REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

M aster

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Science Des Matériaux.

Thème

Etude du comportement à la corrosion de l'alliage AlMn1 utilisé dans les radiateurs d'automobile.

Proposé et Dirigé par :

M^{r} : Nacer ZAZI

Réalisé par:

Arab BENAKLI

Promotion 2010-2011

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

& *Remerciements*

Je remercie le Bon Dieu pour m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail et qui ma éclairé les chemins par la lumière de son immense savoir.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux personnels en particulier mon père et toute ma famille, qui grâce à leur aide, mon travail a vu le jour.

Je remercie profondément mon promoteur Monsieur N.ZAZI, d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ces conseils pertinentes qui mon données le courage et l'espoir d'être excellé dans le domaine.

Je remercie également Monsieur HALAL responsable de laboratoire de l'Ecole polyethnique d'Algie d'voire accepté notre présence au sein de son siège. Je tiens aussi à remercie les membres de laboratoire de Mécanique UMMTO (sciences des matériaux) pour leurs service et patience. Je remercie également l'équipe de copy fac d'être solidaire avec moi durant mon projet.

Je suis également reconnaissant aux personnels de la bibliothèque de Génie Mécanique pour leur aide

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner et de critiquer ce modeste travail.

Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de, près ou de loin, m'ont porté aide et encouragements. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

" Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence "

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes frères

Mes sœurs

Toute ma famille

Tous mes amis en particulier mes amis d'enfance.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sommaire **Page**

Introduction générale .....

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Introduction 01

I. Alliages d'aluminium 02

I.1 alliages de corroyage 02

Ø Alliage avec durcissement structural (alliage trempent) 02
Ø Alliage sans durcissement structural (alliages non trempent) 03

I.2. Alliage de fonderie (Moulage) 04

I.3. Alliages frités 05

II. Types des éléments d'addition 05

III. Alliage AlMn 06

IV. caractéristique de l'aluminium et ses alliages 07

IV.1. Légèreté 07

IV.2. Conductivité électrique et thermique 08

IV.3. Tenue à la corrosion 08

IV.4. Aptitude aux traitements de surface 08

IV.6. Recyclage 09

V. Corrosion de l'aluminium et ses alliages 09

Ø Potentiel d'équilibre 10
Ø Le potentiel de corrosion 10
Ø Séries galvaniques 10
Ø Paramètres influençant le potentiel d'une électrode 11

VI. Aspect thermodynamique et cinétique de la réaction électrochimique 14

Ø Aspect thermodynamique 14
Ø Aspect cinétique 14

VI. Les différents types de corrosion 14

VI.1. Corrosion uniforme 14

VI.2. Corrosion localisée 15

Ø Corrosion par piqûre 15
Ø Corrosion caverneuse 16
Ø Corrosion érosion 16

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø Corrosion érosion 17
Ø Corrosion feuilletante 18
VII. Techniques d'évaluation de la corrosion 19
VII.1.Techniques d'évaluation de la cinétique de la corrosion 19
VII-1.1 Evolution du potentiel au cours de temps 19
VII.2. Courbes de potentiodynamiques 20
VII.3. Mesure de la résistance à la polarisation aux cours de temps 21
Ø 1ère méthode de Stern 22
Ø 2ème méthode de Stern 23
XI. Rôle des éléments d'addition et leurs comportement en vis-à-vis de la corrosion 25
X. Prévention de la corrosion des alliages a base d'aluminium 27
Conclusion 28

Chapitre II : Radiateur de chauffage et le champ magnétique.

Partie 1 : Aperçu sur les radiateurs de chauffage d'automobile.

I. Radiateur 29
I.1. Le principe fonctionnement de radiateur 29
I.2.1. Refroidissement par air 30
I.2.2. Refroidissement par l'eau 31
Ø Circuit ouvert 32
Ø Circuit sous pression 32
III. Classification des échangeurs 35
IV. Calcul des échangeurs 35
Ø Efficacité d'un échangeur 35
V. Le fluide automobile 37
VI. Aperçu sur les inhibiteurs 38

Partie II : Le champ magnétique

I. Généralité sur le champ magnétique 39
II. Classification des milieux magnétiques et ses effets 40
II.1. Diamagnétique 40
II.2. Paramagnétisme 40
II.3. Ferromagnétisme 41
III. Propriétés magnétiques et son effet sur les matériaux 41
Conclusion 43

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre III : Techniques expérimentales.

Introduction 44

I. Préparation des échantillons 44

Ø L'extraction des tubes du radiateur 45

Ø Conception des échantillons 45

Ø Préparation des conducteurs 46

Ø Assemblage des échantillons et les conducteurs 46

II. Analyse microscopique des échantillons 47

II.1. Observation à l'aide de microscope optique 47

II.2. Observation à laide de microscope électronique à balayage (MEB) 48

Ø Avec polissage 49

Ø Sans polissage 49

III. Le champ magnétique et la forme de l'aiment 49

IV. Analyse électrochimique 49

IV.1. Evaluation de la corrosion libre en fonction de temps d'immersion 50

IV.2. tracer des courbes de la densité de courant en fonction du potentiel de corrosion 50

IV.2.1. Potentiostat 51

IV.2.2. La cellule électrochimique 52

III.2.3 Electrodes 53

Ø Electrode de référence 53

Ø Electrode auxiliaire 53

Ø Electrode de travail 54

V. Analyse des propriétés Mécaniques de l'alliage AlMn 56

V.1. Essai de dureté 56

V.2: Essai de traction 58

Conclusion 60

Chapitre IV : Résultats et discussions

I- Analyse Macroscopique et Microscopique de l'alliage AlMn1 61

I.1 Une analyse macroscopiques à l'œil et la loupe 61

I.2. Une analyse microscopique 63

II. Analyse de la corrosion de l'alliage AlMn1 par les techniques électrochimique 68

II. 1. Essai de la corrosion libre en fonction du temps d'immersion 68

Ø Le potentiel de la corrosion libre 68

Ø Le courant de la corrosion libre 70

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø Etude potentiostatique de la corrosion..... 70
Ø Résistance a la polarisation..... 71
Ø Analyse des courbes de polarisation..... 71
III. Caractérisation mécanique..... 72
Ø Essai de dureté..... 72
Ø Essai de traction..... 73

Conclusion générale.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Résumé :

Dans notre présente étude on va s'intéresser aux effets du champ magnétique permanant induit par les le bobinage du démarreur sur les propriétés physico-chimiques de l'alliage AlMn1 constituant les tubes de l'échangeur de chaleur d'automobile (radiateur). Les échantillons ont été prélevés dans les plusieurs endroits des tubes de radiateurs. Ce dernier à pour but de refroidir le liquide de refroidissement (eau ou gasoil) provenant du moteur d'une façon à lui évité l'échauffement trop important, mais le passage cyclique du liquide de refroidissement à travers les tubes du radiateur provoque la corrosion de l'alliage AlMn1.

Des éprouvettes de l'alliage AlMn1 ont été étudiées par l'analyse des courbes du potentiel de la corrosion libre en fonction du temps d'immersion et des courbes de l'intensité du courant de la corrosion libre en fonction du temps ainsi que la morphologie de la corrosion en présence et en absence de champ magnétique permanent. Les résultats montrent un comportement à la corrosion différent en présence et en absence du champ magnétique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre I

Généralités

Aluminium Et Ses Alliages

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Introduction

L'aluminium a été découvert en 1825. Cet élément métallique est le plus présenté à la surface de la terre. En tonnage, cependant, ses alliages arrivent en seconde position lorsqu'on parle de l'utilisation. La conductivité électrique (62 % de celle du cuivre) et thermique de ce matériau sont élevées. De plus, sa masse volumique est de 2,7 $g.cm^{-3}$ en fait un matériau Léger et de ce fait très intéressant, notamment pour des applications dans le secteur de l'aéronautique et industriel. Néanmoins, l'application de l'aluminium pur reste limitée en raison de ses propriétés mécaniques médiocres (par exemple, pour l'aluminium à 99,5 % : ($R_{p0.2}$ =10-20 MPa, R_m = 70-80 MPa, A % = 50-60 et E = 65-70 x 10_3 MPa). Ainsi, il apparaît intéressant et nécessaire de développer des alliages d'aluminium ; le choix des éléments d'additions se fait dans le but d'obtenir une amélioration de certaines caractéristiques par rapport aux propriétés de l'aluminium pur. [11]

Il existe de nombreux domaines d'applications pour ces alliages et de nombreuses nuances ont donc étés développées afin de satisfaire les caractéristiques requises.car la modification de la composition chimique d'un alliage dans le but d'améliorer une performance donnée s'accompagne souvent d'un changement de ses propriétés (physiques et chimiques). Il est alors essentiel d'adopter un compromis : par exemple, entre de bonnes propriétés mécaniques et une bonne résistance à la corrosion. Certains alliages utilisés dans le secteur industriel, répondent très bien aux exigences. Parmi eux on rencontre des alliages de la série 2000 et 3000. [2]

Dans la suite de ce chapitre, nous abordons quelques généralités sur l'aluminium et ses alliages et en particulier sur les alliages AlMn, utilisé pour la fabrication des échangeurs d'automobiles (radiateurs).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I. Alliages d'aluminium :

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Touts ces alliages sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes ensuite ils subissent des transformations mécaniques telle que le laminage, filage, profile et tube…).

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont, (Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu, **Al-Mn**). A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques qui offrent à l'alliage sa fiabilité. On distingue plusieurs classifications qui sont répartie en trois groupes distincts et en huit séries : [1]

Série	Alliage correspondant
1XXX	Aluminium pur (>99at%)
2XXX	Aluminium / Cuivre
3XXX	Aluminium / Manganèse
4XXX	Aluminium / Silicium
5XXX	Aluminium / Magnésium
6XXX	Aluminium / Magnésium / Silicium
7XXX	Aluminium / Zinc
8XXX	Autres alliages d'aluminium

Tableau I.1 : Dénomination des différents alliages d'aluminium. [2]

I.1 Alliages corroyés :

Destines à la forge et à laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres. Profilés, tubes, etc.), ces types d'alliage sont répartis en deux catégories :

Ø Alliage avec durcissement structural (alliage trempent) :

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand **Alfred Wilhr** dans le système Al-Cu-Mg. Il est très connu aujourd'hui pour plusieurs alliages. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau. Par la mise en solution, avec trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante. La Figure I.1 montre ce mode de traitement [3] :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

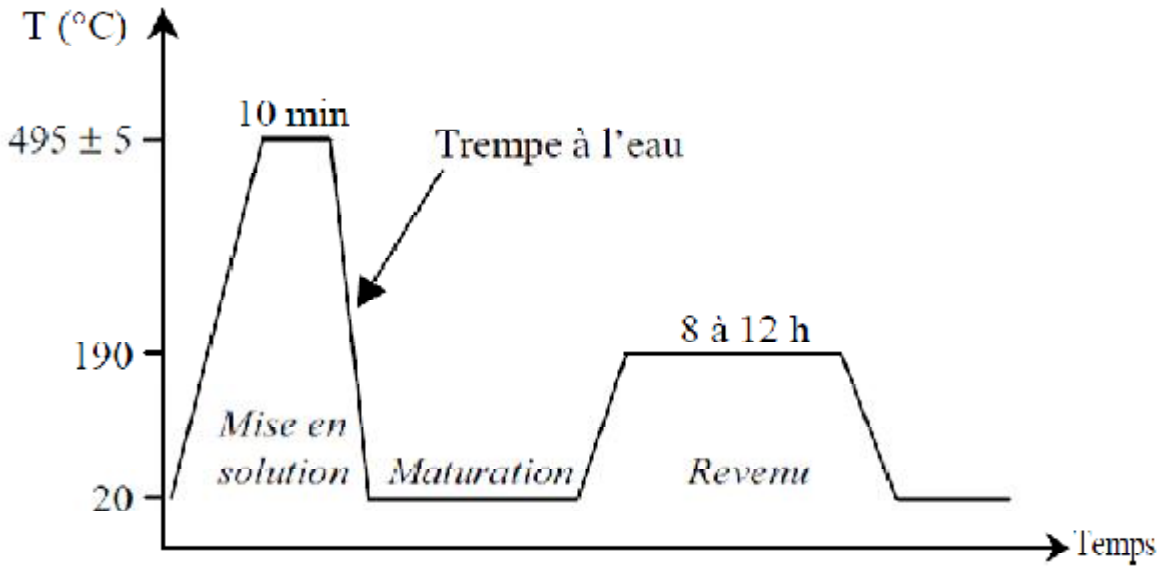


Figure I.1: Traitement thermique des alliages à durcissements structurels (2024).

1) Les alliages **Al-Cu** de la série 2000 sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu. Ils présentent une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faibles à cause de la teneur élevée en Cu, à cet effet ces types d'alliages sont toujours sous forme de plaque.

2) Les alliages **Al-Si-Mg** de la série 6000 sont les alliages de filage par excellence, ils présentent par ailleurs, une résistance mécanique moyenne et une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants à la corrosion.

3) Les alliages **Al-Zn et avec ajout de Mg** de la série 7000 qui possèdent une haute résistance mécanique et une bonne tenue à la fatigue et à la corrosion. Ces nuances sont largement employées en aéronautique et en armement. [2]

Ø Alliage sans durcissement structural (alliages non trempent) :

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que (**Al-Mn**, AI-Mg, Al-Mg-Mn) (alliages de forge et d'estampage). Leur durcissement naturel est du a la formation d'une solution solide et dans une moindre mesure aux phases en excès. Leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques sont données sur le tableau I.2:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Nuance	Composition chimique (%)		Propriétés mécaniques		
	Mn	Mg	R (kgf/mm²)	R 0,002 (kgf/mm²)	A (%)
AMII	1,0 à 1,6	-	13 (17)	5 (13)	23 (10)
AMr2	0,2 à 0,6	1,8 à 2,8	20 (25)	10 (20)	23 (10)
AMr3	0,3 à 0,6	3,2 à 3,8	22	11	20
AMr5	0,3 à 0,6	4,8 à 5,8	30	15	20
AMr6	0,5 à 0,8	5,8 à 6,8	30 (40)	15 (30)	18 (10)

Tableau I.2. : Alliages avec durcissement structural. [2].

Ces types d'alliages se comportent bien au soudage et possèdent une tenue à la corrosion élevée. La limite élastique et la résistance à la traction augmentent et l'allongement diminue. Au delà de la température de 150°C, le long séjour conduit à la diminution de la résistance. Un recuit de recristallisation entre 350 à 450°C peut produire un retour à l'état doux. Pour obtenir une structure à grains fins lors de la recristallisation, il exige au préalable une déformation allant jusqu'à 50 %. Leur usinage à l'état recuit est très difficile.

La figure I.2 rassemble les huit familles d'alliages d'aluminium regroupées dans deux catégories. [1]

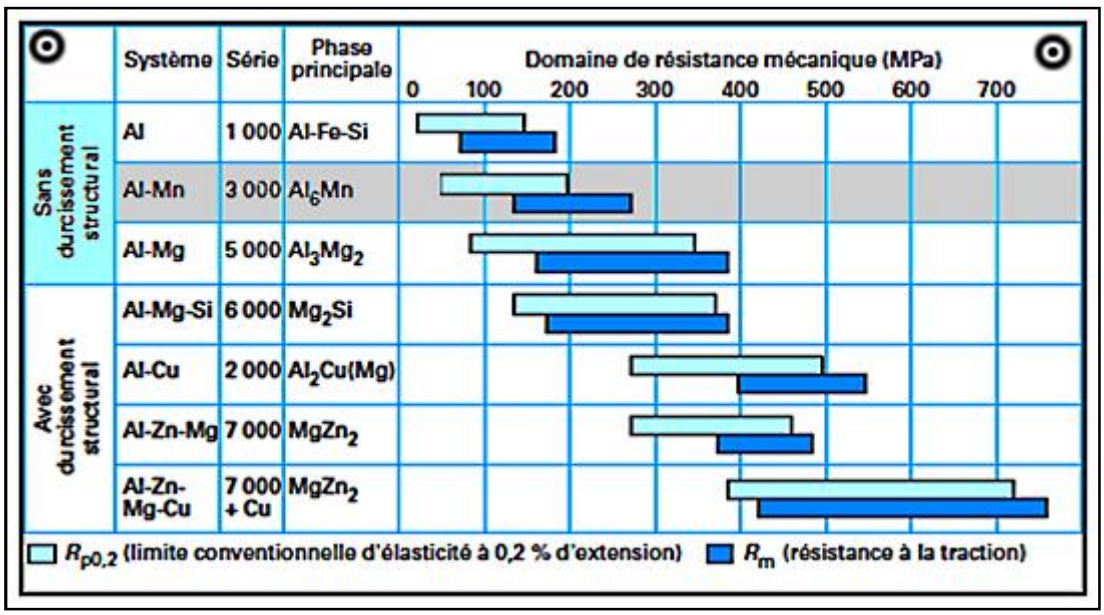


Figure I.2 : Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés. [7]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I.2. Alliage de fonderie (Moulage):

Une grande partie des besoins en aluminium sont utilisée comme pièce de fonderie. La matière première utilisée pour l'obtention des alliages d'aluminium de fonderie le plus souvent est la matière secondaire telle que déchets, rebuts d'aluminium, etc.

Dans certains pays, elle est basée sur 70 % de la production. Avant, on utilisait comme alliages d'aluminium de fonderie, les alliages d'aluminium avec des teneurs élevées en Cu ou Zn, alors qu'aujourd'hui, l'alliage le plus utilise est Al-Si avec des additions en magnésium et cuivre. Les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud, un faible taux de porosité, de bonnes propriétés mécaniques et une résistance élevée à la corrosion. [1]
Les qualités de l'alliage de fonderie sont résumées dans le tableau I.3 :

Qualités	Aptitudes
Coulabilité	Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte
Absence de déformation criques	Fissuration à chaud causée par le retrait du métal
Bonne répartition de la porosité	Due au retrait qui accompagne la solidification
Température de fusion relativement basse	Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression

Tableau I.3 : Les qualités des alliages de fonderie. [8]

I.3. Alliages frités :

Elaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

II. Types des éléments d'addition :

Les éléments d'additions sont rajoutés avec des proportions variables dans la composition d'aluminium de corroyage et de moulage. On peut distingue trois catégorie distinctes :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Les éléments d'addition majeur se résumant dans le cuivre, magnésium, manganèse, silicium et le zinc et dans la teneur peut dépasser un pourcentage important.
- Eléments d'additions mineurs dont leurs teneur dépasse rarement 1%, couramment il se intercale entre 0,1 à 0,3% comme : le chrome, le fer, le nickel et le cobalt.
- Eléments d'addition très spéciaux réservés d'usage particulier. Ces éléments se trouve généralement à des proportions inférieurs à 0,5%, parmi : le béryllium, l'argent… [1]

III. Alliage AlMn:

La teneur en manganèse s'intercale 1,0 à 1,6 %. La résistance à la traction est supérieure que celle de L'aluminium pur, malgré que les propriétés de déformation sont identiques. Le tenu à la corrosion est aussi meilleur que celle de l'aluminium pur. Une meilleure usinabilité peut être obtenue grâce à l'addition de magnésium (0,2 à 0,3) %, de titane ou de chrome. Le manganèse augmente aussi la température de recristallisation, l'addition d'une faible teneur en **Mn** permet d'augmenter nettement la résistance mécanique. L'alliage Al-Mn est une solution solide de manganèse dans l'aluminium qui comporte également une faible quantité de particules de la combinaison entre Al et Mn, voir diagramme d'équilibre partiel Al-Mn, (Figure I.3). [2].

Ils sont utilisés pour les toitures, coffrages, revêtements, réservoirs, ustensiles, cuisine et dans le domaine d'automobile, etc. le tableau suivant montre les Caractéristiques pour les deux nuances 3003 et 3004 à l'état recuit.

Nuances	Composition	R_m(MPa)	A(%)
A-MI 3003	(1à 1,5)% Mn (0,05à0,2) % Cu	100-130	25%
A-MIG 3004	(1 à 1,5)% Mn <0,25% Cu	120à 160	22%

Tableau I.4: Caractéristique des deux Nuance (3003 et 3004). [1]

Ces deux nuances représente un grand potentiel dans le domaine industriel, avec l'addition de l'ordre de 1% de manganèse peut augmenter sensiblement les caractéristiques mécanique et surtout il procure une meilleur protection en vis-à-vis de la corrosion par la formation des précipites. Ce diagramme d'équilibre suivant montre la formation des ceci solution intermétalliques .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

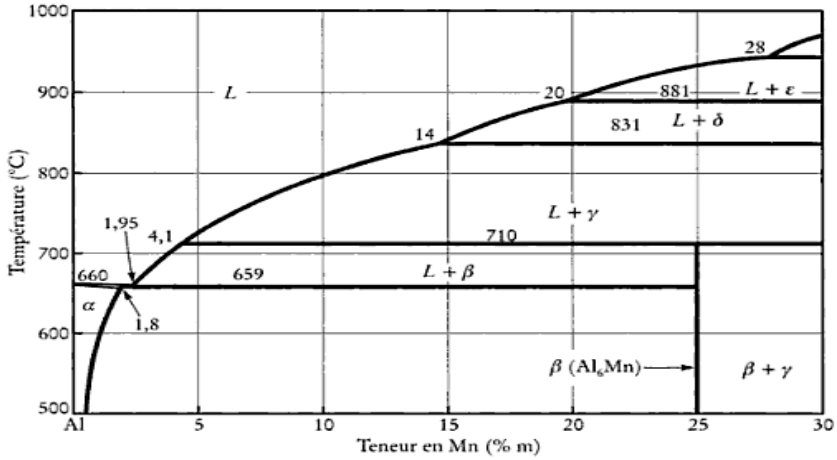


Figure I.3: diagramme d'équilibre Al-Mn.

Sur le diagramme ci-dessus on constate que les alliages **AlMn** présentent un domaine de solution solide **α**, dont l'étendue croit avec la température. Cette solution homogène où les atomes de manganèse sont répartis au hasard dans le réseau d'aluminium. Sur le diagramme on remarque l'appariation des phases intermétallique **(α, β et γ).** [6]

Le Manganèse se combine avec l'aluminium pour former un composé intermétallique Al_6Mn par germination préalable avec des teneurs en Mn inférieur à 1,5%, engendre une dispersion de cette phase dans la matrice sous forme d'Al- Al_6Mn qui a pour effet d'augmenter la température de recristallisation et une meilleure résistance à la corrosion. Mais son aptitude à la déformation plastique diminue légèrement. [13]

IV. caractéristique de l'aluminium et ses alliages:

IV.1. Légèreté:

L'aluminium est léger et de plus présente des caractéristiques mécaniques très élevées. Il constitue de ce fait 80% du poids des avions actuels. Il est très utilisé aussi dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'industrie d'automobile. Bien que, en tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de 2% de celles des aciers, ce métal et ses dérives arrivent en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'expérience montre que l'allégement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

IV.2. Conductivité électrique et thermique:

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus dans les lignes à haute tension.

L'aluminium présente une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre et un fort pouvoir caloporteur. Ceci explique sa présence dans les dispositifs de refroidissements comme les radiateurs d'automobiles (les tubes et intercalaires).

IV.3. Tenue à la corrosion:

L'aluminium et les alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain et industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics (Grande Arche de la Défense, Pyramide du Louvre…) que pour les habitations individuelles. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de traitements de la surface, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité lui a permis le développement et l'utilisation de l'aluminium dans plusieurs domaines. Les utilisateurs disposent ainsi:

- D'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare en effet de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de ports de plaisance, des bateaux…, vieux de plusieurs décennies.
- D'un entretien facilité, même sans protection ad hoc (ni peint, ni anodisé).
- D'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture.

IV.4. Aptitude aux traitements de surface:

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

- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante,
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement,
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle,
- La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire.

IV.5. Diversité des alliages d'aluminium:

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisations. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ainsi le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal (2000 pour le Cu, 3000 pour le Mn, 4000 pour le Si, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si, 7000 pour le Zn).

D'une famille à une autre les propriétés caractéristiques sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables résistants à la corrosion tandis que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique. Les alliages de la série 3000, se caractérisent par:

- une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium,
- une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage,
- une excellente résistance à la corrosion dans des conditions normales d'utilisation.

IV.6. Recyclage:

L'aluminium l'un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusions de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai. L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des « vieux métaux » montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles. [4]

V. Corrosion de l'aluminium et ses alliages :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement métallique avec l'environnement qui l'entour l'entraine une dégradation du matériau et de ses propretés :

Réaction anodique : c'est une réaction d'oxydation induisant la dissolution du métal ou la formation d'oxyde ou d'hydroxyde du métal.

Réaction cathodique: c'est une réaction de réduction du moteur de la corrosion.

- Réaction d'oxydation

$M \rightarrow M^{-z} + ze^-$ Réaction d'oxydation, pole (-), avec perte d'électrons

- Réaction de réduction

$X + ze^- \rightarrow X^{ze-}$ Réaction réduction, pole (+), avec gain d'électrons

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ces deux réactions se produisent simultanément de sorte que le courant électrique total est en apparence nul, Il est nommé courant de corrosion.

Lorsqu'un métal de valence **n** est plongé dans un milieu conducteur des ions M^{n+} passent dans la solution tandis que dans le métal apparaissent des charges négatives. Le passage des ions $\mathbf{M^{n+}}$ est limite dans le temps car pour quitter le métal ces ions doivent vaincre la répulsion des ions qui sont déjà dans la solution et l'attraction des électrons en excès qui sont chargés négativement. Le potentiel pris par le métal par rapport à la solution tend donc vers une valeur stationnaire appelée potentiel d'électrode.

- **potentiel d'équilibre:**

Est un potentiel à courant nul. C'est le potentiel que prend un métal par rapport à la solution dont s'accompagne un équilibre chimique et thermodynamique. Ceci est caractérisé par la relation de **Nernst** :

$$E=E°+(RT/nF)\log([Ox]/[Red])$$

Avec:

E**: le** potentiel à une température donnée

*E°***:**le potentiel standard

R**:** constante d'équilibre (8,314j/K.mol**)**

*F***:** constante de Faraday (9650OO)

Ox/Red**:** l'activité des ions M^{n+}

- **Le potentiel de corrosion:**

Est le potentiel que prend un métal ou un alliage par rapport à un électrolyte donné. Celui-ci dépend des conditions de travail est mesurée par rapport a une électrode de référence.

