

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE de la CORROSION
et
PROTECTION d'un ALLIAGE
7075 T6

Proposé par : VERITAL

Etudié par : TARIK . M
NABI

Dirigé par : Mr M. LARIBI

PROMOTION Juin 92

S O M M A I R E

INTRODUCTION	Page 1
I - Etude Bibliographique	
1.1 - Bases et mécanismes de l'électrochimie	Page 3
1.2 - Types de corrosion des alliages d'Aluminium	9
1.3 - Moyens de protection contre la corrosion	21
1.4 - Diagrammes de phases des alliages d'Aluminium	33
II - Partie expérimentale	
II.1 - Alliage considéré	38
II.2 - Action du milieu sur le 7075T6	44
II.3 - Corrosion observés	50
II.4 - Moyen de protection préconisé	52
II.5 - Dispositif expérimental	56
III - Résultats des tests expérimentaux et interprétations	
III.1 - Tests expérimentaux	58
III.2 - Résultats des tests expérimentaux	60
III.3 - Interprétation des résultats expérimentaux	77
Conclusions et Recommandations	
Annexe I	84
Annexe II	85
Références bibliographiques	88

INTRODUCTION

Les problèmes de corrosion dans l'industrie sont extrêmement présents car ils entrent en ligne de compte lors de la décision concernant le choix des éléments entrant dans la composition d'un alliage. La corrosion n'épargne aucun matériau parmi ceux usuellement utilisés dans l'industrie et consiste généralement en la détérioration plus ou moins progressive de l'aspect et des propriétés d'un matériau.

Si nous considérons un département bien particulier de l'industrie qui est l'aéronautique, le constat est le même, et vu que beaucoup des alliages métalliques utilisés sont à base d'Aluminium, les types de corrosion généralement rencontrés dans ce domaine sont ceux relatifs à l'Aluminium.

Notre travail va donc consister en l'étude de la corrosion d'une pièce d'avion qui est la lice, c'est-à-dire faisant partie de la charpente métallique. La corrosion observée à ce niveau est principalement la superposition de deux types de corrosion : La corrosion par piqûres et la corrosion uniforme.

Pour ce faire, nous avons structuré notre étude en plusieurs parties :

1) Etude bibliographique relative aux mécanismes et types de corrosion rencontrés, ainsi qu'une recherche concernant les différents moyens de protection possibles.

2) Etude du matériau à travers sa composition chimique, son utilisation et ses propriétés mécaniques.

3) *La seconde partie concerne le choix du traitement appliqué qui est l'anodisation dans l'acide sulfurique. Ce choix a été basé principalement sur la disponibilité du produit ainsi que son efficacité.*

4) *Ce qui suit est, logiquement, divers essais de corrosion destinés à mettre à l'épreuve la qualité de notre traitement et serviront à tirer des conclusions quant à ce travail.*

5) *La conséquence logique du point précédent est la prise de résultats aussi bien qualitatifs (phénoménologie) que quantitatifs (tracé de courbes sur la base de résultats numériques) avec les interprétations appropriées à chaque cas.*

I.1 Bases et mécanismes élémentaires de l'électrochimie

Les phénomènes de corrosion s'expliquent, dans la majorité des cas (corrosion humide), par des réactions électrochimiques intervenant dans le cadre de mécanismes bien définis.

La corrosion ne peut se produire que si les produits de corrosion sont thermodynamiquement plus stables que le métal et le milieu environnant. Plus précisément, les lois de la thermodynamique disent qu'une corrosion ne se développe que si le système formé par le métal et le milieu environnant possède une enthalpie libre positive par rapport aux produits de corrosion.

La thermodynamique permet de calculer cette enthalpie libre dans le cas de métaux purs placés dans des conditions bien définies et par la suite de prévoir leur comportement.

Comportement d'une tige de métal plongée dans l'eau pure :
[2,6,7,13,15]

L'électrolyte est de l'eau pure parfaitement désaérée. Des atomes de métal perdent des électrons et entrent en solution : L'équilibre est rompu à la surface du métal qui contient un excès d'électrons et devient négatif, tandis qu'il se forme dans la solution au voisinage de la surface métallique un nuage d'ions positifs.

Les forces électrostatiques d'attraction maintiennent les ions positifs et les électrons au voisinage immédiat de la surface métallique. Il s'établit une couche double et un champ électrique constant. On a alors une **différence de potentiel** entre le métal et la solution au voisinage immédiat du métal, c'est le potentiel d'électrode.

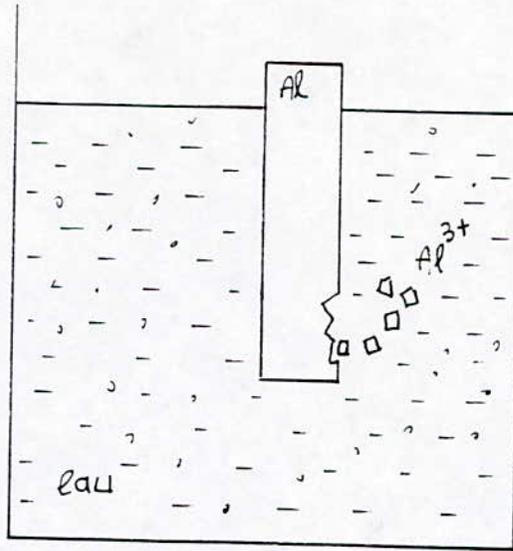


Fig.I.1. : Dissolution d'un métal dans l'eau

Diagrammes de Pourbaix : [1,2]

Le comportement électrochimique des métaux dans l'eau a été présenté sous forme de diagramme exprimant le potentiel d'électrode en fonction du pH. On peut ainsi voir d'un seul coup d'oeil dans quelles conditions on aura :

- Corrosion
- Immunité
- Passivité.

Par contre, ces diagrammes ne donnent aucun renseignement sur :

- La vitesse de corrosion
- L'influence d'impuretés ou d'ions en solution dans l'eau
- L'efficacité des films passifs en présence de Cl^- , SO_4^{2-} , etc.. Ainsi, on voit sur ce type de diagrammes que l'on peut s'échapper du domaine de corrosion en agissant soit sur la valeur du pH, soit sur celle du potentiel E.

Le domaine de passivation correspond en général à la précipitation d'oxydes ou d'hydroxydes, mais le précipité ne forme pas toujours un film protecteur.

S'agissant d'un alliage d'Aluminium, il apparaît nécessaire d'étudier le diagramme de Pourbaix de l'Aluminium.

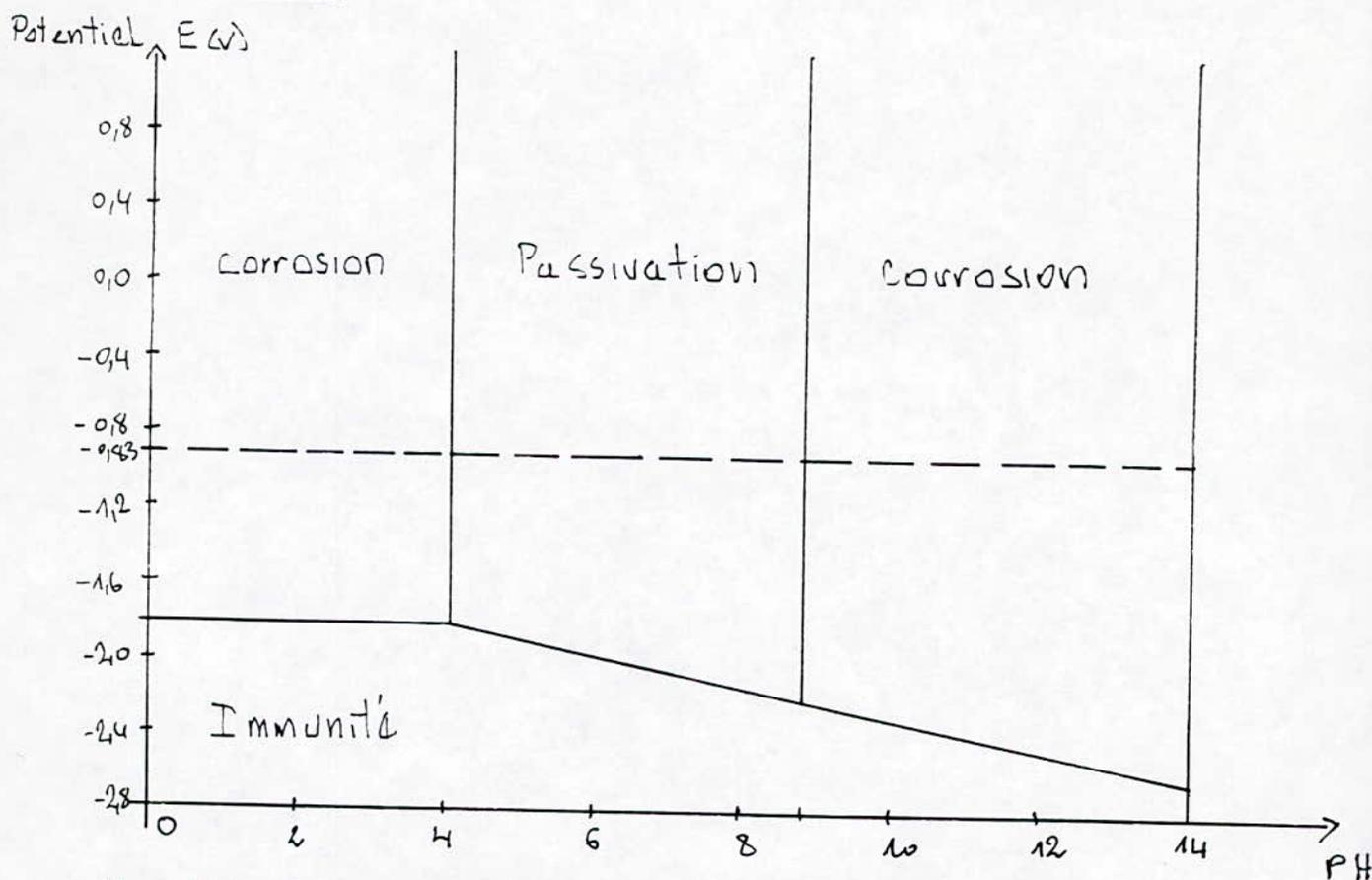


Fig. I.2 Diagramme de Pourbaix de l'Aluminium

Corrosion : Cette zone, dans le diagramme potentiel - pH, délimite un état où thermodynamiquement le produit de corrosion est plus stable que la matrice d'Aluminium. Si les paramètres du milieu ne sont pas changés, l'Aluminium se corrodera constamment. Il s'agit d'une situation à éviter car elle aboutit à une détérioration irréversible et catastrophique de la structure.

Immunité : Il s'agit d'un état thermodynamique où la matrice métallique est plus stable que le produit de corrosion et où donc celui-ci n'a aucune chance de se développer. Cet état reste constant si les paramètres physico-chimiques de l'interface métal-milieu extérieur (température, pH, potentiel...) ne changent pas. Le métal reste inattaqué.

Phénomènes de Passivité : Ils sont connus depuis très longtemps. Les modèles les plus probables proposés pas le mécanisme de la passivité sont ceux admettant la présence d'une couche recouvrante protectrice, contenant de l'oxygène.

Des méthodes de mesure développées très récemment montrent que l'épaisseur du film est nettement supérieure à une couche mono-atomique. Dans certains cas, on obtient même des couches de passivité épaisses de $0,3\mu\text{m}$ et plus.

En réalité, l'analyse détaillée des travaux récemment effectués sur ce sujet semble conduire au modèle général suivant : L'acte initial de la passivité est une adsorption d'ions OH^- provenant de l'eau ; cette adsorption conduit à un composé d'adsorption contenant des ions métalliques qui ont migré. Ce composé, épais de quelques couches atomiques, possède une forte conductivité électronique et une très faible conductivité pour le passage des ions métalliques : La corrosion s'en trouve donc considérablement freinée.

Dans certains cas, cette couche, tout en se déshydratant et en s'épaississant, peut évoluer vers un état très analogue à celui d'un oxyde. La conductivité électronique disparaît alors pratiquement. La cinétique de cette évolution est extrêmement variable suivant les milieux corrosifs et surtout les divers métaux.

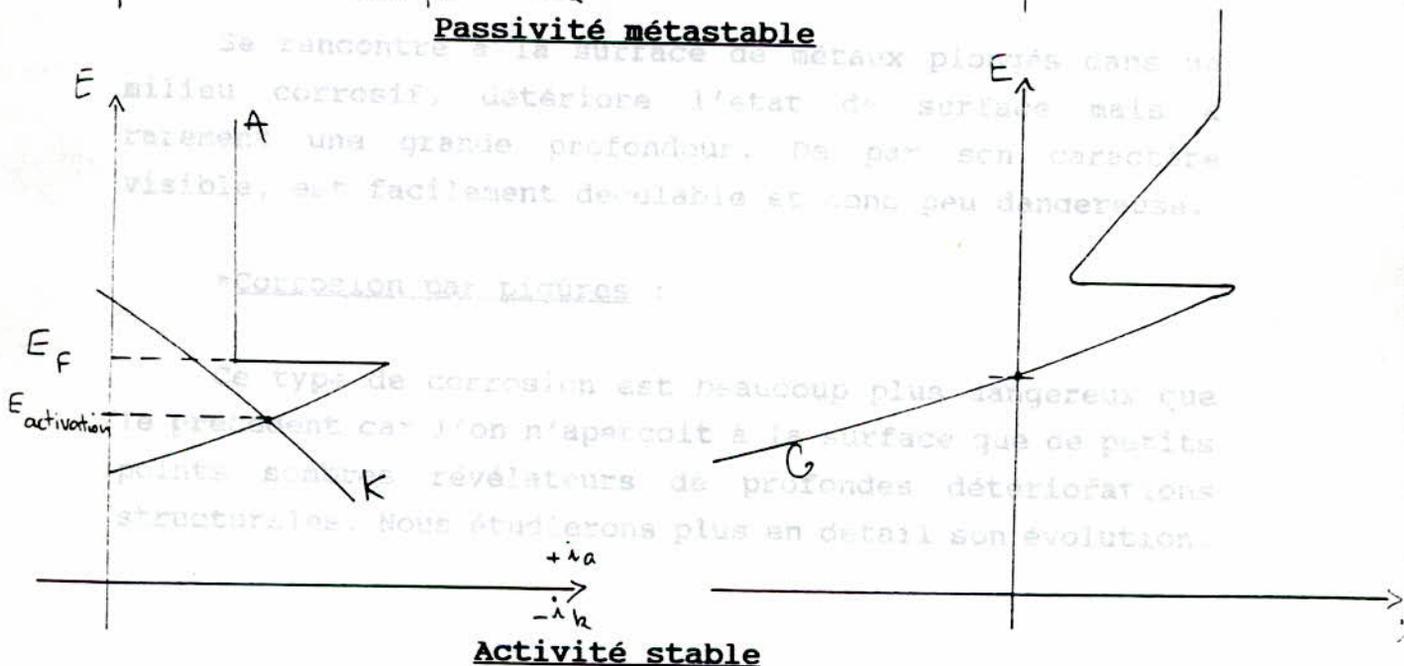
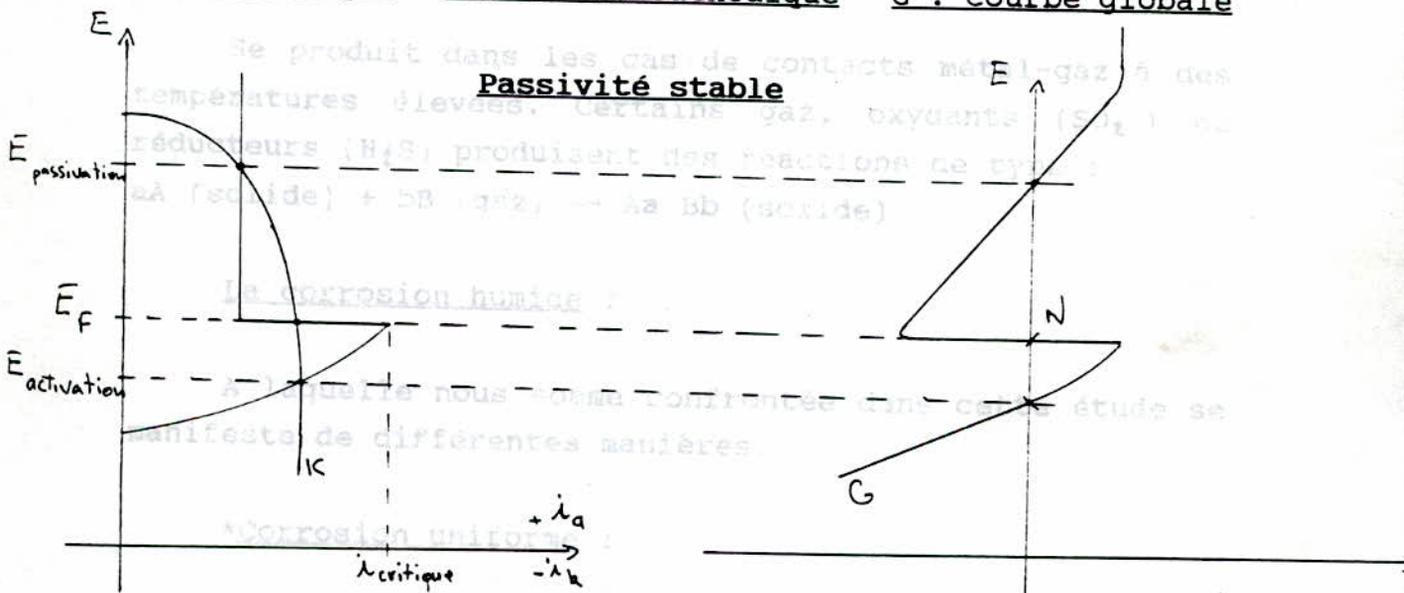
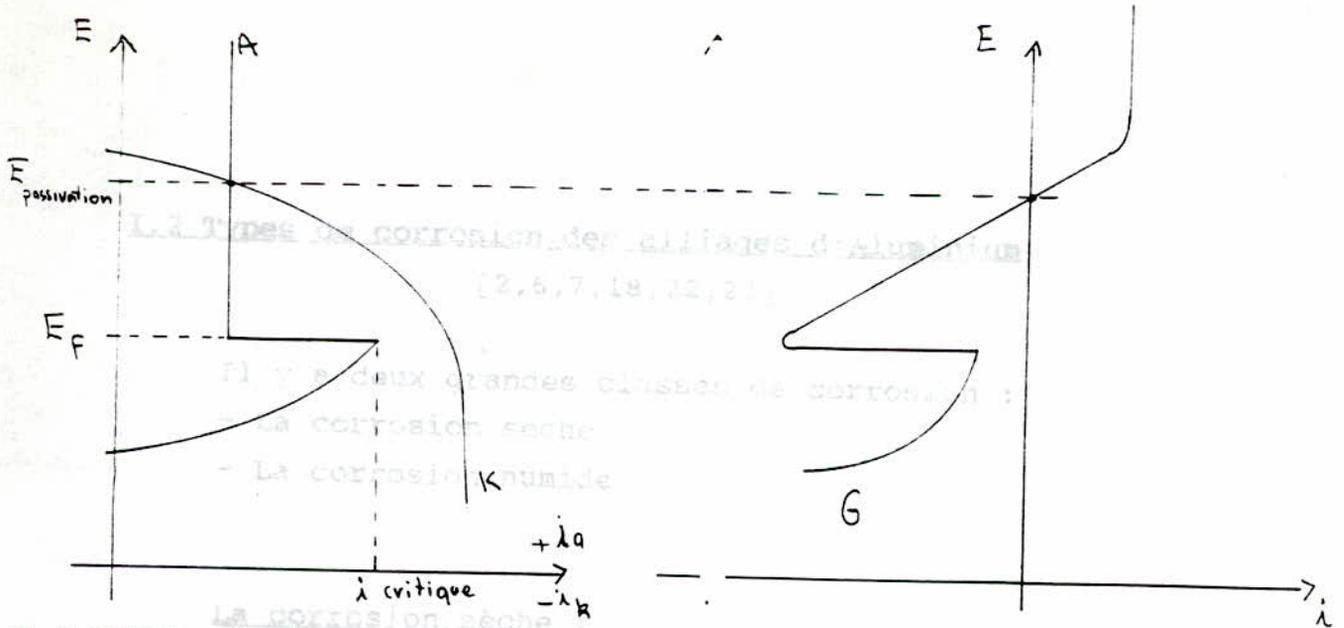
Pseudo-passivité :

L'apparition de la couche de passivité proprement dite peut être précédée par la formation, à la surface du métal, d'une couche de sel ou d'hydroxyde.

Cette couche de pré-passivité semble se former par le mécanisme dit de dissolution-reprécipitation : Tout d'abord le métal se dissout, puis, quand le produit de solubilité d'un de ses sels ou hydroxydes est atteint au voisinage de

la surface du métal, il y a précipitation in-situ de ce sel ou hydroxyde. La couche ainsi formée peut se transformer en (ou être remplacée par) une couche de passivité proprement dite, mais il peut arriver qu'elle subsiste et constitue une protection, en quelque sorte physiquement, pour le métal sous-jacent. On lui donne alors quelquefois le nom de **couche de barrage**.

La caractérisation électrochimique du phénomène est du plus grand intérêt car elle a l'avantage d'être indépendante des mécanismes internes qui, eux, sont parfois mal connus. A titre d'exemple, un alliage d'Aluminium plongé dans une solution à pH connu, pourrait être ramené d'une zone de corrosion dans une zone d'immunité ou de passivation en agissant sur le potentiel métal-solution.



