

0851 211

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB -BLIDA
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'Aéronautique



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'ingénieur d'état en
Aéronautique.

Option: Structure.

Thème

**Etude et Analyse de Réparation de la corrosion
des ferrures
d'une butée d'attache entrée d'air d'un moteur
d'avion**

Encadrée par :

Mme. ASSOUL Yasmina

Mr. GHERBI Amar

Présentée par :

Mlle. SALAH Fahima

Promotion: 2010-2011

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein de la nouvelle base de maintenance et réparation des aéronefs d'Air Algérie à Dar-el Beidha.

En tout premier lieu, je remercie DIEU ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour faire mon devoir.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance et toute ma gratitude tout particulièrement à ma promotrice : **Mme. Assoul Yasmina** pour leur encadrement, leurs conseils et encouragements. Votre rigueur scientifique, votre persévérance, sont pour moi des exemples.

J'adresse mes remerciements les plus vifs à mon Co-promoteur : **Mr. Gherbi Amar**, Chef service d'atelier Protection et traitement de surface. Je le remercie pour tout le savoir qu'il a pu me transmettre au travers de nos nombreux échanges tout au long de ce travail, ainsi que pour leur soutien infaillible. Je souhaite mettre l'accent sur ses qualités humaines, son enthousiasme et sa grande disponibilité qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail, malgré son planning chargé, le tout dans une parfaite entente. Je suis fier d'avoir été une de vos stagiaires.

Un grand merci à **Mr. Tsabit Ali**, Cef de Dépt. Structure de la base de maintenance et réparation des aéronefs d'Air Algérie, Je lui suis très reconnaissant de m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet passionnant, de m'avoir accueilli à la base, et qui a participé directement ou indirectement à l'accomplissement de ce travail.

Evidemment, je remercie profondément Monsieur **Mr. Ziane Ahmed** Chef service de Structure, qui m'a fait l'honneur de participer au jury. Je souhaite lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui m'ont entouré tout au long de cette aventure, Mr. Ben Zetta Kamel, Mr. Tarabet Radhouane de l'ingéniering, Mr. Ben youcef, Mr. Azi, ainsi que le chef d'atelier Protection et traitement de surface Mr. Omar, et en particulier âmi Yahyaoui Chef d'atelier Structure, Mr. Loukari abdennour et Mr. Mehidi Lakhdar d'atelier NDT, Mme. Fatiha et Mr. Mahmoud de sevice de stage, et tous les ingénieurs et les techniciens de la base, en particulier d'atelier Protection et traitement de surface, d'atelier Structure, NDT, et d'atelier Mécanique générale.

Un immense merci et toute ma gratitude à tous les Enseignants du Département d'Aéronautique de BLIDA, en particulier, Dr. Benkhedda Amina, Chef Département d'Aéronautique, Mr. Boukraa, Mr. Chegrani Ahmed, Mr. Bergel, Mme. Hamadouche Amel, Mr. Abada Omar.

Sans oublier les Enseignants du Département de Génie mécanique D. Temmar, P. Nacer. E. Bacha, P. Hadji, Mme Hannache et Mr. A. Abderrahmane.

J'adresse mes plus sincères remerciements à ceux qui m'ont soutenu moralement indéfectiblement durant toutes les phases de ma vie, et qui m'ont appris toutes les bonne valeurs : à mon père, et à ma chère et tendre mère. Merci tout simplement d'être papa et maman. Je n'aurais certainement pas fait tout cela sans vous. Encore merci.

Je tiens bien sûr à remercier mes frères et mes soeurs, de m'avoir aidés durant ces longues années d'études et qui ont toujours été présent quand j'ai eu besoin d'eux.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont, d'une manière ou d'une autre, participé à la réalisation de ce travail et qui ont fait de cette année, une expérience unique et inoubliable.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ceux qui m'ont encouragée et soutenue tout le long de mes études:

Mes très chers parents et que Dieu les protège.

À mes sœurs et mes frères

À mes nièces Ilhem, Aya

À mon neveu Youcef

À toute ma famille

À ma meilleure amie Nacera

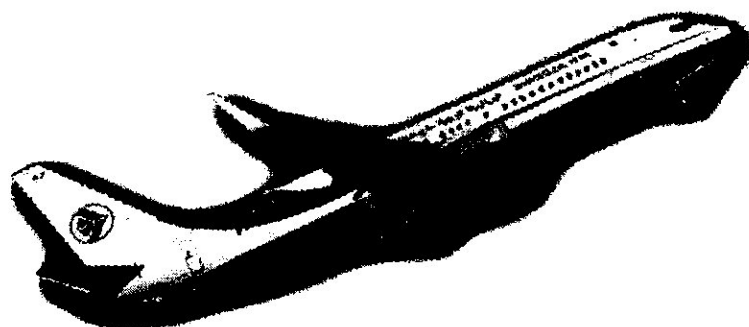
et sa famille

À tous mes amis

À tous les étudiants d'aéronautique.

Salah fahima

*PRESENTATION DE
L'ÉTUDE*



Présentation de l'étude

À l'heure où le développement et la conception d'avions dont la teneur en matériaux composites dépasse les 50% (Boeing B787 et Airbus A350) apparaissent comme des enjeux majeurs pour les industriels de l'aéronautique, il n'est pas déraisonnable de continuer à faire progresser la connaissance sur les matériaux métalliques, parce qu'ils sont présents en forte proportion sur les avions des flottes actuelles. Parmi ces matériaux, les alliages d'aluminium sont très couramment employés compte tenu de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur légèreté. Un avion tel que l'airbus A330 est composé à 73% d'alliages d'aluminium. Cependant ces alliages sont sensibles aux phénomènes de corrosion localisée dans les environnements dans lesquels ils évoluent.

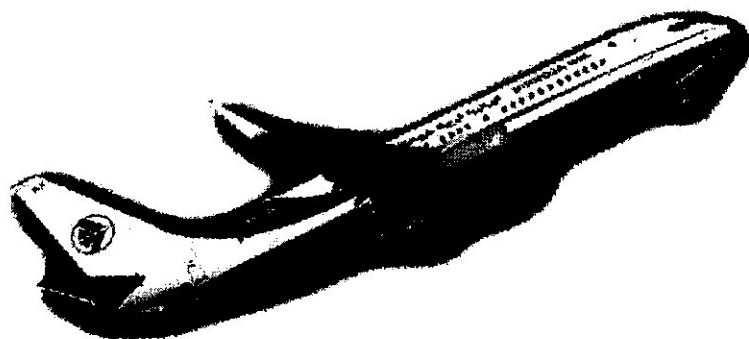
L'approche actuelle utilisée pour traiter les problèmes de corrosion qui apparaissent sur les avions en service est une approche « zéro défaut », c'est-à-dire qu'aucun défaut de corrosion n'est accepté dans la limite de détection des méthodes de contrôles non destructifs actuellement utilisées. Par conséquent, tout défaut de corrosion qui est détecté doit être réparé ou la pièce endommagée doit être remplacée. Cette approche induit des coûts de maintenance très importants. Afin de pallier cette difficulté, deux solutions sont envisagées. Dans la première approche, il ne s'agit plus de refuser tout défaut mais d'accepter l'existence des dommages de corrosion en assurant la sécurité des flottes par une parfaite maîtrise de la propagation de ces défauts. Il s'agit donc d'une approche prédictive de la corrosion. La seconde consiste à travailler sur la mise au point de méthodes de protection infaillibles. C'est cette méthode là qui a fait l'objet de ce travail de thèse, l'objectif est donc ici de protéger contre la corrosion des ferrures de fixation d'entrée d'air-moteur CF6-80E1 d'un avion A330-200, qu'ils sont en alliage d'aluminium 7075, traditionnellement utilisé pour le fuselage des avions civils. Parmi les différents

types de corrosion affectant la durabilité des ferrures, dans certains milieux, la corrosion par piqûres apparaît clairement comme un processus du premier ordre.

Ce mémoire de thèse s'articulera autour de quatre chapitres :

- ➔ Dans un premier temps, il nous apparut indispensable de réaliser une synthèse bibliographique concernant l'entrée d'air de A330-200 et le moteur CF6-80 E1, ainsi que les ferrures d'attache.
- ➔ Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les alliages d'aluminium et leurs différentes propriétés et traitements.
- ➔ Le chapitre III est un aperçu sur les différentes formes de corrosion qui pourront être observées avec la caractérisation du comportement à la corrosion des alliages d'aluminium.
- ➔ Le quatrième chapitre a pour but de présenter les différentes méthodes pour la protection des alliages d'aluminium contre la corrosion.
- ➔ Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la réparation et la protection contre la corrosion des ferrures d'attache entrée d'air-moteur par l'utilisation des voies d'inhibition à base de chrome hexavalent *l'alodine 1200* et *époxy primaire BMS*.

CHAPITRE I
ETUDE DESCRIPTIVE
D'ENTRÉE D'AIR-MOTEUR



Introduction

Au sein de la nouvelle base de maintenance de la compagnie d'Air Algérie, il a été signalé la découverte de corrosion au niveau des trous des ferrures d'attachement de la butée de l'entrée d'air-moteur, lors du démontage du capot pour une réparation indépendante. Le turboréacteur considéré est le CF6-80E1 monte sur L'Airbus A330-200.

Ce chapitre commencera par donner un bref aperçu l'aéronef pour situer les emplacements des reacteurs. Il sera suivi par la présentation de la nacelle et du capot d'entrée d'air. La butée de l'entrée d'air permet la liaison entre le capot et le moteur grâce aux 36 ferrures.

Une représentation détaillée de la localisation des attaches affectées par la corrosion seront représentées.

Les causes incriminées semblent entre aux premières approches la corrosion atmosphérique.

I.1 Nacelle

La nacelle est constituée par la carène du moteur, l'entrée d'air, la tuyère et l'inverseur de poussée (figure I-1), qui est un équipement permettant de renverser le flux du moteur pour apporter un complément de freinage dans le but de ralentir l'avion et de réduire la distance que l'avion a besoin de s'arrêter en toute sécurité et efficacement. Des dispositifs de sécurité interdisent le déploiement des inverseurs pendant le vol et assurent qu'ils ne se déploient que lorsque le train d'atterrissage est sorti et touche le sol.

Sous l'aile d'avion (figure I-2), la nacelle est articulée par le pylône.

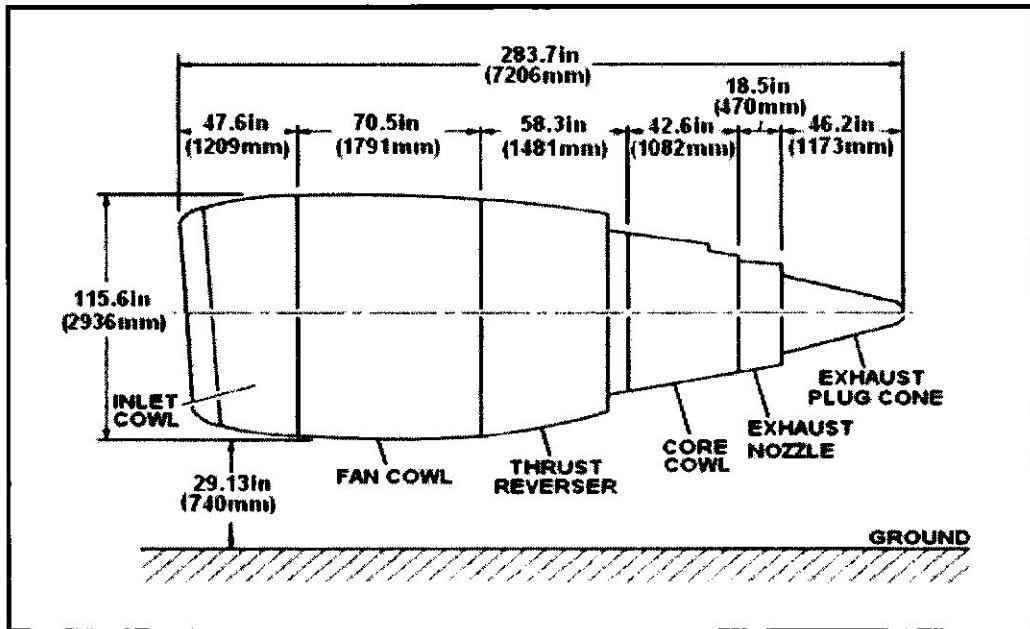


Figure I-1 : Les dimensions et les composantes de la nacelle d'avion A330-200[1].

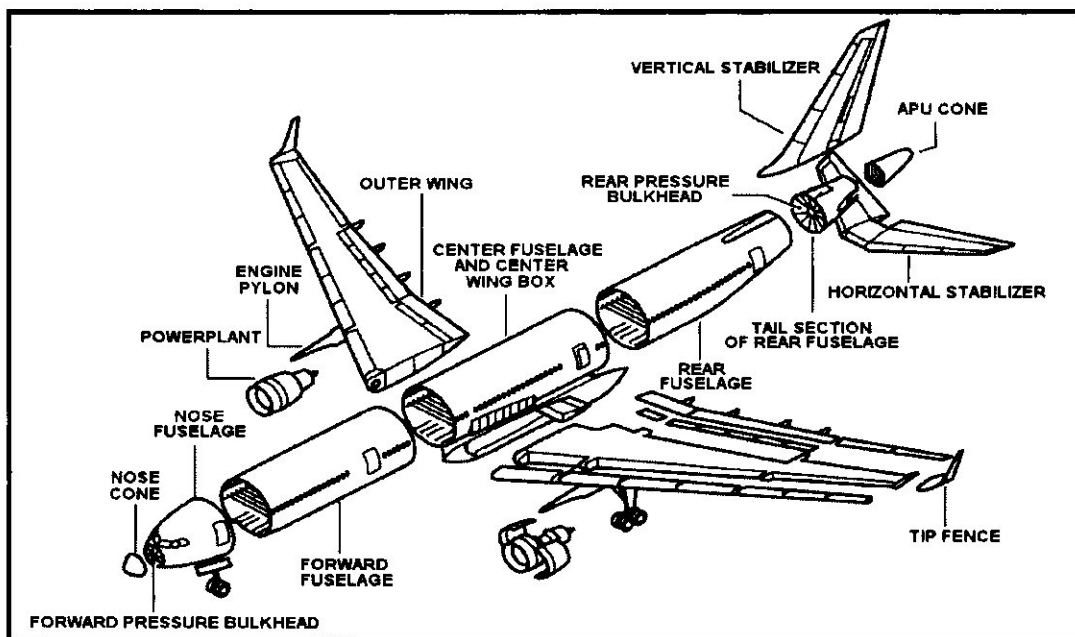


Figure I-2 : La structure de l'avion A330-200[1].

La nacelle fournit des filets d'air réguliers dans et autour du moteur. De plus, elle protège les composants du moteur et isole le moteur de la structure d'avion dans le cas d'un incendie moteur. Enfin, elle fournit également des ouvertures pour les drains de moteur et contient certains éléments d'inverseurs de poussée.

I.2 Capot d'entrée d'air

Le capot d'entrée d'air est à l'avant de la nacelle, il est constitué d'un anneau profilé en tôles légères, attaché à la butée avant le carter de fan du moteur, son rôle est de raccorder le plus avantageusement les filets d'air avec l'entrée du compresseur dans tous les régimes de vol et permet aussi le ralentissement des filets d'air.

Le capot d'entrée d'air comprend :

- Des cloisons avant et arrière.
- Un cylindre acoustique interne (3 pièces) et un cylindre externe (2 pièces).
- Une lèvre d'entrée (5 pièces).

L'ensemble comprend également:

- Un montage anti-givrage.
- Un connecteur téléphonique.
- Un connecteur de sol.
- Des provisions de levage.
- Matériel d'attache du moteur.

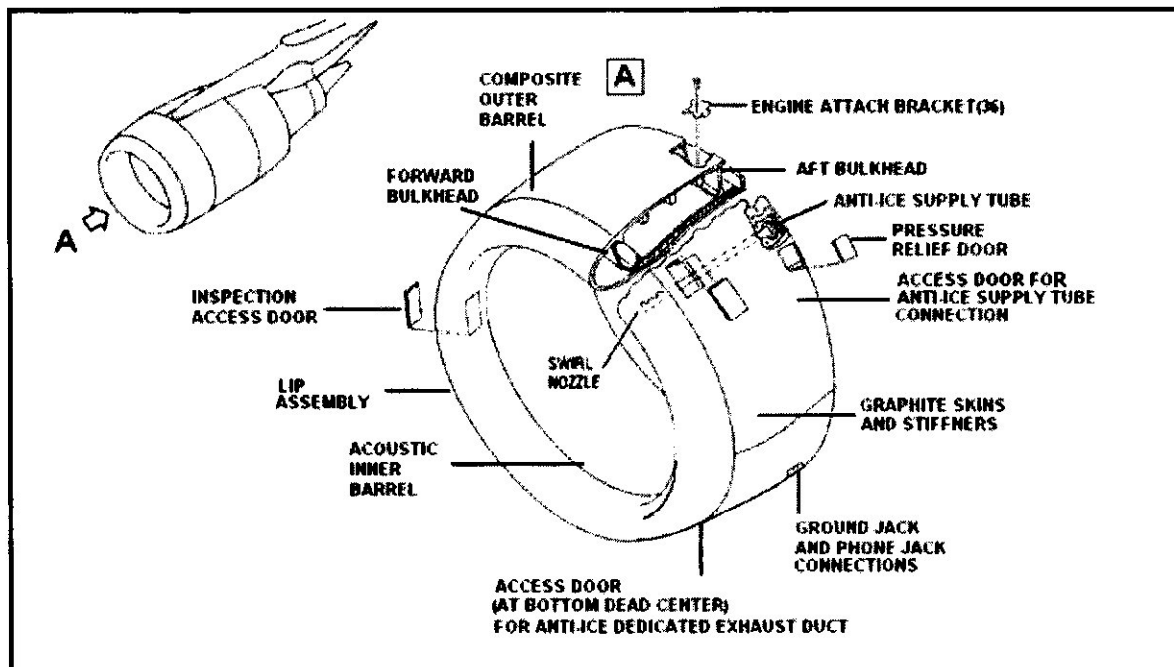


Figure I-3 : Les dimensions et les composantes de la nacelle d'avion A330-200[1].

I.2.1 Description des Composants

Le cylindre externe du capot d'entrée d'air est un composite sandwich. Le cylindre intérieur est composé de:

- Panneaux traités acoustiquement.
- Butée d'attache moteur.
- 36 ferrures de fixation.
- Deux broches de guidage.

Le capot d'entrée d'air peut être installé avec le moteur sur l'avion ou installé avec le moteur lorsque le moteur est enlevé.

Le cylindre intérieur est traité acoustiquement avec une peau époxy graphite et titane et la structure des panneaux en nid d'abeille. La surface acoustique est d'environ 63 carrés pieds.

Un connecteur de sol et Un connecteur téléphonique sont situés sur le côté gauche du capot de l'entrée d'air du cylindre externe. Le connecteur téléphonique permet une communication entre le mécanicien au sol et le cockpit au cours de l'entretien au sol. Un connecteur du sol fournit une interdiction de vol de l'avion lors de l'entretien au sol.

L'airbus A330-200 présente la particularité de pouvoir être propulsé par trois types de moteurs différents :

- Le CF6-80 E1 de General Electric
- Le PW 4000 de Pratt & Whitney
- Le Trent 700 de Rolls Royce.

Le turboréacteur est un système de propulsion par réaction produite par éjection de gaz de combustion d'un carburant. Une partie de l'énergie de ces gaz sert également à comprimer l'air utilisé comme comburant. Ils sont utilisés sur tous les avions civils moyen et gros porteurs car ils sont les seuls à pouvoir atteindre des vitesses transsoniques, entre mach 0,8 et mach 1, de manière économique.

I.3 Description du réacteur CF6-80 E1

Le CF6-80E1 est un moteur de nouvelle génération, turbo fan à double flux, à écoulement axial à haut taux de dilution (5.33), construit par General Electric. Il utilise uniquement 20% de la masse d'air pour la combustion (en couleur rouge) et 80% de cette masse passe à travers le double flux et qui sert pour la poussée et le refroidissement du moteur (en couleur bleu).

