°C pendant 15 à 20 minutes refroidi à l'eau fraîche puis revenu.

Des figures précédentes, nous constatons les remarques suivantes :

- Il est normal de constater que la dureté du substrat traité est bien supérieure au substrat non traité (70 HRB pour 40 HRB), comme le montrent les figures V.10 et V.11.
- Comme il est normal de constater que la dureté du dépôt reste constante avant et après le traitement thermique car la température de $t^{\circ} = 480^{\circ}\text{C}$ à 500°C est très inférieure au point de transformation du matériau du dépôt,
- Le point représentatif de la dureté de l'interface sans sous couche d'accrochage est légèrement inférieur au dépôt et au substrat. Cette différence est expliquée par l'obtention d'une porosité excessive,
- Par contre, le point représentatif de la dureté d'interface avec la sous couche est supérieur au dépôt et au substrat. Ceci est expliqué par la présence de composés intermétalliques qui se sont formés et par la diminution de la porosité,
- Remarquons bien la sensible continuité (uniforme) de la dureté dans l'ensemble dépôt / interface / substrat.

V.2.2 Essais de microduretés.

La préparation de la surface recevant le pénétrateur est très importante principalement lorsqu'on utilise de faibles charges comme dans notre cas.

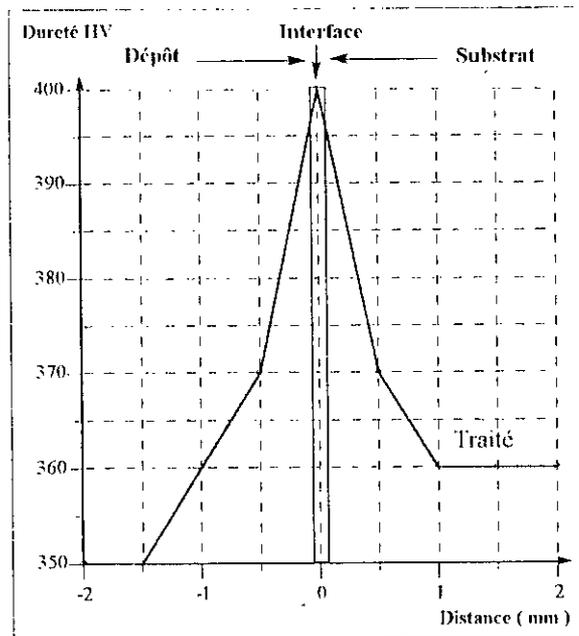


Figure V.12 : Evolution de la dureté Vickers dans le multimatériau réalisé avec sous couche d'accrochage.

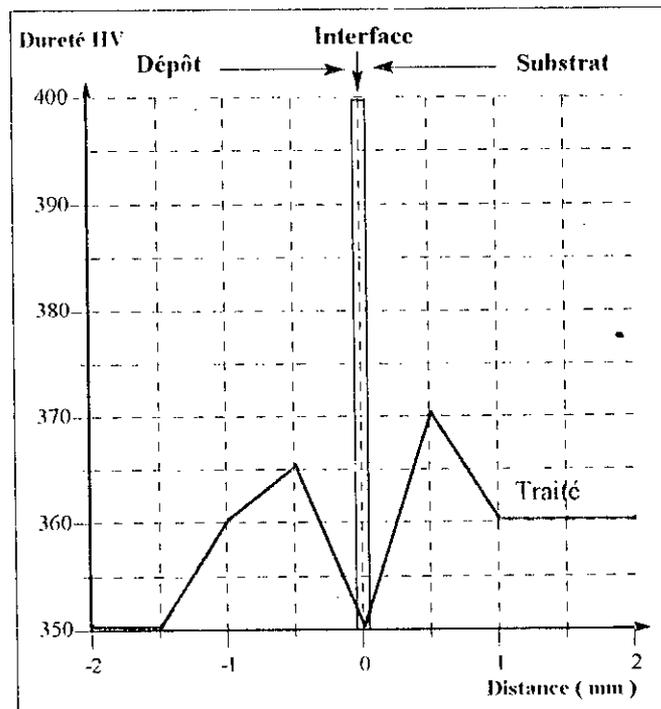


Figure V.13 : Evolution de la dureté Vickers dans le multimatériau réalisé sans sous couche d'accrochage.

Ce type d'essais et de contrôle est destiné principalement à la mesure de la dureté superficielle des matériaux en l'occurrence même si la couche est très dure et très mince, comme elle donne des renseignements précieux sur la nature des phases présentes au niveau de l'interface. L'interprétation est identique à la dureté HRB précédente à savoir la conservation de l'uniformité de la dureté de l'ensemble dépôt / substrat.

V.2.3 Essais de microdureté superficielle.

C'est l'essai de dureté Vickers en surface des traitements de surface et des revêtements appliqués. Pour juger de la qualité de l'uniformité, il a été jugé nécessaire et indispensable de balayer toute la surface (préalablement bien préparée) par un quadrillage de relevés de points de dureté.

Des résultats obtenus, un dixième des valeurs reste en dehors de la tolérance de la valeur moyenne. L'uniformité est considérée comme bonne.

V.3 TESTS D'ARRACHEMENT.

Même s'il n'existe pas d'essais universellement satisfaisant pour vérifier la qualité de l'adhérence des revêtements, néanmoins des tests sont effectués afin de pouvoir évaluer le degré d'adhérence des traitements de surface et des revêtements. Ces tests visent à effectuer une séparation dépôt / substrat par arrachement de dépôts perpendiculairement au substrat. Une des diverses techniques utilisées consiste en un collage par une résine synthétique à prise rapide ou par un ruban adhésif où la résistance est connue.

L'observation de la localisation de la rupture (à l'interface dépôt / substrat, dans le dépôt ou dans le substrat) fournit une indication sur le degré d'adhérence dépôt / substrat.

Bien entendu, il est également possible de mesurer la force nécessaire pour produire l'arrachement. On obtient alors une échelle de valeurs de l'adhérence dans le cas où la rupture se produirait à l'interface dépôt / substrat.

Des essais ont été effectués sur une dizaine d'échantillons, un seul a présenté un décollement revêtement / substrat. Ce qui est largement acceptable (figure V.14).