*Corrosion intergranulaire :

Invisible à la surface. Se traduit par une altérations des joints de grains et donc une chute de l'énergie de liaison intergranulaire, il en résulte une grande fragilisation de la structure du cristal considéré.

*Corrosion transgranulaire :

Se traduit par une fissuration à l'intérieur même du grain. Fragilise le cristal.

*Corrosion sous tension :

A souvent pour conséquence une fissuration intergranulaire fragilisante et est dûe à l'application prolongée d'une contrainte à la surface.

*Corrosion galvanique :

S'observe lorsque deux métaux différents sont mis en contact. Il y a alors corrosion de celui dont le potentiel est le plus bas.

*Corrosion par aération différentielle :

Se produit lorsqu'une même pièce est en contact de deux milieux différemment alimentés en oxygène. L'oxygène situé à la surface du liquide se dissout et provoque ainsi la dissolution des ions du métal. Nous en étudierons plus loin l'évolution.

*Corrosion - érosion :

Observée sur les matériaux plongés dans des milieux corrosifs en mouvement, alliant ainsi la réactivité du milieu (action chimique) à son mouvement (action mécanique).

*Corrosion bactériologique :

Présente principalement dans les matériaux en contact avec des liquides contenant des bactéries susceptibles d'attaquer le matériau.

*Corrosion selective :

Se produit dans les métaux multiphasés, où les potentiels de dissolutions des différentes phases sont différents, d'où possibilité de corrosion des phases les moins nobles et création de porosité fragilisant la structure.

Intéressons-nous maintenant de manière plus approfondie à notre alliage d'étude : L'Aluminium, dont l'affinité pour l'oxygène est très grande, présente une couche naturelle d'oxyde Al_2O_3 . Une coupe micrographique nous donne le schéma suivant :

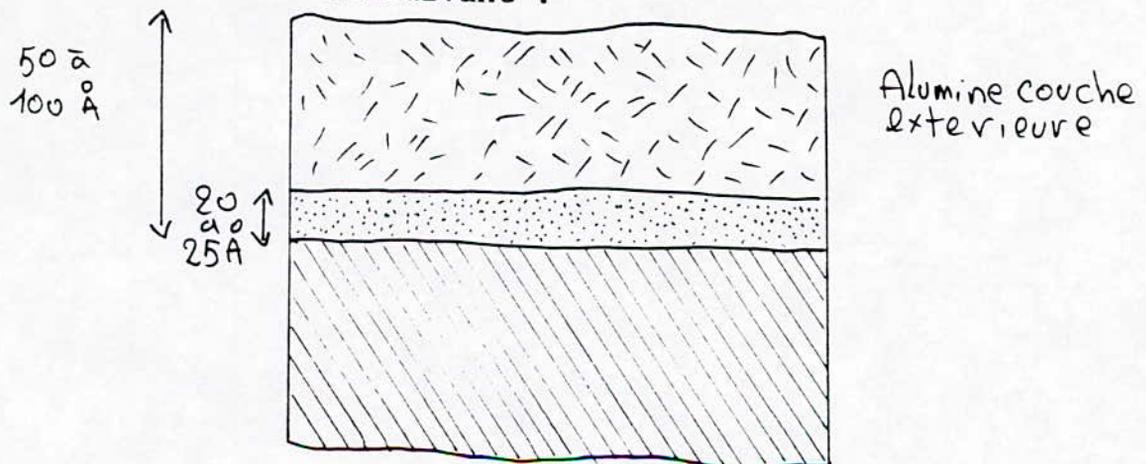


Fig.I.3 Couche d'oxyde naturel sur l'Aluminium

En milieu aqueux, jusqu'à 70°C, il se forme de la bayérite ($\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$), au-delà, jusqu'à 300°C, de la boehmite ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$).

Corrosion localisée des alliages d'Aluminium : [1,2]

Les métaux et alliages passivables peuvent se corroder à l'état actif, si le pouvoir oxydant de la solution est insuffisant. Cette corrosion est essentiellement de nature uniforme. Par ailleurs, les métaux et alliages peuvent subir des corrosions localisées, correspondant à des ruptures (ou percements) de la couche de passivité, le reste du métal restant intact.

Développement de la corrosion à partir d'une amorce : [1,2]

Cette amorce peut être préexistante : c'est le cas de la corrosion carverneuse, type de corrosion exogène. L'amorce est ici constituée par une caverne, cavité dans laquelle les transports de matière par convection sont restreints du fait de sa géométrie. Ces cavités se rencontrent dans les joints entre pièces, sous les dépôts de matières solides, etc... L'amorce peut, au contraire, être créée par le contact du métal et du milieu corrosif : Ceci a lieu dans le cas de la corrosion par piqûres et de la corrosion sous contrainte. Le mécanisme de tels amorçages n'est pas encore élucidé à l'heure actuelle, malgré de très nombreux travaux.

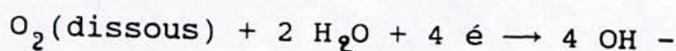
Période d'incubation : [1]

La corrosion dans la caverne, à travers la couche de passivité, est très faible, mais, du fait de la géométrie de la caverne (surface très grande par rapport au volume), elle est suffisante pour y créer une concentration élevée de produits de corrosion dont une bonne partie y restent piégés et s'hydrolysent, le milieu devenant ainsi de plus en plus acide dans la caverne.

Le temps d'incubation se termine quand l'acidité dans la caverne atteint une valeur critique où le métal se dépassive. Les temps d'incubation dépendent au plus haut point de la géométrie de la caverne, mais aussi de la composition du métal. Il existe également des temps d'incubation, beaucoup plus réduits, pour la corrosion par piqûre.

Phase de corrosion destructrice : [1,2]

Cette phase débute après la fin du temps d'incubation. Dans l'intérieur de la piqûre ou de la caverne se déroule la réaction anodique de dissolution du métal ou de l'alliage. Sur la surface libre extérieure, qui reste à l'état passif, se développe la réduction cathodique de l'oxydant par exemple :



La force électromotrice de ce couple est souvent de l'ordre du volt.

Pour que cette dernière réaction puisse débiter, il est nécessaire que les électrons puissent s'échanger facilement à travers la couche de passivité. C'est pourquoi les métaux et alliages ayant une couche de passivité à forte conduction électronique sont plus exposés aux corrosions localisées.

Par exemple, les aciers inoxydables y seront plus sensibles que le titane et ce dernier métal plus que le tantale.

Considérons maintenant les types de corrosion qui sévissent particulièrement dans les alliages d'Aluminium.

Corrosion uniforme : [1,2,6,7]

Se rencontre surtout dans les milieux très acidés ou très alcalins dans lesquels la solubilité du film d'oxyde naturel est grande. Dans les milieux neutre, La vitesse de corrosion générale des alliages d'Aluminium passifs est certes très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle. Elle garde ainsi une valeur de l'ordre de 5 μm par an, ce qui peut entraîner à la longue une évolution progressive de l'état de surface. Le processus consiste en l'apparition de microcellules de corrosion, puis en leur propagation qui aboutit à une attaque générale. Les risques encourus sont principalement une perte d'épaisseur et donc un affaiblissement généralisé des dimensions de la pièce considérée.

Corrosion par piqûre : [1,2,6,7]

Le potentiel de piqûre des alliages d'Aluminium est en règle général extrêmement bas.

Il est ainsi très rare de pouvoir empêcher toute apparition de piqûres sur un alliage d'Aluminium. Les critères de résistance à la corrosion par piqûres sont alors les caractéristiques de ces distributions de piqûres pour chaque alliage (densité, homogénéité, vitesse de pénétration moyenne et maximale). L'intensité de la corrosion par piqûre décroît en général avec le temps. En immersion, la vitesse de pénétration des piqûres suit une cinétique parabolique en t , alors qu'en exposition atmosphérique, la corrosion par piqûres cesse même en pratique au bout de 1 à 3 ans, après que la surface du métal ait acquis la patine grise typique des alliages d'Aluminium. Ce type de corrosion se rencontre souvent dans les milieux dont le pH est voisin de la neutralité (ex. : eaux, humidité,...).

Les piqûres sont recouvertes de pustules blanches d'"Alumine" $Al(OH)_3$ gélatineuse qui sont très volumineuses. Le volume de la pustule est bien plus important que celui de la cavité sous-jacente. Se développent sur des sites où le film d'oxyde naturel présente des défauts : Amincissement, rupture, lacunes, concentration très localisée en impuretés ou en éléments d'addition.

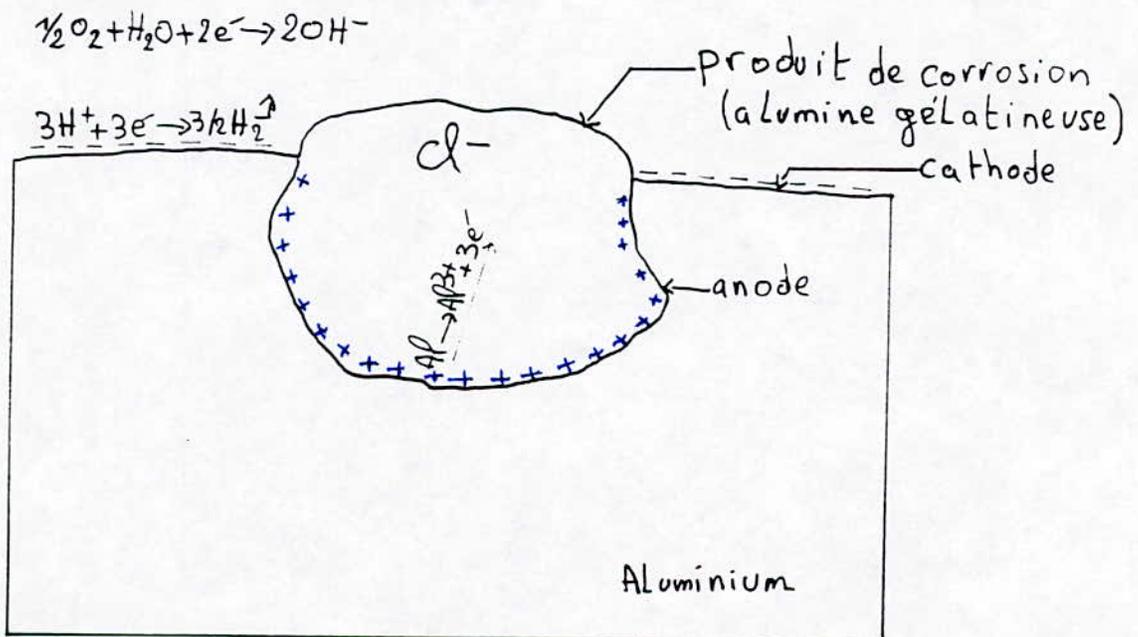


Fig.I.4 Corrosion par piqûre de l'Aluminium

Le fond de la piqûre est anode et acide : L'Aluminium y subit : $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$.

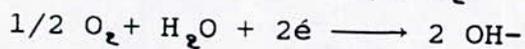
Les ions Al^{3+} , étant pratiquement insolubles dans l'eau, se combinent avec les ions hydroxydes OH^- (provenant de la dissolution de l'eau) pour former $Al(OH)_3$ selon :



La consommation d'ions OH⁻ aboutit à augmenter la proportion d'ions H⁺ et crée donc un milieu acide. Le fond des piqûres atteint un pH à peu près égal à 3 ou 4 si la solution a un pH proche de la neutralité. L'Al (OH)₃ est insoluble et précipite sous forme d'une masse blanche gélatineuse très volumineuse (bayérite) qui constitue le produit de la corrosion de l'Aluminium et recouvre la piqûre.

Comme tous les ions n'ont pas la même mobilité, le passage du courant modifie localement la composition de la solution au voisinage de l'anode et de la cathode. C'est ainsi que les ions chlorures Cl⁻, qui sont presque toujours présents dans l'eau et qui sont les plus mobiles, vont migrer vers la zone anodique. C'est pourquoi le fond des piqûres s'enrichit toujours en chlorures.

Le bord de la piqûre est cathode et alcalin : Les réactions dans l'eau sont les suivantes :



La consommation d'ions H⁺ et la création d'ions OH⁻ créent un excès d'ions OH⁻, donc un pH alcalin.

Corrosion par aération différentielle : [1,2,6,7]

Ce type de corrosion regroupe en fait plusieurs mécanismes, différents dans la forme mais identiques dans le fond.

Le mécanisme électrochimique, mis en évidence par Evans, est le suivant : Considérons une pièce d'Aluminium plongée en partie dans l'eau.

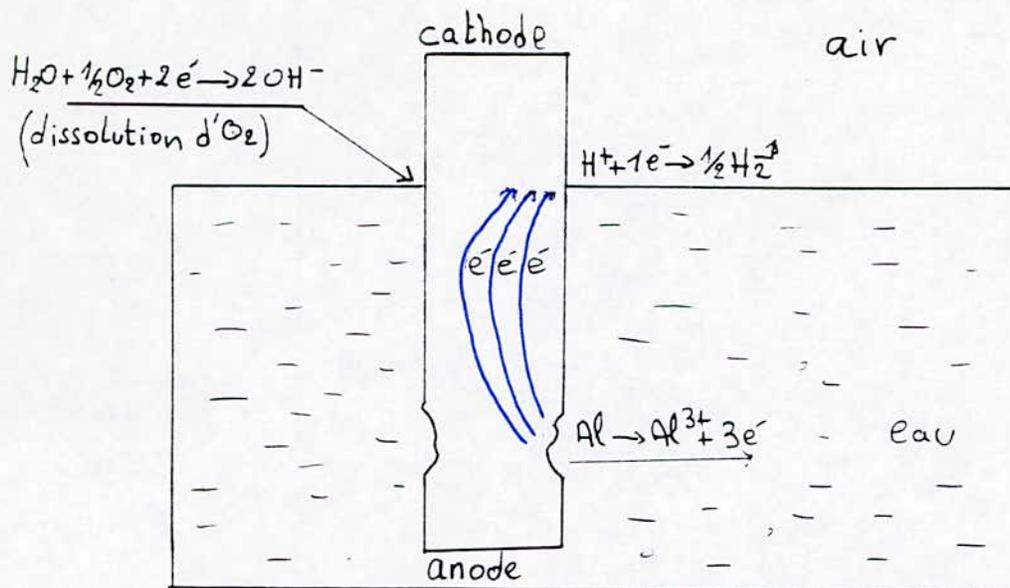


Fig.I.5. Schéma de corrosion par aération différentielle

Corrosion caverneuse : [1,2,6,7]

Ce type de corrosion ne se produit que dans les recoins assez étroits pour empêcher le renouvellement du liquide. La corrosion caverneuse n'est pas initiée au départ par une différence d'aération entre le liquide sous le recoin et celui en dehors de cette zone. Au fur et à mesure que le métal se corrode sous le recoin, l'oxygène dissous dans le liquide contenu dans le recoin s'y épuise et la configuration des lieux limitant la diffusion, le recoin devient une zone appauvrie en oxygène, avec un excès d'ions Al^{3+} , ce qui provoque un afflux d'ions chlorures Cl^- dans le recoin (pour former AlCl_3). Le chlorure d'Aluminium AlCl_3 s'hydrolyse en créant une acidité locale:



La corrosion caverneuse de l'Aluminium progresse généralement peu, probablement à cause de la précipitation de l'"Alumine" qui colmate l'entrée du recoin, empêchant ainsi l'apport de liquide.

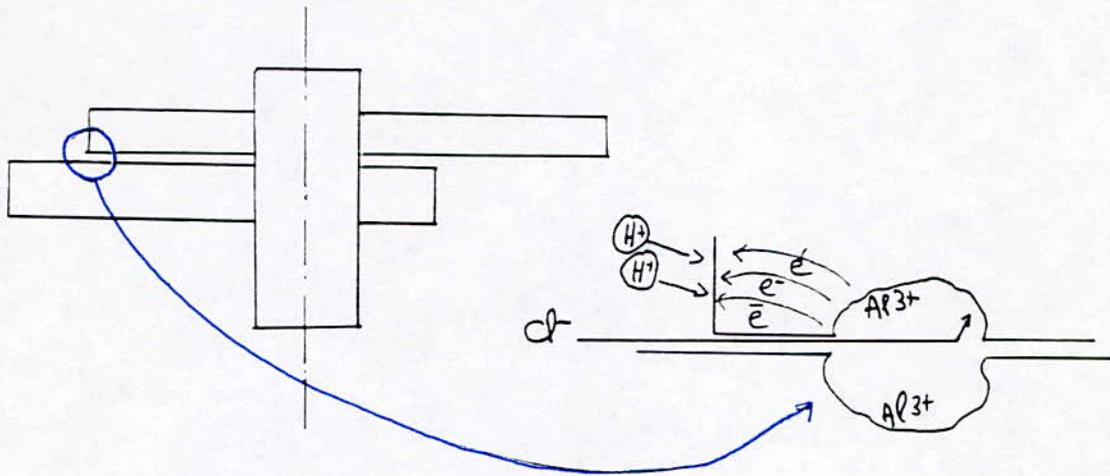


Fig.I.6. Exemple de conditions de corrosion caverneuse

Corrosion par confinement : [1,2,6,7]

Son processus consiste en la création de piles locales anode-cathode dans des zones de recoins, avec liquide stagnant et peu d'aération.

L'origine des recoins peut être diverse : assemblages, interstices mécaniques, dépôts de corrosion ou résidus divers, faune et flore marines.

Les risques de ces types de corrosion sont qu'elle est insidieuse et n'est visible de l'extérieur que pour un stade avancé de la détérioration avec possibilité de déformation de la structure.

La corrosion feuilletante : [1,2,6,7]

Quand la corrosion se propage le long de plans parallèles à une direction privilégiée (par exemple celle du laminage s'il s'agit de tôles), elle aboutit à un "feuilletage" plus ou moins spectaculaire. Cette forme de corrosion se développe si les conditions de traitement thermique ou de soudage sont mal adaptées.

Fatigue - corrosion : [1,2,6,7]

Son processus consiste en l'endommagement d'un matériau sous l'action de multiples sollicitation cycliques.

Soit la figure ci-dessous représentant la variation de la limite élastique en fonction du nombre de cycles.

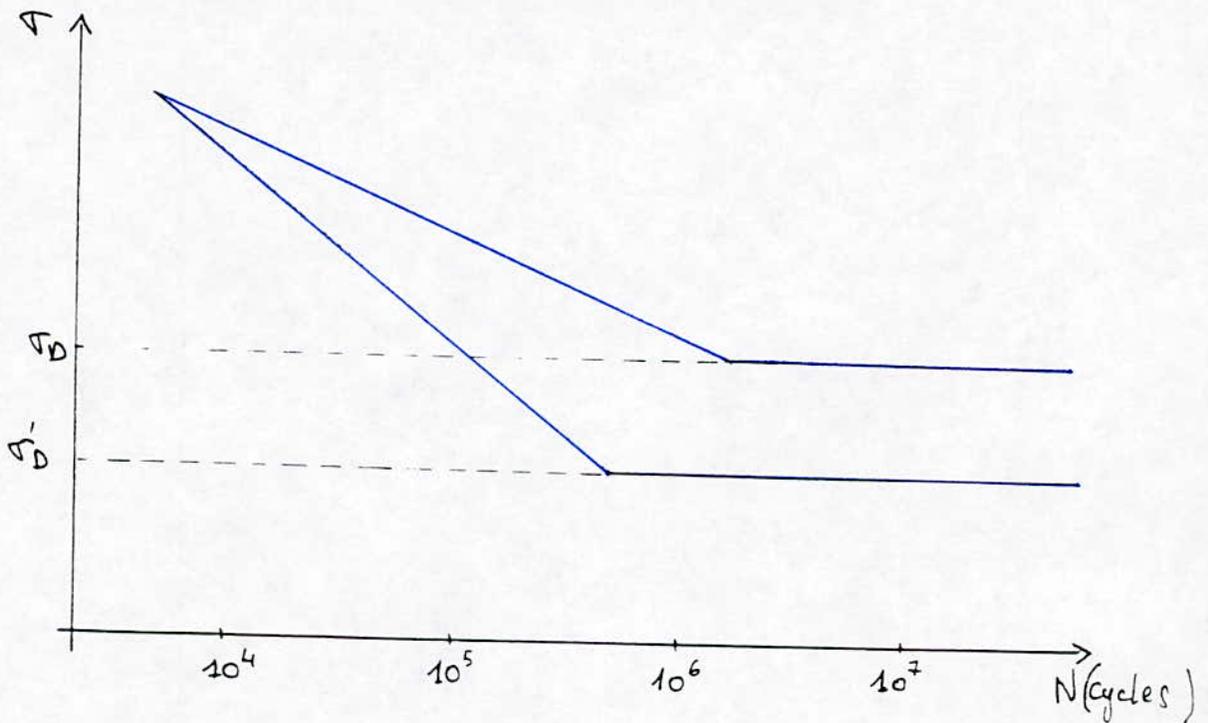


Fig. I.7 Variation de la limite élastique en fonction du nombre de cycles

Ce processus de corrosion consiste en plusieurs stades:

Le premier étant évidemment l'amorce de la fissure qui est mécanique et qui est due à une hétérogénéité de structure ou à la rupture du film de passivité. Suit alors la propagation mécanique de cette fissure sous l'action des différents cycles, puis éventuellement une attaque électrochimique selon le processus de corrosion en cellules occluses.

Corrosion intergranulaire : [1,2,6,7]

Celle-ci est due principalement à deux phénomènes simultanés :

Un phénomène métallurgique conduisant à la production d'une hétérogénéité de la zone du joint de grain, et ceci est vérifié dans notre cas par la précipitation d'Al₂ Cu aux joints de grains. Le second phénomène est l'existence d'un milieu corrosif permettant de différencier les comportements respectifs de la zone du joint de grain et de l'intérieur du grain.

