

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention de diplôme de master académique en
Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Thème :

Étude de l'effet de l'élévation de la température sur la corrosion de
l'alliage d'aluminium AlMgSiCu(Fe) dans une solution de 3 % Na Cl

Réalisé par :

SELLAH MOHAMMED

Devant le jury composé de :

- Mme : BELLAHCENE ABERKANE TASSADITprésident
- Mr : HADJ-ALI YUCEF..... encadreur
- Mr : KEHAL ABDELKRIMexamineur
- Mr : ZAZI NACER.....Co-encadreur

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires tout au long de ma carrière d'étude et de l'élaboration de ce mémoire.

Dieu merci.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, M. HADJ-ALI Youcef, pour m'avoir proposé ce sujet et pour avoir encadré ce travail en m'apportant son orientation précieuse ainsi que son aide tout au long de sa réalisation.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon co-promoteur, M. ZAZI Nacer, pour son soutien constant et ses conseils avisés qui m'ont beaucoup aidé durant la préparation de ce mémoire.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement les membres du jury d'examen qui ont accepté d'évaluer ce travail, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire, leurs remarques constructives et leurs précieux conseils.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique, et plus particulièrement à ceux de la spécialité Génie des Matériaux, pour la qualité de leur enseignement et leurs encouragements.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à l'équipe du hall technologique de l'UMMTO, ainsi qu'à celle de l'Université Abderrahmane Mira de BEJAÏA, notamment M. OUADFEL Abdallah, pour leur disponibilité, leur aide et leurs orientations. Je remercie également l'équipe du laboratoire SDM pour leur assistance et leur collaboration.

Je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à ma famille, mes amis et tous mes camarades de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et en particulier à mes camarades de la promotion GDM 2025, pour leur soutien moral et leur précieuse amitié.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.



Sommaire

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
Liste des figures.....	7
Introduction générale.....	10
Introduction générale.....	11
Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages.....	12
I.1. Introduction.....	12
I.2. L'élaboration de l'Aluminium.....	12
I.2.1. Extraction de l'alumine.....	12
I.2.2. Réduction électrolytique.....	13
I.3. Propriété de l'aluminium.....	13
I.3.1. Propriétés physiques.....	13
a) Masse atomique.....	13
a) Isotopes.....	13
b) Valence chimique.....	13
c) Structure cristallographique.....	13
d) Masse volumique.....	13
I.3.2. Propriétés thermiques.....	14
I.3.2.2 Point de fusion.....	14
I.3.2.3 Chaleur latente de vaporisation.....	14
I.3.3. Propriété électrique.....	14
I.3.4. Propriété mécaniques.....	14
I.3.5. Tenue à la corrosion.....	15
I.3.5.1 Le mécanisme de protection.....	15
I.4. Métallurgie des alliages d'aluminium.....	15
I.4.1. Constitution des alliages d'aluminium.....	15
I.4.1.1 Formation d'une solution solide.....	16

I.4.1.2	Formation de composés intermétalliques	16
▪	Les éléments d'alliage majeurs.....	16
▪	Les éléments d'ajout mineurs	16
▪	Les impuretés	16
I.4.2.	Classification et désignation des alliages d'aluminium.....	16
I.4.2.1	Distinction fondamentale selon le mode de mise en forme	16
•	Les alliages de moulage	16
•	Les alliages de corroyage.....	17
I.4.2.2	Systèmes de désignation normalisés	17
•	Système de l'Aluminium Association (AA)	17
I.4.2.3	Classification selon le mécanisme de durcissement.....	18
•	Les alliages traitables thermiquement.....	18
•	Les alliages non traitables thermiquement.....	18
I.4.3.	Mécanismes de durcissement.....	18
I.5.	Influence des éléments d'addition et des impuretés sur les propriétés	19
I.6.	Avantages et inconvénients de l'aluminium et de ses alliages	20
✓	Avantages.....	20
✓	Inconvénients	20
I.7.	Conclusion.....	20
I.8.	Références bibliographiques.....	22
Chapitre II : corrosions de l'aluminium et ses alliages		23
I.	Introduction.....	22
Définition de corrosion		22
II.1.1.	Corrosion sèche.....	22
II.1.2.	Corrosion humide.....	23
II.2.	Comportement de l'aluminium face à la corrosion	23
II.3.	Mécanismes de corrosion des alliages d'aluminium	25
II.3.1.	Corrosion uniforme.....	25
II.3.2.	Corrosion par piqûres.....	25

II.3.3.	Corrosion caverneuse	26
II.3.4.	Corrosion inter granulaire	26
II.3.5.	Corrosion galvanique	27
II.3.6.	Corrosion sous contrainte.....	27
II.3.7.	Corrosion par érosion.....	28
II.4.1.	Revêtements de surface.....	29
II.4.2.	Traitements électrochimiques	29
e)	Anodisation	29
f)	Conversion chimique	30
II.4.3.	Inhibiteurs de corrosion	30
	Références bibliographies	30
Chapitre III: Matériaux et Techniques.....		32
Expérimentales		32
III	Introduction.....	32
	Matériau utilisé	32
	Préparation métallographique	33
III.2.1.	Enrobage	33
III.2.2.	Polissage	33
III.2.3.	Attaque chimique	34
	Observation au microscope optique.....	34
	La dureté brinell.....	34
	Essai de microdureté.....	36
	Testes électrochimique.....	37
IV.	Introduction.....	38
	Microdurete de l'alliage AlMgSiCu (Fe).....	38
	Morphologie de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe).....	38
	Cinétique de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe)	41
IV.3.1.	Potentiel de la corrosion libre (potentiel d'abandon) après une heures d'immersion.....	41
IV.3.2.	Courbes de polarisation après une heure et 3 heures d'immersion.....	42

Conclusion	44
Conclusion générale et Perspectives.....	45
V. Conclusion générale et Perspectives	45

Liste des figures

<i>Figure I.3.4.1 : Influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.3.2.1 Mécanismes de corrosion par piqûres des alliages d'aluminium</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.3.3.1 Corrosion par effet de crevasse.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.3.4.1 Corrosion inter granulaire</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.3.5.1 Corrosion galvanique.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.3.6.1 : Corrosion sous contrainte.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.3.7.1 : Corrosion sous contrainte.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.4.3.1: : découper des échantillons.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.2.1.1 : Enrobage des échantillons.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.2.2.1 polisseuse (struers rotopol-31)</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.2.3.1: Microscope optique (hund WETZLAR).....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.2.3.1: Duromètre (hommel).....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.2.3.2 : Principe de l'essai de dureté brinell.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.2.3.1 : Potentiostat/Galvanostat [AUTOLAB].....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III.2.3.1 Microdureté Vickers de l'alliage AlMgSiCu (Fe).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.2.3.1: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après 1 heure d'immersion à une température de 24°C.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.2.3.2: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) trois heures d'immersion à une température de à 24°C</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.2.3.3: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) une heure d'immersion à une température de à 32°C</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.2.3.4: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) trois heures d'immersion à une température de à 32°C.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.2.3.5: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) une heure d'immersion à une température de à 62°C</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.2.3.6: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) trois heures d'immersion à une température de à 62°C</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.3.1.1: Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AlMgSiCu(Fe) a différentes températures durant une heure d'immersion : a)(-0,56V) 24 °C, b)(-0,5V) 32 °C, c)(-0,56V) 62 °C</i>	<i>46</i>

Figure IV.3.2.1: Courbes de polarisation après une heure et 3 heures d'immersion : la courbe rouge est obtenue après une heure d'immersion, la courbe bleue est obtenue après trois heures d'immersion, 47

Figure IV.3.2.2 : Courbes de polarisation après une heure et trois heures d'immersion : les courbes rouges sont obtenues pour T=24 °C, les courbes vertes sont obtenues pour immersion à T=32 °C, les courbes bleues sont obtenues pour immersion à T=62 °C, (A échantillons après une heure immersion) (échantillons après trois heures immersion B)..... 47

Figure IV.3.2.3: Évolution de la résistance de polarisation et du potentiel de corrosion en fonction du temps d'immersion et de la température 48

Liste des tableaux

Tableau I.4.2.1 : Classification des alliages de corroyage par séries [1]..... 17

Tableau I.4.2.2 Classification des alliages de fonderie [1]..... 18

Tableau II.4.3.1: Composition chimique de l'alliage d'aluminium recyclé..... 35

Tableau IV.3.2.1: Paramètres obtenue des courbes de polarisation..... 48

Introduction générale

Introduction générale

L'aluminium et ses alliages occupent aujourd'hui une place stratégique dans de nombreux secteurs industriels, en raison de la combinaison exceptionnelle de leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques. Leur faible densité, leur excellente résistance à la corrosion, leur bonne ductilité, ainsi que leur conductivité thermique et électrique élevée en font des matériaux de choix pour des domaines tels que l'aéronautique, la construction navale, l'industrie automobile et diverses applications de construction métallique.

L'alliage étudié dans le cadre de ce travail est majoritairement composé d'aluminium ($\approx 89,7\%$), avec des ajouts de magnésium, de silicium, de cuivre, de manganèse et de fer. Cette composition confère à l'alliage un compromis intéressant entre résistance mécanique et résistance à la corrosion, tout en conservant une faible masse volumique. Cependant, certains éléments d'alliage, en particulier le fer et le cuivre, peuvent favoriser la formation de précipités ou de phases intermétalliques, susceptibles d'influencer son comportement en milieu agressif.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'élévation de température (24 °C, 32 °C et 62 °C) sur le comportement à la corrosion de cet alliage dans un environnement chloruré, plus précisément dans une solution aqueuse de NaCl à 3%. Ce type d'analyse revêt un intérêt particulier, car les alliages d'aluminium sont fréquemment soumis à des environnements marins ou salins, où les variations thermiques peuvent accélérer ou modifier les mécanismes de corrosion.

Ce mémoire est structuré en trois parties :

Chapitre 1 : Présentation générale de l'aluminium et de ses alliages

Chapitre 2 : Présentation générale de la corrosion

Chapitre 3 : Description des matériaux utilisés et des techniques expérimentales

Chapitre 4 : résultats et interprétations plus des perspectives

Les résultats obtenus permettront d'identifier l'influence de la température sur la sensibilité à la corrosion en milieu salin, et de mettre en évidence les paramètres critiques affectant la durabilité et les performances de l'alliage dans des conditions réelles d'utilisation.

Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

I.1.Introduction

L'aluminium, bien que relativement récent dans l'histoire des matériaux industriels, a connu une progression fulgurante. Découvert au milieu du XIX^e siècle, il n'a réellement trouvé son essor industriel qu'en 1886, avec la mise au point simultanée du procédé d'électrolyse par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis. Cette innovation a marqué le véritable point de départ de l'industrie moderne de l'aluminium [1]. Depuis, au fil des décennies, ce métal s'est imposé comme le principal représentant des métaux non ferreux utilisés à l'échelle mondiale. Ce succès repose sur un ensemble de caractéristiques particulièrement remarquables : faible masse volumique, bonne résistance mécanique, excellente conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une résistance naturelle à la corrosion [2]. Sa grande malléabilité constitue également un atout majeur, permettant à l'aluminium et à ses alliages de s'adapter à une vaste gamme de procédés de mise en forme mécanique [2].