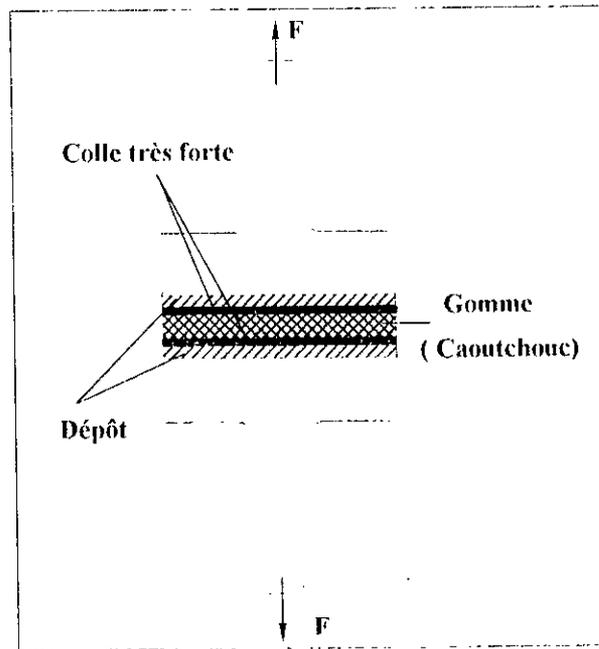


Figure V.14 : Représentation schématique de l'essai d'arrachement.

L'essai d'arrachement permettant d'estimer la contrainte de rupture montre que les échantillons ayant subi une rugosification et une sous couche d'accrochage présentent une meilleure adhérence. La rugosification a un effet d'accrochage mécanique. La sous couche d'accrochage, par les éléments qu'elle contient (Ni et Al) tensioactifs augmente l'énergie d'adhésion tout en restant non réactif.

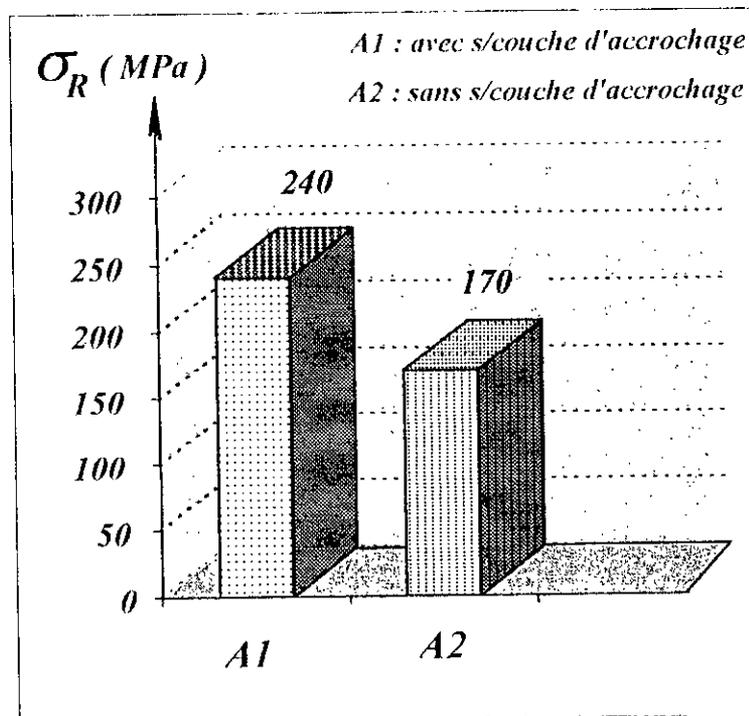


Figure V.15 : Contraintes de rupture des multimatériaux réalisés par projection thermique

V.4 USURE ET FROTTEMENTS.

S'il existe actuellement un grand nombre de remèdes permettant de lutter au cas par cas contre l'usure, tous les phénomènes observés sont loin d'être compris. Il est admis que la modification de la nature des matériaux ne peut supprimer seule l'usure et il faut donc rechercher des palliatifs qui retarderaient la dégradation du contact.

Les protections des alliages d'aluminium (A-U4G dans notre cas) par anodisation ou anodisation dure et par dépôt de couche superficielle par projection thermique sont parmi des remèdes développés ou à développer industriellement et auxquels nous nous intéressons dans ce paragraphe afin d'essayer dans quelles mesures nous pouvons améliorer la tenue à l'usure et au frottement.

C'est un phénomène complexe, vu le nombre de paramètres qui interviennent en même temps si bien qu'il est impossible d'isoler un paramètre pour l'étudier à part. C'est en outre un phénomène qui fait intervenir à la fois la mécanique et les propriétés des matériaux.

Nous nous limiterons à traiter quelques évolutions typiques du coefficient de frottement. Ce coefficient traduit le rapport de la force tangentielle qui s'oppose au mouvement du glissement à la charge normale appliquée.

Les essais ont été réalisés pour 1000 cycles, ce qui équivaut à une durée approximative d'une heure et ceci pour tous les échantillons.

L'évolution du coefficient de frottement enregistrée en cours des essais, présente une instabilité durant toute l'expérience et elle est restée pratiquement la même pour tous les échantillons des couples élaborés.