Le danger de la précipitation d'une phase (Al Cu) aux joints de grain réside dans le fait que deux phases résistent moins bien à la corrosion qu'une seule de par leurs différences structurales et leurs potentiels qui sont différents. Dans le 7075 T6, on peut retrouver les phases suivantes ainsi que leurs potentiels respectifs,

Mg Zn₂ : -1,05V

Mg₂ Al₃ : -1,24V

Cu Mg Al₂ : -1,00V

Al₂ Cu : - 0,73V

I-3 Moyens de protection contre la corrosion

Ils sont classés en trois grandes classes. La protection par revêtement, la protection par inhibiteurs et la protection électrochimique.

I-3.1 Protection par revêtement [1, 10]

Il s'agit d'un procédé mécanique simple qui consiste à projeter sur la surface de la pièce à protéger un plasma constitué du métal protecteur. La difficulté réside dans l'uniformisation de la projection et l'homogénéité de la couche protectrice. Quelquefois, il est nécessaire de faire subir à la pièce considérée un traitement consistant à mettre en place une couche d'accrochage afin de favoriser l'adhérence de la couche protectrice. Ainsi, pour les cermets, l'on fait diffuser du Nickel à la surface de la pièce pour augmenter l'adhérence de la céramique à projeter.

I-3.2 Protection par utilisation d'inhibiteurs [1, 10]

Un inhibiteur de corrosion est un procédé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu. Il peut être utilisé comme moyen de protection permanente, auquel cas il permet d'utiliser des matériaux métalliques dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion ou comme protection temporaire pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion. En général, un inhibiteur doit :

- abaisser la vitesse de corrosion d'un métal
- être stable en présence des autres constituants du milieu

- être stable aux températures d'utilisation
- être efficace à faible concentration
- être peu onéreux

I-3.3 Protection électrochimique [1, 6, 7, 10]

Elle consiste à placer le potentiel métal-solution, soit dans la zone d'immunité, soit dans la zone de passivité. Deux principaux moyens sont mis en oeuvre dans ce cadre, il s'agit de la protection cathodique et de la protection anodique.

Considérons le diagramme potentiel -pH suivant :

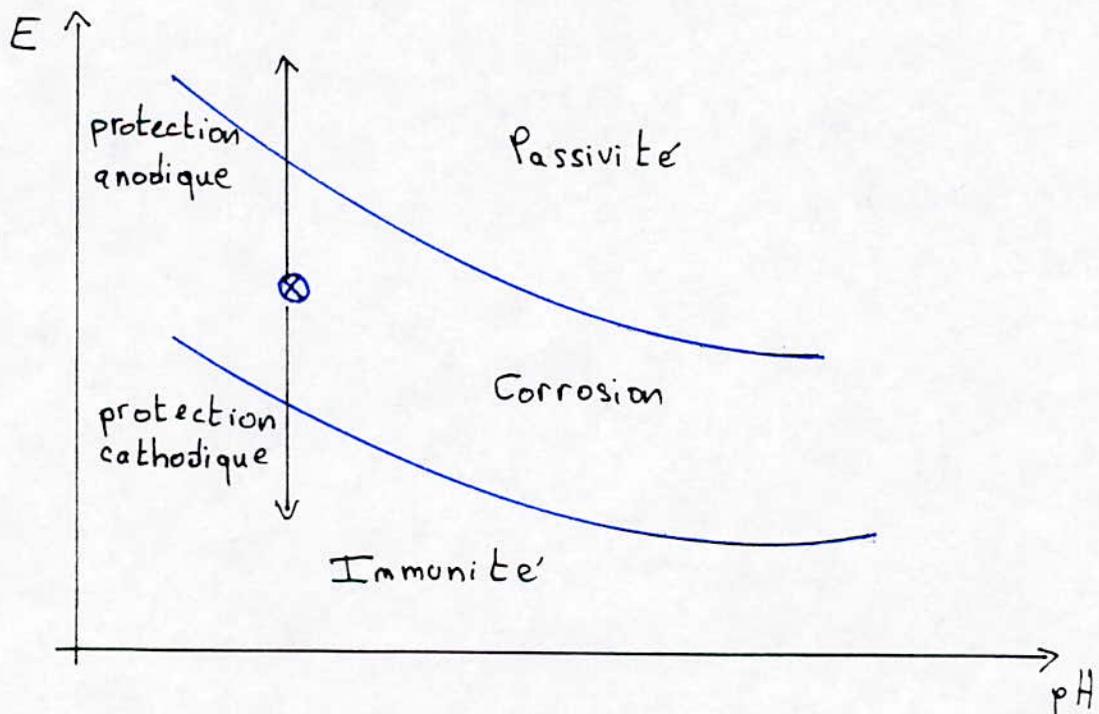


Fig. I.7 - Protection cathodique et anodique

En abaissant le potentiel métal-solution, on fait passer le métal dans la zone d'immunité, alors qu'en l'augmentant, on le fait passer dans la zone de passivité.

*Protection cathodique : la pièce à protéger est placée en situation de cathode par rapport à un redresseur, et le circuit se ferme par une anode choisie inattaquable (graphite, plomb).

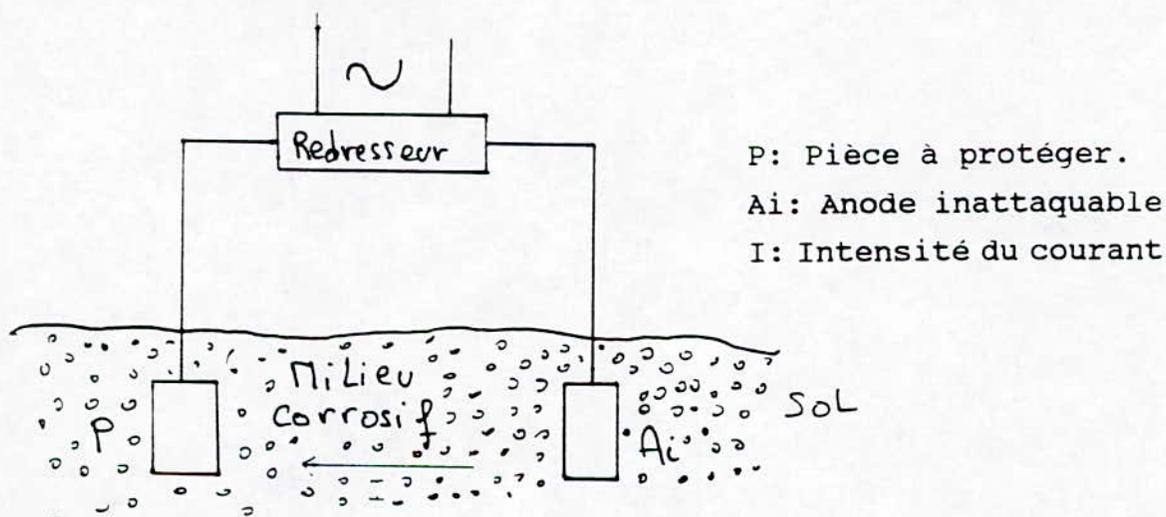
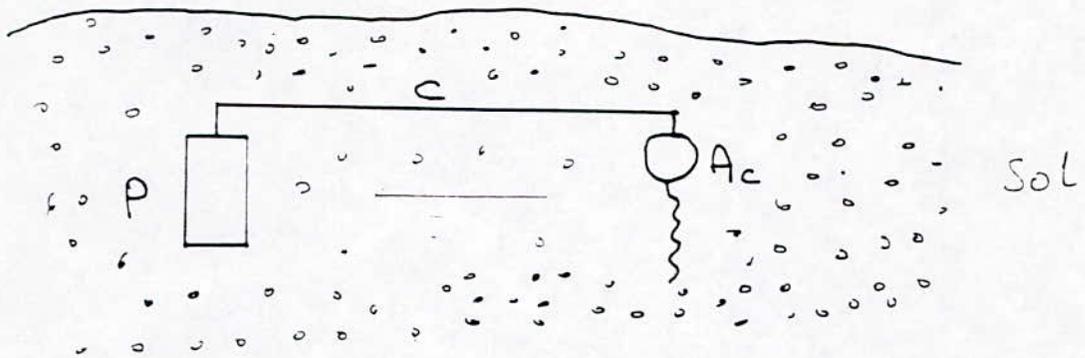


Fig. I-8 Protection cathodique avec source extérieure de courant

La protection cathodique peut également être réalisé au moyen d'une anode constituée d'un métal moins noble que le métal à protéger. On forme ainsi un couple galvanique où notre pièce est protégée car elle se trouve en situation de cathode :



Ac : Anode consommable

C : Conducteur isolé

Fig. I-9 Protection cathodique avec anode consommable

*Protection anodique : sa mise en oeuvre est assez complexe et nécessite notamment, comme source de courant, un potentiostat fixant automatiquement le potentiel métal-solution dans le domaine de passivité par rapport à une électrode de référence.

*Protection par passivation proprement dite : la passivation est obtenue lorsque le potentiel métal-solution est supérieur au potentiel de Flade. Par conséquent, elle consiste à porter le potentiel métal-solution à un point tel que le potentiel de Flade soit dépassé. Nous verrons ultérieurement et en détail le cas de l'anodisation.

Anodisation des alliages d'Aluminium [1, 9, 10]

La pellicule d'oxyde ($0,01 \mu\text{m}$) qui recouvre l'Aluminium tout en le protégeant contre les agents atmosphériques, peut être renforcée artificiellement par un traitement chimique appelé anodisation. La couche d'oxyde obtenue de cette façon est également incolore et transparente et se distingue par une dureté remarquable pouvant atteindre celle du quartz (7 Mohs), son épaisseur, essentiellement variable suivant les conditions de traitement, est le plus souvent de 10 à 20 μm , soit 1000 fois celle de la couche naturelle. Sans traitement subséquent, elle est finement poreuse et absorbante et peut être teinte au moyen de colorants organiques ou minéraux. On doit, en outre, boucher les pores de la couche d'oxyde par traitement à l'eau bouillante (colmatage) ou par imprégnation de substances de remplissage telles que silicates, résines, cires etc...

Le traitement d'anodisation, qui est applicable sur la plupart des alliages d'Aluminium, a pris, ces dix dernières années, une extension considérable dans plusieurs domaines d'application.

a) Tout d'abord, la couche colmatée offre une protection remarquable du métal contre la corrosion marine et industrielle, ce qui explique l'implantation croissante dans le monde d'ateliers d'anodisation capables de traiter des demi-produits (tôles et profils) en grande longueur, destinés à des revêtements de façades d'immeubles. Divers procédés de coloration électrochimique, dont certains mis au point récemment, donnent aux éléments architecturaux en alliages d'Aluminium, en plus de la protection, une valeur esthétique agréable et durable avec peu d'entretien.

b) Ensuite, la dureté de la couche est mise à contribution pour protéger le métal également contre les détériorations mécaniques et prévenir le grippage de surfaces glissant l'une sur l'autre, surtout lorsque les faces sont imprégnées d'huiles ou de graisses.

Des procédés spéciaux dits d'anodisation dure permettent d'obtenir des couches de 50 μm avec une dureté de 500 à 600 HV.

c) La transparence de la couche permet, en outre, de conserver le poli de surface du métal, qui peut atteindre un très haut degré grâce à des traitements préliminaires de brillantage chimique ou électrochimique, ce qui permet d'obtenir des miroirs et réflecteurs en alliage d'Aluminium, et aussi des articles de bijouterie ayant l'apparence de métal précieux.

d) On peut également utiliser la couche d'oxyde non-colmatée comme support de substances sensibles à la lumière pour réaliser des reproductions photographiques sur l'Aluminium ou des dessins multicolores (polychromie) ou encore comme base d'accrochage pour les revêtements de peinture ou de vernis.

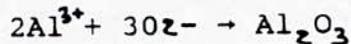
e) Enfin, les propriétés isolantes de la couche permettent de réaliser des conducteurs d'Aluminium isolés, résistants à haute température (électro-aimants), et des condensateurs électrolytiques à partir de bandes d'Aluminium attaquées par un réactif.

Principe de la méthode :

Le principe de l'anodisation est celui de l'électrolyse de l'eau. Si, dans une cuve remplie d'eau conductrice (électrolyte) par l'addition d'un acide (acide sulfurique dans notre cas) on dispose deux électrodes, Aluminium et Plomb, l'Aluminium (anode) étant relié au pôle positif d'un générateur à courant continu (redresseur), le Plomb (cathode) se trouvant au pôle négatif, le passage de courant provoquera :

a) Sur la cathode en Plomb un dégagement d'hydrogène suivant la réaction : $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$

b) Sur l'anode en Aluminium, la formation d'une couche d'alumine anhydre Al_2O_3 isolante, par combinaison de l'oxygène naissant avec le métal suivant la réaction :



Cette couche, qui se forme aux dépens du métal, aura tendance à empêcher le passage du courant du fait de son caractère isolant. La croissance du film dépendra donc de l'action plus ou moins dissolvante de l'électrolyte sur l'alumine ainsi formée (voir figure ci-dessous).

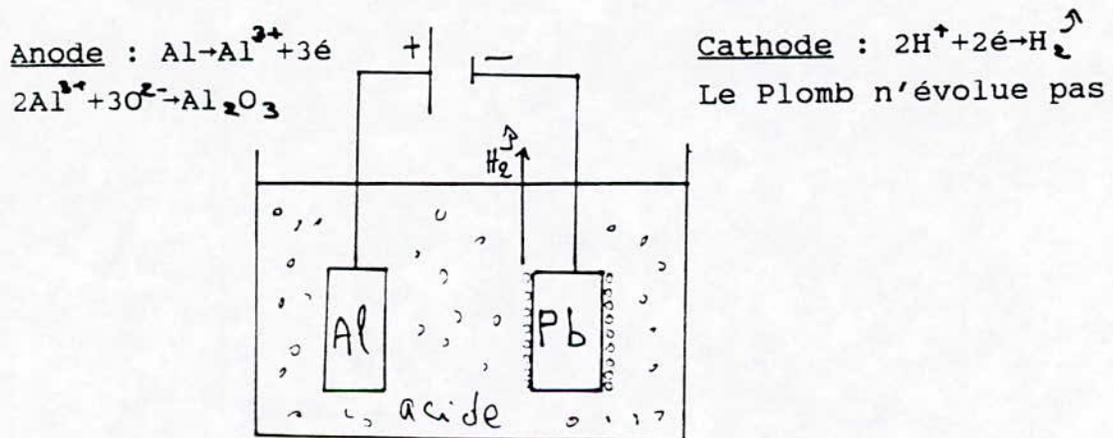


Fig I-10 Schéma du dispositif réactionnel de l'oxydation anodique

La couche d'oxyde ainsi obtenue a une structure cellulaire de forme hexagonale et poreuse au centre de chaque hexagone (voir figure ci-dessous).

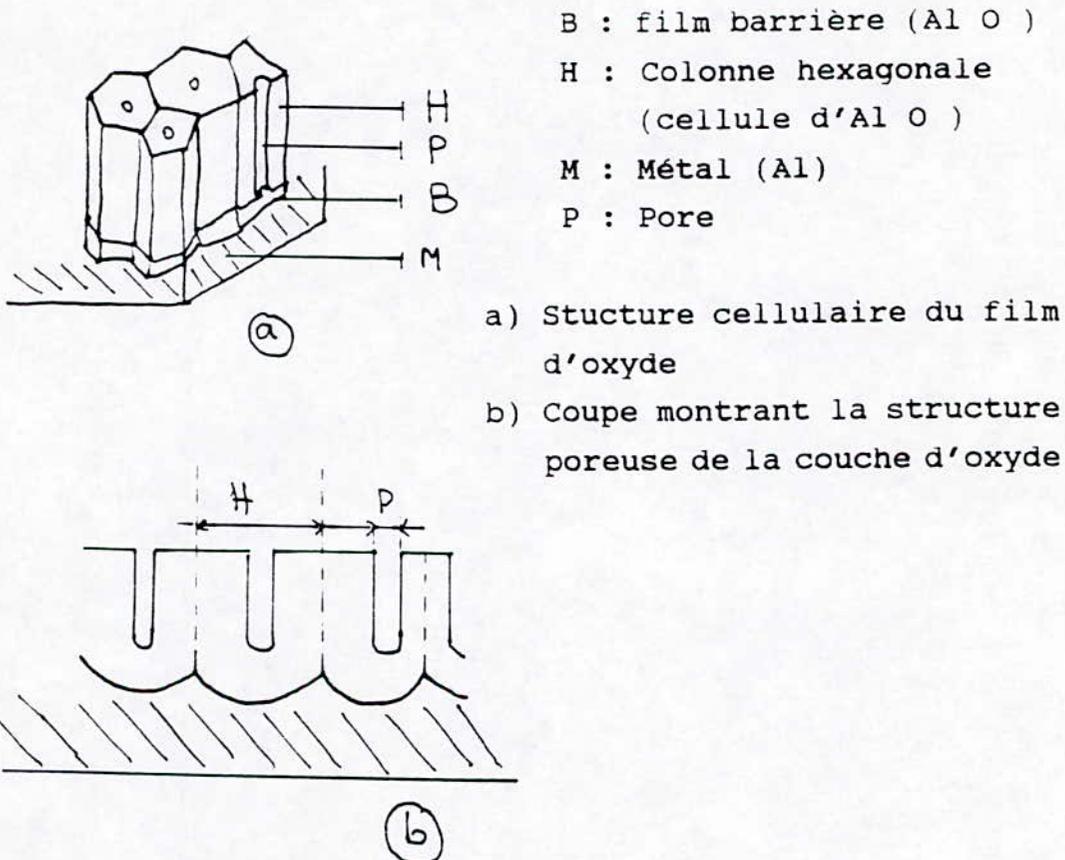


Fig. I-11 Structure de la couche d'oxyde en cours de formation

Les électrolytes utilisés, et particulièrement l'acide sulfurique, ont une action dissolvante moyenne sur l'alumine : la dissolution conduit à la formation de nombreuses petites piqûres dans la couche barrière, qui permettent au courant de continuer à passer et, par suite, à la couche de croître en épaisseur en prenant une structure poreuse orientée.

Le fond des pores correspond aux piqûres initiales, les pores sont entourés de cellules d'alumine compacte qui, pendant l'oxydation, ne participent plus aux réactions qui conduisent à la progression de l'oxydation. La structure cellulaire poreuse qui résulte de ce mode de croissance a été étudié par de nombreux auteurs [WERNICK et PINNER (1962), HERENGUEL, LELONG et SEGOND (1964)]. La photographie prise au microscope électronique à l'interface métal/oxyde après dissolution de l'alumine, met en évidence le motif de répartition des cellules qui s'établissent autour de chaque pore sous forme de calottes hémisphériques juxtaposées.

Grossissement :

150000 X



Fig. I-12 Structure cellulaire, de forme hexagonale de la couche d'oxyde

Au dessus de la couche barrière, on observe des cellules d'alumine qui se présentent sous forme de prismes hexagonaux percés d'un trou (pore), chacun suivant son axe principal.

Des examens au microscope électronique, qui ont confirmé cette théorie, ont permis de montrer que le nombre et le diamètre des pores dépendent principalement de la nature et de la concentration de l'électrolyte, alors que la dimension des cellules et l'épaisseur du film barrière ne dépendent que de la tension de formation. A titre d'exemple pour un électrolyte contenant 15 % d'acide sulfurique à 10°C, la couche barrière est de 1nm/v, le diamètre "d" des pores est de 12 nm/v et l'épaisseur de la paroi de la cellule "e" est de 8 nm/v.

Ce type de structure est valable pour tous les films formés dans les électrolytes sulfurique, chromique, oxalique et phosphorique : les différences observées dans les dimensions des pores et des cellules suivant les conditions de traitement se traduisent en pratique par des propriétés différentes des films formés (densité, résistance à l'abrasion, dureté, etc...). Avec certains acides, dont, en particulier, l'acide sulfurique qui est actuellement le plus utilisé (et que nous utilisons), la couche d'oxyde est transparente et reproduit l'aspect de la surface du métal qui peut avoir un pouvoir réflecteur élevé en choisissant une qualité de métal appropriée. Suivant les électrolytes et les conditions de traitement choisis, on peut obtenir des épaisseurs de couche pouvant dépasser 50 μm .

Le gonflement des couches d'oxyde peut se produire selon deux manières : celle de l'alliage 5155 (A-G5), et celle du 2017 (A-U4G) (voir figure ci-dessous).

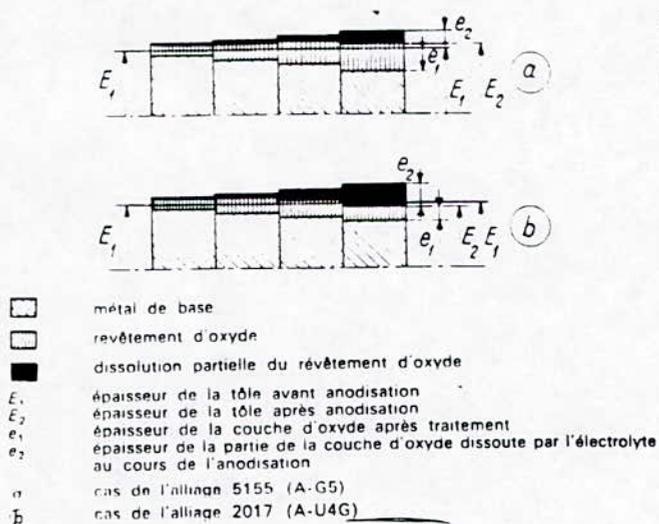


Fig. I-13 Gonflement des couches d'oxyde

Gonflement des couches d'oxyde : le volume spécifique du film d'oxyde étant plus grand que celui du métal qui lui a donné naissance, il en résulte une variation des côtes de la pièce qui dépend du procédé utilisé et de l'alliage. Si la durée d'oxydation est trop longue, la dissolution du film croît et le gonflement diminue, si bien que la tôle traitée peut avoir une épaisseur inférieure à son épaisseur initiale.