Grâce à cette combinaison unique de propriétés, les alliages d'aluminium occupent aujourd'hui un rôle central dans plusieurs secteurs industriels clés, tels que les transports, le bâtiment, l'électrotechnique et la mécanique générale [3]. Leur utilisation ne cesse de croître, portée par la recherche constante de matériaux plus légers, plus performants et offrant une meilleure efficacité énergétique [3].

Leur utilisation continue de croître à mesure que les industries recherchent des matériaux plus légers, plus durables et plus économes en énergie [3].

I.2.L'élaboration de l'Aluminium

L'aluminium est obtenu exclusivement à partir de la bauxite, un minerai particulièrement riche en alumine (45 à 60 %) et contenant également divers oxydes, tels que l'oxyde de fer, la silice et l'oxyde de titane, dont la teneur varie selon l'origine géologique du gisement. Les principaux pays producteurs sont l'Australie, la Guinée, le Brésil et la Jamaïque, qui disposent de réserves estimées suffisantes pour maintenir le rythme actuel de production pendant près de deux siècles [3].

La conversion de la bauxite en aluminium se déroule en deux phases principales :

I.2.1. Extraction de l'alumine

Réalisée par le procédé Bayer (1887), qui repose sur la dissolution de l'alumine à haute température dans une solution alcaline, suivie de sa précipitation et de sa calcination pour obtenir une poudre d'alumine pure [3].

I.2.2. Réduction électrolytique

Selon le procédé Hall-Héroult, l'alumine est dissoute dans un bain de cryolite fondue et décomposée sous l'action d'un courant électrique pour libérer l'aluminium liquide [3].

Bien que conçus à la fin du XIX^e siècle, ces procédés demeurent aujourd'hui les piliers de la production industrielle d'aluminium, continuellement optimisés pour améliorer leur rendement énergétique et réduire leur impact environnemental [3].

I.3. Propriété de l'aluminium

I.3.1. Propriétés physiques

I.3.1.1 Propriétés atomique et cristallines

L'aluminium présente un ensemble de caractéristiques atomiques et cristallographiques qui expliquent en grande partie son comportement physique et mécanique.

a) Masse atomique

26,9815 g·mol⁻¹, valeur déterminée sur la base de l'isotope du carbone 12 [1].

a) Isotopes

L'aluminium est dominé par l'isotope stable ²⁷Al, constitué de 13 protons et 14 neutrons. À côté de celui-ci, on distingue l'isotope radioactif ²⁶Al, dont la demi-vie est de l'ordre de 10⁶ années, ainsi que plusieurs isotopes artificiels à durée de vie très courte [2].

b) Valence chimique

Dans les composés chimiques, l'aluminium adopte généralement une valence de +3, ce qui traduit sa forte affinité pour l'oxygène et les halogènes [3].

c) Structure cristallographique

L'aluminium cristallise dans une structure cubique à faces centrées (CFC), caractérisée par un paramètre de maille de $4,0496 \times 10^{-10}$ m à 298 K. Le diamètre atomique est de $2,86 \times 10^{-10}$ m, tandis que le volume atomique est estimé à $9,999 \times 10^{-30}$ m³. Son numéro atomique est 13, le plaçant dans le groupe 13 de la classification périodique [1].

d) Masse volumique

La masse volumique de l'aluminium pur est d'environ 2,7 g/cm³ (soit 2 700 kg/m³). Pour mettre cela en perspective, c'est environ un tiers de la masse volumique de l'acier (7,8 g/cm³) ou du cuivre (8,9 g/cm³), des métaux avec lesquels il est souvent comparé [1]. Cette faible masse volumique confère un rapport résistance/poids exceptionnel, ce qui en fait

un choix privilégié dans les industries où chaque gramme compte, comme l'aéronautique et le transport terrestre.

I.3.2. Propriétés thermiques

I.3.2.1 Conductivité thermique

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur, avec une conductivité thermique d'environ $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ce qui le rend idéal pour les radiateurs, dissipateurs thermiques et ustensiles de cuisine [3].

I.3.2.2 Point de fusion

Le point de fusion de l'aluminium pur est relativement bas, soit $660,32 \text{ °C}$, facilitant sa mise en forme par moulage et extrusion [3].

I.3.2.3 Chaleur latente de vaporisation

La chaleur latente de vaporisation est l'énergie nécessaire pour faire passer le métal de l'état liquide à l'état gazeux. Pour l'aluminium est de $293,7 \text{ kJ/mol}$ [3].

I.3.3. Propriété électrique

L'aluminium possède une bonne conductivité électrique ($\approx 37,7 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$), soit environ 61 % de celle du cuivre, mais avec une densité bien plus faible, offrant un excellent rapport conductivité/masse. Il est largement utilisé dans les câbles électriques et le transport d'énergie [4].

I.3.4. Propriété mécaniques

Le module d'élasticité de l'aluminium pur, qui traduit sa rigidité, est d'environ $66,6 \text{ GPa}$. Cette valeur varie en fonction de la présence d'impuretés et d'éléments d'alliage, augmentant avec leur ajout et diminuant lorsque la température s'élève. [2]

L'aluminium présente également une bonne ductilité et une résistance mécanique correcte, mais ses propriétés mécaniques sont généralement insuffisantes pour certaines applications structurales. C'est pourquoi l'usage d'alliages adaptés devient nécessaire pour renforcer sa résistance et sa ténacité.

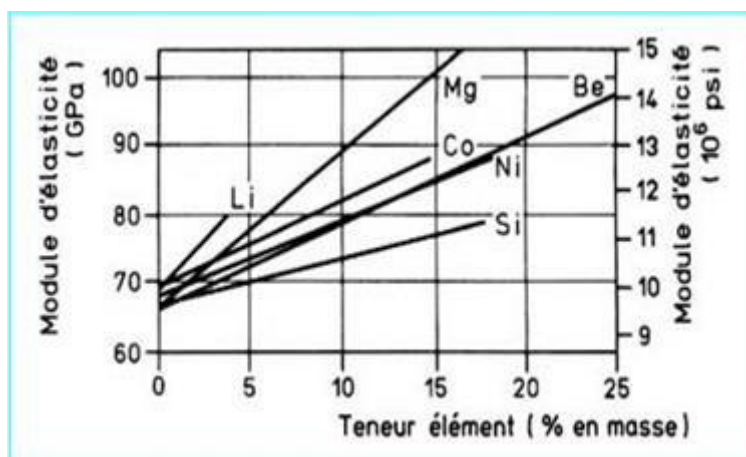


Figure I.3.4.1 : Influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité

I.3.5. Tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages sont particulièrement prisés pour leur résistance à la corrosion, l'une de leurs propriétés les plus précieuses. Contrairement au fer, qui s'oxyde pour former la rouille, l'aluminium se protège naturellement grâce à la formation d'une couche d'oxyde dense et stable (Al_2O_3) à sa surface [2].

I.3.5.1 Le mécanisme de protection

Dès que l'aluminium est exposé à l'air, une fine couche d'oxyde d'une épaisseur de quelques nanomètres se forme instantanément. Cette couche agit comme une barrière imperméable, isolant le métal sous-jacent de l'environnement et empêchant l'oxydation, phénomène appelé passivation [2].

I.4. Métallurgie des alliages d'aluminium

L'aluminium pur, bien que doté de propriétés remarquables, présente des caractéristiques mécaniques souvent insuffisantes pour répondre aux exigences des applications structurales modernes. Son utilisation massive est donc intimement liée à la maîtrise de sa métallurgie d'alliage, qui consiste à modifier sa composition chimique et sa microstructure par l'addition d'éléments spécifiques et par des traitements thermomécaniques contrôlés, dans le but d'optimiser son ensemble de propriétés [5].

I.4.1. Constitution des alliages d'aluminium

L'aluminium pur (série 1xxx) est rarement utilisé pour des applications structurales en raison de ses propriétés mécaniques limitées. Pour les améliorer, on lui incorpore des éléments d'alliage en proportions contrôlées, qui interagissent avec la matrice de deux manières principales :

I.4.1.1 Formation d'une solution solide

Les atomes d'éléments d'addition (comme le magnésium ou le zinc) viennent se substituer aux atomes d'aluminium sur les nœuds du réseau cristallin, entraînant une distorsion locale qui augmente la résistance mécanique [5].

I.4.1.2 Formation de composés intermétalliques

Lorsque la solubilité d'un élément est dépassée, il forme des phases secondaires distinctes (telles que Al_2Cu ou Mg_2Si), qui jouent un rôle crucial dans le durcissement structural [5].

Les éléments d'alliage se classent ainsi :

- **Les éléments d'alliage majeurs**

(Cu, Si, Mg, Mn, Zn), ajoutés en proportions allant de 1% à plus de 10% (notamment en fonderie) pour conférer les propriétés fondamentales de l'alliage [5].

- **Les éléments d'ajout mineurs**

(Cr, Zr, V, Ti), ajoutés à des teneurs inférieures à 1% pour modifier des caractéristiques spécifiques comme la taille du grain ou la trempabilité [5].

- **Les impuretés**

Comme le fer (Fe), qui sont des éléments indésirables présents de façon non intentionnelle. Ils peuvent former des phases intermétalliques dures et fragiles (ex., Al_3Fe) qui nuisent à la ductilité et à la tenue à la fatigue. Le contrôle du rapport Fe/Si est souvent critique pour limiter leur impact négatif [5].

I.4.2. Classification et désignation des alliages d'aluminium

Face à la grande diversité des alliages d'aluminium disponibles, il est nécessaire de recourir à des systèmes de classification et de désignation normalisés. Ces systèmes permettent une identification claire, facilitent la normalisation industrielle et garantissent une utilisation adaptée selon les propriétés recherchées

I.4.2.1 Distinction fondamentale selon le mode de mise en forme

La première classification repose sur le procédé d'élaboration de l'alliage :

- **Les alliages de moulage**

Les alliages de moulage, élaborés soit à partir d'aluminium primaire soit par recyclage, sont destinés aux procédés de fonderie. Leur qualité essentielle est la coulabilité, qui garantit le bon remplissage des moules et la fiabilité des pièces obtenues [5].

- **Les alliages de corroyage**

Les alliages de corroyage, ou alliages déformables, sont obtenus sous forme de lingots ou billettes puis transformés par laminage, extrusion ou forgeage en produits tels que tôles, barres ou profilés. Ils se divisent en deux catégories : les alliages durcisables par traitement structural (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX), à haute résistance mécanique, et ceux durcisables par écrouissage (séries 1XXX, 3XXX, 5XXX), appréciés pour leur formabilité et leur excellente résistance à la corrosion [5].