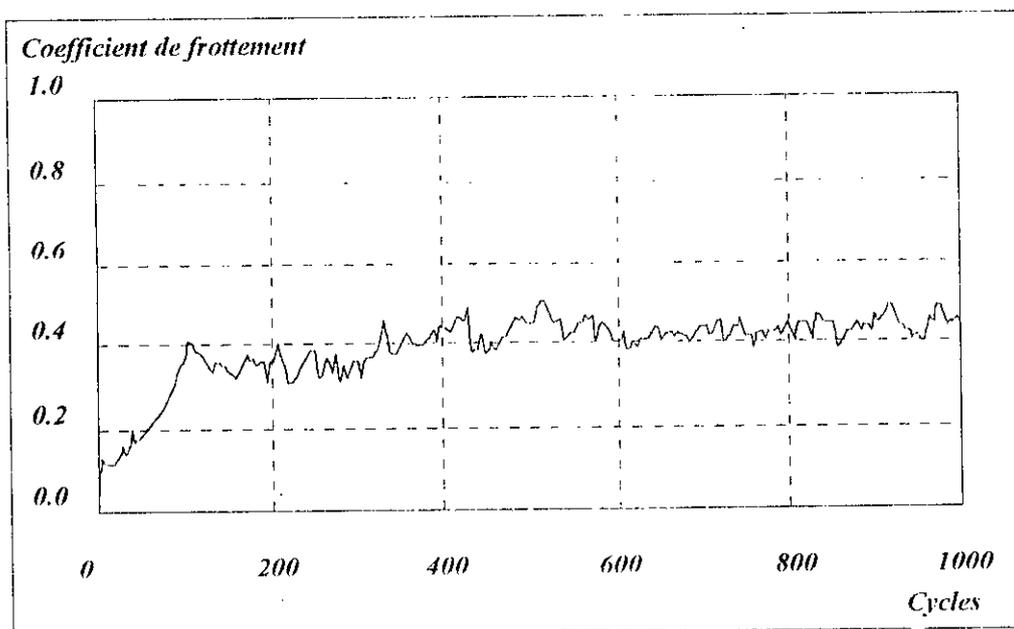


Figure V.16 : Evolution du coefficient d'usure en fonction du nombre de cycles.
Cas du substrat brut A-U4G.

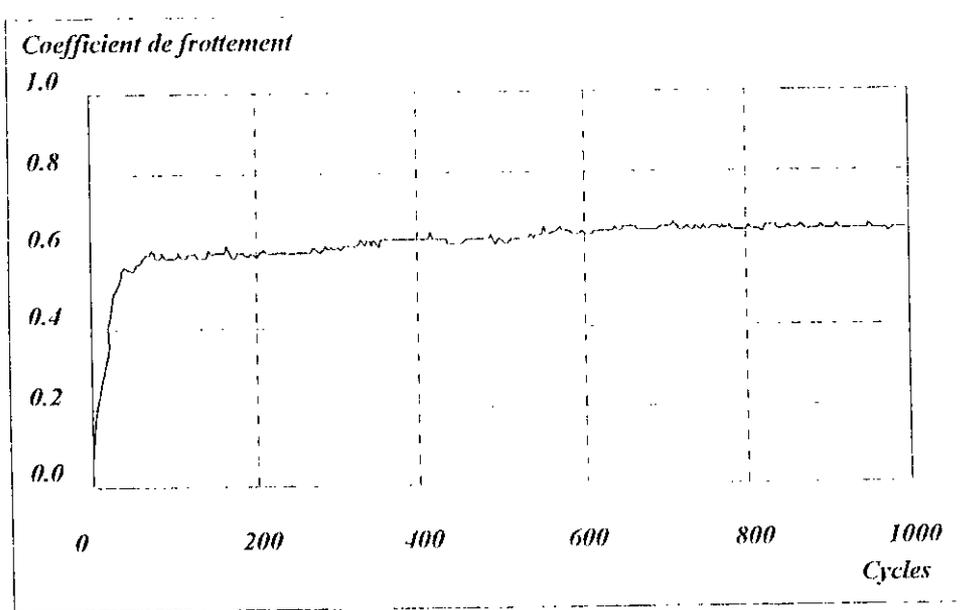


Figure V.17 : Evolution du coefficient d'usure en fonction du nombre de cycles.
Cas du système A-U4G / Ni-Al / 55 E + 65 E.

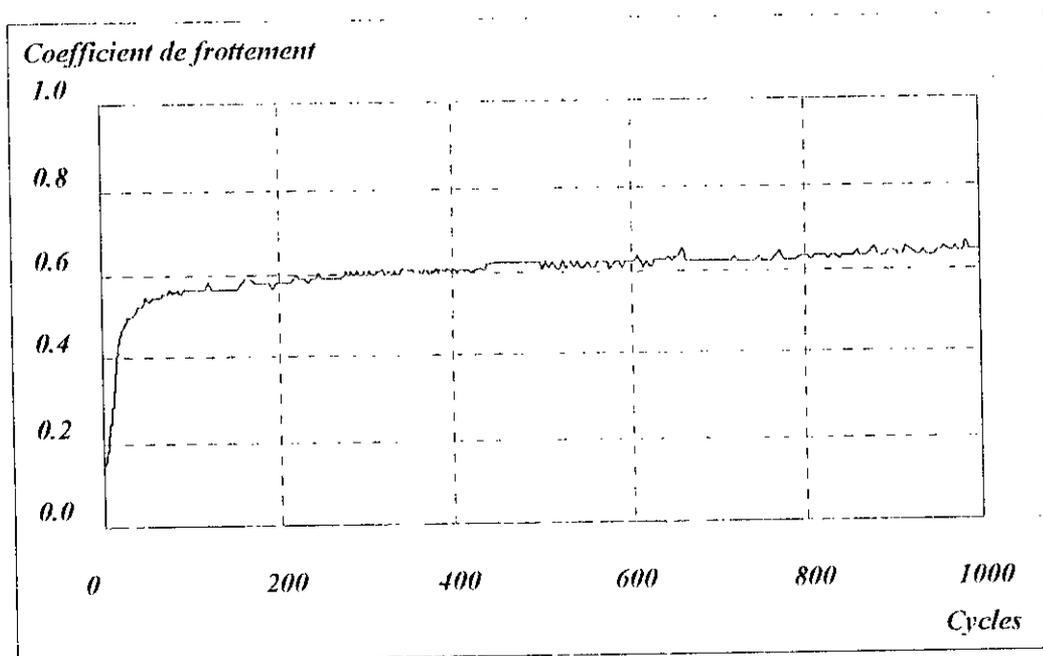


Figure V.18 : Evolution du coefficient d'usure en fonction du nombre de cycles.
Cas du système A-U4G / Ni-Al / 65 E + Thermanit.