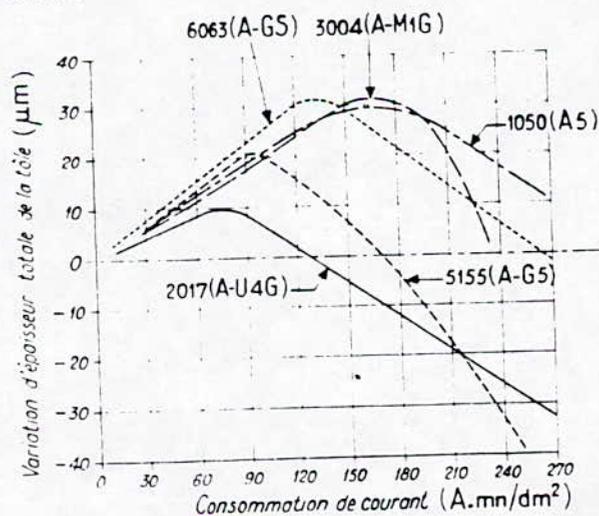


Fig. I-14 Variation, en fonction de la consommation de courant, de l'épaisseur totale d'une tôle en divers alliages d'Aluminium

Après anodisation, les films sont habituellement colmatés par immersion dans l'eau bouillante ou à la vapeur pour obtenir une bonne résistance à la corrosion : il a été établi que le colmatage transformait superficiellement l'alumine anhydre obtenue par électrolyse en alumine monohydratée (boehmite) ; celle-ci possédant un volume spécifique plus grand que celui de l'alumine anhydre, cette transformation s'accompagne d'un gonflement et d'une fermeture des pores. Pour certaines applications (diminution de la résistance aux frottements par exemple), le colmatage peut être remplacé par une imprégnation de la couche avec des substances organiques. Pour obtenir des effets colorés (applications décoratives), la porosité des couches permet l'absorption de colorants qui sont ensuite fixés par le colmatage.

I-4 Diagrammes de phases des alliages d'Aluminium [1,2,12]

Il est à noter que l'alliage d'Aluminium sur lequel va porter notre étude est composé, outre l'Aluminium, de nombreux autres éléments. Seulement, leurs proportions sont tellement faibles qu'ils n'ont pas d'influence réelle sur le comportement et la structure de l'alliage. Celui-ci, selon son appellation, repose sur trois éléments d'alliage principaux : le Zinc, le Magnésium et le Cuivre. Mais le système quaternaire Al-Zn-Mg-Cu peut être ramené sans crainte d'erreur au système ternaire Al-Zn-Mg. Mais observons d'abord les diagrammes de phases à l'équilibre des systèmes binaires Al-Zn et Al-Mg [1].

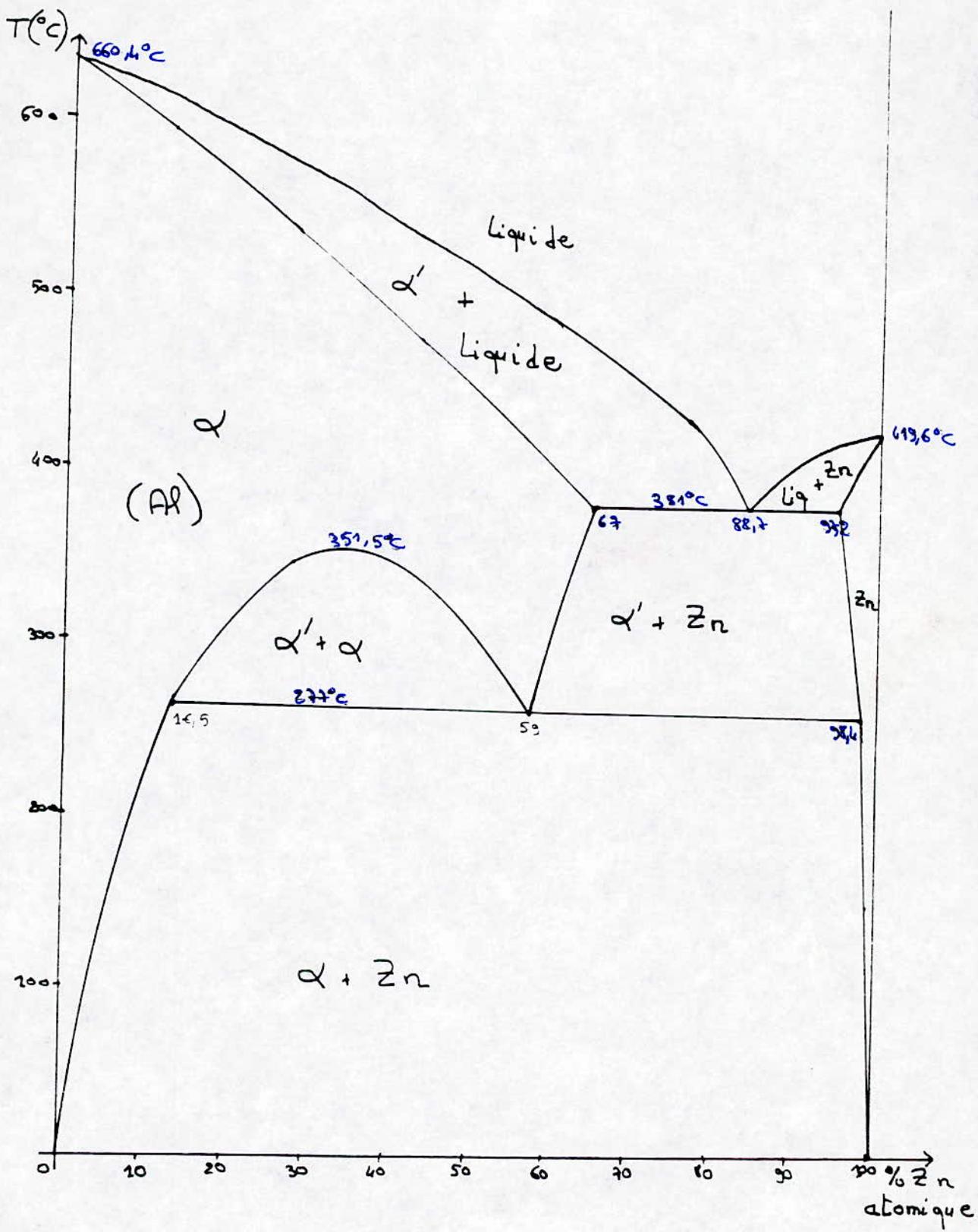


Fig. I Diagramme d'équilibre Al-Zn

La phase α est celle de l'Aluminium et présente une structure cubique à faces centrées (c.f.c.).

On remarque que pour une teneur de 5,6 % massique en Zinc ou 2,45 % atomique (teneur en Zinc de l'Alliage que l'on se propose d'étudier) et à température ambiante, la structure est biphasée : $\alpha + \text{Zn}$ (cfc + h.c.). On remarque aussi que la limite de solubilité de l'Aluminium en Zinc est de 67 % atomique.

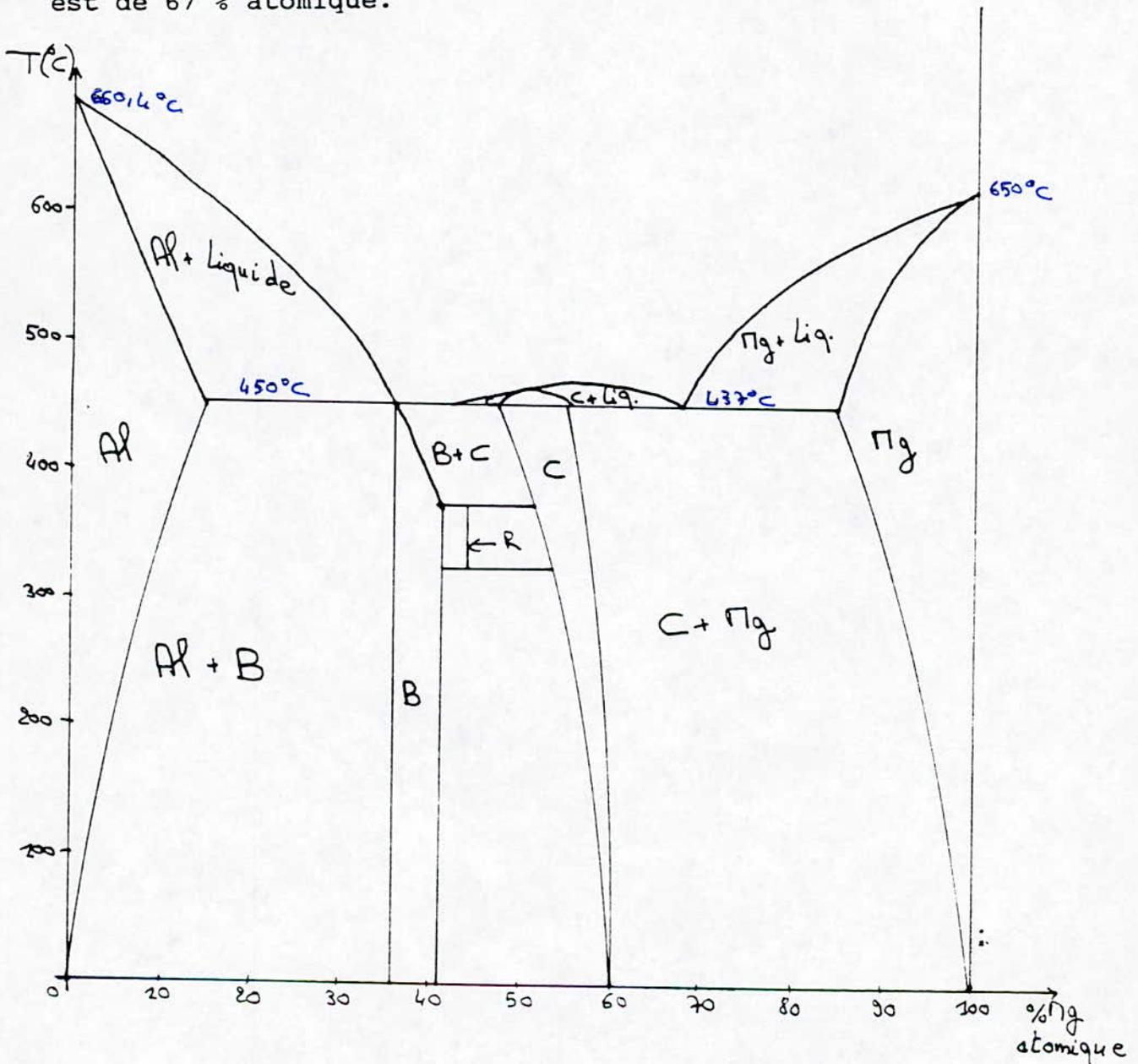


Fig. I Diagramme d'équilibre Al-Mg

La phase Aluminium possède une structure c.f.c. La phase Magnésium possède une structure hexagonale compacte. La phase B représente le composé intermétallique Al_3Mg_2 à structure cfc complexe.

La phase C représente le composé intermétallique $Al_{12}Mg_{17}$. On peut remarquer que pour une composition de 2,7% massique ou 3,03% atomique de Magnésium et à température ambiante, la structure à l'équilibre est biphasée : Al+B.

En ce qui concerne la présence de Cuivre dans l'Aluminium, les phases à l'équilibre sont Al + Q, Q représentant le composé intermétallique Al_2Cu .

Au vu des diagrammes précédents, considérons maintenant le diagramme ternaire Al-Zn-Mg représentant les solubilités limites de Zinc et de Magnésium dans l'Aluminium [11].

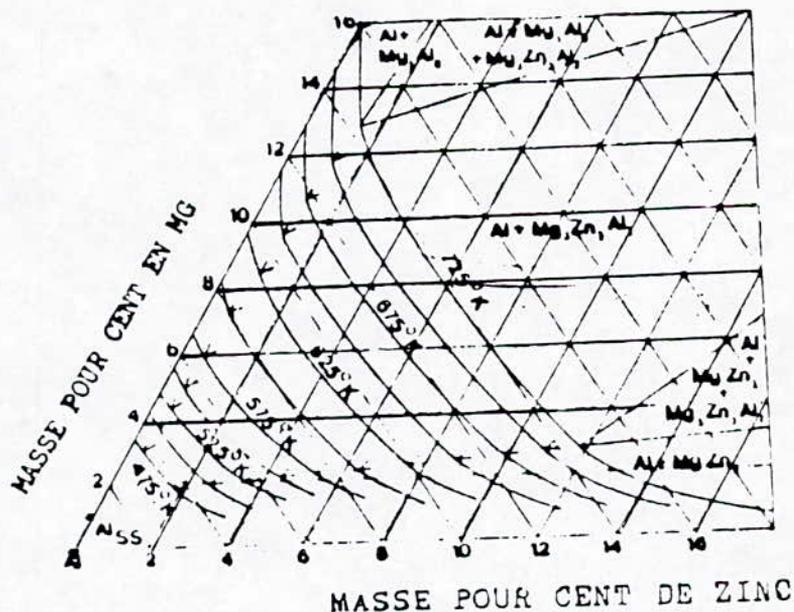


Fig. I Solubilité limite de Zinc et de Magnésium dans l'Aluminium

Il apparait que la solubilité limite en Zinc et en Magnésium diminue considérablement avec l'abaissement de température, c'est pourquoi l'on peut dire qu'à température ambiante, la structure de l'alliage ternaire est majoritairement biphasée cfc et hc.

II.1 : Alliage considéré :

L'alliage sur lequel porte notre étude est un alliage très utilisé en aéronautique. L'analyse spectrochimique d'un échantillon de cet alliage révèle la composition suivante :

Element	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti
Teneur %	5,6	2,7	1,6	0,5	0,4	0,3	0,23	0,2

Il s'agit donc, selon la norme française, de l'AZ5GU ou, selon la norme américaine, du 7075.

L'Analyse de notre échantillon a été réalisée sur un spectromètre type DV4.

Propriétés physico-chimiques et mécaniques de l'alliage étudié :

Les alliages d'Aluminium 7075 sont en général traités afin d'optimiser leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques pour leur permettre d'être utilisés convenablement. A cet effet, l'alliage que nous étudions a subi un traitement thermique de trempe et de revenu pour produire un phénomène de précipitation et de durcissement structural. Ces traitements spécifiques conduisent à une nouvelle appellation qui est : 7075-T6.

Propriétés du 7075-T6 [5] :

Densité volumique : 2,80g/cm³

Durée de mise en solution de trempe : 15 mn

Température de trempe : 470 + 5°C

Milieu de trempe : eau froide à une température inférieure à 40°C

Durée de revenu de maturation : 8 heures
Température de revenu : $135 + 5^{\circ}\text{C}$
Limite élastique : 440 MPa
Charge de rupture : 520 MPa
Dureté Brinell (bille 10 mm, 1000 kg, 30 s) : 140 à 160
Module d'élasticité : $72 \cdot 10^3$ MPa
Malléabilité : Impropre
Aptitude à l'anodisation de protection : acceptable
Résistance à l'action atmosphérique : acceptable
Intervalle de fusion : 477 à 635°C
Coefficient de dilatation linéique : $23,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Capacité thermique massique : 960 J/kg K
Conductivité thermique : 130 W/m K
Résistivité : $5,22 \cdot 10^{-8} \text{ ohm.m}$
Allongement : 11 %
Cisaillement : 330 MPa
Fatigue : 160 MPa

Les alliages 7075 T6 sont souvent utilisés pour avoir des produits filés et des fils étirés d'usage courant, des produits laminés d'usage général, ou des pièces obtenues par forgeage libre ou matriçage.

Ils acquièrent, par mûrissement, des caractéristiques mécaniques qui les rapprochent des alliages traités thermiquement. Ils présentent un intérêt pour la construction mixte moulée-soudée. Leur mise en oeuvre est assez délicate et ils ne conviennent pratiquement que pour la coulée en sable. Ce sont des alliages auto-trempants [1].

Processus de précipitation [1] :

A température ambiante et au-dessous de 76°C , il se forme des zones de Guinier-Preston de forme sphérique, difficilement décelables au microscope électronique mais qui produisent un durcissement déjà important de l'alliage.

Les alliages d'Aluminium sont constitués en proportions plus ou moins grandes, suivant les cas, de cristaux d'une phase riche en Aluminium, noyés dans un mélange eutectique, en présence de phases ou de composés intermétalliques généralement fragiles. Les cristaux de la phase riche en Aluminium contiennent en solution solide une petite proportion des éléments d'alliage (Zn, Mg, Cu).

L'eutectique est un mélange fin de cristaux de cette solution solide et d'autres combinés entre l'Aluminium et les éléments d'alliage (exemple : $Mg_2 Al_3$ par Al-Mg). La présence des constituants intermétalliques est principalement due à la teneur en fer, impureté naturelle de l'Aluminium. Celui-ci, ainsi que ses alliages, sont connus comme résistant relativement bien à la corrosion.

Néanmoins, dans certaines conditions d'exposition ou de mise sous contrainte, les alliages d'Aluminium, de même que les autres métaux, peuvent subir un endommagement par corrosion. Et, de même que pour la plupart des métaux usuels, la corrosion des alliages d'Aluminium peut se manifester sous différentes formes qui dépendent des alliages eux-mêmes (composition, état métallurgique) et des conditions d'exposition ou d'utilisation.

Les principaux facteurs conditionnant la résistance à la corrosion de l'Aluminium et de ses alliages sont :

*Potentiel d'électrode de l'alliage comparativement à celui des autres alliages.

A titre informatif, il est intéressant de connaître les potentiels de dissolution de quelques-unes des phases présentes dans le 7075 T6 :

Mg : -1,73 V	Al Fe : -0,56 V	Al Mg : -1,24 V
Zn : -1,10 V	Al Cu : -0,73 V	Mg Zn : -1,05 V
Cu : -0,2 V	Al Mn : -0,85 V	Cu Mg Al : -1,00V

*Composition de l'alliage : Forme, nombre et répartition des constituants présents.

*Traitements métallurgiques que l'on fait subir au matériau.

Le 7075 a une résistance à la corrosion moindre que celle des autres alliages d'Aluminium à cause de la présence de cuivre: Une expérience réalisée sur un alliage d'Aluminium 7075 T6 susceptible d'être recouvert (par revêtement) sous forme d'une feuille d'Aluminium de 1,27 mm d'épaisseur et après une exposition de 7 ans montre une perte d'épaisseur de 0,502 μm . par an, avec un maximum de 53 μm . et une moyenne de 41 μm . Le taux de matière perdue est de 0,1 %.

Remarque :

Si le Cuivre abaisse la résistance à la corrosion de l'alliage, c'est parce qu'il précipite aux joints de grains sous forme de Duralumin (CuAl_2), ainsi que le long des plans de glissement.

*Traitements métallurgiques que l'on fait subir au matériau.

*Effets du pH du milieu.

Aspect micrographique de l'alliage :



Fig. II.1 Structure micrographique du 7075 T6 (x500)

Nous avons utilisé le réactif de Tucker, dont la composition est la suivante (en volume) :

- Acide nitrique : 15 %
- Acide Chlorhydrique 45 %
- Acide fluorhydrique : 25 %
- Eau distillée : 25 %
- Conditions d'attaque : 10 à 15 secondes à température ambiante.

L'examen au microscope métallographique sur une surface préalablement polie et attaquée nous a révélé des phases de $Mg Zn_2$ précipitées aux joints de grains car

insolubles dans la phase α de l'Aluminium. L'ensemble de la structure est biphasé malgré quelques trace de $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ de $\text{Cr}_2\text{Mg}_3\text{Al}_{18}$ ou de Mg_2Si négligeables.

II.2 : Action du milieu sur le 7075 T6 [2]

Pour déterminer les types de corrosion auxquels est soumis notre alliage, il est nécessaire de connaître le milieu dans lequel il est plongé, et donc de dresser une liste des éléments qui peuvent l'attaquer.

La pièce considérée étant une lice d'avion (charpente métallique) située sous les toilettes, il est simple de déterminer les éléments éventuellement corrosifs auxquels elle est exposée et qui peuvent se résumer en gros à ce qui suit : eau, détergents, urine.

La corrosion galvanique est d'emblée à exclure car le rivetage utilisé est du même matériau que la lice, nous allons donc étudier de plus près l'action de l'eau ainsi que de toutes ses composantes (ions divers), de l'urine et de sa composante essentielle qui est l'urée ($\text{Co}(\text{NH}_2)_2$) et des détergents utilisés en aéronautiques.

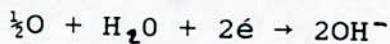
L'action de l'eau :

Considérons d'abord l'action de la molécule d' H_2O sur l'alliage :

Dissociation ionique de l'eau : $\text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH}^-$

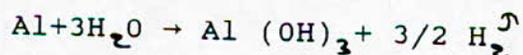
Réduction des ions H^+ : $\text{H}^+ + 1\text{é} \rightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2^{\uparrow}$

Réduction de l'oxygène dissous dans l'eau :



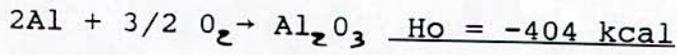
Oxydation de l'Aluminium : $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{é}$

La combinaison de toutes ses réactions conduit à l'équation chimique suivante :



$\text{Al}(\text{OH})_3$ est donc le produit de corrosion.

En réalité, la dissolution des ions Al^{3+} ne se fait pas de manière aussi directe à cause de la grande affinité qu'a l'Aluminium avec l'oxygène.