Électrodes de références :

L'électrode de référence dont la tension est choisie égale dans les conditions standards est l'électrode de référence à hydrogène. Les électrodes de référence la plus utilisées sont l'électrode à calomel sature au KCl (E.C.S ou S.C.E en version anglo-saxonne) et l'électrode d'argent.

- **Série galvanique:**

Il peut être établi une classification des éléments en fonction de la valeur du potentiel standard par rapport au potentiel standard de l'hydrogène qui est prie égal à zéro, on parle alors de **série galvanique ou échelle galvanique.**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø **Paramètres influençant le potentiel d'une électrode:**

La composition chimique, la structure cristallographique, l'histoire thermomécanique, la technique d'élaboration du matériau et le milieu physico-chimique (tels que le pH, le champ magnétique et l'agitation mécanique ou /et thermique) ont une influence considérable sur la morphologie et la cinétique de la corrosion. [5]

La stabilité de la surface de l'aluminium, en fonction du pH de milieu (par exemple), peut être extraite du diagramme E-pH, également nommé diagramme de **Pourbaix :**

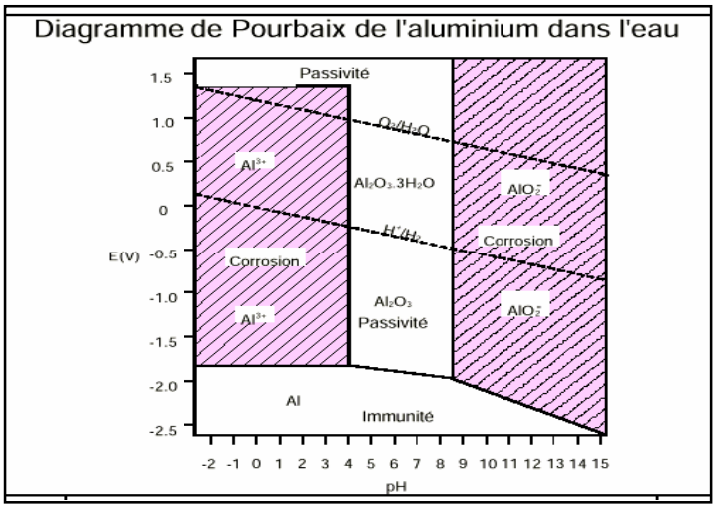


Figure I.4 : Diagramme de Pourbaix. [4]

Le diagramme E – pH de l'aluminium illustre bien la propriété amphotère du métal : il est attaqué en milieu acide et en milieu alcalin. Le diagramme de **Pourbaix** de l'aluminium est constitué de 4 domaines correspondant à trois états distincts :

Ø **corrosion**, s'il existe un produit de corrosion soluble,

Ø **passivation**, si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble,

Ø **immunité**, s'il est dans des conditions pour lesquelles il ne peut pas être corrodé (la concentration des ions M^{n+} est < 10^{-6}M).

Dans les solutions aqueuses neutres (4 < pH < 9), un film d'oxyde d'une épaisseur de 50 Å protège le métal (passivation). L'aluminium n'est corrodé de manière homogène que dans une solution très acide, avec formation d'$Al^{3+,}$ ou dans une solution alcaline, avec formation d'aluminates (AlO^{2-}). La résistance et la stabilité de la couche d'oxyde dépendent du milieu ambiant, de la composition de l'alliage et de la structure microscopique du métal (en fonction des traitements thermiques appliqués).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Le comportement électrochimique de l'aluminium est influencé par le film d'oxyde naturel qui régit la tenue à la corrosion de l'aluminium. Ainsi le potentiel qu'on mesure sur l'aluminium n'est pas celui du métal, mais un potentiel mixte entre le film d'oxyde et le métal. L'aluminium ne se corrode pas d'une manière spécifique, mais sous diverses formes suivant des facteurs inhérents au métal (éléments d'alliages) et au milieu. [4]

Exemple d'application : *Comment l'aluminium se corrode dans un milieu aqueux, et comment évaluer les pertes de masse lors de sa corrosion?*

Dés que l'aluminium entre en contacte avec une solution aqueuse celui-ci va s'oxyder de la manière suivante :

$$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e^-$$

Les électrons libérés vont entrer simultanément au contacte avec la solution dont le PH est voisin de la neutralité (eau douce, eau de mer, humidité de l'atmosphère…). Selon les conditions thermodynamiques les deux réactions de réduction possibles sont :

- **Réduction d'ions hydrogène (H^+) selon la réaction suivante:**

$$3H^+ + 3e^- \longrightarrow (3/2)\uparrow H_2$$

- **Réduction de l'oxygène O_2 selon les réactions suivantes :**

  - En milieu alcalin ou neutre : $0_2 + 2H_20 + 4e^- \longrightarrow 4\ 0H^-$
  - En milieu acide : $0_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2\ H_20$

La corrosion de l'aluminium va se traduire par la somme de deux réactions électrochimique définies préalablement

$$\begin{cases} Al + 3H_20 \longrightarrow Al\,(0H)_3 + 3/2\uparrow H_2 \\ \text{Ou bien} \\ Al + 3H^+ \longrightarrow Al^{+3} + 3/2\uparrow H_2 \end{cases}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Toutes les réactions électrochimiques dans un système donné se traduisent par des courants électriques sensibles aux différences de potentiel entre les deux phases métal-solution. La cinétique des réactions électrochimiques anodiques et cathodiques est représentée dans les figures (I.5, I.6) qui montrent la l'évolution de potentiel (e) en fonction de l'intensité de courant (i).

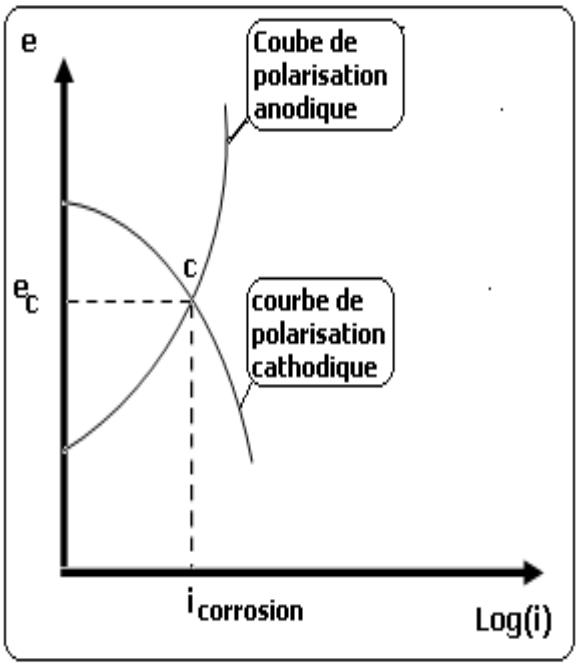


Figure I.5 : Courbes de polarisation.

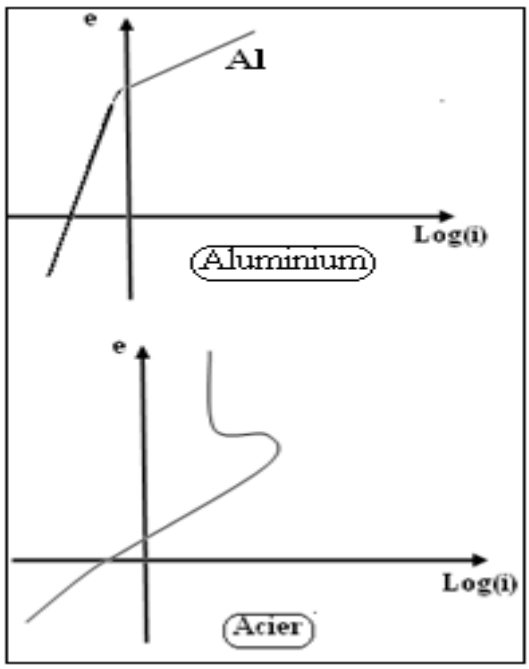


Figure I.6 : Exemple des courbes de Polarisation pour l'acier et aluminium.

Cette interprétation reste valable si la corrosion est uniforme **Faraday** montre pour des intensités données des pertes de masse ont été envisagées. La relation ci-dessous estime la grandeur de la masse évadée. [3]

$$m = k\frac{A}{n}i(t)$$

Où :

m : La masse perdue

n : La valence (3 pour Al)

i : L'intensité (ampère)

K : Constante

A : Nombre atomique

t : Temps en (s).

Donc les pertes de masse dans une réaction électrochimique restent proportionnelles à l'intensité de courant.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

VI. Aspect thermodynamique et cinétique de la réaction électrochimique:

L'électrochimique est une discipline qui étudié la relation entre transformation chimique et passage de courant. Plusieurs aspects qui intervient caractériser une réaction électrochimique parmi eux on trouve:

Ø Aspect thermodynamique:

L'équilibre entre les phases pour un système donné peut être établi à partir de deux variables thermodynamique: l'enthalpie libre d'un système, ou le potentiel chimique des espèces produit lors d'une réaction électrochimique relié par la relation **($G=\sum n_k \mu_k$),** qui permet de quantifier la contribution de chaque espèce à l'enthalpie libre global. Plusieurs facteurs peuvent perturber le potentiel d'un système comme: la température, pression et le PH d'un milieu. Des modèles évoquent l'évolution de ce processus tels que: le modèle de Helmholtz et Gouy-chaman et le modèle de Sterne. Cependant la thermodynamique d'un système nous permet de prévoir dans quel sens évaluer le système et quelle sera sa composition dans l'état d'équilibre final.

Ø Aspect cinétique:

La cinétique d'une réaction électrochimique, nous renseigne sur l'évolution de la réaction et sa vitesse. Arrhenius a annoncé que l'énergie d'activation d'un système influent directement sur la vitesse de la réaction car cette dernière reste proportionnelle à la nature et à la concentration dans laquelle s'établie un échange de charge avec la phase solide. [9]

VI. Les différents types de corrosion:

VI.1. Corrosion uniforme:

La corrosion uniforme se manifeste avec la même vitesse en tous points du métal entrainant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement). Mais la corrosion uniforme se progresse pour former un oxyde homogène sur toute la surface. [5]

Lorsque le pH s'écarte en effet du voisinage immédiat de la neutralité ($4 < pH < 9$), la corrosion uniforme se traduit par une attaque rapide. Il existe, naturellement, un certain nombre d'exceptions à cette règle. L'aluminium peut ainsi se passiver en milieu acide si le pouvoir oxydant du milieu est très élevé (Par exemple, l'acide nitrique). De même, l'aluminium et ses alliages peuvent résister en milieux alcalins grâce à certains effets d'inhibition (par exemple, l'ammoniaque concentrée, les bases organiques faibles, les silicates, le béton). Dans les milieux neutres, la vitesse de corrosion uniforme des alliages d'aluminium passifs est certes très réduite, mais elle n'est néanmoins jamais totalement nulle.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

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 vers un aspect inesthétique du à une variation de la rugosité.

VI.2. Corrosion localisée:

La corrosion localisée est liée à la pression du moteur de la corrosion dans les différentes positions de la surface, à la distribution des éléments chimiques à la surface, à la présence des halogénures dans la solution et à la rugosité de la surface.

Ø Corrosion par piqûre:

La corrosion par piqûre se développe dans tous les milieux naturels, sous forme de cavités de profondeurs variables. Les conditions d'initiation et de propagation de la piqûration sont bien connues, même si il s'agit d'un phénomène très complexe, dont le mécanisme n'est pas totalement déterminé. La figure I.7 montre la propagation de ce phénomène dans un milieu aqueux (l'eau de mer). [7]

L'aluminium est sensible à la corrosion par piqûres dans les milieux dont le PH est voisin de la neutralité, c'est-à-dire en fait dans tous les milieux naturels : eaux de surface, eau de mer, humidité de l'air. [4]

Elle se produit quand le métal est mis en contact permanent ou intermittent avec un milieu aqueux : eau, eau de mer, pluie, humidité, etc. L'expérience montre que s'il y a corrosion par piqûres, elle se produit toujours dans les premières semaines de mise en service.

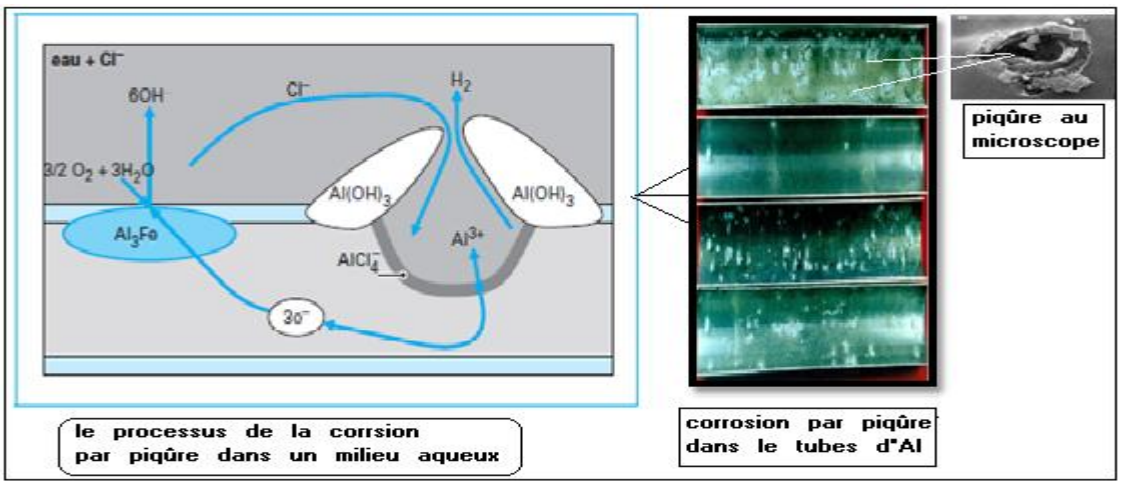


Figure I.7 : Propagation auto-catalytique des piqûres. [7]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø Corrosion caverneuse:

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûres. L'acidification du milieu corrosif emprisonné dans une caverne interdit en effet, dans ce cas, la répartition homogène des piqûres est concentrée, ainsi en un seul point la pénétration de la corrosion. Les alliages dénués de cuivre sont en pratique relativement assez résistants à cette forme de corrosion. Là encore, l'anodisation préalable des pièces permet souvent d'assurer une résistance à la corrosion satisfaisante (par exemple, visserie, boulonnerie).

Ø Corrosion érosion:

La corrosion par érosion se produit à la surface de contact entre un fluide en mouvement et une conduite. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientés dans une même direction. La figure I.8 illustre le mécanisme de formation des creux par érosion :

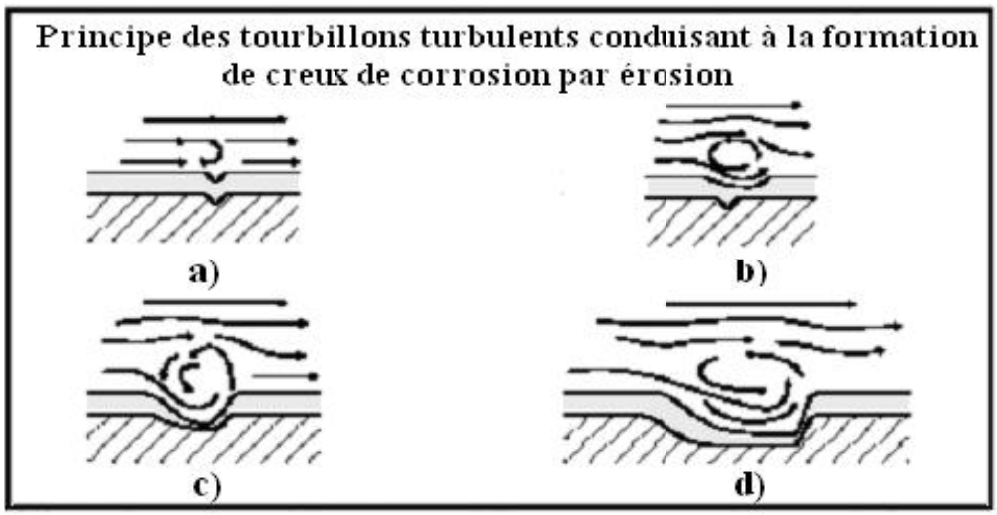


Figure I.8 : Principe des tourbillons turbulents conduisant à la formation de creux. [4]

Ce type de corrosion étroitement liée à l'hydrodynamique du fluide peut être rencontré dans le cas des circuits de chauffage ou de refroidissement. Le meilleur moyen de luttes contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes et l'addition d'un inhibiteur de la corrosion. On remarque la formation et l'accumulation des divers dépôts qui provient de fluide qu'est en mouvement qui peut entrainer un arrachement

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

de matière à la surface (érosion), ou bien une rugosité pouvant induire une corrosion par crevasse. La figure I.9 illustre cette interprétation:

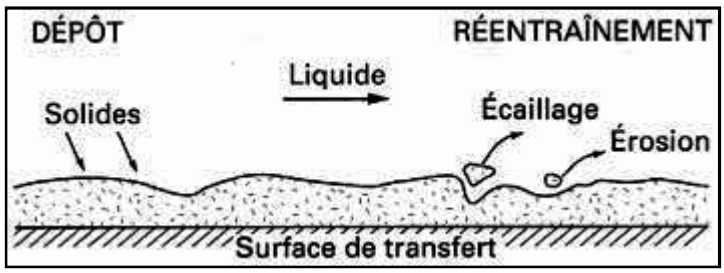


Figure I.9: Action de fluide sur la surface d'un métal. [16]

Ø Corrosion galvanique:

Pour chaque solution, il est possible d'établir une « série galvanique » (classement des différents métaux et alliages en fonction de leur potentiel standard.

La figure I.11 présente une classification des métaux et de quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer (les métaux sont classés ici par ordre croissant d'activité). Le matériau de potentiel le plus bas d'un assemblage galvanique est une anode, l'autre est une cathode. L'aluminium étant anodique par rapport à la plupart des métaux usuels, il est habituellement la victime dans des assemblages mixtes.

Néanmoins comme souligné auparavant, même si l'aluminium est dans une position défavorable dans l'échelle galvanique, il se rencontre le plus souvent recouvert d'un film passif, ce qui l'anoblit considérablement et le rend beaucoup moins sensible au bimétallisme.[16]

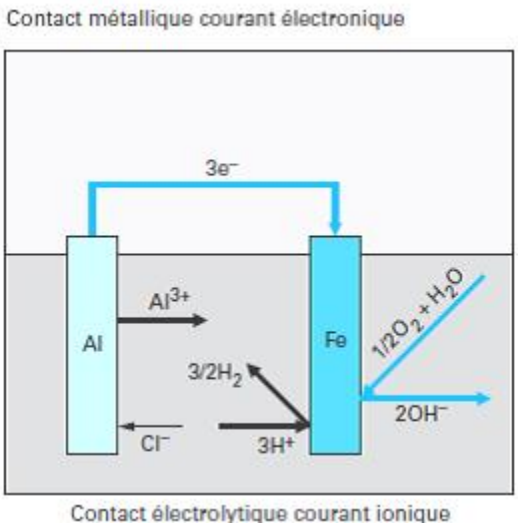


Figure I.10: Corrosion galvanique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

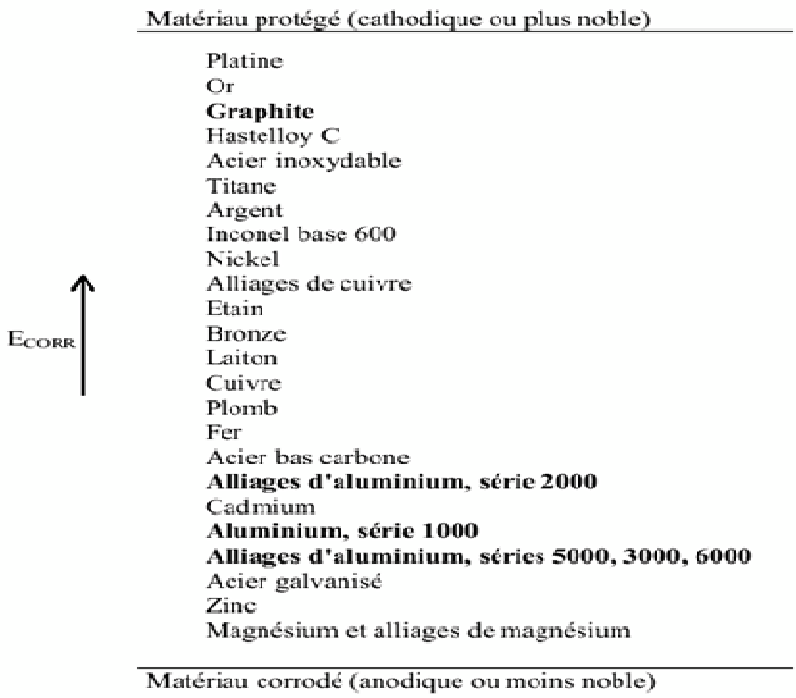


Figure I.11: Série galvanique. [7]

Ø Corrosion feuilletante:

La corrosion feuilletant (ou exfoliante) comme la corrosion inter granulaire est une conséquence du traitement thermomécanique préalable des pièces. Seuls les alliages à haute caractéristiques mécaniques sont concernés : ces phénomènes sont liés à la structure métallurgique particulière des alliages laminés. Cette forme de corrosion qui affecte seulement quelques alliages (ceux des séries 2000, **3000**, 5000 et 7000) se développe si les conditions de traitements thermiques ou de soudage sont mal adaptées. La corrosion feuilletante de l'alliage AlMn1 est caractérisée par une déformation locale de feuillets métalliques et fait apparaître des cloques à la surface du matériau. Il s'agit d'une attaque qui se propage généralement de façon inter-granulaire selon des plans Parallèles aux surfaces, séparées par de fins feuillets métalliques. Le déchaussement des grains est dû aux produits de corrosion formés, qui sont plus volumineux que les espèces initialement non corrodées. Le mécanisme de propagation est généralement assimilé à une corrosion inter granulaire, dirigé préférentiellement par les contraintes exercées par les produits de corrosion. Dans certains cas, la propagation est de type transgranulaire la figure I.12 illustre ce processus. [4]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

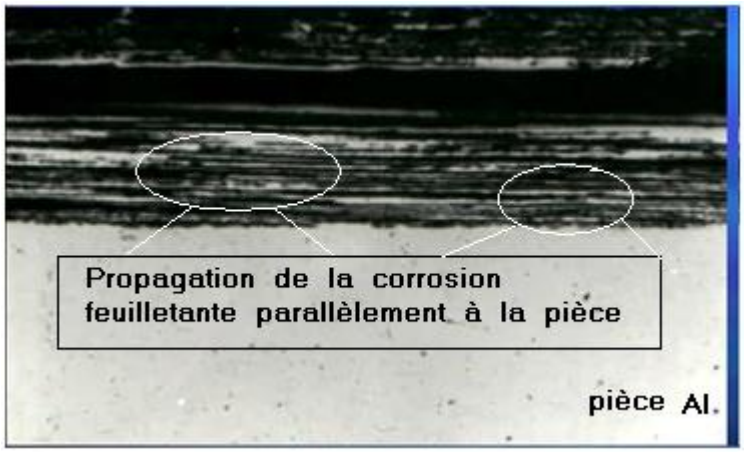


Figure I.12 : corrosion feuilletante. [13]

VII. Techniques d'évaluation de la corrosion:

VII.1.Techniques d'évaluation de la cinétique de la corrosion :

Les réactions électrochimiques sont affectées par plusieurs variations. Son comportement reste très attaché aux conditions dont laquelle la réaction s'évalue (cinétique et thermodynamique). Pour exploiter ces diverses modifications plusieurs méthodes électrochimiques classiques adoptées :

- Suivi du potentiel de la corrosion en fonction de temps E=f(t)
- Exprimer la variation de la densité en fonction de courant (potentiodynamique)
- Mesure l'évolution de la résistance à la polarisation (Rp) au cours de temps
- Susceptibilité à la corrosion localisée par voltammétrie cyclique
- Par spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS).

VII-1.1 Evolution du potentiel au cours de temps:

Le suivi temporel du potentiel de corrosion libre ou de corrosion sous tension a un double objectif : d'une part, il permet d'avoir une première idée du comportement de la surface en milieu corrosif (corrosion, formation d'une couche passive ….), et d'autre part, il permet de déterminer le temps nécessaire à l'obtention d'un régime stationnaire (la passivation), indispensable pour les tracés potentiodynamiques et les spectres d'impédances. Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et une l'électrode de référence. L'interprétation repose sur le diagramme dit d'Evans qui exprime graphiquement que le courant global correspond à la somme algébrique des composants anodiques et cathodiques. La figure (I.14) illustre ce principe.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

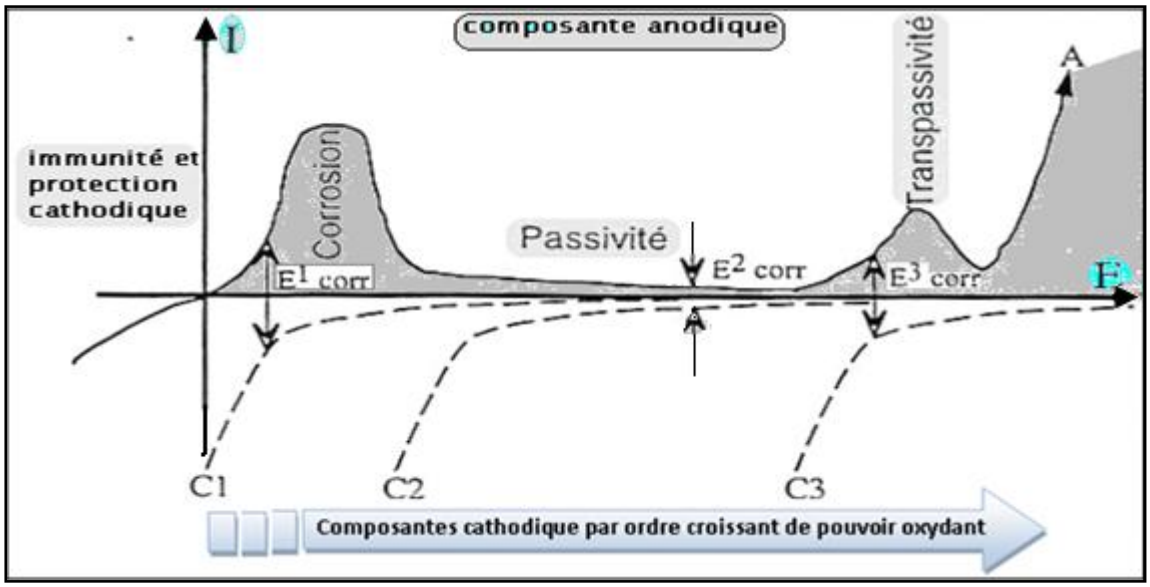


Figure I.13 : Positions du potentiel de corrosion E_{corr} et conditions de corrosion selon les processus cathodiques

Il faut toutefois garder présent à l'esprit qu'il s'agit là d'une information issue de la thermodynamique qui ne donne donc aucune indication sur la vitesse effective de dissolution dans les domaines de corrosion ou de passivation. Les mesures de potentiel de corrosion sont donc systématiquement complétées par des tracés de courbe intensité – potentiel, ou courant tension, Dans le prochain paragraphe. [4]

VII.2. Courbes de potentiodynamiques:

Une courbe potentiodynamique décrit l'évolution de la densité de courant de l'électrode de travail soumise à une différence de potentiel. Cette courbe donne des informations sur la vitesse de la réaction électrochimique et sur les éventuelles modifications de la surface de l'électrode étudiée. Nous imposons, grâce au Potentiostat, une différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence et on mesure la densité de courant résultant traversant l'électrode de travail. [9]

Ces courbes sont données en logarithme décimal de la densité de courant, en fonction de potentiel applique, ce dernier peut être balayés dans des marges bien définis (selon la nature de métal à étudié…..). De la même manière en fixe une vitesse de corrosion (mV/s).