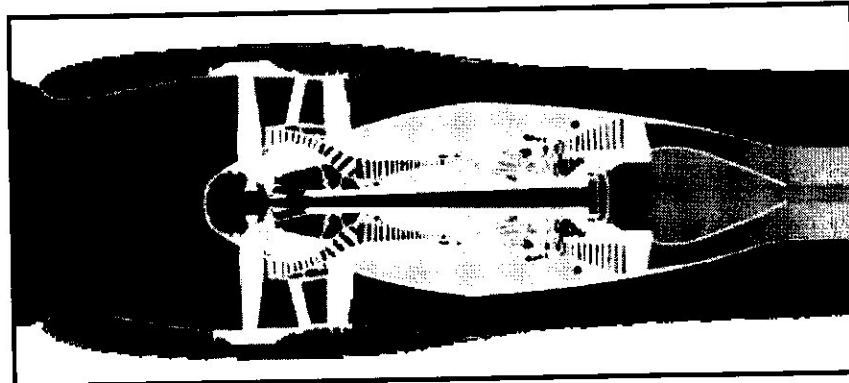


Figure I-4 : Le moteur CF6-80E1.

I.3.1 Caractéristiques du moteur CF6-80E1

Les dimensions principales du CF6-80E1 sont :

- La longueur du moteur : 4.28 m
- La hauteur de l'enveloppe : 2.88 m
- Longueur maximal de l'enveloppe : 2.90 m

Le poids et le centre de gravité :

- Le poids à sec du moteur : 5074 kg
- Le centre de gravité est localisé sur la station 218 (+/-20).

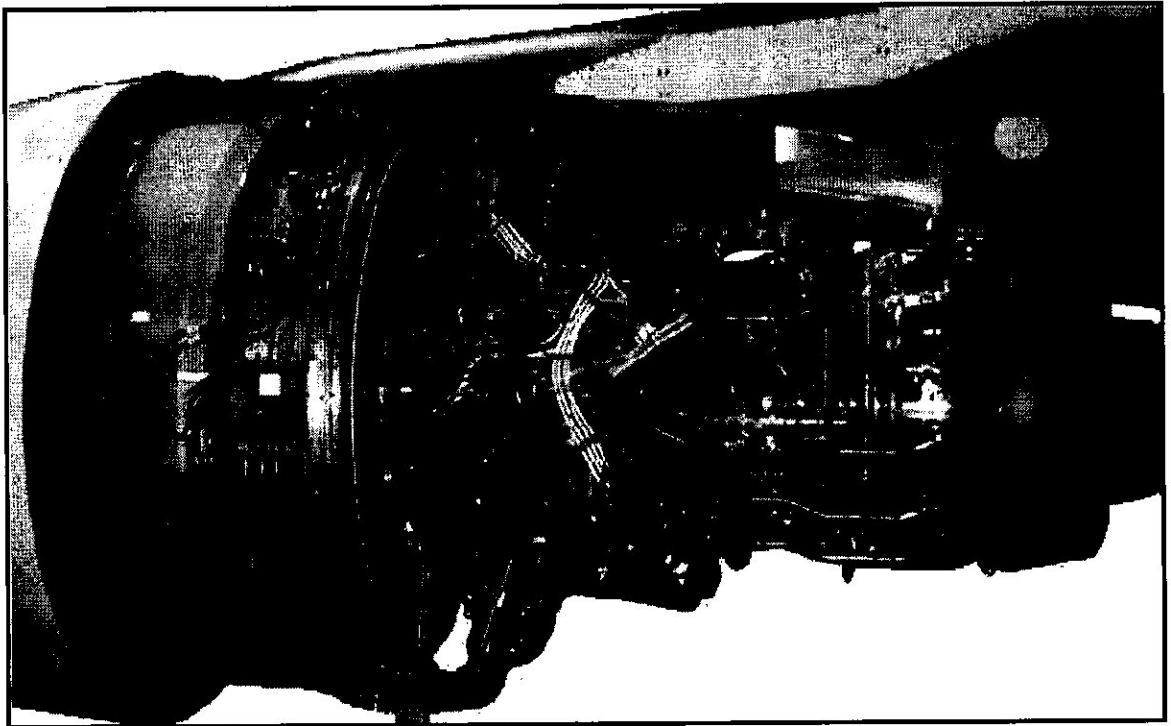


Figure I-5 : Photographie de la vue gauche du moteur CF6-80E1.

I.3.2 Les différents modules du moteur CF6-80E1

Le moteur CF6-80 E1 est composé de cinq principaux modules :

1. Module FAN.
2. Module Core.
3. Module turbine haute pression.
4. Module turbine basse pression.
5. Module boîte d'entraînement des accessoires.

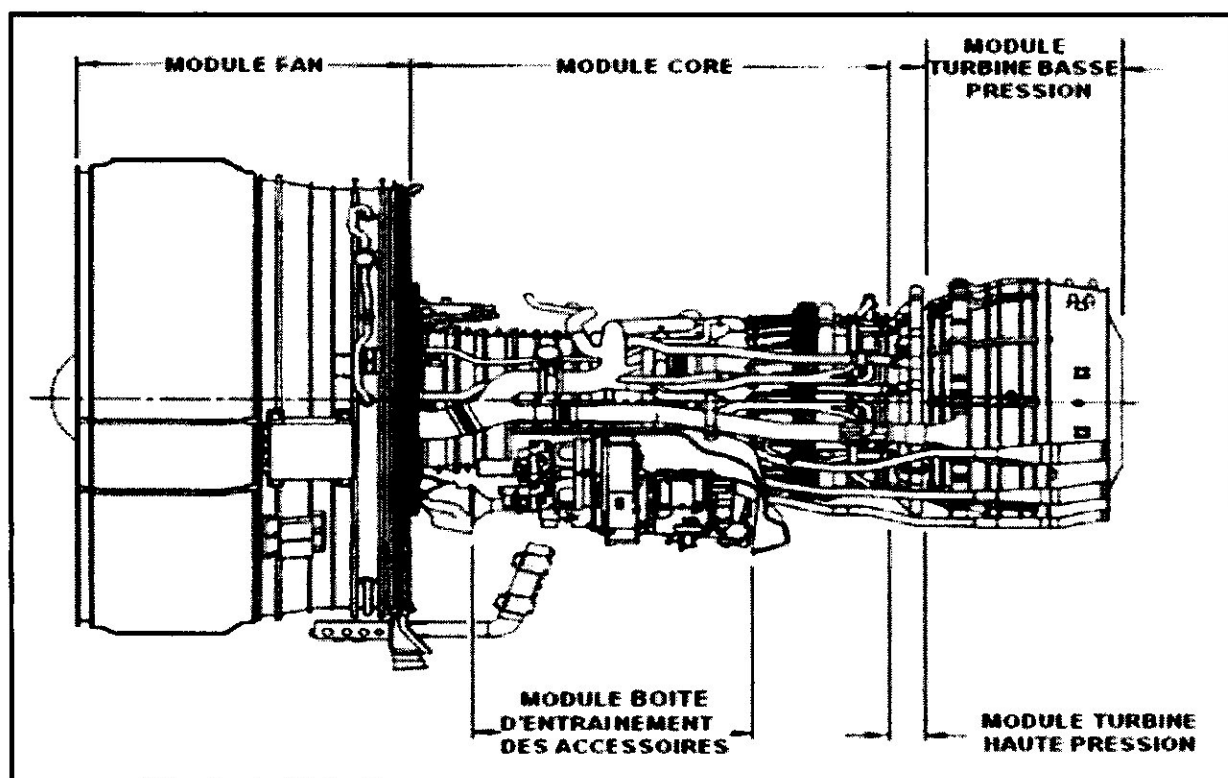


Figure I-6 : Les différents modules du moteur CF6-80E1.

I.4 Les ferrures d'attache entrée d'air-moteur

L'entrée d'air est fixée avec le moteur CF6-80E1 par des ferrures en aluminium, au niveau de ces dernières, il y a des trous de fixation. Le matériel d'attache est composé de 36, de chaque :

- Ferrure,
- boulon inconel,
- rondelles et écrous.

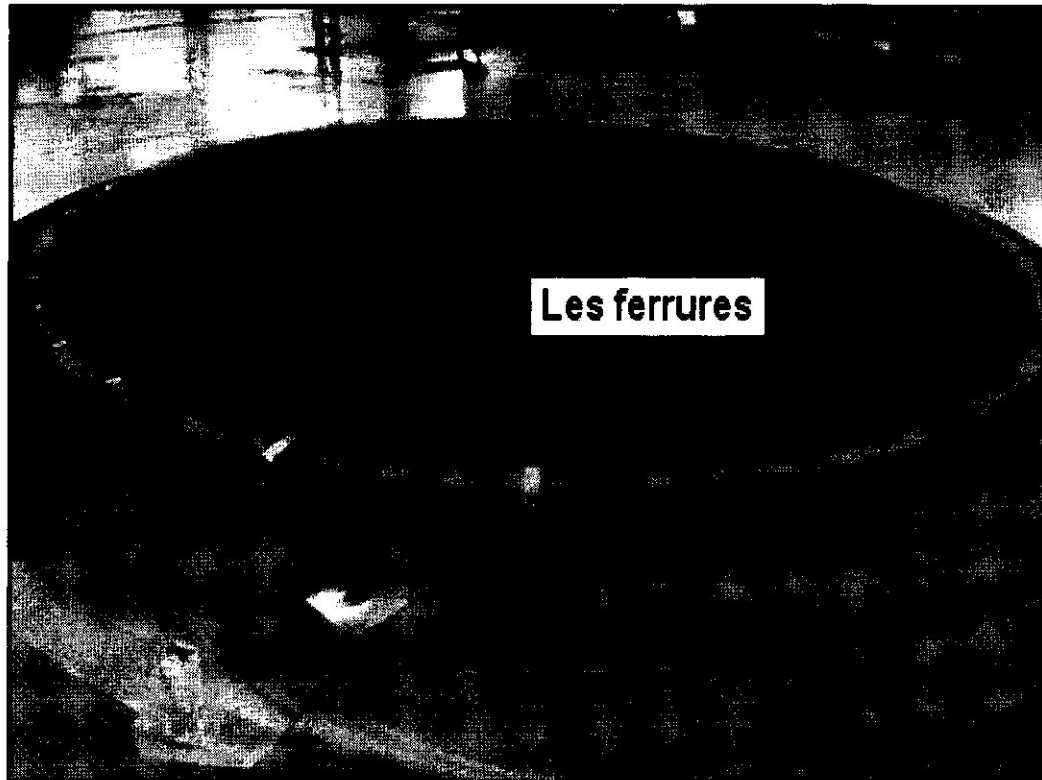


Figure I-7 : Photographie des ferrures montées sur l'entrée d'air.

I.5 Analyse de la problématique

L'analyse du problème a révélé une omission dans le processus de fabrication des ferrures d'attache de la butée d'entrée d'air.

Aucune peinture époxy primaire n'a été appliquée au niveau des trous. L'alodine seule avait été appliquée. L'exigence de l'ingénierie pour le processus de fabrication consiste à appliquer un supplément de traitement d'époxy primaire après un traitement alodine.

Les ferrures corrodées ont été localisées dans la partie inférieure de l'entrée d'air « flèches rouges » (figure I-8).

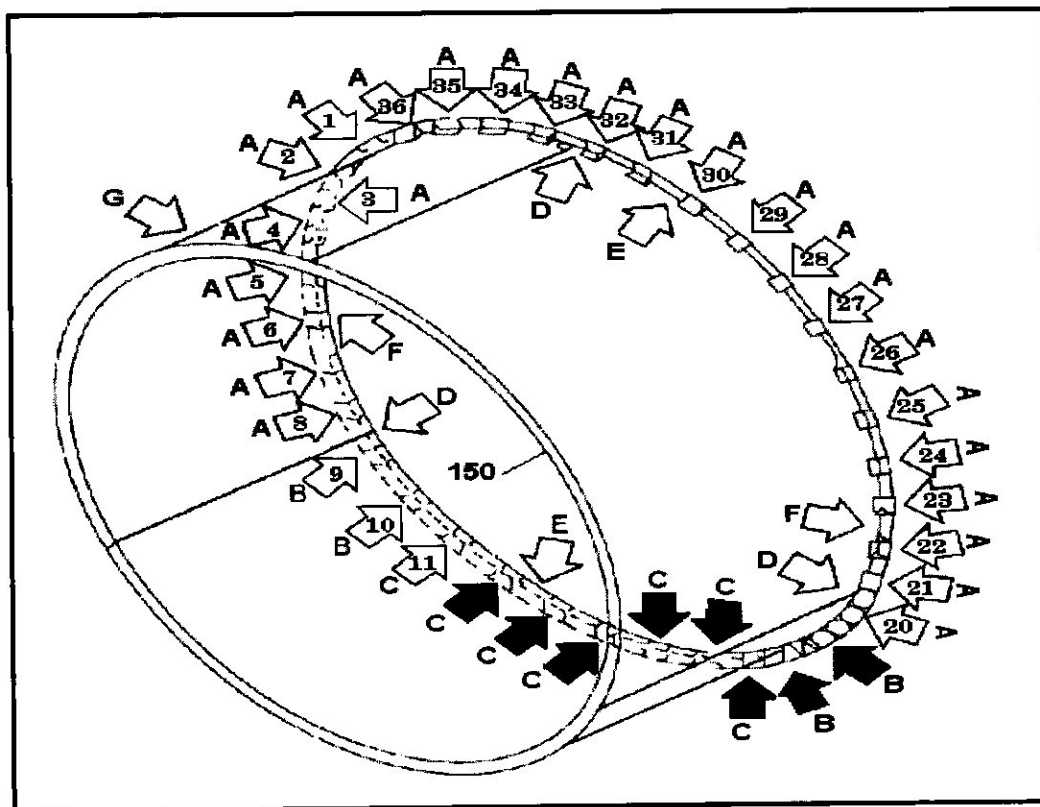


Figure I-8 : Schéma de localisation des ferrures de fixation corrodées sur l'entrée d'air.

L'entrée d'air est le lieu de passage des écoulements qui peuvent induire des sollicitations dynamiques complexes, donc des sources de dommage synergique de forme corrosion sous contrainte et fatigue corrosion. Le problème de l'attache peut aussi, aux lieux des plans d'assemblage, et de part ces mêmes sollicitations être lieu de "frittage de contact". Il ne sera considéré dans ce travail de fin d'étude que l'effet de corrosion.

I.6 Facteurs de corrosion

➤ Les chlorures

Les chlorures qu'on trouve dans l'atmosphère des zones côtières sont d'origine marine. Ils sont amenés par des vents qui passent sur la mer. Les chlorures peuvent provenir d'une pollution par une usine. L'agressivité d'un milieu est très liée à la teneur en chlorures de l'atmosphère.

➤ Atmosphère polluée

Dans les zones industrielles proches aux parkings d'avions, l'atmosphère contient toujours des polluants. Ces polluants transportés par le vent et combinés à l'eau, forment des liquides hautement corrosifs. Par exemple, les composés sulfureux sont fréquemment rencontrés et forment des acides à base de sulfure.

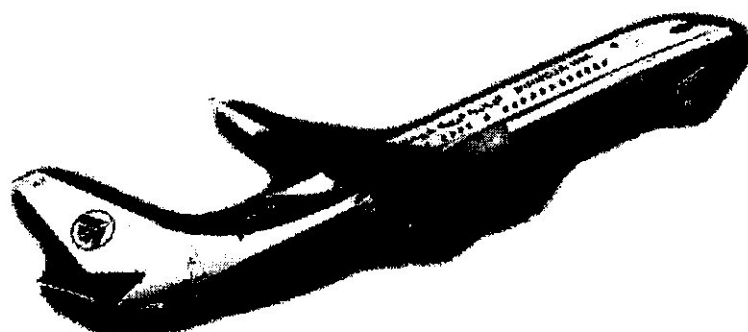
➤ L'humidification et le séchage alternés

Il est bien connu que la vitesse de corrosion des métaux et des alliages usuels est généralement plus grande quand ils sont soumis à des cycles répétés d'immersion et d'émersion alternées dans l'eau de mer que s'ils restent immergés en permanence.

Conclusion

A l'inspection régulière des éléments de la nacelle, il a été constaté une corrosion de certaines ferrures de l'attache de l'entrée d'air. Une première analyse a conclu le non respect de la procédure de fabrication. Ce travail vise à proposer une solution afin d'inhiber ce processus et d'assoir l'exigence zéro corrosion de ces ferrures.

CHAPITRE II
GENERALITES SUR LES
ALLIAGES D'ALUMINIUM



II.1 Historique de l'aluminium métal

C'est le chimiste anglais *Sir Humphry Davy*, qui découvrit le premier en 1807 un élément jusqu'alors inconnu qui entrerait dans la composition de l'alun ($K Al(SO_4)_2, 12 H_2O$) qui est utilisé en médecine depuis des millénaires pour ses propriétés antiseptiques et aussi pour teinter les vêtements. Il lui donna tout d'abord le nom *d'alumium* puis *l'aluminium*.

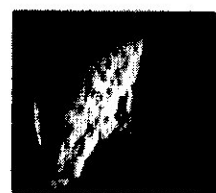
En 1825, *Hans Christian Oersted* obtint une forme impure du métal. Mais la première obtention d'aluminium est la plus souvent associée au nom de *Friedrich Wöhler*, qui reprit les travaux d'*Oersted* et obtint une poudre grise d'aluminium, à partir de la réaction du chlorure d'aluminium anhydre avec du potassium. Cette poudre impure n'a suscité que peu d'intérêt car elle était attaquée très facilement par de l'eau chaude. En 1854, le français *Henri Sainte-Claire Deville* obtint de l'aluminium métal avec la réduction du chlorure d'aluminium par du sodium et présenta l'année suivante quelques kilogrammes du nouveau matériau à l'exposition universelle de Paris. Mais, il faudra attendre 1886, pour que l'américain *Charles Martin Hall* ainsi que le français *Paul Héroult*, développent, quasiment simultanément, un procédé électrolytique pour la production de l'aluminium à partir d'alumine et de cryolite fondues (Na_3AlF_6) à 977 °C [2].

L'année d'après, en 1887[2], le procédé *Bayer*, du nom du chimiste *Karl Bayer*, permet d'obtenir facilement de grandes quantités d'alumine à partir de la bauxite (minerai particulièrement riche en alumine, silice et oxydes de fer lui conférant une couleur rouge orangée intense, son nom est tiré du village de Baux-de-Provence dans les Bouches-du-Rhône).

Au cours de cette étape, la bauxite est broyée, puis mélangée sous pression et à haute température à de la soude. L'aluminate de sodium ainsi formé est alors purifié, puis



Bauxite



Alumine

dilué et refroidi afin d'amorcer la précipitation de l'oxyde d'aluminium hydraté. Ce dernier est finalement calciné afin d'isoler l'alumine, qui est le produit du procédé de Bayer.

L'alumine doit ensuite être réduite. Ceci est réalisé par le procédé Héroult-Hall. Dans un creuset garni de carbone, formant une cathode, l'alumine est dissoute dans la cryolithe fondue à 1000 °C. L'introduction d'anodes en carbone dans le bain permet le passage d'un courant à haute intensité qui dissocie l'alumine en aluminium et en oxygène. Ce dernier réagit avec le carbone des anodes pour former du CO et du CO₂, tandis que l'aluminium, plus lourd que l'électrolyte, se dépose au fond de la cuve.

Les impuretés présentes dans le métal 0.5% (principalement le fer et le silicium) doivent être éliminées par raffinage. Il existe à l'heure actuelle deux procédés distincts, tous deux employés industriellement.

- Le premier est un raffinage électrolytique (dit à trois couches) réalisé dans un bain de sels fluorés, permettant d'obtenir de l'aluminium pur à 99,99%.
- Le second procédé, appelé méthode de la zone fondue, est basé sur la ségrégation naturelle de l'aluminium lors d'un refroidissement lent. Les deux procédés peuvent être également combinés pour obtenir de l'aluminium de titre très élevé : 99,999%.

L'aluminium qui était jusque là considéré comme un métal précieux va devenir l'un des métaux les plus produits au monde avec actuellement plus de 3 millions de tonnes produites par mois dans le monde.