Ceci indique donc qu'avant l'oxydation de l'Aluminium, il faut qu'il y ait dissolution de la couche d'oxyde Al_2O_3 et, en fonction du pH du milieu, la courbe ci-dessous nous en donne une approche numérique.

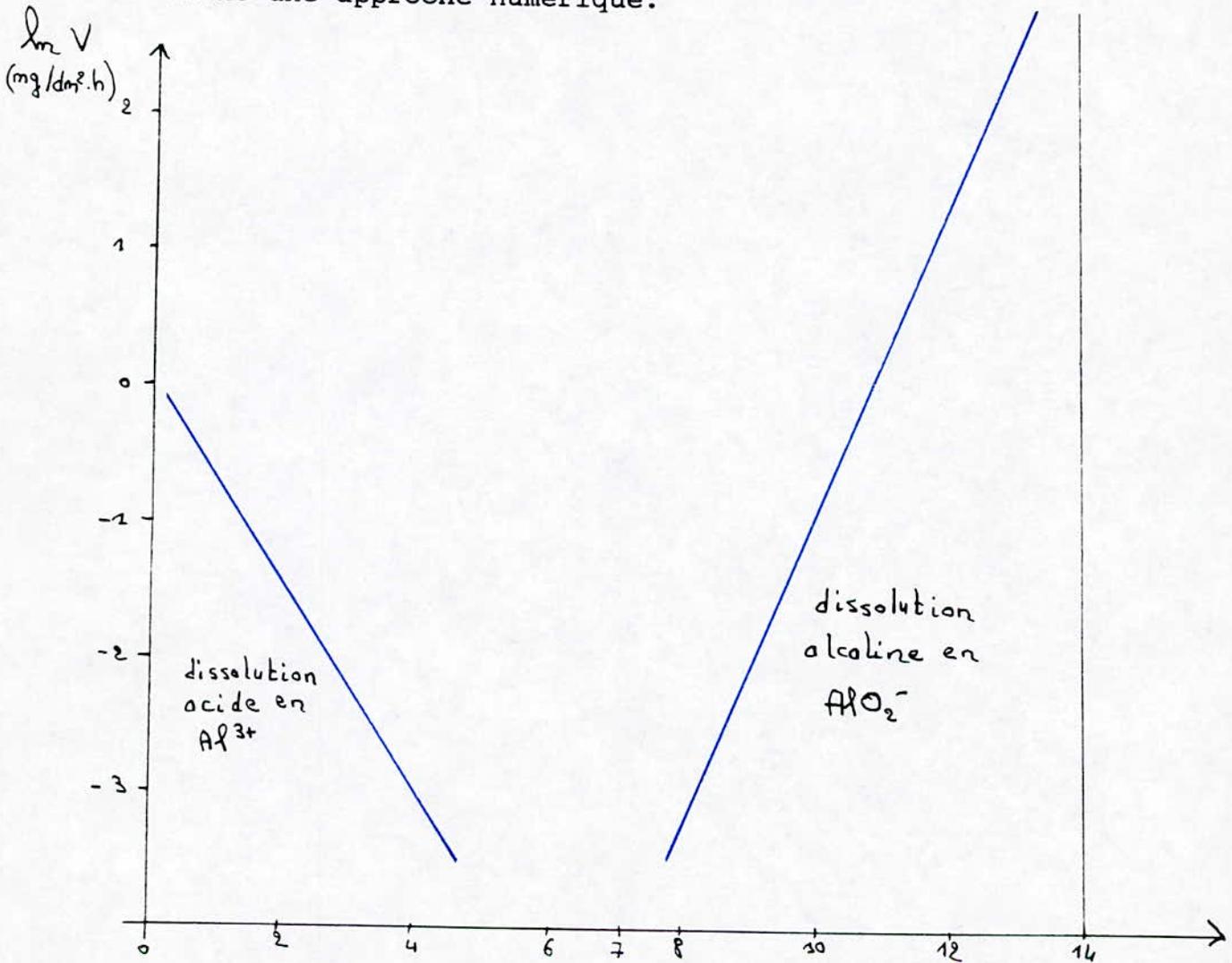
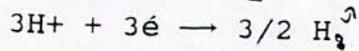
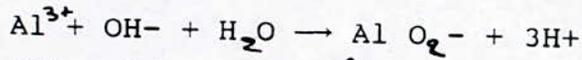
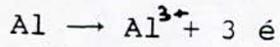


Fig.II.2 Vitesse de dissolution de l'Alumine en milieu aqueux en fonction du pH (d'après Shatalov)

Il apparait donc que l'aluminium et ses alliages se corrodent plus rapidement dans les acides et les alcalis que dans l'eau distillée. La dissolution en milieu basique de l'Aluminium résulte des réactions suivantes :



L'équation globale est : $\text{Al} + \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3/2 \text{H}_2 \uparrow + \text{AlO}_2^-$

Effet des chlorures :

Ainsi que d'autres anions, ils peuvent être absorbés par le film d'oxyde et se substituent aux atomes d'oxygène dans le réseau de l'alumine. Les chlorures ont le plus fort pouvoir de pénétration car leurs dimensions sont voisines de celles de l'oxygène.

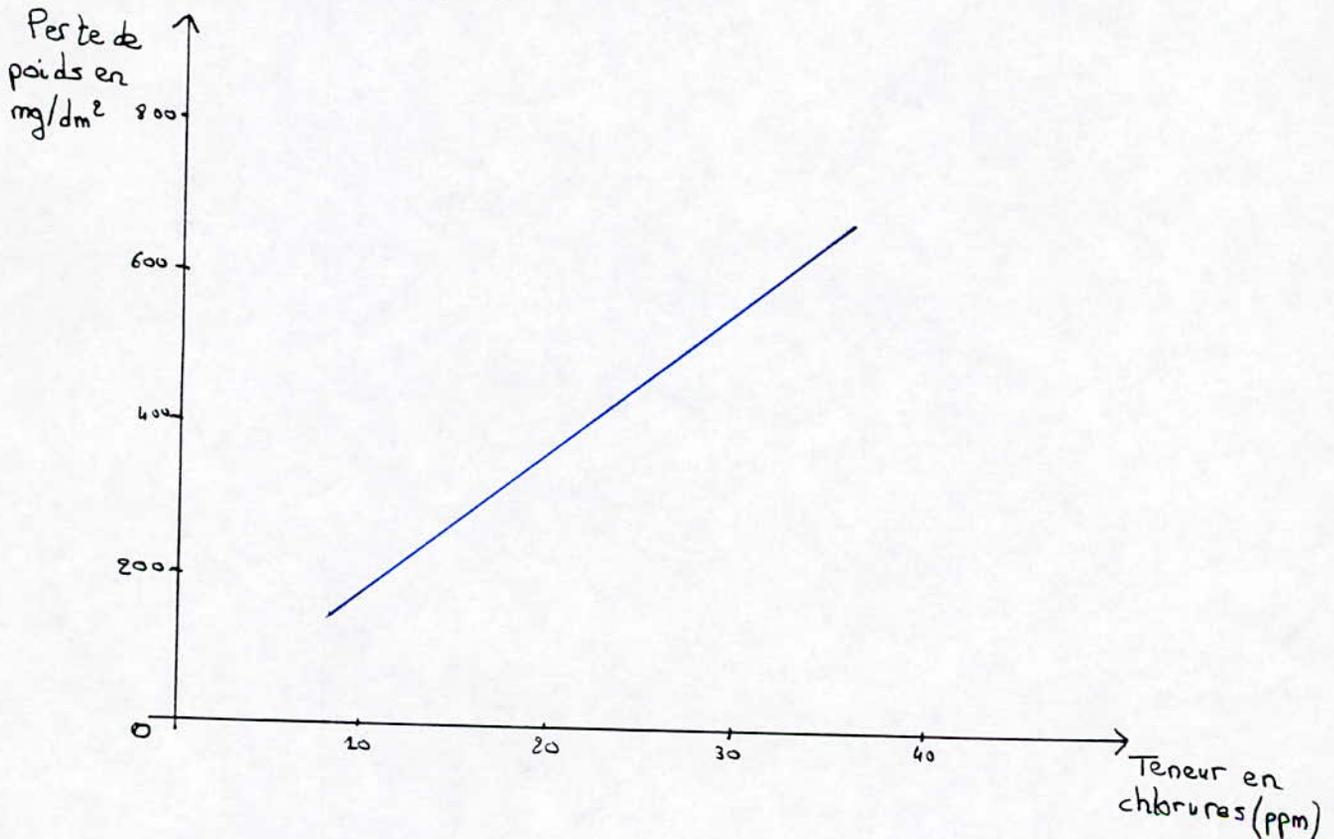


Fig. II.3 Influence des chlorures dans l'eau sur l'Aluminium

Effet des sulfates :

Ils ont moins d'influence que les chlorures car ils sont plus volumineux et moins mobiles, donc pénètrent moins facilement dans le film d'oxyde. Sans vraiment influencer sur la densité des piqûres, ils provoquent une augmentation sensible de leur profondeur. La figure ci-dessous montre leur influence sur la corrosion de l'Aluminium.

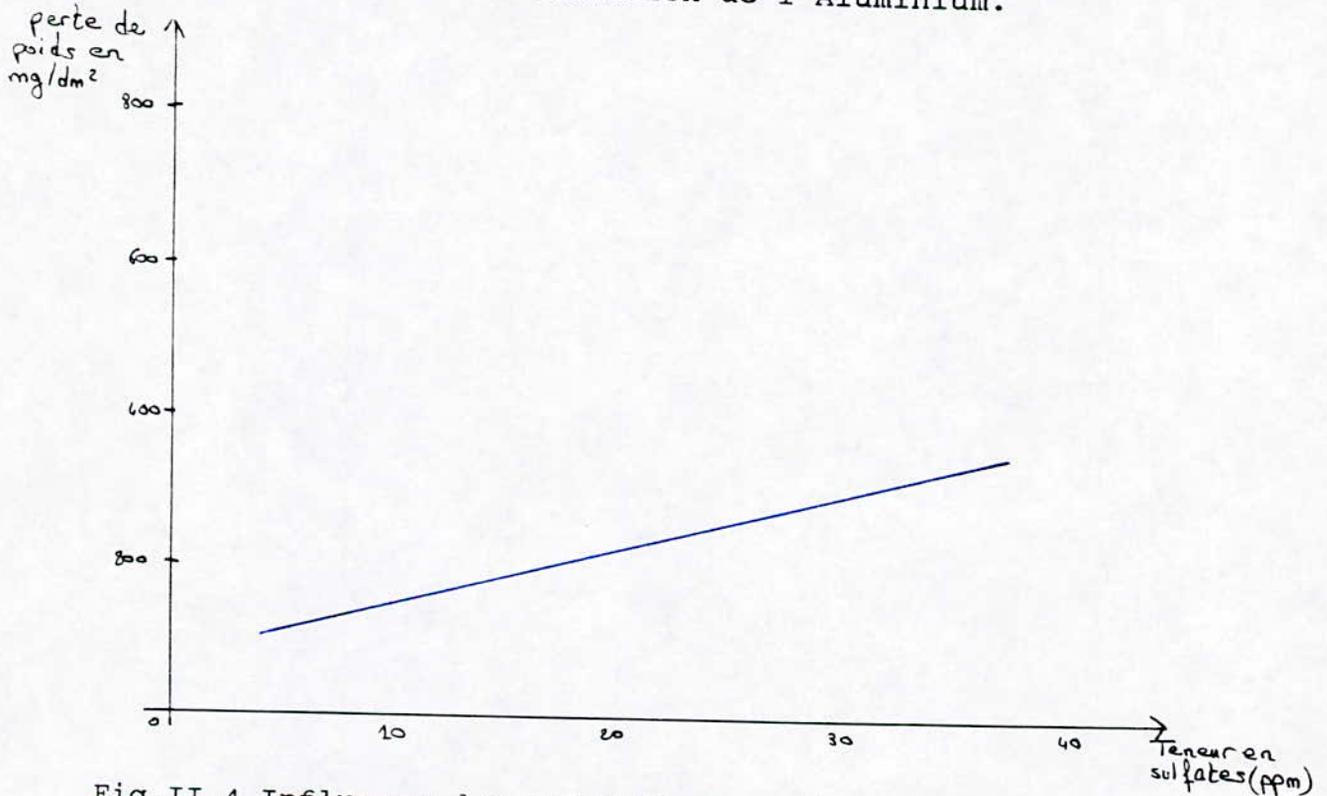


Fig.II.4 Influence des sulfates dans l'eau sur l'Aluminium

Des éléments comme le Calcium, les Carbonates, le Manganèse, le Cobalt, le Fer, le Chrome ou le Zinc, n'ont pour ainsi dire aucune action destructrice sur l'Aluminium ainsi d'ailleurs que les Sodium, Potassium, Magnésium et Nitrates. Quant à la quantité d'oxygène dissout dans l'eau, ses effets sont quasiment nuls car, tout en favorisant la corrosion par dépolarisation des cathodes, il permet la reconstitution du film d'oxyde Al_2O_3 , qui protège le métal.

Action de la Température :

La tenue de l'Aluminium et de ses alliages dans l'eau s'améliore sensiblement avec l'augmentation de la température. La profondeur des piqûres décroît très fortement avec l'augmentation de la température, mais leur densité peut par contre augmenter.

La figure ci-dessous nous en donne un bref aperçu :

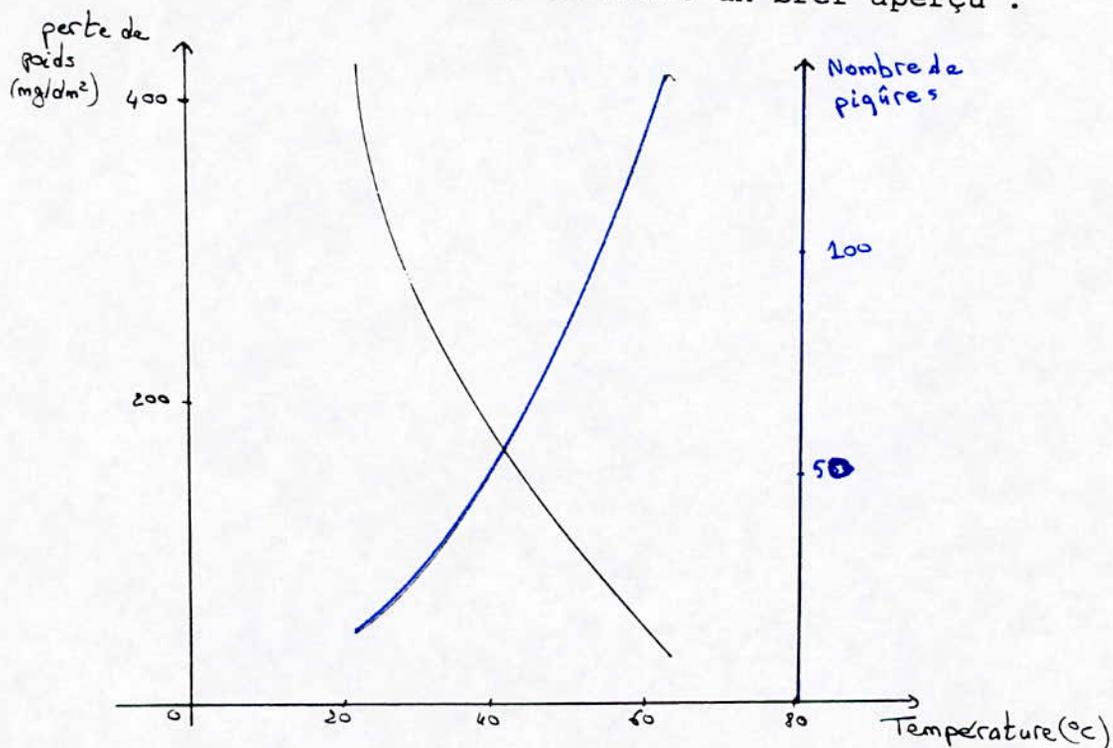


Fig.II.5 Influence de la température de l'eau sur l'Aluminium

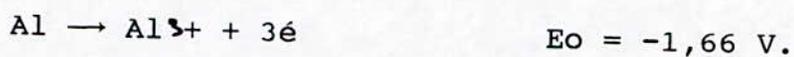
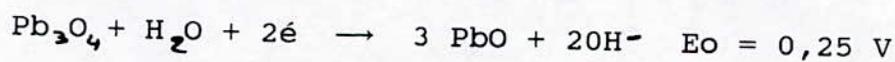
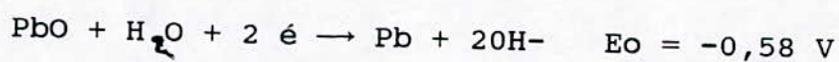
Action de l'urine :

Celle-ci se traduit par la réactivité de l'Urée ($\text{Co}(\text{NH}_2)_2$) par rapport à l'alliage d'Aluminium. Seulement, l'urée n'a aucune action sur l'Aluminium et ses alliages à cause principalement de sa grande solubilité dans l'eau qui est de 900 g/l, et son pH est de 9,5 à 50 %.

Action des détergents : [2,5]

Les détergents utilisés pour le nettoyage des toilettes des avions par le service d'entretien d'Air Algérie se résument en fait à un seul produit : Color Fresh de ROCHEX, et est essentiellement constitué par des aldéhydes. L'action du détergent se traduit donc par celle des aldéhydes qui est pratiquement nulle, car même si attaque il y avait, elle correspondrait à une diminution d'épaisseur de 20 μm par an.

Il est toutefois important, avant de clore ce chapitre, d'étudier l'action des oxydes de Plomb car les techniciens d'Air Algérie utilisent du crayon pour dessiner les contours des pièces à découper. Ainsi, les oxydes de plomb se réduisent facilement en présence d'eau :



L'Aluminium fonctionne donc comme anode dans la pile ainsi formée. Il en résulte qu'en milieu aqueux, l'aluminium et ses alliages se corrodent par piqûres.

II-3 Corrosion observée

Les observations que nous avons effectuées sur des échantillons corrodés prélevés sur site montrent plusieurs phénomènes :

- Diminution notable à certains endroits de la pièce allant jusqu'au percement de l'épaisseur de la tôle.
- Corrosion accentuée au niveau des rivets et s'étendant uniformément dans la pièce.
- Piqûration évidente à certains endroits. D'après notre étude, ces endroits sont ceux qui étaient recouverts d'eau.
- Exfoliation de la pièce qui laisse apparaître une structure stratifiée due en partie au traitement mécanique de mise en forme, en l'occurrence le laminage.
- Création de crevasses profondes dans certaines zones de la tôle.



Photo II-1 Echantillon corrodé prélevé sur site

Par conséquent, nous déduisons qu'il s'agit d'une action conjointe de deux types de corrosion : la corrosion par piqûration et la corrosion feuilletante uniforme. Néanmoins, il est important d'ajouter que les causes en sont, outre l'action directe de l'eau et des éléments qu'elle contient, une action indirecte qui est l'aération différentielle et éventuellement le confinement.

II-4 Moyen de protection préconisé

Il s'agit de l'anodisation dans l'acide sulfurique. Celle-ci, en courant continu, appelée indifféremment Alumilite ou Eloxal est de loin le procédé le plus utilisé car, suivant les conditions d'électrolyse, il est possible d'obtenir des couches dont les caractéristiques offrent une gamme considérable d'utilisations. Les principaux paramètres rentrant en ligne de compte sont la durée de l'opération, la température du bain, la densité de courant et la concentration de l'électrolyte. Il n'est pas recommandé de dépasser des temps de traitement pouvant donner des couches de 30 μm d'épaisseur car elles deviennent trop molles en surface. En général, des couches de 6 à 12 μm sont utilisées pour les applications décoratives et de 15 à 25 μm pour la protection. Par exemple, pour une concentration d' H_2SO_4 à 20 % en masse et pour une température de 20°C, pour une densité de courant de 1,5 A/dm², la vitesse de croissance de la couche est de l'ordre de 1 μm en 2 minutes [1,14,17,21,22].

Les propriétés des couches telles que la brillance, la protection, la continuité ou la densité sont influencées par la composition de l'alliage, car durant l'anodisation, l'oxygène réagit autant avec l'Aluminium qu'avec ses éléments d'alliage qui peuvent soit s'oxyder (Mg et Zn), soit se dissoudre dans l'électrolyte (Cu) en créant des lacunes, soit rester inattaqués (Si).

Gamme opératoire [4]

- Tout d'abord, nous avons effectué un polissage mécanique des deux surfaces de l'échantillon à l'aide d'une série de papiers abrasifs, à granulométrie croissante, de 120 grains/mm à 1000 grains/mm, suivi d'un polissage fin effectué sur des feutres.

- Toutes les opérations précitées avaient pour but de préparer notre échantillon au traitement électrolytique proprement dit : l'anodisation. Celle-ci, qui consiste en une oxydation des pièces, a été faite dans une solution d'acide sulfurique 66°B à 128 cm /l sous une tension de 12 V et une densité de courant de 1,5 A/dm², l'échantillon étant placé en tant qu'anode. Cette oxydation est toutefois précédée d'un léger décapage électrolytique réalisé en inversant simplement les polarités du montage, et ce pendant un temps relativement court : environ 3 minutes.

- L'échantillon est ensuite rincé à l'eau froide pour enlever le plus d'acide sulfurique possible de sa surface.

- L'opération suivante est la neutralisation, effectuée dans une solution d'ammoniaque à 3 %, dans le but de ramener le pH de l'échantillon traité d'une faible valeur à cause de son contact avec l'acide sulfurique à une valeur proche de la neutralité.

- Il s'ensuit un rinçage à l'eau froide pour enlever ce qu'il restait d'acide sulfurique ou d'ammoniaque.

