

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique



## **Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en Génie Mécanique**

**Option : Génie Des Matériaux**

### **Thème :**

---

**Etude du comportement à la corrosion et à la dureté de la zone de soudage et de la surface externe obtenue par un soudage sous une contrainte de compression à haute température : Cas soudage de l'aluminium de pureté industrielle avec l'alliage aluminium-silicium**

---

**Réalisé par :**

- Mr GHEZAILI Abderahmane
- Mr CHIKHI Mahdi

**Membres de jury :**

M<sup>me</sup> MENDIL S.

Mr ZAZI N.

Mr HADJ-ALI Y.

Mr FILALI S.

Mr ILLOUL CH.

**Présidente**

**Encadreur**

**Co-encadreur**

**Examineur**

**Invité**

**2021/2022**



# Remerciements

*Nous remercions le bon Dieu pour le courage et la patience qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs : Mr ZAZI Nacer et HADJ-ALI Youcef Pour avoir accepté de nous encadrer et de nous orienter durant ce projet.*

*Nous remercions également les membres du jury qui nous en fait honneur de juger notre travail.*

*Nous tenons à remercier nos enseignants qui nous ont transmis le savoir et le bien.*

*En reconnaissance à leur aide et leur collaboration, on remercie le personnel du laboratoire (SDM, RDM)*

*Ces remerciements ne seraient pas complets si on n'a pas pensé à les destiner, avec notre profonde reconnaissance, à nos parents qui nous ont offert un environnement favorable pour mener à terme notre travail.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.*



# Sommaire

**Remerciements**

**Liste des symboles**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale..... 1**

## **Chapitre I : L'aluminium et ses alliages**

I.1. Introduction.....	2
I.2. L'aluminium et ses alliages .....	2
I.3. Production de l'aluminium et ses alliages .....	3
I.3.1. Le minerai de l'aluminium.....	4
I.3.2. Traitement de la bauxite.....	4
I.4. Domaine d'utilisation d'aluminium .....	5
I.5. Les caractéristiques de l'aluminium .....	7
I.5.1. Propriété.....	7
I.5.2. Etats métallurgiques.....	8
I.5.3. Désignations des alliages d'aluminium .....	8
I.5.3.1. Désignation numérique .....	8
1- L'aluminium série 1000 .....	9
2- L'aluminium série 4000 .....	<10
I.6. La corrosion de l'aluminium et ses alliages.....	12
I.6.1. Différents types de corrosion .....	13
1. Corrosion uniforme.....	13
2. Corrosion par piqûres .....	13
3. Corrosion galvanique .....	14
4. Corrosion caverneuse .....	14
5. Corrosion intergranulaire .....	15

## **Chapitre II : Le soudage**

II.1. Introduction .....	20
II.2. Types de Soudage .....	20
II.2.1. Soudage à l'arc .....	20
II.2.2. Soudage au fer .....	20
II.2.3. Soudage TIG (Tungstène Inerte Gas) .....	21

II.2.4. Soudage par résistance.....	23
II.2.5. Soudage par friction.....	24
II.2.6. Soudage MIG (Métal Inert Gas) .....	25
II.2.7. Soudage par friction rotative .....	25
II.2.8. Soudage MAG (Metal Active Gas) .....	25
II.2.9. Soudage par diffusion .....	26
II.3. Soudage de l'aluminium .....	26
II.3.1. Influence des propriétés physico-chimiques.....	26
II.4. Défauts de soudage dans l'aluminium.....	27
II.4.1. Porosités.....	27
a) Porosités localisées.....	27
b) Porosités alignées.....	27
c) Porosités uniformément réparties.....	27
II.5. Effet des paramètres de soudage.....	28
II.6. La métallurgie de soudage de l'aluminium .....	29

### **Chapitre III : Procédés et techniques expérimentales**

III.1. Introduction .....	32
III.2. Matériaux utilisés .....	32
III.3. Techniques expérimentales .....	32
III.3.1. Préparation des échantillons .....	32
III.3.2. Réalisation du mécanisme du soudage .....	33
III.3.3. Paramètres de soudage .....	33
III.3.4. Conditions de soudage .....	34
III.3.5. Choix des températures et des temps de maintien lors du traitement thermiques, et de la contrainte de compression .....	35
III.4. Caractérisation mécanique .....	35
III.4.1. Mesure de dureté .....	35
III.4.2. Analyse métallographique.....	37
a) Préparation des échantillons.....	37
b) Observation par microscope optique (MO).....	37
III.4.3. Etude à la corrosion.....	38
a) Préparation des échantillons.....	38
b) Préparation d'une solution corrosive.....	39
c) Mesure du potentiel de la corrosion libre.....	39

d) Tracé des courbes de polarisation .....	40
--	----

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV.1. Introduction .....	41
IV.2. Caractérisation mécanique .....	41
IV.3. Caractérisation de la microstructure .....	47
IV.3.1. Microstructures de l'aluminium industriel et de l'alliage aluminium-silicium avant soudage .....	47
IV.3.2. Caractérisation électrochimique .....	50
IV.4. Résultats des tests de polarisation .....	54
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>60</b>
<b>Bibliographie</b>	

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Etapes de production de l'aluminium.....	4
<b>Figure I.2.</b> Traitement de la bauxite .....	5
<b>Figure I.3.</b> Diagramme d'équilibre de l'aluminium silicium .....	11
<b>Figure I.4.</b> Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium .....	13
<b>Figure I.5.</b> Exemple caractéristique d'une corrosion d'un alliage d'aluminium par un couplage galvanique avec un acier inoxydable (une vis).....	14
<b>Figure I.6.</b> Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium .....	15
<b>Figure I.7.</b> Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition .....	18
<b>Figure II.1.</b> Principe de la soudure à l'arc électrique .....	20
<b>Figure II.2.</b> Le schéma de soudage a fer .....	21
<b>Figure II.3.</b> Principe de soudage TIG.....	22
<b>Figure II.4.</b> Principe du soudage par point.....	23
<b>Figure II.5.</b> Principe de la soudure par molette.....	24
<b>Figure II.6.</b> Différents étapes de soudage par friction.....	24
<b>Figure II.7.</b> Soudage par friction rotative.....	25
<b>Figure II.8.</b> Principe de soudage MIG et MAG .....	26
<b>Figure II.9.</b> Porosités .....	28
<b>Figure III.1.</b> Forme de l'échantillon .....	33
<b>Figure III.2.</b> Mécanisme de serrage .....	33
<b>Figure III.4.</b> Machine à traction .....	34
<b>Figure III.5.</b> Four électrique à chambre horizontale .....	34
<b>Figure III.6.</b> Soudure obtenue .....	35
<b>Figure III.7.</b> Appareille d'essai de dureté .....	36
<b>Figure III.8.</b> Echantillon lors d'essai de dureté .....	36
<b>Figure III.9.</b> Polisseuse utilisée.....	37
<b>Figure III.10.</b> Microscope optique .....	38
<b>Figure III.11.</b> Echantillon enrobé à froid .....	39
<b>Figure III.12.</b> Potentiostat (autolab).....	40
<b>Figure III.13.</b> Dispositif expérimental des tests de polarisation .....	40
<b>Figure VI.1.</b> Histogramme de dureté Vickers avant soudage des échantillons (Al, AlSi).....	41

<b>Figure IV.2.</b> Histogramme de dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l'alliage AlSi.....	43
<b>Figure IV.3.</b> Histogramme de dureté Vickers après le soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l'aluminium.....	44
<b>Figure IV.4.</b> Histogramme de dureté Vickers sur la coupe centrale de la zone de soudage .....	44
<b>Figure IV.5.</b> Histogramme dureté Vickers après soudage à la limite extérieure de des échantillons (1, 2, 3, 4, 5) .....	45
<b>Figure IV.6.</b> Histogramme dureté Vickers à la limite extérieure de l'alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5) .....	46
<b>Figure IV.7.</b> Histogramme de dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5) .....	46
<b>Figure VI.8.</b> Échantillon d'alliage aluminium-silicium : avant immersion (a), et après 1h (b), et 72h (c) d'immersion, Échantillon d'aluminium industriel : avant immersion(d), et après 1h (e), et 72h (f) d'immersion.....	47
<b>Figure VI.9.</b> Échantillon ayant subi un soudage à la température de 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes sous une contrainte compression de 30 KN (coupe centrale), avant émergence (a), après émergence (1h (b), 48h (c), 72h (d)), effet loupe de l'image (c).....	48
<b>Figure VI.10.</b> Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 550 avec un maintien de 30 minutes et sous une contrainte de compression de 50, avant émergence (a), après émergence (24h (b) ,72h (c)).....	49
<b>Figure IV.11.</b> Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 500 avec un maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 30, (c, d), avant émergence (a, c), 72 heures après immersion (b,d).....	49
<b>Figure IV.12.</b> Potentiel de la corrosion libre de la première heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).....	50
<b>Figure IV.13.</b> Potentiel de la corrosion libre de la première heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de la face des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	51
<b>Figure IV.14.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 24 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	51
<b>Figure IV.15.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 24 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	52

<b>Figure IV.16.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 48 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	52
<b>Figure IV.17.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 48 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	53
<b>Figure IV.18.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 72 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	53
<b>Figure IV.19.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 72 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	54
<b>Figure IV.20.</b> Courbes de polarisation après une heure d'immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	54
<b>Figure IV.21.</b> Courbes de polarisation après une heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	55
<b>Figure IV.22.</b> Courbes de polarisation après 72 heure d'immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	56
<b>Figure IV.23.</b> Courbes de polarisation après 72 heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi) .....	56

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Propriétés de l'aluminium.....	7
<b>Tableau I.2.</b> Normalisation des états métallurgiques .....	8
<b>Tableau I.3.</b> Composition chimique de l'aluminium série 1000.....	10
<b>Tableau I.4.</b> Caractéristiques physiques de l'aluminium série 1000 .....	10
<b>Tableau I.5</b> Composition chimique de l'aluminium silicium .....	11
<b>Tableau I.6.</b> Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion formes de corrosion généralement observées dans ces alliages.....	16
<b>Tableau I.7.</b> Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques.....	17
<b>Tableau I.8.</b> Température et formes de corrosion de l'aluminium.....	19
<b>Tableau II.1.</b> Propriété physique de l'aluminium .....	27
<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de l'alliage Al 1050.....	32
<b>Tableau III.2.</b> La composition chimique de l'alliage aluminium silicium .....	32
<b>Tableau III.3.</b> Paramètres de soudage.....	34
<b>Tableau VI.1.</b> Dureté Vickers des échantillons (Al ; AlSi) avant soudage.....	41
<b>Tableau IV.2.</b> Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l'alliage AlSi .....	43
<b>Tableau IV.3.</b> Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l'aluminium .....	43
<b>Tableau IV.4.</b> Dureté Vickers coté (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone du soudage zone de soudage.....	44
<b>Tableau IV.5.</b> Dureté Vickers après soudage à la limite extérieure de l'aluminium des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	45
<b>Tableau IV.6.</b> Dureté Vickers à la limite extérieure de l'alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	45
<b>Tableau IV.7.</b> Dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	46
<b>Tableau IV.8.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d'immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons .....	57
<b>Tableau IV.9.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d'immersion de la surface représentant la face externe des échantillons .....	58
<b>Tableau IV.10.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d'immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons .....	58
<b>Tableau IV.11.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d'immersion de la surface représentant la face externe des échantillons .....	59

## Liste des symboles

<b>AL :</b>	Aluminium
<b>ALSI :</b>	Aluminium silicium
<b>Ecorr :</b>	Potentiel de corrosion
<b>Rp :</b>	Résistance à la polarisation
<b>μ :</b>	Micro millionième $10^{-6}$
<b>Ω :</b>	Est l'unité de résistance électrique du Système international (oméga)
<b>T :</b>	Température (°C)
<b>t :</b>	Temps
<b>Icorr :</b>	La densité de courant de corrosion
<b>Rm :</b>	Résistance mécanique
<b>Re :</b>	Résistance d'élasticité

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Etapes de production de l'aluminium. ....	4
<b>Figure I.2.</b> Traitement de la bauxite .....	5
<b>Figure I.3.</b> Diagramme d'équilibre de l'aluminium silicium .....	11
<b>Figure I.4.</b> Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium .....	13
<b>Figure I.5.</b> Exemple caractéristique d'une corrosion d'un alliage d'aluminium par un couplage galvanique avec un acier inoxydable (une vis). ....	14
<b>Figure I.6.</b> Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium .....	15
<b>Figure I.7.</b> Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition .....	18
<b>Figure II.1.</b> Principe de la soudure à l'arc électrique .....	20
<b>Figure II.2.</b> Le schéma de soudage au fer .....	21
<b>Figure II.3.</b> Principe de soudage TIG .....	22
<b>Figure II.4.</b> Principe de soudage par point .....	23
<b>Figure II.5.</b> Principe de la soudure par molette .....	24
<b>Figure II.6.</b> Différentes étapes de soudage par friction .....	24
<b>Figure II.7.</b> Soudage par friction rotative.....	25
<b>Figure II.8.</b> Principe de soudage MIG et MAG .....	26
<b>Figure II.9.</b> Porosités.....	28
<b>Figure III.1.</b> Forme de l'échantillon. ....	33
<b>Figure III.2.</b> Mécanisme de serrage. ....	33
<b>Figure III.4.</b> Four électrique à chambre horizontale .....	34

<b>Figure III.5.</b> Soudure obtenue.....	34
<b>Figure III.6.</b> Appareil d'essai de dureté. ....	356
<b>Figure III.7.</b> Echantillon lors d'essai de dureté.....	36
<b>Figure III.8.</b> Polisseuse utilisée.....	36
<b>Figure III.9.</b> Microscope optique. ....	37
<b>Figure III.10.</b> Echantillon enrobé à froid. ....	38
<b>Figure III.11.</b> Potentiostat (autolab).....	39
<b>Figure III.12.</b> Dispositif expérimental des tests de polarisation. ....	40
<b>Figure VI.1.</b> Histogramme de dureté Vickers avant soudage des échantillons (Al, AlSi).....	41
<b>Figure IV.2.</b> Histogramme de dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l'alliage AlSi. ....	43
<b>Figure IV.3.</b> Histogramme de dureté Vickers après le soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l'aluminium. ....	44
<b>Figure IV.4.</b> Histogramme de dureté Vickers sur la coupe centrale de la zone de soudage. ....	44
<b>Figure IV.5.</b> Histogramme dureté Vickers après soudage à la limite extérieure des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	45
<b>Figure IV.6.</b> Histogramme dureté Vickers à la limite extérieure de l'alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	46
<b>Figure IV.7.</b> Histogramme de dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	46
<b>Figure VI.8.</b> Échantillon d'alliage aluminium-silicium : avant immersion (a), et après 1h (b), et 72h (c) d'immersion, Échantillon d'aluminium industriel : avant immersion(d), et après 1h (e), et 72h (f) d'immersion. ....	47
<b>Figure VI.9.</b> Échantillon ayant subi un soudage à la température de 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes sous une contrainte compression de 30 KN (coupe centrale), avant émersion (a), après émersion (1h (b), 48h (c), 72h (d)), effet loupe de l'image (c).....	48

<b>Figure VI.10.</b> Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 550°C avec un maintien de 30 minutes et sous une contrainte de compression de 50, avant émerision (a), après émerision (24h (b) ,72h (c)).....	49
<b>Figure IV.11.</b> Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 500°C avec un maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 30, (c, d), avant émerision (a, c), 72 heures après immersion (b,d). ....	49
<b>Figure IV.12.</b> Potentiel de la corrosion libre de la première heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). ....	50
<b>Figure IV.13.</b> Potentiel de la corrosion libre de la première heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de la face des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). ....	51
<b>Figure IV.14.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 24 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). ....	51
<b>Figure IV.15.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 24 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).....	52
<b>Figure IV.16.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 48 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). ....	52
<b>Figure IV.17.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 48 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).....	53
<b>Figure IV.18.</b> Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 72 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). ....	53

<b>Figure IV.19.</b> Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 72 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).....	54
<b>Figure IV.20.</b> Courbes de polarisation après une heure d'immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). .....	54
<b>Figure IV.21.</b> Courbes de polarisation après une heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). .....	55
<b>Figure IV.22.</b> Courbes de polarisation après 72 heure d'immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). .....	56
<b>Figure IV.23.</b> Courbes de polarisation après 72 heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi). .....	56

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Propriétés de l'aluminium. ....	7
<b>Tableau I.2.</b> Normalisation des états métallurgiques. ....	8
<b>Tableau I.3.</b> Composition chimique de l'aluminium série 1000 .....	10
<b>Tableau I.4.</b> Caractéristiques physiques de l'aluminium série 1000. ....	10
<b>Tableau I.5</b> Composition chimique de l'aluminium silicium .....	11
<b>Tableau I.6.</b> Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées dans ces alliages .....	16
<b>Tableau I.7.</b> Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques .....	17
<b>Tableau I.8.</b> Température et formes de corrosion de l'aluminium .....	19
<b>Tableau II.1.</b> Propriété physique de l'aluminium .....	27
<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de l'alliage Al 1050.....	32
<b>Tableau III.2.</b> La composition chimique de l'alliage aluminium silicium .....	32
<b>Tableau III.3.</b> Paramètres de soudage. ....	34
<b>Tableau VI.1.</b> Dureté Vickers des échantillons (Al ; AlSi) avant soudage.....	41
<b>Tableau IV.2.</b> Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l'alliage AlSi.....	43
<b>Tableau IV.3.</b> Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l'aluminium.....	43
<b>Tableau IV.4.</b> Dureté Vickers coté (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone du soudage zone de soudage. ....	44
<b>Tableau IV.5.</b> Dureté Vickers après soudage à la limite extérieure de l'aluminium des échantillons (1, 2, 3, 4, 5). ....	45
<b>Tableau IV.6.</b> Dureté Vickers à la limite extérieure de l'alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5). .	45
<b>Tableau IV.7.</b> Dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).....	46
<b>Tableau IV.8.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d'immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons.....	57
<b>Tableau IV.9.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d'immersion de la surface représentant la face externe des échantillons.....	58
<b>Tableau IV.10.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d'immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons .....	58
<b>Tableau IV.11.</b> La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d'immersion de la surface représentant la face externe des échantillons.....	59



# *Introduction*

### Introduction générale :

Le développement de matériaux innovateurs et l'évolution de la technologie d'assemblage associées est toujours pour les industriels un des axes majeurs de recherche pour l'avenir.

Dans le domaine des aluminiums, les techniques d'assemblage par soudage présentent de nombreux atouts pour les applications de l'industrie automobile, aéronautique, et alimentaire et dans le domaine du bâtiment. Elles permettent de réduire voire de supprimer les fixations, les zones de recouvrement, minimise le risque d'une corrosion galvanique, et conduisent ainsi à des réductions de masse et de coûts importantes.

Les procédés de soudage classiques par fusion ne s'appliquent pas aux alliages d'aluminium, en raison de la formation d'une couche de passivation à la surface. Des techniques avancées tels que le soudage en tungstène gaz inerte (TIG) qui consiste à produire un arc électrique entre une électrode de tungstène réfractaire et la pièce à souder, et dans ce cas le bain de fusion est protégé au sein d'une atmosphère inerte (généralement de l'argon), le soudage par friction malaxage (FSW) qui consiste à produire une forte pression et un frottement intense entre deux surfaces à assembler, et Le soudage (MIG-MAG) qui signifient respectivement Métal et Gaz Inerte, et Métal et Gaz Actif respectivement sont utilisés.

Le soudage à haute température sous une contrainte de compression entre les pièces à souder, est un procédé facile à réaliser dans notre laboratoire. Celui-ci consiste à appliquer une contrainte mécanique en parallèle avec un enfournement, à une température au dessus de la température de recristallisation et au dessous de la température de fusion.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés par l'observation du comportement à la corrosion, de la zone de soudage et de la surface des métaux soudés, ainsi que l'évolution de la dureté Vickers de ces surfaces, obtenu par un soudage à haute température sous une contrainte de compression, entre l'aluminium à pureté industrielle et un alliage d'aluminium-silicium.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres et une conclusion :

- La première traite des alliages d'aluminium en générale et les alliages d'aluminium en particulier.
- Le second chapitre développe le soudage et ses paramètres.
- Troisième résume les différentes techniques expérimentales utilisées.
- Le dernier chapitre présente les résultats et discussion.



# *Chapitre I*

## *L'aluminium et ses alliages*

**I.1. Introduction :**

L'ensemble des caractéristiques de l'aluminium ont fait qu'au cours du XX<sup>e</sup> siècle, l'industrie de ce métal a connu une grande croissance.

Entre 1950 et 1970, la production en aluminium s'est beaucoup accrue.

En effet, cela est dû à la malléabilité de ce métal avec des propriétés physico-chimiques remarquables qui dépendent de plusieurs paramètres tels que :

- La pureté ;
- Le procédé d'élaboration, de mise en forme ;
- La composition en éléments chimiques ;
- Les traitements thermiques effectués.

Dans ce chapitre, les différentes familles de l'aluminium seront présentées et les propriétés de la série 1000 et 4000 seront étudiées.