I.4.2.2 Systèmes de désignation normalisés

Plusieurs systèmes coexistent, les plus utilisés étant :

- **Système de l'Aluminium Association (AA)**

Le système de désignation de l'Aluminium Association (AA) est aujourd'hui le plus utilisé à l'échelle internationale pour identifier les alliages d'aluminium. Il repose sur un code à quatre chiffres permettant de distinguer les alliages de corroyage (séries 1XXX à 8XXX), Le Tableau ci-dessus résume la classification des alliages de corroyage par séries.

Tableau I.4.2.1 : Classification des alliages de corroyage par séries [1]

Série	Alliage	Élément d'alliage
1xxx	1000	Aluminium Pur
2xxx	2000	Cuivre
3xxx	3000	Manganèse
4xxx	4000	Silicium
5xxx	5000	Magnésium
6xxx	6000	Magnésium-Silicium
7xxx	7000	Zinc
8xxx	8000	Autres élément(ex:Li,fer,étain,)

Le premier chiffre de la désignation indique la série, ou encore la famille, de l'alliage d'aluminium. Il varie de 1 à 8, ce qui définit l'existence de huit séries d'alliages, parmi lesquelles les sept premières constituent les plus répandues et les plus utilisées. Le deuxième chiffre correspond à la variation par rapport à l'alliage de base. Lorsqu'il est égal à 0, il désigne la composition originale de la série. En revanche, toute modification de la teneur d'un ou plusieurs éléments d'alliage, généralement comprise entre 0,15 et 0,50 %, entraîne le remplacement du chiffre 0 par un autre chiffre, représentatif de cette nouvelle composition. Enfin, le troisième et le quatrième chiffre n'ont pas de signification particulière sur le plan

chimique. Ils servent uniquement à identifier le numéro d'alliage spécifique au sein de la série considérée [6,7].

Chaque série correspond à l'élément d'alliage principal : le manganèse pour la série 3XXX, le magnésium pour la 5XXX, ou encore le zinc pour la 7XXX. Ce système assure une classification claire et normalisée, facilitant le choix et la comparaison des alliages dans les applications industrielles [6,7].

Les alliages de fonderie sont désignés avec le même codage en séparant le troisième chiffre et le quatrième avec un point .

Tableau I.4.2.2 Classification des alliages de fonderie [1]

Série	Alliage	Élément d'alliage
1xx.x	1000	Aluminium Silicium
2xx.x	2000	Cuivre
3xx.x	3000	Aluminium Silicium Cuivre
5xx.x	5000	Magnésium
6xx.x	6000	Magnésium-Silicium
7xx.x	7000	Aluminium Zinc Magnésium

I.4.2.3 Classification selon le mécanisme de durcissement

Une autre manière de classer les alliages d'aluminium repose sur leur mécanisme de renforcement. On distingue ainsi deux grandes familles :

- **Les alliages traitables thermiquement**

(Séries 2XXX, 6XXX et 7XXX), dont la résistance est obtenue par durcissement structural, via la précipitation contrôlée de phases secondaires [5].

- **Les alliages non traitables thermiquement**

(Séries 1XXX, 3XXX, 4XXX et 5XXX), dont l'amélioration des propriétés mécaniques est liée uniquement à l'écrouissage [5]

I.4.3. Mécanismes de durcissement

Le renforcement des alliages d'aluminium repose principalement sur deux mécanismes complémentaires.

Le premier est le durcissement par écrouissage, qui se produit lors de la déformation plastique. Il résulte de l'augmentation de la densité de dislocations, ce qui limite leur mobilité et accroît la résistance mécanique. Ce type de durcissement est typique des alliages de la série 5XXX, qui présentent en outre une bonne stabilité microstructure et une excellente tenue à température ambiante.

Le second est le durcissement structural, ou durcissement par précipitation, caractéristique des alliages des séries 2XXX, 6XXX et 7XXX. Ce mécanisme s'effectue en plusieurs étapes [5].

Dans un premier temps, l'alliage est porté à une température comprise entre 450 et 550 °C afin de dissoudre les phases secondaires (mise en solution). Il est ensuite rapidement refroidi (trempe) de manière à obtenir une solution solide sursaturée. Enfin, un traitement de vieillissement favorise la précipitation contrôlée de phases cohérentes (zones GP, β'' , η'), qui entravent le mouvement des dislocations et permettent d'obtenir une résistance mécanique élevée. Toutefois, si le vieillissement se prolonge, on observe un phénomène de sur-vieillessement, marqué par le grossissement et la perte de cohérence des précipités, ce qui conduit à une diminution progressive des propriétés mécaniques de l'alliage [5].

I.5. Influence des éléments d'addition et des impuretés sur les propriétés

L'aluminium pur présente de bonnes propriétés de légèreté, de conductivité électrique et de résistance à la corrosion, mais ses caractéristiques mécaniques restent limitées. Pour répondre aux exigences industrielles, il est donc allié à divers éléments. Les éléments d'addition comme le cuivre, le magnésium, le silicium, le zinc et le manganèse améliorent de façon ciblée certaines propriétés. Le cuivre accroît la résistance mécanique par durcissement structural ; le magnésium renforce la ténacité et la soudabilité ; le silicium favorise la coulabilité et la résistance à l'usure ; le zinc et le magnésium combinés confèrent une résistance élevée, notamment dans les alliages de la série 7000. À l'inverse, certaines impuretés, en particulier le fer et le silicium, influencent défavorablement les performances. Lorsque leur teneur dépasse 1,5 %, elles forment des phases intermétalliques grossières et fragiles (ex. Al-Fe-Si) qui réduisent la ductilité et la ténacité. Elles peuvent également agir comme sites de corrosion localisée, affectant la durabilité de l'alliage. Cependant, leur présence contrôlée est parfois tolérée, car elles améliorent la résistance au fluage et la stabilité thermique [5].

En résumé, l'optimisation des propriétés de l'aluminium repose sur un compromis entre l'ajout volontaire d'éléments d'alliage et la maîtrise des impuretés, dont le fer et le silicium constituent les principaux facteurs limitant.

I.6. Avantages et inconvénients de l'aluminium et de ses alliages

L'aluminium et ses alliages occupent une place essentielle dans l'industrie moderne en raison de leur combinaison unique de propriétés.

✓ **Avantages**

L'aluminium pur est caractérisé par sa légèreté (densité d'environ $2,7 \text{ g/cm}^3$), ce qui en fait un matériau privilégié pour l'aéronautique, l'automobile et le transport. Il possède une bonne conductivité thermique et électrique, représentant environ 60 % de celle du cuivre pour une masse trois fois plus faible. Sa résistance naturelle à la corrosion provient de la formation spontanée d'une fine couche d'oxyde protectrice en surface. De plus, l'aluminium présente une excellente aptitude à la mise en forme (laminage, extrusion, emboutissage) et à la recyclabilité, puisque près de 90 % de l'aluminium est réutilisable sans perte de propriétés [1-3].

Les alliages d'aluminium, quant à eux, permettent d'améliorer la résistance mécanique grâce à des mécanismes tels que le durcissement structural (Cu, Mg, Zn) ou l'écrouissage. Certains alliages (séries 2000, 7000) atteignent des résistances comparables à celles des aciers tout en conservant une faible densité [5].

✓ **Inconvénients**

L'aluminium et ses alliages présentent également certaines limites. Sa résistance mécanique intrinsèque reste faible à l'état pur, nécessitant l'adjonction d'éléments d'alliage. Sa résistance à l'usure est réduite en raison de sa faible dureté de base. Sur le plan thermique, certains alliages perdent rapidement leurs propriétés mécaniques à haute température, limitant leur usage dans des environnements sévères. Enfin, la soudabilité de certains alliages durcis (notamment les séries 2000 et 7000) reste problématique à cause de la sensibilité à la fissuration [5].

I.7. Conclusion

Ainsi, l'aluminium et ses alliages constituent des matériaux polyvalents offrant un compromis intéressant entre légèreté, propriétés mécaniques et résistance à la corrosion. Néanmoins, leur

Chapitre I : Généralité sur aluminium et ses alliages

utilisation optimale exige une sélection rigoureuse de la composition et des traitements, afin de pallier leurs limites inhérentes.

I.8. Références bibliographies

- [1] Davis JR. Aluminium and aluminium alloys. ASM International; 1993.
- [2] Callister WD, Rethwisch DG. Materials science and engineering: an introduction. 10th ed. Wiley; 2018.
- [3] Totten GE, MacKenzie DL. Handbook of aluminum: volume 1: physical metallurgy and processes. CRC Press; 2003.
- [4] Totten GE, MacKenzie DL. Handbook of aluminum: volume 2: alloys and products. CRC Press; 2003.
- [5] Banhart J. Aluminium alloys: structure and properties. Springer; 2011.
- [6] Aluminum Association. *Teal Sheet: Alloy Designation System for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*. Arlington, VA: Aluminum Association; 2015.
- [7] Aluminum Association. *Designations and Chemical Composition Limits for Aluminum and Aluminum Alloys*. Arlington, VA: Aluminum Association; 2015

Chapitre II : corrosions de l'aluminium et ses alliages

I. Introduction

L'aluminium et ses alliages occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment et l'emballage. Leur large utilisation s'explique par leur faible densité, leurs bonnes propriétés mécaniques et surtout leur résistance naturelle à la corrosion [1]. Cette dernière est liée à la formation spontanée, à la surface du métal, d'une couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) mince, compacte et adhérente, qui agit comme une barrière protectrice contre de nombreux agents agressifs [2]. Cependant, cette protection naturelle n'est pas absolue. La composition chimique des alliages, la microstructure ainsi que les conditions du milieu environnant peuvent fragiliser le film passif et favoriser l'apparition de divers mécanismes de corrosion. Comprendre le comportement des alliages d'aluminium face à la corrosion constitue donc un enjeu majeur pour garantir leur durabilité, en particulier dans des applications exigeant fiabilité et sécurité.

II.1. Définition de corrosion

La corrosion peut être définie comme un processus naturel de dégradation des matériaux métalliques résultant de leur interaction avec l'environnement. Elle traduit la tendance thermodynamique du métal à revenir vers un état plus stable, généralement oxydé [2].

Selon les conditions, on distingue deux formes principales : la corrosion sèche (chimique) et la corrosion humide (électrochimique).

II.1.1. Corrosion sèche

La corrosion sèche, également appelée corrosion chimique, survient en absence d'électrolyte liquide et se manifeste généralement à haute température. Elle est due à une réaction directe entre le métal et des gaz corrosifs de l'atmosphère, tels que l'oxygène, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone ou encore les halogènes (Cl_2 , F_2) [3].

La dégradation résulte de la formation de couches d'oxydes, de sulfures ou de chlorures. Leur efficacité protectrice dépend de leur adhérence, de leur compacité et de leur épaisseur. Une couche dense et stable, comme l'alumine (Al_2O_3) qui se forme sur l'aluminium, constitue une barrière efficace et ralentit fortement la progression de la corrosion. À l'inverse, des oxydes poreux et fragiles, tels que ceux formés sur le fer, ne protègent pas efficacement et permettent la poursuite de l'attaque[4].