- Le colmatage, qui a une grande importance dans la tenue à la corrosion de l'échantillon, a été réalisé par immersion pendant 15 minutes dans de l'eau portée à 98°C. Il a pour but de refermer les pores de la couche et d'obtenir le meilleur pouvoir de protection contre la corrosion possible ainsi que le maximum de tenue des colorants à la lumière. Comme la couche d'oxyde formée électrolytiquement est poreuse, le colmatage provoque une transformation de phases aboutissant à une structure présentant une porosité beaucoup moins importante dont les mécanismes sont encore mal connus et qui, au microscope électronique, montre une structure en "Corn-Flakes" selon

El-Mashri, Jones et Forty (1983). Ainsi, l'alumine anhydre est transformée superficiellement en alumine monohydratée (boehmite) [8,9].

Au plan électrochimique, l'anodisation consiste à ramener le potentiel du métal dans une zone de passivité dans la courbe de polarisation anodique.

- La dernière opération, qui est la coloration, joue deux rôles, l'un décoratif car l'on choisit la couleur que l'on veut, et l'autre protecteur car le colorant renforce l'imperméabilité ionique de l'échantillon en recouvrant et bouchant les pores qui pourraient éventuellement subsister.

II - 5 Dispositif expérimental [1,4]

La technique expérimentale utilisée pour l'anodisation des échantillons de 7075 T6 a nécessité l'emploi d'un dispositif expérimental dont le schéma de principe est le suivant :

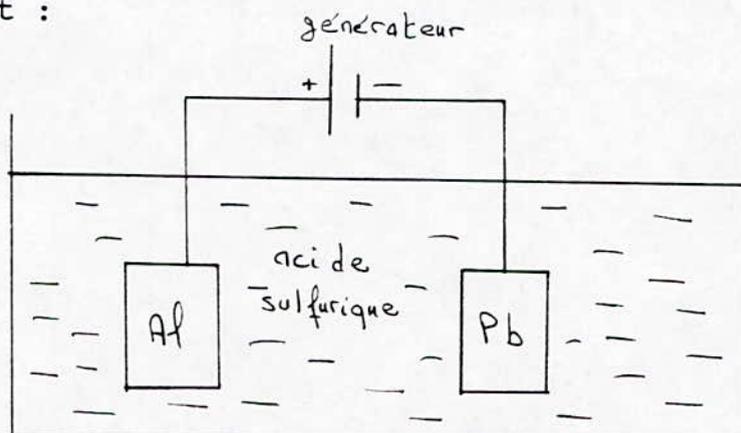


Fig.II Schéma du dispositif expérimental d'anodisation

Le générateur du courant continu peut débiter un courant allant jusqu'à 3A et délivre une tension allant jusqu'à 30 V.

La cathode en Plomb a été usinée de manière à correspondre à la forme de l'anode, c'est-à-dire une lame aux dimensions surfaciques suivants :

02 cm x 02 cm

Il est à noter que pour oxyder convenablement les deux faces de notre échantillon, nous avons disposé deux cathodes en Plomb de part et d'autre de l'anode en 7075 T6, ceci a pour but d'assurer une oxydation de l'ensemble de la pièce.

La surface de la pièce à anodiser étant de 4 cm^2 , et vu qu'il a lieu d'oxyder les deux surfaces de la pièce, le courant imposé par le générateur sera donc de $1,5 \text{ A/dm}^2 \times (2 \times 4) \cdot 10^2 \text{ dm}^2 = 0,12 \text{ A}$ à raison de $1,5 \text{ A/dm}^2$, et la tension de 12 V



Dispositif expérimental

L'anode en 7075 T6 est placée entre les deux cathodes de Pomb, parallèlement à celles-ci. Elle y est maintenue à une distance de deux (2) centimètres par rapport à chacune d'elles.

Il est rappeler que le temps d'anodisation a été de 35 minutes, sauf pour certains essais supplémentaires servant de comparaison où nous l'avons fait varier.

III-1 Tests expérimentaux

En vue de valider l'efficacité du traitement effectué, il est nécessaire de procéder à divers essais de corrosion. Les premiers tests ont eu pour objet des échantillons non-anodisés, ceux-ci ont été suivis de tests sur les échantillons traités.

Les résultats obtenues lors de ces tests seront comparés et interprétés dans les chapitres suivants. Pour ce faire, nous avons plongé les échantillons dans les milieux et pendant les temps suivants :

- Une solution d'eau de robinet pendant deux (2) semaines.
- Une solution d'eau de robinet avec une teneur en ions Cl⁻ double de la normale, soit environ à 0,28 g/l pendant deux semaines.
- Une solution d'eau de robinet pendant trois (3) semaines.
- Une solution d'eau de robinet à 0,28 g/l d'ions Cl⁻ pendant trois (3) semaines.
- Une solution d'eau du robinet pendant quatre (4) semaines.
- Une solution d'eau du robinet à 0,28 g/l d'ions Cl⁻ pendant quatre (4) semaines

Nous avons volontairement utilisé de l'eau du robinet (0,14 g/l de Cl⁻) comme solution d'immersion car la corrosion produite sur les lices d'avion n'est due qu'aux infiltrations d'eau (voir II-2), aussi nous avons voulu recréer les conditions d'attaque réelles.

La seconde solution, doublement concentrée en ions Cl^- a été utilisée d'une part pour mettre en évidence l'action destructrice des ions Cl^- , et d'autre part pour mettre à l'épreuve l'efficacité de notre traitement en augmentant l'agressivité du milieu. De plus, on pourrait envisager une éventuelle extrapolation des résultats obtenus, en ce sens que l'on pourrait poser comme postulat que les figures de corrosion obtenues par immersion dans cette solution seraient celles que l'on pourrait obtenir dans une immersion en eau "normale" mais pendant un temps beaucoup plus long.

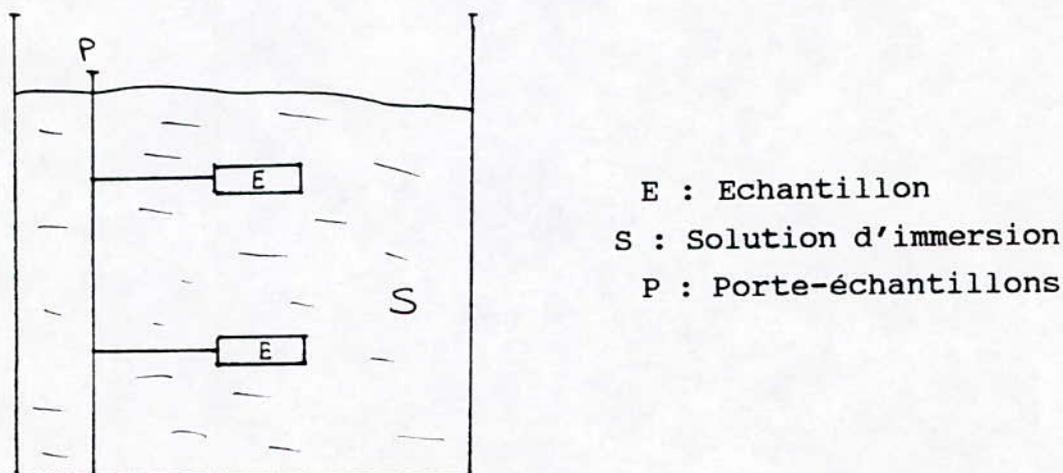


Fig. III-1 : Schéma du dispositif expérimental d'une cellule d'immersion

Pour une estimation de l'évolution de la couche d'oxyde formée à travers une étude pondérale, nous avons réalisé plusieurs anodisations pendant des temps variables.

III. 2 Résultats des tests expérimentaux : [20]

Le principal test expérimental est le test de corrosion qui consiste en l'immersion des échantillons non-traités et traités pendant des durées successives de deux, trois et quatre semaines respectivement dans deux (2) types de solutions (voir III.1).

Les résultats que l'on présentera ci-dessous sont déterminés respectivement par une étude métallographique macro et microstructurale et une étude pondérale.

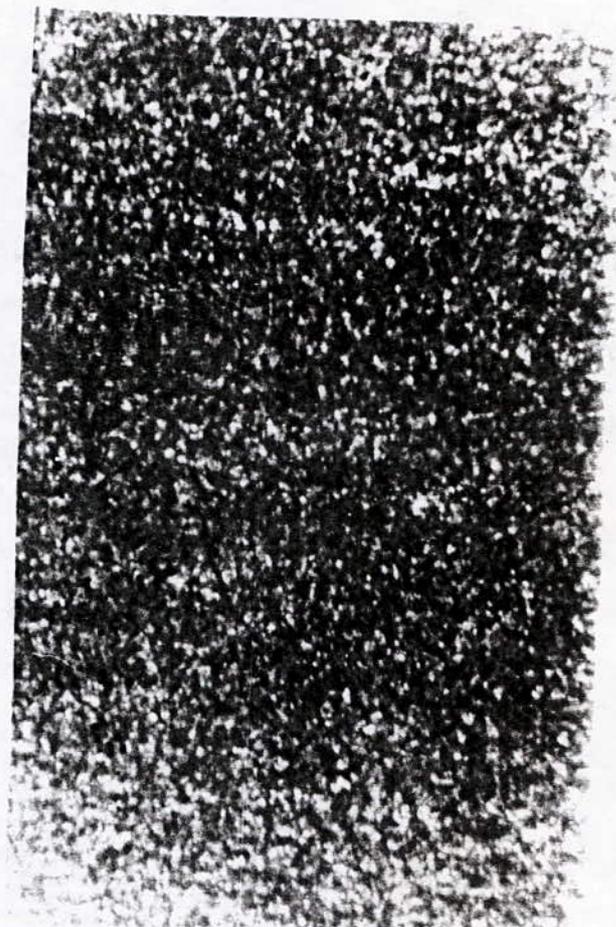
L'étude macrographique a été réalisée sur microscope optique à grossissement de trente-deux (x32). L'étude micrographique, par contre, a été réalisée à un grossissement de deux cents fois (x200) ou cinq cents fois (x500).

L'étude pondérale présente deux volets différents : Le premier consiste en une prise de poids juste avant et juste après l'immersion de chaque échantillon, le second en une prise de poids juste avant et juste après l'oxydation électrochimique pour différentes durées.

III.2 - Immersion dans de l'eau industrielle

Immersion de deux semaines

Macrographies des échantillons



Photo

III-2 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 32)

Photo

III-3 : Echantillon de 7075T6 anodisé (x 32)

L'échantillon non-anodisé présente une figure de corrosion marquée où l'on voit nettement les produits de corrosion, alors que l'échantillon anodisé ne présente aucune altération de surface.

Micrographie de l'échantillon non traité



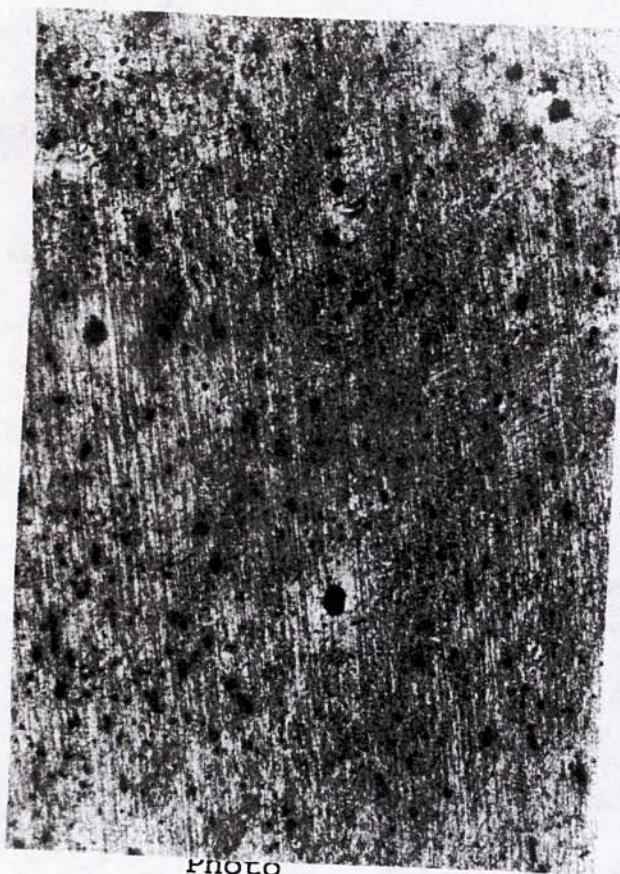
Photo : III-4 Echantillon de 7075T6 non anodisé (x500)

Cette micrographie de surface nous montre une texture très sombre parsemée de nombreuses piqûres de faible diamètre reconnaissables aux petits points brillants, preuves de la présence d' Al(OH)_3 dans le fond de la cavité piqûrale.

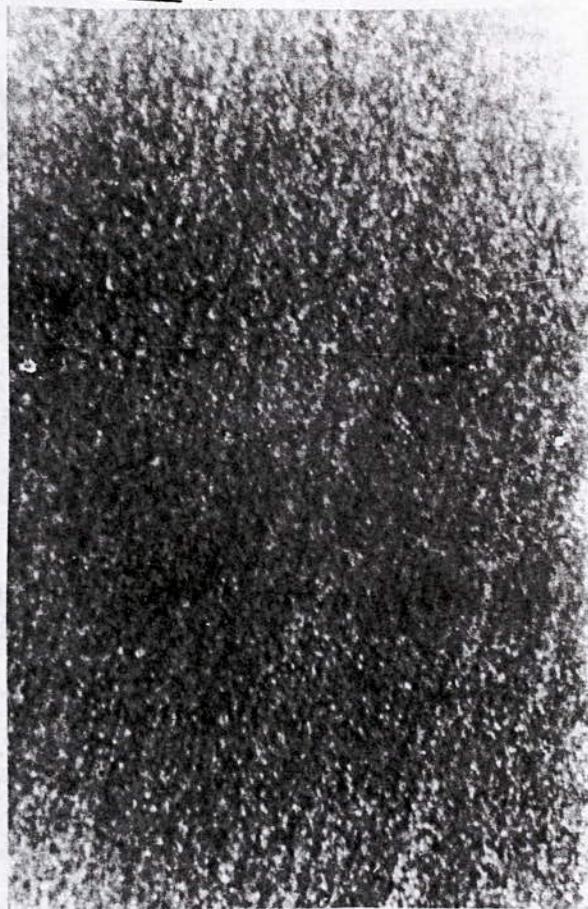
La coloration de l'ensemble n'est pas uniforme et présente plusieurs teintes visibles sur la photo. La taille des piqûres est, homogène, si l'on exclut quelques unes d'entre elles, plus grosses que les autres. L'on remarque aussi la présence d'agrégats noirâtres.

Immersion de trois semaines

Macrographies des échantillons :



III-5 : Echantillon de 7075T6
non anodisé (x 32)



III-6 : Echantillon de 7075T6
anodisé (x 32)

L'échantillon non-anodisé présente une différence de faciès par rapport à celui immergé pendant deux semaines : il n'y a pas de produits de corrosion noirâtres à la surface, par contre on aperçoit nettement de nombreuses piqûres laissant à penser que la corrosion uniforme a peut-être laissé place à la corrosion par piqûres.

L'échantillon anodisé, lui, ne présente toujours pas de figures de corrosion : il n'est toujours pas attaqué.

Micrographie de l'échantillon non traité

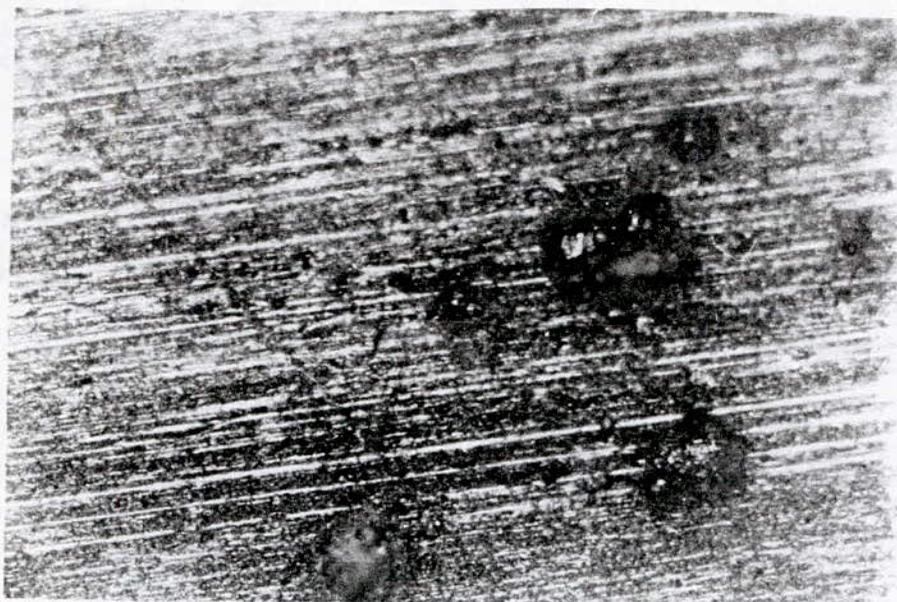


Photo III - 7 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé
(x 500)

La surface observée est beaucoup plus claire que lors de l'immersion dans la même solution pendant deux semaines. Les piqûres sont très nettement visibles, et l'on remarque la rareté des masses noirâtres (oxydes). La densité des piqûres est aussi beaucoup moins importante que celle de l'échantillon précédemment observé.

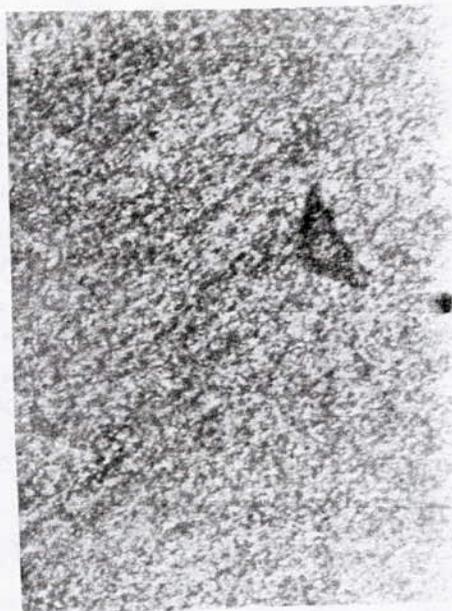
Immersion de quatre semaines :

Macrographies des échantillons :



Photo

III-8 : Echantillon de 7075T6
non anodisé (x 32)



Photo

III-9 : Echantillon de 7075T6
anodisé (x 32)

L'échantillon non-anodisé présente un faciès de corrosion assez particulier : les produits de corrosion sont présents mais ne recouvrent pas totalement la surface, par contre l'on voit aussi présence d'une certaine piqûration. Il semble que la piqûration présente lors de l'immersion pendant trois semaines dans la même solution ait évolué et est maintenant associée à une relativement légère production de produits de corrosion.

L'échantillon anodisé ne présente toujours aucune trace de corrosion.

Micrographie de l'échantillon non traité



Photo III-10 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 500)

La surface est cette fois très sombre, preuve de l'existence d'une grande quantité d'oxydes. Les piqûres, reconnaissables au petit point brillant de leur fond sont cette fois plus nombreuses que celles observées sur l'échantillon immergé pendant trois semaines dans la même solution.

La coloration de l'ensemble varie du sombre au clair, selon les structures rencontrées.

Etude pondérale en fonction du temps d'immersion

Nous présenterons dans ce qui suit la courbe d'étude pondérale relativement à la solution d'eau industrielle.

Le tableau des valeurs correspondantes et en annexe.

Il est toutefois à remarquer que pour éviter au maximum les erreurs dues à l'hétérogénéité des poids des différents échantillons, nous avons préféré calculer la perte relative de poids, c'est-à-dire le taux $[(P - P')/P] \times 100 \%$, P étant le poids relevé avant l'immersion, et P' celui relevé après.

Il est à noter que les valeurs négatives de perte de poids correspondent à des gains.