**I.2. L'aluminium et ses alliages :**

L'aluminium est un élément chimique ayant pour numéro atomique 13 et pour symbole Al. Ce métal se caractérise par sa faible densité, qui est notable pour sa résistance à l'oxydation. Comme il a été mentionné en introduction, l'aluminium est un métal malléable, qui est aussi pauvre et de couleur argentée. C'est aussi le métal que l'on retrouve le plus sur terre après l'oxygène et le silicium. En moyenne, il représente 8% de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. Par ailleurs, l'aluminium ne peut exister à l'état brut dans la nature car il est trop réactif. Par conséquent, il est retrouvé sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, la bauxite étant son minerai principal où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Par la suite, cette alumine est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On parvient à une liqueur qui est envoyée, après séparation des oxydes de fer et de silicium, est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

Enfin, l'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode).

Les principales propriétés de l'aluminium sont :

- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité ;
- Faible masse volumique :  $2,7 \text{ kg/dm}^3$  ;
- Point de fusion :  $658^\circ \text{ C}$  ;
- Faible module d'Young :  $70000 \text{ N/mm}^2$   $70000 \text{ Mpa}$   $7000 \text{ DaN/mm}^2$  ;
- Faible limite élastique ;
- Fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier) ;
- Bonne conductibilité (67 % de celle du cuivre).

L'aluminium métallique est très oxydable, mais est immédiatement passivé par une fine couche d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , qui est imperméable de quelques micromètres d'épaisseur qui protège la masse métallique de la corrosion. Du fait de sa résistance et de sa très grande légèreté, l'aluminium est très utilisé industriellement. En effet, il est très utilisé dans les domaines de l'aéronautique, les transports et la construction.

### **I.3. Production de l'aluminium et ses alliages :**

L'importance actuelle de l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de tout un réseau avec en amont le minerai et en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis et finis.

En 1886, Héroult et Hall développent un procédé qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ  $1000^\circ\text{C}$ , dans une cuve contenant un garnissage intérieur en carbone cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique. C'est par ce procédé que l'aluminium est produit de nos jours dans le monde entier. [1]

L'aluminium n'existe pas à l'état pur. Il se trouve principalement dans son minerai, la bauxite, d'où il est extrait et réduit pour obtenir l'aluminium pur.

### I.3.1. Le minerai de l'aluminium :

La bauxite est le seul minerai utilisé dans la métallurgie de l'aluminium. Celle-ci se présente sous forme de poudre de granules de roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Elle contient entre 45 et 60% d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) appelée alumine. Les différentes formes et couleurs de bauxite sont dues à la présence d'autres constituants, notamment :

- Oxyde de fer (bauxite rouge) ;
- Oxyde de Silicium (bauxite blanche) ;
- Oxyde de Titane et l'eau (X).

Pour passer du minerai au produit fini, l'aluminium doit subir une série de traitements qui dépendent largement les uns des autres. La Figure I.1 illustre les principales étapes de production de l'aluminium.

### I.3.2. Traitement de la bauxite :

Pour extraire l'alumine de la bauxite, on utilise le procédé de Bayer basé sur 3 étapes principales à savoir la préparation du minerai, l'attaque par la soude et la décomposition de l'aluminium.

La figure I.1 illustre le schéma du procédé d'extraction de l'alumine.

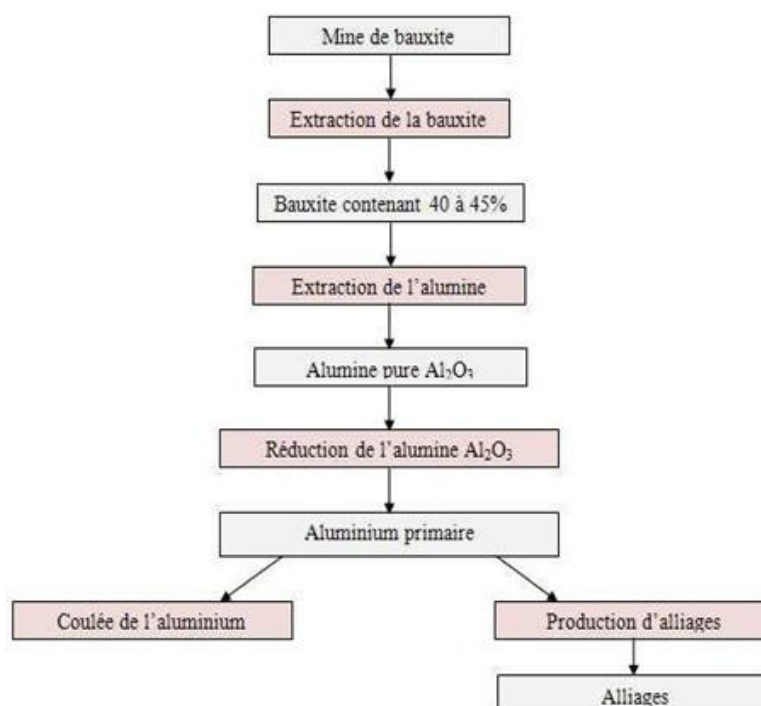


Figure I.1. Etapes de production de l'aluminium. [2]

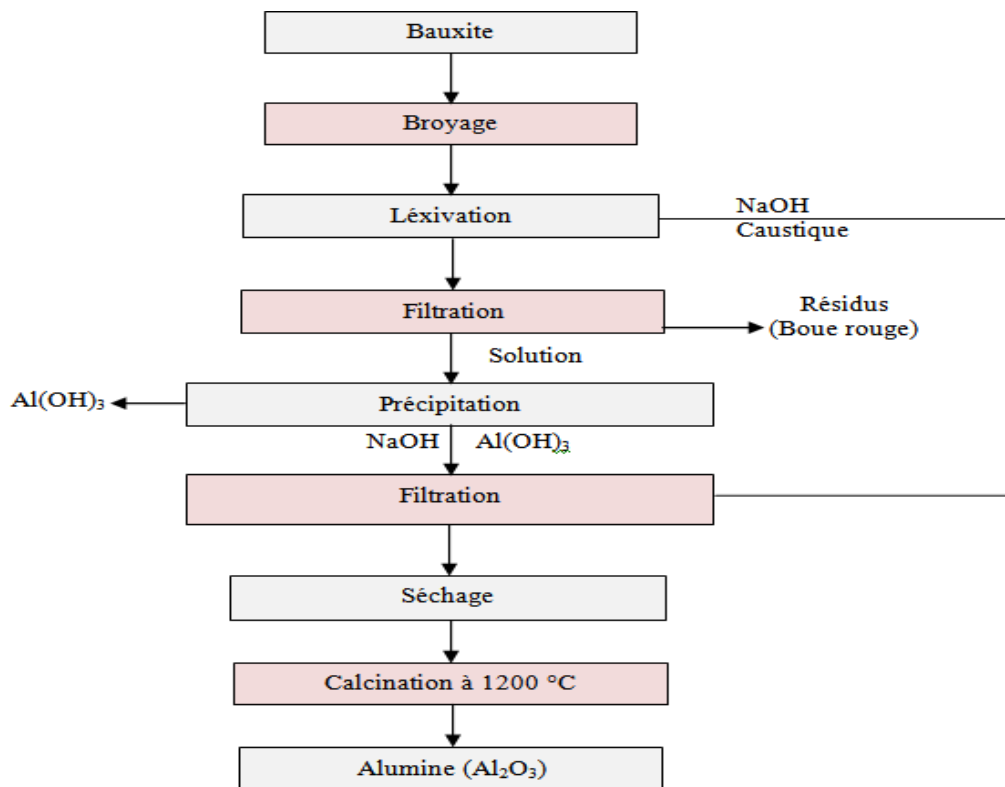


Figure I.2. Traitement de la bauxite. [2]

#### I.4. Domaine d'utilisation d'aluminium :

La malléabilité et la ductilité de l'aluminium lui permet un usinage facile. Avec un point de fusion bas 660°C contre 1500°C pour le fer, il se prête facilement au moulage de petites pièces. Les secteurs des transports, de la construction, de l'emballage et de la vie quotidienne constituent les marchés les plus importants pour les produits en aluminium. Les autres utilisations concernent les équipements électriques, la mécanique, la chimie et la pharmacie constituent.

**Les transports :** Aéronautique, automobile, train, bateau.

Grâce à sa légèreté qui permet de réduire la consommation de carburant, l'aluminium est apprécié dans le domaine du transport, Cela engendre une diminution du taux d'émission des gaz de combustion. De plus il se lie facilement avec du cuivre de silicium ou de magnésium pour former des alliages résistants qui évacuent bien la chaleur, qui sont idéal pour les moteurs à combustion. L'utilisation de l'aluminium réduit également le bruit et les vibrations.

En raison de la légèreté et de la robustesse des alliages existants, l'aluminium est indispensable en aéronautique. Il permet de réduire la consommation de carburant et d'augmenter la charge utile de l'appareil. De ce fait, en 35 ans, le poids de la structure d'un avion a été réduit de moitié.

Dans le domaine des automobiles encore une fois, sa légèreté réduit la consommation, les émissions de polluants et les distances de freinage. Ses propriétés améliorent l'absorption d'énergie cinétique en cas d'accident ce qui augmente la sécurité des usagers. De plus, étant donné que l'aluminium ne rouille pas comme l'acier, la durée de vie d'une pièce en aluminium est triplée par rapport à ce dernier.

Dans le domaine ferroviaire on notera sa tenue à la corrosion qui permet de transporter facilement des produits corrosifs, sa légèreté est toujours aussi appréciée.

Enfin, dans le secteur naval, l'aluminium a permis le développement de navires à grande vitesse. Utilisé dans la construction des coques, mâts, ponts et superstructures de tous types de navires, sa résistance à la corrosion en fait une parfaite protection naturelle contre l'usure des métaux en milieu marin. Une coque en aluminium peut tenir plus de 30 ans sans usure ni entretien.

**Le bâtiment :** Étant facilement malléable et résistant en alliages, l'aluminium permet de fabriquer des formes complexes dans une gamme variée de coloris. De ce fait, il est très populaire en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien. Ces avantages en font un matériau polyvalent utilisé dans tous types de bâtiments. Par exemple, il est utilisé pour construire des structures vitrées, des cloisons, des portes, des gouttières, etc.

**Autre aspect intéressant :** l'aluminium fait partie des métaux ininflammables : l'aluminium ne s'enflamme pas même après avoir fondu (au-dessus de 650°). Sa conductivité thermique élevée facilite la dissipation de la chaleur en cas d'incendie. (Sa diffusivité thermique est 6 fois supérieure à celle de l'acier). Ces deux propriétés en font un matériau avantageux et pratique dans la lutte contre l'incendie.

**L'électricité :** L'aluminium est très apprécié dans ce domaine en raison de sa conductivité électrique élevée, de ses propriétés non magnétiques et de son inertie chimique. L'aluminium a remplacé le cuivre dans les lignes à haute tension et constitue désormais le moyen le plus économique de transmettre l'énergie électrique. Depuis les années 1950, l'aluminium a pratiquement remplacé le laiton comme base standard pour l'ampoule électrique.

Des milliers d'antennes de télévision et de nombreuses antennes paraboliques sont également fabriquées en aluminium.

**L'alimentation :** L'emballage en aluminium est largement utilisé en raison de son faible coût de fabrication, de sa légèreté et de son isolation thermique. Une fine feuille d'aluminium (environ 0,1 mm) suffit à isoler le produit du monde extérieur : imperméable à la lumière, à l'air, aux UV, à la vapeur d'eau, à l'oxygène et aux micro-organismes. De plus, la résistance à la corrosion et la stabilité métallurgique de l'aluminium protègent l'aluminium contre les dommages causés par certains produits. A titre d'exemple d'emballage en aluminium, on peut citer la canette. Celle-ci n'altère pas le goût des aliments, est solide, légère, recyclable et constitue le type d'emballage de boisson le plus courant. Cependant, il convient de noter que certaines études scientifiques ont montré que l'aluminium n'est pas excrété par le corps et que des doses élevées ont des effets néfastes sur le système nerveux et le tissu osseux. C'est considéré comme possible, mais son utilisation comme conduite d'eau est interdite.

**I.5. Les caractéristiques de l'aluminium :**

**I.5.1. Propriété :**

**Tableau I.1.** Propriétés de l'aluminium. [3]

Point de fusion	660°C
Structure cristalline	CFC
Masse volumique	2700 (kg/m <sup>3</sup> )
Conductivité thermique	237 (W/mK)
Coefficient de dilatation linéaire (20°C, Al pur)	23,1.10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> )
Resistivité électrique	0,0265 (μΩ.m)
Caractéristiques mécaniques (20°C, Al pur)	
Rm	70-80 (MPa)
Re	10-20 (MPa)
A%	50-60 %
E	70 000 (MPa)

**I.5.2. Etats métallurgiques :**

Il est possible d'obtenir différents états d'alliages d'aluminium: recuits, écrouis ou trempés et vieillis. On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles (Tableau I-2). Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie. [3]

**Tableau I.2.** Normalisation des états métallurgiques. [3]

<b>Symbole</b>	<b>Etat de base</b>
F	Brut de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui
T	Traité thermiquement
W	Trempé et non stabilisé

**I.5.3. Désignations des alliages d'aluminium :****I.5.3.1. Désignation numérique :**

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont référencés par une désignation de 4 chiffres. Cette désignation est conforme aux directives de l'Aluminium Association (Washington DC 20006, USA), ce qui donne par exemple : 7075. Les quatre chiffres sont parfois précédés par les lettres AA (exemple : AA 6061), acronyme de « Aluminum Association ». Les quatre chiffres sont parfois suivis par une lettre qui indique une variante nationale d'une composition existante.

Cette désignation a été reprise en Europe par la norme EN 573-3 en ajoutant les préfixe EN, A (aluminium) et W (wrought : mot anglais signifiant corroyage). Ce qui donne EN AW-7075. Dans les faits, très souvent, seuls les quatre chiffres sont utilisés.

Cette notation à quatre chiffres est très usitée internationalement et a dans la pratique remplacé les anciennes appellations nationales.

Le premier chiffre indique l'élément d'addition principal de l'alliage :

- 1XXX (série des 1000) : alliage comportant au minimum 99% d'aluminium (exemple : 1050)

- 2XXX (série des 2000) : cuivre (exemple 2024)
- 3XXX (série des 3000) : Manganèse (exemple : 3003)
- 4XXX (série des 4000) : silicium (exemple : 4006)
- 5XXX (série des 5000) : magnésium (exemple : 5083)
- 6XXX (série des 6000) : magnésium, silicium (exemple : 6061)
- 7XXX (série des 7000) : zinc (exemple : 7020)
- 8XXX (série des 8000) : autres éléments.

Le deuxième chiffre indique une variante (exemple : 7075 comporte 0,50 % de fer et le 7175 plus pur comporte 0,20% de fer). Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage.

La seule exception est la série 1000, ces deux derniers chiffres y indiquant le pourcentage d'aluminium (exemple : 1050 qui comporte au minimum 99,50% d'aluminium).

### 1- L'aluminium série 1000 :

Nous ne pouvons pas réellement parler d'alliages la plupart du temps, ce sont des nuances qui sont en général sans ajout d'éléments.

Néanmoins, selon la présence qui est plus ou moins importante d'impuretés, nous pouvons distinguer les différentes nuances de la série 1000. De façon fréquente, le 3e chiffre indique le degré pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99%. A titre d'exemple, l'alliage 1050 contient 99,5% d'aluminium.

Cet alliage cité est le plus représenté parmi les nuances et on lui trouve de nombreux usages, notamment pour des applications de grande consommation tels que les cuves, échangeurs, emballage, matériel ménager ou encore le bardage pour bâtiment.

Concernant les alliages dits raffinés, ils renferment plus de 99,99% d'aluminium. L'industrie de l'électronique ou de l'optique sont leurs principales applications : on peut citer par exemple les microprocesseurs, condensateurs, ou encore la fabrication de pièces de réflexions.

Dans ces deux cas, la présence d'impuretés peut provoquer des erreurs ou des pannes le 1199 est un des représentants de cette classe d'alliage.

**Tableau I.3.** Composition chimique de l'aluminium série 1000 [4]

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr + Ti	Autres chaque	Autres total	Al
1050A	Min.	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
/	Max.	0.25	0.40	0.05	0.05	/	/	/	0.07	0.05	/	0.03	/	/
1199A	Min.	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
/	Max.	0.006	0.006	0.006	0.002	0.006	/	/	0.006	0.003	/	/	/	/

**Tableau I.4.** Caractéristiques physiques de l'aluminium série 1000. [4]

Caractéristiques physiques	1050
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,70
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	23,6
Module d'élasticité (MPa) (1)	69 000
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	État O/H18 : 231
Résistivité électrique à 20 °C (μΩ cm)	État O/H18 : 2,8
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	945
Limité élastique RP0.2 (MPa)	20 (2)
Limite à la rupture Rm (MPa)	60-95 (2)
Allongement (%)	25 (2)

**2- L'aluminium série 4000 :**

Le silicium (Si) est un élément d'alliage de cette série.

Il est à noter que les alliages de la série des 4000 sont clairement moins utilisés que les alliages des autres séries. De plus, les alliages aluminium silicium sont particulièrement des alliages de fonderie.

Par ailleurs, on peut différencier :

- Les alliages bas silicium (avec un taux inférieur à 2%). Ces alliages sont utilisés pour la soudure ainsi que pour les ustensiles émaillés (alliage 4006).
- Les alliages haut silicium (avec un taux compris entre 5-10%). Ces alliages sont utilisés pour la soudure. A titre d'exemple, l'alliage 4043 est utilisé en soudure TIG et MIG.

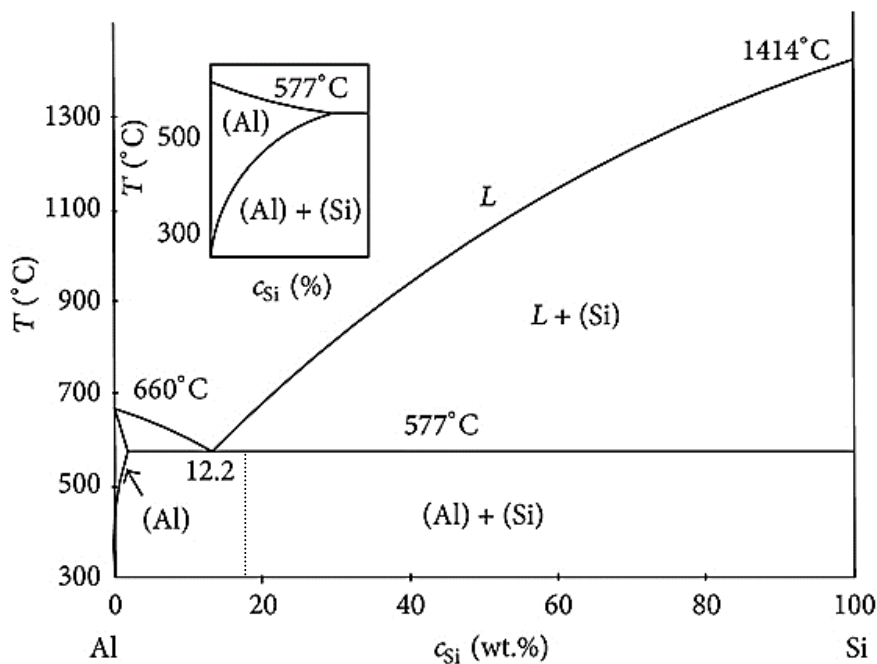


Figure I.3. Diagramme d'équilibre de l'aluminium silicium [4]

Tableau I.5 Composition chimique de l'aluminium silicium [4]

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr + Ti	Autres chaque	Autres total	Al
4006	Min.	0,80	0,50	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	1,20	0,80	0,10	0,05	0,01	0,20	/	0,05	/	/	0,05	0,15	/
4043	Min.	4,50	/	/	/	/	/	/	/	/	(*)	/	/	le reste
/	Max.	6,00	0,60	0,30	0,15	0,20	/	/	0,10	/	/	0,05	0,15	/

**I.6. La corrosion de l'aluminium et ses alliages :**

La corrosion n'est pas toujours simple à expliquer dû à sa complexité. La corrosion des métaux peut prendre plusieurs formes. La résistance à la corrosion varie également en fonction du métal ou de l'alliage, de l'environnement dans lequel il est placé, voire des conditions d'utilisation, la tenue à la corrosion sera différente.

Il n'existe pas d'alliage ou de métal capable de résister à tous les milieux aqueux, même à la température ambiante. Pour l'aluminium, on peut observer sa corrosion sous plusieurs formes qui sont plus ou moins visibles à l'œil nu.

De plus, il n'existe pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages.

L'aluminium est un métal passif qui est donc sujet à la corrosion localisée.

Concernant la protection contre la corrosion, on peut agir sur:

- Le matériau lui-même (choix judicieux, formes adaptées, contraintes en fonction des applications, etc.)
- La surface du matériau (revêtement, peinture, tout type de traitement de surface, etc.)
- L'environnement avec lequel le matériau est en contact (inhibiteur de corrosion).

Les premiers essais de corrosion connus sur l'aluminium ont commencé vers 1890, à partir du moment où ce métal fut disponible en quantité suffisante pour envisager des applications dans le bâtiment et dans les appareils de cuisine. C'est ainsi que les premiers essais de tenue à l'eau de pluie, au contact de plusieurs liquides alimentaires : bière, café, thé, furent entrepris dès le début de la décennie 1890 [5]. L'aluminium ne se corrode pas de manière spécifique, mais de différentes manières en fonction de facteurs spécifiques au métal (éléments d'alliage) et de l'environnement dans lequel il est utilisé [6]. Les différentes formes de corrosion peuvent apparaître sur un diagramme expérimental obtenu par mesure de chaque type de potentiel (corrosion, piqûration, passivation) en fonction du pH [7]. Le diagramme de POURBAIX du potentiel E en fonction du pH est tracé pour un équilibre aluminium / eau [8], et n'est donc pas représentatif des phénomènes apparaissant en milieu chloruré.