Ce type de corrosion est surtout rencontré dans les environnements à haute température, comme dans les turbines, chaudières, moteurs ou fours industriels, où les pièces métalliques sont exposées à des atmosphères oxydantes ou sulfatées.

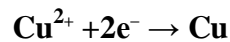
II.1.2. Corrosion humide

La corrosion humide, ou électrochimique, est la plus courante à température ambiante en présence d'un électrolyte liquide (eau, humidité atmosphérique, solutions aqueuses). Elle repose sur des réactions d'oxydation-réduction se produisant simultanément sur des zones différentes de la surface métallique, créant des micro-piles électrochimiques :

Oxydation anodique :



Réduction cathodique (milieu neutre aéré) :



Chez l'aluminium, une couche d'alumine protectrice se forme naturellement et limite la propagation de la corrosion. Toutefois, cette couche peut être localement déstabilisée en présence d'ions agressifs tels que les chlorures (Cl^{-}), conduisant à l'apparition de piqûres de corrosion[1,5].

Ainsi, la corrosion humide représente la forme la plus critique pour les alliages d'aluminium en service, car elle conditionne directement leur durabilité dans les environnements réels : atmosphère humide, eau de mer, solutions industrielles ou milieux aqueux agressifs.

II.2. Comportement de l'aluminium face à la corrosion

L'aluminium est reconnu pour sa bonne résistance naturelle à la corrosion, ce qui explique son large emploi dans des environnements variés tels que l'aéronautique, le bâtiment, l'automobile et l'industrie maritime [6]. Cette résistance est principalement attribuée à la formation spontanée d'un film d'oxyde protecteur, appelé couche passive, qui se développe instantanément au contact de l'air ou de l'eau. Cette couche, constituée d'alumine amorphe (Al_2O_3), est très mince (quelques nanomètres), compacte, adhérente et pratiquement imperméable à l'oxygène et à l'humidité [7].

En conditions normales, cette passivation confère à l'aluminium une très faible vitesse de corrosion comparée à celle de nombreux autres métaux comme l'acier. Toutefois, ce comportement n'est pas immuable et dépend de plusieurs paramètres.

II.2.1. Stabilité de la couche passive

La stabilité du film d'oxyde varie en fonction du pH et de la composition ionique du milieu environnant :

- Dans les milieux neutres ou légèrement basiques (pH 4–9), la couche passive reste stable et protège efficacement le métal.
- En revanche, dans les environnements très acides (pH < 4) ou très basiques (pH > 9), l'oxyde d'aluminium devient soluble, ce qui conduit à une dissolution accélérée et à une perte de protection [8].
- Les ions agressifs, notamment les chlorures (Cl^-), ont la capacité de percer localement cette couche, favorisant la formation de piqûres, qui constituent la principale faiblesse de l'aluminium dans les milieux salins [9].

Influence de la composition de l'alliage

La résistance à la corrosion dépend fortement de la présence d'éléments d'alliage :

- Les éléments comme Mn, Mg et Si tendent à maintenir une bonne résistance en contribuant à une couche passive homogène.
- En revanche, des teneurs élevées en Cu ou Fe favorisent la formation de phases intermétalliques cathodiques, qui créent des micro-piles électrochimiques responsables de la corrosion localisée [10].

Ainsi, les alliages de la série 2xxx (riches en cuivre) présentent une résistance plus faible à la corrosion que ceux des séries 5xxx (Al-Mg) ou 6xxx (Al-Mg-Si).

Influence de la microstructure

La microstructure joue également un rôle déterminant :

- La présence de zones hétérogènes ou de frontières de grains enrichies en certains éléments peut constituer des sites privilégiés pour l'initiation de la corrosion inter granulaire.
- Les phases intermétalliques contenant du cuivre ou du fer se comportent souvent comme des cathodes locales, accélérant la dissolution anodique de la matrice environnante.

II.2.2. Influence des conditions environnementales

- Atmosphère humide : favorise la formation d'un film plus épais mais potentiellement poreux.
- Eau de mer : particulièrement agressive en raison de sa forte teneur en chlorures.
- Température : une température plus élevée accélère les réactions électrochimiques et donc la dégradation du film protecteur.

En résumé, l'aluminium présente une excellente résistance générale à la corrosion grâce à sa couche passive protectrice. Cependant, cette protection peut être compromise localement par certains ions (notamment les chlorures), par la composition chimique de l'alliage, ou encore par des conditions environnementales sévères. Comprendre ces facteurs est donc essentiel pour choisir correctement les alliages et les traitements adaptés aux applications industrielles.

II.3. Mécanismes de corrosion des alliages d'aluminium

L'aluminium, malgré sa réputation de métal résistant à la corrosion grâce à son film passif protecteur, n'est pas totalement exempt de dégradations. Dans certains environnements agressifs ou sous l'effet de la composition des alliages, divers mécanismes de corrosion peuvent se développer. Ces mécanismes sont souvent localisés et représentent une limite importante à la durabilité des alliages d'aluminium dans les applications industrielles [11]

II.3.1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme, ou corrosion généralisée, correspond à une attaque relativement homogène de toute la surface exposée du métal. Chez l'aluminium, ce type de corrosion est peu fréquent en raison de la stabilité de sa couche passive. Cependant, elle peut se produire dans des environnements extrêmement acides ($\text{pH} < 4$) ou fortement basiques ($\text{pH} > 9$), où l'oxyde protecteur devient soluble [12]. Dans ce cas, le métal se dissout progressivement, entraînant une réduction régulière de l'épaisseur du matériau.

II.3.2. Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est la forme la plus caractéristique et la plus dangereuse de la dégradation des alliages d'aluminium. Elle est déclenchée par la présence d'ions halogénures, en particulier les ions chlorures (Cl^-), qui pénètrent localement la couche d'oxyde protectrice [13]. Ce phénomène conduit à la formation de cavités de petites dimensions mais profondes, appelées "piqûres". Bien que la surface globale paraisse intacte, ces attaques localisées peuvent compromettre rapidement l'intégrité mécanique de la pièce. La sensibilité au piquage dépend fortement de la composition de l'alliage, de la température et de l'aération du milieu.

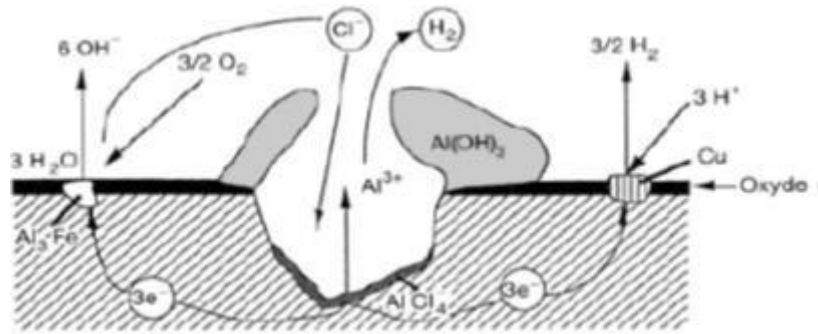


Figure II.3.2.1 Mécanismes de corrosion par piqûres des alliages d'aluminium

II.3.3. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse survient dans les zones confinées où la diffusion de l'oxygène est limitée, par exemple sous des joints, des dépôts ou des assemblages boulonnés [14]. Dans ces espaces restreints, un déséquilibre électrochimique se crée : la zone confinée devient anodique par rapport à la surface exposée, ce qui entraîne une dissolution accélérée du métal. Ce mécanisme est particulièrement redouté dans les structures marines et aéronautiques.

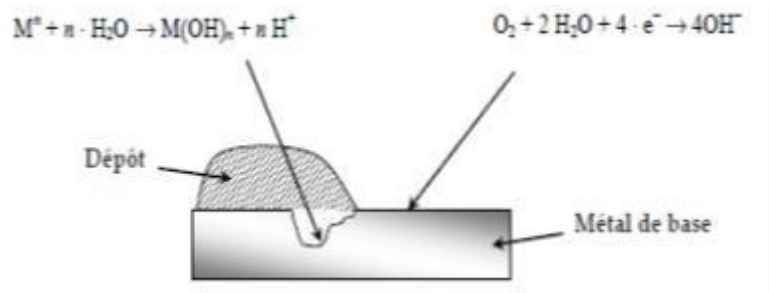


Figure II.3.3.1 Corrosion par effet de crevasse

II.3.4. Corrosion inter granulaire

La corrosion intergranulaire affecte principalement les alliages traités thermiquement. Elle résulte de la ségrégation ou de la précipitation de phases enrichies en certains éléments (comme le Cu ou le Mg₂Si) au niveau des joints de grains [15]. Ces zones deviennent anodiques par rapport à la matrice, favorisant une attaque préférentielle le long des limites de grains. Bien que la matrice apparaisse intacte, la perte de cohésion intergranulaire fragilise considérablement la résistance mécanique du matériau.

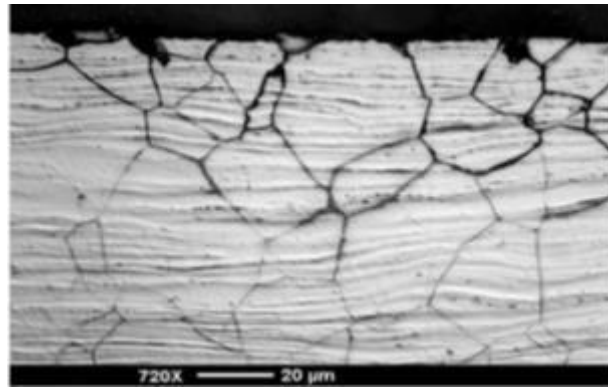


Figure II.3.4.1 *Corrosion inter granulaire*

II.3.5. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique apparaît lorsque l'aluminium est mis en contact avec un métal plus noble (acier inoxydable, cuivre, titane) en présence d'un électrolyte conducteur [17]. L'aluminium, plus électropositive, joue alors le rôle d'anode et se dissout préférentiellement. Ce phénomène est fréquent dans les assemblages métalliques multi-matériaux, où il doit être limité par des isolants électriques ou des traitements de surface.

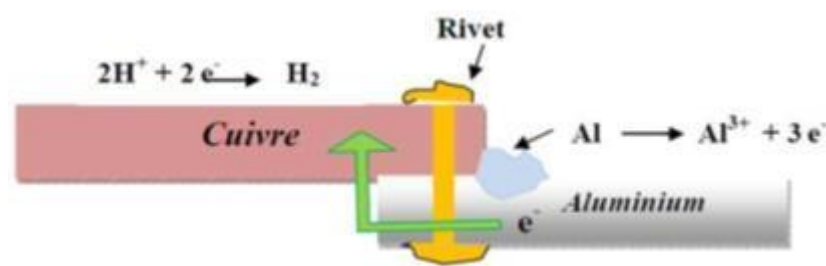


Figure II.3.5.1 *Corrosion galvanique*

II.3.6. Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte résulte de l'action combinée d'un milieu corrosif et de contraintes mécaniques (résiduelles ou appliquées). Elle se traduit par l'apparition de fissures Trans granulaires ou inter granulaires qui peuvent conduire à une rupture brutale du matériau [18]. Les alliages d'aluminium à haute résistance mécanique, comme ceux utilisés en aéronautique (séries 7xxx riches en zinc), sont particulièrement sensibles à ce phénomène.