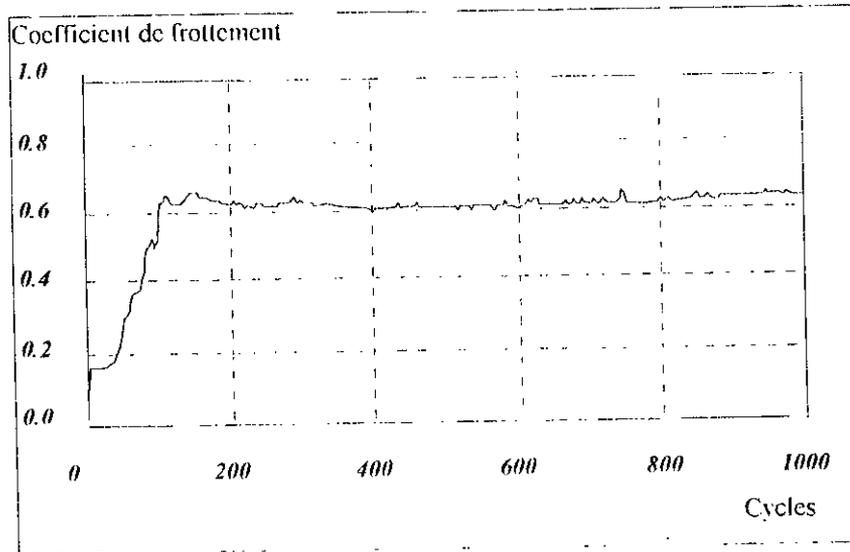


Figure V.19 : Evolution du coefficient d'usure en fonction du nombre de cycles.
Cas du système A-U4G / Ni-Al / 80 E + Thermanit.

En nous basant sur les différentes figures précédentes qui représentent l'évolution générale du coefficient de frottement dans quatre cas, nous remarquons une augmentation rapide dès les premiers cycles, ceci correspond à un frottement entre les pics (les aspérités) des deux corps. Ensuite, l'évolution est suivie d'une courte étape où le coefficient de frottement est à peu près stable, cette étape est liée à l'établissement du troisième corps, formé à partir des premières particules qui se détachent.

La figure V.16 représente l'évolution du coefficient de frottement du substrat A-U4G et il y a lieu de remarquer une faible valeur moyenne du coefficient (0,35 à 0,40) par rapport à celles des revêtements des couples élaborés (0,60) (figures V.17, V.18 et V.19).

Enfin, nous pouvons dire que le frottement dans le cas du revêtement est bien meilleur que dans le cas du substrat. Ceci peut s'expliquer par le grand coefficient de frottement obtenu pour le revêtement. Cette valeur est due à la création de particules entre les corps où ces derniers créent un écran et protègent ainsi le revêtement de l'usure.

V.5 CONCLUSION DU CHAPITRE.

La caractérisation physico-chimique des traitements de surface réalisés (anodisation et projection thermique), l'image X des différents éléments pour chacun des systèmes, la dureté (plus la microdureté), les tests d'arrachement ainsi que les études de l'usure et des frottements ont révélé que la diffusion des éléments est pratiquement absente et que la sous-couche d'accrochage augmente la contrainte à la rupture.

Nous retenons alors que l'adhérence est principalement mécanique. Elle peut être augmentée par la sous-couche de par les éléments tensio-actifs qu'elle contient (Ni-Al) qui augmentent l'énergie d'adhésion et par la rugosification de par l'effet d'accrochage.

Thèse de MAGISTER ETUDE DE LA PROTECTION DU MATERIAU AERONAUTIQUE A UAG

CHAPITRE 6

MODELISATION MATHEMATIQUE

CHAPITRE VI

MODELISATION MATHÉMATIQUE

VI.1 INTRODUCTION.

La dégradation des surfaces par usure, de diverses origines, est l'un des principaux problèmes rencontrés dans l'industrie qui conduisent au remplacement des pièces ou d'assemblages mécaniques.

Le choix des matériaux qui constituent les éléments mis en contact est souvent complexe, puisque les matériaux usuels possèdent rarement toutes les propriétés désirées.

Pour résoudre ce problème, les traitements thermiques et les revêtements de surface constituent une alternative. Les études de caractérisation de ces revêtements donnent, en général, la composition du revêtement, la dureté, le coefficient de frottement et d'usure... En effet, ces données sont peu utiles à un mécanicien car, dans la conception d'un mécanisme, il faut pouvoir calculer les champs de contraintes et de température après avoir analysé les conditions de fonctionnement (charges, déplacements, flux thermiques,...).

L'absence d'outils théoriques permettant le dimensionnement de pièces revêtues, fait que le choix d'un traitement de surface est assujéti à une série d'essais, souvent coûteux, et dont les résultats aident à résoudre un problème spécifique ; mais ne peuvent pas être extrapolés. Ainsi, on constate que l'influence thermomécanique d'un revêtement de surface obtenue par projection ou électrolytiquement est mal connue.

Dans ce chapitre, nous ne résolvons pas le problème posé car il est très complexe mais, par contre, nous essayerons de proposer un aperçu de la mise en équation pouvant aider à formuler le problème pour le cas des champs de contraintes et de déformations à l'interface du substrat et du revêtement pour le cas d'un problème bidimensionnel moyennant certaines hypothèses.

On appelle champ de contraintes résiduelles au sein d'un matériau, l'ensemble de contraintes subsistant quand celui-ci n'est soumis à aucune force ni moment extérieur. Les processus de fabrication sont les causes les plus fréquentes des contraintes résiduelles. Théoriquement, toutes les méthodes telles que le moulage, l'usinage, le forgeage, les traitements thermiques, chimiques ou thermochimiques sont génératrices de contraintes résiduelles. Ces contraintes résiduelles constituent le facteur principal d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue des pièces d'une structure.

Ce champ est régi par l'équilibre mécanique des forces et des moments de la pièce au repos. Pour mieux situer ce champ de contraintes, il est nécessaire et indispensable de définir d'une façon détaillée l'état mécanique de la matière (Mécanique des Milieux Continus).

On sait que les déplacements occasionnés par une sollicitation externe sont décrits par deux grandeurs tensorielles :

- Les déformations pures englobant les comportements élastiques réversibles et les comportements plastiques irréversibles,
- Les rotations.

Les contraintes internes correspondent à des distorsions de la matière qui sont présentes à différentes échelles d'observations et de mesure : macroscopique, microscopique et submicroscopique.

Les **contraintes internes d'ordre I** (σ^I) ou macroscopiques sont homogènes sur plusieurs grains (quelques 1/10 mm).

Les **contraintes internes d'ordre II** (σ^{II}) sont issues de déformations entre grains (propriétés mécaniques anisotropes) ou entre phases (propriétés mécaniques, thermiques et physico-chimiques). Elles sont homogènes sur quelques dizaines de μm .

Les **contraintes internes d'ordre III** (σ^{III}) ou submicroscopiques sont homogènes sur quelques distances interatomiques (quelques dizaines de nm). Les modifications d'équilibre n'entraînent aucune variation dimensionnelle macroscopique.