Donc les courbes potentiodynamiques sont composées de deux branches

Ø Une branche anodique : correspondante à la superposition des courants résultant des réactions d'oxydation.

Ø Une branche cathodique : correspondante à la superposition des courants des réactions de réduction. La figure I.14 montre ces deux branches. [4]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

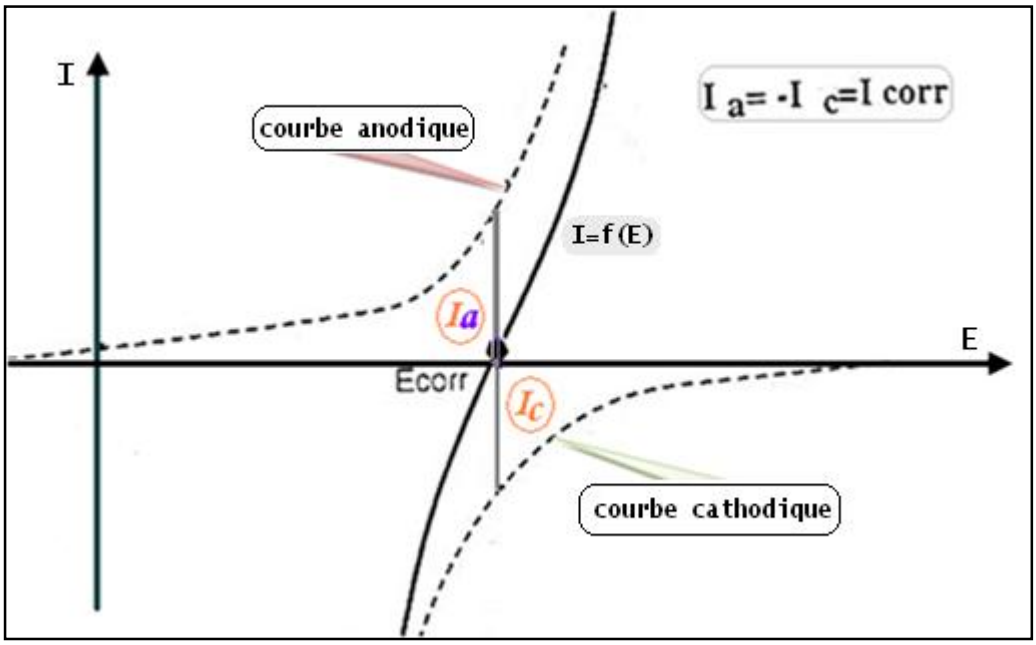


Figure I-14 : Composantes anodique et cathodique et courbe de la densité du courant de corrosion. i = f(E) au voisinage de E_{corr}: Potentiel de corrosion. [9]

VII.3. Mesure de la résistance à la polarisation aux cours de temps:

La mesure de la résistance à la polarisation (**R_p**) est une technique peu, voire non perturbatrice de l'interface métal/milieu. Elle permet donc un suivi de l'évolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion de l'échantillon. La résistance de polarisation est égale à **l'inverse de la pente** à la courbe de polarisation i = f (E), au voisinage **du potentiel de corrosion.**

$$\mathbf{Rp = \Delta E/\Delta I}$$

Ainsi à une faible résistance de polarisation correspond une forte vitesse de corrosion et inversement. La détermination de la vitesse de corrosion peut être extraire à partir de l'exploitation des courbes intensités potentielles. Par construction la courbe i(E) de la réaction anodique et la réaction cathodique on peut déterminer le courant de corrosion **I_{corr},** définie entre les composantes anodique et cathodique pour un courant global nul i=0. Voire Figure I.14.

La détermination par un procédé électrochimique indirect de la valeur de **I_{corr}** a donné lieu à un très grand nombre des travaux dont beaucoup ne présentent pas un grand caractère d'originalité par rapport aux publications originales de Stern et coll. qui a laissé son nom à deux méthodes. Elles sont purement et simplement calquées sur la détermination du courant

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

d'échange d'un couple redox en cinétique électrochimique d'une électrode simple ou bien du courant de corrosion des électrodes mixtes.

Le potentiel d'équilibre dans le cas d'une électrode mixte correspond le potentiel de corrosion et le courant de corrosion. Les difficultés existantes pour un potentiel redox s'ajoutent à celles liées au fait que **E_{corr}** est un potentiel mixte. L'impossibilité de calculer **I_{corr}** à l'aide de la seule valeur du potentiel de corrosion conduit naturellement à exploiter la forme de la courbe courant-tension au voisinage de ce point, là où les composantes anodiques et cathodiques contribuent de manière appréciable au courant global. La 1ère méthode est une méthode d'extrapolation, la 2ème une méthode locale. Toutes deux reposent sur une forme analytique des relations élémentaires **I = f(E)** : la loi de **Tafel.** [9]

Ø 1ère méthode de Stern :

Il s'agit d'une technique d'extrapolation dont le principe est présenté sur la figure :

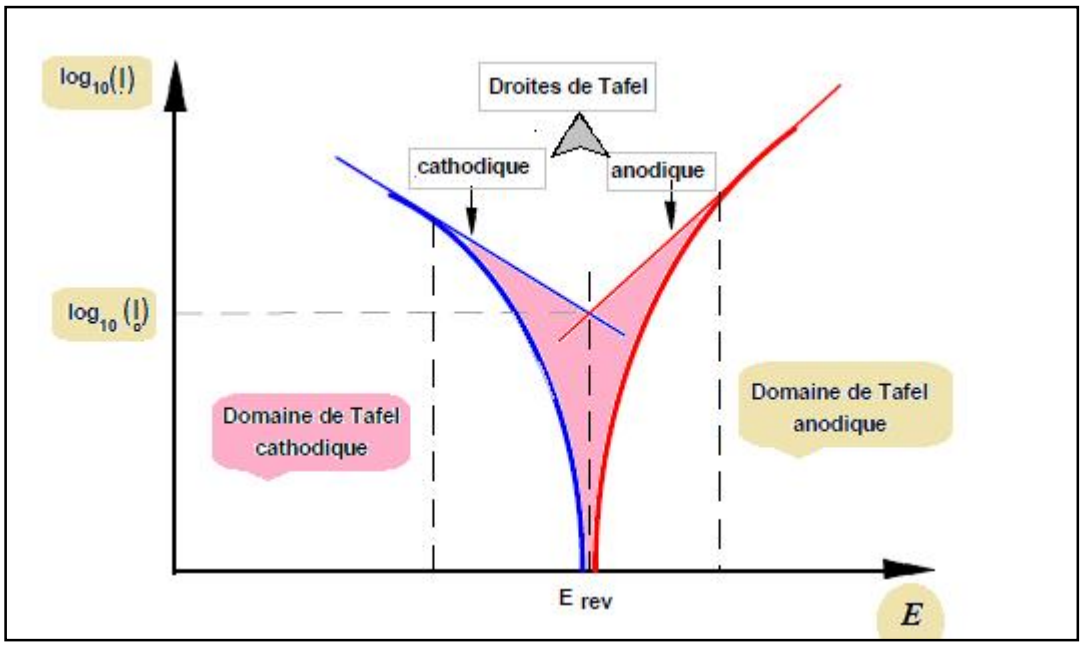


Figure I.15 : Première méthode de Stern**.** [12]

La détermination du courant de corrosion par extrapolation des branches anodiques et cathodique assimilées à des droites de Tafel dans le plan (log I, E). Lorsque la composante anodique est affectée par un processus d'inhibition à l'intérieur de la région pré - **Tafelienne** ou par la chute ohmique à surtension élevée seule la branche cathodique extrapolée à E_{corr} donne **I_{corr}**.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

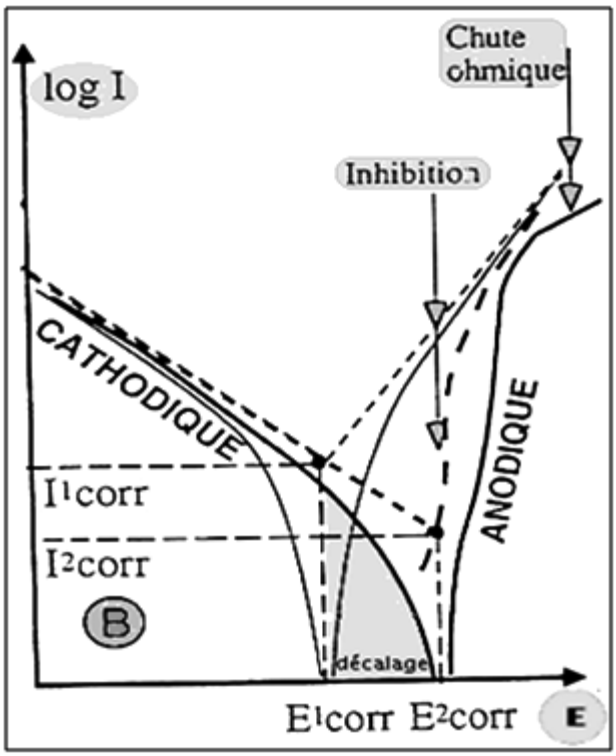


Figure I.16: Effet de la surtension sur les courbes des Tafel.

L'extrapolation des branches anodiques et cathodiques assimilées à des droites de Tafel dans le plan (log I, E) aboutit au point (I_{corr}, E_{corr}). L'hypothèse fondamentale est l'existence des lois de Tafel pour les deux composantes ou pour l'une d'entre elles si l'autre garde une valeur constante (processus cathodique limité par la diffusion de l'oxygène dissous). L'ensemble de conditions est cependant assez contraignant : lois de Tafel conservées sur une large plage de potentiel, réactions éloignées de leur potentiel d'équilibre respectif (irréversibilité), pas de couple redox de vitesse appréciable introduisant de composante anodique parasite. [4]

Ø **La seconde méthode de Stern:**

L'idée qui préside à la seconde méthode de Stern est précisément de s'affranchir de ces obstacles en n'exploitant qu'un domaine très étroit de potentiel au voisinage immédiat de $\mathbf{E_{corr}}$. Egalement connue sous le nom de polarisation linéaire ou résistance de polarisation, elle permet de calculer le courant de corrosion à partir de la seule quantité mesurable si l'on se limite au voisinage immédiat de $\mathbf{E_{corr}}$: la résistance de polarisation R_p, pente de la courbe I = f(E) au potentiel de corrosion est donnée par la relation suivante :

$$R_p = \left(\frac{dE}{dI}\right)_{I=0}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

L'hypothèse de lois exponentielles de Tafel entre les composantes anodique et cathodique et la tension E, traduisant le rôle déterminant du transfert de charge permet d'établir simplement la relation de **Stern et Geary**.

$$I_{corr} = \frac{1}{R_p(B_a + B_c)}$$

Où **Ba** et **Bc** sont les exposants des lois de Tafel écrites sous la forme :

- anodique : Ia = Icorr exp Ba(E-Ecorr) et
- cathodique : Ic = - Icorr exp Bc(E-Ecorr) avec Bc < 0

Une méthode indicatrice de détermination de la vitesse de corrosion consiste à appliquer la formule de **Stern et Geary** valable pour des réactions simples de transfert de charge

$$I_{corr} = \frac{b_a b_c}{2{,}3(b_a + b_c)} \frac{1}{R_p} = \frac{K}{R_p}$$

Où **ba** et **bc** sont les coefficients anodique et cathodique de Tafel, tandis que la résistance de polarisation **Rp** est définie comme la tangente de la courbe de polarisation au potentiel de corrosion.

Donc la vitesse de corrosion exprimée plus exactement la perte de matière sur une période donnée est alors calculée à partir de $\mathbf{I_{corr}}$ selon la relation ci-dessous.

$$V_{corr} = \frac{I_{corr} x t x W_a}{10 x F} \ (mg.\ dm^{-2}.jour^{-1})$$

Avec :

Icorr : la densité du courant de corrosion (µA.cm-2).

t : la durée de l'essai

W : l'équivalent électrochimique du métal.

F : le Faraday, (96483 C).[4]

VIII.3. Mesure d'impédance:

La spectroscopie d'impédance Electrochimique (SIE) est une méthode qui permet de séparer les contributions des différents phénomènes chimiques et électrochimiques se déroulant au niveau de l'interface métal solution. Par application d'un signal de fréquence

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

variable et de faible amplitude dont la commodité de la mesure qui consiste à déterminer le signal perturbateur le plus approprie. [4]

L'analyse en fréquence de l'impédance électrochimique permettra de différencier les divers phénomènes élémentaires en fonction de leur fréquence caractéristique (ou constante de temps). Les phénomènes électrochimiques rapides (transfert de charge) sont sollicités dans le domaine des hautes fréquences, tandis que les phénomènes lents (diffusion, adsorption) se manifestent à moyenne et bases fréquences. Donc il importe de bien préciser le rôle des circuits électriques : ils interviennent comme intermédiaires de calcul destinés à faciliter l'obtention des constantes cinétiques ou la prévision de l'évolution des diagrammes d'impédance. [14]

XI. Rôle des éléments d'addition et leurs comportement en vis-à-vis de la corrosion :

Il est souvent attribué à l'aluminium le comportement électrochimique de l'alliage (Caractère passivable, sensibilité à la corrosion localisée …). Cependant pour certains éléments la résistance à la corrosion peut être influencée. Ainsi la figure I.17 présente schématiquement la baisse de la résistance à la corrosion d'échantillons d'aluminium en milieu chloruré en fonction de la série. Il est toutefois il est à noter que cet effet défavorable s'accompagne de propriétés mécaniques accrues

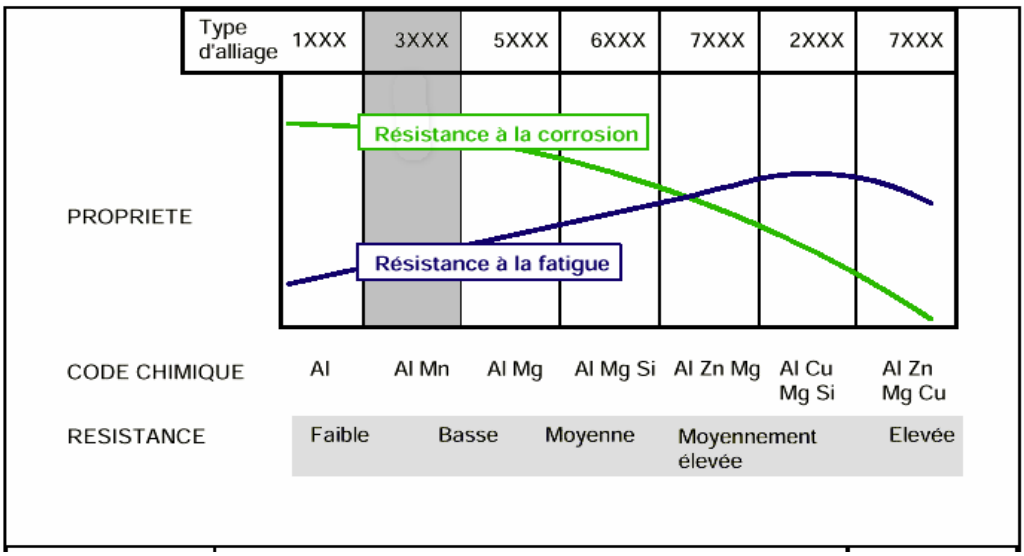


Figure I.17: Effet des éléments d'addition sur la résistance à la.
corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium.[3]

Depuis le début du XXe siècle, de nombreuses études ont porté sur l'influence de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés de l'aluminium. Elles ont permis d'établir un classement qualitatif de la résistance à la corrosion en fonction de la nature chimique de l'alliage. Voir tableau I.4.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Résistance à la corrosion

Série	Eléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al_3Mg_2, Al_8Mg_5	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al_3Fe, Al_6Fe $Al_{12}Fe_3Si_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	$FeSiAl_5$, Fe_2SiAl_8 $Al_8Si_6Mg_3Fe$, Mg_2Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al_6Mn, Al_6MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg Ajout de Cu	$MgZn_2$	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuilletante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Cu	$CuFeMnAl_6$, Al_2Cu Al_2CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuilletante

Tableau I.5 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées. [3]

Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques il peut être retenu d'une manière générale que les éléments : (Cr, Mg, Mn) apportent un effet bénéfique, tandis que les éléments: (Cu, Fe, Ni, Sn, Pb, Co) sont néfastes. (Si, Ti, Zn, Sb, Cd, Zr) ont aucun sans effet. Les éléments d'alliages existent sous deux formes dans l'aluminium :

- en solution solide,
- sous forme de particules intermétalliques.

Dans ce dernier cas les particules intermétalliques ont un comportement plus ou moins nobles par rapport à l'aluminium, et peuvent conduire à la formation de micropiles induisant une attaque localisée. Le tableau I.5 illustre cette interprétation.

	Particule intermétallique / Seconde phase	E_{CORR} (mV_{ECS})
particules cathodiques	Si	-170
	Al_3Ni	-430
	Al_2Cu	-440
	Al_3Fe	-470
	Al_6Mn	-760
	Al	**-840**
particules anodiques	Al_2CuMg	-910
	$MgZn_2$	-960
	Al_3Mg_2	-1150
	Mg_2Si	-1190
	Al_8Mg_5	-1240

Tableau I.6: Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques.[4]

L'addition d'éléments d'alliage modifie ainsi fortement le potentiel de corrosion dans le sens anodique ou cathodique. Pour chacun, les principales variations sont fonction de la teneur de l'élément dans l'alliage.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

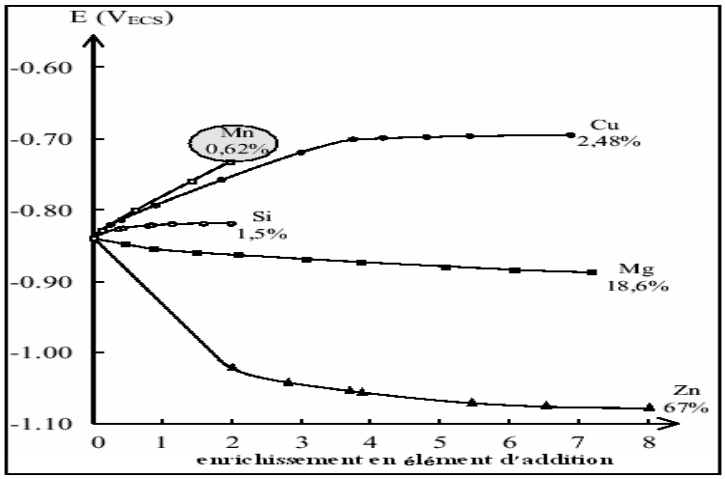


Figure I-18 : évolution de potentiel chimique en fonction de l'enrichissement des éléments d'addition. [4]

X. Prévention de la corrosion des alliages a base d'aluminium:

La protection contre la corrosion doit répondre à des sollicitations complexes et variées du point de vue matériaux, mécanismes, milieux agressifs, facteurs mécaniques et physico-chimiques, etc. Il existe une multitude de moyens de lutte contre la corrosion : la très grande majorité d'entre eux font appel à un des deux modes d'action suivants :

- Ø action sur le matériau ;
- Ø action sur le milieu agressif.

Dans le premier groupe sont compris :

- o L'utilisation des métaux et alliages ou des matériaux non métalliques résistant à la corrosion comme l'aluminium ;
- o Les traitements de surface améliorant le comportement global de la pièce.

Dans le deuxième groupe sont comprises toutes les actions susceptibles de diminuer l'agressivité du milieu ambiant et notamment l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

Un groupe à part dans la protection contre la corrosion est constituée par les méthodes électrochimiques, à savoir la protection cathodique et la protection anodique.

La corrosion des alliages d'aluminium ne présente pas en générale de réels problèmes soient dans milieu sec ou humide, ces alliages ont bonne résistance à la corrosion. En fonction de l'agressivité de l'environnement et des conditions d'utilisation, des mesures doivent néanmoins parfois être prises afin de limiter ou d'empêcher la dégradation. Il existe divers moyens de prévention contre la corrosion ceux- ci sont résumés dans la figure I.19.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

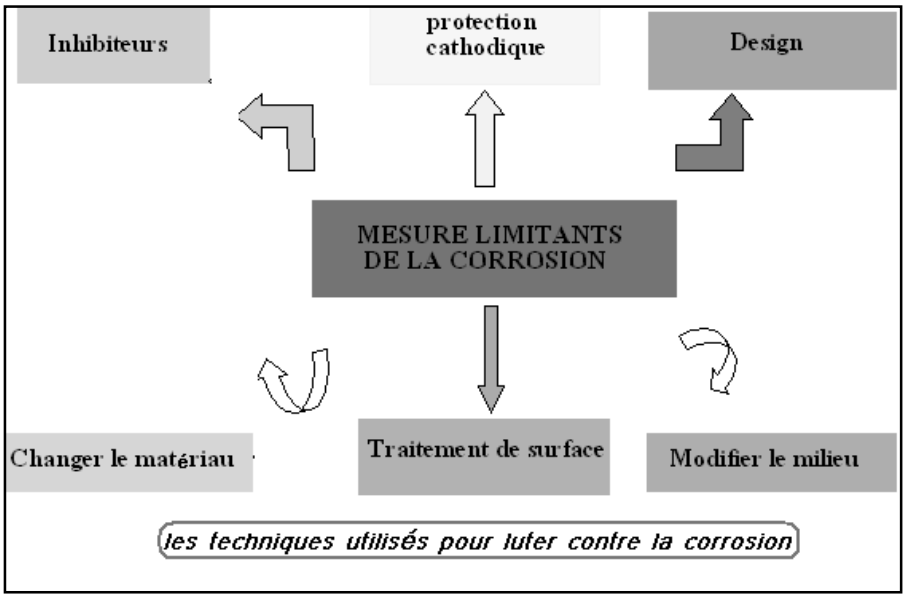


Figure I.19 : Moyens de prévention de la corrosion. [16]

Conclusion

La durabilité et recyclabilité de l'aluminium, en font un matériau fiable, sûr et économique qui peut répondre aux divers dommages. Parmi ses avantages, on peut citer le gain de poids, la résistance à la corrosion et une bonne sécurité envers des milieux agressifs. Pour toutes ces raisons l'emploi de l'aluminium dans l'industrie automobile a accru dans une manière remarquable. Le choix des ces alliage est lié étroitement aux conditions de mise en service comme, l'application de l'alliage AlMn dans les radiateurs d'automobiles.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre II

Fonctionnement d'un Radiateur Et Quelques Rappels Sur Le Champ Magnétique

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Introduction :

Le moteur d'automobile génère une chaleur importante durant sont fonctionnement, pour cela les pièces en mouvement se délattent et le moteur risque de s'user. Pour rassurer un bon fonctionnement de moteur il est nécessaire de le maintenir à une température idéale de fonctionnement. Un système de refroidissement conçu pour les automobiles qui reste l'un des dispositifs majeurs aux seins des moteurs à combustion. Cependant le circuit de refroidissement est relié à un organe qui permet de refroidir le liquide appelée le **Radiateur**.

Dans la suite de ce chapitre qu'est subdiviser en deux partie distinctes, la première qu'est consacrée sur le mode de fonctionnement des radiateurs de chauffage d'automobile, et la deuxième sur le champ magnétique et ses effets sur les matériaux métallique.

Partie I : Aperçu sur les radiateurs du chauffage d'automobile:

I. Radiateur:

C'est l'élément au sein duquel se passe l'échange de température entre l'air extérieur et le liquide de refroidissement. Il est fabriqué en alliage d'aluminium (AlMn1), selon le sens d'écoulement du liquide de refroidissement, soient en U ou en Diagonal. La figure II.1 montre les deux formes distinctes :

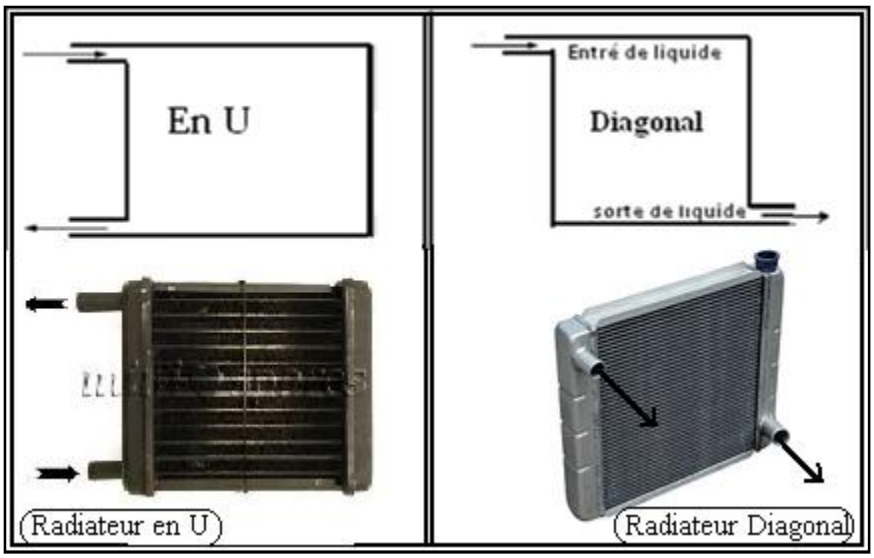


Figure II.1: Les différentes formes de radiateur. [14]

I.1. Le principe fonctionnement de radiateur:

Le moteur brûle du carburant dans les cylindres afin de transformer l'énergie thermique en mouvement. Mais l'énergie thermique provenant du carburant, n'est pas entièrement transformée en puissance, environ 35 % seulement de l'énergie du carburant est effectivement utilisée, 45 % de cette énergie environ étant perdue dans les gaz d'échappement

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ou gaspillée et 21 % est absorbée par le moteur directement. Les calories absorbées par le moteur doivent être évacué à l'air libre, sinon, il y aurait échauffement et risque de grippage du moteur. Un circuit de refroidissement est donc agencé à l'intérieur du moteur afin d'en assurer son refroidissement et d'empêcher son échauffement. Donc Le radiateur refroidit le liquide qui a été chauffé dans les passages d'eau du bloc moteur. Le liquide de refroidissement arrive dans la boîte à eau supérieure par la durite supérieure, cette boite à eau comporte également un bouchon qui permet de faire l'appoint du liquide de refroidissement. Cette boîte à eau est également reliée, par une tuyauterie souple, à un vase d'expansion où le liquide de refroidissement en excès est récupéré. La boîte à eau inférieure comporte une sortie et un bouchon de vidange. [19]

Cependant le radiateur occupe une place pertinente car grâce à ce dispositif la température de fonctionnement au sein de moteur reste régulière, ainsi et lui confère un rendement adéquat. La figure II.2 illustre comment le radiateur est collecté aux moteur ainsi les différents organes qui forme un radiateur.