### I.6.1. Différent types de corrosion :

#### 1. Corrosion uniforme :

Ce type de corrosion se développe sous forme de micro piqûres de très petit diamètre, dans l'ordre du micromètre. Elle se traduit par une diminution continue d'épaisseur au-dessus de la superficie entière du métal. On observe ce type de corrosion particulièrement dans les milieux acides ou milieux alcalins, dans lesquels la solubilité du film normal d'oxyde est haute.

Le taux de dissolution peut changer de quelques micromètres par an jusqu' à quelques micromètres par heure, selon la nature de l'acide ou de la base. Les inhibiteurs appropriés peuvent la réduire. Comme exemple, le silicate de soude réduit considérablement le taux de dissolution d'aluminium dans des milieux alcalins.

Le taux de corrosion uniforme peut être facilement déterminé en mesurant la perte de masse, ou la quantité d'hydrogène libéré [9]. C'est une donnée utile pour évaluer le taux de dissolution d'aluminium dans un bain de décapage.

#### 2. Corrosion par piqûres :

Comme tous les métaux passifs, l'aluminium est sensible à la corrosion par piqûre dans les milieux aqueux proches de la neutralité. La corrosion par piqûre dépend alors plus de la quantité d'anions dans l'eau que des variations de pH.

Le potentiel de piqûre des alliages d'aluminium est en règle générale extrêmement bas. Il est ainsi très rare de pouvoir empêcher toute apparition de piqûre sur un alliage d'aluminium. La figure suivante présente un schéma simplifié de la corrosion par piqûre.

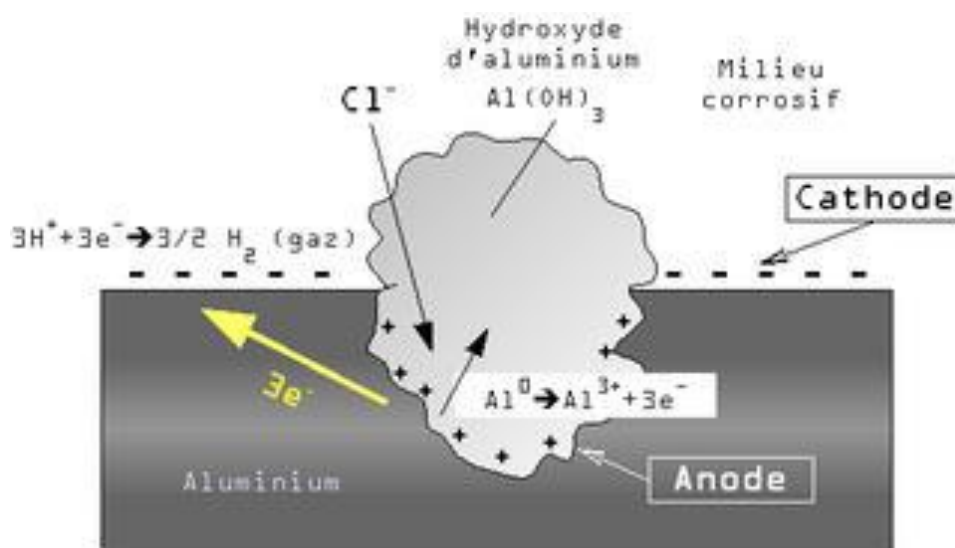


Figure I.4. Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium [10]

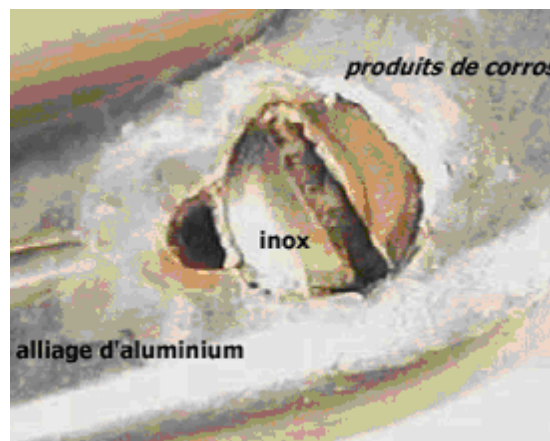
**3. Corrosion galvanique :**

L'aluminium étant anodique par rapport à la plupart des métaux usuels, il est habituellement la victime dans des assemblages mixtes.

L'aspect de la corrosion galvanique de l'aluminium est très caractéristique. Elle n'est pas dispersée comme la corrosion par piqûres mais, au contraire, très localisée dans la zone de contact avec l'autre métal. L'attaque de l'aluminium est régulière, et progresse en profondeur sous forme de cavernes plus ou moins arrondie. La zone affectée par la corrosion galvanique est souvent plus brillante que le reste de la surface [11, 12].

L'intensité de la corrosion galvanique de l'aluminium est d'autant plus forte que la conductivité de l'eau (ou sa salinité) est plus élevée. En d'autres termes, la corrosion galvanique est plus importante dans l'eau de mer que dans l'eau distillée.

Tous les alliages d'aluminium peuvent subir de la même manière une corrosion galvanique.



**Figure I.5.** Exemple caractéristique d'une corrosion d'un alliage d'aluminium par un couplage galvanique avec un acier inoxydable (une vis). [11]

**4. Corrosion caverneuse :**

L'acidification du milieu corrosif confiné à l'intérieur de la cavité empêche la répartition uniforme de la corrosion par piqûres et concentre ainsi en un seul point la pénétration de la corrosion. Les alliages sans cuivre sont relativement résistants à cette forme de corrosion. [14]

5. Corrosion intergranulaire :

Ce type de corrosion résulte de la présence, aux joints de grains, d'une phase continue et anodique par rapport au cœur du grain. Cette phase peut être due à la présence de précipités inter granulaires anodiques comme les précipités  $Al_3Mg_2$  présents dans les alliages de la série 5XXX ou à un appauvrissement d'éléments nobles à la périphérie du grain [13]. La corrosion inter granulaire se résume alors à un couplage galvanique entre le cœur du grain et la zone anodique. Elle apparaît lorsque la différence entre les potentiels des deux phases est d'au moins 50 à 100 mV ; le potentiel global de l'alliage est alors compris entre les potentiels des deux phases. Si le potentiel de l'échantillon est supérieur à celui de la phase la plus noble, il y a coexistence des phénomènes de corrosion inter granulaire et de corrosion par piqûre. [13]

Effet des éléments d'alliages sur la corrosion :

Le comportement électrochimique de l'alliage (caractère passivable, sensibilité à la corrosion localisée, etc.) est souvent attribué à l'aluminium [15]. Cependant la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal.

La formation de particules intermétalliques ou la ségrégation de secondes phases dans l'alliage matriciel ou autour des fibres (cas du silicium) sont responsables, soit d'une dégradation accélérée de l'aluminium, soit, au contraire, d'un ralentissement de la cinétique de corrosion du matériau. Ainsi la figure I.5 présente schématiquement la baisse de la résistance à la corrosion d'échantillons d'aluminium en milieu chloruré en fonction de la série.

Toutefois il est à noter que cet effet défavorable s'accompagne de propriétés mécaniques accrues. [16]

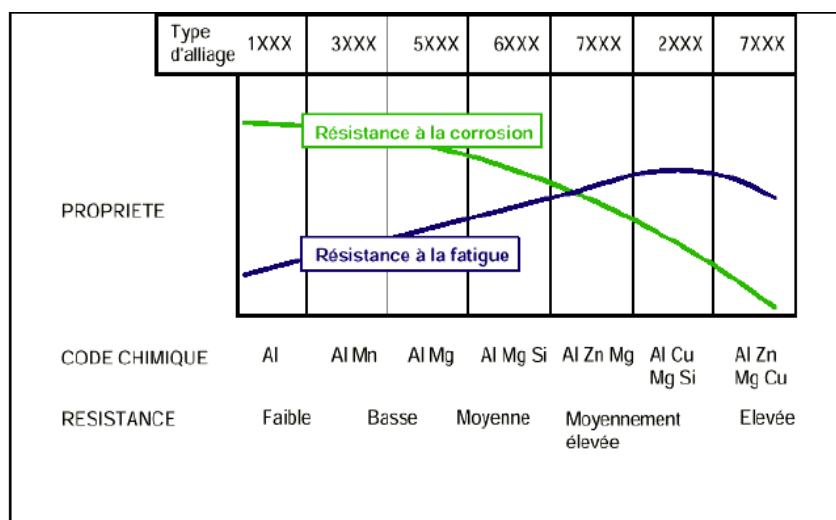


Figure I.6. Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium [10]

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, de nombreuses études ont porté sur l'influence de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés, notamment de corrosion, de l'aluminium.

Différents tests ont été mis en place pour mesurer l'importance relative de chacun : observation des états de surface géométrique et physico-chimique de l'alliage, détermination de la localisation des zones corrodées (joints de grains, etc.), mesure de perte de masse dans un électrolyte, mesure du potentiel de corrosion de l'alliage, effet du pourcentage d'un élément ajouté sur le potentiel de corrosion de l'aluminium pur. Ces études ont permis d'établir un classement qualitatif de la résistance à la corrosion d'un alliage en fonction de la nature de ses constituants minoritaires et des impuretés d'élaboration.

**Tableau I.6.** Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques [10].

Série	Eléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> , Al <sub>3</sub> Mg <sub>5</sub>	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al <sub>3</sub> Fe, Al <sub>6</sub> Fe Al <sub>12</sub> Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	FeSiAl <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>3</sub> Al <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> Mg <sub>3</sub> Fe, Mg <sub>2</sub> Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al <sub>6</sub> Mn, Al <sub>6</sub> MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg Ajout de Cu	MgZn <sub>2</sub>	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuilletante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Cu	CuFeMnAl <sub>6</sub> , Al <sub>2</sub> Cu Al <sub>2</sub> CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuilletante

Les alliages au magnésium ont une excellente tenue à la corrosion marine. Ils sont utilisés dans l'accastillage [10]. Le manganèse (série3000) a pour effet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion. [17]

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 sont sans effet [15].

Les éléments d'alliages existent sous deux formes dans l'aluminium :

- En solution solide, suivant leur solubilité dans le métal.
- En précipités intermétalliques avec les autres éléments présents dans le métal.

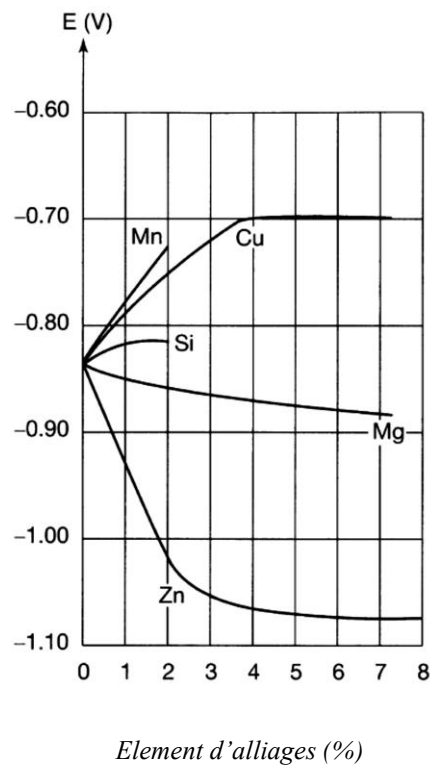
Dans ce dernier cas les particules intermétalliques ont un comportement plus ou moins noble par rapport à l'aluminium, selon leur composition. La corrosion des alliages est fortement liée aux potentiels de corrosion de ces composés, car ils sont une source de micro galvanisme (micro piles) et influent sur la piqûration de l'aluminium (attaque localisée) [18]. La mesure des potentiels de corrosion des particules intermétalliques est cependant difficile en raison de leur petite taille (<100  $\mu\text{m}$ ).

**Tableau I.7.** Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées dans ces alliages [10].

	Particule intermétallique / Seconde phase	$E_{\text{CORR}}$ ( $\text{mV}_{\text{ECS}}$ )
particules cathodiques	Si	-170
	$\text{Al}_3\text{Ni}$	-430
	$\text{Al}_2\text{Cu}$	-440
	$\text{Al}_3\text{Fe}$	-470
	$\text{Al}_6\text{Mn}$	-760
	<b>Al</b>	<b>-840</b>
particules anodiques	$\text{Al}_2\text{CuMg}$	-910
	$\text{MgZn}_2$	-960
	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$	-1150
	$\text{Mg}_2\text{Si}$	-1190
	$\text{Al}_3\text{Mg}_3$	-1240

Dans les alliages à base de magnésium et/ou de silicium (précipités intermétalliques anodiques), dont le potentiel de corrosion est plus faible que celui de l'aluminium, les précipités d' $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  et de  $\text{Mg}_3\text{Si}$  sont plus corrodables que la matrice. Leur dissolution aux joints de grains confère aux alliages des séries 5000 et 6000 une meilleure résistance à la corrosion que les alliages contenant des particules cathodiques.

L'addition d'éléments d'alliage modifie ainsi fortement le potentiel de corrosion dans le sens anodique ou cathodique [19]. Pour chacun, les principales variations sont fonction de la teneur de l'élément dans l'alliage.



**Figure I.7.** Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition [10].

Ce sont les alliages au cuivre de la famille 2000 qui ont les potentiels de dissolution les moins électro-négatifs. Les alliages au zinc de la famille 7000 ont les potentiels les plus électro-négatifs.

Les valeurs des potentiels de dissolution des principaux alliages peuvent varier d'un auteur à un autre de 50 à 100 mV pour un même alliage.

#### **Effet de la température et la déformation sur la corrosion :**

Quand la température de l'eau s'élève, la sensibilité à la corrosion augmente, elle intervient via l'abaissement de la résistivité et du pH, et par l'accroissement de vitesses des réactions. De plus, l'augmentation de la température diminue la solubilité de tous les gaz si la corrosion est contrôlée par la diffusion de l'oxygène, celle-ci va s'accroître car la vitesse de diffusion de l'oxygène augmente en raison d'une diminution de la viscosité de l'eau.

Dans le cas de la corrosion de l'aluminium, c'est vrai dans les acides et les bases inorganiques et aussi dans certains milieux organiques, surtout quand la température s'approche de leur point d'ébullition.

Par contre dans l'eau pure, distillée ou peu minéralisée, l'élévation de température a pour effet de modifier la forme de la corrosion de l'aluminium parce que le film d'oxyde naturel peut réagir avec l'eau pour former une couche protectrice de boehmite. La tenue à la corrosion de l'aluminium dans l'eau dépend de la température.

Dans les eaux douces, jusque vers 60-70°C, c'est la tendance à la corrosion par piqûres qui domine. Quand la température s'élève, la profondeur des piqûres diminue fortement, la densité pouvant par contre augmenter dans certains cas. Au-delà de 70°C et jusque vers 150°C, la tendance à la corrosion par piqûres disparaît progressivement [10].

**Tableau I.8.** Température et formes de corrosion de l'aluminium [10].

<b>Domaine de température</b>	<b>Forme de corrosion</b>
< 100 °C	Corrosion par piqûres (dans les eaux douces, la tendance à la corrosion par piqûres diminue à partir de 60-70°).
100-150 °C	Corrosion uniforme.
150-250 °C	Corrosion uniforme et corrosion inter cristalline.
> 250 °C	Corrosion inter cristalline avec destruction du métal.

A partir de 60-70°C, on observe la formation de couches aux reflets plus ou moins colorés dont la structure s'apparente à celle de la boehmite, que ce soit dans l'eau distillée, l'eau douce ou l'eau de mer. L'épaisseur de ces couches d'oxyde augmente avec la température et avec le temps. Elles peuvent atteindre une valeur de plusieurs micromètres vers 100°C dans l'eau distillée.

Dans l'ensemble, la tenue à la corrosion de l'aluminium dans l'eau douce est meilleure aux niveaux de température 70-100°C qu'à la température ambiante. En-dessus de 150°C, quelle que soit la nature de l'eau, la corrosion inter cristalline se développe rapidement en surface et en profondeur. Aussi, l'élévation de la température peut modifier les potentiels de dissolution et accélérer la corrosion galvanique. [10]



# *Chapitre* **II**

## *Le soudage*

## II.1. Introduction :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage, soit sous pression, soit par les deux, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre ou non de grandeur que celle de matériaux de base. [20]

## II.2. Types de Soudage :

Il existe, à l'heure actuelle, plusieurs procédés de soudage, mais toute tentative de classification est rendue difficile au regard des nombreuses variantes d'un procédé à l'autre, les plus souvent sont classés suivant la source d'énergie utilisée.

### II.2.1. Soudage à l'arc électrique :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

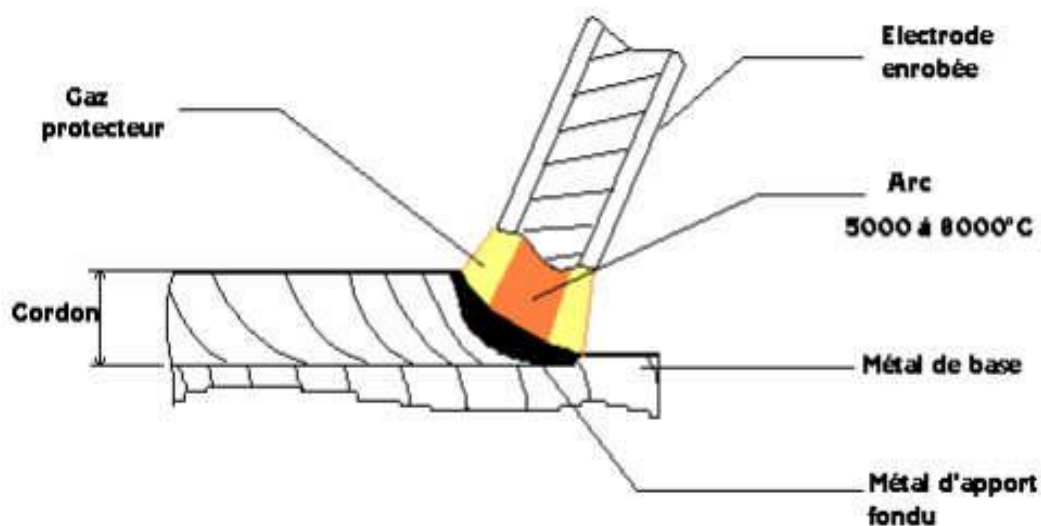
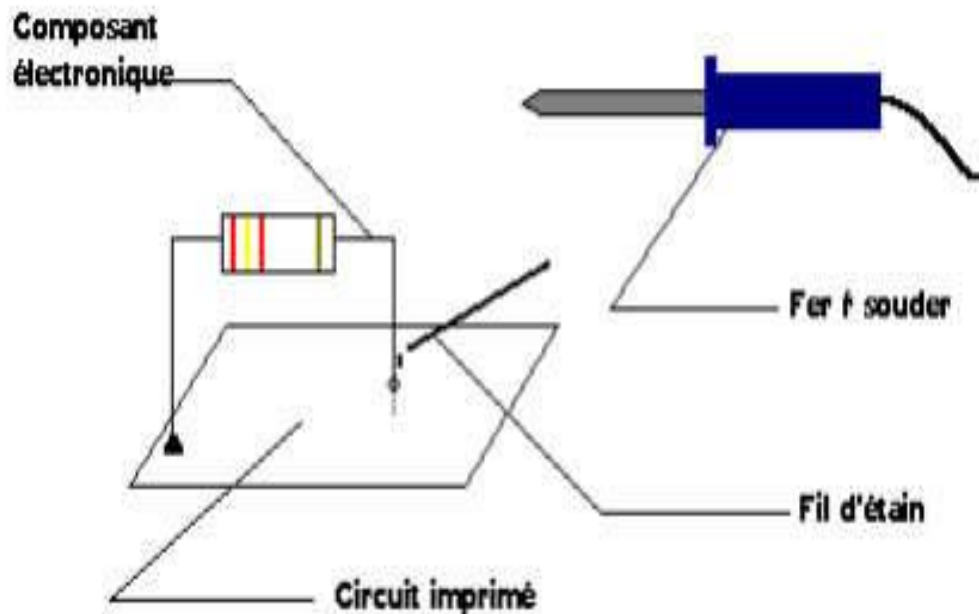


Figure II.1. Principe de la soudure à l'arc électrique [3]

### II.2.2. Soudage au fer :

Ce procédé de soudage est employé majoritairement dans l'industrie électronique pour les petites soudures. On utilise un fer qui fait office de résistance ce qui produit la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport souvent l'étain. [22]



**Figure II.2.** Le schéma de soudage au fer [22]

**Exemples d'applications :** Ce soudage n'est employé que dans l'électronique pour le soudage de composants, il est employé aussi bien dans l'industrie (soudage à la vague) que par les artisans (manuellement).