Localement, dans les matériaux réels, la contrainte totale est la résultante de la superposition des contraintes d'ordre I, II et III.

$$\sigma \text{ (résultante)} = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (\text{VI.1})$$

Expérimentalement, il est très difficile de faire une séparation d'ordre. Pour cela, on parle souvent de macrocontraintes (position des pics de diffraction X) et de microcontraintes (profils des pics). Ces contraintes résiduelles sont d'autant plus insidieuses qu'elles ne sont généralement pas détectables et encore récemment, il n'existait pas de méthodes simples permettant de les mesurer sans détruire la structure. A ce jour, les méthodes les plus utilisées pour leur détermination, nous citerons entre autre :

- La méthode du TREPAN,
- La méthode par enlèvement de couches,
- La méthode du trou,
- La méthode par diffraction X.

Pour préparer au mieux et conduire efficacement les mesures ou pour analyser correctement les résultats des expériences effectuées dans la détermination du champ de contraintes résiduelles d'une pièce mécanique, tout ce qui concerne la nature du matériau et l'historique d'élaboration est précieux. L'origine du matériau, sa composition chimique, la nature et la proportion des phases en présence en surface et/ou en volume doivent être connues.

Par ailleurs, la connaissance du mode d'élaboration du multimatériau et de la pièce mécanique comprenant les opérations de mise en forme, d'assemblage ou de dépôt et les traitements thermiques ou mécaniques qui leurs sont associés, est un paramètre primordial dans l'interprétation. Il en est de même pour les gammes d'usinage ou toute autre opération introduisant des perturbations en surface ou en volume. La description des modes de sollicitations en service est indispensable (fatigue, corrosion, frottements, choc thermique...).

Tous les matériaux sont le siège de contraintes résiduelles si une étape dans l'historique cause une inhomogénéité de déformation plastique. Entre autres au sein d'un matériau fragile, on peut noter :

- Le procédé de frittage,
- Le fluage sous charge,
- L'usinage mécanique,
- La trempe superficielle,
- Les traitements thermiques, chimiques, mécaniques.

La détermination du champ de contraintes résiduelles permet leur estimation en surface. C'est un renseignement très utile pour le chercheur et l'ingénieur dans la caractérisation d'un traitement de surface superficiel.

En ce qui concerne la maîtrise des contraintes résiduelles, leur limitation au sein du substrat et aux points singuliers (principalement l'interface) est recherchée pour diminuer et atténuer au plus les possibilités de rupture par fissuration des pièces. Le contrôle de quelques paramètres par l'expérimentation ou par la modélisation mathématique permet sans aucun doute de guider l'expérimentateur et le praticien dans le choix des traitements de surface et des dépôts des substrats.

Pour cela, les refroidissements lents ainsi que le choix des matériaux avec des coefficients de dilatation thermiques proches (quand cela est possible) sont plus qu'indiqués. A titre d'exemple, dans le cas des dépôts par projection thermique, un maintien à faible température du substrat permet de limiter les contraintes de traction dans le dépôt.

Les contraintes résiduelles peuvent être fatales à la liaison. Une rupture n'est pas forcément attribuée aux contraintes résiduelles mais à des problèmes liés aux mécanismes d'adhésion.

Le contrôle de la liaison s'effectue par tests mécaniques en considérant qu'un état de contraintes satisfaisant donne la tenue mécanique la plus élevée. Cette étude est utilisée couramment pour vérifier les études paramétriques conduites par modélisation. En toute rigueur, il faut considérer que le champ de contraintes appliquées se superpose au champ de contraintes résiduelles, celui-ci dépendant directement de l'essai mécanique pratiqué et de la géométrie d'éprouvette testée.

VI.3 MODELISATION MATHÉMATIQUE.

Depuis longtemps et principalement durant ces dernières années où l'outil informatique a révolutionné toutes les sciences. A cet effet, la simulation mathématique est devenue un outil de recherche incontournable. Elle nécessite la mobilisation de peu de moyens. Elle est rapide et surtout économique. Cela ne signifie nullement l'abandon des montages expérimentaux qui restent un moyen de vérification des résultats obtenus.

Bien entendu, beaucoup d'autres avantages militent en faveur de la modélisation. Nous citerons entre autres :

- L'étude par simple calcul des différents paramètres d'un procédé (anodisation ou projection thermique par exemple),
- La résolution d'un problème par approche numérique est bien plus économique que par expérience dans un laboratoire,
- La compréhension de l'évolution de procédés par rapport aux mécanismes fondamentaux,
- L'utilisation dans le contrôle et l'optimisation des procédés.

La simulation ou la modélisation mathématique d'un problème scientifique et technique donné est très complexe. Pour cela, il y va d'un grand intérêt à cerner tous les comportements des paramètres physiques.

Dans notre cas, en nous basant sur les différents paramètres des traitements de surface et de protection (anodisation, projection thermique, préparation des échantillons, substrat...), la mise en place d'un modèle mathématique optimisant les différents facteurs de réalisation des multimatériaux est nécessaire et indispensable. Une étude de l'interface, sous tous ses angles, est plus qu'indiquée.

Les hypothèses se classent comme suit :

- **Hypothèses fondamentales et simplificatrices**, elles conduisent à l'écriture des équations de l'élasticité linéaire.
- **Contraintes résiduelles** : des contraintes résiduelles existent souvent dans un revêtement de surface. Elles sont créées en particulier lors de la réalisation du revêtement de protection. Cependant leur caractérisation actuelle ne permet pas de les inclure dans une modélisation. En effet, il est très difficile de prédire leur distribution dans l'épaisseur du revêtement et comme elles évoluent au cours du temps. Les contraintes résiduelles seront donc négligées dans cette modélisation.