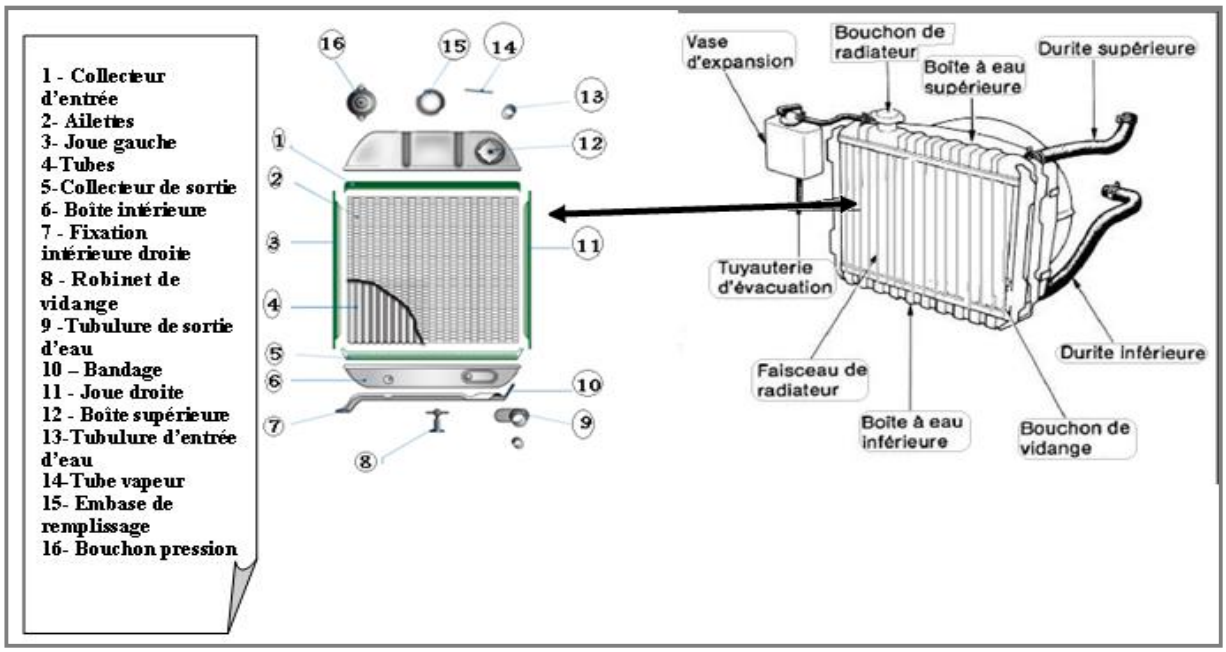


Figure II.2: Radiateur et ses accessoires. [17]

I.2. Les différents circuits de refroidissement:

Les moteurs sont en principe refroidis par air ou par liquide, mais la plupart des moteurs automobiles sont refroidis par des liquides.

I.2.1. Refroidissement par air:

Les cylindres du moteur sont munis d'ailettes orientées pour que le courant d'air provoqué par le déplacement du véhicule circule facilement entre elles. En revanche, le

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

système est complété par un ventilateur ou turbine. Les cylindres sont alors enfermés dans un habillage en tôle, destiné à canaliser l'air. Parfois, un volet commandé manuellement ou automatiquement par un thermostat, faisait varier la circulation d'air selon la température du moteur et celle de l'extérieur.

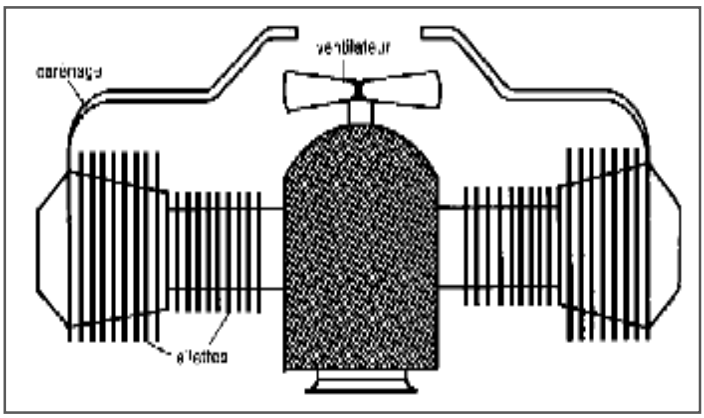


Figure II.3: Système de refroidissement avec l'air. [18]

Des avantages et des inconvénients peuvent être touchés dans cette rubrique parmi :

Avantages :

- Simplicité et faible coût de construction.
- Gain de poids.
- Peu de défaillances et d'entretien.

Inconvénients :

- Régulation de température imprécise.
- T° moyenne élevée, donc remplissage moins bon.
- Rendement, puissance et consommation moins favorables.
- Pollution moins maîtrisée.

I.2.2. Refroidissement par l'eau:

Dans ce système, l'eau sert d'agent de transmission de la chaleur à l'intérieur du moteur et l'air extérieur: c'est le principe de « l'échange de température ». Le plus chaud cédera des calories au plus froid : le liquide de refroidissement qui se trouve dans les chambres aménagées au sein du moteur doit être refroidi après avoir absorbé la chaleur dégagée par ce dernier. La culasse et le bloc moteur comportent des chambres dans lesquelles circule le liquide de refroidissement (à base d'eau déminéralisée et d'antigel). Cette circulation est assurée par une pompe à eau et par la différence de masse volumique (thermosiphon). Le liquide chaud est dirigé vers l'entrée du radiateur et ressort par le bas en

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

se refroidissant. Dans le même contexte deux circuits de refroidissement alimenter par l'eau peut exister :

Ø Circuit ouvert:

Dans ce système le liquide chauffé au contact des cylindres monte dans le réservoir supérieur, dont le liquide chaud est remplacé par du liquide froid du réservoir inférieur du radiateur. Ce mode de fonctionnement dénommé **thermosiphon**. Une pompe ajustée pour accélérer la circulation et l'échange thermique entre le liquide chaud et froid.

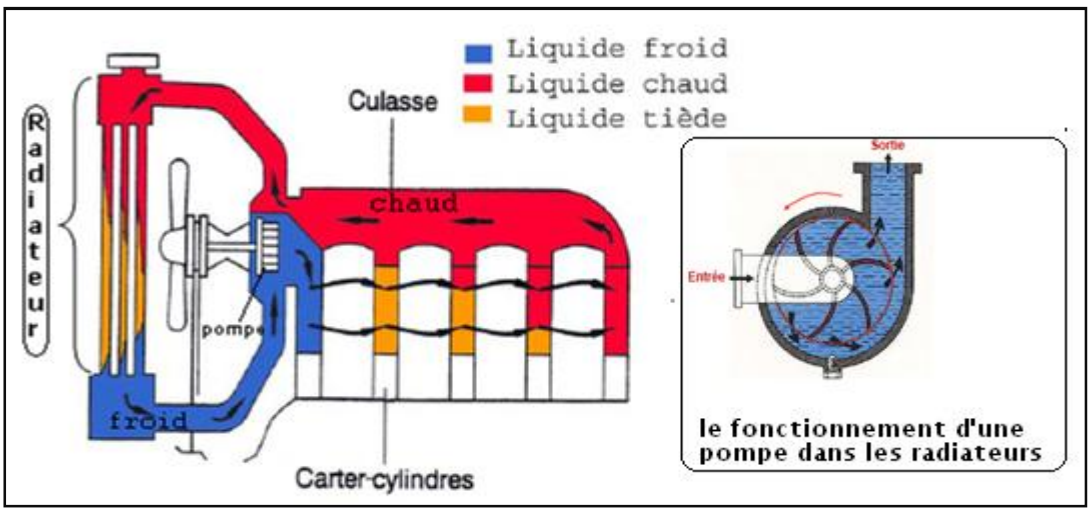


Figure II.4: Le circuit de refroidissement par eau. [12]

Ø Circuit sous pression:

Est un circuit classique auquel on ajoute un vase d'expansion et d'une soupape pour réguler la pression de circulation de liquide qui provient de moteur. La figure II.5 montre comment la vase et disposée :

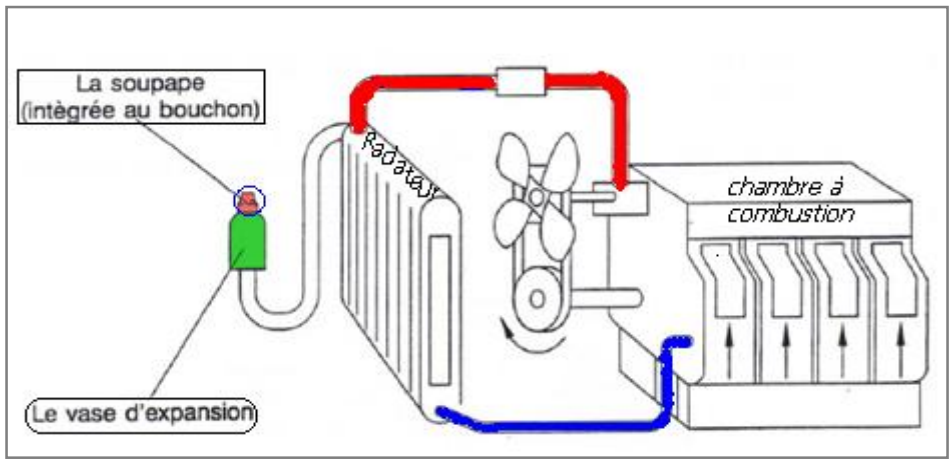


Figure II.5: Circuit de refroidissement sous pression. [12]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Plusieurs avantages et inconvénients seront aussi devinés dans ce mode de refroidissement :

Avantages :

- Moteur moins bruyant
- Refroidissement mieux contrôlé
- Meilleur rendement

Inconvénients :

- Moteur plus lourd
- L'aménagement du circuit de refroidissement rend sa mise en œuvre plus difficile.

Ø Exemple d'application sur le principe des échangeurs de chaleur:

Le refroidissement de liquide chaud dans le radiateur de chauffage suit le principe des échangeurs de chaleur ce concept est l'une des assises fondamental qui nous permet d'exploiter la question sur comment s'effectuer et évaluer l'échange de chaleur entre deux fluide. Dans notre cas on va se focaliser sur la forme cylindrique et d'établir le mode de transfert thermique. Pour soulever cette problématique il est intéressante d'évoquer les notions fondamentales qui définissent le principe de fonctionnement des échangeurs de chaleur en particulier dans un système tubulaire. [19]

La description des échangeurs est tout simplement un système qui permet de transfert un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contacte direct entre les deux fluides. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leurs arrangements :

- Echangeur monotube
- Echangeur coaxial
- Echangeur multitubulaire

Dans le dernier cas nous pouvons constater diverses forme la figure II.6 illustre ceci :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

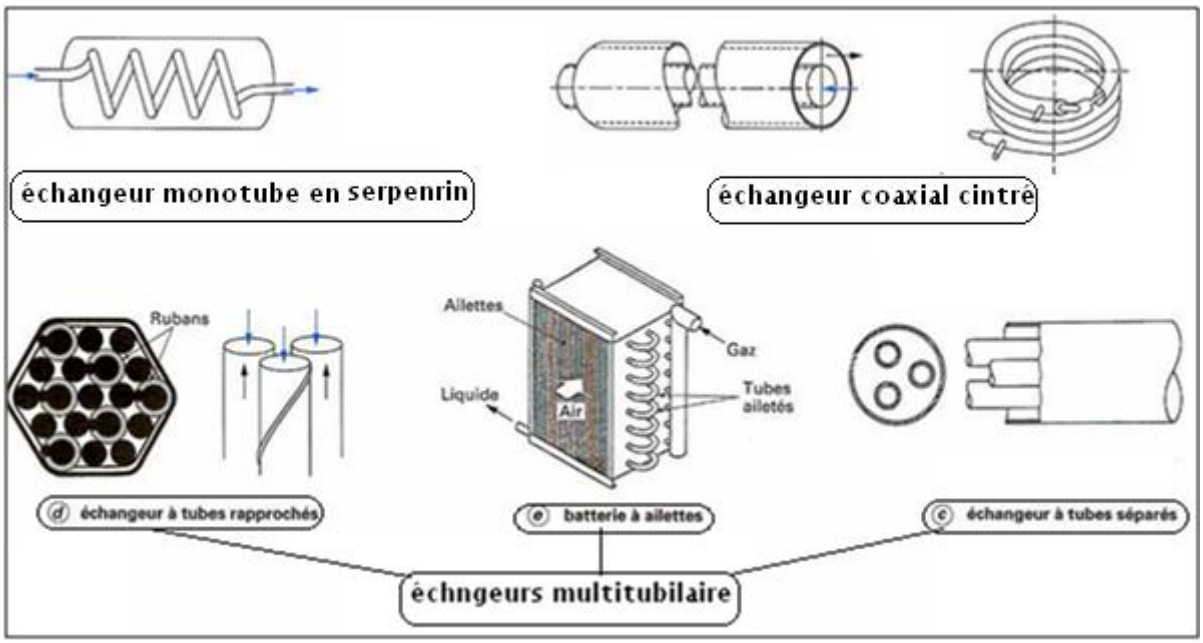


Figure II.6: Les différents échangeurs. [16]

Nous pouvons aussi rencontrer d'autre type des échangeurs, qui sont dotés des ailettes ceci s'impose autour des tube ou quelque fois dans les tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas principalement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique par exemple dans le cas d'échange entre le liquide-gaz (radiateur).La répartition des ailettes peuvent être disposées soit se forme transversale ou longitudinale. Cet arrangement peut-être continue ou indépendant de sorte qu'il permet une meilleure évacuation de chaleur qui provienne des tubes.

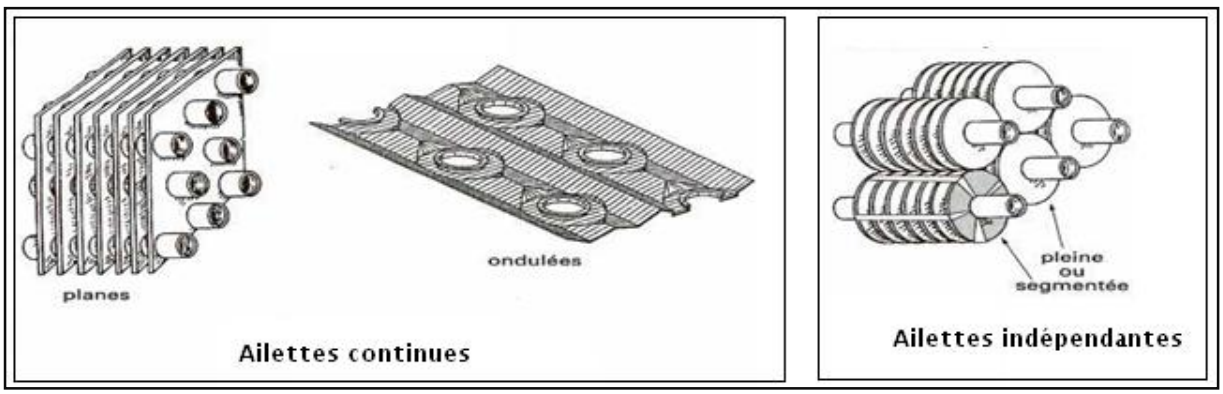


Figure II.7: Différent types d'ailette. [19]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III. Classification des échangeurs:

Selon le sens d'écoulement des deux fluides en distingue trois classifications distinctes :

- Ø Les échangeurs à courants parallèles ou échangeur anti-méthodique ceci traduit que l'écoulement de deux fluides parallèle et dans le même sens.
- Ø Les échangeurs à contre-courant ou échangeur méthodique dans ce cas le mouvement de deux fluides sont parallèle mais en sens contraire.
- Ø Les échangeurs à courants croisés avec ou sans brassage avec écoulement des deux fluides perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. La figure II.8 illustre cette classification :

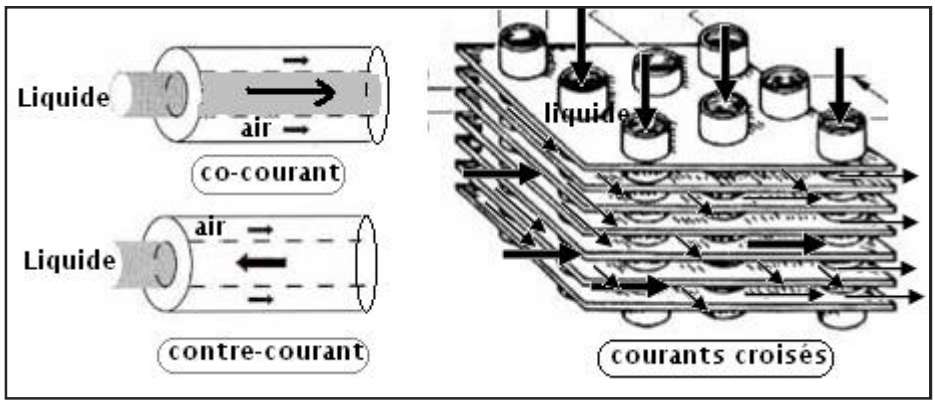


Figure II.8: Classification des échangeurs. [18]

IV. Calcul des échangeurs:

Chauffer ou refroidir (traitements thermiques) des fluides alimentaires, on utilise souvent des fluides caloporteurs ou frigoporteurs intermédiaires. Les paramètres nécessaires et le dimensionnement d'un échangeur sont :

- la surface d'échange (surfaces des plaques, surface intérieure des tubes concentriques...).
- des caractéristiques de l'appareil (épaisseur des plaques, conductivité thermique) et du fluide (régime turbulent ou laminaire, épaisseurs des couches limites, viscosité...) qui détermine le coefficient global des échangeurs.
- de l'écart de température de part et d'autre de la surface d'échange.

Ø Efficacité d'un échangeur:

La puissance thermique d'un échangeur est déterminée à partir de la relation suivante :

$$P = K.S.\Delta T_m.$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dont :

K : est fonction de l'épaisseur de la paroi, du coefficient de transfert thermique du métal, du coefficient de film extérieur et intérieur

ΔTm : est la moyenne logaritmique des écarts de température entre les deux éxtrimités d'un échangeur avec :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

La figure II.9 développe étroitement la relation ci-dessus :

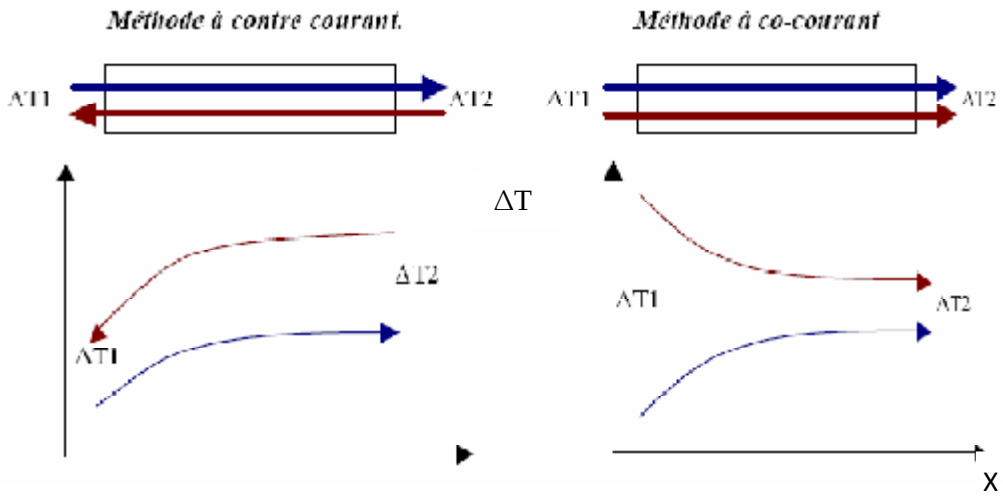


Figure II.9: Evaluation de la température entre les deux extrémités d'un échangeur. [20]

La quantité de chaleur cédée ou reçue dans un échangeur reste proportionnelle aux paramètres thermodynamique de fluide utilisé :

$$Q = Q_m . C . \Delta T$$

Avec :

Q : Flux de chaleur : J/s= W

Q_m : Débit massique : Kg/s

C : Capacité thermique (J/Kg/°C)

Donc l'efficacité **E** d'un échangeur est définie comme le rapport entre le flux échangé et le flux max :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$E = \frac{Q}{Q_{max}}$$

V. Le fluide automobile:

Le liquide de refroidissement conçu pour les véhicules industriels est celui qui répond à des anomalies qui reste assez complique à les concevoir. Un bon antigel de refroidissement est absolument essentiel pour une conduite sécuritaire et efficace des automobiles, peu importe la température dans lequel baigne. Ce liquide doit être compatible au circuit de refroidissement, protège tous les métaux du système contre la rouille et la corrosion. Il n'affecte la peinture des automobiles et n'assouplit le matériel plastifié utilisé dans la structure des réservoirs de refroidissement.

Les liquides de refroidissement recommandés et couramment mis en évidence sont le **glaceol** de type **D** et **A**, ces deux colporteurs ont comme un milieu de base le **mono éthylène glycol**, la grande différence entre eux étant la nature de l'inhibiteur de corrosion. Dans le glaceol D on constate la présence d'un inhibiteur organique par contre le glaceol A contient un inhibiteur inorganique appelé **borax**. Les propriétés physicochimiques de ces deux antigels sont sauvegardées dans le tableau ci-dessous :

Glaceols	Masse volumique (g/cm^3)	Température de fusion(C°)	Température d'ébullition(C°)	Composition chimique
D	**1,11 g/cm3**	**-12 C°**	**198 C°**	- Mono éthylène glycol (MEG) : min 92% - Inhibiteur de corrosion (tolyltriazol entre 0,2-0,5%) - Des autres inhibiteurs organiques et des additifs entre 4,2-4,5% - Colorant : fluorescéine 40ppm - Agents basés sur des sels cyanure : 60-70ppm - Eau : maximum 5%
A	**1,12- 1,13 g/cm3**	**-12 C°**	**150 C°**	- Mono éthylène glycol (MEG) Borax : 2,5- 3% inhibiteur des corrosions - Eau de permutée

Tableau II.1: Propriétés physico-chimiques de glaceol **A** et **D**. [4]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Cependant un antigel idéal devrait être chimiquement stable, de faible viscosité, de faible conductivité électrique, et doit avoir une température d'ébullition élevée, le moins corrosif possible (comporte des inhibiteurs) et avec une bonne conductivité thermique. D'autre antigels sont utilisés aujourd'hui pour les moteurs de voiture sont le méthanol, l'éthanol et l'éthane-1,2-diol (éthylène glycol) ; la plupart contiennent des phosphates, des nitrates ou d'autres agents anticorrosion.

VI. Aperçu sur les inhibiteurs:

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui s'ajoute en faible concentration au milieu corrosif dans le but : de ralentir ou stopper le processus de la corrosion d'un métal placé au contact d'un milieu corrosif (c.-à-d. empêcher les réactions anodiques et cathodiques entre le matériau et le liquide refroidissement).

Un inhibiteur est un mode de protection qui peut être permanent, temporaire ou combiné avec d'autre inhibiteur (protection supplémentaire). Cette distinction est selon la sensibilité de métal à résister à la corrosion. D'une manière générale un inhibiteur doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal sans se répercute ou affecte sur les caractéristiques physico-chimiques.
- Etre stable en présence des autres constituants du milieu comme les oxydes.
- Doit être stable aux températures d'utilisation
- Doit être efficace à faible concentration, compatible avec la norme de non-toxicité et soit peu onéreux.

Il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion. Un même composé peut avoir un mécanisme d'action qui sera en fonction du système de corrosion (métal-solution). Ceci à la présence de certain nombre de considération de base valables électrochimique, un inhibiteur se manifeste au niveau des zones dont les réactions sont élémentaires (transport des espèces en solution, formation des protecteurs intermédiaires superficiels, adsorption des espèces à la surface des phases solides et transfert des charges électroniques). La figure II.9 illustre comment intervient un inhibiteur sur la surface d'un métal.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

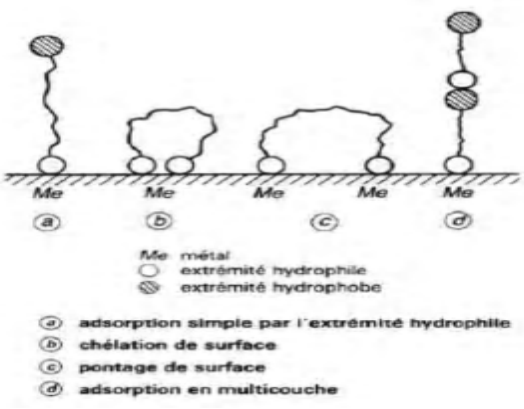


Figure II.9: Montre l'action des inhibiteurs sur la surface d'un métal.