Outre la filière de production d'aluminium primaire décrite précédemment, une grande partie de l'aluminium provient du recyclage (près de 30 % sur le marché européen). L'aluminium est recyclable à 100 % et indéfiniment, sans perte de ses caractéristiques mécaniques. Le recyclage de l'aluminium permet une économie d'énergie de 95 % par rapport à la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de l'aluminium primaire. Plusieurs raisons expliquent le choix de l'aluminium

secondaire par certains industriels et consommateurs : sa technologie de production est plus simple que celle de production de l'aluminium primaire, elle est aussi moins coûteuse et moins nocive pour l'environnement. Mais le principal avantage de l'aluminium secondaire est sa consommation relativement faible d'énergie électrique. En effet, la production d'une tonne d'aluminium secondaire ne consomme que 5 % de l'énergie nécessaire pour la production d'une quantité équivalente d'aluminium primaire.

II.2 Les atouts de l'aluminium

Bien que, en tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de 2% de celle des aciers, ce métal (et les alliages qui en dérivent) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui, dans bien des circonstances, en font un matériau irremplaçable, parmi celles –ci, citons les plus importantes [3].

II.2.1 La légèreté

C'est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2.7 g/cm^3 , soit près de trois fois moins que celle des aciers. La masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2.6 et 2.8 g/cm^3 [2]. L'utilisation de l'aluminium s'impose donc quand il faut réduire au maximum la masse des systèmes et des structures ; c'est le cas, par exemple, dans les domaines de la construction aéronautique, depuis 1930, tous les avions sont en alliage d'aluminium. Ils entrent pour au moins 73% dans le poids à vide des avions modernes, et de l'industrie du transport en général où, pour réaliser des économies d'énergie, on cherche à diminuer la charge à vide, afin d'augmenter la charge utile.

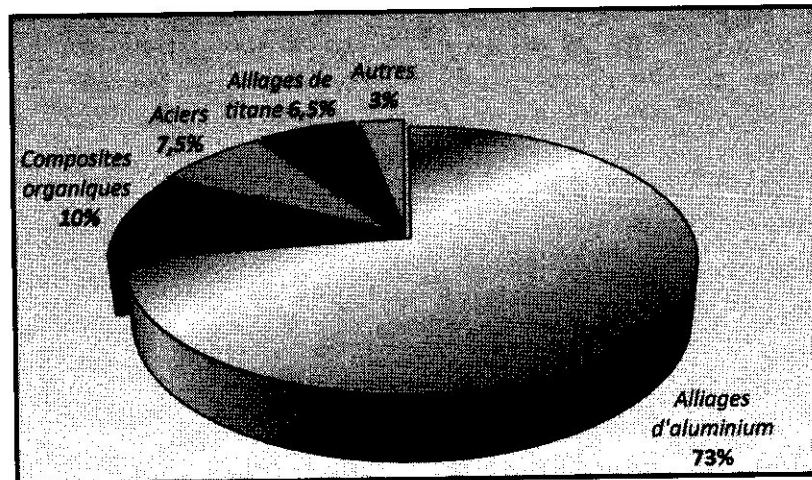


Figure II-1 : Proportions des différents matériaux utilisés dans la conception des avions Airbus A340/A330.

II.2.2 La conductivité électrique

La conductivité électrique de l'aluminium commercialement pur atteint 62 % de celle du cuivre. Par ailleurs, la masse volumique du cuivre est plus élevée 8.96 g/cm³, pour une même intensité de courant, un conducteur en aluminium, dont la masse est deux fois moindre que celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins[3].

Les câbles électriques aériens en aluminium ou en alliages d'aluminium de type « Almelec », commercialisés en France depuis 1927, sont employés partout dans le monde. L'aluminium, sous forme de barres, de tubes, est également très utilisé dans les postes de connexion des réseaux aériens haute et moyenne tension, et dans les câbles téléphoniques, souterrains et sous-marins [2].

II.2.3 La conductivité thermique

L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre, le plus performant des métaux usuels. La conductivité thermique des alliages d'aluminium dépend de leur composition et de leur état métallurgique [2].

II.2.4 La tenue à la corrosion

Grace à la couche d'oxyde (Al_2O_3) qui se forme à leur surface, les alliages d'aluminium résistent relativement bien à la corrosion. On peut d'ailleurs rendre cette couche d'oxyde protectrice plus épaisse par anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium sont sujets à la corrosion par piqûre, la corrosion sous contraintes, la fatigue corrosion, voire la corrosion généralisée. Le degré d'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état (recuit ou écroui, traité ou non) [3].

II.2.5 L'aptitude aux traitements de surface

Les traitements de surface sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels [2] :

- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante, comme c'est souvent le cas pour les alliages au cuivre des familles 2000 et 7000,
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement,
- La décoration du métal.

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont indiquées dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Principales propriétés physiques de l'aluminium non allié [2].

Propriété	Valeur	Remarque
Numéro atomique	13	
Masse molaire	27 g.mol ⁻¹	
Masse volumique ρ	2698 Kg.m ⁻³	
Point de fusion	660,45 °C	sous 1013.10 ³ bar
Point d'ébullition	2056 °C	sous 1013.10 ³ bar
Pression de vapeur	3,7.10 ³ Pa	à 927 °C
Energie interne massique u	3,98.10 ⁵ J.kg ⁻¹	
Capacité thermique massique C_p	897 J.kg ⁻¹ . K ⁻¹	à 25 °C
Conductivité thermique λ	237 w.m ⁻¹ . K ⁻¹	à 27 °C
Coefficient de dilatation linéique α_l	23,1 .10 ⁻⁶ K ⁻¹	à 25 °C
Résistivité électrique ρ	26,548 .10 ⁻⁹ Ω .m	à 25 °C
Module d'élasticité longitudinal E	69000 MPa	
Coefficient de poisson ν	0.33	

Si l'aluminium pur présente une bonne résistance à la corrosion généralisée, ses faibles propriétés mécaniques (limite élastique $R_{p0,2} = 10$ à 20 Mpa, limite à la rupture $R_m = 70$ à 80 Mpa, $E=65$ à 70×10^3 Mpa) limitent son utilisation dans les secteurs industriels où les propriétés mécaniques sont un critère essentiel dans le choix d'un matériau. L'addition d'éléments d'alliages associée à des traitements thermiques adaptés permet d'améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques et l'aptitude à la mise en forme de l'aluminium tout en préservant sa faible masse volumique initiale.

II.4 Les séries principales et la désignation numérique des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont désignés de 1000 à 8000, c'est la désignation AA (l'Aluminium Association) des Etats-Unis qui s'est progressivement imposée en France et en Europe depuis 1970[2]. Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal, le second chiffre indique la modification de l'alliage de base, les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre pour identifier l'alliage dans la série. La norme européenne EN 1780 a récemment introduit pour les alliages de moulage une désignation numérique basée sur le même principe que les alliages corroyés mais avec cinq chiffres.

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents, les alliages qui forment la coque d'un avion sont tous des alliages d'aluminium et ils appartiennent à deux séries d'alliages, la série 2000 et la série 7000.

II.5 Les alliages de corroyage

Il existe huit systèmes d'alliages de corroyage par opposition aux alliages de moulage. D'un point de vue métallurgique, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts (Tableau II-2) :

- Les alliages à durcissement par écrouissage,
- Les alliages à durcissement structural.

II.5.1 Les alliages à durcissement par écrouissage

Ils appartiennent aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Leur gamme de fabrication est faite d'une suite de mise en forme à chaud et éventuellement ensuite à froid, associée à des recuits intermédiaires ou finaux.

Le durcissement par écrouissage correspond à une modification de structure provoquée par une déformation plastique. L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté, et par une perte de ductilité.

Tableau II-2 : Familles d'alliages de corroyage [2].

Mode de	Durcissement par écrouissage				Durcissement structural			
	Famille	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000
Eléments d'alliages	Aucun	Mn	Mg	Si+Fe	Cu	Si	Mg+ Si	Zn+Mg
Etendue de la teneur%	/	0.5 -1.5	0.5 - 5	Si : 0.3-1 Fe : 0.6-2	2-6	0.8-1.7	Mg : 0.5-1.5 Si : 0.5-1.5	Zn : 5-7 Mg : 1-2
Éléments d'additions	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	divers	Si, Mg	/	Cu, Cr	Cu
Résistance mécanique R_m (MPa)	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

II.5.2 Les alliages à durcissement structural

Ils appartiennent aux familles 2000, 6000, et 7000. Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement comprenant trois étapes :

➤ Un chauffage à une température supérieure à la température de solvus, pour effectuer la mise en solution des éléments d'alliage dans l'aluminium qui participent à la formation des précipités, la température de mise en solution est généralement comprise entre 400 et 550 °C.

➤ Un refroidissement rapide, appelé « *la trempe* », en général par immersion dans l'eau à la température ambiante, pour empêcher toute précipitation, ainsi de maintenir les éléments d'alliages et d'addition en solution solide sursaturée dans l'aluminium, dans laquelle les atomes de soluté sont positionnés aux nœuds du réseau CFC de l'aluminium.

➤ Un maintien : il comprend

- La maturation ou vieillissement naturel

C'est le maintien, après la trempe, à température ambiante, autour de 20°C. La solution solide sursaturée a la possibilité d'évoluer. Les éléments d'alliage en sursaturation diffusent vers les défauts du réseau, essentiellement vers les dislocations. En se rassemblant, ils forment des zones de *guignier-Preston*, un durcissement important apparaît en l'absence de toute précipitation. Ce durcissement s'établit assez lentement (quelques jours pour des alliages de la série 2000, à quelques mois pour des alliages de la série 7000).

- Le revenu

C'est un chauffage ultérieur à des températures inférieures aux températures de mise en solution, typiquement de l'ordre de 100 à 200°C (de 5 à 24 heures), Cette

➤ Les particules intermétalliques

Elles peuvent atteindre des tailles de l'ordre de la vingtaine de micromètres et ne participent donc pas au durcissement de l'alliage. Elles jouent en revanche un rôle important dans la sensibilité à la corrosion localisée. Il s'agit soit de phases ordonnées (composés définis, Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_2CuLi pour les alliages de la série 2000 ou MgZn_2 pour ceux de la série 7000).

➤ Les dispersoïdes

Sont de taille variant de vingt à quelques centaines de nanomètres, et se forment par précipitation à l'état solide. Ils ne sont pas cohérents avec la matrice et ne participent donc pas directement au durcissement structural.

II.5.2.2 Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium

La norme NF EN 515, définit la désignation symbolique des états métallurgiques de l'aluminium et de ses alliages. Les états recuits, symbole O avec, notamment, O1 recuit à haute température et refroidissement lent. Les états écrouis, symbole H peuvent être brut d'écrouissage (symbole H1) ou écroui et partiellement restauré (symbole H2). Le symbole est suivi d'un chiffre (de 1 à 9) qui caractérise le niveau de durcissement dû à l'écrouissage (9 le plus dur). Des chiffres supplémentaires complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises. Les états obtenus par traitement thermique, symbole T, sont nombreux :

- T1 refroidi après mise en forme à chaud et mûri
- T2 refroidi après mise en forme à chaud, écroui et mûri
- T3 mis en solution, écroui et mûri
- T4 mis en solution et mûri
- T5 refroidi après mise en forme à chaud et mûri
- T6 mis en solution et revenu

- T7 mis en solution et sur-revenu

- T8 mis en solution, écroui et revenu
- T9 mis en solution, revenu et écroui

Les symboles sont généralement suivis par des chiffres supplémentaires qui complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises.

II.5.2.3 Les alliages de la série 7000

La spécificité des alliages de la série 7000 réside dans une résistance mécanique élevée obtenue après un processus de durcissement structural. La figure II-4 présente les limites élastique ($R_{p0,2}$) et à la rupture (R_m) de l'aluminium non allié 1050 et de certains alliages d'aluminium. Les propriétés mécaniques sont significativement augmentées, notamment dans le cas des alliages appartenant aux séries 2000 et 7000, lorsque le traitement thermique est adapté.

Leur durcissement structural est dû principalement à la précipitation du composé $MgZn_2$. L'addition de cuivre au système aluminium-zinc-magnésium renforce ce durcissement structural, et produit les alliages d'aluminium les plus résistants sur le plan mécanique, à l'état T6. Le cuivre diminue toutefois la soudabilité et la ténacité des alliages Al-Zn-Mg.

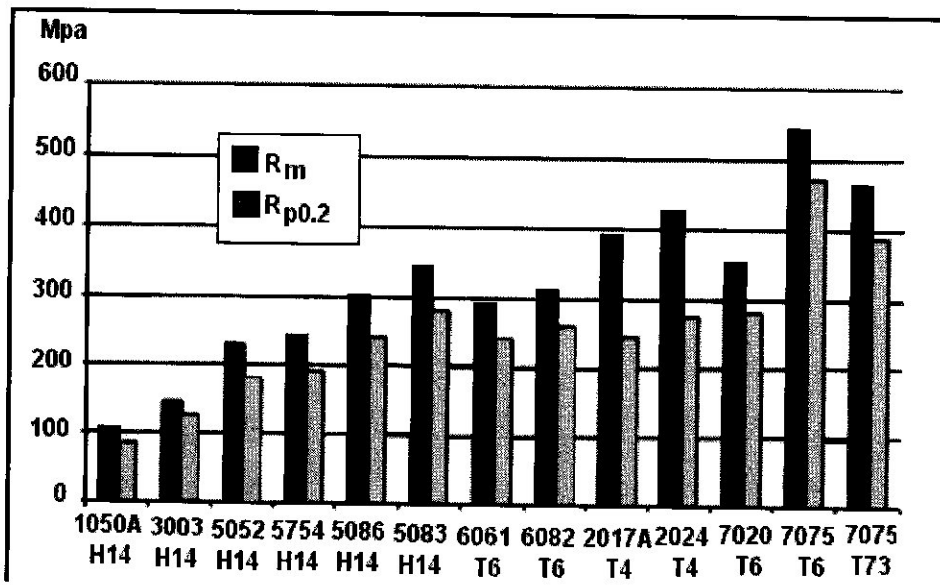


Figure II-4 : Amplitude des caractéristiques mécaniques de l'aluminium et de ses alliages selon la norme EN 485-2, valeurs obtenues sur pièces de 1,5 à 3 mm d'épaisseur [2].

L'inconvénient des alliages de cette série est leur faible résistance mécanique à chaud, dès que la température de service dépasse 120°C (Figure II-5).

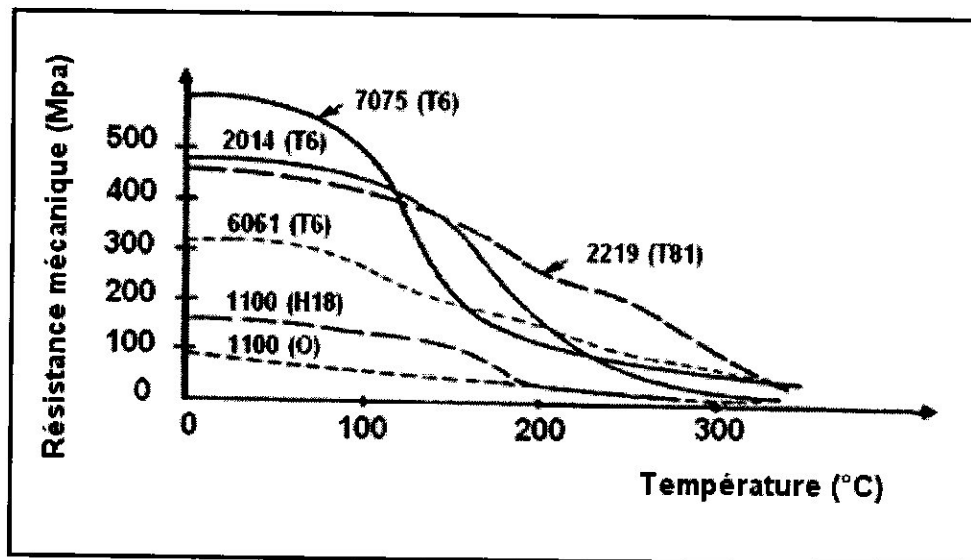


Figure II-5 : La variation de la résistance mécanique à chaud de différentes nuances des alliages d'aluminium en fonction de température.

II.5.2.4 Diagramme d'équilibre du système Al-Zn

Le diagramme d'équilibre des phases du système AlZn est présenté sur la figure II-6 comme on peut le remarquer, ce diagramme est complexe. Il illustre le phénomène de transformation de phases très varié avec la température et la vitesse de refroidissement. Ce diagramme est caractérisé, au voisinage de l'aluminium, par une solution solide Al-Zn titrant au maximum 5% en Zn. Les alliages Al-Zn sont donc biphasés, la seconde phase est la solution solide de première espèce du côté du zinc. Elle forme avec la première, la solution solide de première espèce du côté de l'aluminium, un eutectoïde dont la composition correspond sensiblement à $Al_2 Zn_3$.

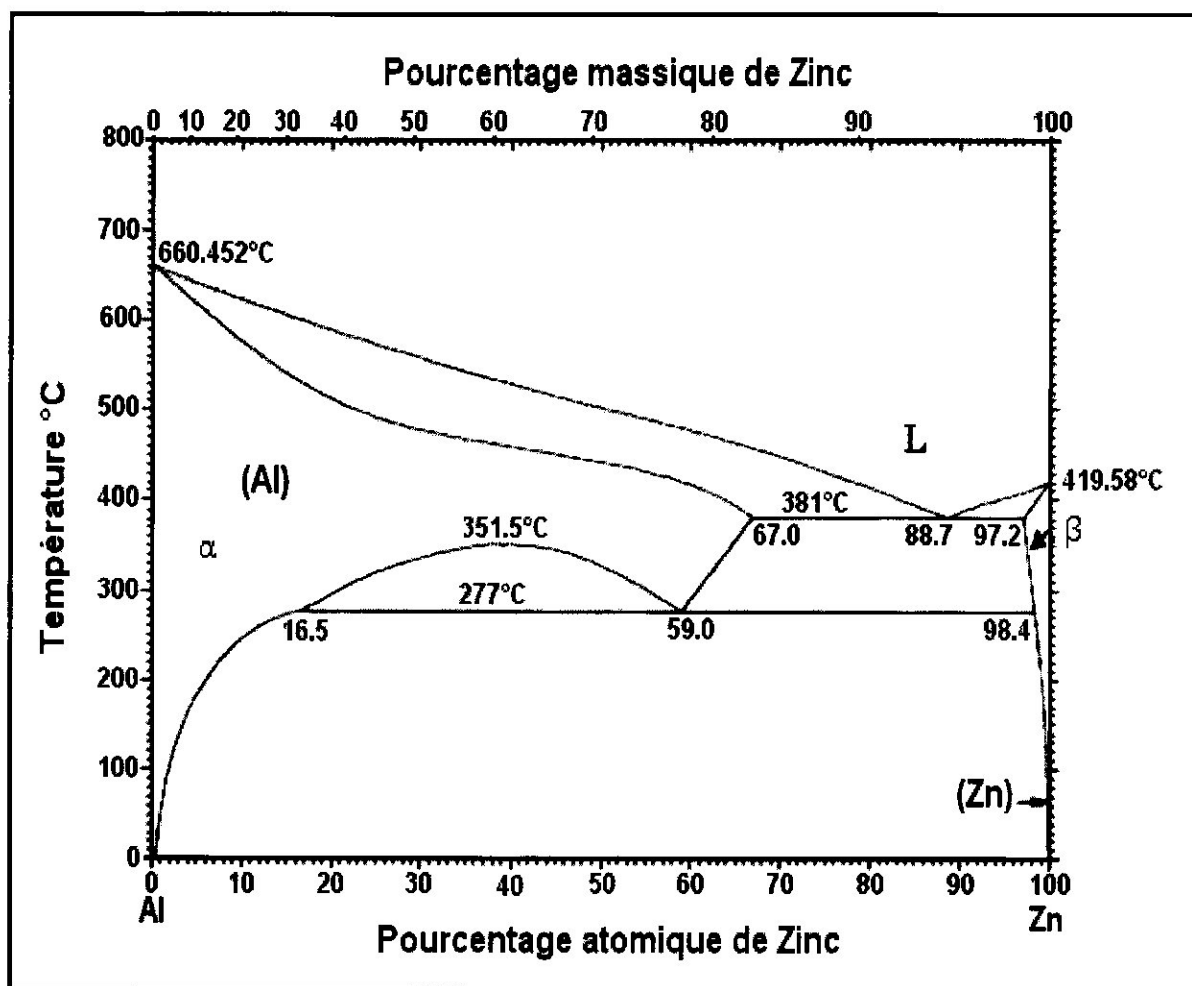


Figure II-6 : Diagramme d'équilibre du système AlZn.