Figure II.3.6.1 : Corrosion sous contrainte

II.3.7. Corrosion par érosion

La corrosion par érosion est une forme particulière où l'action mécanique d'un fluide en mouvement (eau, vapeur, solutions chargées en particules) s'ajoute au phénomène électrochimique. Le flux détruit localement la couche passive protectrice, qui ne parvient pas à se reformer correctement [11].

Chez l'aluminium et ses alliages, elle est surtout rencontrée dans les turbines, échangeurs de chaleur, conduites ou systèmes hydrauliques soumis à de fortes vitesses. Elle résulte d'une synergie entre usure mécanique et corrosion électrochimique, réduisant significativement la durée de vie des pièces exposées.

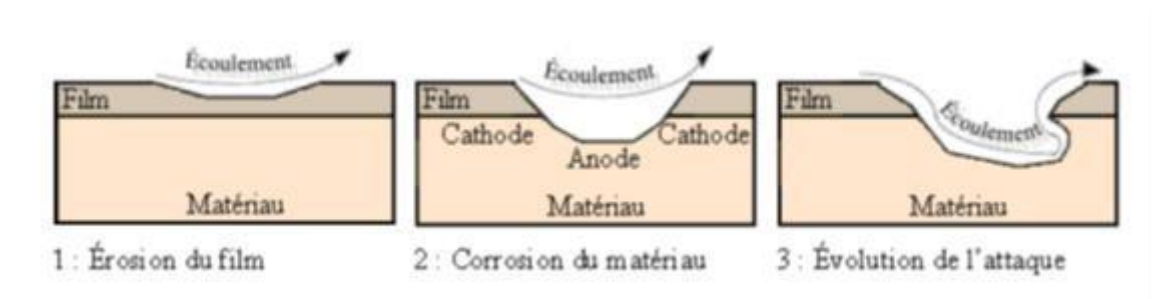


Figure II.3.7.1 : Corrosion sous contrainte

L'analyse des différents mécanismes de corrosion met en évidence la vulnérabilité des alliages d'aluminium lorsqu'ils sont soumis à des environnements agressifs. Bien que la couche passive confère une protection naturelle, celle-ci peut être localement compromise par la présence d'ions chlorures, par des conditions de confinement, par la microstructure de l'alliage ou encore par l'action combinée de contraintes mécaniques et chimiques. Ces phénomènes entraînent des dégradations localisées (piqûres, corrosion intergranulaire, corrosion sous contrainte) qui peuvent compromettre la durabilité et la sécurité des structures.

Face à ces limites, il devient essentiel de mettre en œuvre des stratégies de protection adaptées. Celles-ci visent soit à renforcer la stabilité du film passif, soit à créer une barrière

supplémentaire contre l'environnement corrosif. Parmi les approches les plus utilisées figurent les revêtements de surface, les traitements électrochimiques et l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion, qui permettent de prolonger la durée de vie des alliages d'aluminium dans leurs différentes applications industrielles.

II.4. Moyens de protection contre la corrosion des alliages d'aluminium

La durabilité des alliages d'aluminium dans des environnements agressifs peut être considérablement améliorée grâce à différentes stratégies de protection. Ces méthodes visent à renforcer ou restaurer l'efficacité de la couche passive naturelle, à limiter l'accès des agents corrosifs au métal, ou encore à inhiber les réactions électrochimiques responsables de la dégradation [6,11,19].

II.4.1. Revêtements de surface

Les revêtements organiques (peintures, vernis, polymères) ou inorganiques (oxydes, céramiques) constituent une barrière physique entre le métal et son environnement.

- Les revêtements organiques sont particulièrement utilisés dans les domaines automobile et architectural pour associer protection anticorrosion et fonction esthétique.
- Les revêtements métalliques (zinc, nickel, cadmium) sont appliqués par procédés de dépôt électrolytique ou par projection thermique, apportant une protection galvanique ou une barrière supplémentaire [12,19].
- Enfin, des revêtements hybrides tels que les couches sol-gel ont émergé comme alternative respectueuse de l'environnement, avec une bonne adhérence et une résistance accrue [20].

II.4.2. Traitements électrochimiques

Les traitements électrochimiques constituent des techniques largement utilisées pour renforcer la résistance des alliages d'aluminium :

e) Anodisation

Elle consiste à épaissir artificiellement la couche d'alumine naturelle par oxydation anodique. La Couche formée est dure, poreuse, et peut être colmatée pour améliorer sa compacité. Elle offre une excellente protection contre la corrosion et une bonne base d'adhérence pour les peintures [7,13,19].

f) Conversion chimique

Les traitements au chromate (Cr^{6+}) étaient autrefois répandus pour leurs performances exceptionnelles. Toutefois, en raison de leur toxicité, ils sont progressivement remplacés par des alternatives plus écologiques, comme les procédés à base de zirconium, titane [20,21].

II.4.3. Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs sont des substances ajoutées au milieu corrosif ou intégrées dans un revêtement pour réduire la vitesse des réactions électrochimiques.

- Les inhibiteurs anodiques (ex.: chromates, molybdates) renforcent la passivation de l'aluminium mais sont limités par des considérations environnementales.
- Les inhibiteurs cathodiques (nitrates, phosphates) réduisent la réaction de réduction de l'oxygène.
- Les inhibiteurs dits « verts », issus de composés organiques ou d'extraits végétaux, suscitent un intérêt croissant car ils sont biodégradables et non toxiques [21].

En résumé, la combinaison de revêtements, de traitements électrochimiques et d'inhibiteurs adaptés constitue une stratégie efficace pour prolonger la durée de vie des alliages d'aluminium dans des environnements agressifs. Le choix du procédé dépend des contraintes techniques, économiques et environnementales de l'application considérée.

Références bibliographies

- [1] Hatch, J.E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM International, 1984.
- [2] Davis, J.R. *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 1999.
- [3] Fontana, M.G. *Corrosion Engineering*. 3^e éd., McGraw-Hill, 1986.
- [4] Uhlig, H.H., Revie, R.W. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. 4^e éd., John Wiley & Sons, 2008.
- [5] Roberge, P.R. *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill, 2000.
- [6] Polmear, I.J. *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. 4^e éd., Butterworth-Heinemann, 2006.
- [7] Shreir, L.L. *Corrosion*. Vol. 1 et 2, 3^e éd., Butterworth-Heinemann, 1994.

- [8] Pourbaix, M. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. 2^e éd., NACE International, 1974.
- [9] ASTM G44-99. *Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5% Sodium Chloride Solution*. ASTM International, 2011.
- [10] Jones, D.A. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2^e éd., Prentice Hall, 1996.
- [11] Sedriks, A.J. *Corrosion of Stainless Steels*. 2^e éd., John Wiley & Sons, 1996.
- [12] Revie, R.W., Uhlig, H.H. *Corrosion and Corrosion Control*. 3^e éd., John Wiley & Sons, 1991.
- [13] Szklarska-Smialowska, Z. *Pitting Corrosion of Metals*. NACE International, 1986.
- [14] Kelly, R.G., Scully, J.R., Shoesmith, D.W., Buchheit, R.G. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*. CRC Press, 2002.
- [15] Birks, N., Meier, G.H., Pettit, F.S. *Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals*. 2^e éd., Cambridge University Press, 2006.
- [16] Sinko, J. "Challenges of Chromate Inhibitor Pigments Replacement in Organic Coatings." *Progress in Organic Coatings*, vol. 42, 2001, pp. 267–282.
- [17] Schweitzer, P.A. *Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals*. 2^e éd., CRC Press, 2007.
- [18] Parkins, R.N. "Stress Corrosion Cracking of Aluminum Alloys." *Metallurgical Transactions A*, vol. 13, 1982, pp. 1395–1406.
- [19] Verdier, S., Dalard, F. "Inhibition of Pitting Corrosion of Aluminum Alloys by Cerium Chloride." *Corrosion Science*, vol. 45, 2003, pp. 707–719.
- [20] Zhang, X.G. *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. Springer, 1996.
- [21] Buchheit, R.G. "Chemistry and Structure of Passive Films on Aluminum Alloys." *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 142, no. 11, 1995, pp. 3994–4003.

Chapitre III: Matériaux et Techniques Expérimentales

III Introduction

Ce chapitre sur les matériaux et techniques expérimentales vise à présenter les méthodes utilisées pour caractériser l'alliage d'aluminium recyclé AlMgSiCu[Fe] et étudier son comportement face à la corrosion dans un milieu aqueux à différentes températures.

III.1. Matériau utilisé

Pour l'étude expérimentale on a utilisé l'alliage d'aluminium recyclé AlMgSiCu(Fe) sa composition chimique donnée dans le tableau ci-dessus.

Tableau II.4.3.1: Composition chimique de l'alliage d'aluminium recyclé

Elément	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Sb	Ga	V
% en masse	0.61	>1.50	0.59	0.65	0.4	0.23	0.1	>0.1	>0.2
Elément	Ti	Zn	Pb	Be	Sr	In	Zr	Co	Mo
% en masse	0.014	0.017	0,024	0.004	0.004	>0.02	0.001	>0.05	>0.02
Elément	P	Ce	Al						
% en masse	>0.01	>0.05	89.73						

Les électrodes de travail ont été découpées à l'aide d'une scie à métaux, avec des dimensions de $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, puis percées à une extrémité à l'aide d'une perceuse afin d'y connecter un fil conducteur en cuivre. Les électrodes de travail ont ensuite été enrobées et polies avec du papier abrasif de différentes granulométries.



Figure II.4.3.1: découper des échantillons

III.2. Préparation métallographique

III.2.1. Enrobage

Nous avons utilisé un enrobage à froid pour éviter toutes transformations et changements structuraux. Avec une résine polymère pour isoler la surface d'étude.



Figure III.2.1.1 : Enrobage des échantillons

III.2.2. Polissage

Nous avons effectué un polissage mécanique, qui consiste à enlever mécaniquement des micros couches avec des papiers abrasifs à granulométrie décroissante ; 400, 800, 1000, 1200, 1500, 2000. Afin d'éviter les rayures produites par le papier abrasif, nous effectuons une rotation de 90° à chaque changement de papier abrasif.



Figure III.2.2.1 polisseuse (struers rotopol-31)

III.2.3. Attaque chimique

Après le polissage l'échantillon est rincé à l'eau puis séché. Afin de rendre les phases constituant l'alliage à partir d'une surface polie, il est nécessaire pour certains alliages formant des couches d'oxydes protectrices en surface tels que l'aluminium et ses alliages, de recourir à une attaque électrochimique en utilisant le réactif de Keller pour révéler la microstructure des alliages d'aluminium.