On peut conclure que le mode d'action des inhibiteurs se repose sur l'aspect mécanistique et morphologique. Donc le mécanisme d'action va se différencier fortement en fonction des caractéristiques de PH de milieu. [4]

L'action de fluide de refroidissement peut être modifiée à l'aide d'un effet extérieur, tel que le champ magnétique que se produit par des organes électriques. Et comme nous avons évoqué dans le chapitre précédent que la réaction électrochimique qui s'établie entre un métal et une solution aqueuse s'accompagne par un échange des électrons. L'action de champ sur le transfère charge reste pérennant car il peut engendrer des actions soit positif ou négatif sur l'alliage dont lequel circule le fluide. Dans la suite de ce chapitre nous aborderons le champ magnétique et ses effets sur les matériaux métalliques.

Partie II : Le champ magnétique:

I. Généralité sur le champ magnétique:

Le champ, avaient la propriété particulière d'attirer en direction de lui des corps ferromagnétique; cette propriété physique porte le nom de magnétisme. Parmi les éléments qui possèdent cette propriété, il s'agit du cobalt (Co), du fer (Fe), du gadolinium (Gd) et du manganèse (Mn), et autre. Les sources de champs magnétiques existent soit à l'état naturel (Terre, aimant naturel) ou peuvent être crées artificiellement (aimant, électro-aimant), ceci se traduit par un effet d'induction magnétique qui explique le déplacement de charges électriques dont il engendre un champ d'excitation au sein d'un conducteur. [22] Tout comme le courant électrique les aimants possèdent la même caractéristique où les lignes de champ

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

sont orientées de pole nord (+) vers le pole sud (-) qu'émit un champ d'induction B tangente aux lignes de champ magnétique. Voir la figure II.10. [21]

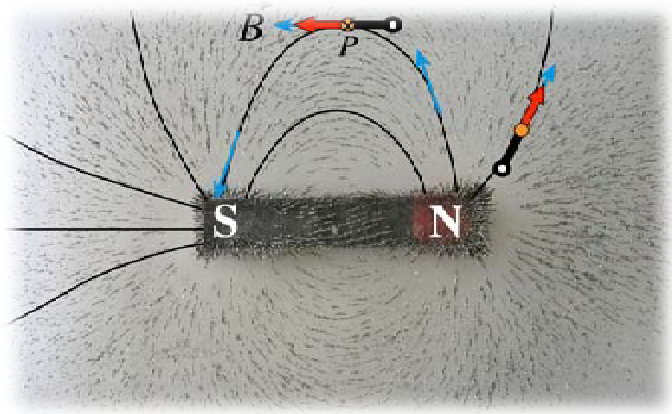


Figure II.110: Champ produit par un aimant. [23]

II. Classification des milieux magnétiques et ses effets:

Selon leurs capacités d'aimantation, les matériaux métalliques sont classés en trois catégories distinctes:

II.1. Diamagnétique:

Lorsqu'une molécule comporte un nombre pair d'électron, tous groupés en doublets associant deux électrons de spin opposés, son moment magnétique global résultant est nul. La substance correspondante est diamagnétique. Un corps est donc diamagnétique s'il s'aimante, sous l'influence d'un champ magnétique, et acquiert en chaque petite région une intensité d'aimantation (induite) proportionnelle au champ inducteur mais de sens opposé. Sa susceptibilité magnétique est donc négative, pratiquement indépendante de la température. En fait, toutes les substances sont diamagnétiques, cette propriété étant souvent masquée par un paramagnétisme ou un ferromagnétisme plus important. L'origine du diamagnétisme est attribuée à l'action du champ inducteur sur le mouvement des électrons atomiques, donc sur leur moment magnétique orbital individuel m. Quelle que soit l'orientation respective des deux vecteurs du champ magnétique et du moment magnétique, tandis que le champ magnétique passe de la valeur 0 à sa valeur finale, s'accroît d'une quantité dm proportionnelle au champ et de sens opposé. [24]

II.2. Paramagnétisme:

Leur moment magnétique résultant n'est pas nul. Toute substance paramagnétique, plongée dans un champ magnétique, s'aimante et elle se déplace vers les régions où le champ est fort. Elle acquiert en chaque région une intensité d'aimantation B proportionnelle au

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

champ magnétique local et de même sens que lui. On pose B = Pm = χH (Pm polarisation magnétique; H vectrices excitations magnétique). La susceptibilité magnétique χ d'un corps paramagnétique est positive, indépendante de H. C'est une fonction décroissante de la température. Les substances tels que l'oxygène O_2 (χ = 1, 9.10-6), NO (χ = 0, 38.10-6) qui possèdent dans leur structure un ou plusieurs électrons célibataires sont paramagnétiques.

II.3. Ferromagnétisme:

Le ferromagnétisme est une propriété très complexe à analyser, caractéristique de l'état solide exclusivement, manifestée notamment par des métaux. Une substance ferromagnétique reste fortement aimantée alors qu'on supprime tout champ magnétisant extérieur. Les matériaux tels que le nickel, le cobalt, la magnétite (Fe3O4) sont ferromagnétiques et surtout le fer et ses alliages, d'où vient le nom ferromagnétisme. Les caractéristiques d'un matériau ferromagnétique peuvent être représentées sous la forme de deux graphes donnant: l'un, la «courbe de première aimantation », variations de l'intensité d'aimantation B lorsque l'on fait croître progressivement le champ magnétisant Ho, le matériau ayant été préalablement désaimanté, par chauffage par exemple, l'autre, le «cycle d'hystérésis».

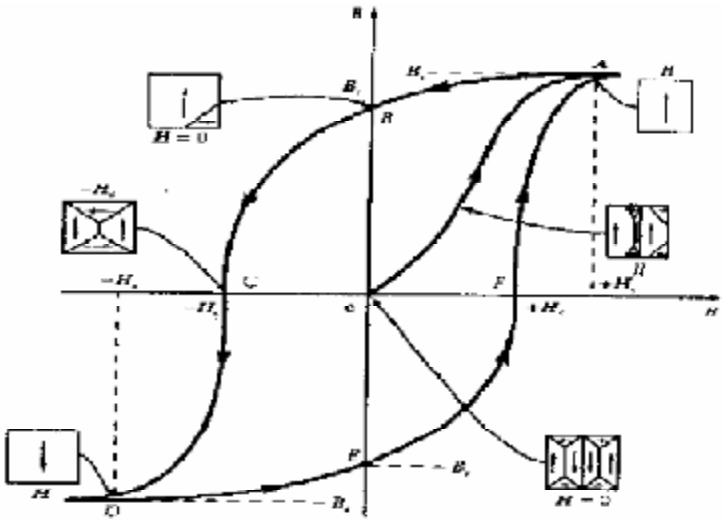


Figure II.11: Cycle d'hystérésis. [24]

III. Propriétés magnétiques et son effet sur les matériaux:

Une meilleure compréhension des caractéristiques magnétiques est obtenue par l'étude des structures intérieures des matériaux. Les propriétés magnétiques d'un matériau sont attribuables au spin des électrons et à leur mouvement orbital autour du noyau. Etant donné qu'une charge électrique en mouvement engendre un champ magnétique H autour d'elle-

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

même, les électrons qui tournent sur eux-mêmes (spin) et autour du noyau (orbital) forment de petits dipôles magnétiques; ces dipôles peuvent réagir à l'application d'un champ magnétique extérieur, de la même manière que les dipôles électriques réagissent à l'application d'un champ électrique. [9]

Chaque électron d'un atome possède donc ce moment, appelé magnéton de Bohr. Sa valeur est de 1 μB = 9,274.10-24 A/m2 et est utilisé comme une unité de mesure du magnétisme au niveau atomique. Quant aux oxydes de fer, le moment magnétique effectif par ion de FeO est de 5,33 μB, celui de Fe304 est de 6 μB, et environ 10-2 μB pour α-Fe203, 1,25 μB pour γ-Fe203. Un atome n'apparaîtra magnétique que lorsqu'il y a un déséquilibre de spins des électrons. La moitié des éléments chimiques purs ne sont pas concernés par ces caractéristiques magnétiques car presque cinquante pour-cent des éléments chimiques ont un nombre pair d'électrons de valence. Par ailleurs, dès lors qu'ils sont intégrés dans un édifice poly atomique (molécule, cristal pur, composé et alliage), seulement un petit nombre d'atomes sont porteurs d'un moment magnétique permanent. [23]

Un grand nombre d'éléments du tableau périodique portent un moment magnétique à l'état d'atome isolé alors qu'à l'état solide pur, la plupart sont diamagnétiques. L'établissement de la liaison chimique perturbe les orbites électroniques responsables du magnétisme. La majorité des ions sont exemptés parce qu'un ion à des électrons dégagés ou acceptés. En conséquence, quelques éléments ont des spins d'électron déséquilibrés pour avoir un moment magnétique. Parmi eux, le fer, le cobalt et le nickel ont un manganèse…cet. Donc l'une des propriétés de champ magnétique est la capacité d'orienté les électrons dans une direction privilégiée. La figure II.12 montre cette aptitude:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

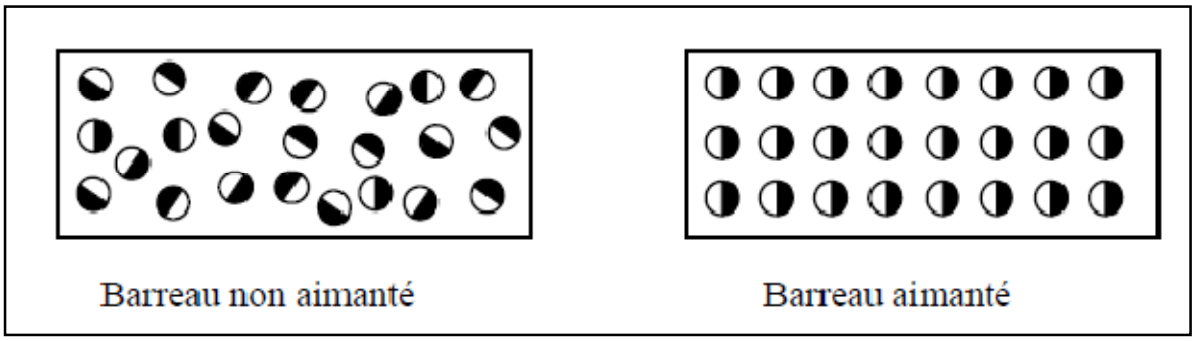


Figure II.12: Effet de champ sur les électrons. [22].

D'après la figure II.12, on constate que l'effet de champ sur les matériaux sert à modifier la redistribution des charges et leurs sens, ce changement qui provienne de la traction magnétique qu'est pour effet d'augmenter leur vitesse dans une direction privilégie, ceci peut accélérer le processus de corrosion électrochimique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre III

Partie Expérimentale

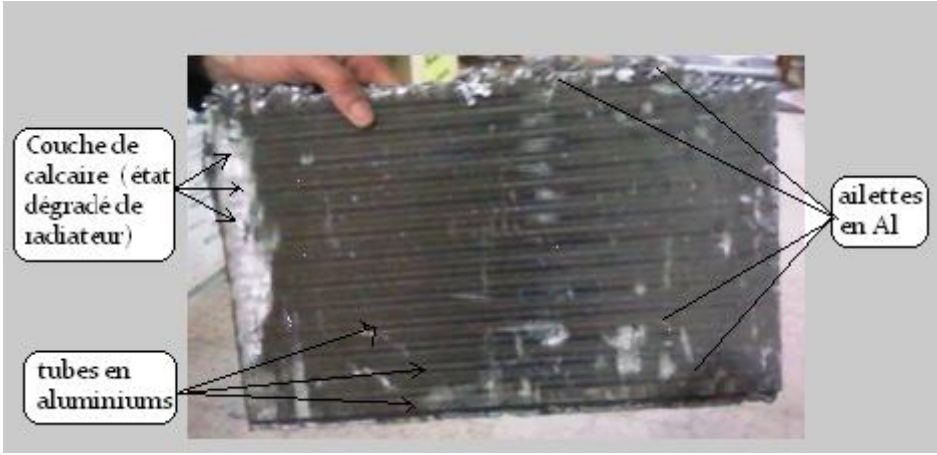
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Introduction :

Pour évaluer l'influence de la corrosion de l'alliage AlMn1, nous avons choisi comme outil d'étude le radiateur de chauffage d'automobile, dont ces tubes sont fabriqués en alliage de la famille 3000(Aw3103), qui compatible à celui cité préalablement. La démarche à suivre consiste à instaurer des différentes manouvres, afin que nous allions réussir à expliquer certains phénomènes intervenant lors de la corrosion de l'alliage (AlMn).

I. Préparation des échantillons:

La préparation de nos échantillons suit une démonstration spécifique. Avant de commencer notre démarche, vous devez savoir que le radiateur sur lequel nous allons focaliser notre étude, est un dispositif qui a été mis en service. La figure III.1 montre le radiateur étudié:



Figue III.1: Radiateur de chauffage d'automobile**.**

Cependant notre étude sera concentrée sur les tubes qui apparaissent sur la figure III.1 où circule le liquide de refroidissement, constituant l'électrolyte induisant le phénomène de la corrosion conduisant à une dégradation par corrosion localisée des tubes. Le radiateur troué est toujours mis hors d'usage. L'extraction et la préparation des échantillons à partir de ces tubes, renfermes plusieurs étapes qui vont être abordés succinctement dans notre démarche.

Etape 1 : L'extraction des tubes du radiateur

Dans cette présente étape qui consiste à arracher les tubes du radiateur qui baignent dans les ailettes sous forme de feuille en aluminium, pour cela nous utiliserons une tourne vis, la figure suivante illustre les tube juste après extraction et leurs dimensions:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

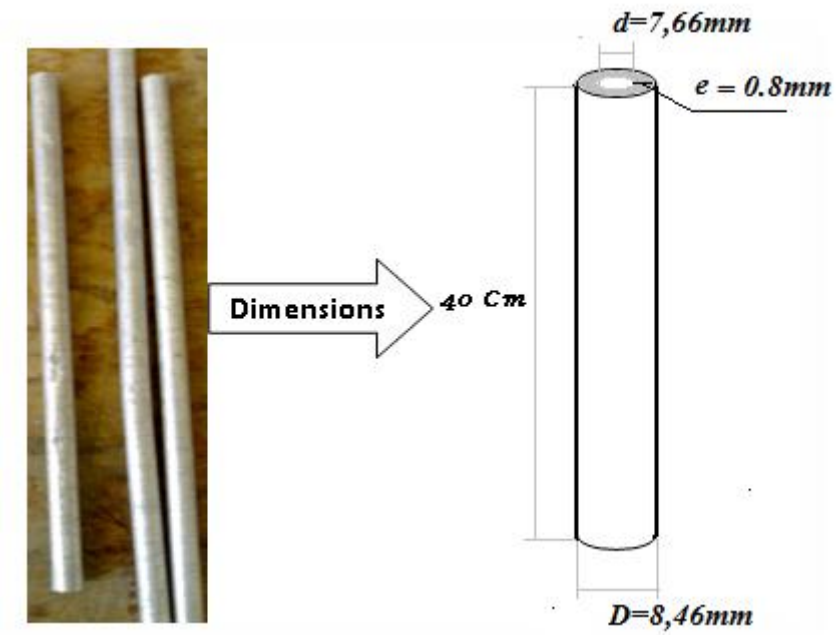


Figure III-2: Tubes de l'alliage AlMn1.

Etape 2 : Conception des échantillons:

Dans cette étape on prépare des échantillons de 20mm d'hauteur, puis sur l'un des extrémités on fait des trous de 1mm de diamètre. Cependant une forme appropriée conçue pour facilité la connexion des fils conducteurs puis de les enrobées à l'aide d'un isolant en plastique, pour éviter le contact des fils de connexion avec l'électrolyte. La figure III.3 illustre d'une manière explicite la forme et les mesures de conception adoptée pour la conception de ces échantillons.

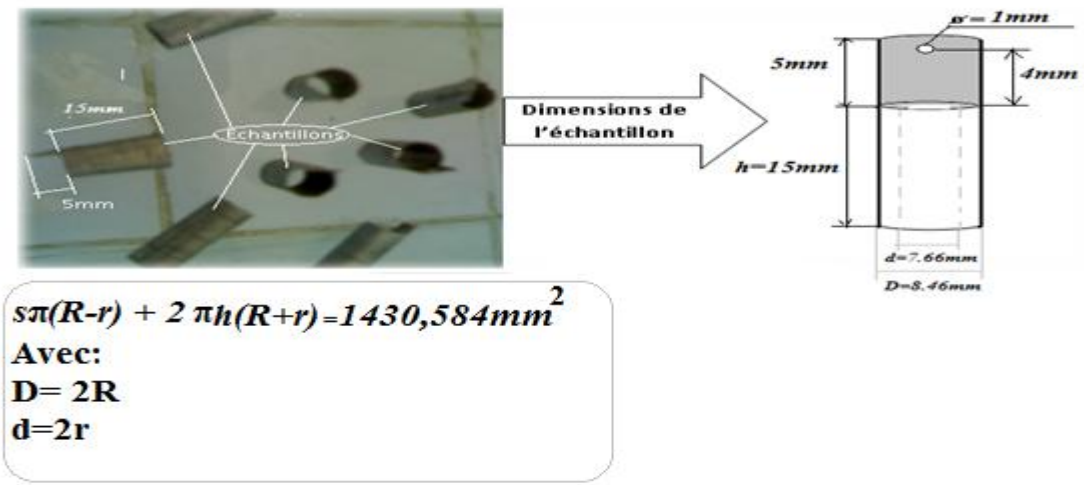


Figure III-3: Forme de l'échantillon.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Etape 3 : Préparation des conducteurs:

Dans cette partie consacrée aux étapes adoptés pour la préparer les conducteurs. On prend des fils en cuivre de diamètre 1,5mm puis on fait des coupes de 30 cm. Sur l'une de ces extrémités on réalise une bobine de 9 spires, puis à l'aide de l'étain en fusion on ferme tout les vide entre les spires, ceci nous permet d'évité l'effet de l'inductance sur la conduction électrique.

Etape 4 : Assemblage des échantillons et les conducteurs:

Après avoir préparé les échantillons et les conducteurs, maintenant en va les assembler pour cela en fait passer les fils en cuivres dans les trous des échantillons, à l'aide d'une pince on serre le conducteur pour assurer un bon contacte, et à l'aide d'un isolant en plastique en isole la partie du conducteur en contact avec la solution. La figure III.4 illustre cette procédure et les différentes manœuvres:

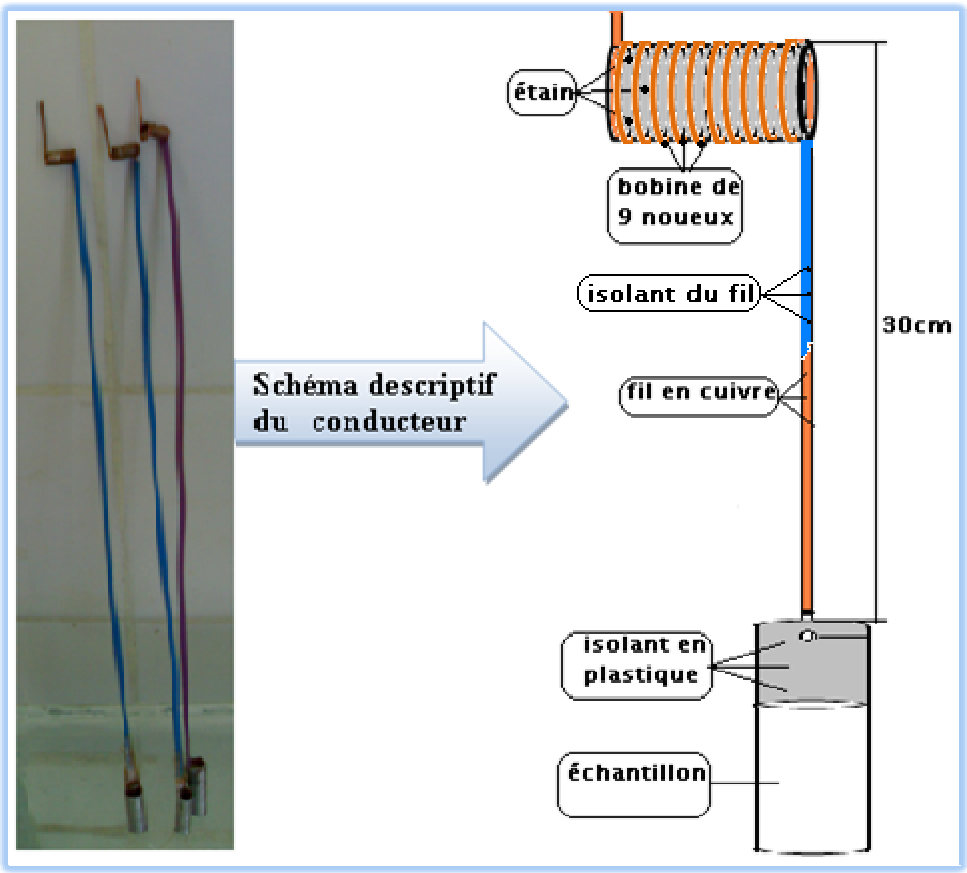


Figure III.4: Les échantillons avec les conducteurs.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II. Analyse microscopique des échantillons:

La connaissance de la structure métallurgique de l'alliage à étudier est un point essentiel pour la compréhension des divers phénomènes intervenant dans le processus de corrosion. Les techniques disposées pour cette partie sont : le microscope optique et le microscope électronique à balayage (MEB).

II.1. Observation à l'aide de microscope optique:

Avant de passer à l'observation de la surface des échantillons non corrodés au microscope, nous avons préparé les échantillons par les techniques suivantes:

Nous avons découpé à partir des tubes des portions rectangulaires d'environ $1cm^2$, puis on les a aplaté soigneusement, nous les avons enrobé dans la bakélite, nous avons poli les échantillons à l'aide d'une polisseuse avec différent papiers abrasifs **Sic** de grade de : 320 ; 500 ; 1200 et 4000, puis nous les avons rincé avec de l'eau distillé suivi de l'alcool (éthanol), après ça on les a laissés sécher à l'air libre. La figure suivante montre les échantillons pour la microscopie :

Figure III.5: Les appareils utilisés (enrobeuse et la polisseuse).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Les échantillons préparés sont présentés dans la figure III.6 :

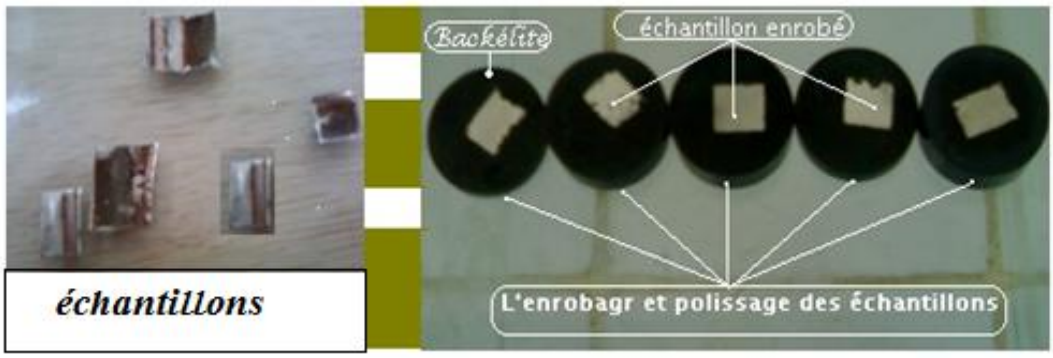


Figure III.6: Echantillons préparés.

Pour mettre en évidence la répartition des phases de l'alliage nous avons fait une attaque chimique à l'aide de réactif de **Keller**, de composition : 2,5ml d'acide nitrique, 1,5ml d'acide chlorhydrique, 1ml d'acide fluorhydrique et 95ml d'eau. La durée de l'attaque est comprise entre cinq à dix secondes puis on les lave à l'eau et on laisse sécher à l'air libre. Après avoir réalisées toutes ces opérations on passe à l'observation.

II.2. Observation à laide de microscope électronique à balayage (MEB):

Cette technique nous a permet de visualiser et d'étudier la topographie des surfaces du matériau avant et après immersion. Le microscope utilisé a une résolution de l'ordre de 50 nm ainsi il permet l'observation des détails relatifs aux surfaces d'un métal comme les cavités de corrosion [24]. Du fait du balayage de la surface à l'aide d'un faisceau d'électron et à différent grossissement. Le microscope que nous avons utilisé est de marque Philips ESEM XL30 à filament de tungstène ceci est couplé à un système complet de microanalyse par dispersion d'énergie (EDS X). La figure suivante montre la morphologie de cet appareil.

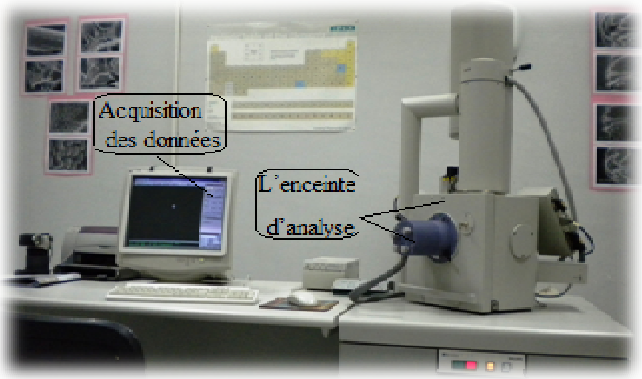


Figure III.7: Microscope électronique à balayage (MEB).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Les échantillons avant immersion ont été préparés selon deux manières distincts :

Ø Avec polissage:

On prépare des échantillons de petite taille d'environ de 1 cm^2, puis on va les enrober et polir aux différents papiers abrasifs de grade allant de 320 ; 500 ; 1200 et 4000 après le rinçage avec l'eau distillé et séchage, on passer à l'visualisation aux différents grossissements à l'aide de l'appareil cité au dessus.

Ø Sans polissage:

Dans cette partie les échantillons ne vont pas subir de déformation mécanique susceptible de modifier l'état métallurgique de la surface du matériau. Ces échantillons ont été destinés pour l'étude de la morphologie de la corrosion.

III. Le champ magnétique et la forme de l'aimant:

Le champ magnétique est produit à l'aide d'un aimant permanant de forme cylindrique (figure III8).

Figure III.8: L'aimant utilisé. [22]

IV. Analyse électrochimique:

L'analyse électrochimique, reste un paramètre important pour évaluer le comportement à la corrosion, cette technique consiste à établir un dispositif de mesure bien spécifique.

Dans notre présente étude la démarche est structurée en deux parties fondamentales : la première est consacrée à l'évolution de la corrosion libre, en fusant suivre la variation de potentiel et du courant en fonction le temps d'immersion, et dans la seconde partie qui

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

consiste à tracer la variation de courant I en fonction de potentiel E (potentiodynamique), afin que on puisse tirer de diverse paramètre qui caractérise la réaction électrochimique.