II.5.2.5 L'alliage d'aluminium 7075 T6

Intéressons nous de nouveau plus particulièrement à l'alliage 7075, dont les principaux éléments d'alliage sont le zinc et le magnésium. Sa composition chimique est présentée dans le tableau II-3.

Tableau II-3 : Composition chimique de l'alliage 7075 (% massique) [2].

Elément	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr
% en masse	Base	5.1-6.1	2.1-2.9	1.2-2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.18-0.28

Le tableau II-4 présente quelques propriétés physiques des alliages 7075.

Tableau II-4 : Quelques propriétés physiques de l'alliage 7075 [2].

Alliage	Masse volumique ρ Kg.m ⁻³	Intervalle de fusion (°C)	Coefficient de dilatation α_l (10 ⁻⁶ /K) (20 à 100 °C)	État	Conductivité thermique λ w .m ⁻¹ . K ⁻¹ à 20°C	Résistivité électrique ρ μ . Ω .cm
7075	2800	477-635	23.4	T6	130	5.2
				T73	155	43

Les traitements de durcissement structural appliqués à de tels alliages 7075 doivent être parfaitement maîtrisés pour conduire à une optimisation des propriétés mécaniques. Dans ce cas là, on obtient des caractéristiques mécaniques très intéressantes comme l'atteste le tableau II-5.

Tableau II-5 : Quelques propriétés mécaniques de l'alliage 7075.

Alliage	Limite élastique $R_{p0,2}$ (MPa)	Limite à la rupture R_m (MPa)	Allongement (%)	Dureté HB	Module d'élasticité (Mpa)
7075-T6	470	535	11	150	72
7075-T73	390	475	13	140	72

Ainsi, ajoutées à sa faible masse volumique, les hautes caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075 font de celui-ci un matériau de structure très employé dans le secteur industriel de l'aéronautique.

III.1 Vue d'ensemble des phénomènes

Corrosion, du latin *corrodere*, signifie ronger, attaquer. Ce mot est entré dans la langue française en 1314. Pour désigner l'action de détruire progressivement par une action chimique, il s'agit de la détérioration lente, progressive ou rapide des propriétés d'un métal : l'aspect, l'état de la surface, les caractéristiques mécaniques, etc. du fait de l'environnement dans lequel il est placé : atmosphère, eau de mer, solutions diverses, milieux organiques, etc [2].

On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde. Or, la corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte les métaux ainsi que les polymères et céramiques [4]. Elle résulte d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement. Voici quelques exemples de phénomènes de corrosion :

- transformation de l'acier en rouille,
- fissuration de laiton en présence d'ammoniaque,
- corrosion à chaud d'un superalliage dans une turbine à gaz,
- dégradation du PVC par le rayonnement ultraviolet,
- attaque d'un tuyau en nylon par un acide oxydant,

III.2 Définition

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la *corrosion* est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible : elle détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Un autre phénomène dégrade le matériau : *l'usure*, perte progressive de matière de la surface d'un solide, dûe au frottement ou à l'impact.

Parfois, la corrosion est un phénomène bienvenu, voir souhaité. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans la nature [4]. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion, par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique.

III.3 Aspect électrochimique de la corrosion des métaux

La corrosion des métaux est la réaction de nature électrochimique oxydo-réduction irréversible entre un métal (ou un alliage) et un agent oxydant contenu dans l'air, l'eau, ou une solution aqueuse. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant.



Elle se déroule suivant un processus électrochimique complexe lié à la structure atomique de la matière.

Dans le métal, il y a des atomes dont l'environnement électronique est constitué entre autres d'électrons libres capables de se déplacer à l'intérieur de celui-ci.

Dans la phase aqueuse, qui est une solution, on trouve :

- Des ions positifs (les cations) et des ions négatifs (les anions),
- Des molécules neutres, eau et composés divers non dissociés.

III.3.1 Les réactions électrochimiques élémentaires de la corrosion

À l'interface métal-eau, il y a transfert de charges électriques entraînant des réactions électrochimiques selon la figure III-1 :

- I. L'atome du métal s'oxyde sous forme d'ions M^{n+} libérés dans la phase aqueuse créant ainsi à l'intérieur du métal un flux d'électrons dans le sens *solution* \rightarrow *métal*.



Le courant d'oxydation anodique qui en résulte I_A , est orienté dans le sens *métal* \rightarrow *solution*.

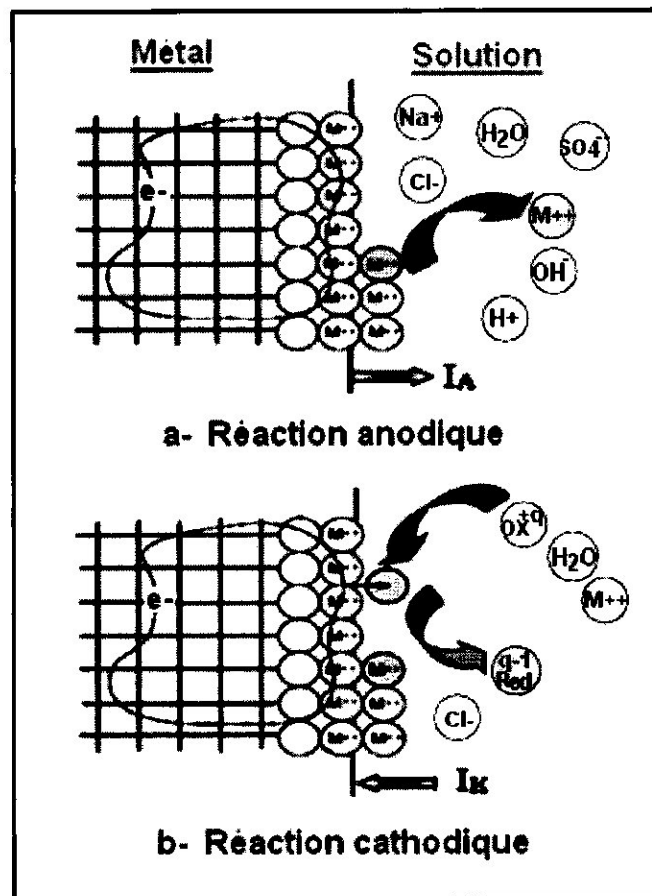


Figure III-1 : Les réactions électrochimiques à l'interface métal- solution [2].

II. L'ion ou la molécule de la phase aqueuse vient être réduit, c'est-à-dire capter des électrons du métal pour se transformer en une autre espèce chimique, crée ainsi un flux d'électrons à l'intérieur du métal dans le sens

métal \longrightarrow *solution*



Cette réduction se traduit par un courant cathodique I_K , qui circule en sens inverse : *solution* \longrightarrow *métal*.

Les électrons qui interagissent à l'interface métal-solution ne pénètrent pas dans la solution.

III.3.2 Structure de la double couche électrochimique

Ces réactions ont lieu à l'interface métal-solution constituée de ce que les électrochimistes appellent la « *double couche* » et dont l'épaisseur est de l'ordre de 10 nm [2].

L'immersion d'un métal dans une solution aqueuse perturbe localement les arrangements des molécules et des ions, modifiant la répartition des charges électriques dans l'espace de la double couche. Pour respecter la neutralité électrique, les charges qui apparaissent dans le liquide de l'interface doivent être neutralisées par des charges électriques superficielles égales et opposées sur la surface du métal.

La double couche est constituée de trois zones (Figure III-2) :

- La zone compacte de *Stern*, d'épaisseur de quelques dixièmes de nanomètres, dans laquelle on trouve des molécules d'eau et des anions adsorbés de petit diamètre comme les chlorures ;
- La zone de *Helmoltz* dans laquelle on trouve des ions solvatés, c'est-à-dire entourés de molécules d'eau ;
- La zone diffuse de *Gouy-Chapman*, dont l'épaisseur dépend de la force ionique de la

solution.

Pour que les réactions électrochimiques aient lieu, il faut que les ions à réduire X^- puissent arriver jusqu'à la surface du métal, et les cations M^{n+} puissent s'échapper de la surface du métal. Plusieurs phénomènes tendent à freiner les mouvements des ions dans la solution, par exemple le dépôt des produits de corrosion, ou d'un inhibiteur, une résistance à ralentir l'oxydation sur l'anode, ou réduction sur la cathode, ce phénomène signifie que la corrosion tend à se ralentir.

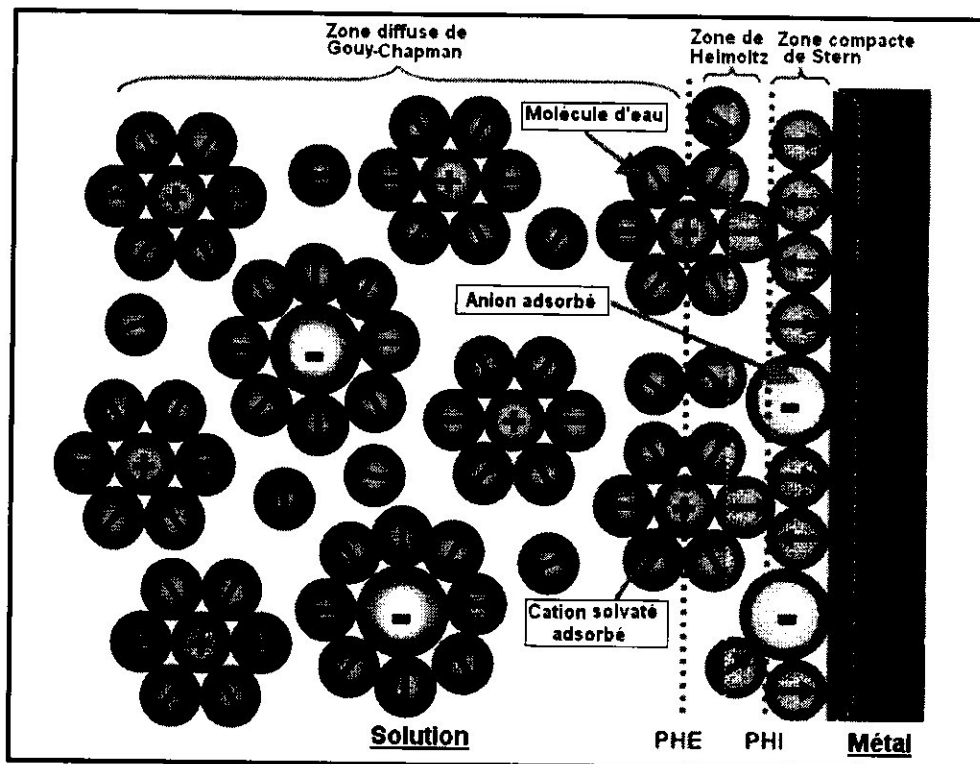


Figure III-2 : Structure de la double couche, interface métal-solution [2].

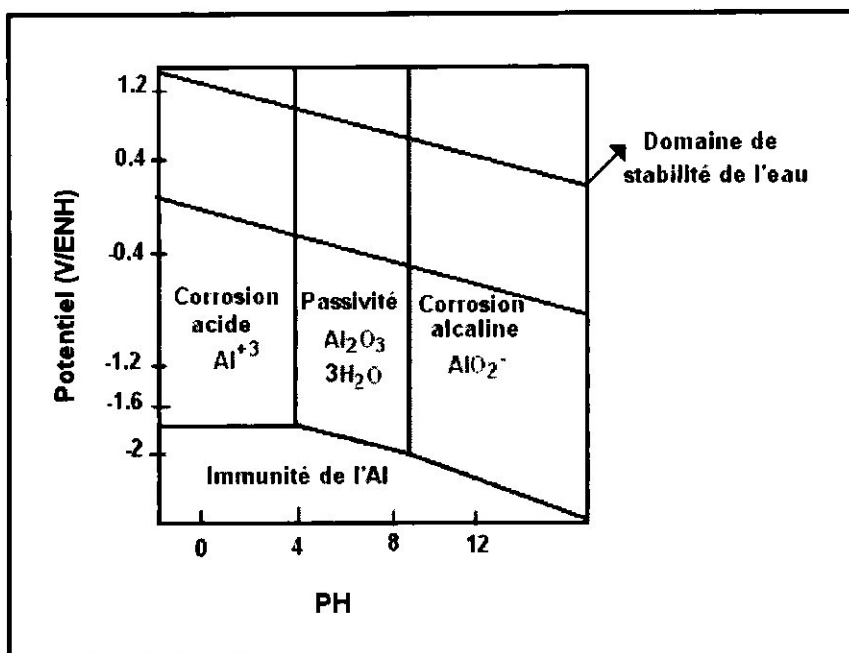
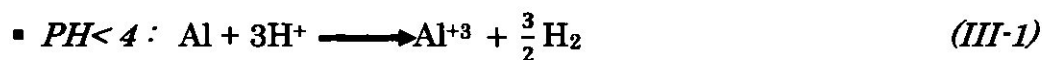


Figure III-3 : Diagramme de Pourbaix du système Al-H₂O à 25°C dans le cas d'une passivation par l'hydrargilite (Al₂O₃, 3H₂O)

L'échelle de potentiel est graduée en Volt par rapport à l'électrode normale à hydrogène.

Il apparaît quatre domaines définissant trois états possibles de l'aluminium dans l'eau à 25°C :

- La corrosion ou dissolution de l'aluminium, correspondant à un degré d'oxydation +3. Ce domaine est défini pour des valeurs de PH inférieures à 4 et supérieures à 9. L'importante concentration en H⁺ ou en OH⁻ permet respectivement les réactions électrochimiques (III-1) et (III-2) :



Le cation Al⁺³ est stable à PH faible.

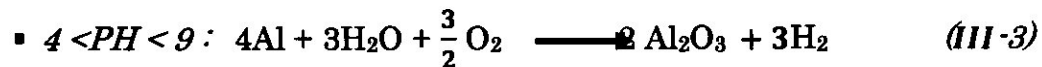


L'aluminate AlO_2^- est stable à PH élevé.

La concentration en espèces dissoutes est par définition supérieure à 10^{-6}mol/l . (Soit 0.027mg/l pour l'aluminium) [2]. À partir de laquelle on peut considérer qu'il y a corrosion du métal.

Les réactions cathodiques associées font entrer en jeu différents oxydants comme les ions H^+ en milieu acide, les ions OH^- en milieu basique, et l'oxygène dans tous les milieux, dans les deux cas les réactions s'accompagnent d'une décomposition de l'eau avec dégagement d'hydrogène.

- Le domaine de passivation de PH avoisinant la neutralité entre les PH 4 et 9, et est déterminé par la stabilité de l'oxyde ou hydroxyde d'aluminium au degré d'oxydation +3. Les faibles concentrations en H^+ et OH^- ne permettant pas les réactions (III-1) et (III-2), la formation du film d'oxyde est la réaction prédominante :



- L'immunité est le domaine de stabilité de l'aluminium au degré d'oxydation zéro. Il correspond à des potentiels très négatifs, qu'il n'est pas possible d'atteindre en solution aqueuse. La concentration en espèces dissoutes M^{n+} est par définition inférieure à 10^{-6}mol/l . La zone d'immunité est la zone recherchée par la protection cathodique.

Il faut noter qu'il s'agit de diagrammes d'équilibre qui permettent de déterminer les espèces stables, leur domaine de stabilité et le sens des réactions possibles. Ils ne permettent pas de prévoir la vitesse de corrosion éventuelle.

III.5 Structure du film d'oxyde naturel

Il est bien connu que l'aluminium est un métal réactif qui forme facilement une couche d'alumine Al_2O_3 à l'air et un film d'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ lorsqu'il est exposé à un milieu aqueux à température ambiante.

Le film d'oxyde naturel, incolore, est constitué de deux parties superposées dont l'épaisseur totale varie entre 4 et 10 nm (figure III-4) :

- La première, au contact du métal, compacte ($V_{Al_2O_3} / V_{AF} = 1.4$ avec V est le volume), et amorphe, est appelée *couche barrière*, compte tenu de ses propriétés diélectriques (peu conductrice). Elle se forme en quelques millisecondes, dès que le métal, entre au contact de l'air ou d'un milieu oxydant, et non hydratée [2]. La température n'ayant d'influence que sur l'épaisseur atteinte. par exemple, l'épaisseur est doublée pendant un traitement thermique de recuit à 500 C°.
- La seconde, au-dessus de la première, elle correspond à une couche d'oxyde hydratée. L'hydratation par une molécule d'eau correspond à *la Boehmite* ($Al_2O_3 \cdot H_2O$ ou $AlO(OH)$). *La Bayérite* et *hydrargillite*, sont elles trihydratées ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$). Ces dernières se forment par vieillissement de *la Boehmite* au contact de l'eau et constituent les films les plus stables en solution aqueuse. L'épaisseur finale de cette couche, poreuse et moins compacte que la couche barrière, ne sera pas atteinte avant des semaines voire des mois, en fonction des conditions physico-chimiques (l'humidité relative et température), qui favorisent sa croissance. De plus, elle réagit avec l'environnement extérieur au cours des différentes étapes de mise en forme du matériau ou pendant son service formant ainsi une couche de contamination superficielle. La composition de la surface peut être très complexe.

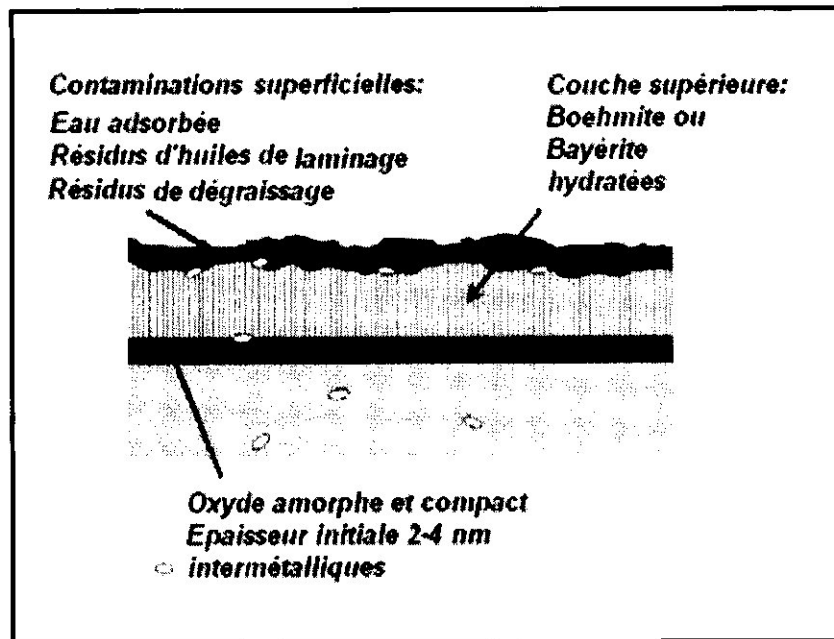


Figure III-4 : Couches et adsorptions sur le film d'oxyde d'aluminium [2].

Le tableau III-1 présente les propriétés de ces deux formes allotropiques de l'oxyde d'aluminium, qui dépendent en particulier de la température du milieu.

Tableau III-1 : Formes allotropiques de l'alumine [2].

Variété	Réseau cristallin	Désignation chimique	Formule chimique	Domaine de température de formation(C°)	Densité
Alumine amorphe		Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	<50-60	3.40
Boehmite	Orthorhombique	Hydroxyde oxyde d'aluminium	γ-AlOOH	>90	3.01
Bayérite	Monoclinique	Trihydroxide d'aluminium	α-Al(OH) ₃	60-90	2.53

III.6.1 Les différents modes de corrosion des alliages d'aluminium

La corrosion de l'aluminium peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu: corrosion généralisée ou uniforme, corrosion par piqûres, corrosion sous contrainte, etc. La prédominance d'une forme de corrosion dépendra d'un certain nombre de facteurs inhérents au métal (la composition des alliages, l'état de surface), au milieu (la teneur en oxygène, le pH, la température), et aux conditions d'emploi (le mode d'assemblage, les contraintes mécaniques).