III.3. Observation au microscope optique

Les observations ont été effectuées avec un microscope optique HUND Wetzlar, associé à une caméra et au logiciel PICED CORA, afin d'observer les échantillons après polissage et attaque chimique ainsi qu'avant et après immersion.



Figure III.2.3.1: Microscope optique (hund WETZLAR)

III.4. La dureté brinell

La dureté d'un métal se réfère à sa résistance face à la pénétration d'un matériau plus dur. Différents tests de dureté sont utilisés, partageant un principe commun mais varient dans la forme du pénétrateur et la charge utilisée. Dans notre étude nous avons déterminé la dureté Brinell, en réalisant 5 indentations pour chaque échantillon.



Figure III.2.3.1: Duromètre (hommel)

La dureté Brinell est déterminée à partir du rapport entre la charge appliquée et la surface de l’empreinte laissée par la bille, selon la relation : $HB = F/S$ où F représente la charge appliquée (en kgf) et S la surface de l’empreinte (en mm^2), qui correspondent à une calotte sphérique. La dureté Brinell (HB) est calculée à partir de l’équation (eq (1)).

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots eq (1)$$

D : Le diamètre de la bille.

d : diamètre de l’empreinte.

F : la charge appliquée (en kgf).

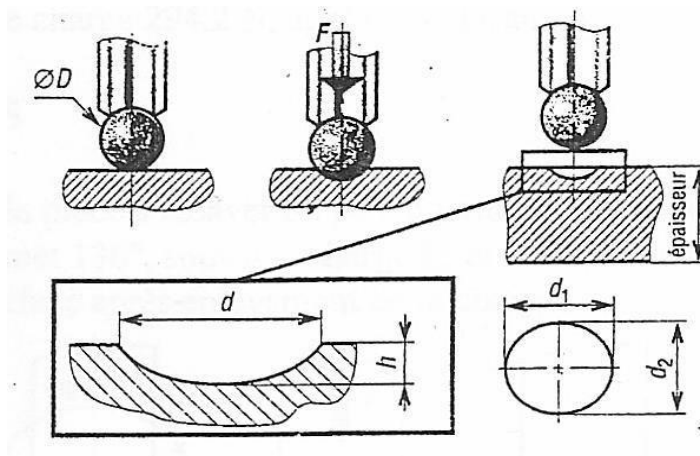


Figure III.2.3.2 : Principe de l’essai de dureté brinell

III.5. Essai de microdureté

Les essais de microdureté ont été réalisés à l'aide d'un appareil de type FALCON 400 G2O1 (INNOVATEST Europe BV). La méthode utilisée est la microdureté Vickers, avec une charge d'essai de 0,005 kgf (HV0.005) appliquée pendant un temps de maintien de 3 secondes.

Les échantillons d'alliage d'aluminium recyclé ont été soigneusement préparés avant essai afin d'obtenir une surface plane et polie, garantissant la précision des mesures. Cinq empreintes ont été effectuées sur chaque échantillon, dans des zones distinctes, afin de tenir compte de l'éventuelle hétérogénéité de la microstructure.

Les diagonales des empreintes (d_1 et d_2) ont été mesurées automatiquement par le logiciel associé à l'appareil, puis converties en valeurs de dureté exprimées en HV 0.005. La moyenne des valeurs de dureté a ensuite été calculée, ainsi que les paramètres statistiques associés (valeur minimale, maximale, écart-type, étendue des valeurs).

- Principe

La mesure de la microdureté Vickers repose sur l'utilisation d'un pénétrateur en diamant de forme pyramidale à base carrée, dont l'angle au sommet est de 136° . Ce pénétrateur est appliqué sur la surface de l'échantillon sous une charge définie, produisant une empreinte visible au microscope.

Les longueurs des deux diagonales de l'empreinte sont ensuite mesurées avec précision, et leur moyenne est calculée. La dureté Vickers est alors déterminée à partir de la relation :

$$H_V = \frac{2 \cdot P \cdot \sin(136^\circ)}{d^2} \quad \Longrightarrow \quad H_V = 1854.4 \frac{P}{d^2}$$

où P est la charge appliquée (en kgf) et d la moyenne des diagonales de l'empreinte (en mm). Cette méthode présente l'avantage d'être adaptée à une large variété de matériaux, notamment les alliages d'aluminium, en fournissant une évaluation fiable de la résistance locale à la pénétration ainsi que des indications sur l'homogénéité du matériau.

III.6. Testes électrochimique

Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'une cellule conventionnelle à trois électrodes, reliée à un potentiostat /galvanostat Autolab et pilotée par le logiciel NOVA.

L'électrode de travail correspond à l'alliage étudié Al-Mg-Si-Cu[Fe], soigneusement préparé par polissage et nettoyage avant chaque essai afin de garantir des conditions initiales reproductibles. L'électrode de référence utilisée est une électrode Ag/AgCl, et la contre électrode constituée de graphite.

Les échantillons ont été immergés dans une solution électrolytique composée d'eau distillée et de 3 % en masse de Na Cl, un milieu agressif simulant l'environnement aqueux chloruré responsable de la corrosion des alliages d'aluminium. Afin d'étudier l'effet de la température, les essais ont été conduits à 24 °C, 32 °C et 62 °C. Par ailleurs, pour chaque température, deux durées d'immersion ont été fixées, 1 heure et 3 heures, afin d'évaluer l'évolution des phénomènes de corrosion en fonction du temps de séjour dans l'électrolyte.

Les mesures électrochimiques réalisées comprennent :

- L'enregistrement des courbes de polarisation (anodiques et cathodiques), permettant de caractériser les mécanismes de corrosion et de déterminer les paramètres électrochimiques associés (potentiel de corrosion, densité de courant de corrosion, la résistance à la polarisation...etc.)
- Le suivi du potentiel de corrosion libre OCP

Ces données permettront d'analyser de manière comparative l'influence de la température et du temps d'immersion sur le comportement électrochimique de l'alliage étudié dans un environnement aqueux ainsi que le suivi de la morphologie de la corrosion avant et après immersion en fonction du temps et de la température.



Figure III.2.3.1 : Potentiostat/Galvanostat [AUTOLAB]

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV. Introduction

Ce chapitre donne l'interprétation des résultats qui consiste à donner du sens aux données obtenues et à les analyser, afin de vérifier le comportement à la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe), et de tirer des conclusions significatives.

IV.1. Microdureté de l'alliage AlMgSiCu (Fe)

L'histogramme représenté sur la figure II.1 donne la microdureté Vickers de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après 5 tests et la moyenne de cette microdureté. La moyenne de microdureté de cet alliage est de 116,50 HV. Cette microdureté est élevée par rapport à celle de l'aluminium pur, qui est d'environ 26 HV, et proche de celle des aciers ordinaires qui ont une microdureté supérieur à 120 HV.

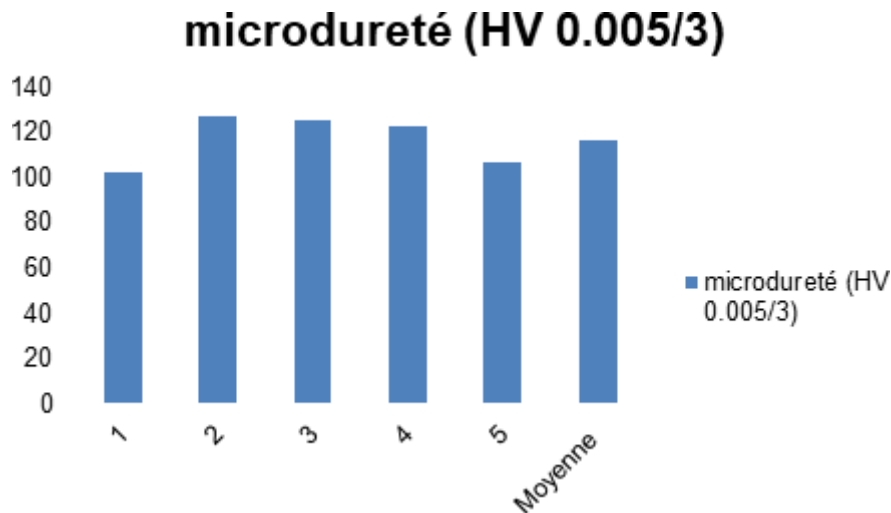


Figure III.2.3.1 Microdureté Vickers de l'alliage AlMgSiCu (Fe)

IV.2. Morphologie de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe)

La figure III.2.3.1 est obtenue après polissage mécanique, sans attaque et une heure d'immersion Figure III.2.3.1 (a et b) à 24°C dans une solution de 3% en masse de Na Cl.

Sur cette figure, une corrosion localisée sur les sillons dus au polissage mécanique a été observée, une corrosion autour de certaines particules intermétalliques a été aussi observée sur la Figure III.2.3.1 (a et b). La corrosion sur les sillons est probablement due à la stagnation de la solution de Na Cl à l'intérieur des sillons par contre la corrosion observe autour des particules est due à la différence de potentiel entre les particules et la phase mère en

aluminium, puisque la corrosion apparaît entour les particules ceci nous amène à dire que les particules sont plus nobles que la matrice.

Une corrosion généralisée a été aussi observée sur la Figure III.2.3.1 (a et b), après une heure d'immersion, celle-ci s'est développée sur toute la surface, la figure III.1a et b ont un grossissement différent.

Ainsi, après une immersion dans la solution à 3% en masse de Na Cl à 24 °C, les corrosions localisées et généralisées sont observées.

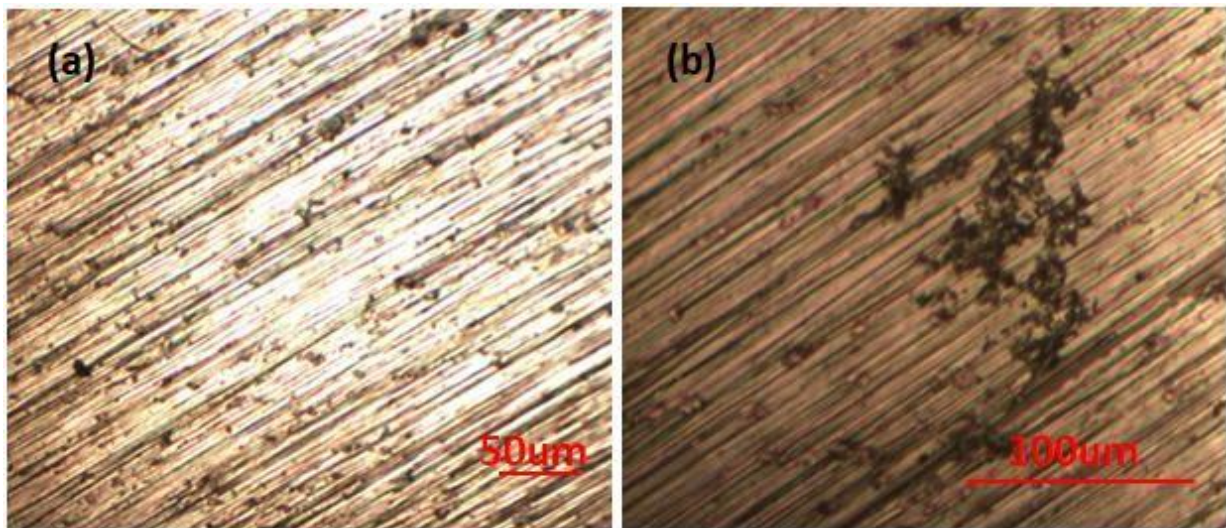


Figure III.2.3.1: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après 1 heure d'immersion à une température de 24°C

Après 3 heures d'immersion à une température de 24°C (Figure III.2.3.2(a et b)) la corrosion localisée et la corrosion généralisée se développent sur toute la surface de l'échantillon. Et la corrosion des particules moins nobles que la matrice couvre ces particules. Cette figure montre la sensibilité de l'alliage AlMgSiCu (Fe) à la corrosion localisée et généralisée à 24°C.