IV.1. Evaluation de la corrosion libre en fonction de temps d'immersion:

Dans notre démarche expérimental, consacrée éventuellement à interpréter la variation des paramètres de la corrosion libre au cours de temps, pour cela nous avons adopté un mécanisme de travail bien spécifique à l'alliage AlMn1. Dans la suite de ce paragraphe nous décrivons attentivement la préparation de notre expérience.

On prend quatre enceintes en verre de forme cubique, on fait immerger les échantillons préparé précédemment dans une cellule électrochimique contenant soit de l'eau ou bien du glaceol en présence et absence de champs magnétique. A l'aide d'un multimètre, on mesure la différence de potentiel et la densité du courant de corrosion par rapport à une électrode de référence Ag/AgCl, afin d'évité l'influence de la corrosion bactérienne on isole notre enceinte et on laisse les échantillons à l'état libre et nous fusant enregistrer l'évolution du courant et du potentiel au cours de temps, après chaque heure on prend cinq mesures par paramètres puis on calcule la moyenne. Cette évolution est suivie pendant une durée un mois. La figure III.9 la manip.

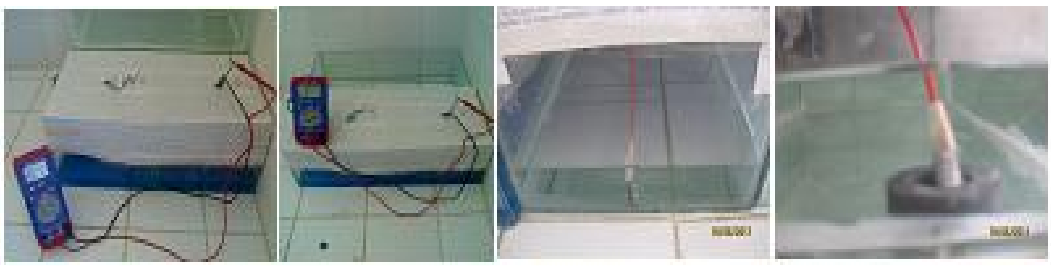


Figure III.9: cellule électrochimique pour la mesure du potentiel et du courant de la corrosion libre.

IV.2. tracer des courbes de la densité de courant en fonction du potentiel de corrosion:

Dans notre démarche expérimentale, qui consiste à évaluer la variation de la densité du courant en fonction du potentiel de corrosion nous nous sommes rapproché du laboratoire (du département de métallurgie) de l'Ecole Polytechnique supérieur d'Alger afin de réaliser les essais potentiodynamiques.

Toute technique d'analyse électrochimique requiert un dispositif expérimental adapté et bien précis est adapté. Le dispositif de mesure comprend une source de potentiel

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

variable reliée à une cellule électrochimique à quatre électrodes (électrode de travail représenté par un échantillon d'AlMn1, une électrode de référence à calomel et deux électrodes auxiliaires en graphite.

IV.2.1. Potentiostat:

L'appareil ayant à la fois un rôle d'imposition de la tension ou de courant et de contrôle de celle-ci, un dispositif est basé sur la boucle d'asservissement où on trouve trois amplificateurs opérationnels : le premier joue un rôle de comparateur entre la valeur de consigne de tension qu'est la différence entre l'électrode de travail et l'électrode de référence de référence avec la valeur réelle ; le deuxième joue un rôle de suiveur (inverseur) de tension et le troisième est un convertisseur courant-tension. Le schéma ci-dessous interprète ce mode de fonctionnement d'une manière explicite :

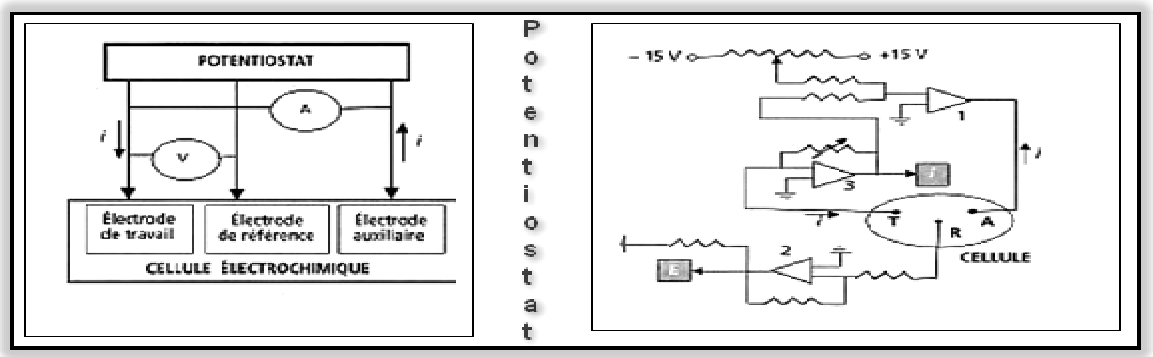


Figure III.10: Le principe fonctionnement d'un potensiostat utilisé. [9]

A partir de ce dispositif nous pouvons extraire l'intensité de courant en fusant varier le potentiel d'un intervalle prédéfinie ceci dans le but d'avoir le courant de corrosion Ic. Dans la figure III.11 illustre les différents organes de l'appareil utilisé :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

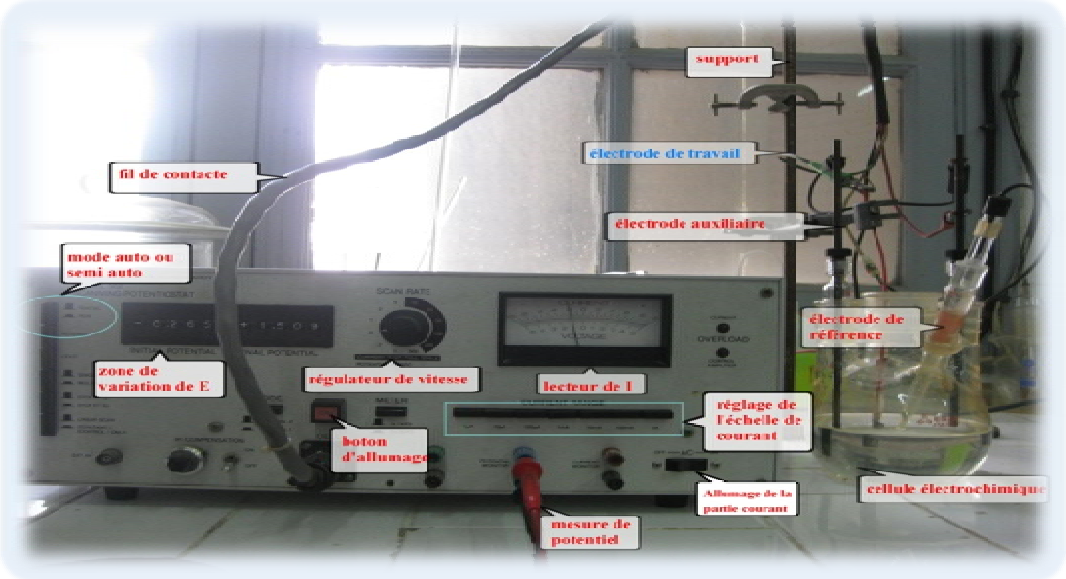


Figure III.11: Potentiostat.

IV.2.2. La cellule électrochimique:

La cellule dans laquelle nous avons réalisé notre expérience présente une forme spécifique, cette instrument est conçue pour ce type de réaction, elle est en verre constituent de plusieurs entrées pour les différentes électrodes (figure III.12).

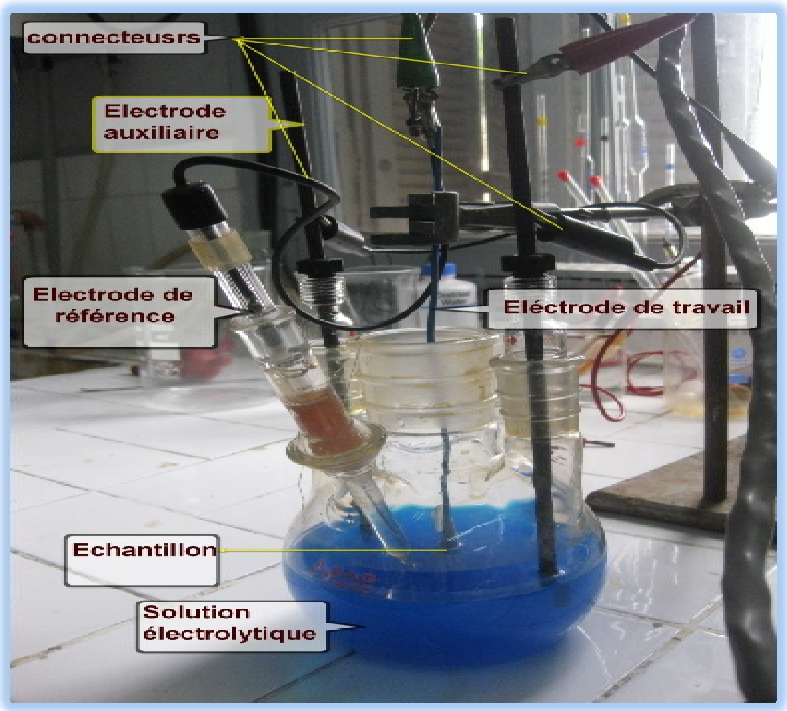


Figure III.12: Cellule électrochimique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III.2.3 Electrodes:

Ø Electrode de référence :

L'électrode de référence utilisée est une électrode de calomel. Cette électrode est représentée par la figure III.12.

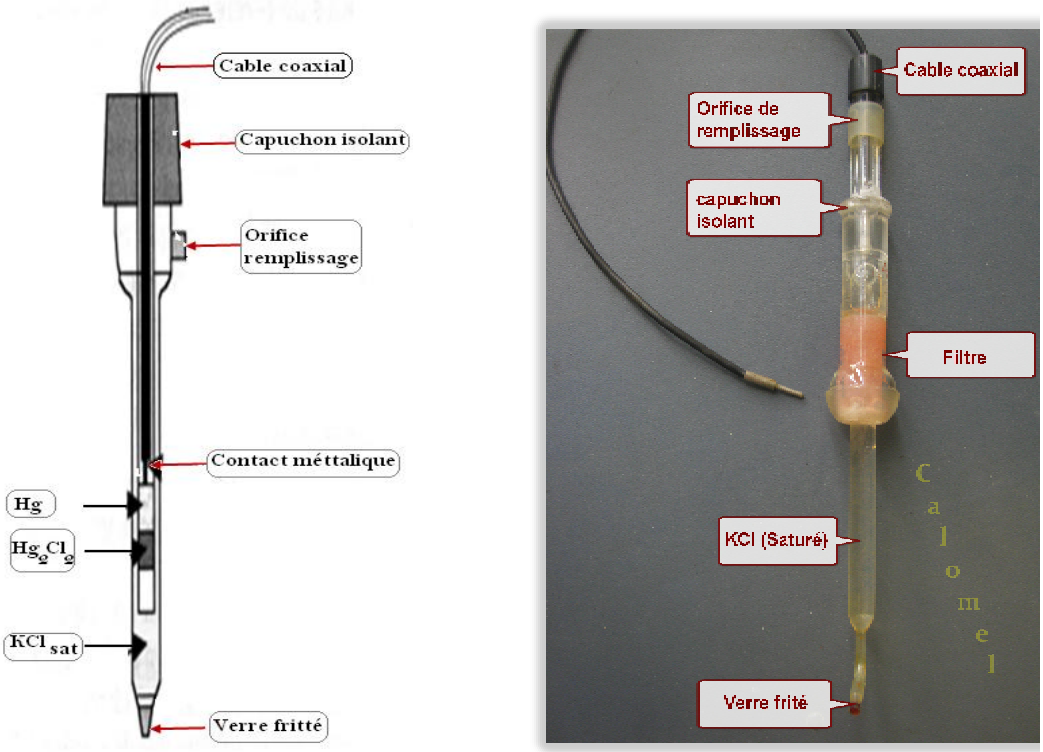


Figure III.12: Electrode de référence à calomel.

La solution sursaturée en chlorure de potassium à pour but d'améliorer la sensibilité de mesure par effet de contacte, afin de pouvoir solliciter l'électrode de travail par une différence de potentiel désirée, à une distance de séparation de l'ordre de quelque dizaine de millimètre.

Ø Electrode auxiliaire:

Appelée aussi contre électrode. Selon le sens de branchement du dispositif d'alimentation. L'incorporation de cette électrode dans la cellule électrochimique a pour objectif d'améliore la lisibilité de courant car il joue toujours un rôle symétrique de celui de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

l'électrode de travail. [9] Cet outil en graphite présente une forme crédible et ces différents composants sont illustrés dans la figure III.14.

Figure III.14: Electrode Auxiliaire.

Ø **Electrode de travail:**

L'électrode de travail est l'alliage AlMn1, sa composition exacte est donnée par le tableau III.1.

Si%	Fe%	Cu%	Mg%	Mn%	Cr%	Zn%	Autre	Al%
0,5	0,7	0,1	0,3	0,9-1,5	0,3	0,2	0,15	Reste

Tableau III.1: Composition chimique de l'alliage AlMn. [4]

Après avoir jeté un aperçu sur l'ensemble des outils à utiliser, nous avons immergé les échantillons décrets précédemment dans deux solutions distinctes (l'eau potable et glaceol) en présence et en absence de champ magnétique.

Huit échantillons du même l'alliage (AlMn1) ont subi des contraintes physico-chimiques (immersion dans une solution en présence ou en absence de champ) durant un mois, dans une cellule parallépipéde en verres. Pour transporter ces électrodes dans les solutions susciter pour complété le reste des essais à l'Ecole polytechnique, nous avons utilisés des bouteilles en plastique (isolante). La figure III.15 illustre ces.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure III.15: Les échantillons avec immersion sans et avec champ.

Après avoir évoqué l'ensemble des dispositifs utilisés durant notre travail. Durant les essais potentiostaques nous avons varié la différence de potentiel entre -1200mV est 2800 mV avec une vitesse de 2 mV/s, en enregistrant l'intensité de courant pour des incréments de 50mv celle-ci sont réduites quand la tendance de courant il tend vers une valeur nulle.

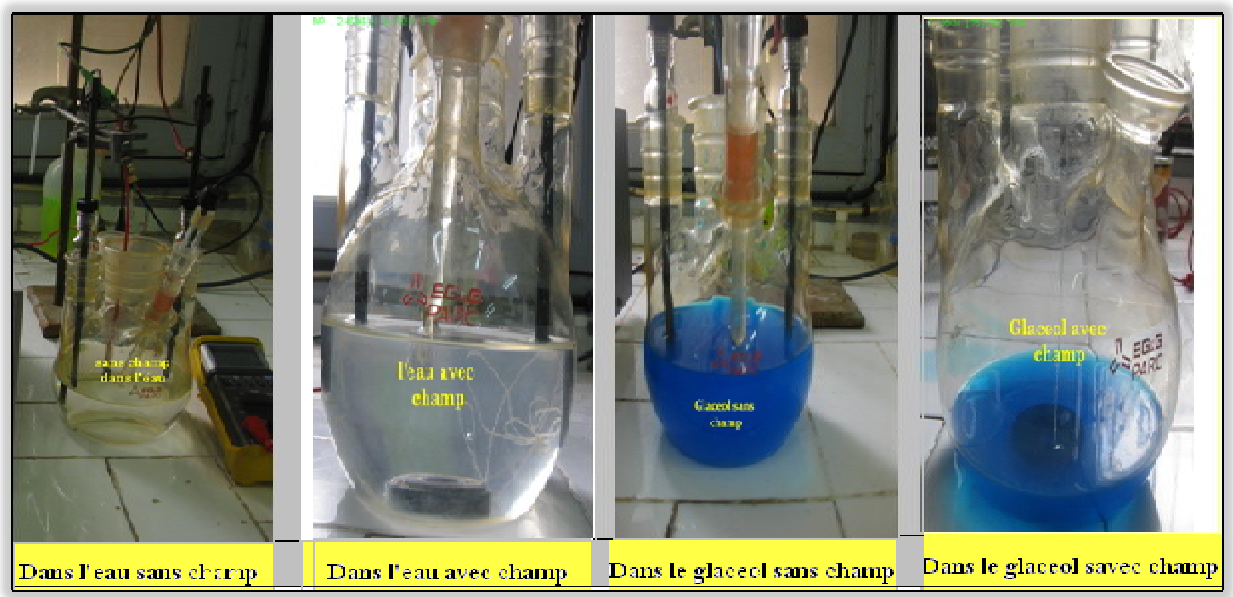


Figure III.16: Analyse électrochimique en présence et l'absence de champ.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sachant que notre échantillon est un cylindre creux de surface (S= 1430,584 mm^2), donc la densité de courant qui corresponde une surface de 1cm. Les résultats obtenues nous ont permet de tracé les courbes potentiodynamique (variation de la densité de courant i en fonction de la différence de potentiel).

V. Analyse des propriétés Mécaniques de l'alliage AlMn:

V.1. Essai de dureté:

Par définition la dureté d'un matériau est la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur (par exemple la pointe de la bille). La mesure de la dureté d'un matériau, permet d'avoir une idée sur caractéristique mécanique et sur les contraintes surfacique du matériau. Celle-ci peut nous renseigner la direction de la corrosion.

Plusieurs essai met en évidence pour ce type d'analyse parmi les plus utilisés on trouve: l'essai Rockwell, Vickers et Brinell, ce dernier est le plus adopté pour les métaux sa spécificité est relative à la forme qu'est caractérisée par l'empreinte faite par indentation sous une charge donnée pendant 15 secondes. L'empreinte est formée d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. Les diagonales de l'empreinte permettent de calculées la dureté. [26]

Dans cette présente partie qu'est consacrée, à l'évaluation de la dureté de notre alliage (AlMn1), après avoir subit l'enrobage et le polissage aux différents papiers abrasif de grade allant, 320 ; 500 ; 1200 et 4000 nous avons mesuré la microdureté à l'aide du microduremètre de l'entreprise nationale pour la production des produits en inox de bordj menaillene **(B.C.R**). Cet appareil est de marque AMSLER et de type V-testor 2 et avec un grossissement allant jusqu'à 100µm. les différents organes qui caractérise cet outil est présentée dans la figure III.17.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

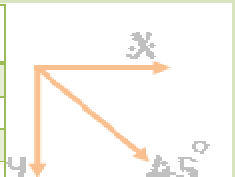
Figure III.17: Microduremètre.

La mesure de la dureté par ce mode d'appareillage, consiste à implanter un pénétrateur (de type Vickers pour les métaux on trouve aussi l'échelle Knope utilisée généralement pour les matériaux fragiles comme les verres et polymères) avec un chargement de faible intensité (10g ; 20 ; 50g…).

À l'aide de l'essai **Vickers** on a effectué quinze empreintes dans trois directions différentes (selon X ; Y et 45°), sous un chargement de 50g force. La figure III.18 illustre les résultats de dureté enregistrés dans les trois directions distinctes.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Nombre D'essai	selon X (HV)	selon Y (HV)	selon 45° (HV)
1	35,6	35	35,6
2	28,3	38,4	36,4
3	35	38,2	36,4
4	25,3	39,2	35,6
5	34,3	38,6	34,6
6	35	36,4	35,6
7	37,8	35	37,8
8	37,8	35,6	35,8
9	38,6	32,6	32,3
10	38,6	37,1	28,8
11	32,2	38,6	29,3
12	28,5	32,4	34,6
13	32	31,2	35,2
14	36,5	37,6	36,4
15	39,5	39,2	35,5



Essai Microdureté

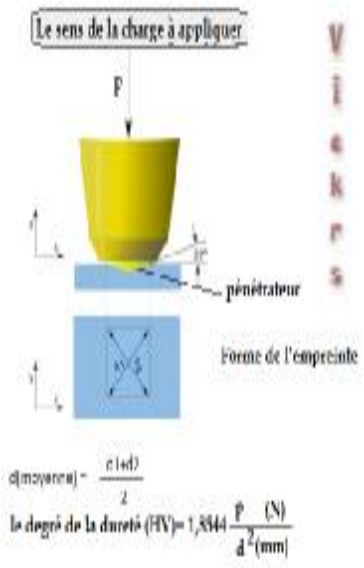


Figure III.18: Microduretés enregistrés selon les directions X, Y, 45.

V.2: Essai de traction:

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces**,** polymère, céramique et métallique**.** L'essai de traction est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. La figure ci-dessous montre la forme d'une éprouvette normalisée par des organismes spécialisé dans le domaine parmi: (norme afnor et européenne): [25]

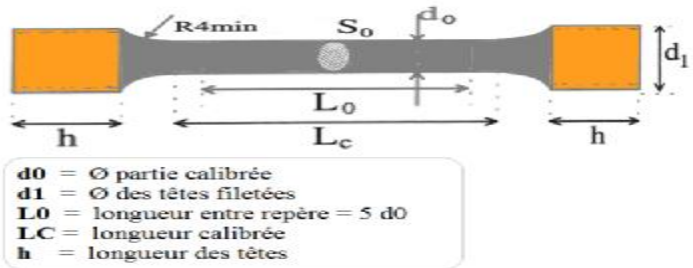


Figure III.19: Eprouvette de traction normalisée

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dans notre cas nous disposons des éprouvettes sous forme tubulaire de diamètre extérieur et intérieur sont respectivement, do=8,46mm et 7,66mm. Avec un épaisseur de faible taille (0,8mm) est reste un peu compliqué pour réaliser une éprouvette comme celle qu'est définie préalablement, une autre forme est adoptée de sorte que à converger ces dimension à celle d'une éprouvette plate dont on prend la longueur entre repère comme une longueur à respecter. Pour éviter la déformation des ces tubes aux niveaux des mors de fixation, on ajuste des morceaux de bois de forme cylindrique et de longueur de 4omm dans chaque extrémité. La figure III.20 montre cette description:

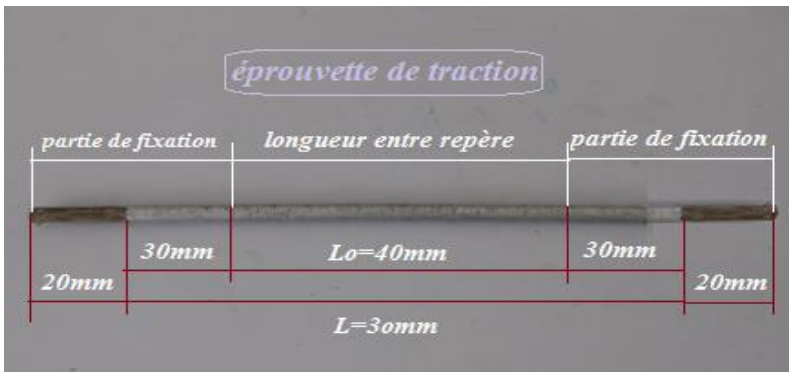


Figure III.20: Dimension de l'éprouvette de traction.

A l'aide d'une machine de traction de marque Ibertest à hydraulique de capacité 100KN pilotée par un ordinateur de laboratoire sciences des matériaux de l'université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou nous réalisons notre essai. La figure III.21 montre ce mode d'appareillage:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure III.21: Machine de traction

On a découpé cinq éprouvettes de l'alliage AlMn sous la forme désirée, l'une à l'état libre et les autres immergées pour une durée de dix jours, dans deux solutions différentes (l'eau et glaceol) en présence et en absence d'un champ magnétique. Avec une vitesse de 0,5mm/min, on suit la variation de la force et fonction de l'allongement L jusque à la rupture. Les résultats de l'essai sont réquisitionnés sous forme d'un fichier Excel, qui renferme l'ensemble des données.

Conclusion

Dans cette partie expérimentale nous sommes confrontés à plusieurs essais dans le but de suivre l'évolution des différentes caractéristiques physico-chimiques de l'alliage AlMn1.

L'exploitation de tous ces résultats recueillis lors des essais, reste un paramètre important pour identifier les principaux facteurs qu'intervient lors de processus de la corrosion. Ceci est abordé explicitement dans le chapitre IV.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Chapitre IV

Résultats et Interprétation

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Les résultats de caractérisation de l'alliage AlMn1 utilisé dans les radiateurs de chauffage d'automobile sont présentés dans ce chapitre. Plusieurs techniques ont été utilisées : des essais électrochimiques (en présence d'un champ magnétique permanant et en absence de celui-ci), des essais mécaniques et une caractérisation structurale de l'alliage. Ceci nous permet d'évaluer la relation entre les propriétés chimiques et les propriétés mécaniques.

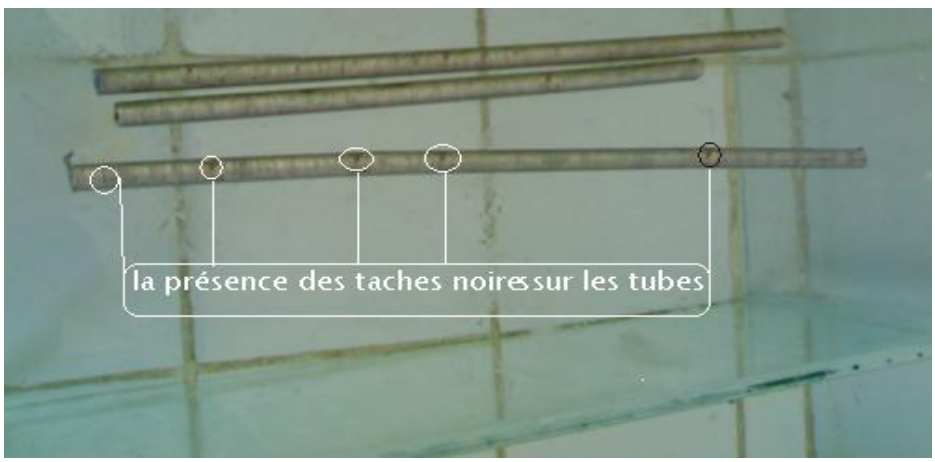
L'analyse et l'interprétation de tous les résultats recueillis s'appuient sur des concepts et des théories qui évoquent l'aspect physico-chimique de la corrosion et de ses propres effets sur les matériaux métalliques en particulier l'aluminium et ses alliages, ainsi notre raisonnement se base sur l'évaluation des différents paramètres induisant dégradation chimique de l'alliage AlMn1 sous forme de tubes mis en service dans un radiateur d'automobiles, afin de rassemblé le maximum de données permettant l'interpolation des propriétés adéquates correspondant à une longue durée de vie.