### II.2.3. Soudage TIG (Tungstène Inerte Gas) :

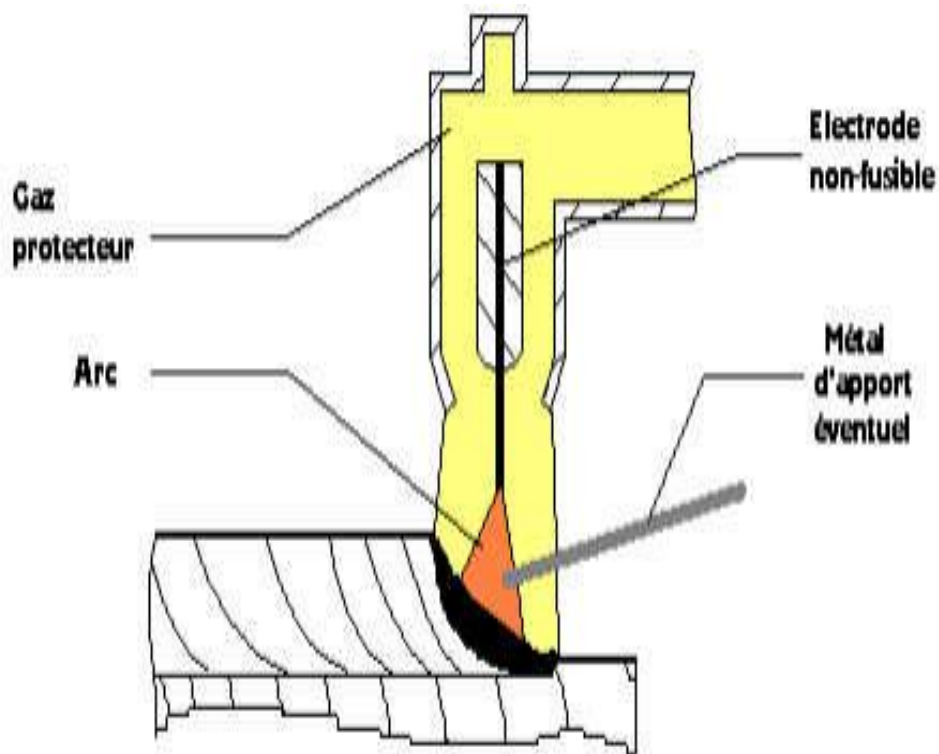
Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (bague) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance).

Le soudage TIG nécessite des transformateurs électriques qui multiplient l'intensité du courant en créant un court-circuit, dans le but de créer un arc électrique entre une électrode non fusible au tungstène et les éléments à assembler. Ce procédé permet le soudage des principaux métaux : acier, aluminium, inox.

Le gaz utilisé pour le soudage TIG est obligatoirement un gaz inerte, comme l'indique le nom de ce procédé de soudage : Tungsten Inert Gas. Les gaz de protection jouent un rôle essentiel dans la protection du processus de soudage, de même que la transmission ciblée de chaleur, de sorte que l'argon et des mélanges à l'argon sont utilisés.

L'argon est le gaz le plus commun, mais il peut être combiné à de l'hélium afin de découpler l'énergie de l'arc, et accélérer le processus de soudage. Remplacer l'hélium par de l'hydrogène permet d'obtenir encore plus de performances, car l'hydrogène facilite la pénétration de la fusion. Enfin, l'argon et l'azote combinés sont utilisés pour le soudage d'aciers complexes.

C'est la nature du matériau à souder qui détermine si l'on soude en courant continu (pôle négatif à l'électrode) ou en courant alternatif. La quantité de matériau d'apport étant indépendante du courant de soudage, le bain de fusion est parfaitement maîtrisable et le procédé peut s'appliquer à toutes les positions de soudage.



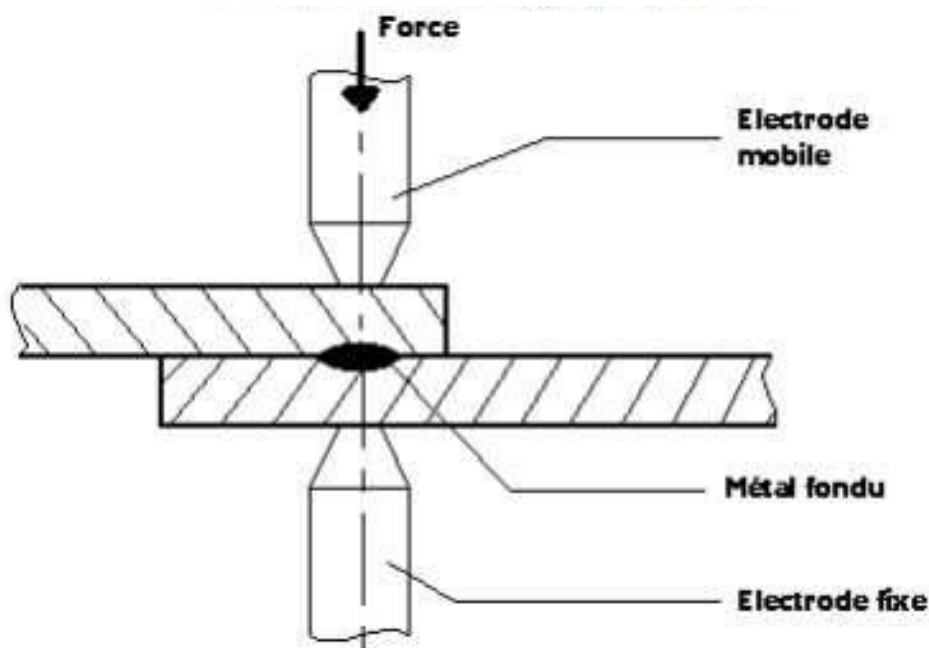
**Figure II.3.** Principe de soudage TIG [22]

**Exemples d'applications :** Ce procédé est très utilisé dans l'industrie, car sa mise en service et la production de fusion entraîne moins de déformations que le chalumeau. Il est employé dans la construction mécano-soudée, la chaudronnerie, les charpentes métalliques, les chantiers navales, l'industrie automobile, le nucléaire, l'aérospatiale.

### II.2.4. Soudage par résistance :

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ( $I > 2000 \text{ A}$ ) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «forge» la soudure.

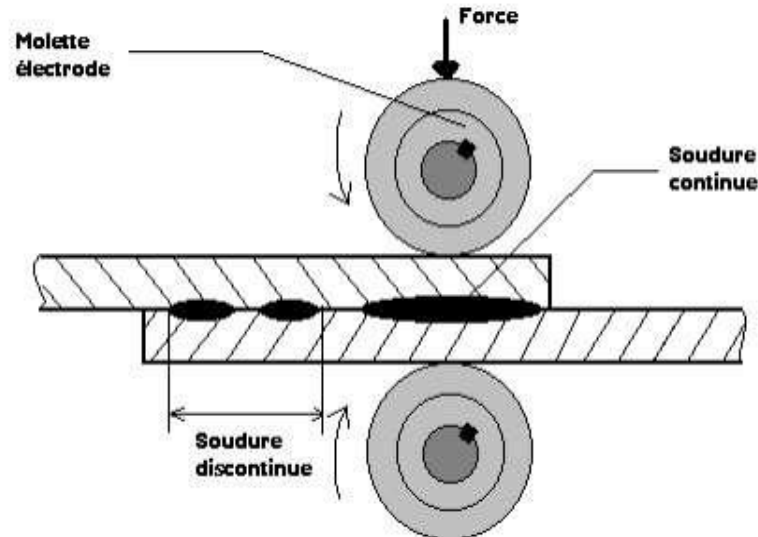
De nombreux procédés de soudure par résistance existent, nous allons voir le plus caractéristique : le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder.



**Figure II.4.** Principe du soudage par point [22]

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide.

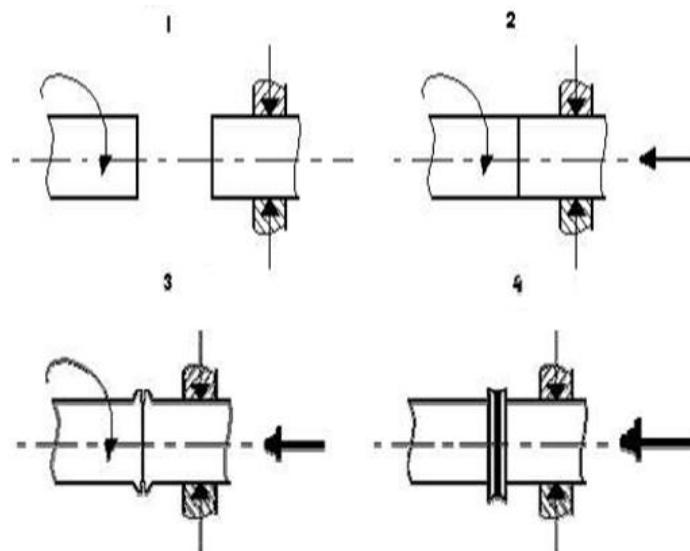
**Exemples d'applications :** Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...



**Figure II.5.** Principe de la soudure par molette [22]

### II.2.5. Soudage par friction :

Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (Figure II.6.1). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé (Figure II.6.2). Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ( $V = 100 \text{ m/min.}$ ). Un bourrelet commence à se former (Figure II.6.3). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (Figure II.6.4). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet par usinage.



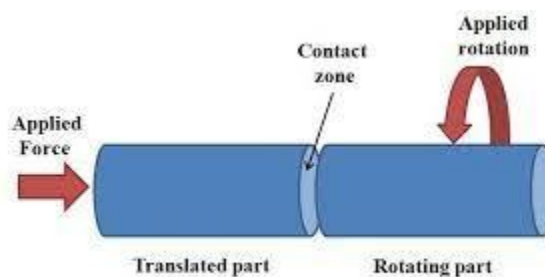
**Figure II.6.** Différents étapes de soudage par friction [22]

**II.2.6. Soudage MIG (Métal Inert Gas) :**

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

**II.2.7. Soudage par friction rotative :**

Le soudage par friction rotative est l'une des méthodes de soudage par friction, dont la méthode classique utilise le travail de friction pour créer une soudure non séparable. Généralement, un élément soudé est tourné vers l'autre et forgé. Le chauffage du matériau est causé par le travail de friction et crée une connexion permanente.



**Figure II.7.** Soudage par friction rotative

**II.2.8. Soudage MAG (Metal Active Gas) :**

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique  $\text{CO}_2$  et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

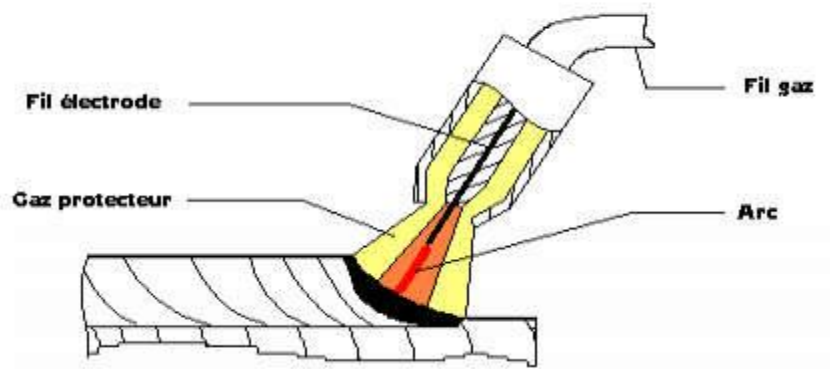


Figure II.8. Principe de soudage MIG et MAG [22]

### II.2.9. Soudage par diffusion :

Le procédé de soudage par diffusion consiste à assembler deux pièces en état solide en provoquant une diffusion des atomes à travers le plan de joint ce qui assure une continuité métallique sous l'application d'une pression adaptée et une température suffisamment élevée proche à la température de fusion avec nécessité de nettoyage et de préparation des surfaces par polissage afin de garantir le contact parfait et éliminer tous genres de pollution qui peuvent gêner la diffusion

### II.3. Soudage de l'aluminium :

Le soudage de l'aluminium et de ses alliages nécessite la prise en compte des spécificités de ces matériaux, à savoir :

- Les propriétés physiques et physico-chimiques, en particulier la bonne conductivité thermique,
- Les propriétés mécaniques,
- Les propriétés métallurgiques.

#### II.3.1. Influence des propriétés physico-chimiques :

Le tableau II.1 donne les principales caractéristiques physiques de l'aluminium. Plusieurs propriétés propres à l'aluminium ont une influence déterminante sur les conditions de soudage. Prenant par exemple si la température de fusion est basse le soudage est plus facile.

Tableau II.1. Propriété physique de l'aluminium [21]

Propriétés physiques	Al
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2700
Température de fusion (°C)	658
Chaleur spécifique à 20°C (J/Kg°C)	960
Chaleur latente de fusion (J/Kg)	390
Conductivité thermique (W/m°C)	230
Diffusivité thermique (cm <sup>2</sup> /s)	0,9
Confficient de dilatation liée (°C10 <sup>-6</sup> )	24
Résistivité électrique (Ω/m10 <sup>-8</sup> )	2,63
Conductivité électrique à 20°C (Ω/m10 <sup>7</sup> ) (% de celle du Cu-1)	3 ,74 65
Coefficient d'absorption de la lumière (longueur d'onde 10,6 μm) (longueur d'onde 1,06 μm)	3 25

## II.4. Défauts de soudage dans l'aluminium :

### II.4.1. Porosités :

#### a) Porosités localisées :

Sont s'observées :

- En début de cordon quand le régime n'est pas stable ;
- Dans les zones où se trouve un agent de contamination locale (graisse, humidité).

#### b) Porosités alignées :

Ces porosités sont dues à la géométrie du joint et sont associées à un manque de pénétration. En soudure d'angle, elles sont dues à des inclusions de gaz en fond d'angle.

#### c) Porosités uniformément réparties :

Ces porosités sont en général liées à une dissolution d'hydrogène dans le bain de fusion.

L'hydrogène dissous provient :

- De la décomposition dans l'arc de produit organique (graisse) ou d'humidité ;
- D'impureté dans le gaz de protection ;
- De la présence d'hydrogène dans le métal de base ou d'apport.

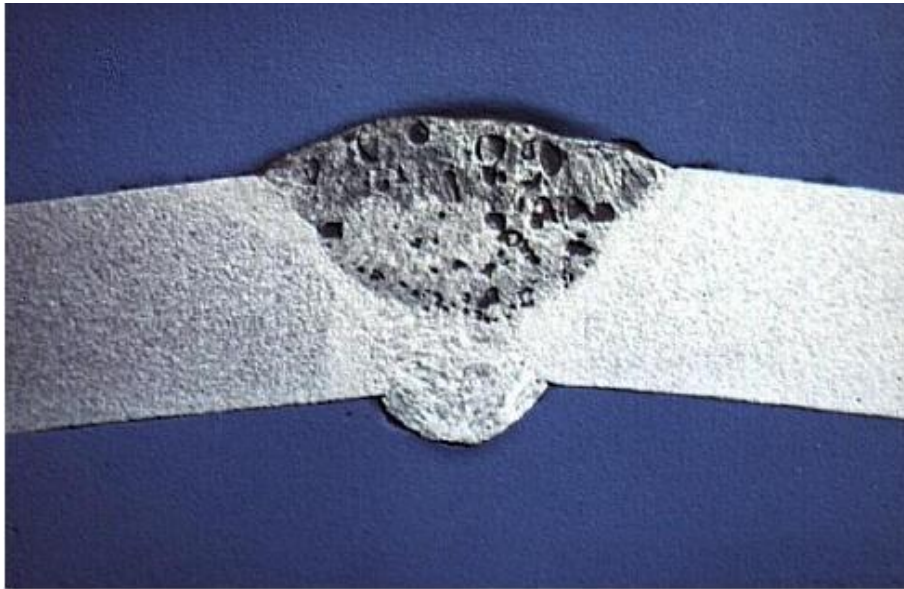


Figure II.9. Porosités [21]

### II.5. Effet des paramètres de soudage :

La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient très rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant.

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres tel que la puissance et la vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement.

La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques. [23]

Dans un soudage par fusion, ou par frottement rotation par exemple, les principales zones constitutives d'un joint de soudure sont :

- a) **Zone fondue ou (métal fondu) :** C'est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. Le bain de fusion est similaire à un système de fonderie où le métal de base est considéré comme un moule qui entraîne la solidification du métal fondu par un processus de ségrégation qui débutera aux parois du moule engendrant la

germination et par suite la croissance. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et de solidification.

- b) **La zone de liaison (ZL) :** Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement.
- c) **Zone affectée thermiquement (ZAT) :** C'est la zone où la température atteinte est comprise entre la température du solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide, en modifiant la structure du métal de base.
- d) **Le métal de base (MB) :** C'est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que du point de vue métallurgique inchangé, en revanche, (MB) est le siège de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de bridage imposé à la soudure.

Dans le cas du soudage par contact à haut température on parle de la zone du soudage seulement.

## **II.6. La métallurgie de soudage de l'aluminium :**

### **- Cas du soudage avec métal d'apport :**

La métallurgie du soudage à un caractère différent de la métallurgie classique, qu'elle soit d'élaboration ou de traitement thermomécanique, par les faits suivants :

- du point de vue thermique, le soudage se caractérise par des temps d'échauffement et de refroidissement beaucoup plus court. Si en métallurgie classique l'unité de temps est l'heure, elle est la seconde dans le cas du soudage : les phénomènes se caractérisent donc par un état hors d'équilibre résultant des grandes vitesses de variation de température tant à réchauffement qu'au refroidissement [24] ;
- du point de vue de l'élaboration métallurgique (fusion du métal de base et du métal d'apport) le soudage se distingue de la métallurgie classique par le fait que le phénomène se passe de proche en proche et est lié aux conditions de soudage (taux de dilution, protection du bain de fusion, courant de soudage, tension d'arc, vitesse de soudage,...) [24] ;
- du point de vue de l'opération de fonderie, par le fait que la solidification se fait de proche en proche et intéresse une partie des pièces à assembler. [24]

Cette brève introduction montre que les phénomènes métallurgiques dans le cas du soudage sont à la fois complexes et spécifiques et que si la connaissance de la métallurgie que nous avons qualifiée de classique est indispensable pour l'aborder, celle-ci est insuffisante pour avoir une connaissance suffisante de la métallurgie du soudage. [24]

- **Cas du soudage sans métal d'apport :**

La métallurgie du soudage dans le cas du soudage sans métal d'apport est régie par les phénomènes se produisant lors du traitement thermique et de la fusion du métal ou alliages tels que, la diffusion, la recristallisation...etc.

- **Soudabilité des alliages d'aluminium :**

Les différentes séries d'alliage sont toutes soudables, mais certaines nuances de la famille 7XXX sont difficilement soudables en raison de leur grande sensibilité à la fissuration. La soudabilité opératoire de l'aluminium est bonne. Cependant, il faut être prudent lors du soudage de l'aluminium.

Les familles d'alliages qui se soudent le plus facilement sont les séries 1XXX, 3XXX et 5XXX qui n'ont pas subies un traitement thermique. La série 6XXX peut aussi être soudée facilement, mais le soudage de ces alliages provoque une diminution des propriétés mécaniques.

Les alliages à résistance élevée des séries 2XXX et 4XXX sont soudables, mais il faut prendre des précautions particulières. À l'intérieur de la famille 7XXX, seulement les alliages 7039 et 7005 sont soudables. De plus, les soudures vieillissent naturellement et retrouvent 70 à 90% de leur résistance mécanique antérieure à l'intérieur de 30 à 90 jours suivant le soudage.

- **Soudabilité globale :**

La chaleur nécessaire pour fusionner le métal de base lors du soudage abaisse la résistance mécanique à l'intérieur de la zone affectée thermiquement en provoquant un recuit. Dans le cas d'un alliage ayant été écroué pour obtenir ses propriétés mécaniques, il n'est pas possible de régénérer les propriétés de cette zone par un traitement thermique.

La couche d'alumine ( $Al_2O_3$ ) qui recouvre l'aluminium et ses alliages est de l'ordre de 0,01 mm et a tendance à s'accroître avec la température. Cette mince couche est isolante thermiquement et électriquement en plus d'être insoluble dans le métal liquide. Elle a une

moindre densité et c'est pour cette raison que lors de la fusion du métal, elle demeure à la surface du bain de fusion. Pour souder l'aluminium, il faut donc éliminer cette couche néfaste au soudage, soit par des moyens mécaniques, tels que la meule et la brosse d'acier inoxydable, soit par des moyens chimiques comme les solutions fortement alcalines.

Une autre difficulté lorsqu'on soude l'aluminium est sa grande conductibilité thermique. Pour contrer les pertes de chaleur par le phénomène de diffusion thermique, il est souvent nécessaire de préchauffer les parties à joindre entre 200 et 260°C.



# *Chapitre* **III**

*Procédés et techniques  
expérimentales*

### III.1. Introduction :

Dans cette partie nous présentons toutes les opérations effectuées pour bien mener notre travail, avec la description des techniques et matériels utilisés pour cette étude.

### III.2. Matériaux utilisés :

L'allié aluminium pure (série 1000) a de bonnes propriétés de résistance mécanique, résistance à la corrosion remarquable et une faible densité qui est beaucoup utilisé dans les domaines tels que les cuves, emballage, et condensateur.

Sa composition est résumée dans le tableau en dessous :

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'alliage Al 1050.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
Al-si	0.25	0.40	0.05	0.05	0.07	0.05	Le reste

Le deuxième alliage c'est l'aluminium silicium AlSi (série 4000) qui est particulièrement l'alliage de fonderie et beaucoup utilisé en soudure.