III.6.1.1 La corrosion généralisée

Comme l'indique son nom, la corrosion généralisée se distingue par une usure de toute la surface exposée au milieu. Le métal devient plus mince. Cette corrosion peut être uniforme ou galvanique.

III.6.1.1.1 La corrosion uniforme

Cette forme de corrosion se développe sous forme de micro piqûres de très petit diamètre, de l'ordre du micromètre. Elle se traduit par une diminution d'épaisseur uniforme et régulière de toute la surface du métal [2]. La vitesse de corrosion est égale en tous points du matériau métallique. Elle est extrêmement faible.

Pour l'aluminium, cette forme de corrosion se rencontre surtout dans les milieux très acides avec $\text{PH} < 4$ ou très alcalins avec $\text{PH} > 9$, et entraîne alors un taux de corrosion important dans ces deux milieux, tandis que ce taux est relativement faible dans les milieux neutres.

Dans le domaine de PH compris entre 4 et 9, dit « de passivation », l'expérience montre que l'aluminium et notamment ses alliages peuvent subir une autre forme de corrosion dite « localisée ».

III.6.1.1.2 La corrosion galvanique

L'appellation « corrosion galvanique », fait intervenir des métaux différents. Puisque la corrosion galvanique se trouve au voisinage immédiat de la rencontre des deux métaux, l'attaque peut être considérée comme localisée à un endroit précis, mais la forme de l'usure est généralisée. C'est pourquoi cette forme de corrosion est reconnue comme généralisée [6].

Lorsqu'un métal est immergé dans une solution électrolytique quelconque, on peut mesurer son potentiel de dissolution. Ainsi, pour une solution donnée, il est possible d'établir un classement des différents métaux et alliages en fonction de ce potentiel. La Figure III-5 donne un exemple d'une telle classification des métaux et alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer [7]. Lors d'un couplage électrique entre deux métaux ou alliages différents dans un milieu conducteur, on réalise alors une pile électrochimique, il va s'établir un courant électrique entre eux, résultant de leur différence de potentiel. Le matériau le moins noble devient *l'anode* de la pile et se corrode, l'autre devient *Cathode*.

Deux ou plusieurs métaux regroupés par une même accolade, même en contact électrique dans un électrolyte en stagnation, n'engendrent pas de corrosion galvanique. Ainsi les laitons, les cuivres, les bronzes, les cupronickels et les monels sont au même potentiel et n'entraînent pas entre eux de corrosion galvanique.

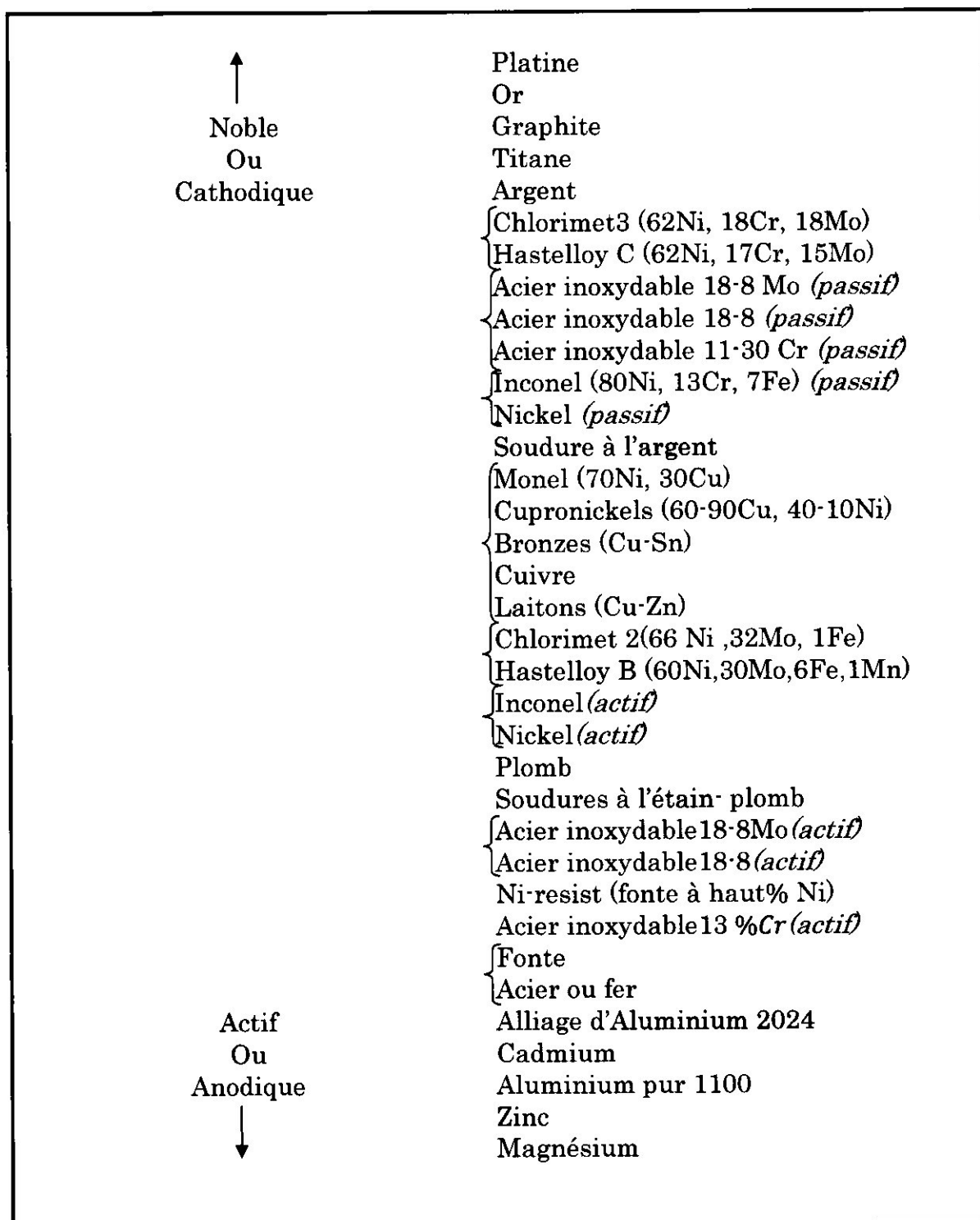


Figure III-5 : Série galvanique des métaux et alliages dans l'eau de mer à 25°C [7].

Quand l'aluminium et l'acier sont en contact électrique dans le même milieu électrolytique, ils forment un couple galvanique qui produit du courant en consommant le métal le plus anodique (Figure III-6). L'aluminium, qui est anodique par rapport à la plupart des métaux usuels (à l'exception du Zinc et du Magnésium), est généralement la victime de ces assemblages. Mais, il se rencontre le plus souvent recouvert de son film passif, ce qui l'anoblit considérablement.

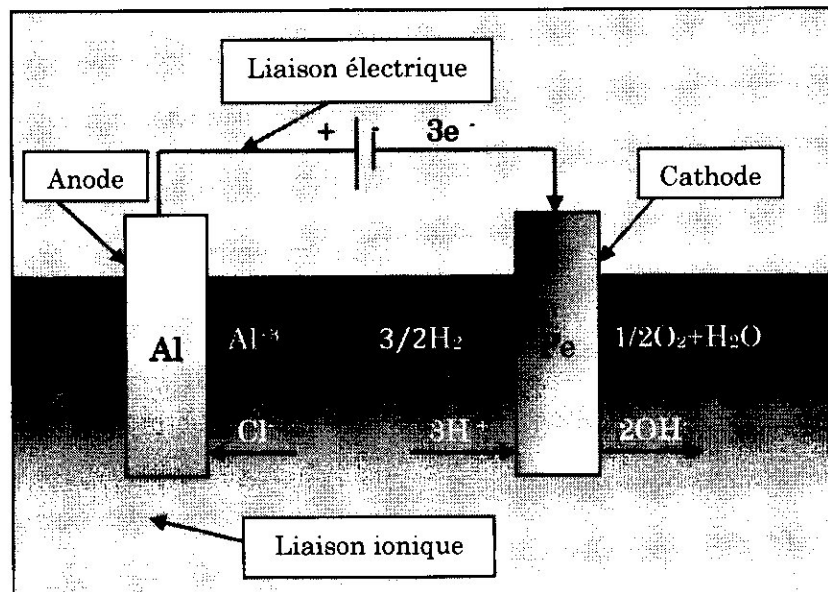


Figure III-6 : Corrosion galvanique de l'aluminium.

III.6.1.1.2.1 Les conditions de la corrosion galvanique

Le courant de la corrosion galvanique n'est observé que si les trois conditions suivantes soient simultanément satisfaites :

1. Métaux de nature différente : l'expérience montre que la corrosion galvanique ne se produit que si les deux métaux en contact présentent une différence de potentiel d'au moins 100mv.
2. Présence d'un électrolyte : l'électrolyte assure le transport des espèces ioniques, et donc du courant dans le milieu liquide.

anodique dans la plupart des cas. Il se corrode et protège l'acier. À des températures supérieures à 82 °C, le couple zinc-acier s'inverse et c'est l'acier qui se corrode.

III.6.1.2 La corrosion localisée

C'est la forme la plus insidieuse et elle ne peut être évaluée convenablement par le calcul de son taux. En effet, pour une perte de poids minimale, la corrosion localisée peut être catastrophique, par la mise hors service d'une partie de l'équipement. Ce type de corrosion inclut les piqûres, l'attaque microbienne.

III.6.1.2.1 La corrosion par piqûres

Les piqûres constituent une forme d'attaque extrêmement localisée et peuvent aboutir au percement du métal. Ces piqûres sont difficiles à déceler à cause de leur dimension réduite et parce que, très souvent, elles sont recouvertes de produits de corrosion. Elles s'amorcent en des points particuliers de la surface (défauts intrinsèques ou altération à l'interface métal/solution), et progressent habituellement dans le sens gravitationnel. On les observe donc le plus souvent sur les parties horizontales supérieures. La corrosion par piqûres est un phénomène particulier aux aciers inoxydables, aux aciers et à l'aluminium. Elles se retrouvent le plus souvent chez les aciers inoxydables dans des solutions neutres ou faiblement acides en présence de chlorures (les halogénures : F⁻, Cl⁻, Br⁻, I⁻). Les piqûres des aciers et des aluminiums apparaissent dans des solutions basiques en présence des chlorures (faible diamètre, caractère polaire). Contrairement à d'autres métaux, la corrosion de l'aluminium attire toujours l'attention par ce que les piqûres sont recouvertes d'une couche d'alumine Al(OH)₃ qui est insoluble dans l'eau et précipite sous forme d'un gel blanc qu'on observe sur les piqûres sous forme de flocons gélatineux blancs (figure III-7).

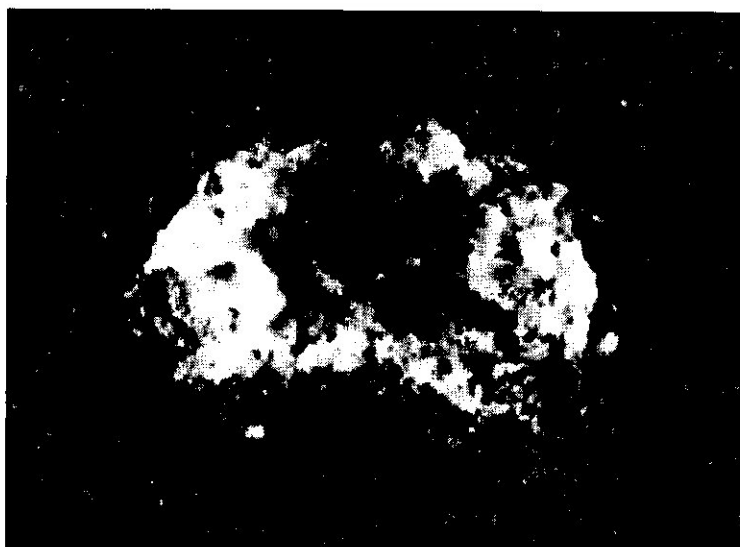


Figure III-7 : Corrosion par piqûres d'un alliage d'aluminium de la série 2000.

III.6.1.2.1.1 Initiation et propagation de la piqûre

Comme tous les métaux passifs, l'aluminium est sensible à la corrosion localisée qui résulte d'une rupture locale du film passif. Elle se traduit par une piqûre qui peut, si les conditions le permettent, se propager. Il y a deux phases dans la corrosion par piqûres : l'amorçage et la propagation.

- Phase d'amorçage

Il est bien connu que la corrosion par piqûres se développe en milieu chloruré. Il y a adsorption des ions Cl^- dans les défauts de la couche d'oxyde naturel suivie d'une rupture de celui-ci aux points faibles avec formation de microfissures de quelques nanomètres de large. Beaucoup de piqûres sont très rapidement initiées, jusqu'à $10^7/\text{cm}^2$. Mais la plupart s'arrêtent au bout de quelques jours. Des essais de polarisation montrent que si les piqûres s'arrêtent, elle se repassivent. Quand on polarise de nouveau le métal, les piqûres déjà passivées ne sont pas réinitiales, et la piqûration redémarre sur d'autres sites. Il y a réduction lente de l'oxygène à la cathode. À l'endroit des ruptures du film, il y a oxydation rapide de l'aluminium et formation d'un complexe chloruré intermédiaire AlCl_4^- .

Il y a précipitation d'hydroxyde $\text{Al}(\text{OH})_3$. Les microbulles d'hydrogène provenant de la réduction des ions H^+ , poussent l'hydroxyde d'aluminium vers l'ouverture de la piqûre où il se dépose sous forme de pustules blanches.

L'accumulation de produits de corrosion au sommet de la piqûre obstrue progressivement l'entrée de la piqûre, gênant les échanges ioniques, en particulier ceux dans lesquels les ions Cl^- sont impliqués. Cela explique le ralentissement, l'arrêt du processus de piqûration [2].

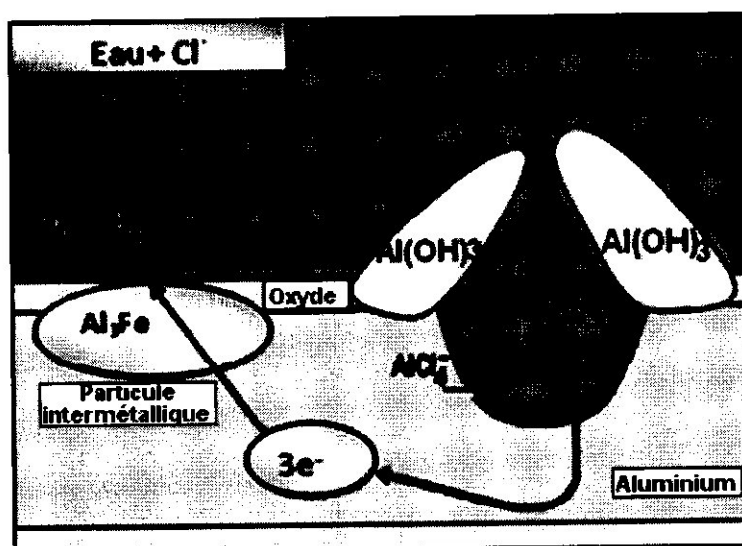


Figure III-8 : Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium [2].

III.6.1.2.2 La corrosion filiforme

Elle se développe sous forme de filaments étroits de 0.1 à 0.5 mm de largeur et de quelques millimètres de longueur qui se propagent à l'interface métal-peinture. Le gonflement des produits de corrosion déforme la couche de peinture et fait apparaître des fils très fins sous la peinture (figure III-9). Ce phénomène se produit dans des atmosphères marines très humides.

La corrosion filiforme peut être observée pour des métaux revêtus (protection par peinture). Elle démarre toujours à partir des défauts du revêtement comme les rayures, et de ses points faibles: les bords découpés.

Cette forme de corrosion, décrite pour la première fois en 1944, pour l'aluminium, sur des alliages à hautes caractéristiques mécaniques dans les applications aéronautiques [2].



Figure III-9 : Corrosion filiforme de l'aluminium peint.

III.6.1.2.2.1 Facteurs de la corrosion filiforme

- *La nature de revêtement*

La corrosion filiforme se produit avec toutes les variétés de peintures : époxy-polyamides, époxy-amines..., quelque soit le mode d'application classique avec de la peinture liquide ou poudrage électrostatique. Par contre, elle ne se produit pas sous un revêtement étanche, par exemple des rubans de scotch « électrique ».

- *La préparation de surface*

La corrosion filiforme se développe sur du métal qui n'a pas reçu de préparation de surface ou d'une mauvaise préparation, ou encore quand celle-ci a été polluée avant peinture [2].

III.6.1.2.3 La corrosion par crevasse ou corrosion caverneuse

Cette corrosion est généralement associée à la présence de petit volume de solution stagnante, dans des trous, sous des joints et des dépôts (sable, précipités, etc). Elle est localisée dans les recoins : les zones de recouvrement de rivetage, de boulonnage ou de soudage. Dans ces zones, la composition du milieu est différente de celle du reste de la solution (appauvrissement en oxygène, augmentation des espèces corrosives : chlorure, ions hydrogène) et se traduit par une forte diminution du PH, ce qui entraîne la constitution d'une pile galvanique [7]. Il en résulte que cette surface en recoin devient anodique par rapport au reste de la structure.

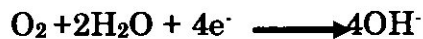


*Figure III-10 : Corrosion caverneuse d'une bride en acier inoxydable
- corrosion sous un joint en téflon -*

L'aluminium est oxydé dans la crevasse suivant la réaction :



Tandis qu'au bord de crevasse, il y a réduction de l'oxygène :



Au fur et à mesure que le métal se corrode sous le recoin, ce dernier devient une zone appauvrie en oxygène, avec un excès d'ions Al^{+3} . Le chlorure d'aluminium s'hydrolyse :



Le milieu devient très rapidement acide avec un PH de 2 à 3.

Contrairement aux aciers inoxydables, les alliages d'aluminium (sans le cuivre) sont peu sensibles à la corrosion caverneuse, une des raisons de cette bonne résistance est que l'aluminium est peu sensible aux piles d'aération différentielle, donc, après le lent appauvrissement en oxygène de la solution dans la crevasse, la pile d'aération différentielle (entre la crevasse et la solution extérieure) produit une lente réaction d'acidification de la solution à l'intérieur de la crevasse [5].

III.6.1.2.4 Corrosion-érosion

L'érosion correspond à une dégradation de la surface sous l'effet d'impacts de particules, de gouttelettes, d'un jet, ou de l'action d'un écoulement turbulent. Dans certaines conditions, en présence d'électrolyte, on observe une corrosion-érosion, autrement dit une dégradation simultanée par érosion et par corrosion. Elle se caractérise en apparence par des cannelures, des ravins, des vagues et des cratères. Cette forme de corrosion est étroitement liée à l'hydrodynamique et à la vitesse de

passage du fluide. Des essais dans l'eau distillée à 100°C montrent que l'érosion de l'aluminium commence à des vitesses de passage de l'ordre de 12-15m/s.

Tous les genres d'équipements exposés aux fluides en mouvement sont sujets à la corrosion-érosion. Il s'agira, des réseaux de canalisation (particulièrement les courbes, les coudes et les tés), des vannes, des pompes, des ventilateurs centrifuges, des hélices, des tubes d'échangeurs de chaleur et des appareils de mesure. Le meilleur moyen de lutte contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes.

III.6.1.2.5 La corrosion bactériologique

Le seul cas bien connu de corrosion bactériologique de l'aluminium est celui des réservoirs de carburant des avions à réaction. Le carburant n'est jamais totalement anhydre. Il contient toujours quelques traces d'humidité qui se séparent du kérosène et s'accumulent dans les zones difficilement drainables des réservoirs d'avion, où se produisent les corrosions. Le carburant contient des micro-organismes qui y trouvent de quoi se nourrir.

La corrosion se développe à l'interface carburant-eau et se présente sous forme de piqûres. Comme pour les autres formes de corrosion, le mécanisme est toujours de nature électrochimique. L'oxydation du kérosène par les bactéries libère des acides organiques qui modifient le PH du milieu. Les dépôts microbiens créent des sites anodiques par acidification locale.