Dans la suite de ce chapitre qu'est consacré éventuellement à l'analyse des divers résultats obtenus lors de nos investigations dans le but de ralentir le phénomène de dégradation électrochimique de l'alliage (AlMn1).

I- Analyse Macroscopique et Microscopique de l'alliage AlMn1 : Dé l'extraction des tubes de l'alliage AlMn1 nous avons effectuées :

I.1 Une analyse macroscopiques à l'œil et la loupe :

afin de sélectionner les parties de tubes n'ayant pas déjà subies une dégradation chimique. On constate juste après l'enlèvement des tubes de l'alliage AlMn1 la présence des taches de différentes formes et couleur, noir est la plus dominante, celle-ci sont répartie quasiment sur toute la périphérie externe des tubes. Ces taches représentent la crasse, c'est le résultat de la circulation des poussières et des fumées des huiles et carburants dans le bloc moteur.



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure IV-1 : Les tubes justes après enlèvements.

Dans la partie intérieure de ces tubes on observe dans certains endroits de la direction de soudage un enchainement des oxydes de forme circulaire noir au centre ceci représente les piqûres, ce phénomène peut être expliqué premièrement ; par le fait que dans ces endroits la composition du matériau varie, deuxièmement en raison de la rugosité prenant place après pliage et soudage troisièment aux cavité formée après une longue durée de circulation et stagnation du fluide refroidissement.

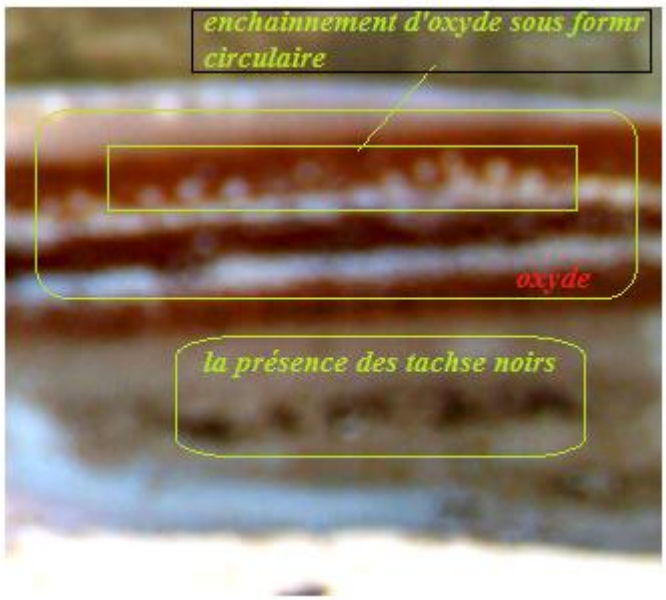


Figure IV-2 : L'oxyde à l'intérieur des tubes.

Pour approfondir notre investigation nous avons observé le matériau au microscope échantillon optique et au microscope électronique balayage. Avec et sans polissage mécanique.

I.2. Une analyse microscopique, d'abord à l'aide du microscope optique et puis avec le microscope électronique à balayage. Nous a permet de recensé la composition en phase de l'alliage. Celle –ci nous à permet de prévoir le mode de corrosion pouvant se produire, cette analyse nous a permet de détecter de types de particules intermétalliques distribué d'une manière hétérogène, d'après la recherche bibliographique la grise est $(Mn,Fe)_3\ SiAl_{12}$ et la blanche est $(Mn,Fe)\ Al_6$.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

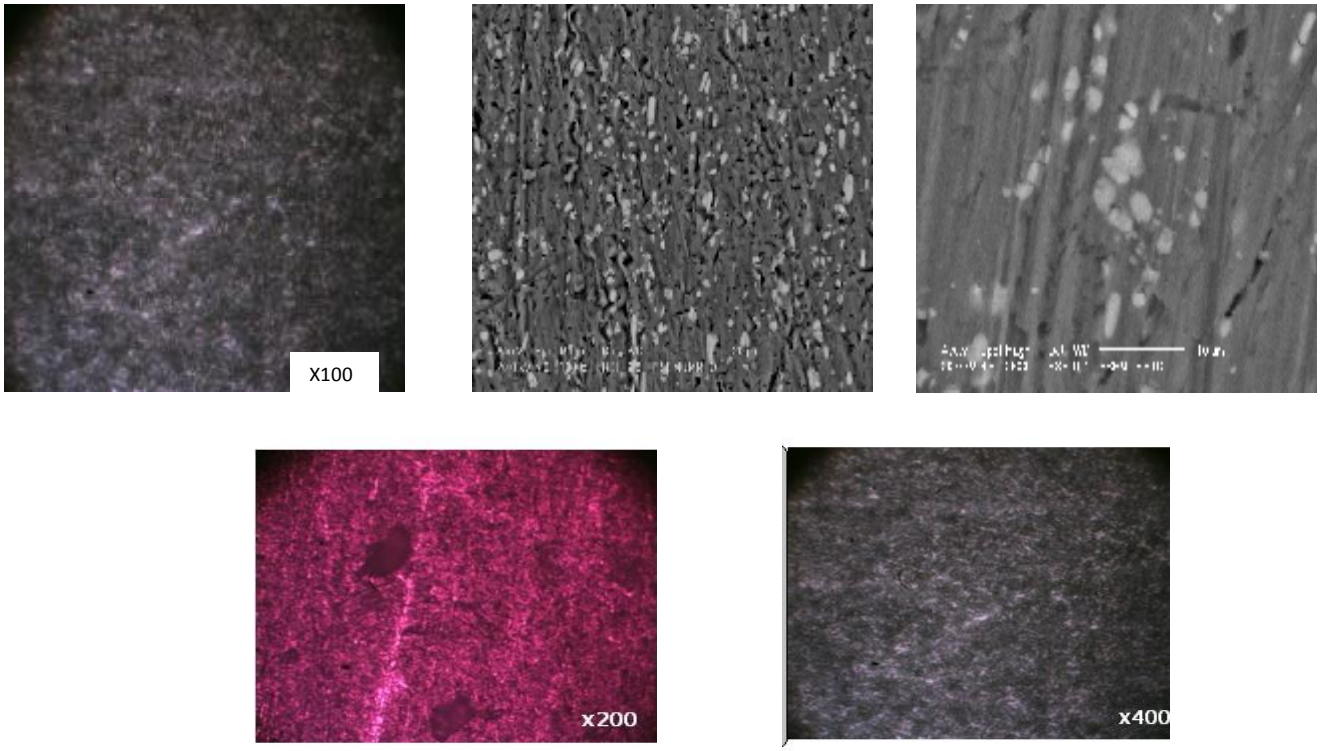


Figure VI.3 Microstructure de l'alliage AlMn1 : (a) obtenue par le microscope optique, (b),(c) obtenues par M.E.B

Les particules intermétalliques de distribution hétérogène ont été formées durant les traitements thermomécaniques subis par l'alliage d'aluminiums AlMn1, tel que le recuit d'homogénéisation laminage à chaud et à froid, le potentiel électrochimique standard de ces particules est plus élevé que celui de la matrice. La différence de potentiel entre les particules intermétalliques et la matrice dans naissance aux micropiles au sein du matériau, d'où une sensibilité à la corrosion localisée par piqûres.

Les microstructures des échantillons polis montrent que le polissage mécanique arrache les particules intermétalliques induit des microcrevasses (figure IV.4). Donc si on veut faire une analyse exacte de la corrosion de l'alliage AlMn1, l'examen de la corrosion ne doit pas se faire après polissage mécanique, si non les résultats obtenus ne seront pas significatif.

Il est à noter aussi que le déroulement du tube de l'alliage AlMn1 modifié les propriétés mécanique et électrochimique du matériau d'où l'analyse de la corrosion doit se faire sans déroulement des tubes.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

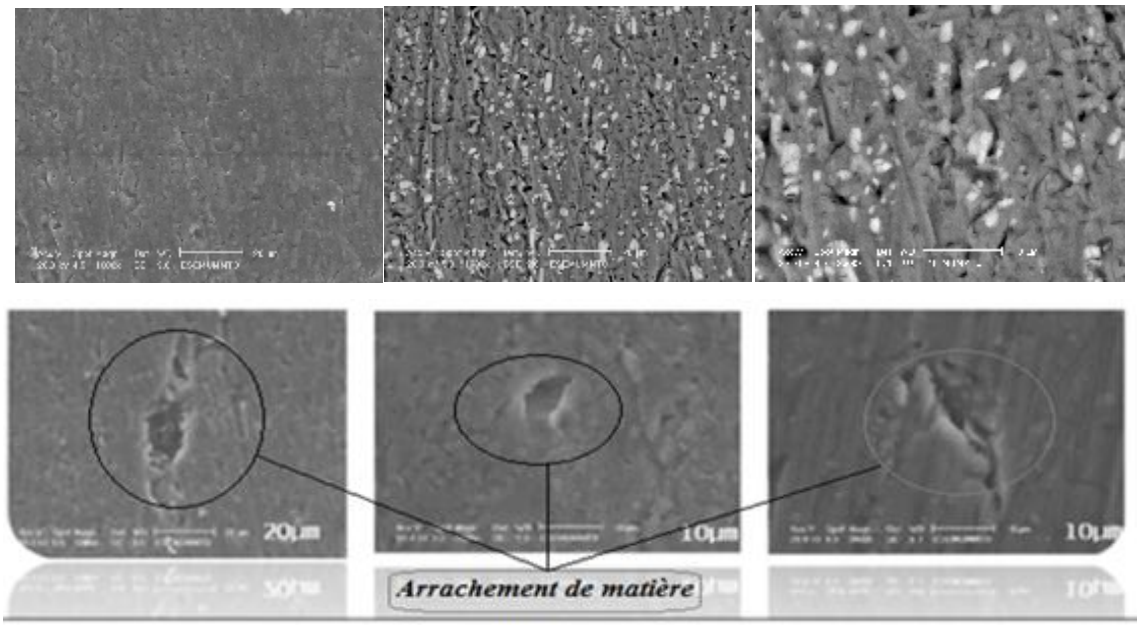


Figure VI.4 : arrachement des particules intermétalliques suite au polissage mécanique de l'allige AlMn1

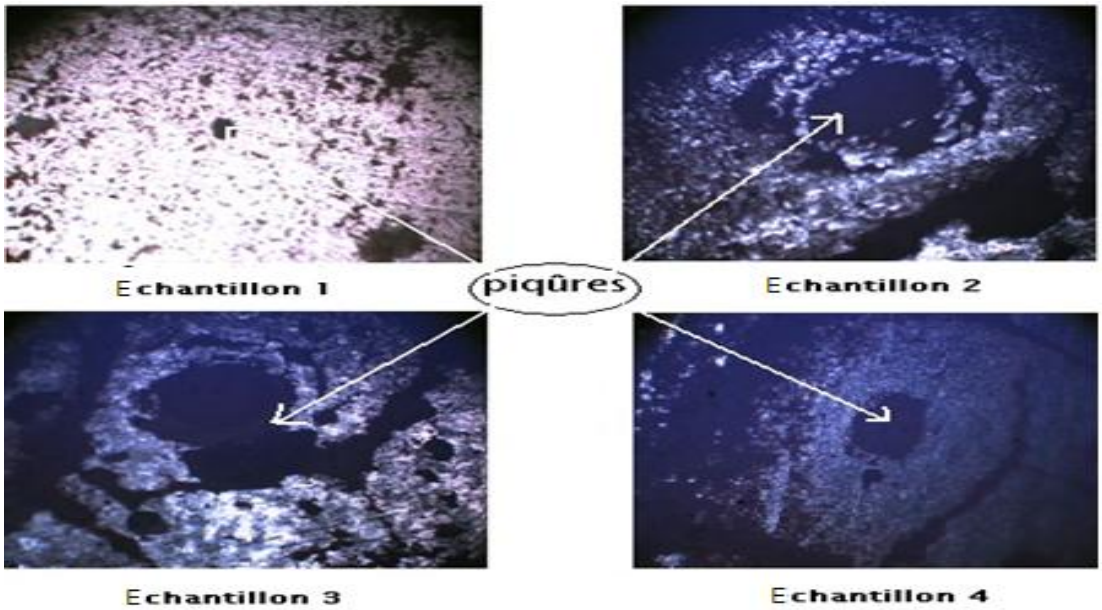
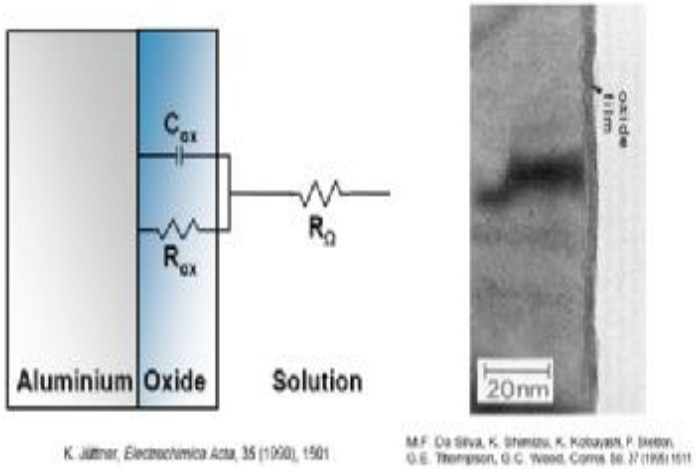


Figure IV-5: images présentant les piqûres dans l'alliage AlMn1 après mise en service.

Cependant la présence de plusieurs phases et/ou des microporosités à la surface induit la formation des micropiles entrainant une dissolution du matériau d'où le mécanisme et la cinétique de la corrosion change (Figure IV.6, IV.7).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



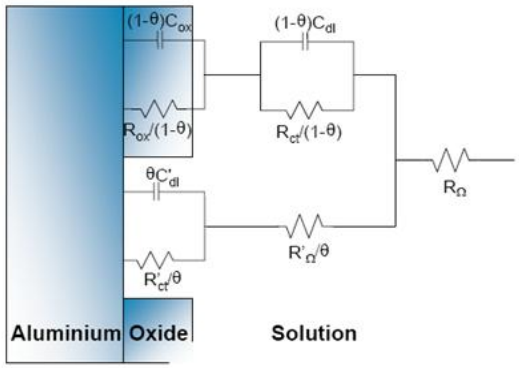


Figure IV.6 Effet de la présence des particules intermétalliques et des porosités à la surface sur la morphologie et la cinétique de la corrosion [26].

Nous avons analysez la morphologie de corrosion des échantillons après 10 jours de corrosion dans l'eau et le glaceol et aussi en présence et en absence de champ magnétique.

Il semble que la dégradation chimique de la surface de l'alliage AlMn1 dans une solution d'eau potable en absence de champ magnétique plus importante (Figure VI.7). Ce résultat est attribué au fait que la composition du glaceol contient un (ou plusieurs) inhibiteur de corrosion. Ce dernier prend la position intermédiaire entre la partie corrosive de la solution et le matériau, et influe sur les réactions anodiques en les ralentissant.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

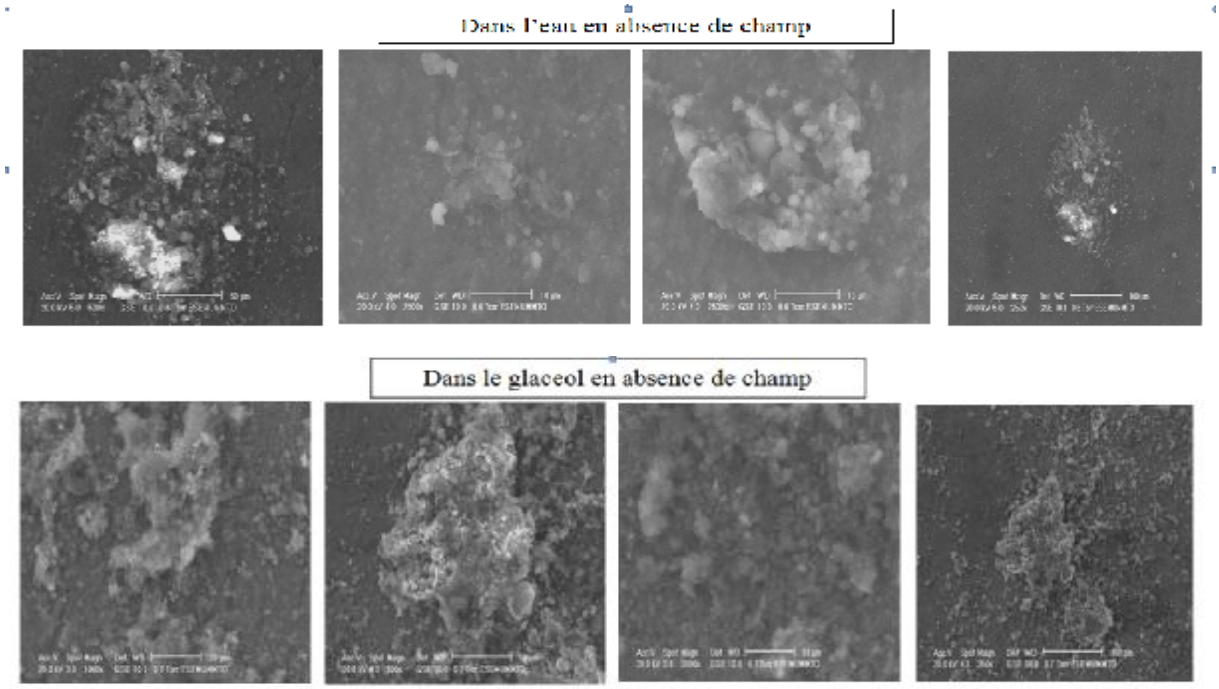


Figure VI.7 : La morphologie de la corrosion après 10 jours d'immersion dans l'eau et le glaceol en absence du champ.

L'observation de la corrosion après une longue durée dans le glaceol de l'alliage non poli révèle que le type de corrosion observé sur l'alliage AlMn1 est une corrosion dirigé par piqûre (Figure VI.8).

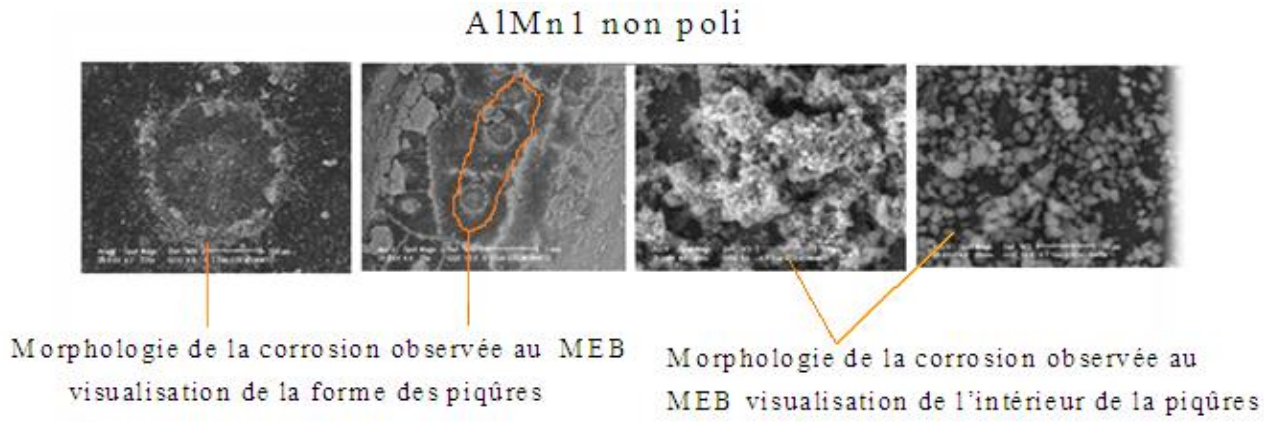


Figure IV-8 : Observation microscopique des échantillons sans polissage après mise en service de longue durée dans une solution de Glaceol.

Les expériences ont montrés que la corrosion en présence ou bien en absence de champs magnétique permanant est différente et il semble que la présence du champ magnétique permanant amplifie le phénomène de la corrosion, après 10 jours d'immersion (Figure VI.9).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

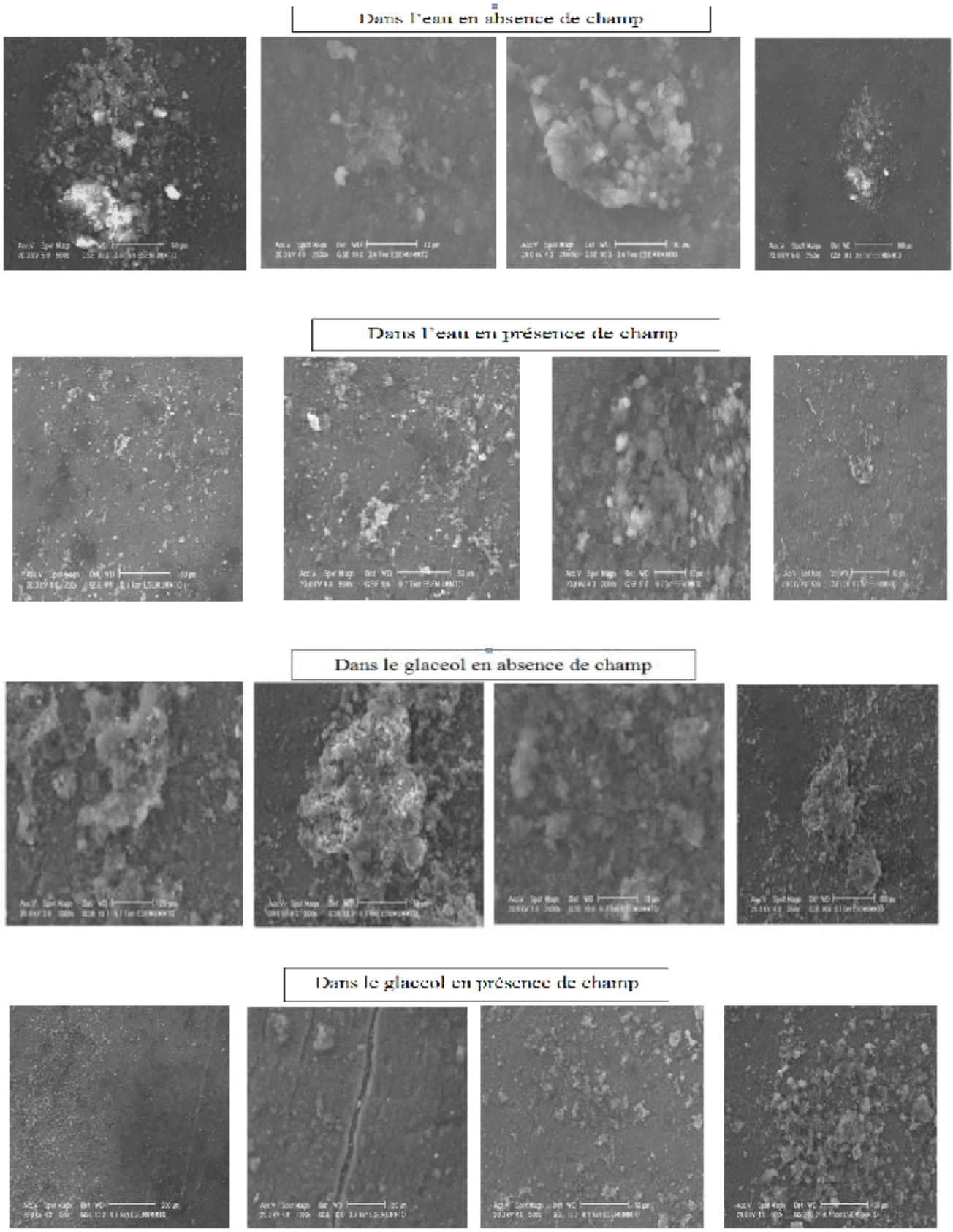


Figure IV.9 : Morphologie de la corrosion de l'alliage AlMn1 en présence et en absence de champ magnétique dans l'eau et le glaceol.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II. Analyse de la corrosion de l'alliage AlMn1 par les techniques électrochimique :

Dans cette partie on a exploité l'ensemble des phénomènes se produisant à la surface de l'alliage AlMn1, dans de l'eau potable ou du glaceol commercialisé en Algérie comme électrolyte, en présence et en absence du champ magnétique.

Cependant les mesures des paramètres électrochimiques permettent une meilleure compréhension des phénomènes et des réactions électrochimiques qui manifestent entre une l'électrode de travail (l'alliage AlMn1) et un électrolyte (le glaceol ou l'eau potable). Dans la première étape nous avons enregistrés la variation de potentiel et de courant de la corrosion libre en fonction du temps sur plusieurs semaines.

II. 1. Essai de la corrosion libre en fonction du temps d'immersion :

- **Le potentiel de la corrosion libre :**

La corrosion libre est une dégradation purement naturelle du matériau en contact avec une solution, le suivi de celle-ci nous renseigne sur l'évolution phénomène de corrosion et de passivation au cours du temps, nous permet de déterminé la durée du régime actif et le temps nécessaire pour obtention du régime stationnaire.

Dans notre cas nous avons effectué des mesures de potentiel et d'intensité de courant de la corrosion libre pendant une durée d'environ un mois jours d'immersion, dans les solutions d'eau potable et glaceol, en présence et en absence de champ. La figure VI.10 représente la variation du potentiel de la corrosion libre, de l'alliage AlMn1, en fonction du temps dans l'eau potable et le glaceol, en présence et absence du champ magnétique. Cette figure montre clairement que le potentiel de la corrosion libre dans l'eau et dans le glaceol n'est pas le même, à l'immersion le potentiel de corrosion libre dans l'eau est inférieur au potentiel de la corrosion libre dans le glaceol. La cinétique de la corrosion dans l'eau est différente de la cinétique de corrosion dans le glaceol, ceci est dû à la présence des inhibiteurs dans le glaceol. La présence du champ provoque un changement dans la cinétique de la corrosion libre après une longue durée d'immersion dans le cas d'une solution glaceol Figure VI.11, l'effet du champ apparait dès le début d'immersion dans le cas d'une solution d'eau potable figure VI.12, cette différence est du à la présence des inhibiteurs de corrosion dans le glaceol. Une longue durée d'immersion dans les différentes solutions, en présence ou en absence du champ magnétique fait converger le matériau vers l'état stationnaire qui peut être le phénomène de passivation qui s'est installé, une couche d'oxyde partiellement imperméable se forme à la surface du matériau, le matériau devient plus noble. Pour une durée plus longue, la couche d'oxyde est fragilisée dans certains endroits de la surface du

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

matériau par les halogénures présent dans la solution, ainsi le matériau devient moins noble et le phénomène de passivation se désinstalle.