Sa composition est résumée dans le tableau en dessous :

**Tableau III.2.** La composition chimique de l'alliage aluminium silicium

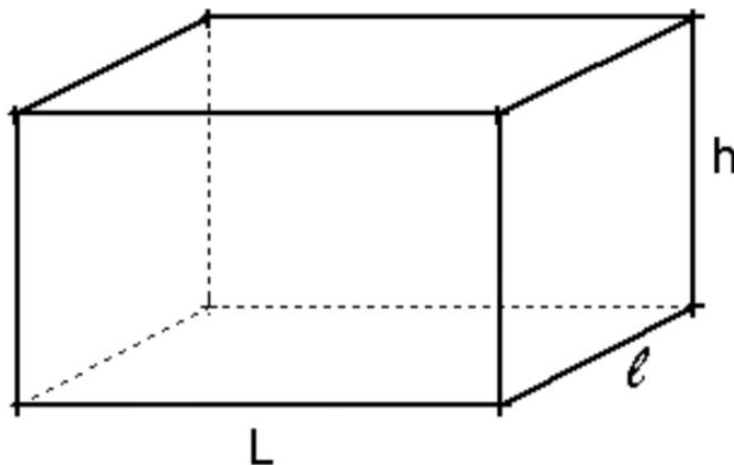
Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Autres chaque	Autres total	Al
	1,20	0,80	0,10	0,05	0,01	0,20	0,05	0,05	0,15	Le reste

### III.3. Techniques expérimentales :

#### III.3.1. Préparation des échantillons :

L'objectif de cette étape est de préparer les échantillons pour le soudage par compression à haute température, et l'étude de la corrosion de la zone de soudage obtenu par ce type de soudage de deux échantillons d'alliage différent en l'aluminium, pour cela on va préparer 5 échantillons en aluminium pure , 5 échantillons en alliage d'aluminium silicium on utilisant une scie mécanique et une fraiseuse.

Les échantillons obtenus ont une forme parallélépipède de dimension  $L20 \times L20 \times h10$  mm.



**Figure III.1.** Forme de l'échantillon.

### III.3.2. Réalisation du mécanisme du soudage :

Nous avons réalisé un mécanisme qui est composé de deux lames en acier pour ressorts percées aux deux extrémités afin de serrer deux échantillons entre eux en contact l'un sur l'autre les deux lames sont fixées par 2 vis écrous d'usage mécanique.

Les matériaux qui composent ces éléments ont été choisis afin d'être capable de résister à des hautes températures et pressions.



**Figure III.2.** Mécanisme de serrage.

### III.3.3. Paramètres de soudage :

Le procédé utilisé est le soudage au contact sous contraintes mécanique et thermique de deux alliages en aluminium pur, et un alliage en aluminium silicium, les moyens mis en place sont :

- un four électrique à chambre horizontale.
- machine de traction/ compression.



Figure III.3. Machine à traction.

Figure III.4. Four électrique à chambre horizontale

### III.3.4. Conditions de soudage :

Les conditions de soudage sont résumées dans le tableau en dessous :

Tableau III.3. Paramètres de soudage.

Echantillon	1	2	3	4	5
Paramètre					
Température en °C	500	550	500	600	550
Temps en Min	60	30	60	60	60
Compression en KN	30	50	50	50	50

**NB : Deux types d'échantillons ont été préparés :**

Echantillons nommés (1m, 2m, 3m, 4m, 5m qui représentent la surface de la coupe centrale des échantillons soudés, 1f, 2F, 3F, 4F, 5F qui représentent la surface externe après soudage).

**III.3.5. Choix des températures et des temps de maintien lors du traitement thermique, et de la contrainte de compression:**

La fixation des températures, et des temps de maintien lors du traitement thermique durant les différents essais a été fait sur la base du diagramme d'équilibre Al-Si, la valeur de compression a été choisie suite à plusieurs tests préalable de soudage sous compression mécanique à haute température.

L'objectif est d'étudier la corrosion sur la zone de soudage Al / Al-Si suite au soudage sous compression à haute température.



**Figure III.5.** Soudure obtenue.

**III.4. Caractérisation mécanique :****III.4.1. Mesure de dureté :**

Les mesures de dureté Vickers sont effectuées à l'aide d'un pénétrateur normalisé en forme de pyramide en diamant avec une base carrée et un angle au sommet de  $136^\circ$  entre les faces sur lesquelles une force est appliquée. La dureté du matériau peut être calculée à partir de l'empreinte laissée par le pénétrateur. La puissance et la durée du support ont été normalisées. Cette mesure est largement utilisée dans les laboratoires en raison de sa

précision, mais elle n'est pas aussi précise pour les méthodes plus rapides telles que la dureté Rockwell et dans les environnements de production où la préparation des échantillons ne nécessite pas plus d'attention que la dureté Brinell.

Nous avons utilisé une charge de 30Kg (300N).

**Détermination de la dureté Vickers :**

La valeur de la dureté Vickers se définit comme étant le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte (s) elle se calcule selon la relation :

$$HB = F/S \text{ (F en kg)}$$

**Mesure de la diagonale (d) de l'empreinte :**

La surface est calculée en fonction des diagonales de l'empreinte mesurées grâce au microscope optique. On mesure la première diagonale (d1) ; puis la seconde (d2) ; et on calcule la valeur moyenne en utilisant la relation v :

$$D = (d1 + d2)/2 \text{ (mm)}$$

La valeur de la surface de forme pyramidale est donnée par la relation :

$$HV = 1.8544 * f/d^2$$



**Figure III.6.** Appareil d'essai de dureté.



**Figure III.7.** Echantillon lors d'essai de dureté.

**III.4.2. Analyse métallographique :****a) Préparation des échantillons :**

Premièrement l'enrobage a été effectué en utilisant une résine à froid, et polissage de la surface à étudier avec du papier abrasif de divers granulométries (800,1000, 1200, 2000, 2500 et 4000), l'attaque chimique a été effectuée à l'aide du réactif "KEELER" de composition :0,5% de HF, 1.5% de HCL, 2,5 de HNO<sub>3</sub>, 100cm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O afin de révéler la microstructure.



**Figure III.8.** Polisseuse utilisée.

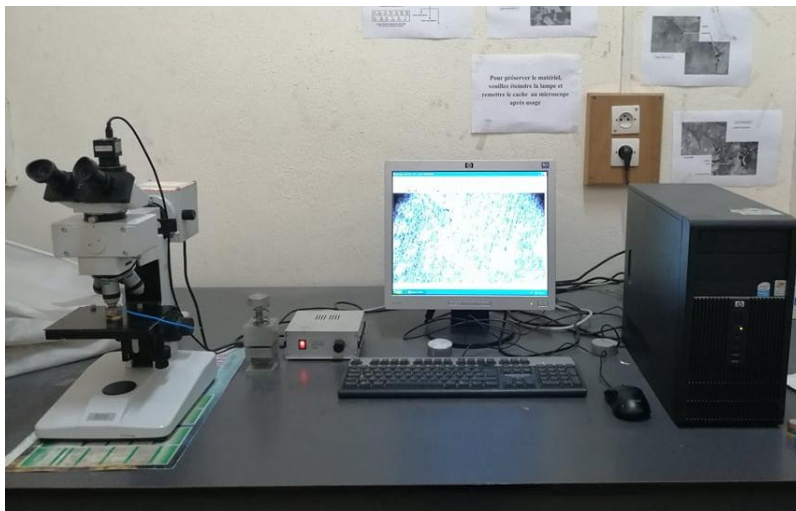
**b) Observation par microscope optique (MO) :****Le But de l'examen au microscope optique :**

L'examen au microscope optique a pour but principale la mise en évidence de la structure de l'échantillon, lors de cette observation, le pouvoir de résolution du microscope optique est de l'ordre de 0.2 $\mu$ m, le grossissement de cet instrument ne peut pas dépasser 1500X.

La caractérisation métallographique a été réalisée à l'aide d'un microscope optique. Il s'agit des différentes zones du matériau inspecté (zone de soudure, zone d'aluminium pur, zone d'aluminium silicium). L'analyse microscopique permet de mettre en évidence la morphologie des différentes zones du joint soudé. Un décapant approprié doit être utilisé pour exposer

correctement la structure métallique. Les observations ont été faites avec un microscope optique HUND (WETZLAR. Pour procéder à l'observation des différents échantillons avant et après le polissage et l'attaque chimique, le microscope est muni d'une caméra permettant la transmission de l'image sur l'écran ordinateur et un logiciel d'acquisition et de traitement d'image Piced CORA.

Pour être observable au microscope optique, les échantillons doivent être spécialement préparés ; après avoir prélevé l'échantillon de la pièce à étudier, on doit d'abord polir la surface à examiner. La surface ainsi obtenue doit être libre de rayures, la microstructure de l'échantillon est mise en évidence par attaque chimique ou électrochimique. Après attaque les différents constituants de la microstructure n'ont plus le pouvoir réfléchissant, ce qui permet leur observation. Les échantillons doivent être polis avant les tests de corrosion.



**Figure III.9.** Microscope optique.

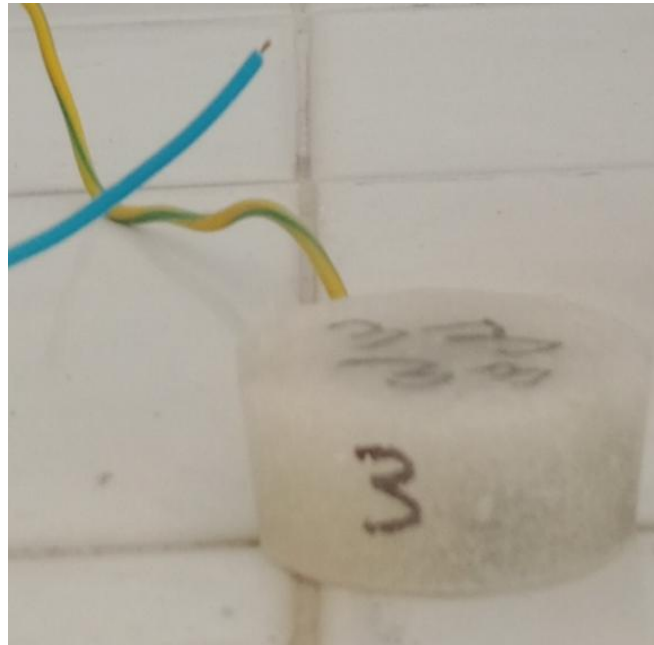
### **III.4.3. Etude a la corrosion :**

L'analyse électrochimique est un paramètre important pour évaluer la cinétique de la corrosion.

Les techniques électrochimiques consistent à suivre la corrosion en fonction du temps dans un environnement corrosif.

#### **a) Préparation des échantillons :**

Le matériau à tester a été percé, puis connecté au conducteur à ses extrémités et enduit à froid d'une résine non conductrice, ne laissant en contact avec la solution uniquement la surface à tester. Lors du test de corrosion, l'électrode de travail prend la position anodique et se corrode.



**Figure III.10.** Echantillon enrobé à froid.

**b) Préparation d'une solution corrosive :**

Afin de préparer notre solution corrosive nous avons mélangé un litre de l'eau déminéralisée avec 30 gramme de NaCl pour obtenir une solution à 3% en masse de NaCl dans un bécher.

**c) Mesure du potentiel de la corrosion libre :**

Cette technique consiste à mesurer la différence de potentiel entre les électrodes de travail et de référence (Ag /AgCl) au cours du temps, celui-ci représente le potentiel de la corrosion libre par rapport à l'électrode d'argent.

A l'aide d'un potentiostat et un chronomètre, nous avons relevé après chaque heure, 24h, 48h, 72h les valeurs de potentiel de la corrosion.

Cette technique nécessite le matériel de laboratoire suivant :

- Potentiostat (autolab) ;
- Micro-ordinateur (piloté par un logiciel autolab) ;
- Electrode de travail (nos échantillons) ;
- Eélectrode de référence (Ag-AgCl) ;
- Deux contre électrode en graphite.



Figure III.11. Potentiostat (autolab).

**d) Tracé des courbes de polarisation :**

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'une solution corrosive à savoir : la densité de courant de corrosion ( $I_{corr}$ ), Le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation ( $R_p$ ). Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple.

Cette technique nécessite le matériel de laboratoire suivant :

- Potentiostat (autolab) ;
- Micro-ordinateur (piloté par un logiciel autolab) ;
- Electrode de travail (nos échantillons) ;
- Electrode de référence (Ag-AgCl) ;
- Electrode auxiliaire (contre électrode).

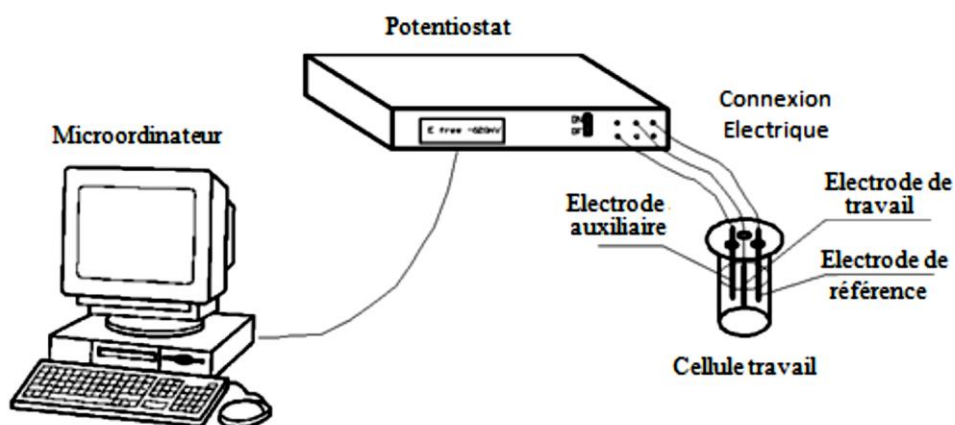


Figure III.12. Dispositif expérimental des tests de polarisation.



# *Chapitre* **IV**

*Résultats et discussions*

**IV.1. Introduction :**

Ce chapitre montre les résultats de la caractérisation obtenus et la discussion des effets des températures des temps de maintien de soudage, ainsi que la valeur de la contrainte de compression sur le comportement à la corrosion, la microstructure et sur la dureté.

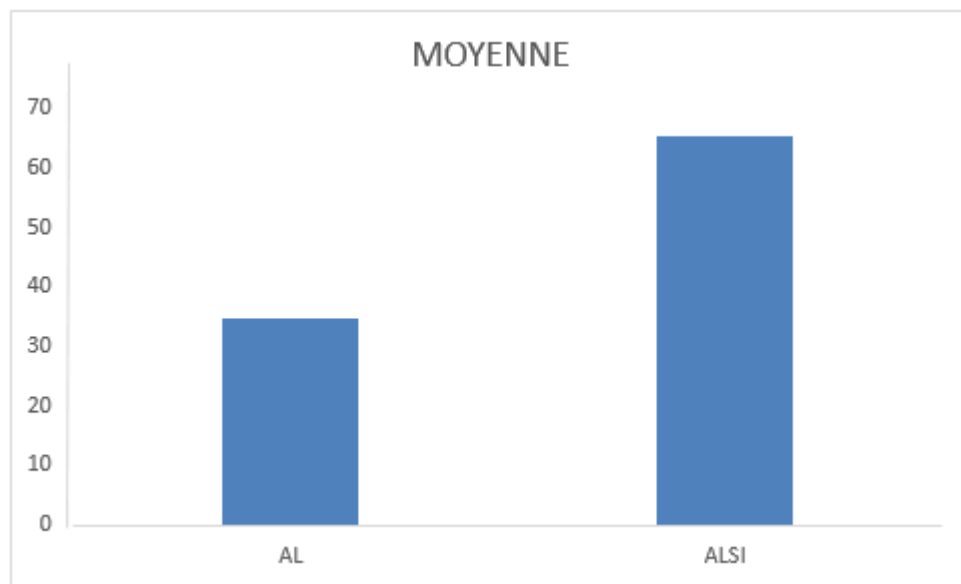
**IV.2. Caractérisation mécanique :**

**Dureté Vickers :**

Le tableau VI.1 et la figure VI.1 montre que l'aluminium industriel est moins dur que l'alliage AlSi cette caractéristique est due à la présence de l'élément de silicium comme addition.

**Tableau VI.1.** Dureté Vickers des échantillons (Al ; AlSi) avant soudage

Echantillon	Dureté (Kgf/mm <sup>2</sup> )			Dureté Vickers moyenne
Al	35,60	33,95	34,49	34,68
AlSi	61,64	67,18	67,18	65,33



**Figure VI.1.** Histogramme de dureté Vickers avant soudage des échantillons (Al, AlSi)

Les Tableaux IV (2-7) et les Figures IV (2-7) obtenus montrent que la dureté Vickers après soudage de l'aluminium industriel avec l'alliage aluminium-silicium, varie sur dans la zone de soudage et les zone adjacentes à l'aluminium industriel et à l'alliage aluminium-silicium.

Les duretés obtenues sur la coupe centrale de la zone de l'alliage AlSi (Tableau IV.2 et la Figure IV.2) montrent que la température et le temps de maintien lors du soudage ainsi que la valeur de la contrainte de compression au cours du soudage influent sur la valeur de dureté Vickers. L'échantillon ayant subi un soudage à une température de 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes, et sous une contrainte de compression de 30 KN a la plus grande dureté dans cette zone.

Les duretés obtenues sur la coupe centrale de la zone de l'alliage Al (Tableau IV.3 et la Figure IV.3) montrent que la température et le temps de maintien lors du soudage ainsi que la valeur de la contrainte de compression au cours du soudage influent sur la valeur de dureté Vickers. L'échantillon ayant subi un soudage à une température de 600°C avec un temps de maintien de 60 minutes, et sous une contrainte de compression de 50 KN a la plus grande dureté dans cette zone.

Les duretés obtenues sur la coupe centrale de la zone de soudage (Tableau IV 4 et la Figure IV4) montrent que la dureté de l'échant ayant subi un soudage à une température de 550°C avec un temps de maintien de 30 minutes, et sous une contrainte de compression de 50 KN a la plus grande dureté dans cette zone.

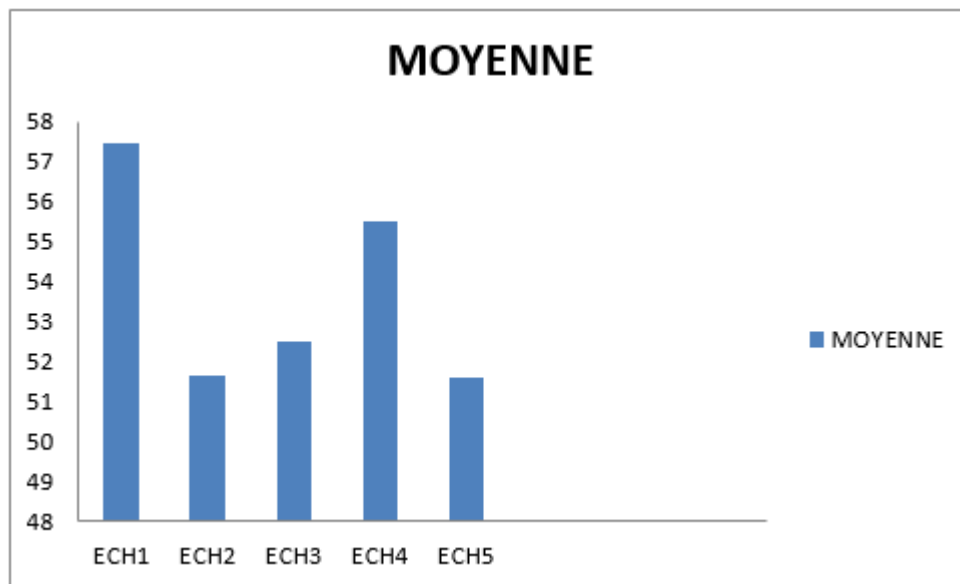
On ce qui concerne la dureté à l'extérieur de la zone à la limite extérieur de l'aluminium, de l'alliage Al-Si, et de la zone de soudage (Tableau IV (5-7) et la Figure IV (5-7), la grande dureté Vickers est observée, pour l'échantillon ayant subi un soudage à une température de 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes, et sous une contrainte de compression de 30 KN.

Toutes les duretés Vickers sont inférieures à celle de l'alliage aluminium-silicium avant le soudage.

Toutes les valeurs de la dureté Vickers montrent qu'une diffusion des éléments d'alliages a eu lieu.