La prévention de la corrosion bactériologique des réservoirs des avions à réaction est faite à l'aide de bactéricides solubles dans l'eau comme le chromate de strontium, ou solubles dans le kérosène, comme l'éther monoéthylène glycol [2].

III.6.1.3 Les Corrosions structurales

Les problèmes de corrosion que nous avons vus précédemment résultent de réaction entre le métal et son environnement, quand la couche d'oxyde ne peut pas éviter cette réaction. Cela concerne tous les alliages d'aluminium.

Les corrosions structurales sont plus particulièrement concernées par le mode de pénétration de la corrosion dans le métal qui peut être particulière dans certains métaux. On les appelle *structurales* parce qu'elles sont directement liées à la structure métallurgique du métal. La distribution hétérogène des éléments d'addition et/ou des précipités est à l'origine de ces formes particulières de propagation de la corrosion. Elles diffèrent des autres formes de corrosion étudiées habituellement par le mode de pénétration dans le métal. La pénétration des corrosions structurales est souvent intergranulaire.

Pour les alliages d'aluminium trois formes particulières de corrosion structurales peuvent être rencontrées :

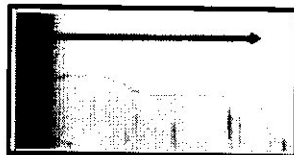
- la corrosion intergranulaire ;
- la corrosion feuilletante ou exfoliante ;
- la corrosion sous contrainte ;
- Fatigue-corrosion.

III.6.1.3.1 La corrosion intergranulaire

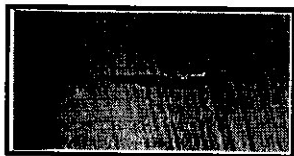
La corrosion intergranulaire est une forme de corrosion qui consomme uniquement le joint des grains. De ce fait, très peu de métal est réellement dissous, très peu d'eau est nécessaire à cette corrosion, c'est pourquoi, contrairement à la corrosion par piqûres mais surtout à la corrosion transgranulaire (elle progresse à

l'intérieur des grains), l'étude de la perte de masse n'est pas un paramètre approprié pour ce type de corrosion.

La corrosion intergranulaire s'évolue en cinq étapes :



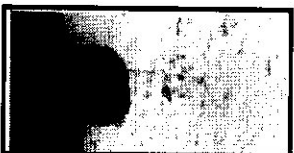
1 - Sillon profond très fin :
200 μm de profondeur sur quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur



2 - Épaississement du sillon :
200 μm de profondeur sur quelques micromètres d'épaisseur



3 - Épaississement hétérogène du sillon :
piqûres, corrosion intragranulaire



4. Développement des piqûres et de la corrosion intragranulaire:
Formation d'une piqûre sévère débouchante inférieure à 200 μm de profondeur



5 - Développement de la piqûre sévère :
La piqûre ou corrosion intragranulaire s'étend sur toute la profondeur du sillon initial

200 μm



- Apparition d'un nouveau sillon fin et profond en avant de la
Piqûre sévère.

Figure III-11 : L'évolution de la corrosion intergranulaire.

Cette forme de corrosion est causée par une différence de potentiel électrochimique entre le grain lui-même et la zone des joints de grains, où se produisent des précipitations de composés intermétalliques. Le grain (encore appelé la matrice) est constitué d'une solution solide et de composés intermétalliques dispersés.

Il y a des composés intermétalliques :

- moins électronégatifs que la solution solide (Al_3Fe , Al_2Cu): ils sont cathodiques par rapport à la solution solide, et lorsqu'il y a corrosion intercrystalline c'est elle qui est dissoute ;
- plus électronégatifs que la solution solide (Mg Zn_2 , Al_3Mg_2 et Mg_2Si): ils sont anodiques par rapport à la solution solide, et lorsqu'il y a corrosion intercrystalline ce sont les intermétalliques qui sont attaqués.

Tableau III-3 : Potentiels de dissolution des solutions solides et des intermétalliques (Solution NaCl) [2].

<i>Solution solide</i>	<i>Potentiel de dissolution (mV ECS)</i>	<i>Intermétalliques</i>
	-170	Si
	-430	Al_3Ni
	-470	Al_3Fe
Al-4Cu	-610	
	-640	Al_2Cu
Al-1Mn	-650	
	-750	
	-760	Al_6Mn
Al-3Mg	-780	
Al-5Mg	-790	

Al-1Zn	-850	
	-910	Al ₂ CuMg
	-960	MgZn ₂
Al-5Zn	-970	
	-1150	Al ₃ Mg ₂
	-1190	Mg ₂ Si

ECS : électrode au calomel saturé, c'est le plus utilisé dans les milieux aqueux.

Pour les alliages d'aluminium, cette zone anodique a deux origines : précipitation directe d'une phase anodique ou constitution d'une zone anodique appauvrie.

➤ **La précipitation d'une phase anodique**

On l'observe sur les alliages de la famille 5000 dont la teneur en magnésium est supérieure à 3.5% . Sous l'influence de chauffages prolongés, une précipitation de la phase β -Al₃Mg₂ se produit aux joints de grains. Son potentiel de dissolution -1150 mVECS est très anodique par rapport à la solution solide dont le potentiel est de -780mV. Si les conditions s'y prêtent, à savoir un milieu corrosif, il peut y avoir une corrosion inter cristalline [2].

➤ **Constitution d'une zone appauvrie anodique**

On l'observe sur les alliages de la série 2000, par exemple sur un 2024(4% de cuivre), quand la vitesse de trempe est trop lente, il y a précipitation aux joints des grains de la phase durcissante Al₂Cu qui a un potentiel de -640mV. La formation de cet intermétallique se fait avec des atomes de cuivre provenant du voisinage immédiat, si bien que la zone limitrophe aux joints de grains se trouve être appauvrie en cuivre. La solution solide appauvrie a un potentiel qui est proche de -750 mV, anodique par rapport aux joints de grains (figure III-12) :

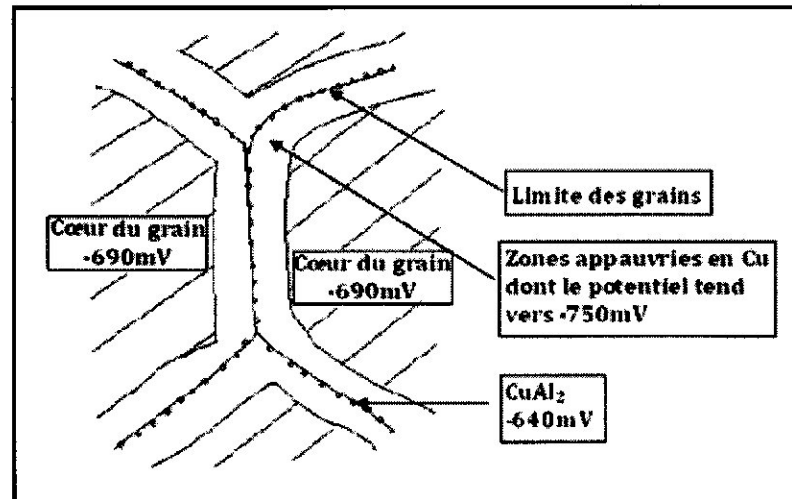


Figure III-12 : Précipitation d'une phase cathodique aux joints de grains d'un alliage 2024 [2].

Si les conditions s'y prêtent, c'est donc cette zone appauvrie (ou dénuée) qui va se dissoudre en cas de corrosion intergranulaire suivant un chemin parallèle aux joints de grains [2].

Pour éviter la corrosion intergranulaire dans le cas de la série 2000, il faut réaliser une trempe rapide. Pour les alliages de la série 7000, l'état T73 survenu améliore en revanche la résistance à la corrosion intergranulaire.

III.6.1.3.2 La corrosion feuilletante (ou exfoliante)

En effet, la corrosion feuilletante constitue la principale forme de dégradation des structures aéronautiques. Ce phénomène se rencontre généralement au niveau des bords d'attaques des ailes d'avions et du nez du fuselage ainsi que sur certaines pièces de structures (planchers, portes,...). Les conséquences de cette corrosion sur l'intégrité des avions et par conséquent sur la sécurité des passagers, constituent un enjeu très sérieux pour l'industrie aéronautique.

Elle se traduit par une pénétration de la corrosion parallèlement aux fibres du métal, et par un feuilletage de la structure sous l'effet du gonflement des produits de corrosion. Le mécanisme de propagation est généralement assimilé à une

Al₁₂CrMn, AlFeMn, etc. qui sont cathodiques par rapport à la solution solide et entre lesquels existe une zone anodique appauvrie en Fe et Mn.

III.6.1.3.2.1 Sensibilité des alliages d'aluminium

Les alliages de la famille 7000 sans cuivre, type 7020, soudés, à l'état T4, sont très sensibles à la corrosion feuilletante.

La sensibilité à la corrosion feuilletante dépend principalement des conditions de transformation et des traitements thermiques. Elle peut être éliminée par des traitements thermiques particuliers (sur-revenu) [2].

III.6.1.3.3 La corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte est une forme de corrosion localisée. Ce mode de dégradation se manifeste sous l'effet couplé d'une sollicitation mécanique (flexion, traction) et d'un environnement agressif (NH⁺₃ pour le cuivre, Cl⁻ pour les aciers inoxydables, l'aluminium...). Il se traduit par une modification locale des propriétés mécaniques du matériau induisant une fissuration à caractère fragile même sur des matériaux très ductiles et provoque la rupture prématurée de pièces en service.

La corrosion est une préoccupation dans le domaine aéronautique. Les pipelines enterrés sont également des structures sensibles au phénomène de fissuration qui apparaît le plus souvent après 20 à 30 ans d'exploitation et résulte du vieillissement des revêtements des tubes (porosité, décollement) permettant aux eaux d'infiltrations d'accéder à la surface de l'acier[8].

III.6.1.3.3.1 Mécanisme de la corrosion sous contrainte

Les machines sont semblables à celles que l'on utilise pour les tests de fatigue, mais, dans ce cas, les essais se déroulent dans un milieu corrosif, liquide ou gazeux. Parfois, en milieu électrolytique, pour évaluer l'influence de la corrosion, on compare généralement les résultats obtenus dans un milieu corrosif à ceux obtenus dans un milieu inerte. Il existe deux sortes d'essais de fatigue-corrosion en fonction du type d'éprouvette :

- éprouvettes non fissurées,
- éprouvettes fissurées.

III.6.1.3.4.1.1 Essais de fatigue-corrosion avec éprouvettes non fissurées

Les éprouvettes sont lisses ou entaillées. On leur impose une charge ou une déformation. Le paramètre imposé suit une fonction cyclique du temps, de forme

sinusoïdale. La figure III-14 définit les trois paramètres mécaniques d'un essai de fatigue-corrosion à charge imposée sinusoïdale :

- La contrainte maximum σ_{max} ,
- La contrainte minimum σ_{min} ,
- La durée d'un cycle t_{cycle} .

Cette figure indique deux autres paramètres : la contrainte moyenne,

$\sigma_{moy} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$, et la variation de contrainte $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$.

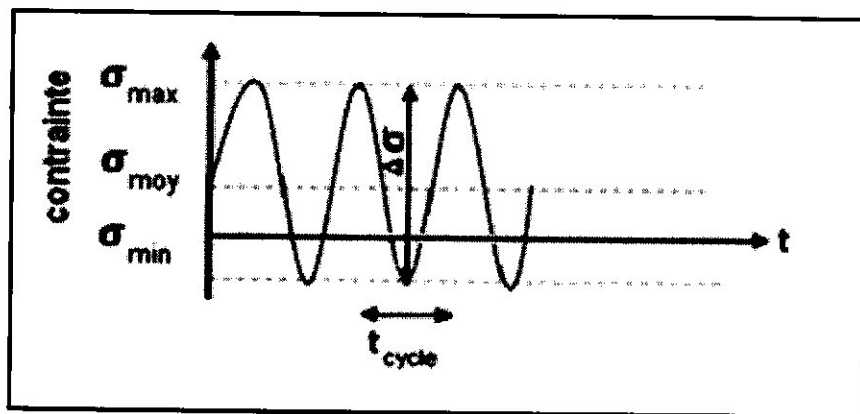


Figure III-14 : Différents paramètres caractérisant la contrainte périodique dans un essai de fatigue.

Les essais de fatigue avec éprouvettes non fissurées consistent à mesurer la durée avant défaillance t_f , qui s'exprime en nombre de cycles : $N_f = \nu t_f$

N_f : désigne le nombre de cycle avant défaillance,

ν : La fréquence de sollicitation.

La représentation graphique des résultats d'essais de fatigue dans le plan $\Delta\sigma - \log N_f$ est appelée *courbe de Wöhler*. Elle permet de déterminer la *limite d'endurance*, qui représente la contrainte limite au-dessous de laquelle on n'observe plus de défaillance due à la fatigue (figure III-15). Certains métaux n'ont pas de limite d'endurance nette. On définit alors une endurance arbitraire, à savoir la contrainte correspondant à 10^8 cycles.

La corrosion réduit la durée avant défaillance et supprime la limite d'endurance.

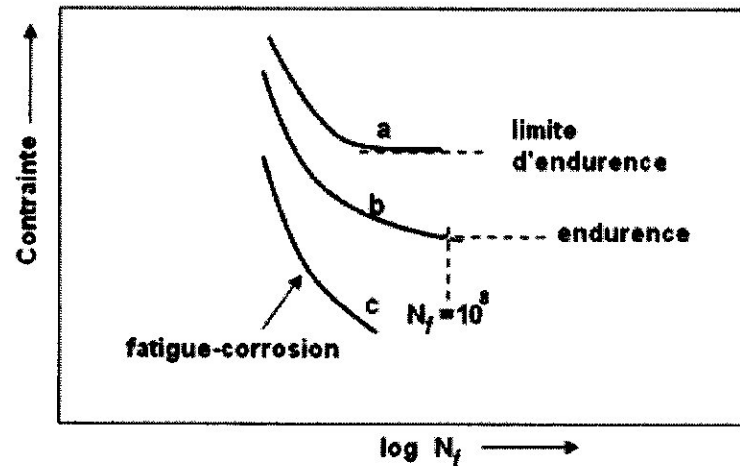


Figure III-15 : Courbe de Wöhler : métal exhibant une limite d'endurance (a), métal ne montrant pas de limite d'endurance (b), métal sujet à la fatigue-corrosion (c) [3].

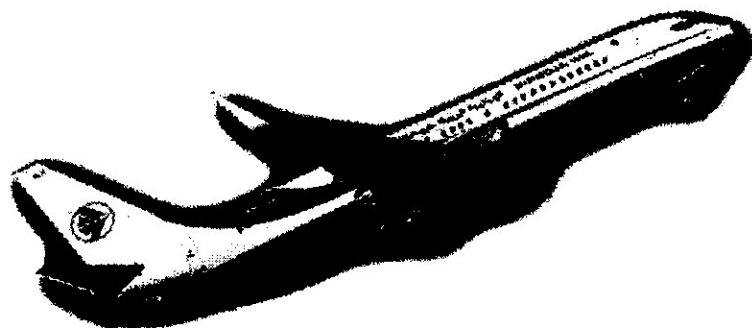
Dans un essai de fatigue-corrosion avec éprouvettes non fissurées, la durée avant défaillance ne dépend pas seulement de l'effort mécanique et de la corrosivité du milieu, mais elle varie aussi en fonction des conditions expérimentales :

- Etat de la surface du métal : Une surface rugueuse permet plus facilement l'amorçage d'une fissure qu'une surface lisse. Ainsi une surface en compression, suite à un sablage ou à un grenailage par exemple, augmente la durée avant amorçage des fissures.
- Géométrie de l'éprouvette : généralement, la présence d'une entaille réduit la valeur de la durée avant défaillance.

III.6.1.3.4.1.2 Essais de fatigue-corrosion avec éprouvettes préfissurées

Donc, l'aluminium est un métal thermodynamiquement réactif, ne se corrode pas d'une manière spécifique, mais sous diverses formes suivant des facteurs inhérents au métal et au milieu. Le prochain chapitre sera consacré à une approche préventive contre la corrosion.



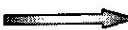
CHAPITRE IV
PREVENTION ET LUTTE
CONTRE LA CORROSION



Introduction

La corrosion est une préoccupation majeure des constructeurs aéronautiques car elle peut diminuer la longévité des appareils et parfois même affecter leur sécurité. Pour prévenir l'initiation et le développement de la corrosion, les constructeurs ont mis en place des actions visant à prendre en compte, dès la conception, les risques de corrosion. Elles reposent, d'une part, sur l'identification des zones les plus sensibles par une analyse approfondie des problèmes rencontrés en service et, d'autre part, sur une meilleure connaissance du comportement des matériaux et des assemblages afin d'optimiser les protections à appliquer dans ces zones.

Il en résulte que la cellule d'un aéronef peut être divisée en trois catégories selon le risque de corrosion encouru [8] :

- **Catégorie A** : zones en contact avec l'air sec et avec un accès facile qui permet une inspection aisée  supérieure du fuselage.
- **Catégorie B** : zones en contact avec le carburant  réservoirs.
- **Catégorie C** : zones en contact avec différents liquides (eau, fluide hydraulique, boissons) et/ou zones d'accès difficile et/ou zones avec risque d'endommagement des protections  partie basse de fuselage à partir du plancher cabine.

IV.1 Démarche de prévention de la corrosion

Afin de prévenir le développement de la corrosion sur les avions modernes, des mesures ont été prises depuis plus de vingt ans par les constructeurs pour :

- Prendre en compte, dès la conception les risques de la corrosion par une meilleure connaissance du comportement des matériaux, l'identification et l'analyse des problèmes rencontrés en service, la sensibilisation et la formation du personnel.

- Améliorer les moyens de protection contre la corrosion et renforcer la protection des zones sensibles (principalement en catégorie C).

Une comparaison des problèmes de corrosion observés sur des avions modernes avec ceux rencontrés sur des appareils plus anciens (Caravelle, Transall) permet de tirer des conclusions intéressantes :

- Les zones concernées sont préférentiellement dans les parties basses de fuselage au niveau des portes et au voisinage des toilettes. Le développement de la corrosion est expliqué par la présence d'eau, de fluides hydrauliques ou de liquide de nettoyage qui se répandent et stagnent.
- Les changements de matériaux ou de protections, le renforcement de l'étanchéité par l'utilisation de mastics (en intercalaire, en cordons et pour le remplissage des trous de fixation) se sont avérés, après quelques années d'exploitation, efficace pour éviter la propagation de différents types de corrosion (corrosion caverneuse, corrosion filiforme, corrosion microbienne, corrosion sous contrainte).
- Les cas les plus fréquents qui persistent sont d'origine galvanique (couplage aciers inoxydables ou composites carbone/résine avec des alliages d'aluminium) ainsi que de la corrosion intergranulaire ou exfoliante liée à l'utilisation de tôles profilés en 2024 T3.

IV.2 Les principaux moyens de protection contre la corrosion dans l'industrie aéronautique

IV.2.1 Sélection des matériaux

Tous les matériaux employés dans l'industrie aéronautique n'ont pas le même degré de sensibilité intrinsèque à la corrosion dans les milieux rencontrés en service.

Il s'agira donc de conditionner cette surface par une succession d'opérations appropriées afin de la rendre apte à recevoir les traitements ultérieurs. L'ensemble de ces opérations unitaires en amont du traitement de surface proprement dit, connu sous le terme de « séquence de préparation ».

La préparation des surfaces a pour but d'éliminer les agents de contamination : huile, graisse, produits d'oxydation avant la mise en peinture des subjectiles, donc de passer d'une surface métallique « polluée » à une surface physiquement et chimiquement propre en éliminant la couche de souillures formée de graisses et d'oxydes superficiels .

Dans la pratique, préparer une surface nécessite plusieurs étapes essentielles :

- La première consiste à dégraisser la surface.
- La seconde concerne le décapage dont l'objectif principal est la destruction des couches d'oxydes interfaciaux.

IV.2.2.1.1 Dégraissage

Sa fonction consiste à éliminer la pellicule grasse générée lors d'une lubrification ou la couche superficielle difficilement hydratante, qui confère un caractère hydrophobe à l'interface. Dégraisser revient à rompre la liaison huile/oxyde métallique.