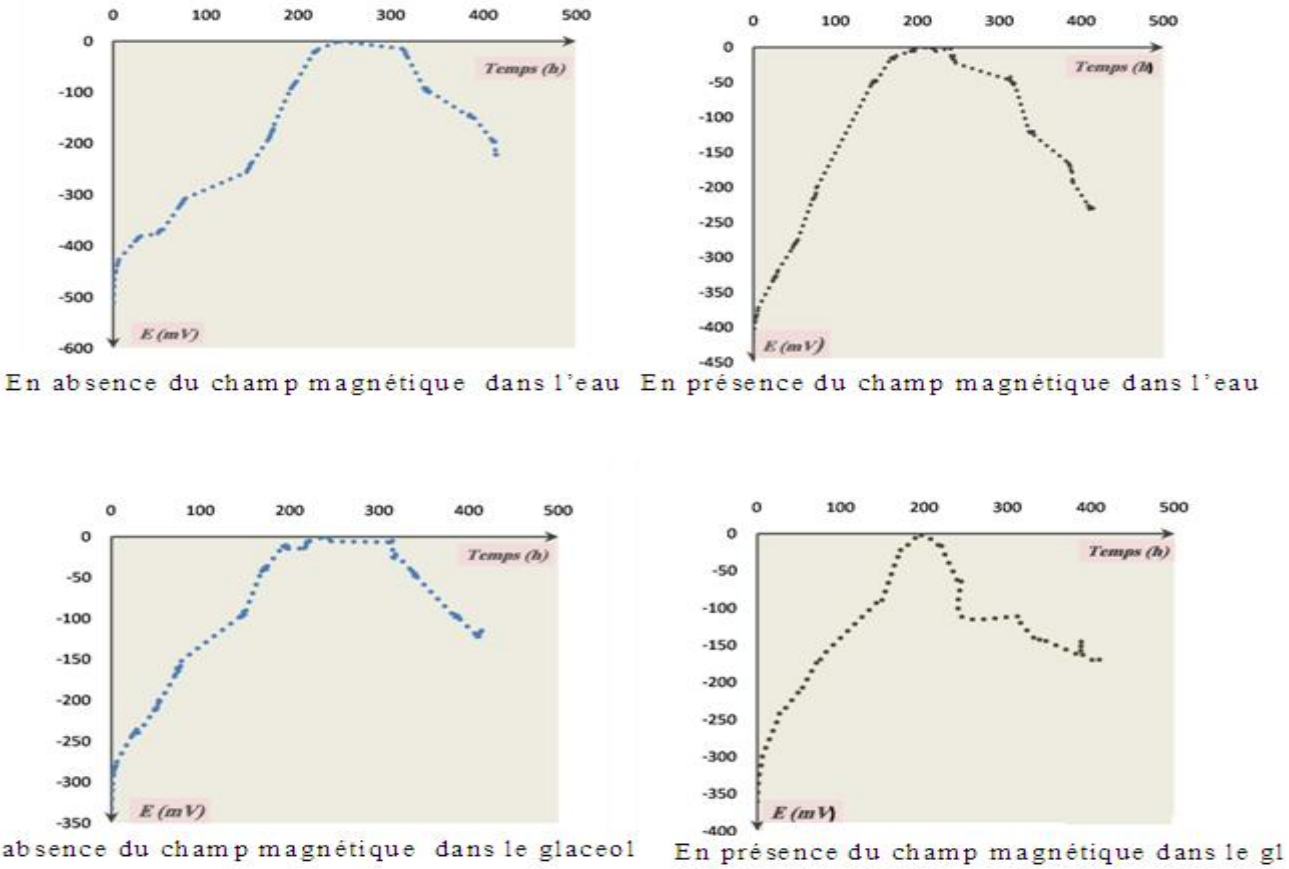


Figure VI.10 : le potentiel de la corrosion libre de l'alliage AlMn1, dans l'eau et dans le glaceol, en présence et en absence du champ magnétique.

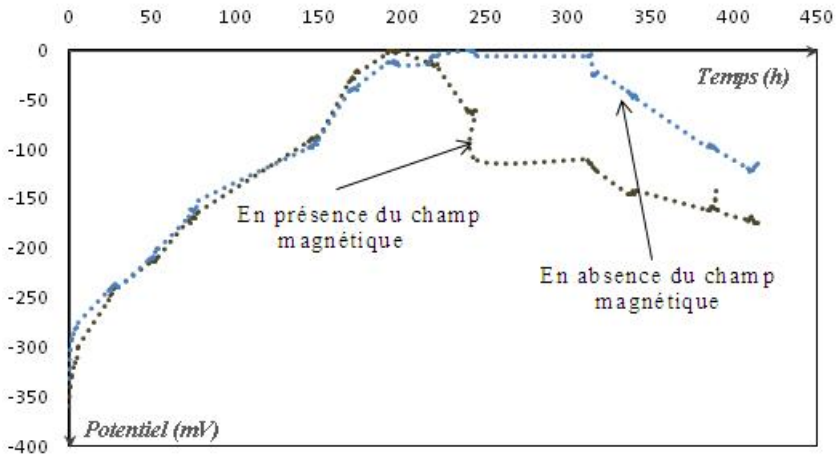


Figure VI.11 : effet du champ magnétique sur le potentiel de la corrosion libre dans le glaceol

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

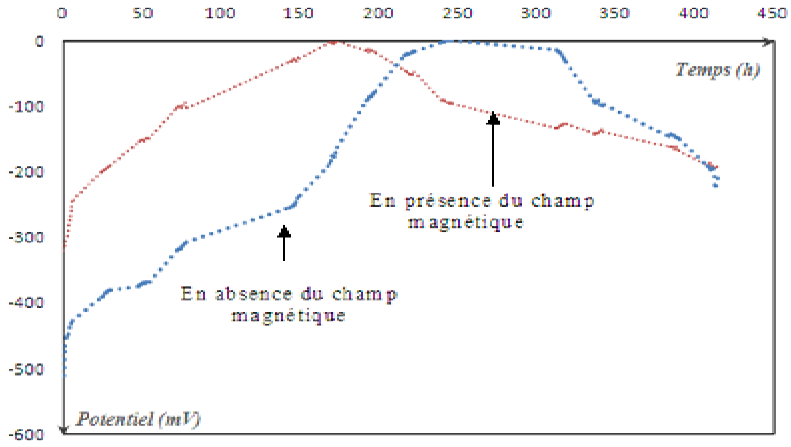


Figure VI.12 : effet du champ magnétique sur le potentiel de la corrosion libre dans l'eau

Ø Le courant de la corrosion libre :

Le champ magnétique permanant influe considérablement sur le courant de corrosion libre, la valeur absolue du courant diminue avec l'application du champ magnétique, ceci a été observé même dans le cas d'immersion dans l'eau potable. Donc la résistance à la corrosion augmente avec l'application du champ magnétique d'après la (Figure VI.13).

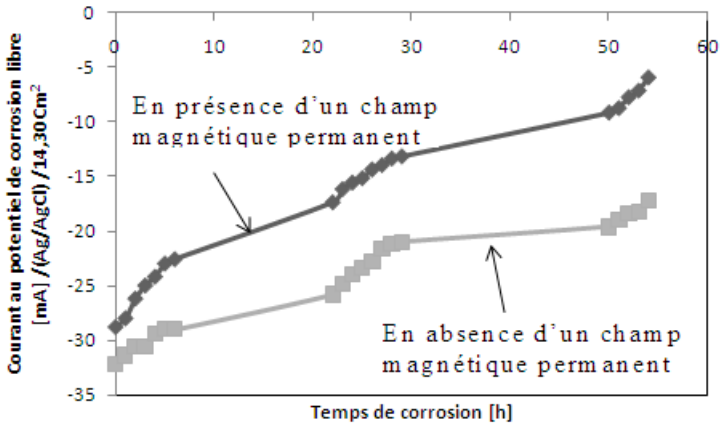


Figure VI.13 : Evolution du courant de la corrosion libre en fonction du temps d'immersion Dans le glaceol.

Ø Etude potentiostatique de la corrosion :

A l'aide d'un Potentiostat nous avons effectuer une étude potentiostatique qui consiste à révéler la valeur du courant de corrosion en fonction potentiel imposé variant de 1,2 V jusqu'à une valeur de 2,8V, avec une vitesse potentiel de 2mV/s , dans deux solutions (l'eau potable et glaceol) en présence ou bien en absence du champ magnétique permanant.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø Résistance a la polarisation :

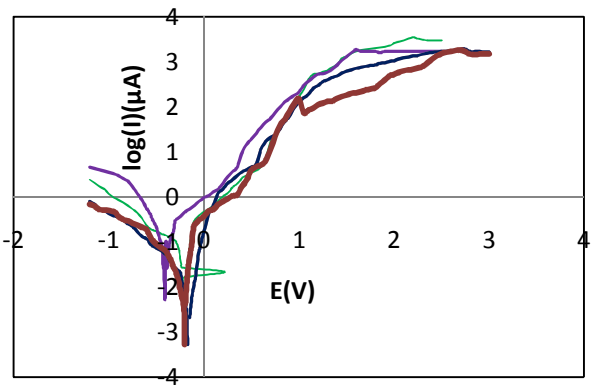
Les valeurs des résistances a la polarisation montrent que résistance à la corrosion la présence du champ diminue (Tableau VI. 1). La résistance à la polarisation dans eau est environ 6 fois moins que la résistance à la polarisation dans le glaceol, dans les deux cas, en présence du champ ou en absence de celui-ci.

R_P (résistance à la polarisation)	Temps d'immersion	Solution	Présence du champ	Absence du champ
20KΩ	1mois	Glaceol	X	
22KΩ	1mois	Eau potable	X	
170KΩ	0	Glaceol	X	
5KΩ	0	Eau potable	X	
26KΩ	1mois	Glaceol		X
52KΩ	1mois	Eau potable		X
200KΩ	0	Glaceol		X
4,5KΩ	0	Eau potable		X

Tableau IV. 1 : Evolution de la résistance à la polarisation en fonction de la solution et de la présence ou pas du champ magnétique.

Ø Analyse des courbes de polarisation :

Après juste après immersion ou bien un mois d'immersion dans le glaceol ou dans l'eau potable la présence du champ magnétique déplace les courbes de polarisation à gauche, augmente le courant anodique et le courant cathodique.



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure VI.14 : Courbes de polarisation après un mois de corrosion : bleu en absence du champ dans le glaceol, vert en présence du champ dans le glaceol, marron en absence du champ dans l'eau potable, violet en présence du champ dans l'eau potable

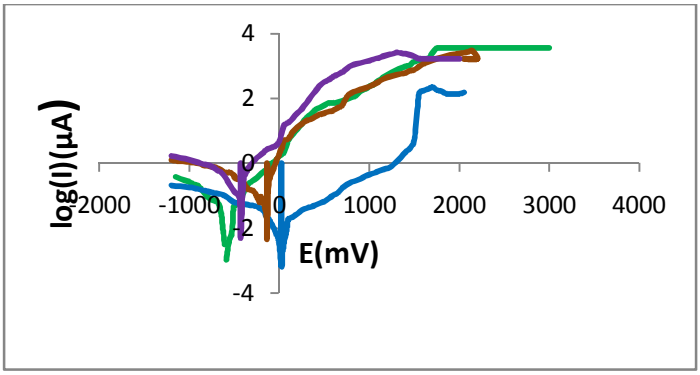


Figure IV.15 : Courbes de polarisation après au début d'immersion de corrosion : bleu en absence du champ dans le glaceol, vert en présence du champ dans le glaceol, marron en absence du champ dans l'eau potable, violet en présence du champ dans l'eau potable

III. Caractérisation mécanique

Ø Essai de dureté :

Nous avons mesuré la dureté de l'alliage AlMn selon les trois directions, on a constaté que la dureté obtenue est variable en fonction de la direction (Figure VI.16) ce qui fait le matériau est anisotrope.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ø Essai de traction :

La figure (VI.17) montre que la corrosion en présence ou bien en absence du champ magnétique ne n'altère pas les propriétés mécaniques de la même façon.

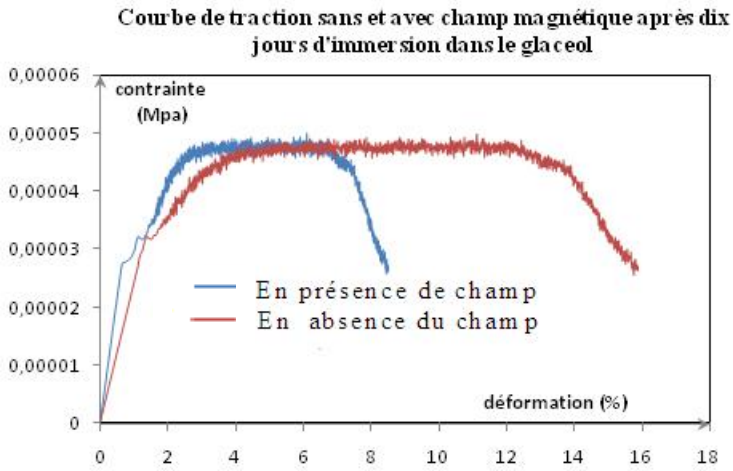
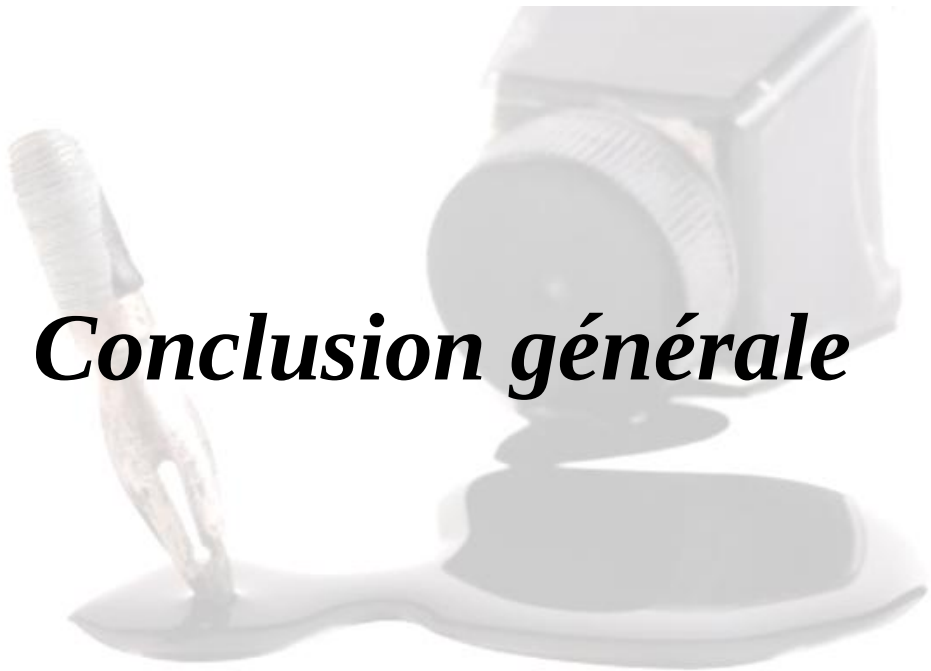


Figure IV.16: Essai de traction de l'alliage AlMn en présence et en absence de champ avec immersion de le glaceol.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



Conclusion générale

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Conclusion générale

Cette étude nous a permet de suivre la cinétique et la morphologie de la corrosion de l'alliage AlMn1, utilisée pour la fabrication des radiateurs de refroidissement dans l'industrie automobile, en fonction du temps dans une solution de glaceol et l'eau potable, en présence et en absence de champ magnétique.

Les résultats obtenus montrent que :

- L'alliage AlMn1 est constitué deux particules intermétalliques qui sont distribuées d'une façon hétérogène dans le volume du matériau, celle-ci ont un potentiel différent de celui de la matrice, ceci peut amorcer une corrosion intergranulaire.
- L'alliage AlMn1 se corrode par piqûres, dans la direction de longueur, sur le cordon de soudure.
- Le glaceol augmente la résistance à la corrosion de cet alliage, car celui-ci contient dans sa composition des inhibiteurs de corrosion.
- Un polissage arrache facilement les particules intermétalliques, la position des particules intermétalliques arrachées peut jouer le rôle de micocrevasses, ainsi la corrosion par crevasse s'installe.
- Le champ magnétique augmente le potentiel et le courant de corrosion libre, diminue la résistance à la polarisation et augmentent les courants de corrosion anodique et cathodique.
- La résistance à la polarisation de l'alliage AlMn1 dans le glaceol est très grande que la résistance à la polarisation de l'alliage AlMn1 dans l'eau potable surtout juste à l'immersion.
- Une longue durée d'immersion met en place la passivation du matériau, mais une durée plus importante provoque la rupture de la couche de passivation.
- La microdureté du matériau est variable à la surface de l'alliage, ceci implique l'existence d'une anisotropie des propriétés mécaniques et une

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

anisotropie des contraintes résiduelles. Ceci dit il est a rappelé que maintenant les chercheurs s'intéressent à la relation existante entre les contraintes résiduelles et la corrosion, car le moteur principale de la corrosion est l'excès en énergie qui peut se traduire par les contraintes résiduelle.

La corrosion dans le glaceol ou bien dans l'eau potable altère les propriétés mécaniques de l'alliage AlMn1, mais pas de la même façon.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PERSPECTIVES

Cette étude peut être complétée :

1- Par une étude de l'effet de la densité de particules intermétalliques résiduelles après polissage sur la corrosion.

2- Par une étude de la corrosion par spectroscopie d'impédance électrochimique.

3- Par étude de l'effet de la dilution du glaceol.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Référence Bibliographique

[1] : *N.MURER, Aluminium et ses alliages, 2006.*

[2] : *M. REDJAIMIA, Université De Biskra, cours sur l'aluminium et ses alliages, 1998.*

[3] : *CHRISTIAN VARGEL, Corrosion de l'aluminium, Dunod, 1998.*

[4] : *E.LUMINITA, Thèse, Institue Nationale Des Sciences Appliquées, Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium, the book edition ,2005.*

[5] : *B.GROSGOGEAT, P. COLON, Corrosion Des Alliages Métalliques, 2009-2010.*

[6] : *J.BARRALIS, G.MAEDER, Métallurgie, AFNOR,NATHAN, 1997.*

[7] : *P. POUPEAU, Techniques De L'ingénieur, aluminium et ses alliages, 2006.*

[8] : *I.JONATHAN, Comportement Electrochimique des alliages d'aluminium, Signet Book 2005.*

[9] : F.MIOMANDRE, SSADKI, PAUDEBERT, Electrochimie, *Dunod,* 2005.

[10] : L.SHERIR, R.JARMAN, Corrosion Métal avec Son Environnement, *Wart, **Son** of Toad,* 1994.

[11] : Thèse de doctorat de Monsieur ZAZI NACER, UMMTO. 2011.

[12] : *MM Fall, Guissé & Bâ du L.T.I.D. de dakar le refroidissement des moteurs cours de technologie automobile. Publibook, 2005.*

[13] : *J. Fouletier, P. Fabry et M. Kleitz, Journal of Electrochemical Society, 123, p.165, (1976).*

[14] : *http://.www.Wilkipédia.com. Page radiateurs.*

[15] : *Claude Bathias et coll, Matériaux composites, édition , DUNOD, 2005.*

[16] : *A.BONTEMPS, A.GARRIGUE, C.GOUBIER, Echangeur De Chaleur,* John Wiley and Sons *2000.*

[17] : *T. JEAN, Thèse, Institue nationale de recherche Et de sécurité, paris, 2006.*

[18] : *ROLAND, Refroidissement Des Moteur, édition par DavidInitial le Mar, 2010.*

[19] : *A.BONTEMPS, A.GARRIGUE, C.GOUBIER, Echangeur Les radiateur De d'automobile, Edition Europa-Lehrmittel, Ostfildern,* 2005.

[20] : *R.YOUNS, Les échangeurs de chaleur, Edition, Bruce **R**. Munson, Donald, 2006.*

[21] : *JONATHAN. FERREIRA, Champ Magnétique Et Ses Caractéristiques. Edition, Ellipses, 2002.*

[22] : *JULIEN GEANDROT, Le Champ Magnétique, édition à Roscoff, 2007.*

[23] : *CAPES, Caractéristiques Des Milieux Magnétiques, 2003.*

[24] : *A.MEKROUD, Thèse, Université de Mentouri Constantine, influence De Champs Magnétique Sur Le Comportement Des Matériaux.*

[25] : *F. DIOLOGENT,* Essais Mécaniques, 2008. Annie Caimant.

[26] : *Annie Caimant, Corrosion, Edition* Ibis Rouge, *2003.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Liste Des Figures

Figure I.1: *Traitement thermique des alliages à durcissements structurels (2024).*

Figure I.2 : *Principales familles d'alliages d'aluminium corroyés.*

Figure I.3: *Diagramme d'équilibre Al-Mn*

Figure I.4 : *Diagramme de Pourbaix.*

Figure I.5 : *Courbes de polarisation.*

Figure I.6 : *Exemple des courbes de Polarisation pour l'acier aluminium.*

Figure I.7 : *Propagation auto-catalytique des piqûres.*

Figure I.8 : *Principe des tourbillons turbulents conduisant à la formation de* creux.

Figure I.9: *Action de fluide sur la surface d'un métal.*

Figure I.10: *Corrosion galvanique.*

Figure I.11: *Série galvanique.*

Figure I.12 : *Corrosion feuilletante.*

Figure I.13 : *Positions du potentiel de corrosion* E_{corr} *et conditions de corrosion. selon les processus cathodiques.*

Figure I-14 : *Composantes anodique et cathodique et courbe de la densité du courant de corrosion.*

Figure I.15 : *Première méthode de Stern.*

Figure I.16: *Effet de la surtension sur les courbes des Tafel.*

Figure I.17: *Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium.*

Figure I-18 : *évolution de potentiel chimique en fonction de l'enrichissement des éléments d'addition.*

Figure I.19 : Moyens de prévention de la corrosion.

Figure II.1: Les différentes formes de radiateur.

Figure II.2: Radiateur et ses accessoires.

Figure II.3: Système de refroidissement avec l'air.

Figure II.4: *Le circuit de refroidissement par eau.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure II.5: *Circuit de refroidissement sous pression*

Figure II.6: *Les différents échangeurs.*

Figure II.7: *Différent types d'ailette.*

Figure II.8: *Classification des échangeurs.*

Figure II.9: *Montre l'action des inhibiteurs sur la surface d'un métal.*

Figure II.10: *Champ produit par un aimant.*

Figure II.11: *Cycle d'hystérésis.*

Figure II.12: *Effet de champ sur les électrons.*

Figue III.1: *Radiateur de chauffage d'automobile.*

Figure III-2: *Tubes de l'alliage AlMn1.*

Figure III.3: *Forme de l'échantillon.*

Figure III.4: *Les échantillons avec les conducteurs.*

Figure III.5: *Les appareils utilisés (enrobeuse et la polisseuse).*

Figure III.6: *Echantillons préparés.*

Figure III.7: *Microscope électronique à balayage (MEB).*

Figure III.8: *L'aimant utilisé.*

Figure III.9: *cellule électrochimique pour la mesure du potentiel et du courant de la corrosion libre.*

Figure III.10: *Le principe fonctionnement d'un potensiostat.*

Figure III.11: *Potentiostat.*

Figure III.12: *Cellule électrochimique.*

Figure III.12: *Electrode de référence à calomel.*

Figure III.14: *Electrode Auxiliaire.*

Figure III.15: *Les échantillons avec immersion sans et avec champ.*

Figure III.16: *Analyse électrochimique en présence et l'absence de champ.*

Figure III.17: *Microduremètre.*

Figure III.18: *Dureté selon les trois directions.*

Figure III.19: *Eprouvette de traction normalisée.*

Figure III.2O: *Dimension de l'éprouvette de traction.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Figure III.21: *Machine de traction.*

Figure IV.1 : Les tubes justes après enlèvements.

Figure IV.2 : L'oxyde à l'intérieur des tubes.

Figure VI.3 Microstructure de l'alliage AlMn1 : (a) obtenue par le microscope. optique, (b), (c) obtenues par M.E.B.

Figure VI.4 : arrachement des particules intermétalliques suite au polissage. mécanique de l'allige AlMn1.

Figure IV.5: images présentant les piqûres dans l'alliage AlMn1 après mise en service.

Figure IV.6 : *Effet de la présence des particules intermétalliques et des porosités à la surface sur la morphologie et la cinétique de la corrosion.*

Figure VI.7 : *La morphologie de la corrosion après 10 jours d'immersion dans l'eau et le glaceol en absence du champ.*

Figure IV-8 : *Observation microscopique des échantillons sans polissage après mise en service de longue durée dans une solution de Glaceol.*

Figure IV.9: *Morphologie de la corrosion de l'alliage AlMn1 en présence et en absence de champ magnétique dans l'eau et le glaceol.*

Figure VI.10 : *le potentiel de la corrosion libre de l'alliage AlMn1, dans l'eau et dans le glaceol, en présence et en absence du champ magnétique.*

Figure VI.11 : *Effet du champ magnétique sur le potentiel de la corrosion libre dans. le glaceol.*

Figure VI.12 : *effet du champ magnétique sur le potentiel de la corrosion.*
libre dans l'eau.

Figure VI.13 : *Evolution du courant de la corrosion libre en fonction du temps.*
d'immersion Dans le glaceol.

Figure VI.14 : *Courbes de polarisation.*

Figure VI.15 ;16 : *Courbes de polarisation.*

Figure IV.16 : *L'évolution de la dureté de la direction à la surface du tube.*

Figure IV.17 : *Essai de traction de l'alliage AlMn en présence et en absence de. champ avec immersion de le glaceol.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Liste Des *T*ableaux

Tableau I.1: *Différents alliages d'aluminium.*

Tableau I.2: *Alliages avec durcissement structural.*

Tableau I.3 : *Les qualités des alliages de fonderie.*

Tableau I.4: *Caractéristique des deux Nuance (3003 et 3004).*

Tableau I.5 : *Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion.*

Tableau I.6: *Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques.*

Tableau II.1: *Propriétés physico-chimiques de glaceol **A** et **D**.*

Tableau III.1: *Propriétés physico-chimiques de glaceol **A** et **D**.*

Tableau VI. 1 : *Evolution de la résistance à la polarisation en fonction de la solution et de la présence ou pas du champ magnétique.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com