Les équations utilisées dans notre cas sont celles de Lamé (équations d'équilibre écrites en fonction des déplacements), où les effets d'inertie sont négligés.

$$\begin{cases} 2(1-\gamma_j) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (1-2\gamma_j) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - 2(1+\gamma_j)\alpha_j \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ 2(1-\gamma_j) \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + (1-2\gamma_j) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - 2(1+\gamma_j)\alpha_j \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

On utilise aussi les relations contraintes / déplacements:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{xx}}{2\mu_j} = \frac{1-\gamma_j}{1-2\gamma_j} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\gamma_j}{1-2\gamma_j} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1+\gamma_j}{1-2\gamma_j} \alpha_j T \\ \frac{\sigma_{yy}}{2\mu_j} = \frac{1-\gamma_j}{1-2\gamma_j} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\gamma_j}{1-2\gamma_j} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1+\gamma_j}{1-2\gamma_j} \alpha_j T \\ \frac{\sigma_{xy}}{2\mu_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \sigma_{zz} = \gamma_j (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E_j \alpha_j T \\ 2\mu_j = \frac{E_j}{1+\gamma_j} \end{cases}$$

Ces équations sont valables dans le cas de déformations planes ($\varepsilon_{zz} = 0$).

Pour le calcul en contraintes planes ($\sigma_{zz} = 0$), il suffit d'utiliser ces équations en remplaçant :

$$\begin{aligned} E_j & \text{ par } \frac{(1+2\gamma_j)}{(1+\gamma_j)} E_j \\ \gamma_j & \text{ par } \frac{\gamma_j}{(1+\gamma_j)} \\ \alpha_j & \text{ par } \frac{(1+\gamma_j)}{(1+2\gamma_j)} \alpha_j \end{aligned}$$

Où :

- E_j module d'Young de la couche j ;
- γ_j coefficient de Poisson de la couche j ;
- α_j coefficient de dilatation de la couche j .

Les conditions sont définies en fonctions des problèmes à résoudre:

- la connaissance des chargements sur les surfaces extérieures et les déplacements,
- l'assemblage de couches (substrat + revêtements) conduit à écrire la continuité à
 - ❖ des déplacements u . et v .
 - ❖ des contraintes normales à l'interface σ_{xx} et σ_{yy} .

Les principales méthodes de résolution des équations précédentes peuvent être groupées en deux catégories:

- les méthodes analytiques,
- les méthodes numériques.

VI.4 CONCLUSION DU CHAPITRE.

Le choix d'une méthode de mesure de contraintes résiduelles s'effectuera en fonction des objectifs ou des possibilités naturelles de chacune. Mais la modélisation mathématique reste un moyen de résolution incontournable. Pour cela, la résolution de ces équations par l'une et/ou l'autre méthode permettra d'effectuer un choix optimal des paramètres d'élaboration des traitements de surface et/ou des revêtements en vue de l'obtention de la qualité de protection désirée.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'histoire de la protection des surfaces montre l'importance accordée à ces traitements à travers les générations et les âges. L'anodisation d'abord et l'anodisation dure ensuite sont des traitements de surfaces relativement anciens en comparaison à la projection thermique qui date de ce dernier siècle.

A travers cette étude, il ressort que la projection thermique à l'arc électrique est plus qu'un concurrent sérieux pour les traitements de surface par anodisation pour certaines applications malgré les différents avantages présentés. Cette étude a montré qu'un revêtement par projection thermique permet d'obtenir des caractéristiques intéressantes et en particulier une bonne tenue à l'usure.

Des différents essais, analyses et observations effectués, il y a lieu de retenir:

- à l'interface, la dureté et la microdureté sont légèrement supérieures que sur le dépôt et le substrat (cas de l'utilisation de la sous couche d'accrochage). Ceci est expliqué par la diminution de la porosité et une dispersion correcte des composés intermétalliques. Les analyses au MEB et à la microsonde le confirment.

- dans le cas d'un dépôt **sans** sous couche d'accrochage, l'observation d'une forte porosité ainsi qu'une répartition aléatoire des éléments est frappante. Cette constatation met en évidence l'importance de la sous couche d'accrochage dans l'amélioration de l'adhérence et l'obtention des propriétés mécaniques importantes.

- l'échantillon ayant subi un **post- traitement** à la température de 480°C à 500°C pendant deux heures, réalise un meilleur compromis. On qu'une diffusion d'éléments entre dépôt / substrat a eu lieu grâce à une formation éventuelle de composés intermétalliques au niveau de l'interface. C'est le renforcement de la liaison dépôt / substrat réalisé par un accrochage métallurgique.

- pour l'échantillon **anodisé**, on observe une très bonne continuité (absence de la ligne de séparation) entre le dépôt et le substrat.

- le comportement au frottement des dépôts projetés est meilleur que celui du substrat anodisé seul.

A travers ce travail, nous avons montré que la projection thermique sur les alliages d'aluminium (A-U4G: matériau aéronautique) est plus qu'indiquée en remplacement dans bien des cas (surtout les pièces d'anodisation dure d'origine de chez le constructeur) des traitements de surface.

Une approche mathématique pour l'optimisation des paramètres à prendre en considération lors d'une protection est proposée. Celle-ci nous permettra une meilleure compréhension des phénomènes à prendre en compte.

Aussi, par la résolution des équations proposées dans l'approche de la modélisation mathématique des paramètres régissant l'interface dépôt / substrat, il sera ouvert d'autres horizons de réalisation de traitements de surface et de revêtements dans des conditions optimales et beaucoup moins coûteuses. Ce sera un axe d'effort à privilégier.

Nous retiendrons que l'utilisateur, dans le cadre de l'exploitation et de la réparation des avions, est toujours confronté à des problèmes techniques dont la résolution est un compromis. La décision est bien très difficile à prendre. Nous noterons que beaucoup de problèmes rencontrés quotidiennement dans l'industrie aéronautique sont susceptibles d'être développés à savoir :

- *L'influences des paramètres opératoires sur les propriétés mécaniques du dépôt*
- *Les traitements thermiques et mécaniques après dépôt,*
- *Les contraintes internes,*
- *Les couches barrières de diffusion.*

Recommandations:

- *Résolution mathématique du modèle c'est à dire la validation ;*
- *Effectuer les mêmes dépôts sur l'A-U4G décapé pour éviter l' Al_2O_3 qui forme barrière de diffusion.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [1]- **Ingénieurs Groupe PECHINEY** : L'Aluminium, Tome II, Editions Eyrolles Paris pp 500-631 (1964).
- [2]- **S.AUDISIO, M.CAILLET, A.GALERIE et H.MAZILLE** : Traitements de surface et protection contre la corrosion / Ecole d'été d'Aussois, pp 3-10, 107-118, 229-241, 662 (1987).
- [3]- **Z.HAMMOUCHE, E.H.BOUDRA** : Etude de la diffusion du cuivre dans l'aluminium déposé par évaporation. Thèse de fin d'études HCR/Alger (1992).
- [4]- **J.F.BOSICH** : Prévention de la corrosion. Entreprise moderne, Edition techniques et documentations Paris.
- [5]- **M.A.BRADAI** : Etude des mécanismes de dégradation en fatigue et caractérisation des multimatériaux réalisés par projections thermiques. Thèse de magister, E.N.P./Alger (1995).
- [6]- **D.ALTENPOHL** : Un regard à l'intérieur de l'aluminium. Feldmeilen (Suisse), pp 15-33, 170-172 (1976).
- [7]- **I.LAKHTINE** : Métallographie et traitements thermiques des métaux, Editions MIR Moscou pp 367-386 (1978).
- [8]- **PHILIP A. Schweitzer, P.E.**: Corrosion, Engineering Handbook, pp 99-117 (1996).
- [9]- **E.A.BELHADEF, E.H.GACEM** : Etude d'une oxydation anodique. Thèse de fin d'étude, USTHB/Alger (octobre 1995).
- [10]- **B.DJERDJAR** : Etude et réalisation d'un traitement de surface des alliages légers à base d'aluminium-silicium par slurry-coating. Thèse de magister, ENP/Alger (1993).
- [11]- **C.CHAUSSIN, G.HILLY** : Métallurgie. Dunod (1976).
- [12]- **L.QUEVRON et L.OUDINE** : Cours de métallurgie. Eyrolles-Editions Paris (1972).
- [13]- **SCIENCE ET VIE** : Comment naît un avion de combat, N°861, pp 90-98, 166-169 (juin 1989).
- [14]- **M.BODA** : La corrosion dans les structures d'avions. Matériaux et techniques (juin 1989).
- [15]- **D.AGOSTINI** : L'entretien des structures d'avions, pp 33-37 (mai 1986).

- [16]- **LA RECHERCHE AEROSPATIALE** : "Matériaux" N°5 et 6, pp 393-407 (1996).
- [17]- **R.TINER, A.CORNIVO, M.BOUSSEAU** : Impulsion de la défense dans la révolution des matériaux, pp 3-114 (1986).
- [18]- **DIRECTION CENTRALE DU MATERIEL DE L'ARMEE DE L'AIR FRANCAISE** : Prévention et traitement des matériels techniques contre la corrosion (Décembre 1993).
- [19]- **E.TRIKI** : Phénomène de la corrosion (définition, processus, morphologie), **Première Ecole Maghrebine de corrosion / Tunisie** (Décembre 1990).
- [20]- **C.FIAUD** : Cinétique électrochimique, **Première Ecole Maghrebine de corrosion / Tunisie** (Décembre 1990).
- [21]- **M.PAGETTI** : Introduction sur l'importance de la corrosion, **Deuxième Ecole Maghrebine de corrosion / Alger** (Avril 1993).
- [22]- **Mme GHIMOUZ** : Morphologie de la corrosion, **Deuxième Ecole Maghrebine de corrosion / Alger** (Avril 1993).
- [23]- **F.HELLAL** : la corrosion par frottements, **Deuxième Ecole Maghrebine de corrosion / Alger** (Avril 1993).
- [24]- **E.TRIKI** : Les revêtements, **Deuxième Ecole Maghrebine de corrosion / Alger** (Avril 1993).
- [25]- **M.PAGETTI** : Traitements de surfaces, **Deuxième Ecole Maghrebine de corrosion / Alger** (Avril 1993).
- [26]- **CETIM** : Manuel des traitements de surface à l'usage des bureaux d'étude, Tome I et Tome II, pp 259-291 (1990).
- [27]- **J.P.RIQUE** : Protection des alliages d'aluminium à l'aide de peintures. International CELOMER, pp 1-33 (septembre 1983).
- [28]- **S.BELDJILALI** : Elaboration d'un revêtement anti-oxydation et anti-usure d'un acier peu allié. Thèse de fin d'étude, ENP/Alger (1995).
- [29]- **AFNOR-NATHAN** : Précis de construction mécanique Tomes I, II et III (1979).
- [30]- **M.TAIBI, J.BLOUET, A.BOUABDALLAAH** : Modélisation expérimentale de l'usure abrasive à trois corps des moteurs industriels fonctionnant en environnement saharien, **LE PREMIER CONGRES MAGHREBIN de mécanique, Ghardaia /Algérie**, pp 70-76 (Mars 1996).

- [31]- **M.T.KHABOU, A.DHIAB** : Prévion des contraintes résiduelles introduites par grenailage dans un matériau à haute limite élastique, **LE PREMIER CONGRES MAGHREBIN** de mécanique, Ghardaia /Algérie, pp 152-157 (Mars 1996).
- [32]- **L.HADDOUR, N.MESRATI, D.TREHEEUX** : Frottement d'un multimatériau type 35CD4/75E /55E + 65E , rôle des particules d'usure (3^{ème} corps), **LE PREMIER CONGRES MAGHREBIN** de mécanique, Ghardaia /Algérie, pp 223-229 (Mars 1996).
- [33]- **A.BELHAMZAOU, N.E.ZEGHIB** : Etude expérimentale de l'usure par petits débattements (application aux roulements), **LE PREMIER CONGRES MAGHREBIN** de mécanique, Ghardaia /Algérie, pp 409-411 (Mars 1996).
- [34]- **N.MESRATI, D.TREHEUX** : Etude et réalisation d'interface à base d'Al/ZRO2 et graphite/ZRO2 par slurry coating et projection plasma, **LE PREMIER CONGRES MAGHREBIN** de mécanique, Ghardaia /Algérie, pp 425-431 (Mars 1996).
- [35]- **K.ABOURAYOU** : Comportement tribologique à chaud de couches minces extraduures obtenues par déposition en phase vapeur (PVD). Thèse de doctorat, ECLyon (1996).
- [36]- **L.HADDOUR** : Comportement au frottement d'un multimatériau type 35CD4 / 75E / 55E-65E réalisé par projection thermique. Thèse de magister ENP/Alger (1995).
- [37]- **C.COLIN** : Les mécanismes de l'usure et du frottement. Traitements thermiques N°208, pp 79-96 (1987).
- [38]- **D.BOUKROUNE** : Etude du comportement en frottement-usure des traitements de surface réalisés par chromage dur et nitruration liquide. Thèse de magister, ENP/Alger (1998).
- [39]- **VAN NESTE** : Transformation dans l'état solide (journées d'études), ENP/Alger (1992).
- [40]- **B.MALKI** : Etude de la projection thermique sur deux pièces mécaniques d'un moteur Diésel. Thèse de fin d'étude, ENP/Alger (1992).
- [41]- **J.P.PEYRE, C.TOURNIER** : Choix des traitements thermiques superficiels. CETIM pp 1-34 (1993).
- [42]- **GUY LORIN** : La phosphatation des métaux. Eyrolles-Editions Paris (1973).
- [43]- **AGFA / NDT** : La radiologie industrielle. Agfa-Gevaert NV (1988)
- [44]- **M. DOCUS** : Revêtements par projection thermique, Techniques de l'Ingénieur M5, M1645 (1992).
- [45]- **CETIM** : Guide pratique de la projection thermique (1989).
- [46]- **W.E.BALLARD** : Metal spraying and flamme deposition of ceramics and plastics. 4th edition, London (1963).