Plusieurs formes de dégraissages existent :

a. Dégraissage chimique par voie aqueuse

Met en œuvre de solutions alcalines ou neutres, additionnées de tensioactifs, plusieurs mécanismes devront être mis en jeu :

- ↳ La détergence qui consiste à piéger l'huile à l'aide de tensioactifs, en évitant leur redéposition ultérieure sur la surface métallique.

↳ La saponification, qui consiste à détruire la liaison métal (ou oxyde métallique) / huile saponifiable par l'action d'une base.

L'aluminium et l'alumine sont amphotères, c'est-à-dire attaquables à la fois par les acides, principalement les hydracides HF, HCl, et par les bases, l'hydroxyde de sodium NaOH, l'hydroxyde de potassium KOH et le carbonate de sodium Na₂CO₃.

Les dégraissants à base alcaline : NaOH, KOH, Na₂CO₃ doivent être utilisés avec précaution. Il faut donc employer, de préférence des produits à base de phosphates, de borates contenant des silicates ou des chromates (inhibiteurs d'attaque), dont le phosphate d'aluminium est très stable et très insoluble.

Ce type de dégraissage est suivi obligatoirement d'un rinçage à l'eau distillée chaude de préférence ($\cong 60^{\circ}\text{C}$), pour éviter les rétentions d'acide, sources éventuelles de corrosion localisée.

b. Dégraissage en milieu organique

Le dégraissage des surfaces métalliques par des solvants organiques chlorés (trichloréthylène, perchloréthylène) est une opération couramment utilisée industriellement avant mis en peinture. Elle est réalisée préférentiellement en phase vapeur, les solvants étant préalablement chauffés dans les cuves. Les pièces froides sont placés dans la zone des vapeurs, lesquelles se condense et assurent par ruissellement leur dégraissage. Les subjectiles métalliques sont ensuite remontés dans la zone de séchage où le solvant vaporisé se condense sur les parois froides avant de retomber dans la cuve.

IV.2.2.1.2 Décapage

Deuxième étape de la séquence préparation, la fonction principale de cette opération concerne l'enlèvement des oxydes superficiels formés lors de traitements thermiques et /ou mécaniques antérieurs.

On distingue industriellement deux types de procédés :

- ↳ Le décapage chimique effectué par immersion ou aspersion, dans une solution aqueuse.
- ↳ Le décapage mécanique par projection d'abrasifs.

Le décapage chimique procède de la dissolution acide/base de l'oxyde superficiel puis de la corrosion généralisée du métal sous-jacent, de manière à activer la surface métallique avant la conversion chimique. Les solutions de décapage sont essentiellement acides et plus particulièrement composées d'acides minéraux, peu onéreux et faciles à retraiter.

Dissolution des oxydes présents en surface de l'alliage et attaque de l'aluminium selon les réactions :

Bain sulfochromique



Bain nitrochromique



Le décapage mécanique par projection d'abrasifs perdu et ou recyclé (grenailage, sablage...) est fortement développé. Cette opération consiste à éliminer les oxydes métalliques qui se forment lors du laminage à chaud (calamine) ou à froid (rouille), les résidus de soudure, les résidus de moulage ou les anciens revêtements tels que les peintures, par arrachement, grâce aux multiples impacts de petites particules abrasives, projetée avec une énergie cinétique suffisante.

Avant grenailage il est indispensable de déterminer avec soin les principales caractéristiques physico-chimiques du matériau à traiter : dureté, forme et épaisseur du support métallique. La connaissance de ces grandeurs permettra de choisir le type de grenaille le mieux adapté.

IV.2.2.2 Protection de surface

L'utilisation dans l'industrie aéronautique d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques comme ceux de la série 7xxx, nécessite de mettre en œuvre des moyens de protection contre la corrosion efficaces pour assurer la durabilité de la structure. Plusieurs procédés sont en général couplés pour obtenir une protection optimale. La figure IV.1 donne un schéma d'un système de protection classique qui comprend trois couches successives : la conversion chimique ou l'anodisation reposant sur le substrat, le primaire et puis la couche de finition (décoration).

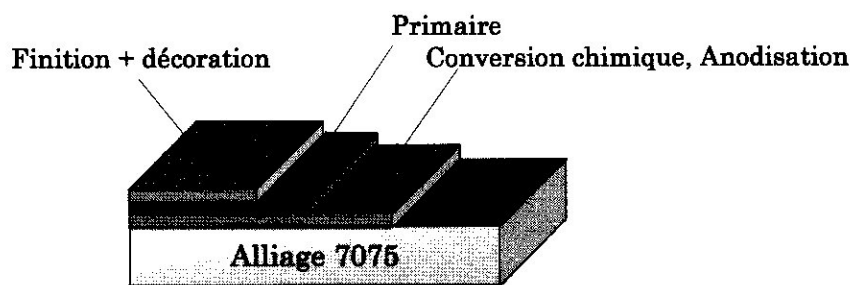


Figure IV-1 : Schéma d'un système de protection utilisé dans l'industrie aéronautique.

IV.2.2.2.1 Les traitements de conversion chimique des alliages d'aluminium

Les premiers traitements de conversion chimique ont vu le jour dès 1936 pour les applications aéronautiques. Ces traitements de conversion appartiennent à la famille des traitements à caractère anodique. Permettant la formation d'un composé métallique en surface par voie chimique ou électrochimique.

Ces traitements servent principalement de base d'accrochage des peintures, des vernis et des colles. Ils augmentent légèrement la résistance à la corrosion de l'aluminium.

Il y a deux types de conversions chimiques :

a. La chromatation

Le principal traitement de conversion chimique utilisé dans le secteur aéronautique est la chromatation. Par exemple, l'Alodine largement employé dans l'industrie aéronautique fait intervenir des ions $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (0.01 M de Cr^{+6}), en présence d'ions F^- et un PH acide, le métal de base est le siège de réactions redox induites par la présence de zones microanodiques et microcathodiques en surface. Ce traitement conduit à la formation d'un composé insoluble sur la surface, composé d'hydroxydes et oxyhydroxydes de chrome et d'aluminium, selon la réaction suivante :



Les principales caractéristiques de ces couches sont les suivantes :

- en aéronautique l'épaisseur de la couche de conversion est de l'ordre de 6000 \AA , soit une masse surfacique de l'ordre de 1 g/m^2 .
- Tenue à la corrosion (intrinsèque) faible (168 heures d'exposition en brouillard salin) sur des alliages d'aluminium type 2024.
- Température maximale d'utilisation de 70°C (pour éviter une déshydratation partielle et une fissuration éventuelle de la couche qui diminue fortement son pouvoir protecteur).
- Propriétés électriques intéressantes (couches conductrice contrairement aux couches d'anodisation).
- Faible chute de la tenue en fatigue des pièces traitées.

Le traitement peut être réalisé en cuve, ou hors cuve pour une application locale.

Les principaux constituants des cuves sont l'anhydride chromique, l'acide fluorhydrique et le ferricyanure de potassium, ces composés chimiques peuvent être remplacés par d'autres. La coloration du revêtement à base de chromate va de l'incolore au brun foncé en passant par le jaune doré.

b. phospho-chromatation

Les principaux constituants des bains qui permettent l'obtention de ce revêtement sont respectivement :

- Le chrome : hexavalent introduit soit sous forme d'acide chromique, soit de chromate ou de bichromate à condition que l'acidité de la solution permette l'activation de la surface métallique.
- L'acide phosphorique ou les phosphates.
- Les fluorures qui sont ajoutés de manière à régler les poids de la couche. ceux-ci sont introduits sous forme d'acide fluorhydrique, de sels, de produits fluorés complexes. La quantité de fluorures contenue dans le bain permet la transformation de la couche pouvant aller d'un vert clair à un blanc poudreux.

Des analyses réalisées sur la couche de conversion ont permis de montrer que celle-ci serait composée d'un phosphate de chrome hydraté (constituant principal), d'un oxyde de chrome au voisinage du métal de base et d'un mélange de fluorures d'aluminium et d'alumine [7].

Ces couches présentent une bonne résistance à la corrosion combinée à une très bonne adhérence de la peinture.

IV.2.2.2 Les traitements d'anodisation

Une des méthodes permettant d'améliorer la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium est l'anodisation. C'est une opération qui, par un processus électrolytique, substitue à la couche d'oxyde (alumine) qui recouvre naturellement l'aluminium, une couche d'oxyde d'épaisseur plusieurs centaines de fois supérieure. En effet, l'épaisseur de la couche d'oxyde naturelle est de l'ordre d'une centaine de nanomètres, alors que la couche obtenue par anodisation est couramment de l'ordre

de la dizaine de micromètres. Celle-ci peut même atteindre, dans des conditions particulières, plusieurs centaines de micromètres.

Dans le secteur aéronautique, l'anodisation est le traitement le plus couramment employé pour :

- La protection contre la corrosion atmosphérique.
- L'amélioration de la dureté et de la résistance à l'abrasion.
- La protection des pièces non peintes (après colmatage de la couche).
- La possibilité de coloration.
- l'adhérence des peintures sur les pièces peintes (cas le plus fréquent).
- L'isolation électrique et thermique.

IV.2.2.2.1 Principe de l'anodisation

Le principe de l'anodisation consiste à réaliser la conversion superficielle par polarisation anodique du métal de base, la pièce d'aluminium est placée dans une cuve d'acide chromique (OAC) ou sulfurique (OAS) et est reliée au pôle + (anode) d'un générateur de courant. Le passage d'un courant sous tension imposée engendre la formation de la couche d'oxyde.

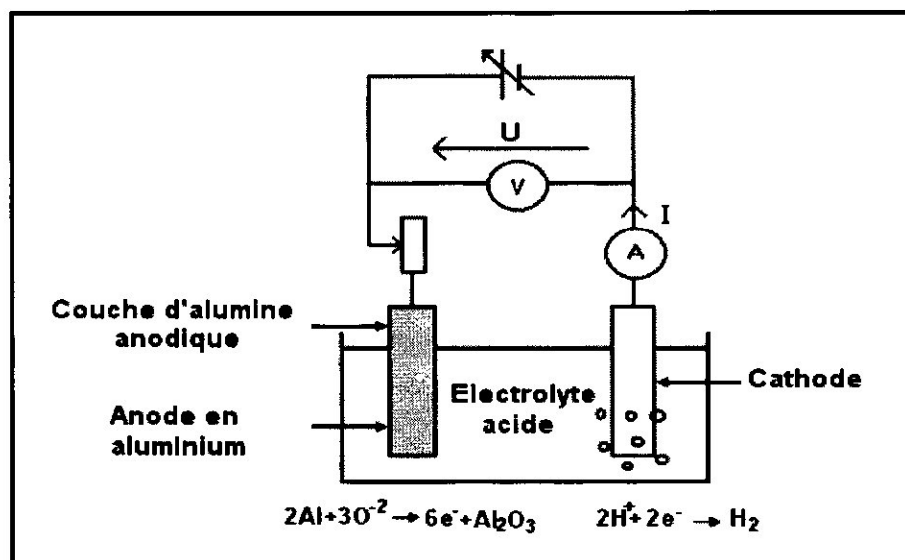
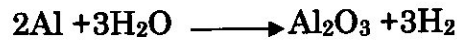


Figure IV-2 : Principe de l'anodisation de l'aluminium.

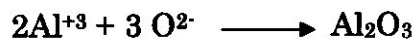
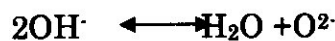
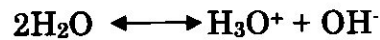
La réaction globale d'oxydation anodique de l'aluminium en milieu acide est :



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



- À l'anode, plusieurs étapes sont proposées pour former l'oxyde d'aluminium



Ce traitement conduit à la formation d'une couche d'oxyde d'aluminium de type duplex (figure IV-3):

- Une couche continue, anhydre et diélectrique, en contact avec le substrat. Cette couche est d'épaisseur très mince (quelques dizaines de nanomètres), dite *couche barrière*
- Une couche poreuse, hydratée qui recouvre la couche barrière et dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs micromètres.

IV.2.2.2.3 Les revêtements métalliques

Le cadmium est très largement utilisé dans l'aéronautique car il présente une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et il produit un couple galvanique acceptable avec l'aluminium. De même, il présente un comportement anodique (sacrificiel) avec les aciers. Enfin ses propriétés mécaniques en frottement sont tout à fait intéressantes (éléments de fixations).

Le cadmiage se réalise généralement à partir de bains cyanurés. Ces bains peuvent contenir des additifs organiques qui permettent d'affiner la structure des dépôts.

Par contre, pour les aciers à haute résistance ($> 1450\text{Mpa}$), l'ajout de tels additifs dans les bains, est rigoureusement interdit car ils favorisent le dégagement d'hydrogène et donc les risques de fragilisation des aciers. La résistance à la corrosion des dépôts est améliorée par un traitement final de chromatisation.

Le cadmium est un élément toxique et la réglementation limite sévèrement son utilisation. Des revêtements de substitution sont recherchés et des résultats prometteurs ont été obtenus avec des revêtements d'alliages Zinc-nickel (6 à 15 % de nickel) pour certaines applications. Ces procédés sont déjà employés industriellement dans d'autres secteurs et leur validation est en cours.

IV.2.2.2.4 Les revêtements organiques

Outre le pouvoir protecteur, les peintures doivent satisfaire à de nombreuses exigences en particulier en termes de résistance chimique du fait du contact possible avec des fluides hydrauliques chauds (à base d'ester phosphorique) et d'adhérence sur les substrats.

Un système de peinture comprend deux éléments essentiels :

- la peinture primaire (primaire réactif appelé *Wash primaire*, et *primaire anticorrosif*) qui assurent deux fonctions :
 - accrochage sur le métal,
 - protection anticorrosion,
- la peinture de finition ayant également deux rôles :
 - résistance à l'abrasion,
 - effet de décoration.

La peinture primaire est constituée de résines polyuréthanes ou époxy dans lesquelles sont incorporés des pigments inhibiteurs de corrosion à base de chromates.

Il est impossible d'obtenir une adhérence convenable d'un revêtement organique : peinture, vernis, etc. sur l'aluminium sans une préparation de surface. Il faut donc effectuer une telle préparation, en commençant généralement par un dégraissage adapté, par l'élimination des oxydes préexistants, et par la formation d'une basse d'accrochage suivie d'une enduction de primaire [2].

L'adhérence du primaire sur le substrat est assurée par un traitement d'anodisation non colmatée sur les alliages d'aluminium. L'épaisseur du primaire est d'environ 20 à 25 μm . Dans certains cas, cette adhérence est assurée sans utilisation de *Wash primaire*. La peinture de finition, à base de résine polyuréthanes, est parfois appliquée sur le primaire pour améliorer la protection contre la corrosion dans des zones de catégorie C (partie basse de fuselage à partir du plancher cabine), l'épaisseur de finition appliquée varie de 40 à 70 μm .

L'application de ces peintures est généralement est réalisée de manière manuelle par pulvérisation pneumatique. Sur pièces élémentaires ou sous-ensembles, la température de polymérisation est limitée 110-120°C pour éviter de modifier les

au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu.

IV.2.2.2.6.1 Emploi des inhibiteurs

Pour l'aluminium, l'inhibition a pour but de réduire ou de supprimer la corrosion par piqûres au contact de l'eau ou des liquides aqueux, principalement dans les cas suivants :

- Dans les circuits fermés des échangeurs de chaleur.
- Lors du décapage acide ou alcalin qu'on pratique généralement au début des traitements de surface. Le but des inhibiteurs est de limiter au maximum l'attaque du métal lors de leur court séjour dans les bains de décapage.
- Lors du nettoyage de matériel en aluminium, en particulier en milieu alcalin très utilisé pour le dégraissage du matériel.
- Pour protéger les avions contre la corrosion lors de leur nettoyage.

IV.2.2.2.6.2 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion

D'un point de vue électrochimique, un inhibiteur à caractère anodique(ou cathodique) agira préférentiellement sur la réactivité anodique (cathodique) du matériau. De la même manière, un inhibiteur à caractère mixte agira sur les réactivités cathodique et anodique. Les mécanismes d'action des inhibiteurs peuvent être différents selon la nature chimique de la molécule inhibitrice et les conditions expérimentales.

On peut concevoir l'action de l'inhibiteur comme [11]:

- l'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif,
- la formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur et une ou plusieurs espèces du milieu corrosif,
- le renforcement d'une barrière préexistante.

IV.2.2.2.6.3 Les principaux inhibiteurs de corrosion de l'aluminium et de ses alliages

a. Les inhibiteurs inorganiques

↳ *Chromate et dichromate*

La meilleure résistance à la corrosion est obtenue pour une concentration de 0,2 mol/l de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Les ions $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ n'empêchent pas la germination des piqûres mais stimulent la réparation des zones actives. La compétition entre l'adsorption des espèces agressives Cl^- et des espèces passivantes $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ est un facteur non négligeable sur l'efficacité de l'inhibiteur. Le rapport $[\text{Cl}^-]/[\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}]$ est à minimiser pour obtenir une bonne efficacité.

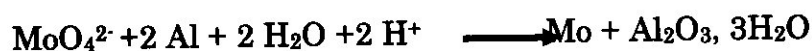
Le mécanisme de passivation s'explique par une adsorption préalable des molécules et un processus d'oxydation-réduction dans lequel la réduction de l'anion passivant se fait au niveau des défauts localisés sur la surface de la couche d'oxyde hydratée, selon la réaction :



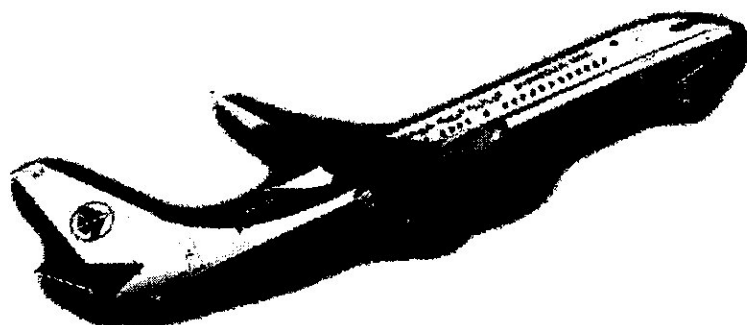
↳ *Molybdate et tungstate*

Les espèces molybdate MoO_4^{2-} et tungstate WO_4^{2-} forment un film en surface et apparaissent comme des inhibiteurs efficaces. Mais, il apparaît que le film passif formé avec les ions MoO_4^{2-} est cependant beaucoup moins efficace que ce lui formé avec les ions $\text{CrO}_4^{2-}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$.

Le processus d'oxydation-réduction, semblable à celui des ions CrO_4^{2-} , fait intervenir la réduction de l'anion passivant au niveau des défauts de la couche d'oxyde hydratée et la formation d'un produit relativement stable faisant office de couche barrière. Les réactions suivantes décrivent ce processus.



CHAPITRE V
PROCEDURE
EXPERIMENTALE DU
TRAITEMENT



V.2 La procédure de réparation des ferrures de fixation entrée d'air-moteur

Avant le traitement de la corrosion, on a coupé l'alimentation électrique de l'avion A330-200, comme il est indiqué dans le manuel « the Airbus Industrie A330 Aircraft Maintenance », et puis, on a enlevé l'entrée d'air.

Après, on a effectué une inspection, au niveau d'atelier NDT, on a introduit une sonde parcourue par un courant alternatif dans le trou de la ferrure à étudier, la présence d'une corrosion est indiquée par une visualisation des variations de l'impédance électrique de la sonde sur un appareil « Roto test ».

Cette méthode fait partie des testes non destructifs utilisés dans la maintenance aéronautique.