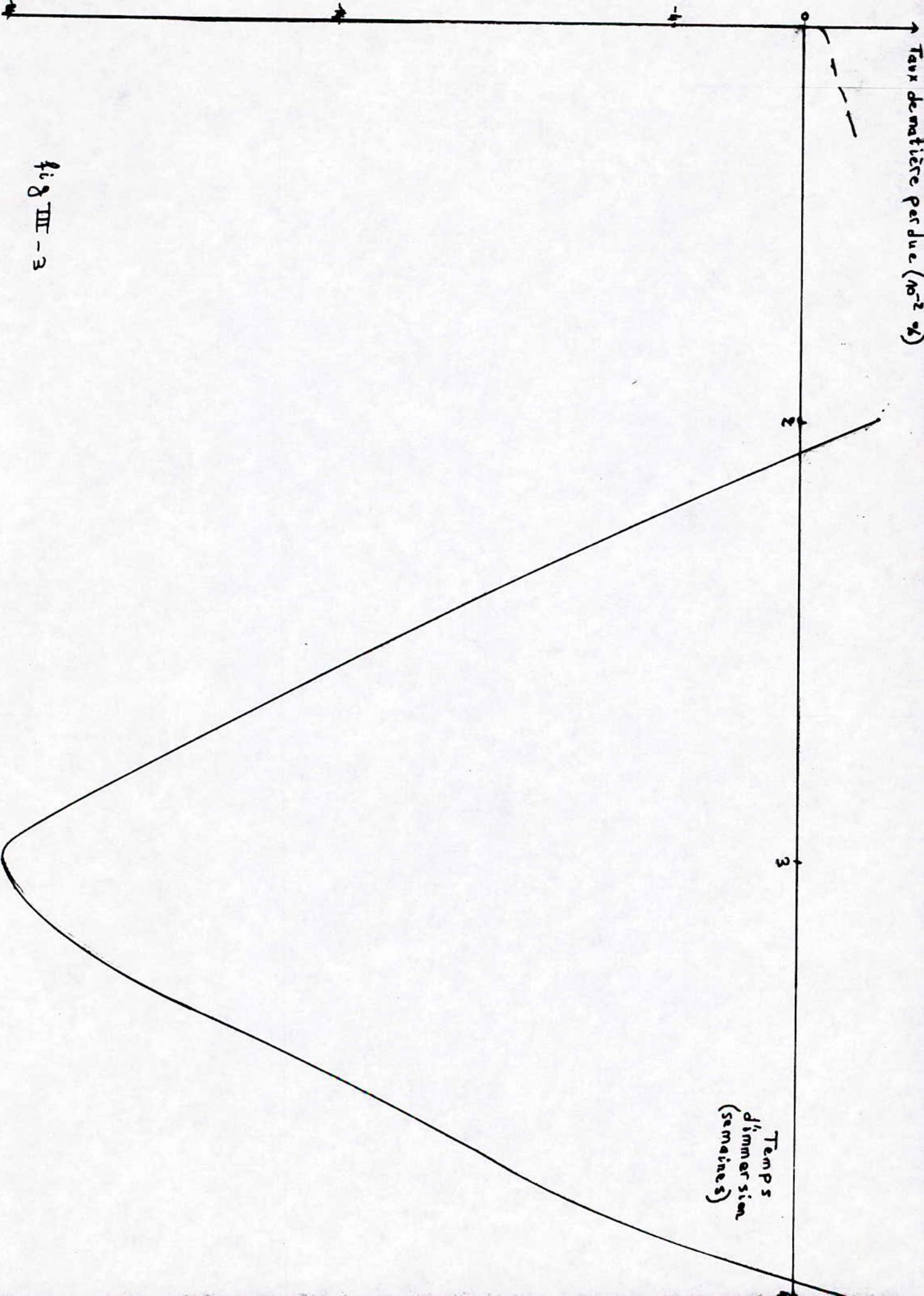
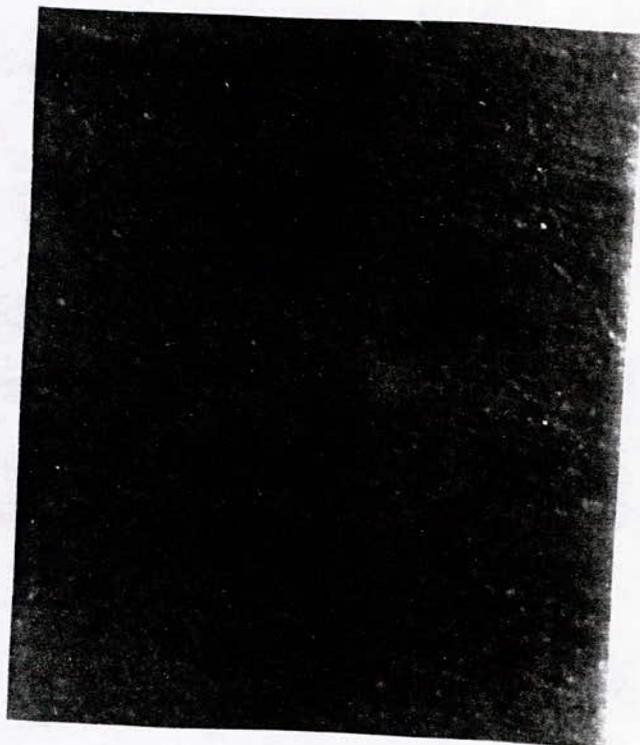
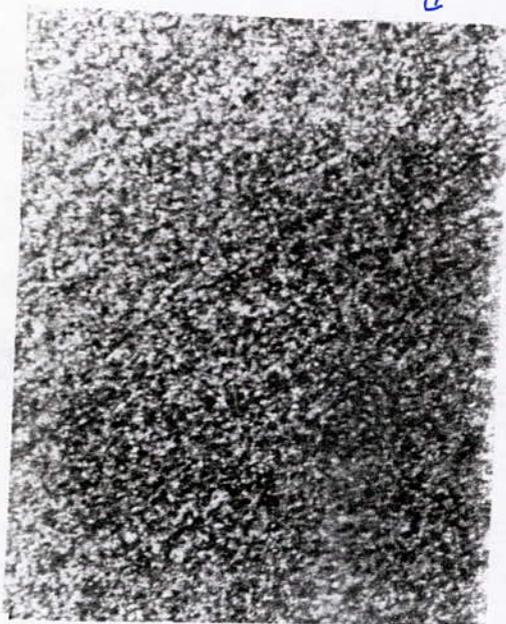


fig III-3

Immersion dans de l'eau industrielle doublement concentrée en chlorures

Immersion de deux semaines :

Macrographies des échantillons :



Photo

III-11 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 32)

Photo

III-12 : Echantillon de 7075T6 anodisé (x 32)

L'échantillon anodisé ne présente toujours aucune attaque de surface, alors que celui qui n'a pas été traité présente le même faciès de corrosion que par l'immersion dans de l'eau "normale", mais avec une plus grande quantité de produits de corrosion car l'on discerne une coloration plus foncée.

Micrographie de l'échantillon non traité

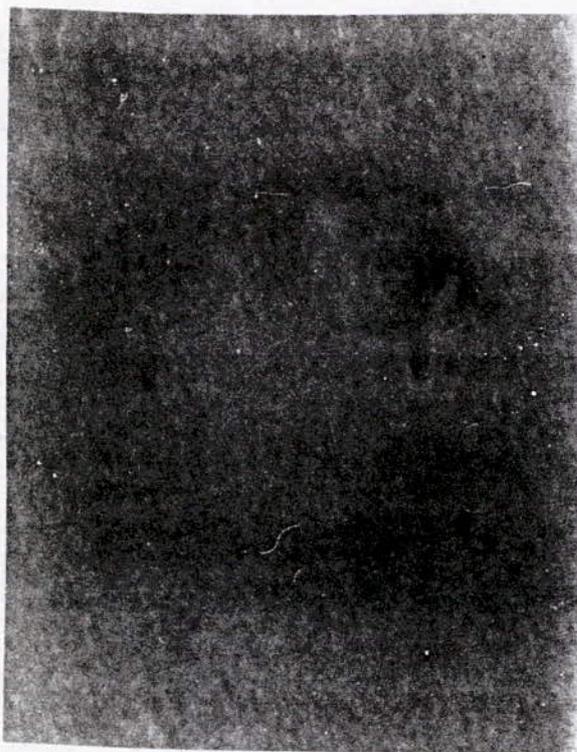


Photo III-13 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 500)

La surface est en partie recouverte d'oxydes et d'autres éventuels produits de corrosion car sombre. Des piqûres sont visibles, moins nombreuses cependant que celles observées sur l'échantillon trempé pendant la même période mais dans la première solution (eau industrielle), et sont souvent groupées. Leur taille est relativement homogène et de faible diamètre. Il semble qu'il y ait des régions préférentielles où les piqûres se forment, et d'autres où les oxydes et autres produits de corrosion se forment.

Immersion de trois semaines

Macrographies des échantillons :



Photo

III-14: Echantillons de 7075T6
non-anodisé (x 32)



Photo

III-15: Echantillon de 7075T6
anodisé (x 32)

L'échantillon anodisé présente cette fois des traces brunes d'oxydes sur la surface qui est tournée vers le haut, alors que l'autre surface ne présente aucune trace d'attaque.

L'échantillon non-anodisé montre une surface complètement recouverte de produits de corrosion.

Micrographie de l'échantillon non traité

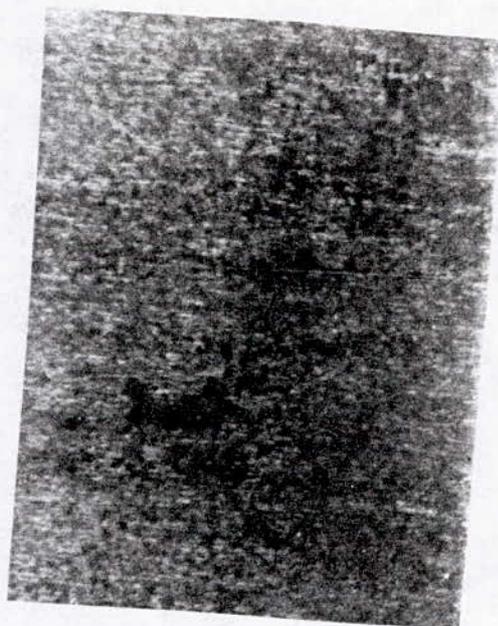


Photo III-16 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 500)

La surface est sombre, donc révélatrice de la création de différents produits de corrosion dont des oxydes. Le nombre de piqûres par unité de surface est plus important de beaucoup par rapport à l'échantillon trempé pendant deux semaines dans la même solution. La taille des piqûres est toujours faible, et elles semblent être plus ou moins uniformément réparties.

Immersion de quatre semaines :

Macrographies des échantillons :



Photo

III-17 : Echantillon de 7075T6
non-anodisé (x 32)

Photo

III-18 : Echantillon de 7075T6
anodisé (x 32)

L'échantillon non-anodisé présente une surface à coloration fortement noirâtre, car fortement corrodée, avec quelques plages blanchâtres, preuves de l'existence de produits de corrosion divers en quantité.

L'échantillon anodisé présente un légère attaque sur sa surface qui est tournée vers le haut, et aucune attaque sur celle tournée vers le bas.

Micrographie de l'échantillon non-traité :



Photo III-19 : Echantillon de 7075T6 non-anodisé (x 500)

On observe de nombreux agrégats noirâtres de toutes tailles, alors que la densité de piqûres est moins importante que celle de l'échantillon précédent. L'aspect en est beaucoup plus sombre.

Etude pondérale en fonction du temps d'immersion

Dans les mêmes conditions que pour la solution d'eau "normale", nous présentons dans ce qui suit la courbe d'étude pondérale relativement à la solution d'eau dans laquelle nous avons doublé la teneur en chlorures.

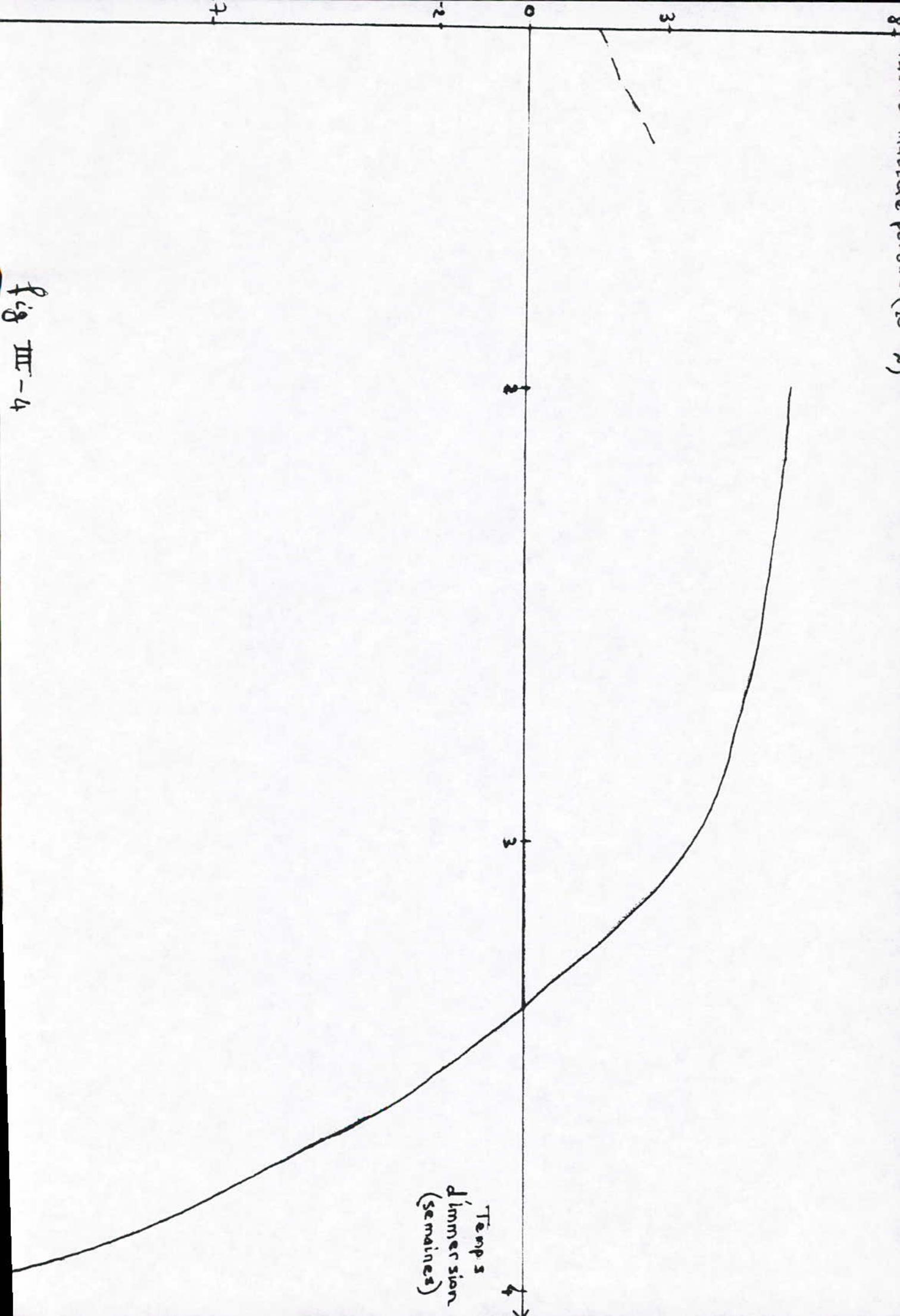


Fig III-4

Observation d'un échantillon traité au microscope
Electronique à balayage : [8]



Photo III-20 : Echantillon de 7075T6 anodisé et colmaté
observé au MEB (x ~~4.5~~.000)

La structure observée, obtenue après colmatage et qui n'a aucune ressemblance avec la structure obtenue après anodisation (fig.I-12) résulte en fait d'une transformation de phases et est appelée, à cause de son aspect, structure en "corn-flakes" [9]. Cette structure est beaucoup moins poreuse que la structure en "nid d'abeille" obtenue après anodisation, et est à l'origine du comportement protecteur de la couche d'oxyde créée.

Etude de perte de poids en fonction du temps d'oxydation :

Ces mesures de poids ont été faites pour différentes durées d'oxydation variant de cinq (05) à soixante-quinze (75) minutes.

Comme précédemment, pour éviter toute erreur due à l'hétérogénéité des poids des échantillons, nous avons relevé une différence relative, c'est-à-dire le même rapport que celui utilisé pour les deux courbes précédentes.

residue (152 g)

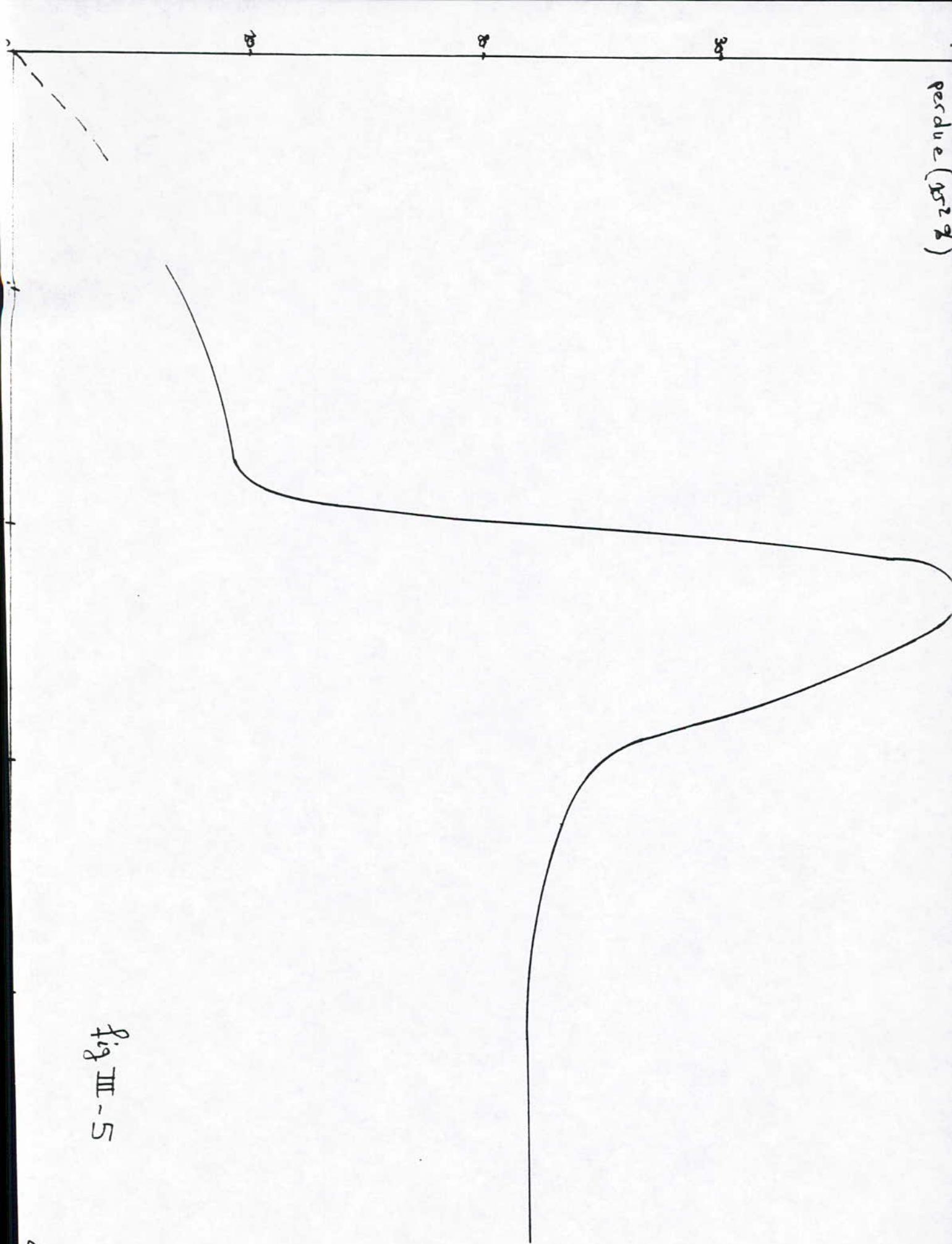


fig III - 5

Temps
d'oxydation (h)

Etude statistique de la piqûration des échantillons non-traités.

Cette étude a été faite à l'aide d'un microscope optique et de photos prises à cet effet.

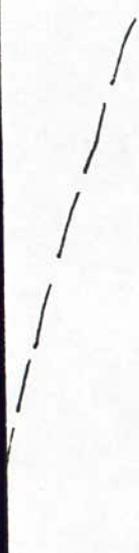
Il est évident que certaines régions sont un peu plus denses que d'autres, ce qui nous a obligé à prendre la moyenne arithmétique.

Le comptage du nombre de piqûres par unité de surface sur chaque échantillon non-traité issu des expériences précédentes nous a donné différentes valeurs que nous avons relevées sur des tableaux (Annexe II) et traduites par les deux courbes ci-dessous.

Il est à noter que les piqûres évoluent parfois de manière à en faire rejoindre plusieurs pour n'en former qu'une seule, ceci nous oblige à faire ces observations statistiques avec circonspection, car un petit nombre de piqûres ne veut pas nécessairement dire que la corrosion est moins importante. En effet, comme nous l'avons cité lors des observations micrographiques, certaines piqûres sont plus larges que d'autres et, bien qu'en diminuant la densité numérique, en augmentent le caractère agressif.