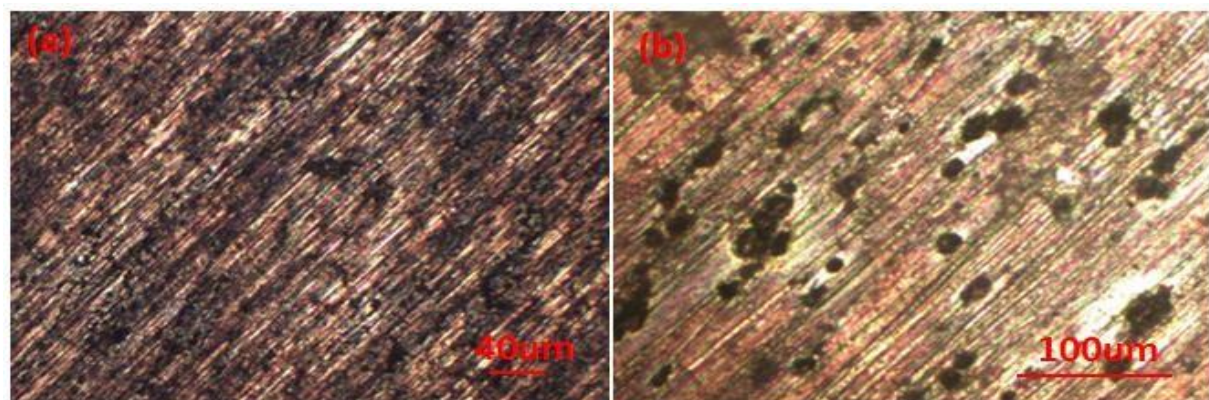


Figure III.2.3.2: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) : (a et b) après trois heures d'immersion à une température de 24°C

Une température légèrement plus élevée de 32°C (figures III.2.3.3 (a et b)) montre une augmentation de la vitesse de corrosion localisée et la corrosion généralisée, L'augmentation de la corrosion localisée est observée autour des particules intermétalliques, sur les sillons et sur les particules moins nobles que la matrice. La corrosion généralisée se développe sur toute la surface de l'échantillon. L'augmentation du temps d'immersion à la température de 32°C montre l'étendue de la corrosion localisée et généralisée. Sur ces deux figures, nous observons la tendance de la corrosion généralisée à remplacer la corrosion localisée.

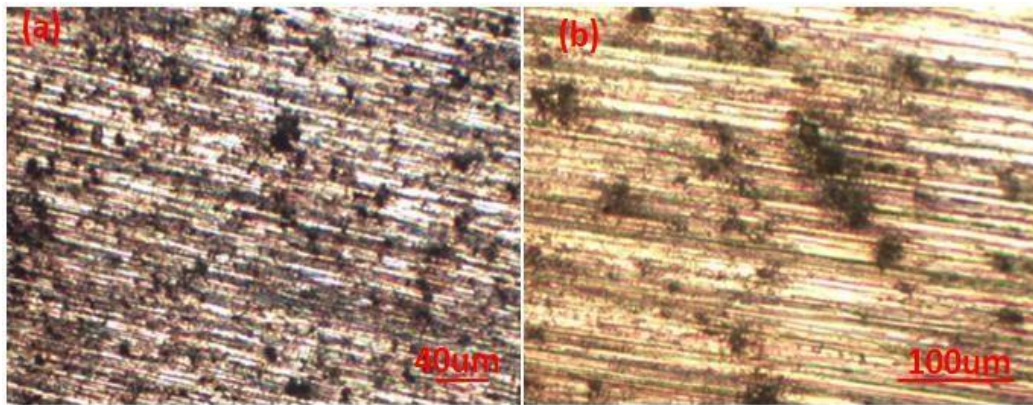


Figure III.2.3.3: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après polissage et après : (a et b) une heure d'immersion à une température de à 32°C

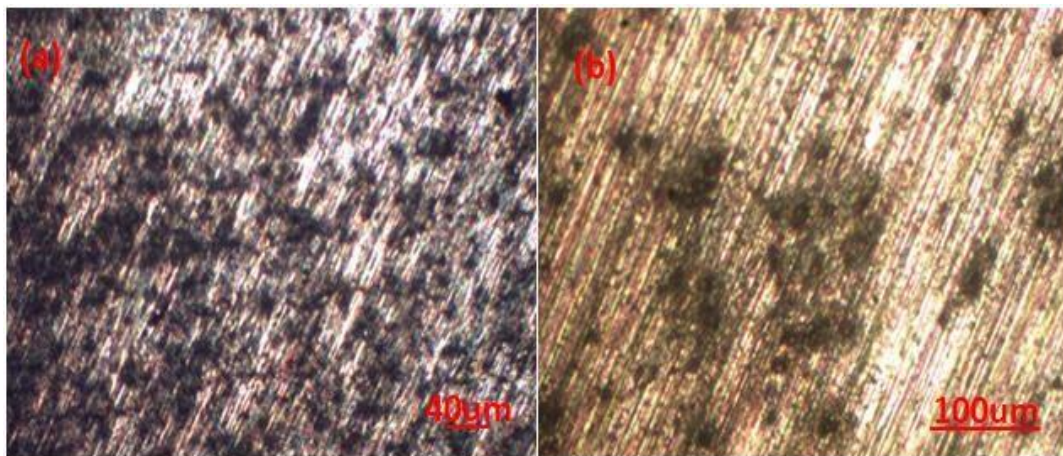


Figure III.2.3.4: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après polissage et après : (a et b) trois heures d'immersion à une température de à 32°C

Pour une température plus élevée de 62°C (le double de 32°C), nous observons une forte étendue de la corrosion généralisée qui tend à remplacer presque la totalité de la corrosion

localisée. Ceci dit, la corrosion localisée est toujours existante même après trois heures de corrosion à la température de 62°C.

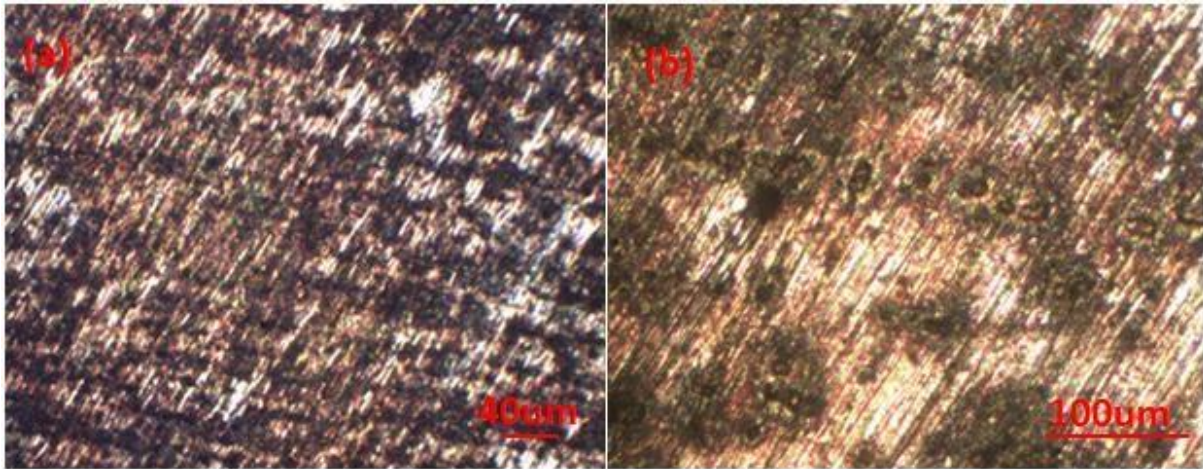


Figure III.2.3.5: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) une heure d'immersion à une température de à 62°C

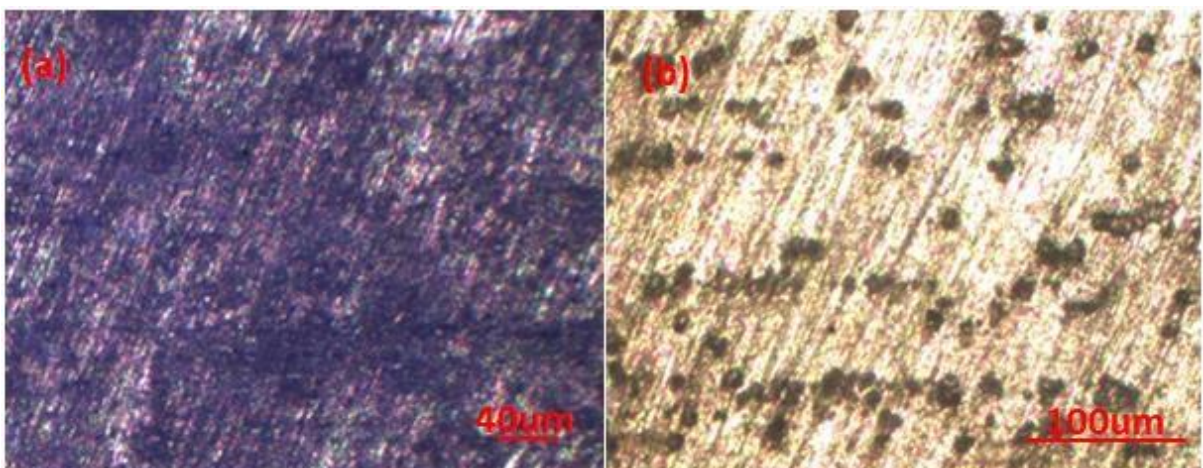


Figure III.2.3.6: Microstructure de l'alliage AlMgSiCu (Fe) après : (a et b) trois heures d'immersion à une température de à 62°C

IV.3. Cinétique de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe)

IV.3.1. Potentiel de la corrosion libre (potentiel d'abandon) après une heures d'immersion

L'enregistrement du potentiel de la corrosion libre aux températures de 24°C, 32 °C et 62 °C est représenté par la figure IV.3.1.1

Au départ, le potentiel de la corrosion libre est de -0.5 V pour l'alliage en immersion dans la solution de 3% de Na Cl à une température de 32 °C et de -0.56 V pour l'alliage en immersion dans la solution de 3% Na Cl aux températures de 24 °C et 62 °C.