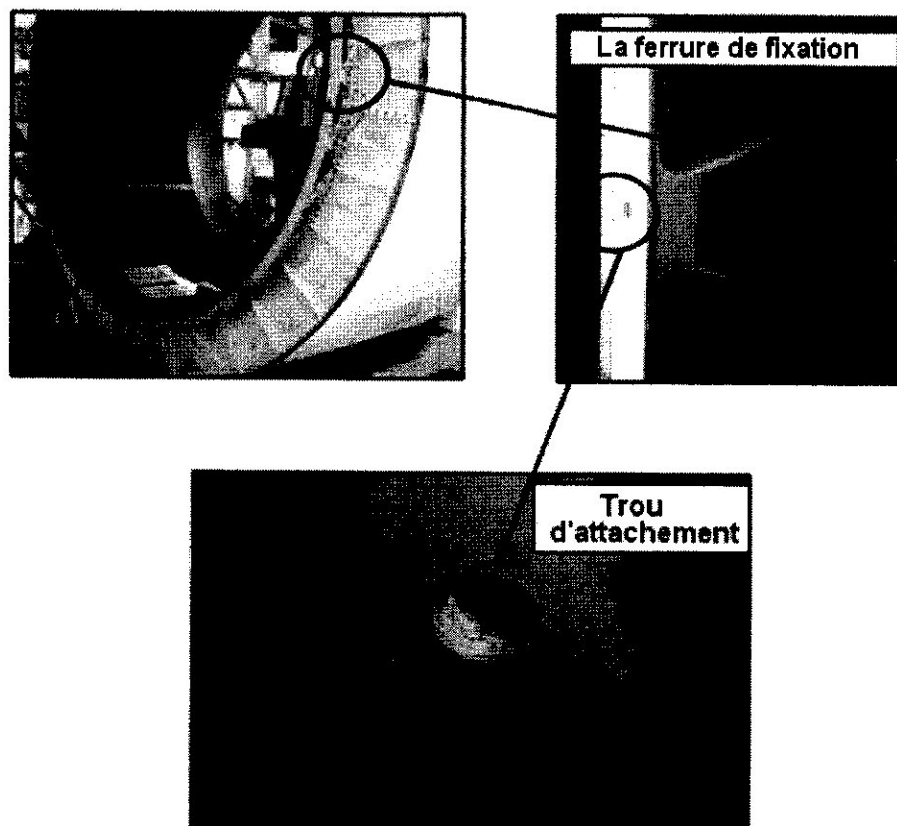


Figure V-1 : Photographie d'un trou d'attache corrodé pour l'inspection.

➔ On a effectué un enlèvement de la corrosion des surfaces de diamètre intérieur par alésage à l'aide d'un alésoir. Le diamètre maximal ne doit pas dépasser

$\phi_{\max} = 0,554$ inch (14.07mm) sur n'importe quel trou. Sachant que le diamètre initial des trous est $\phi = 0,539$ inch (13.69mm).

Après l'enlèvement de la corrosion, on a obtenu une pièce d'un diamètre 0.554 inch (14.07 mm), et d'une profondeur 0,020 inch (0,508 mm), les coins de rayon 0,03 inch (0,76 mm).

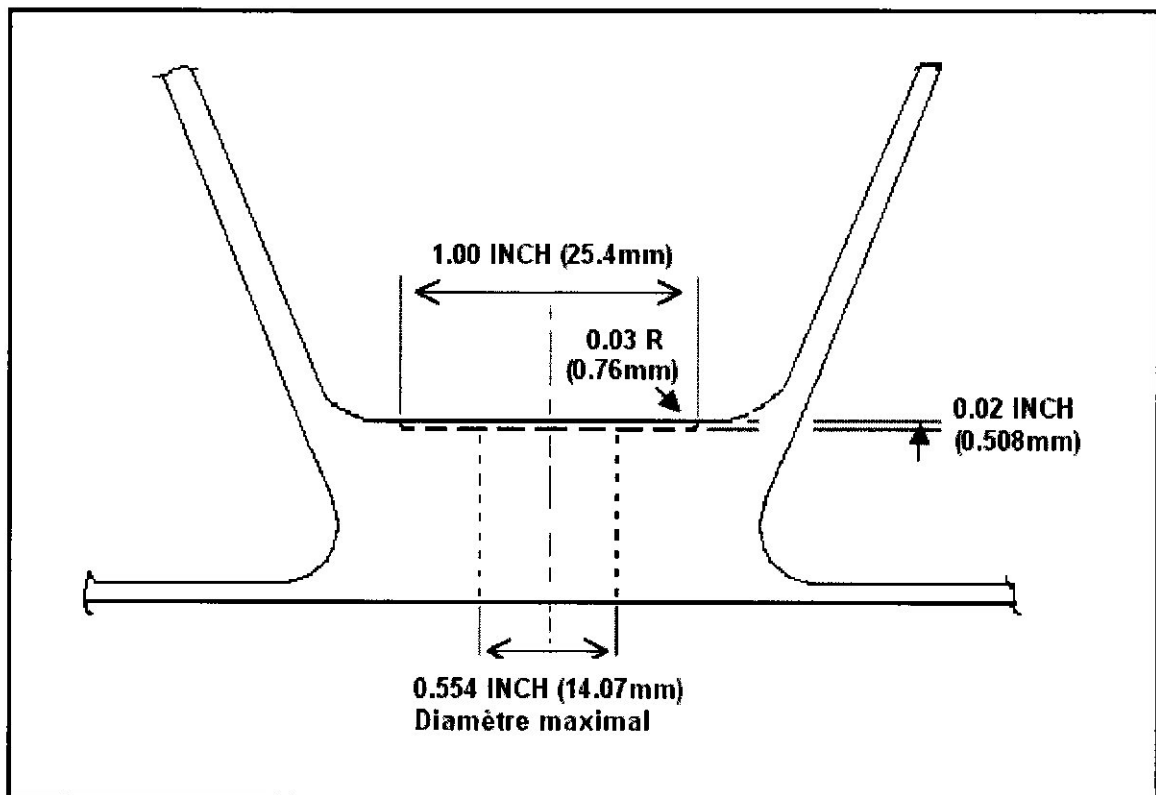


Figure V-2 : Les dimensions de la ferrure après l'enlèvement de la corrosion.

- ➔ On a maintenu 125 RMS de finition sur les surfaces traitées des ferrures
- ➔ Encore une fois, on a effectué une autre inspection au niveau d'atelier NDT, pour assurer une complète disparition de la corrosion, et puis on a nettoyé les surfaces traitées avec un solvant *Methyl Isobutyl Ketone MIBK* pour enlever tous les débris et contamination, et donc la surface de la pièce sera apte à être traitée par les produits chimiques de l'opération suivante.

Toutefois, quelques-uns des trous se trouvaient encore à la corrosion, dans ce cas, le dommage est réparé par le surdimensionnement des trous, à un maximum de $\varnothing_{\max} = 0.687 \text{ inch} = 17.44 \text{ mm}$. Pour remplacer la matière corrodée, on a usiné des bagues avec épaulement par le tournage, les bagues sont en acier inoxydable 17-4PH, avec un diamètre maximal admissible $\varnothing_{\max} = 0.687 \text{ inch} = 17.44 \text{ mm}$.

La gamme d'usinage des bagues est :

1. Sur poutre est réalisée une ébauche de \varnothing_{\max} extérieur, et de \varnothing_{\min} intérieur, avec une dimension de 5/10 par rapport au diamètre final,
2. Un alésage débouchant est réalisé par un foret,
3. Une finition est réalisée,
4. Il est fait un trançage avec 1mm en plus pour la finition, et puis un dressage de la face.

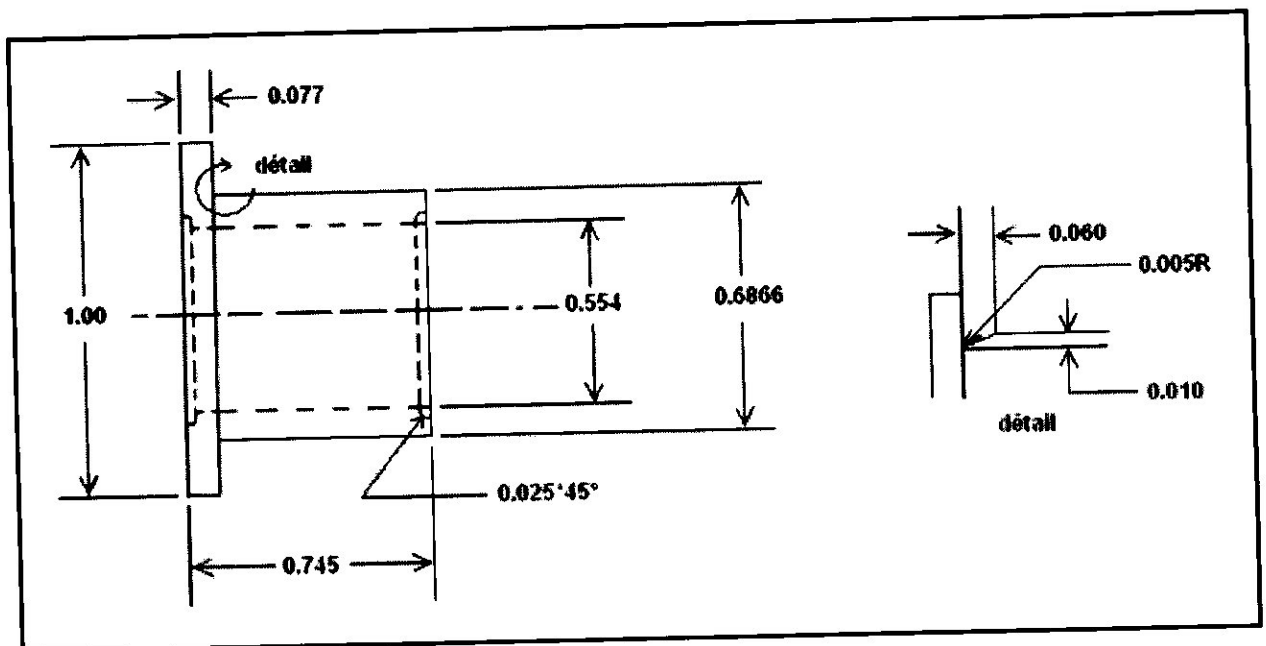


Figure V-3 : Les dimensions de la bague (toutes les dimensions sont en inch).

→ Comme moyen de protection très répandu contre la corrosion des métaux différents, on a appliqué une couche protectrice d'Alodine 1200 et ensuite d'époxy primaire BMS sur les ferrures au diamètre intérieur et à la surface adjacente de

contact (si nécessaire), à l'aide d'une brosse en nylon selon les instructions du fabricant.

- ➔ On a mélangé et puis on a appliqué l'inhibiteur de corrosion Joint PR sur les ferrures, au diamètre intérieur.
- ➔ À la fin, on a inséré les bagues usinées dans les ferrures au niveau des trous. mais avant le montage, il faut les tremper entièrement dans un liquide azote à une température de -320°F (-195°C) avec une durée suffisante de 25-30 min, pour le retrecissement 5/100, et puis, on a installé l'entrée d'air avec le moteur CF6-80E1.

V.3 Essais de corrosion

Quatre types de tests sont couramment utilisés pour les études de corrosion des alliages d'aluminium : les tests en immersion totale, les tests en immersion alternée, les expositions au brouillard salin et l'exposition au milieu marin. Le milieu retenu pour notre test permet d'obtenir après quelques dizaines d'heures d'immersion totale, un état de dégradation qui correspond à celui observé après environ une vingtaine d'année d'exploitation d'un avion.

Des essais de perte de masse ont été effectués dans le laboratoire de Génie Mécanique d'Université Saad Dahleb de Blida dans le but de contrôler la résistance à la corrosion des échantillons d'alliage d'aluminium 7075 qui ont subi une conversion chimique (Alodine 1200, Primaire) ou non. Il s'agit des plaques rectangulaires de dimensions 25mm x 25mm x 2.5mm.

V.3.1 Principe général de l'essai

Les échantillons ont été immergés dans des béciers contenant la solution d'acide HCl de concentration 0.1M, maintenue à une température ambiante, la durée de l'essai est de 72heures. Les résultats sont ensuite exprimés en variation de masse par unité de surface. Des écoulements de produits de corrosion peuvent également être observés lorsque la dégradation est importante. Ces essais ont permis de vérifier qualitativement la tenue à la corrosion des différents revêtements étudiés.

V.3.2 Mesure de variation de masse

Afin d'évaluer la perte de masse, on a mesuré la masse des plaques avant et après la corrosion. Les plaques ont été préalablement rincées et séchées avant la mesure de masse. La balance utilisée a une précision de l'ordre de 0,1 mg.

Les résultats de la masse mesurée après la corrosion sont obtenus dans le tableau suivant :

Tableau V-2 : Résultats de test de corrosion.

La masse (g) Echantillons	M0	M1 après 1h	M2 après 3h	M3 après 72h
À l'état de base	3.8173	3.8173	3.8172	3.8169
Avec une couche Alodine 1200	3.9170	3.9170	3.9170	3.9168
Avec une couche Alodine+Primaire	3.8801	3.8801	3.8801	3.8801

Après les mesures des masses de chaque échantillon, on a calculé la variation de masse par unité de surface $\Delta m/\Sigma S$ (g/mm²).

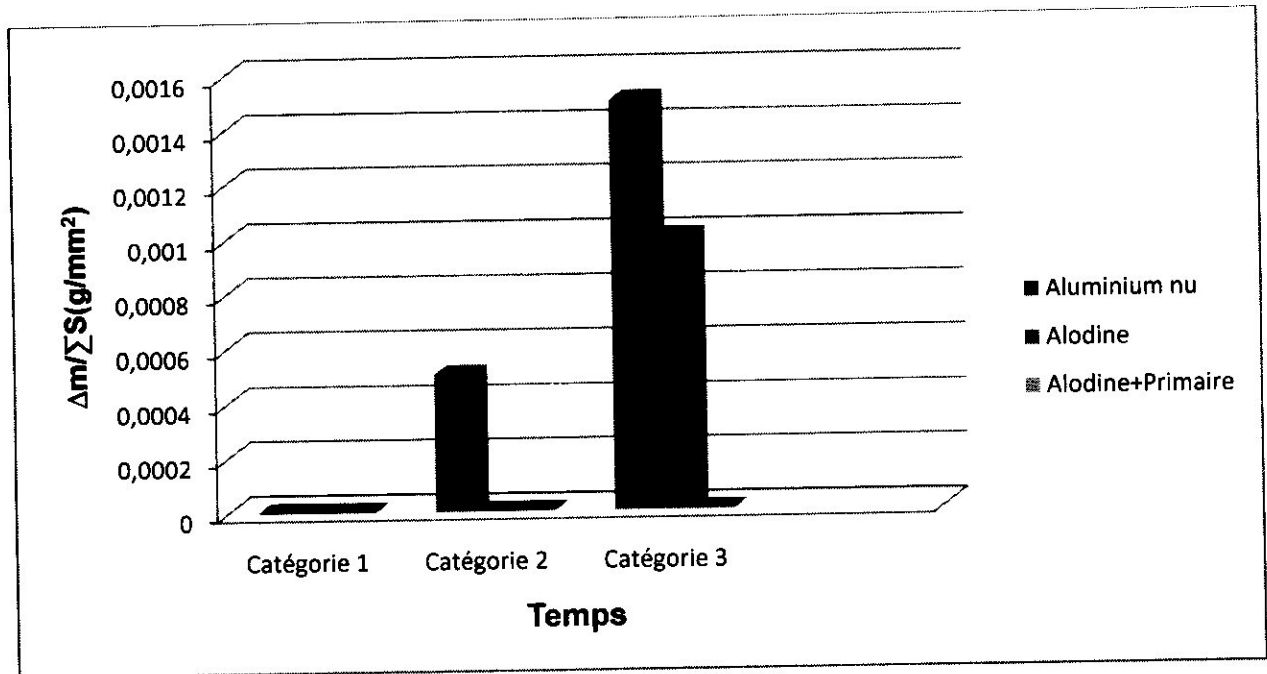


Figure V-3 : Evolution de la corrosion de différents échantillons.

Les résultats de perte de masse ont permis de voir :

- ✈ Pour la couche Alodine+Primaire, on a constaté qu'il n'y a aucune perte de masse pour l'échantillon, pendant 72heurs
- ✈ Pour la couche Alodine 1200, la perte de masse a commencé après 72heures, mais cette perte n'est pas importante.
- ✈ Pour l'échantillon à l'état de base, la perte de masse a commencé après 3 heures, et elle a évoluée de plus en plus avec le temps. Et elle est relativement importante aux autres échantillons.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse est l'étude de la protection contre la corrosion de ferrure de fixation de la butée d'entrée d'air d'un réacteur CF6-80E1 monté sur un Airbus 330. La protection préconisée pour ces éléments en alliage d'aluminium 7075 est l'utilisation des voies d'inhibition avec des composés à base de chrome hexavalent, appelée *l'alodine 1200* et *l'époxy primaire BMS*. Ce procédé représente une solution exclusivement chimique, simple, économique et efficace, pour la protection de longue durée.

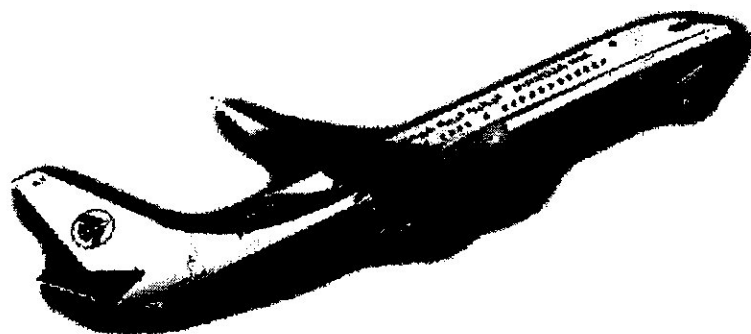
De nombreuses voies de protection contre la corrosion de l'alliage 7075 ont émergées ces dernières années dans le but de remplacer les procédés actuels utilisant des composés à base de Cr (VI). Cependant, malgré le nombre important de travaux portant sur le sujet, aucune solution n'apparaît à ce jour en mesure de pouvoir répondre à la demande industrielle. Par conséquent, dans les cas particuliers des traitements de conversion chimique et d'anodisation de l'alliage d'aluminium 7075, la conversion chimique et l'oxydation anodique chromique demeurent encore les références comme traitements anticorrosion.

On peut aussi en plus raisonnablement soutenir que l'entrée d'air est le siège de passage des écoulements qui peuvent induire des contraintes et sollicitations dynamiques importantes et complexes, donc une source de dommage de forme corrosion sous contraintes et fatigue corrosion, induisant une modification locale des propriétés mécaniques du matériau avec des probables fissurations. Le problème de l'attache peut aussi, aux lieux des plans d'assemblage, et de part ces mêmes sollicitations être lieu de "fretting", ou sous l'effet de l'agressivité du milieu avec l'humidité et la salinité en présence des chlorures qu'on trouve dans l'atmosphère des zones côtières et qu'ils sont d'origine marine. Pour relever ces dilemmes, il est nécessaire de faire plus d'investigation.

L'analyse des causes doit impérativement passer par :

- Une investigation micrographique du facies de rupture.
- Une analyse des conditions dynamiques en ces points
- et l'analyse de l'environnement ou évoluent les équipements endommagés.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

- [1] Manuel « AIRCRAFT MAINTENANCE MANUAL A330 », Imprimé en France.
- [2] Christian Vargel, «CORROSION DE L'ALUMINIUM ». Ed. Dunod, 1999.
- [3] Jean-Marie Dorlot, Jean-Paul Bailon, Jacques Masounave « DES MATERIAUX », Ed de polytechnique de Montréal.
- [4] Dieter Landolt « CORROSION ET CHIMIE DE SURFACE DES MÉTAUX » imprimé par Alden presse, Oxford(GB).
- [5] Max Reboul, « CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM » Techniques de l'ingénieur, COR 325, Paris
- [6] Jean-Jacques « PRÉCIS DE CORROSION »Ed .Beauchemin ltée, Québec, 1994
- [7] S.Audisio, J.-C.Laout « DE LA PRATIQUE DE LA CORROSION ET DE LA PRÉPARATION DES SURFACES MÉTALLIQUES AVANT PEINTURE » Lyon(France) 1997.
- [8] B.Normand, N. Pébère, C.Richard, M. Wery « PRÉVENTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION », Presse polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [9] Christian Vargel, « LE COMPORTEMENT DE L'ALUMINIUM ».Ed. Dunod, 1999.
- [10] Jean Sylvestre Safrany «ANODISATION DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES », Techniques de l'ingénieur,
- [11] C. Fiaud, « INHIBITEURS DE CORROSION ».Techniques de l'ingénieur, 1990.