**Tableau IV.2.** Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l’alliage AlSi.

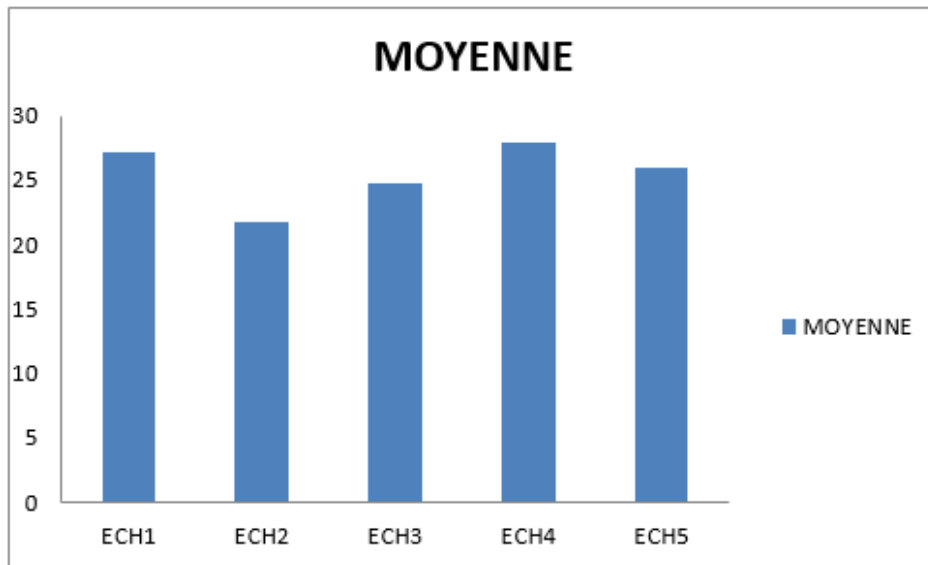
Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )					Moyenne
<b>1</b>	<b>56.42</b>	<b>56.62</b>	<b>57.33</b>	<b>58.16</b>	<b>58.70</b>	<b>57.46</b>
<b>2</b>	<b>51.34</b>	<b>51.38</b>	<b>51.58</b>	<b>51.83</b>	<b>52.13</b>	<b>51.65</b>
<b>3</b>	<b>49.75</b>	<b>54.00</b>	<b>54.53</b>	<b>52.64</b>	<b>51.48</b>	<b>52.48</b>
<b>4</b>	<b>52.44</b>	<b>52.79</b>	<b>58.10</b>	<b>59.61</b>	<b>54.64</b>	<b>55.51</b>
<b>5</b>	<b>48.05</b>	<b>50.41</b>	<b>54.91</b>	<b>51.93</b>	<b>52.74</b>	<b>51.61</b>



**Figure IV.2.** Histogramme de dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone de l’alliage AlSi.

**Tableau IV.3.** Dureté Vickers après soudage pour les échantillons (1,2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l’aluminium.

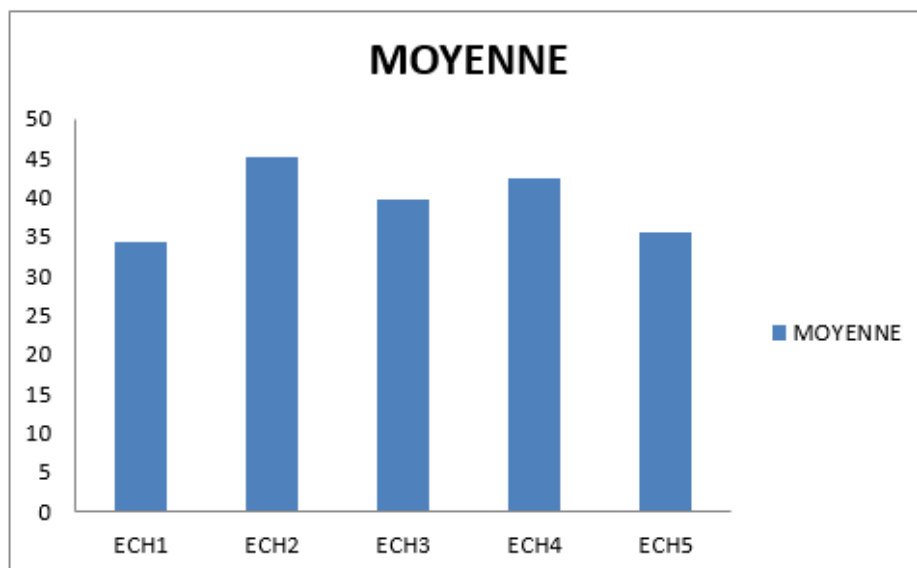
Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )					Moyenne
<b>1</b>	<b>27.74</b>	<b>27.59</b>	<b>26.64</b>	<b>26.81</b>	<b>26.81</b>	<b>27.11</b>
<b>2</b>	<b>25.92</b>	<b>27.36</b>	<b>27.36</b>	<b>28.34</b>	<b>27.45</b>	<b>21.81</b>
<b>3</b>	<b>20.07</b>	<b>26.71</b>	<b>25.87</b>	<b>26.73</b>	<b>25.46</b>	<b>24.79</b>
<b>4</b>	<b>24.74</b>	<b>27.20</b>	<b>28.77</b>	<b>29.75</b>	<b>29.40</b>	<b>27.93</b>
<b>5</b>	<b>23.61</b>	<b>25.83</b>	<b>26.81</b>	<b>27.05</b>	<b>26.36</b>	<b>25.93</b>



**Figure IV.3.** Histogramme de dureté Vickers après le soudage pour les échantillons (1, 2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale dans la zone de l'aluminium.

**Tableau IV.4.** Dureté Vickers coté (1, 2, 3, 4, 5) sur la coupe centrale de la zone du soudage zone de soudage.

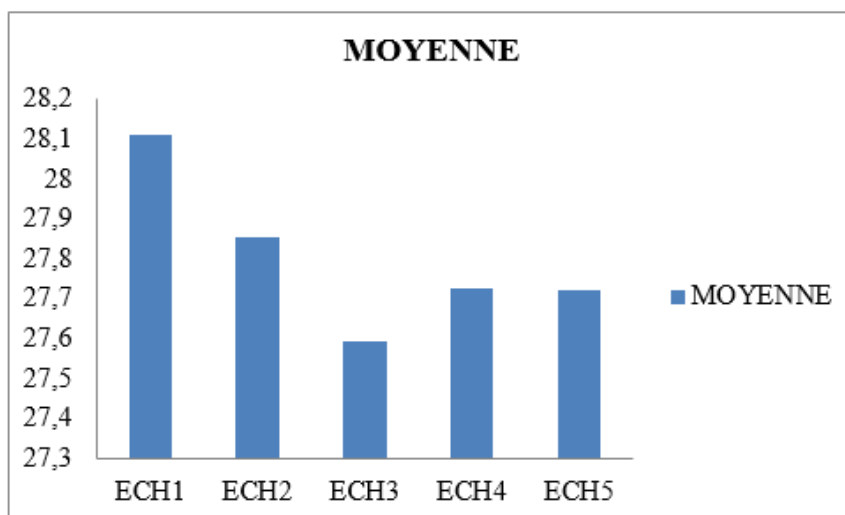
Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )					Dureté Vickers Moyenne
	1	2	3	4	5	
1	36.47	33.10	34.06	36.03	32.25	34.38
2	47.00	49.37	40.47	43.30	44.87	45.00
3	31.26	41.88	41.13	40.15	43.68	39.62
4	42.81	47.96	40.57	45.56	35.55	42.49
5	33.07	35.60	44.27	32.56	32.47	35.60



**Figure IV.4.** Histogramme de dureté Vickers sur la coupe centrale de la zone de soudage.

**Tableau IV.5.** Dureté Vickers après soudage à la limite extérieure de l'aluminium des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

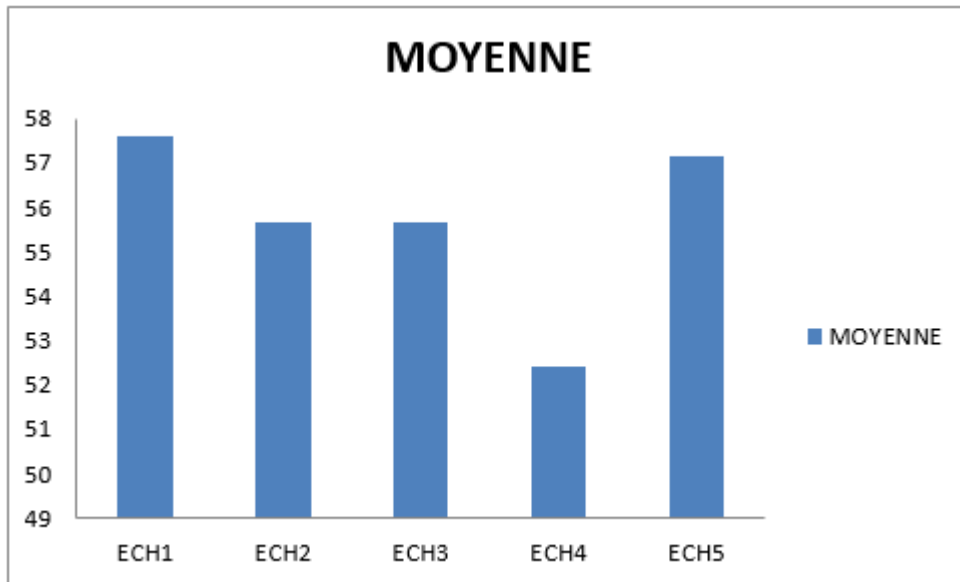
Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )			Dureté Vickers Moyenne
<b>1</b>	<b>27.98</b>	<b>28.36</b>	<b>27.98</b>	<b>28.11</b>
<b>2</b>	<b>27.98</b>	<b>27.98</b>	<b>27.58</b>	<b>27.85</b>
<b>3</b>	<b>27.21</b>	<b>27.98</b>	<b>27.58</b>	<b>27.59</b>
<b>4</b>	<b>27.21</b>	<b>27.98</b>	<b>27.98</b>	<b>27.72</b>
<b>5</b>	<b>27.98</b>	<b>27.58</b>	<b>27.58</b>	<b>27.72</b>



**Figure IV.5.** Histogramme dureté Vickers après soudage à la limite extérieure de des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

**Tableau IV.6.** Dureté Vickers à la limite extérieure de l'alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

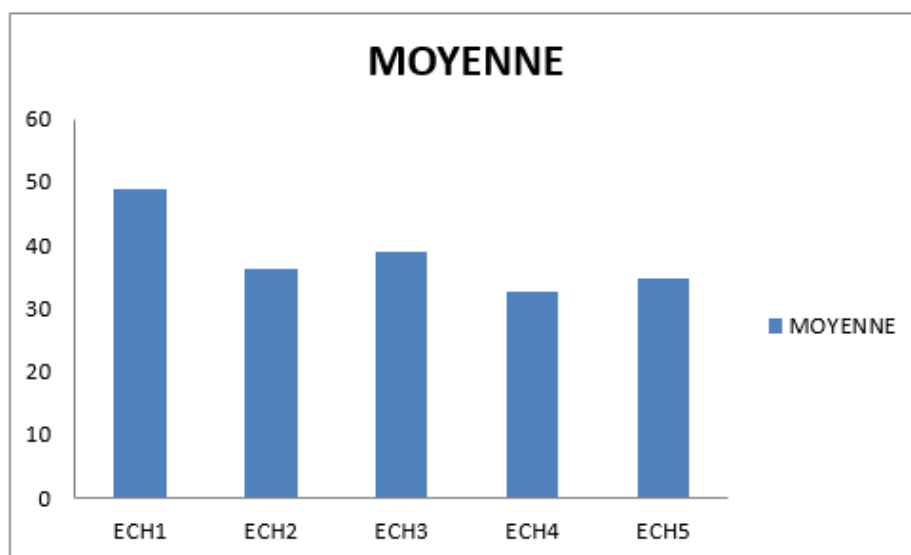
Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )			Dureté Vickers Moyenne
<b>1</b>	<b>56.76</b>	<b>60.36</b>	<b>55.63</b>	<b>57.58</b>
<b>2</b>	<b>54.54</b>	<b>55.63</b>	<b>56.76</b>	<b>55.64</b>
<b>3</b>	<b>54.54</b>	<b>56.76</b>	<b>55.63</b>	<b>55.64</b>
<b>4</b>	<b>45.98</b>	<b>54.53</b>	<b>56.76</b>	<b>52.42</b>
<b>5</b>	<b>56.76</b>	<b>57.92</b>	<b>56.76</b>	<b>57.14</b>



**Figure IV.6.** Histogramme dureté Vickers à la limite extérieure de l’alliage AlSi des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

**Tableau IV.7.** Dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

Echantillon	Dureté Vickers (Kgf/mm <sup>2</sup> )			Dureté Vickers Moyenne
<b>1</b>	<b>46.82</b>	<b>49.89</b>	<b>49.89</b>	<b>48.86</b>
<b>2</b>	<b>34.49</b>	<b>38.00</b>	<b>36.77</b>	<b>36.42</b>
<b>3</b>	<b>39.95</b>	<b>36.77</b>	<b>38.00</b>	<b>39.08</b>
<b>4</b>	<b>35.04</b>	<b>38.00</b>	<b>31.93</b>	<b>32.81</b>
<b>5</b>	<b>33.95</b>	<b>31.93</b>	<b>33.43</b>	<b>34.72</b>

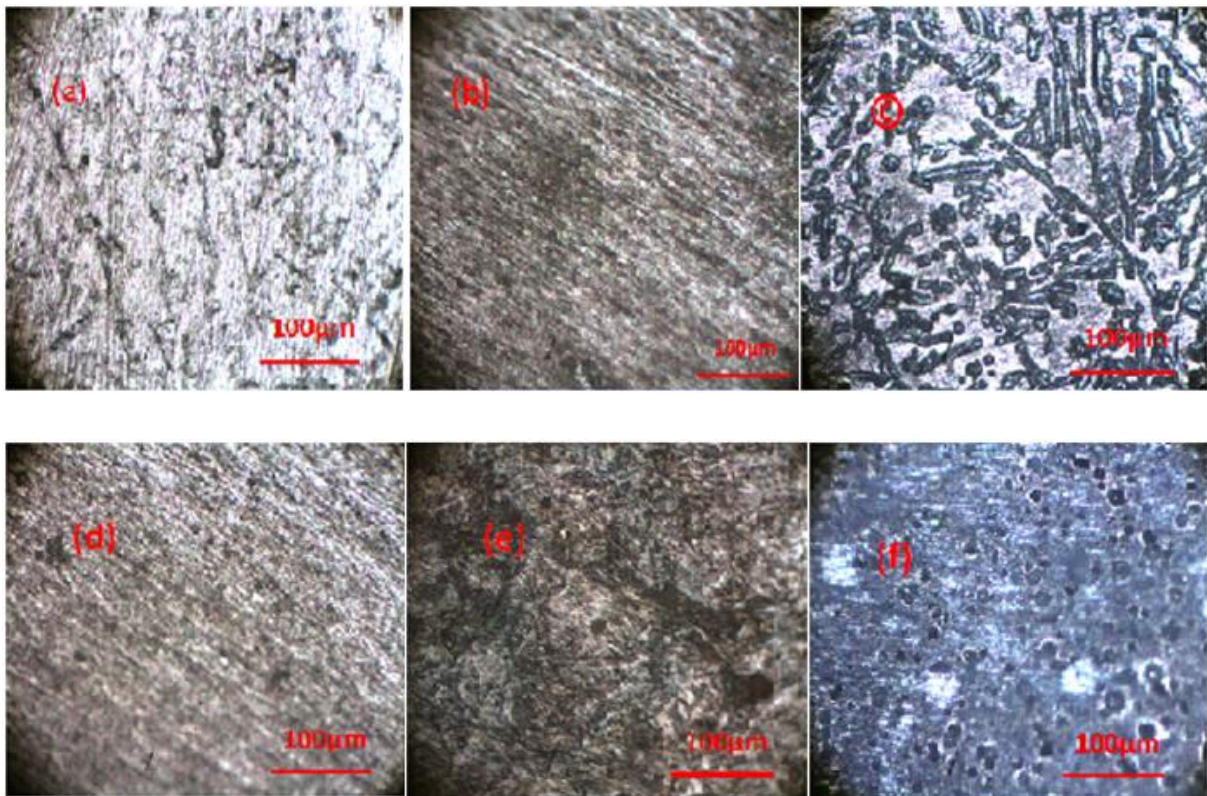


**Figure IV.7.** Histogramme de dureté Vickers à la limite extérieure, de la zone soudage, des échantillons (1, 2, 3, 4, 5).

### IV.3. Caractérisation de la microstructure :

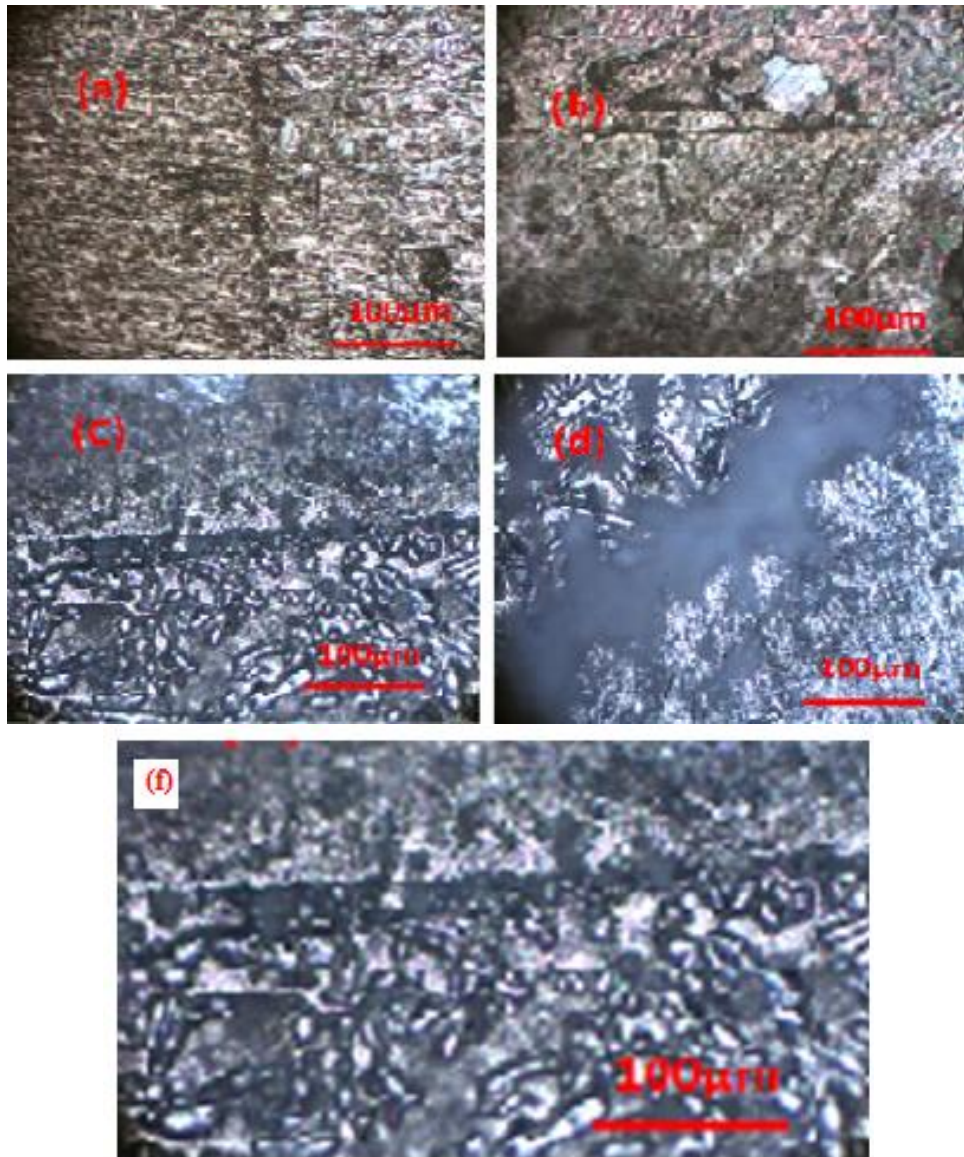
#### IV.3.1. Microstructures de l'aluminium industriel et de l'alliage aluminium-silicium avant soudage :

Figure VI.8 montre la microstructure de l'alliage aluminium-silicium et de l'aluminium industriel, avant et après immersion dans une solution de concentration de 3% en poids de NaCl. Les sous figure (a-c) montrent la microstructure de l'alliage d'aluminium-silicium avant immersion, 1 heure après immersion, et 72 heures après immersion. Ces microstructures montrent que l'alliage aluminium-silicium se corrode autour des d'aiguilles (Figure.VI.8 c) de l'eutectique après 72 heures de corrosion, par contre l'aluminium se corrode par piquûre (Figure.VI.8f).



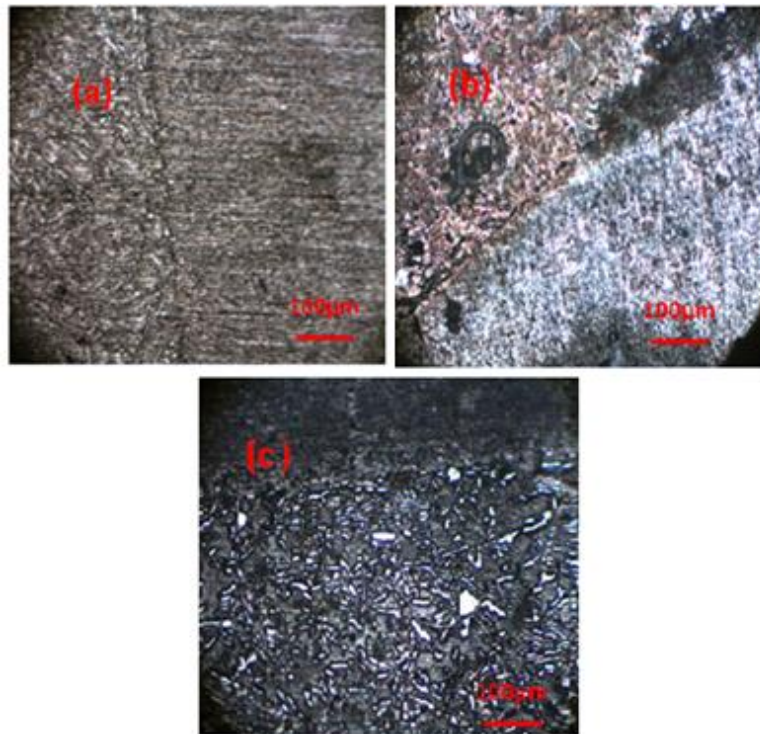
**Figure VI.8.** Échantillon d'alliage aluminium-silicium : avant immersion (a), et après 1h (b), et 72h (c) d'immersion, Échantillon d'aluminium industriel : avant immersion(d), et après 1h (e), et 72h (f) d'immersion.