Par la suite, cette figure montre une diminution du potentiel de la corrosion libre jusqu'à une valeur de -0.55 V suivie d'une stabilisation du potentiel de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu(Fe) à cette valeur en immersion jusqu'à une heure d'immersion aux températures de 24 °C et 32 °C.

Une diminution suivie d'une augmentation du potentiel de la corrosion libre durant les 600 premières secondes jusqu'à une valeur de -0.6 V suivi d'une stabilisation jusqu'à 2600 secondes d'immersion, par la suite, nous observons une diminution du potentiel de la corrosion libre jusqu'à -0.7 V pour l'alliage AlMgSiCu(Fe) en immersion a une température de 62 °C.

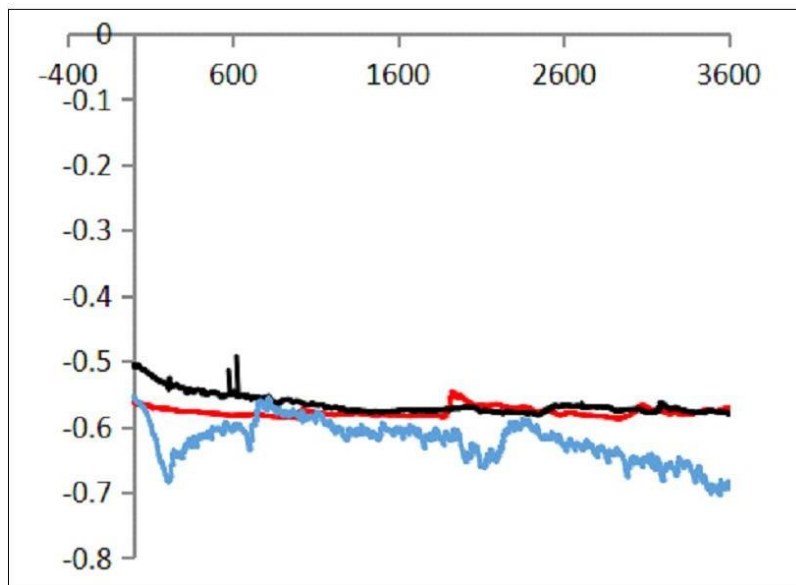


Figure IV.3.1.1: Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AlMgSiCu(Fe) a différentes températures durant une heure d'immersion : a)($-0,56$ V) 24 °C, b)($-0,5$ V) 32 °C, c)($-0,56$ V) 62 °C

IV.3.2. Courbes de polarisation après une heure et 3 heures d'immersion

Représente les courbes de polarisation de l'alliage AlMgSiCu(Fe) après immersion dans une solution de 3% en masse de Na Cl après une durée d'une heure et de trois heures d'immersion aux températures de 24 °C, 32 °C, 62 °C. Ces courbes montrent que le potentiel de corrosion à 24 °C augmente après trois heures d'immersion, à 32 °C diminue après trois heures

Chapitre VI : résultats et discussions

d'immersion, et à 62 °C augmente après trois heures d'immersion. Cette situation est due au phénomène de passivation qui se produit dans le domaine anodique. Le palier de la passivation apparaît bien sûr dans les courbes des figures IV.4.3.2.1. (A et C). Le tableau IV.3.1 et les deux figures (IV.3.2.1 et IV.3.2.2) montre l'évolution du potentiel de corrosion et la résistance à la polarisation après une heure de corrosion et trois heures de corrosion des échantillons en immersion dans une solution de 3% en masse aux températures de 24 °C, 31 °C, 62 °C. La résistance à la polarisation est la moindre pour l'échantillon en immersion à 62 °C après une durée d'immersion d'une heure. Cette résistance est maximale pour l'échantillon une heure en immersion a la température de 24 °C.

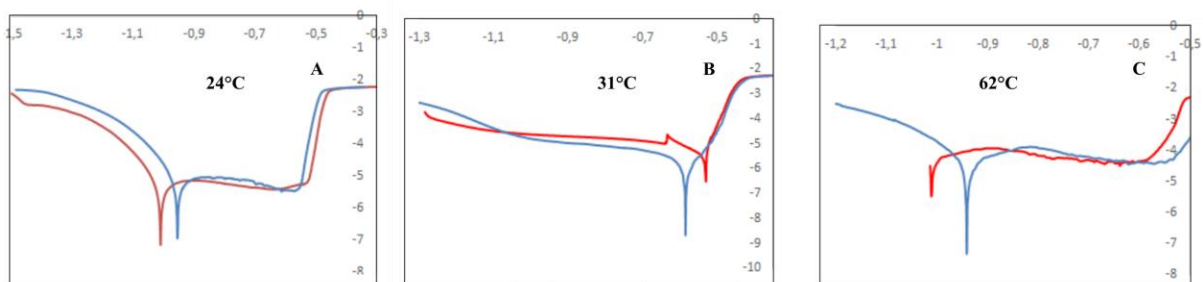


Figure IV.3.2.1: Courbes de polarisation après une heure et 3 heures d'immersion : la courbe rouge est obtenue après une heure d'immersion, la courbe bleue est obtenue après trois heures d'immersion,

- A) immersion a la température de 24 °C,
- B) immersion a la température de 32 °C,
- C) immersion a la température de 62 °C

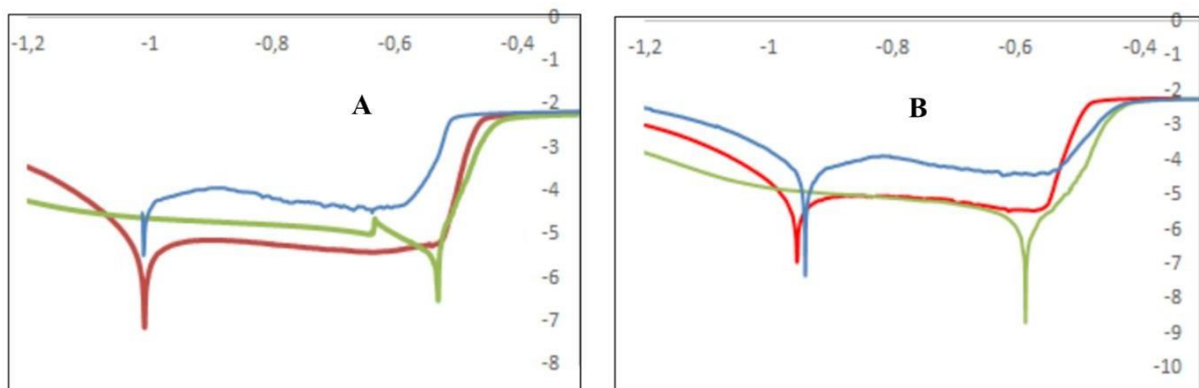


Figure IV.3.2.2 : Courbes de polarisation après une heure et trois heures d'immersion : les courbes rouges sont obtenues pour $T=24$ °C, les courbes vertes sont obtenues pour immersion à $T=32$ °C, les courbes bleues sont obtenues pour immersion à $T=62$ °C, (A échantillons après une heure immersion) (échantillons après trois heures immersion B)

Tableau IV.3.2.1: Paramètres obtenue des courbes de polarisation

Echantillons	E_{corr} (V)	R_p (K Ω)
24°C1h	-1,008858	13338,687
24°C/3h	-0,953133	6188,106
32°C1h	-0,53013	1656,663
32°C/3h	-0,584	9740,00
62°C1h	-1,01	219,183
62°C/3h	-0,940094	579,807

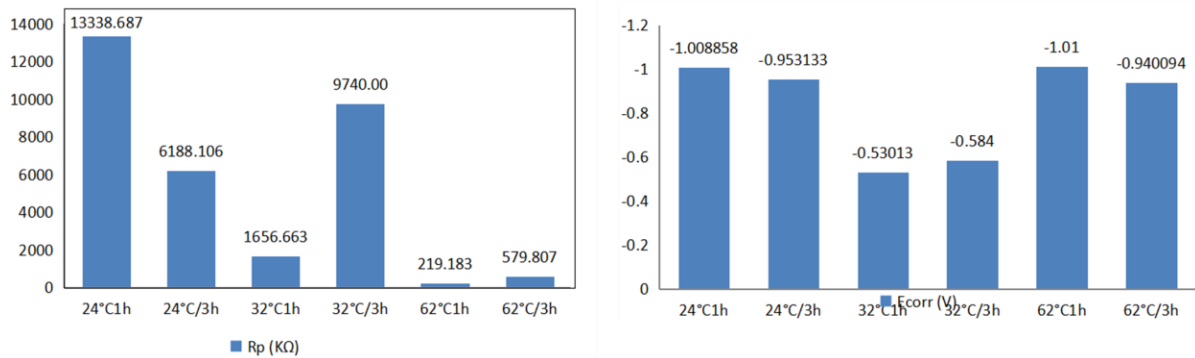


Figure IV.3.2.3: Évolution de la résistance de polarisation et du potentiel de corrosion en fonction du temps d'immersion et de la température.

IV.4. Conclusion

L'étude de l'alliage AlMgSiCu(Fe) dans une solution aqueuse 3% de Na Cl nous a montres que :

- 1) La microdureté Vickers de cet alliage est proche de celle des aciers ordinaires.
- 2) Après immersion de l'alliage AlMgSiCu(Fe) dans une solution de 3% de Na Cl, une corrosion localisée et une corrosion généralisée s'amorcent.
- 3) Le potentiel de la corrosion libre après 1 heure est proche pour les températures de 24°C, de 32°C et de 62°C
- 4) Le phénomène de passivation contrôle le potentiel de corrosion et la résistance de passivation.

Conclusion générale et Perspectives

V. Conclusion générale et Perspectives

- 1) Nous soulignons que cette microdureté Vickers et la dureté Brinell est élevée par rapport à celle de l'aluminium pur, et proche de celle des aciers ordinaires.
- 2) Une corrosion autour de certaines particules intermétalliques, une corrosion sur les sillons, et une corrosion généralisée ont été observées.
- 3) Une augmentation de la température de la solution et l'augmentation de la durée d'immersion amplifient la sensibilité à la corrosion localisée et généralisée.
- 4) Le potentiel de corrosion libre pour les températures 24°C, 32°C, 62°C varie entre -0.5 et -0.7 V durant une heure d'immersion.
- 5) Le potentiel de corrosion obtenu à la température de 32°C est le plus grand.
- 6) La résistance de polarisation obtenue à la température de 24°C est la plus grande.

perspective

- 1) L'étude de la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe) à une température plus élevée est conseillée.
- 2) L'étude de l'effet de la déformation sur la corrosion de l'alliage AlMgSiCu (Fe) peut enrichir les informations concernant la corrosion de cet alliage.