- [47]- **H.CLAIRE, E.CRAWELL** : Thermal spraying coating, Metal Hand Book, volume 5, 9th edition (1982).
- [48]- **P.CHAGNON, A.TRONCHE, P.FAUCHAIS** : Frottement des dépôts d'alumine projetés par plasma. Industrie céramique N°805, pp 319-324 (1986).
- [49]- **Manuel d'entretien du pistolet ARCSPRAY 234.**
- [50]- **H.S.INGHAM, A.P.SHEPARD** : Manuel de la projection à la flamme. METCO / France, Tome II pp 2-106 (1990).
- [51]- **C.URBAN** : La projection au chalumeau à plasma. Edition L.Demarques et Cie, pp 5-21.
- [52]- **CASTOLIN EUTECTIC** : Produits et procédés métallurgiques de maintenance et réparation, pp 1-36 (1986).
- [53]- **A.CONSTANT, G.HENRY, J.C.CHARBONNIER** : Principes de base des traitements thermiques thermomécaniques et thermochimiques des aciers Paris (1992).
- [54]- **M.A LAROCHE, F.MORTIER** : Contrôle des revêtements électrolytiques et chimiques CETIM Paris (1989).
- [55]- **A.BETTAYEB** : Contribution à l'étude du comportement des secteurs circulaires revêtus, élastiques et viscoélastiques: Développement d'un modèle analytique en 2D et 3D Thèse de Doctorat, Poitiers (1994).
- [56]- **N.MESRATI, Du NGUEN, D.TREHEUX** : Rôle du zinc et de l'argent sur l'adhérence de zircone projetée sur un alliage d'aluminium silicium à 12%. La revue de métallurgie-CIT/Science et génie des matériaux (décembre 1993).
- [57]- **A. et C.MILLION** : L'hydrogène dans les aciers et les joints soudés. Dunod Paris (1971).
- [58]- **A.AGUIS, M.FROMENT** : Surfaces, interfaces et films minces. Dunod Poitiers (1990).
- [59]- **AIR&COSMOS** : La "couture" vole au secours des composites N°1560, p.36-38 (avril 1996)
- [60]- **AIR&COSMOS** : L'industrie des composites se restructure N°1548, p.32-34 (janvier 1996).
- [61]- **AIR&COSMOS** : Une peinture hydrodiluable pour avions N°1568, p 29 (mars 1996).
- [62]- **AIR&COSMOS** : Matériaux et procédés innovants pour le M88-2, N°1563 p.24 (avril 1996)

- [63]- **AIR&COSMOS** : Des tôles ultrafortes chez PECHINEY RHENALU, N°1545/46 p.47 (décembre 1995).
- [64]- **AIR&COSMOS** : Pas de deux pour les matériaux aéronautiques, N°1545/46 p.27 (décembre 1995).
- [65]- **AIR&COSMOS** : La fonderie poursuit sa restructuration, N°1580 p.30-34 (septembre 1996).
- [66]- **AIR&COSMOS** : KLOCKNER METAL SERVICE se renforce en France, N°1585 p.25 (novembre 1996).
- [67]- **AIR&COSMOS** : STRUCTIL prend pied dans les préimprégnés, N°1586, p.22, (novembre 1996)
- [68]- **AIR&COSMOS** : Protections de surfaces plus performantes, N°1572, p.21-22, (juin 1996).
- [69]- **AIR&COSMOS** : Des peintures accrocheuses mais décapables, N°1571, p.22, (juin 1996).
- [70]- **VINCENT GUIPONT** : Détermination expérimentale des contraintes résiduelles au sein d'assemblages céramique/métal réalisés par brasage : Application au couple nitrure de silicium/acier doux., Thèse de Doctorat, ECLyon (1994).
- [71]- **Y.ISSAAD** : Modélisation mathématique des contraintes résiduelles d'un matériau traité en surface. Thèse de fin d'études, ENP/Alger (1998).

Thèse de Magister : Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

SADKI Abdallah	Date de soutenance
	11 Octobre 1998
ETUDE DE LA PROTECTION DU MATERIAU AERONAUTIQUE A-U4G	
Thèse de MAGISTER – Spécialité : Métallurgie	
Résumé	
<p><i>Cette étude consiste à réaliser sur le matériau aéronautique A-U4G des protections par anodisation (ou anodisation dure) et par projection thermique à l'arc électrique afin d'augmenter sa résistance à la corrosion et à l'usure.</i></p> <p><i>Le but de ce travail est de cerner les problèmes de protections de ce matériau utilisé, en particulier, sur certaines pièces nécessitant à la fois un traitement contre la corrosion et l'usure. L'approche est basée sur la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'interface dépôt/substrat. Une approche mathématique est proposée pour l'optimisation des paramètres.</i></p>	
Mots Clés : A-U4G, Anodisation, Projection thermique, Adhérence, Frottement-Usure, Modélisation mathématique.	
Laboratoire de recherche : Département Métallurgie, Laboratoire de Génie des Matériaux Ecole Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassen Badi. Alger	
Directeur de thèse : M. MESRATI Nadir (Maître de conférences)	
Composition du jury : MM. E. SALHI, N. MESRATI, D. N'GUYEN, M. LARIBI, A. BETTAYEB, K. NECIB, M. DAMOU.	