La corrosion de l'échantillon ayant subi un soudage à 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes, sous une contrainte de compression de 30KN (coupe centrale), autour de la zone de soudage montre une corrosion par piqure dans la région de l'aluminium et de la corrosion autour des aiguilles de l'eutectique, la zone de liaison est aussi corrodée autours des grains formés, donc une corrosion intergranulaire (Figure .VI.9. (f)).



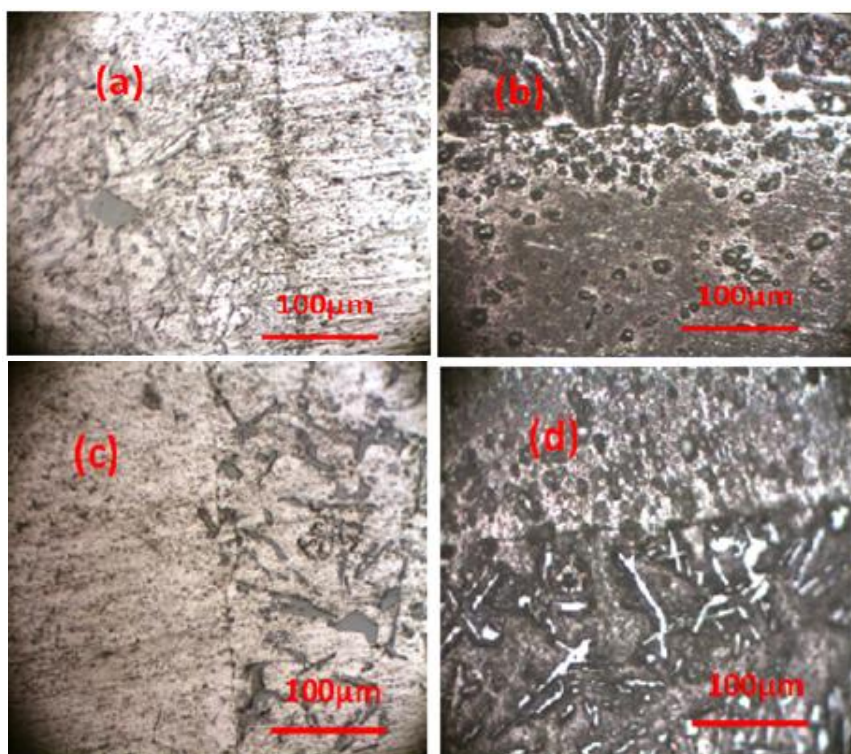
**Figure VI.9.** Échantillon ayant subi un soudage à la température de 500°C avec un temps de maintien de 60 minutes sous une contrainte compression de 30 KN (coupe centrale), avant émergence (a), après émergence (1h (b), 48h (c), 72h (d)), effet loupe de l'image (e).

La Figure VI.10 montre la microstructure de la surface de l'échantillon après soudage à la température de 550°C et un temps de maintien de 30 minutes, et sous une contrainte de compression de 50 KN, montre une corrosion par piqûre dans la région de l'aluminium et une corrosion autour de l'eutectique après 24 heures et 72 heures de d'immersion..



**Figure VI.10.** Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 550 avec un maintien de 30 minutes et sous une contrainte de compression de 50, avant émergence (a), après émergence (24h (b) ,72h (c)).

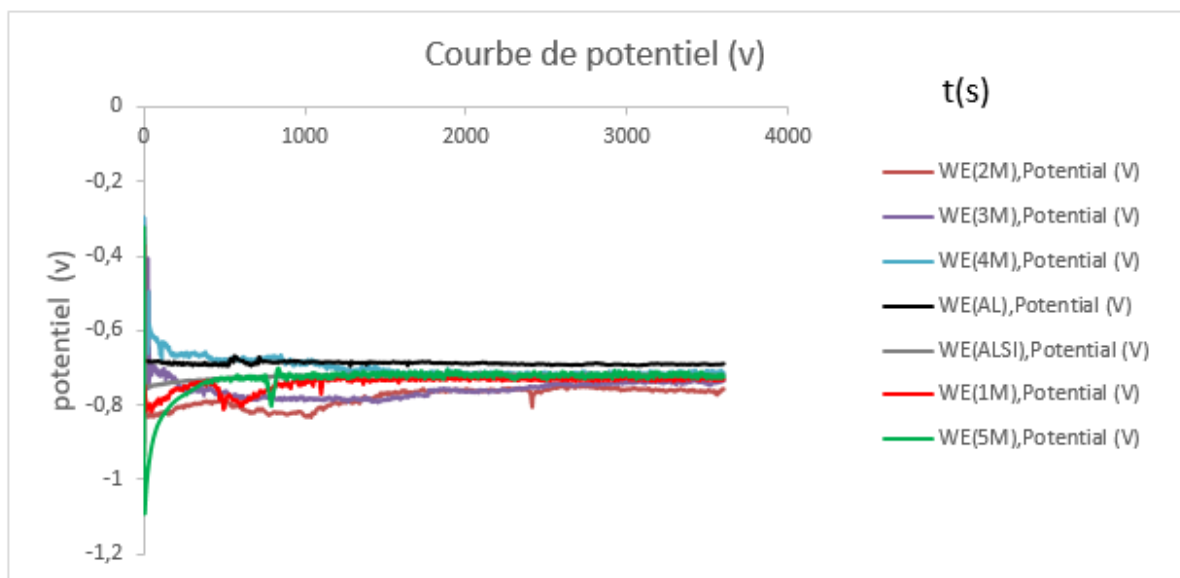
La microstructure représentée par la (Figure IV.11) montre clairement que la corrosion de la zone d'aluminium industriel se corrode par piqûre et celle de l'aluminium silicium se corrode autour de l'eutectique après 72 d'immersion.



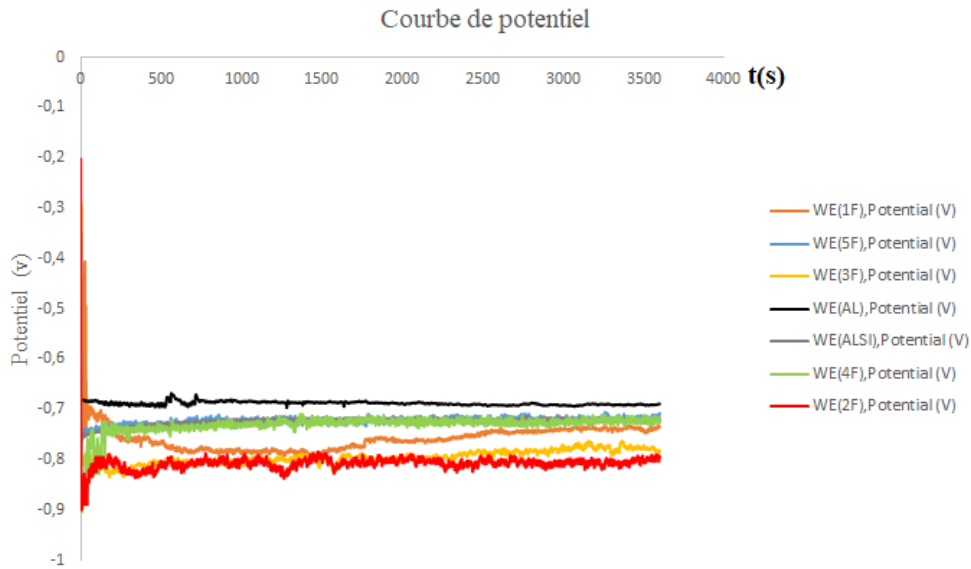
**Figure IV.11.** Microstructure de la surface de l'échantillon soudé à la température de 500 avec un maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 30, (c, d), avant émergence (a, c), 72 heures après immersion (b,d).

**IV.3.2. Caractérisation électrochimique :**

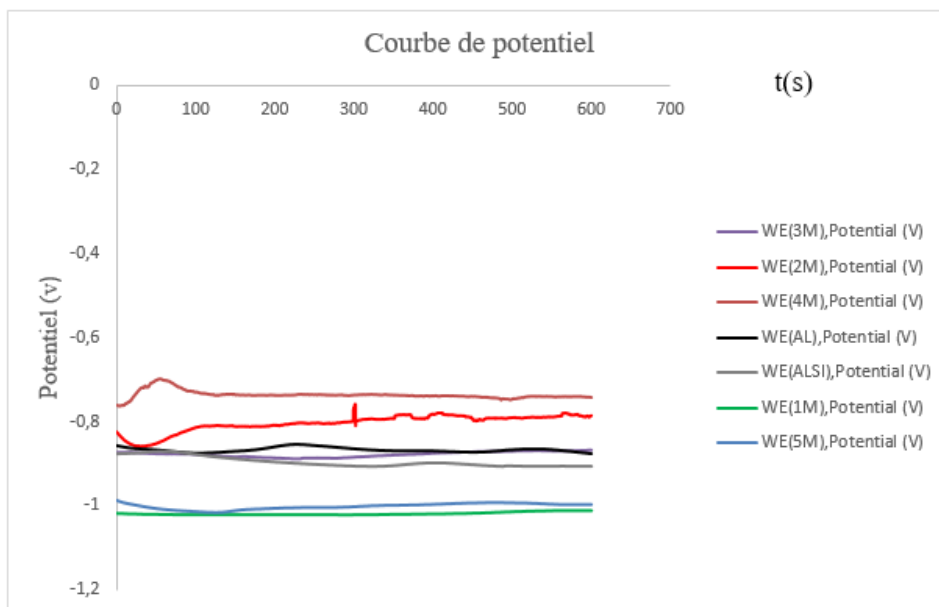
L'étude de l'évolution du potentiel de corrosion libre dans une solution à 3%NaCl en fonction du temps nous a permis d'obtenir les résultats résumés dans les courbes au-dessous, représentées par les figures (IV. 12 ,19). Sur ces figures nous observons que le potentiel de corrosion de la face externe ainsi que la coupe centrale sont différents durant les 72 heures de corrosion dès les premières secondes d'immersion. Aux premières secondes d'immersion les potentiels de corrosion ont des valeurs différentes à celles enregistrés par la suite. A partir de une heure de corrosion le potentiel de corrosion libre de tous les échantillons semble stable, mais le potentiel de chaque un des échantillons est différent des potentiel des autres. Les échantillons de la face externe semblent avoir un potentiel moins noble après une heure de d'immersion. Le potentiel de corrosion de l'aluminium et de l'alliage aluminium-silicium est proche durant les 72 de corrosion. Sachant que les échantillons issus de la coupe centrale ont reçue une contrainte variable sur leurs surfaces, ceci dit la répartition de la compression sur la surface de ces échantillons est variable, de ce fait nous pensons que c'est la raison pour laquelle le potentiel de ces échantillons est moins noble. Par contre les échantillons de la surface externe ont développé une couche de passivation lors de l'enfournement, ce qui les a rendus plus noble.



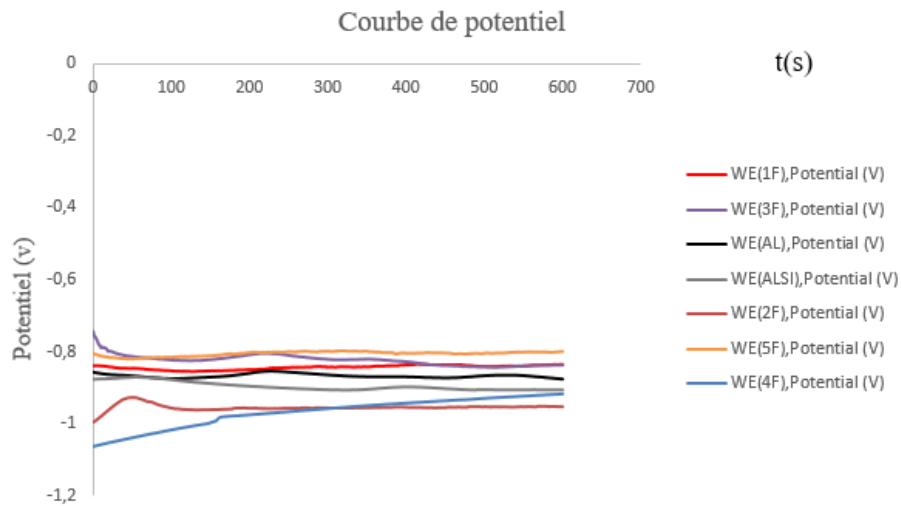
**Figure IV.12.** Potentiel de la corrosion libre de la première heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).



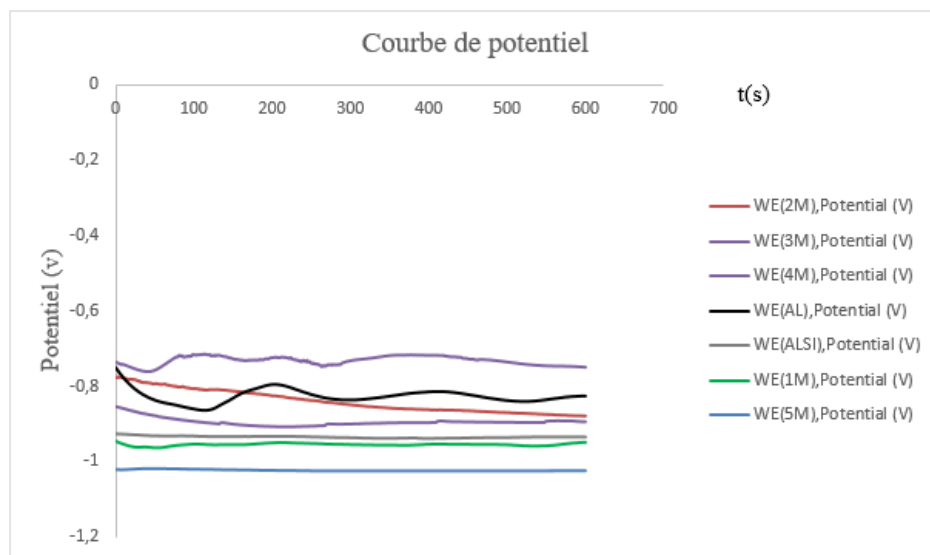
**Figure IV.13.** Potentiel de la corrosion libre de la première heure d’immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de la face des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l’aluminium (Al), ainsi que l’alliage d’aluminium (AlSi).



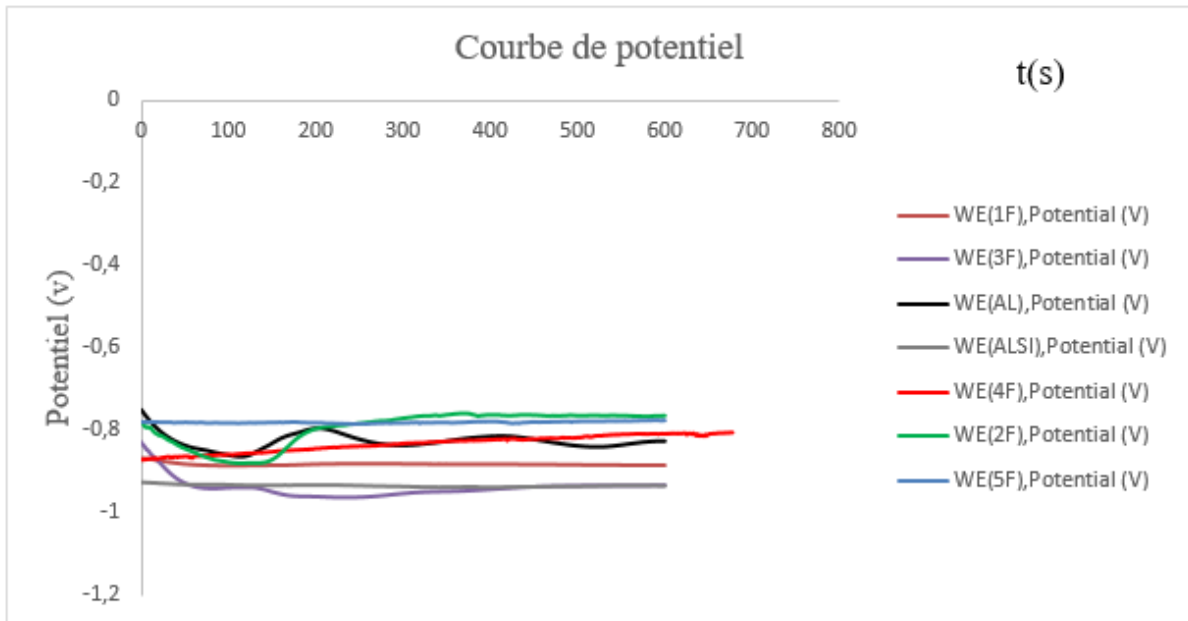
**Figure IV.14.** Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 24 heures de corrosion d’immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l’aluminium (Al), ainsi que l’alliage d’aluminium (AlSi).



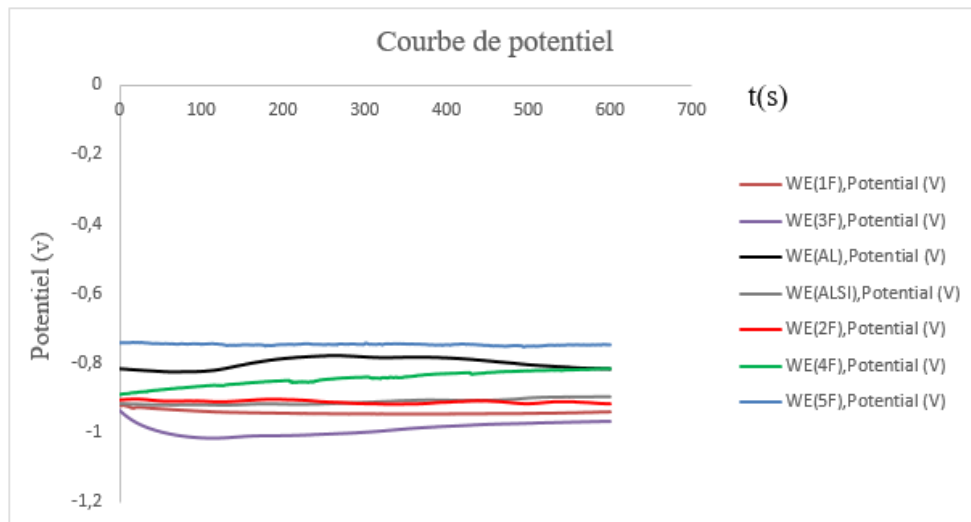
**Figure IV.15.** Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 24 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).



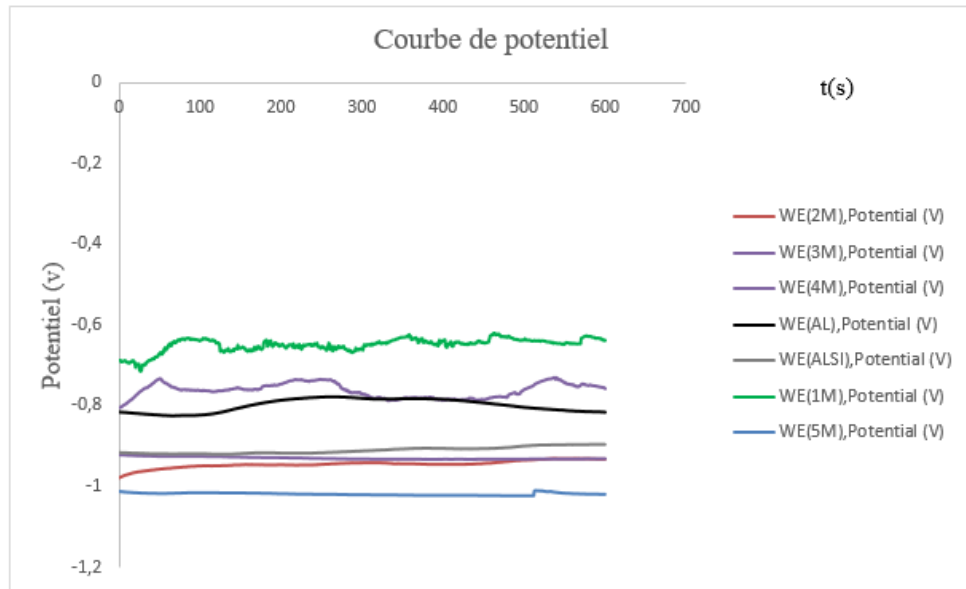
**Figure IV.16.** Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 48 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).



**Figure IV.17.** Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 48 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).