Nombre de piqures (mm⁻²)

*A



1

2

3

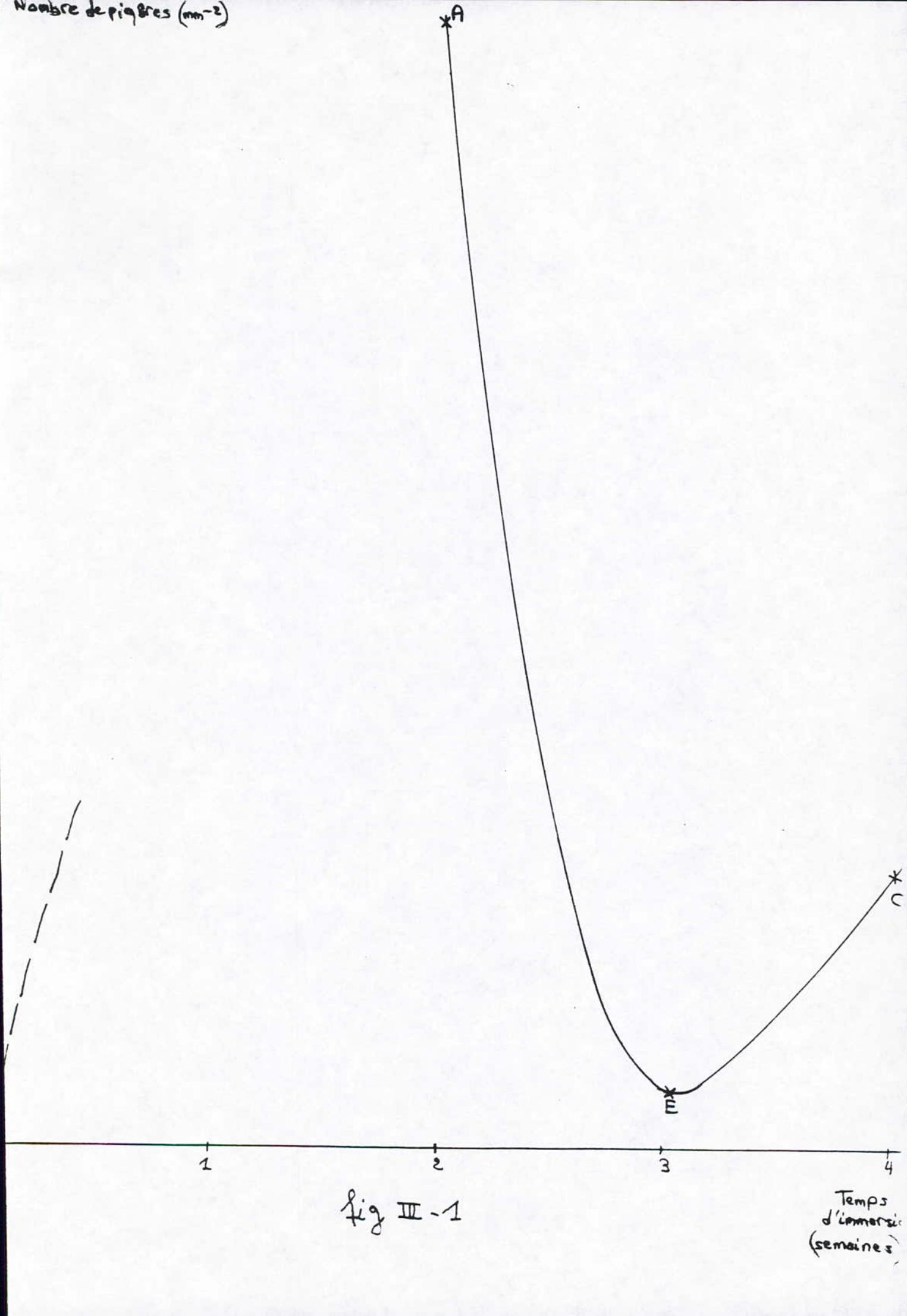
4

*B

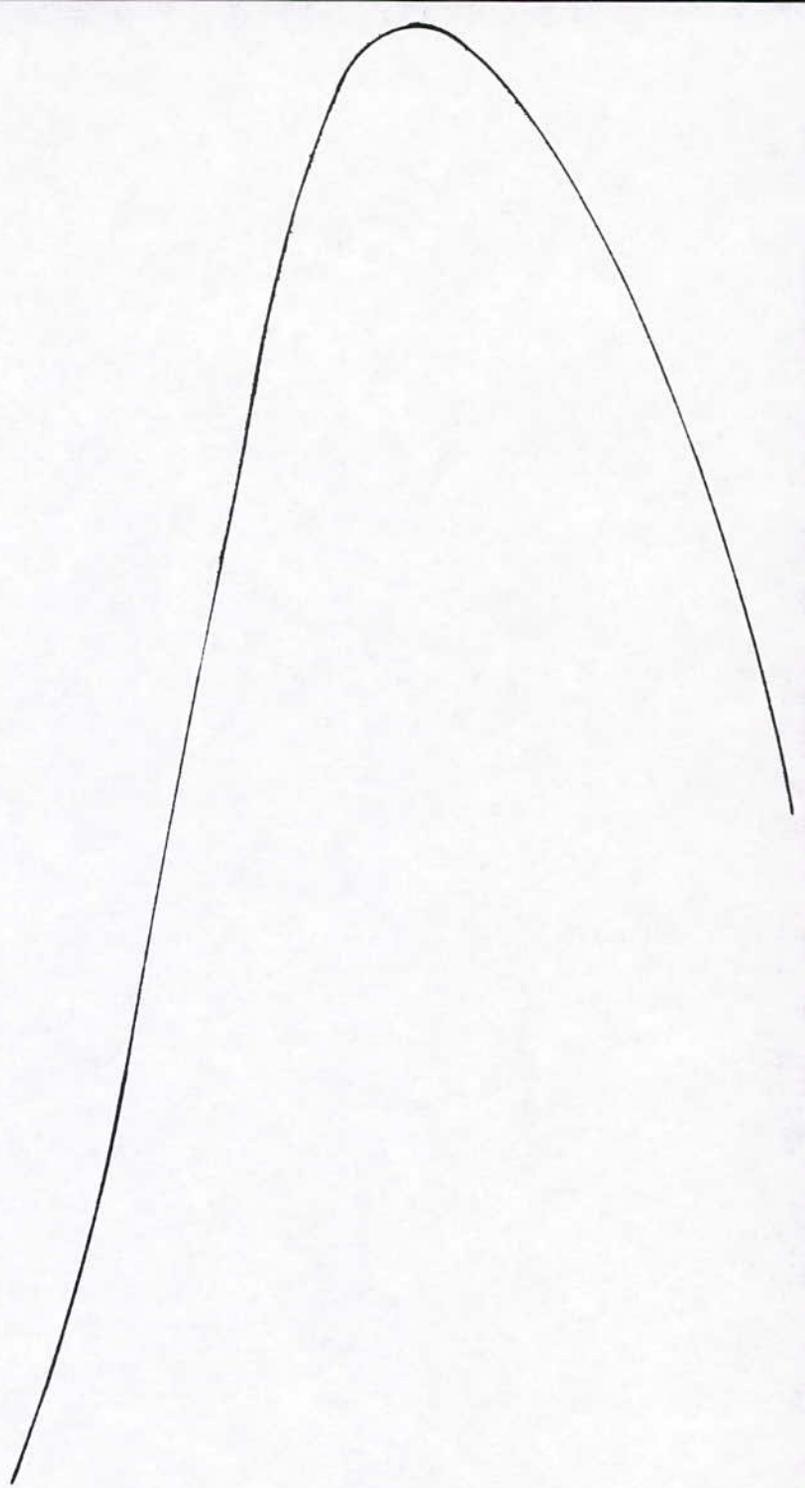
*C

fig III - 1

Temps d'immersion (semaines)



Nombre de piqûres (mm^{-2})



Temps
d'immersion
(semaines)

fig III-2

III-3 Interprétation des résultats expérimentaux

Figures de corrosion, densité de piqûration et variations de poids

Immersion dans l'eau industrielle :

En observant les photos successives des échantillons non-traités plongés dans cette solution d'eau industrielle pendant deux, trois puis quatre semaines, on remarque qu'il y a une évolution dans la figure de corrosion de la manière suivante :

- Des produits de corrosion noirâtres sont visibles d'abord à la surface. Les micrographies montrent qu'il y a une forte piqûration.

- Ensuite, c'est-à-dire après trois semaines, les produits de corrosion semblent disparaître pour ne laisser place qu'aux piqûres.

- Finalement, il y a réapparition de ces produits de corrosion de manière plus accentuée (couche plus noire) que lors de la première observation.

La facilité de piqûration des alliages d'Aluminium en présence de chlorures étant connue [2], nous avons envisagé, afin d'expliquer les photos et les courbes de densité de piqûres obtenues, le processus suivant :

a) Il y a d'abord piqûration excessive de la surface de l'échantillon, mais les piqûres ne sont pas profondes car la concentration en chlorures est relativement faible. Aussi, la densité de piqûres est-elle importante, à tel point que celles-ci, se rejoignant, arrivent à former un film continu. Les réactions intervenant alors sont celles

de la dissociation des ions Al^{+} et de leur recombinaison avec les ions Cl^{-} pour former $AlCl$, ainsi que celles de formation d' $Al(OH)$, d' Al_2O_3 et éventuellement d' HCl à partir de la dissociation ionique de l'eau : c'est ce qui explique la présence de la couche noirâtre.

b) Seulement, le système oxyde-acide n'est thermodynamiquement pas stable, aussi ce film se désagrège-t-il et disparaît de la surface, ne laissant apparaître que les piqûres qui se sont propagées à l'intérieur de la pièce.

c) Mais si l'on prolonge l'immersion, le même phénomène qu'au début se répète, c'est-à-dire multiplication des piqûres et recréation du film continu avec apparition des produits de corrosion.

C'est pour cette raison que la courbe montrant l'évolution de la densité de piqûres en fonction du temps d'immersion, à partir d'un point représentant un nombre important de piqûres (A), on observe une chute notable de cette densité (B), puis un regain d'activité par augmentation du taux de piqûration (C) (Cf. fig. III-1).

Il semble évident que si nous avons prolongé l'immersion, nous aurions eu répétition du même phénomène, c'est-à-dire disparition de la couche noirâtre, puis réapparition de celle-ci selon les processus précédemment cités.

Pertes de poids en fonction du temps d'immersion

On observe tout d'abord, sur la courbe donnant la perte de poids en fonction du temps d'immersion, une légère perte de poids (0,02 % soit un peu moins de 10 g) due à la

dissolution des ions Al . Suit alors un gain de poids correspondant à la période de destruction des produits de corrosion, mais ce gain étant de 0,24 % (soit environ 10 g), on peut envisager le cas où l'excédent de poids serait occasionné par la création de sels (par exemple AlCl et Al(OH)) à l'intérieur même des piqûres. La suite du processus, soit la création de nouveaux produits de corrosion et la dissolution de ceux qui avaient provoqué le gain de poids précédent, entraîne une légère perte de poids (1,3 % soit moins de 0,065 g). (Cf. fig. III-3).

Immersion dans l'eau doublement concentrée en chlorures

Les photos prises pour différentes durées d'immersion (deux, trois et quatre semaines) d'un échantillon non-traité montrent sensiblement la même figure de corrosion, c'est-à-dire une coloration noirâtre tendant à se foncer de plus en plus.

Il serait tentant d'expliquer ceci par une attaque superficielle de l'échantillon tendant à s'accroître en fonction de la durée d'immersion et restant totalement statique, mais l'expérience réalisée précédemment, c'est-à-dire l'immersion dans de l'eau industrielle, nous amène plutôt à penser que le processus de corrosion est identique au précédent, seulement, puisque l'agressivité de la solution est accrue à cause de la forte concentration en chlorures, les processus cités sont plus rapides et les échantillons observés étaient dans leur phase de création de produits de corrosion. Nous supposons que la phase de destruction de ces produits à la surface s'effectuait pendant les immersions successives.

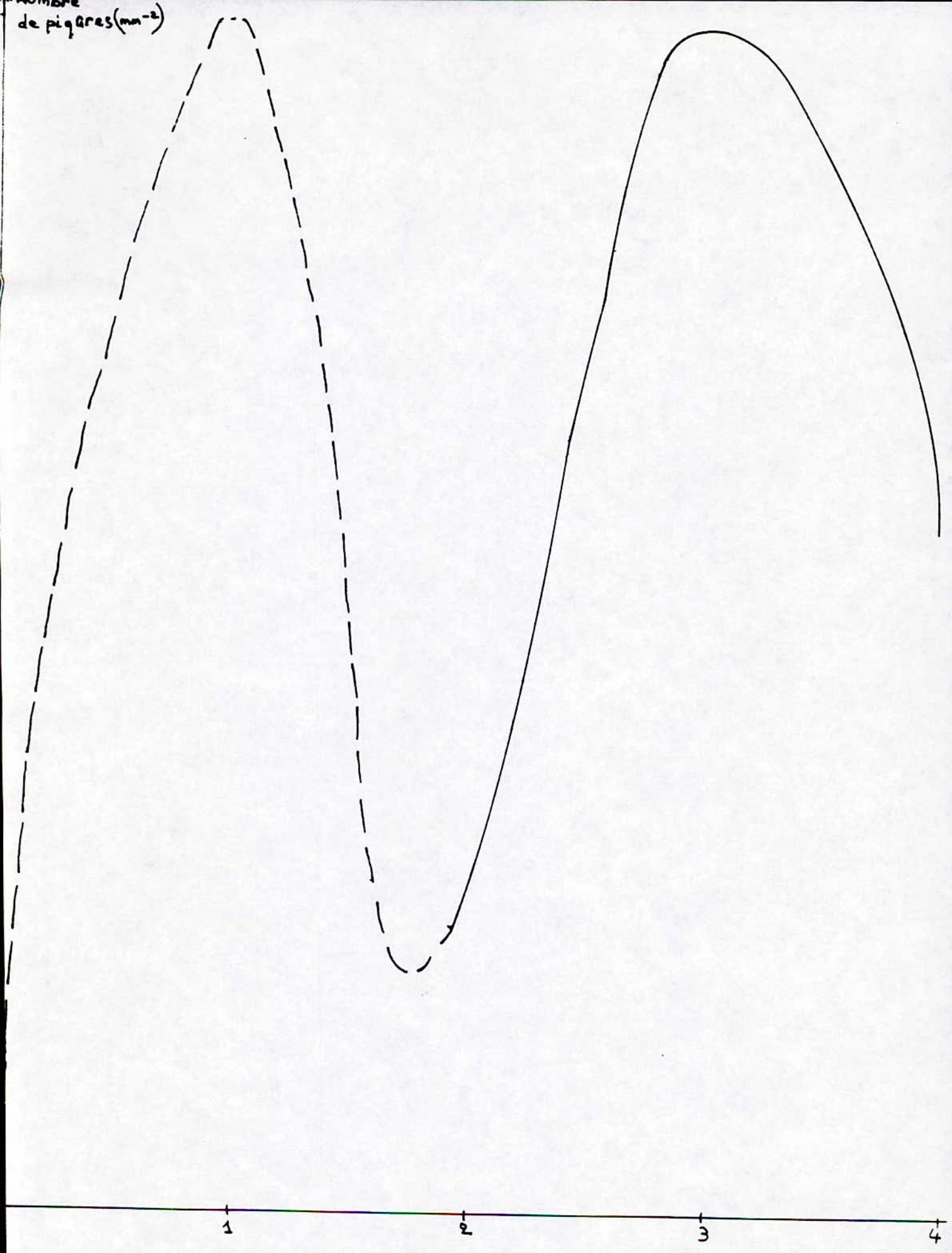
Quant à l'évolution de la densité de piqûration, elle augmente sensiblement entre les deuxième et troisième semaines d'immersion, et ceci à cause de l'activité croissante du milieu. Ensuite, par suite de la création d'une grande quantité de produits de corrosion, la piqûration semble diminuer ou alors les piqûres restent invisibles à l'oculaire du microscope (Cf. fig. III-2).

Il est intéressant de comparer les figures III-1 et III-2 car l'on peut supposer que la première est la courbe obtenue par la solution doublement concentrée en chlorures, mais pendant une durée d'immersion plus courte (par exemple entre quelque jours et deux semaines). Aussi, avons-nous relevé sur un graphe (Cf. fig. III-6) la courbe globale prévue, et ceci nous permettrait d'en déduire l'allure pour des durées d'immersion plus importantes.

Il est à noter que les traits en pointillés représente les portions de courbes proposées par nos soins.

Nous avons aussi remarqué que, les échantillons étant disposés horizontalement dans la cellule, leurs deux faces ne présentaient pas de manière tout à fait exacte le même faciès. En effet, la surface tournée vers le haut présente plus de produits de corrosion que celle tournée vers le bas, ce qui indique que la différence est simplement due à un dépôt et non à une attaque réelle. Nous pouvons décemment supposer que si les échantillons avaient été disposés verticalement, les deux faces auraient présentés exactement la même figure de corrosion, et les courbes de perte de poids en seraient transformées.

nombre
de piqûres (mm⁻²)



Temps
d'immersion
(semaines)

fig III-6

Perte de poids en fonction du temps d'immersion

La courbe représentative montre nettement une perte de poids qui diminue jusqu'à s'annuler, puis un gain de matière atteignant 0,12 % (soit un peu moins de 0,006 g) (Cf. fig III-4). Les pertes de poids constatées pour des immersions de deux et trois semaines sont probablement dues à la trop grande dissolution d'ions Al par rapport à la masse des produits de corrosion formés. Par contre, le gain de poids peut être la conséquence du phénomène inverse, c'est-à-dire que la masse des produits de corrosion est supérieure à celle perdue par dissolution des ions Al . Nous envisageons la possibilité que les oxydes et sels produits forment une barrière physique gênant le déplacement des ions Al .

Perte de poids en fonction du temps d'oxydation

Notre échantillon étant disposé en tant qu'anode dans le dispositif expérimental et bien que celui-ci soit conçu pour créer à sa surface une couche d'alumine, il est évident que l'on ne peut éviter la dissolution d'une certaine quantité d'ions Al^{3+} , quantité qui augmente régulièrement, comme le montre la courbe, pour atteindre un maximum à 0,25 %, puis diminue légèrement avant de se stabiliser vers 0,22 %. La diminution de la perte de poids peut être expliquée par un phénomène de recombinaison des ions Al^{3+} en atomes Al. (Cf. fig III-5)

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude effectuée dans le cadre de ce modeste travail a pu être menée à bien et à terme, et ceci malgré un manque sensible de temps dû à des circonstances indépendantes de notre volonté, et le peu de matériel disponible, ainsi nous n'avons pas pu relever les valeurs de microduretés car le microduromètre est momentanément hors d'état de fonctionner.

Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants, en effet nous avons fait plusieurs observations après différentes immersions dans des solutions dont nous avons fait varier successivement la durée et la concentration, ce qui a pu nous donner une idée de l'efficacité réelle de notre traitement.

Notre souhait serait de pouvoir effectuer d'autres essais d'immersion où nous en aurions prolongé la durée et utilisé d'autres concentrations. Nous aurions aussi voulu faire des essais de microdureté ainsi que des mesures de l'épaisseur de la couche d'oxyde, et ceci pour différentes durées d'oxydation.

Ce travail n'aura pas été vain s'il pouvait contribuer à la mise en oeuvre d'une installation d'anodisation dans l'acide sulfurique destinée au traitement de toutes les pièces à base d'Aluminium utilisées en aéronautique.

ANNEXE I

Données physico-chimiques relatives à l'Aluminium :

Numéro atomique : 13

Structure atomique : K -L8-M

Masse atomique : 27

Structure cristalline : cubique à faces centrées
(c.f.c.)

Rayon atomique : 0,14286 nm

Distance interatomique : 0,2858 nm

Valences principale 3, secondaire 1.

Masse volumique : 2,7 g/cm

Température de fusion : 660°C

Température d'ébullition : 2056°C

Pouvoir émissif de l'Aluminium nu : 5 (à 20°C)

Pouvoir émissif de l'Aluminium anodisé à 20°C à 10µm
de Couche d'oxyde : 79

ANNEXE II

Comptage des piqûres :

Echantillon plongé pendant	0 Semaines	2 Semaines	3 Semaines	4 Semaines
Nombre de piqûres par unité d'aire (mm ²)	0	300	15	75

Fig. A.1 Tableau relatif aux échantillons plongés dans la solution I

Echantillon Plongé Pendant	0 Semaines	2 Semaines	3 Semaines	4 Semaines
Nombre de piqûres (./mm ²)	0	60	225	130

Fig. A.2 Tableau relatif aux échantillons plongés dans la solution II

Perte relative de poids en fonction du temps d'immersion

Echantillon plongé pendant	0 Semaines	2 Semaines	3 Semaines	4 semaines
$\frac{D m}{m}$ (%)	0	0,02	- 0,24	0,013

Fig. A.3 : Tableau relatif aux échantillons plongés dans la solution I

Echantillon plongé pendant	0 Semaines	2 Semaines	3 Semaines	4 semaines
$\frac{D m}{m}$ (%)	0	0,057	0,037	- 0,12

Fig. A.3 : Tableau relatif aux échantillons plongés dans la solution II

Echan- tillons oxydé pendant	0 m n	15 mn	20 mn	27 mn	35 mn	45 mn	50 mn	75 mn
Dm/m (%)	0	0,070	0,085	0,096	0,400	0,250	0,220	0,220

Fig. A-5 : Perte relative de poids en fonction du temps d'oxydation

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : *Techniques de L'ingénieur
Métallurgie* 1990
- [2] : J. VARGEL
*Comportement de l'Aluminium et de
ses alliages* 1979
- [3] : *Metals Hand book
Vol. 9* 1985
- [4] : *Documents recueillis auprès de l'E. C. R. M. A.* 1983
- [5] : *Documents recueillis auprès de VERITAL* 1986
- [6] : G. EVANS
Corrosion des métaux 1967
- [7] : H. UHLIG
The corrosion Handbook 1985
- [8] : S. EL-MASHRI ; R. G. JONES ; A. FORTY
*An electron-yield EXAFS study of anodic-oxide
and hydrated-oxide films on pure aluminium
Philosophical Magazine A, Vol. 48, no. 5
665-683* 1983
- [9] : A. J. BOURDILLON ; S. M. EL MASHRI and A. J. FORTY
*Application of TEM extended electron energy loss
fine structure to the study of aluminium
oxide films
Philosophical Magazine A, Vol. 49, no. 3.
341-352* 1984
- [10] : J. BERNARD
Metallurgie générale 1984
- [11] : *Thèse de fin d'études : Baba Amar
Etude du durcissement par précipitation des
alliages Al-Si-Mg et Al-Zn-Mg.* 1989

- [12] : **E. GUILLET**
Diagrammes de phases en Métallurgie 1964
- [13] : **F. ORLOWSKI**
Comment vaincre la corrosion métallique 1973
- [14] : **I.N.S.A.**
La lutte contre la corrosion et l'usure 1983
- [15] : **J. MAURIN**
Manuel d'anti-corrosion 1964
- [16] : **Centre de Recherches d'Unieux**
Les problèmes industriels de corrosion 1975
- [17] : **P. LACOURCELLE**
Protection contre la corrosion 1976
- [18] : **K. AKIMOV**
Théorie et méthodes d'essai de la corrosion des métaux 1957
- [19] : **T. MILAZZO**
Electrochimie 1969
- [20] : **T. CHAMPION**
Corrosion testing procedures 1964
- [21] : **F. STRAFFORD**
Coatings and surface treatment for corrosion and wear resistance 1984
- [22] : **M. FONTANA**
Corrosion engineering 1988
- [23] : **HÖMIG**
Métal + eau 1966