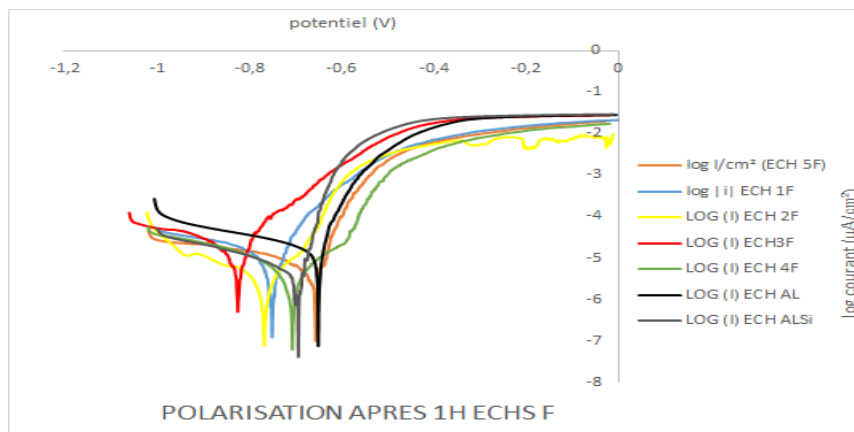
**Figure IV.18.** Potentiel de la corrosion libre 10 minutes après 72 heures de corrosion d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl pour la coupe centrale sous les conditions de soudage des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).



**Figure IV.19.** Potentiel de la corrosion libre de 10 minutes après 72 heure de corrosion dans la solution de 3% en poids de NaCl de face la des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).

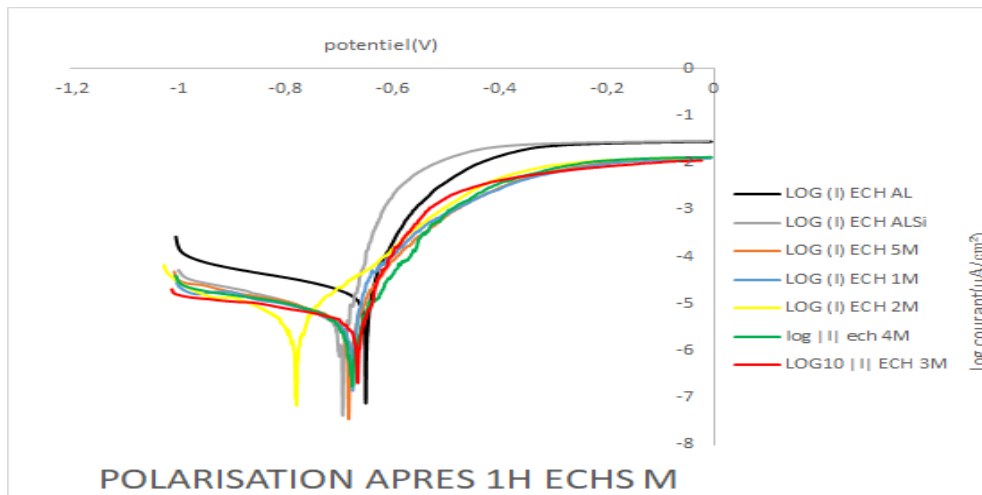
**IV.4. Résultats des tests de polarisatin :**

La Figure. IV.20 représentant les courbes de polarisation de la face extérieure des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 ainsi que celle de l'aluminium et celle de l'alliage aluminium-silicium après une heure d'immersion dans une solution de 3% en poids de NaCl. Cette figure montre que l'échantillon 5 a la même noblesse que l'échantillon d'aluminium de pureté industrielle, car leur potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) sont très proche, par contre l'échantillon 3 est le moins noble car son potentiel de corrosion est le plus petit.



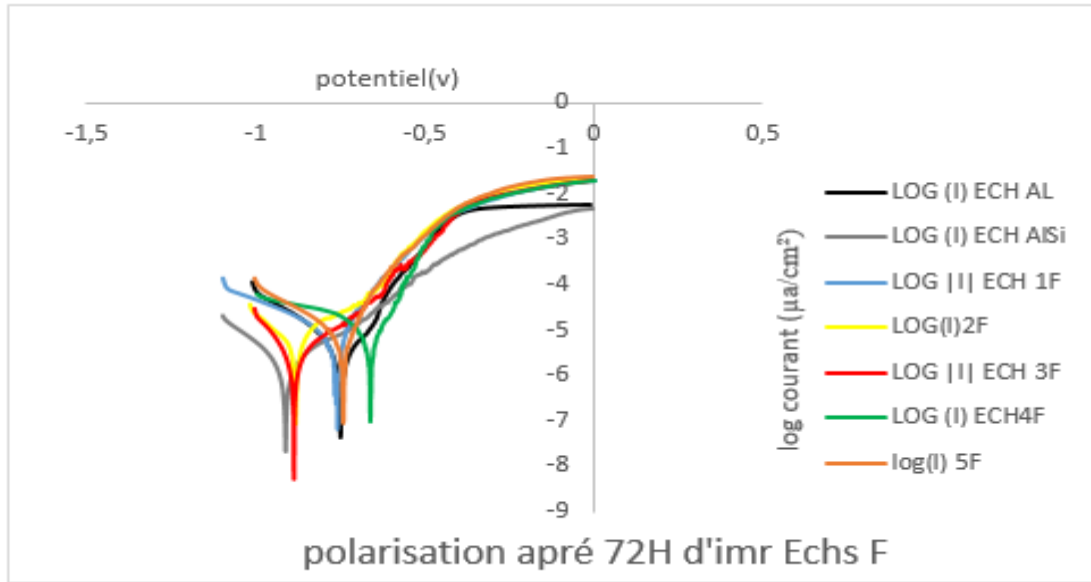
**Figure IV.20.** Courbes de polarisation après une heure d'immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).

La Figure IV.21 représentant les courbes de polarisation de la coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 ainsi que celle de l'aluminium et celle de l'alliage aluminium-silicium après une heure d'immersion dans une solution de 3% en poids de NaCl, la noblesse (le potentiel de la corrosion  $E_{\text{corr}}$  de l'échantillon 3 est proche de celle de l'aluminium, et le potentiel de corrosion de l'échantillon 2 est le moins élevé.



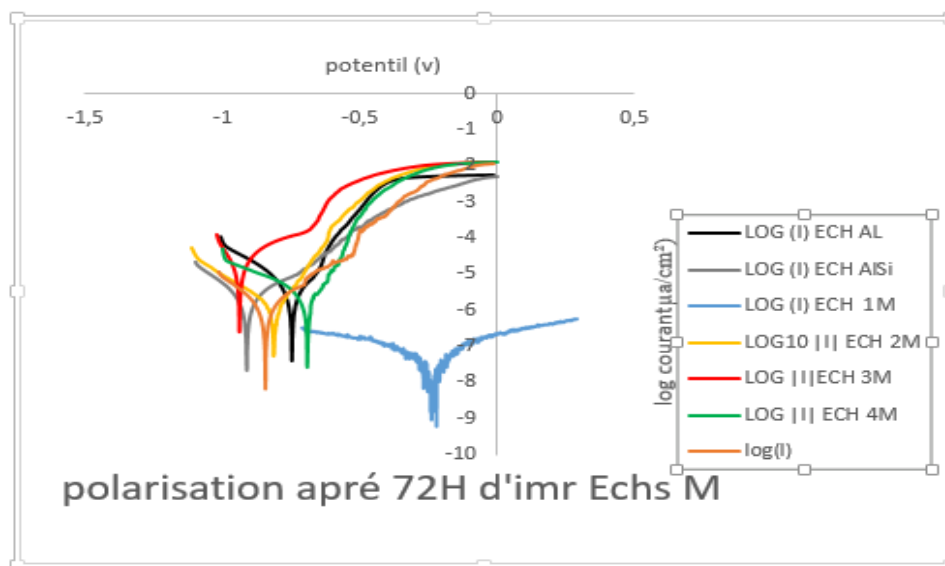
**Figure IV.21.** Courbes de polarisation après une heure d'immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l'aluminium (Al), ainsi que l'alliage d'aluminium (AlSi).

La Figure IV.20 représentant les courbes de polarisation de la face extérieure des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 ainsi que celle de l'aluminium et celle de l'alliage aluminium-silicium après 72 heures d'immersion dans une solution de 3% en poids de NaCl. Cette figure montre que l'échantillon 4 est l'échantillon le plus noble, car son potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) est plus grand, par contre l'échantillon 5 et 1 sont de noblesse proche de celle de l'aluminium de pureté industrielle, l'échantillon aluminium-silicium devient le noble après 72 d'immersion c'est-à-dire de potentiel de corrosion le plus petit ( $E_{\text{corr}}$ ). Ceci est logique car l'alliage aluminium-silicium possède des éléments d'alliages favorisant la corrosion localisée.



**Figure IV.22.** Courbes de polarisation après 72 heure d’immersion pour les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 de la face externe, sous les conditions de soudage, et l’aluminium (Al), ainsi que l’alliage d’aluminium (AlSi).

La Figure. IV.21 représentant les courbes de polarisation de la coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 ainsi que celle de l’aluminium et celle de l’alliage aluminium-silicium après 72 heure d’immersion dans une solution de 3% en poids de NaCl. L’échantillon 1 est l’échantillon le plus noble (son potentiel de corrosion  $E_{corr}$  1 est le plus grand), et le potentiel de corrosion de l’échantillon 3, est le moins élevé (le moins noble) ce potentiel est aussi proche de celui de l’alliage aluminium-silicium.



**Figure IV.23.** Courbes de polarisation après 72 heure d’immersion dans la solution de 3% en poids de NaCl de coupe centrale des échantillons 1, 2, 3, 4, 5 sous les conditions de soudage et l’aluminium (Al), ainsi que l’alliage d’aluminium (AlSi).

### Détermination du potentiel de corrosion et de la résistance de polarisation sur les différentes courbes de polarisation :

La résistance à la polarisation est le rapport de potentiel sur la densité l'intensité du courant au voisinage du potentiel de corrosion, le potentiel de corrosion est le potentiel observé au voisinage d'une densité de courant nulle sur la courbe de polarisation.

On observe sur le Tableau IV.8, représentant la résistance à la polarisation de la coupe centrale des échantillons, l'aluminium et l'alliage aluminium-silicium, après 1 heure d'immersion, que l'échantillon 2 ayant subi un soudage à  $T=550^{\circ}\text{C}$  avec une durée de maintien de 30 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN possède la résistance à la polarisation la plus élevée (21.71  $\text{K}\Omega$ ), par contre l'aluminium de pureté industrielle possède le potentiel de corrosion le plus élevé (-0.65). L'échantillon 3 ayant subi un soudage à  $T=500^{\circ}\text{C}$  avec une durée de maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN cette valeur est de (3.40  $\text{K}\Omega$ ), la plus petite valeur du potentiel de corrosion a été enregistrée aussi par l'échantillon 3 (-0.82V).

**Tableau IV.8.** La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d'immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons.

Echantillon	$R_p$ $\text{K}\Omega$ après 1 heure d'immersion	$E_{\text{corr}}$ en Volt après 1 heure d'immersion
1	12.15	-0.75
2	21.71	-0.77
3	3.40	-0.82
4	20.66	-0.71
5	11.87	-0.71
Aluminium	7.56	-0.65
Alliage aluminium-silicium	8.95	-0.69

On observe sur le Tableau IV.9, représentant la résistance à la polarisation de la surface externe des échantillons, l'aluminium et l'alliage aluminium-silicium, après 1 heure d'immersion, que l'échantillon 2 ayant subi un soudage à  $T=550^{\circ}\text{C}$  avec une durée de maintien de 30 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN possède la résistance à la polarisation la plus élevée (16.73 $\text{K}\Omega$ ). L'aluminium de pureté industrielle possède le potentiel de corrosion le plus élevé (-0.65 V). La plus faible résistance à la polarisation a été enregistrée par l'aluminium de pureté industrielle (7.56  $\text{K}\Omega$ ). Le plus faible potentiel de corrosion a été enregistré par l'échantillon 2 (-0.78V).

**Tableau IV.9.** La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après une heure d’immersion de la surface représentant la face externe des échantillons.

Echantillon	Rp en KΩ après 1 heure d’immersion	Ecorr en Volt après 1 heure d’immersion
1	3.70	-0.67
2	16.73	-0.78
3	4.66	-0.67
4	3.72	-0.68
5	11.87	-0.68
Aluminium	7.56	-0.65
Alliage aluminium-silicium	8.95	-0.69

On observe sur le Tableau IV.10, représentant la résistance à la polarisation de la coupe centrale des échantillons, l’aluminium et l’alliage aluminium-silicium, après 72 heures d’immersion, que l’échantillon 1 ayant subi un soudage à T=500°C avec une durée de maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 30KN possède la résistance à la polarisation la plus élevée (213.34 KΩ), possède aussi le potentiel de corrosion le plus élevé (-0.24 V). L’alliage d’aluminium-silicium le potentiel de corrosion le plus petit (-0.91V) et l’échantillon 3 ayant subi un soudage à T=500°C avec une durée de maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN possède la résistance à la polarisation la plus petite (3.33 KΩ).

**Tableau IV.10.** La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d’immersion de la surface représentant la coupe centrale des échantillons

Echantillon	Rp après 72 heures d’immersion	Ecorr après 72 heures d’immersion
1	213.34	-0.24
2	019.56	-0.81
3	003.33	-0.94
4	039.70	-0.69
5	029.72	-0.74
Aluminium	035.34	-0.75
Alliage aluminium-silicium	017.68	-0.91

On observe sur le Tableau IV.11, représentant la résistance à la polarisation de la surface externe des échantillons, l'aluminium et l'alliage aluminium-silicium, après 1 heure d'immersion, que l'échantillon 3 ayant subi un soudage à  $T=500^{\circ}\text{C}$  avec une durée de maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN possède la résistance à la polarisation la plus élevée (45.95K $\Omega$ ). L'échantillon 5 ayant subi un soudage à  $T=550^{\circ}\text{C}$  avec une durée de maintien de 60 minutes et sous une contrainte de compression de 50KN possède le potentiel de corrosion le plus élevé (-0.74 V). La plus faible résistance à la polarisation a été enregistrée par l'alliage d'aluminium-silicium (17.68 K $\Omega$ ). Le plus faible potentiel de corrosion à été enregistré par l'échantillon 3 et 4 ayant subi un soudage à une température de 500  $^{\circ}\text{C}$  et 600  $^{\circ}\text{C}$  respectivement, avec un temps de maintien de 60 minutes et une contrainte de compression de 50KN (-0.89V).

**Tableau IV.11.** La résistance à la polarisation et potentiel de corrosion après 72 heures d'immersion de la surface représentant la face externe des échantillons

Echantillon	Rp après 72 heures d'immersion	Ecorr après 72 heures d'immersion
1	003.90	-0.77
2	004.09	-0.88
3	045.95	-0.89
4	002.72	-0.89
5	007.10	-0.74
Aluminium	035.34	-0.75
Alliage aluminium-silicium	017.68	-0.91

En conclusion, la résistance à la polarisation et le potentiel de corrosion varient en fonction du temps de corrosion, des paramètres de soudage (T, t, la contrainte de compression).



*Conclusion*

### Conclusion générale :

L'objectif de cette étude est de voir l'effet de la température, du temps de maintien et de la contrainte de compression sur le comportement à la corrosion et sur la dureté Vickers de la zone de soudage ainsi que la surface des deux aluminiums soudés. Le soudage est obtenu par technique de soudage à haute température sous une contrainte de compression de deux pièces de forme parallélépipède, l'une en aluminium de pureté industrielle et l'autre de l'alliage d'aluminium silicium.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous:

- L'application d'une température entre 500 et 600 °C, avec un maintien de 30 à 60 minutes, sous contraintes de compression allant de 30 à 50 KN nous a permis d'avoir un soudage.

- Le soudage sous contraintes de compression à haute température pour l'aluminium pureté industrielle et de l'alliage d'aluminium-silicium permet l'obtention d'une zone de soudage de propriétés mécaniques hétérogènes.

- La technique de soudage sous contraintes de compression à haute température diminue la dureté, ceci est dû à la température de l'enfournement qui supérieure à celle de la recristallisation, ceci dit, plusieurs phénomènes métallurgiques peuvent intervenir surtout dans le volume de l'alliage aluminium-silicium.

- L'immersion dans une solution de 3% de NaCl induit une corrosion galvanique produisant une corrosion par piqûres à la surface de l'aluminium de pureté industrielle et une corrosion autour de l'eutectique sur les surfaces de l'alliage aluminium silicium.

- Le potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion, et la résistance à la polarisation n'ont d'aluminium de pureté industrielle est bonne, ceux de l'alliage d'aluminium-silicium est faible.

- L'évolution du potentiel de corrosion libre, le potentiel de corrosion, et la résistance à la polarisation, n'ont pas d'allure logique.



# *Bibliographie*

### Bibliographie

- [1]. Michel COLOMBIE, Matériaux métalliques, édition DUNOD (2<sup>ème</sup> édition), 2008.
- [2]. D. Beaulieu, Les caractéristiques de l'aluminium structural. Les presses de l'université, Laval, 2002.
- [03]. Victor CASTELHANO, étude des différentes techniques induisant le durcissement des alliages d'aluminium les plus courants, en particulier évolution des structures et des propriétés mécaniques, thèse de doctorat, université de Reims, 2001.
- [4]. Gimenez P, Rameau, J. J. et *al.*, Corrosion, 37, 12, pp. 673-682, 1981.
- [5]. Luminita DIN-STIRBU, Comportement à la Corrosion des Alliages d'Aluminium Utilisés dans l'Industrie Automobile pour la Fabrication de Radiateur Chauffage, Thèse de Doctorat, Génie des Matériaux, Université de Pitesti (Roumanie), p15, 2005.
- [6]. Deltombe E, Pourbaix M, Comportement Electrochimique de l'Aluminium, Diagramme d'Equilibre Tension/ pH du Système Al-H<sub>2</sub>O à 25°C, Rapport Technique N°42, Cebelcor, Décembre 1956.
- [7]. Scully J C, The Fundamentals of Corrosion, International Series of Monographs on Materials Science and Technology, 2nd Ed. Pergamon International, Oxford, Vol. 17, 1975.
- [8]. De PTSI, Matériaux, Classe Lycée Vauban, Brest 1992.
- [9]. Vargel C, Corrosion de l'aluminium, Edition. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, 2002.
- [10]. Wood J, Harris D A, Revue de l'Aluminium, les Alliages de Fonderie Inoxydables, p882-893, 1968.
- [11]. Develay R, Importance de l'Addition de Manganèse dans l'Aluminium et les Alliages de l'Aluminium, Revue de l'Aluminium, p345-368, 1978.
- [12]. Smith C A, The Corrosion Story, Zinc, Lead and Aluminum, Anti-Corrosion, Part 3, Vol 24, pp13-15, 1977.
- [13]. Altenpohl D, Aluminium Viewed From Within, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-87017-138-3, 1982.

- [14]. Ketcham S J, Shaffer I.S, Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys, ASTM, STP 516, pp3-16, 1972.
- [15]. Triki E, Phénomènes de la corrosion, Première Ecole Maghrébine de Corrosion, Hammamet, 1990.
- [16]. Guillaumin V, Mankowski, G., Localised Corrosion of 6056T6 Aluminium Alloy in Chloride Media, Corrosion Science, Vol. 42, pp.105-125, 2000.
- [17]. Jean-Louis C, Métaux et Alliages Passivables, Règle de Choix et Emplois Types, Technique de l'Ingénieur, Vol M 153-7, 1994.
- [18]. TRABANELLI G, Marcel DEKKER Y, MANSFIELD F, Corrosion Mechanism, p 119, 1987.
- [19]. TURGOOSE S, Chemical Inhibitors for Corrosion Control and Organizers, the Royal Society of Chemistry- Industrial Division and UMIST, p 107, 1988.
- [20]. Mostefa BENEDDEB, Étude les défauts de soudage des pipelines mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider, Biskra. pp2
- [21]. CLAUDE Philip, Soudage des alliages d'aluminium, (ENSAM (CER de Bordeaux)), université Art et Métier PRISTECH, Bordeaux Talence.
- [22]. BOUTGHEMES Djamel, Techniques de soudage avancé master LMD 1ere année construction mécanique, université Batna.
- [23]. FERDINAND C, Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires, thèse doctorale de l'institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.
- [24]. Serdyuk G B, Experimental investigation of the stability limits of carbon welding arc in a transverse magnetic field, IZ vestiga Kievskogo Politechnikogo Instituta, 1995, Vol 16.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons fait une étude du comportement à la corrosion et de la dureté de la zone de soudage et de la surface externe obtenue par un soudage sous une contrainte de compression à haute température.

Cas : Soudage de l'aluminium de pureté industrielle et de l'alliage aluminium-silicium.

Les opérations effectuées pour bien mener notre travail :

- Préparation des échantillons.
- Réalisation du mécanisme du soudage.
- Mesure de dureté.
- Analyse métallographique : Observation par microscope optique (MO).
- Etude à la corrosion.
- Mesure du potentiel de la corrosion libre.
- Tracé des courbes de polarisation.

L'objectif de cette étude est de voir l'effet de la température, du temps de maintien et de la contrainte de compression sur le comportement à la corrosion et sur la dureté Vickers de la zone de soudage ainsi que la surface des deux aluminiums à soudés. Le soudage est obtenu par technique de soudage à haute température sous une contrainte de compression de deux pièces de forme parallélépipède, l'une en aluminium de pureté industrielle et l'autre de l'alliage d'aluminium silicium.

**Mots clé :** Aluminium de pureté industrielle aluminium silicium dureté vickers zone de soudage