

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الكيمياء الصناعية

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de Master en : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Étude métallographique du joint soudé d'Al 1050A sous l'effet thermique.

Présentée par :
Ababsa Elhadja

Devant le jury composé de :

Président : Ghebghoub Fatima
Encadreur : Chérifi- Bennadji Nedjema
Examineur : Hamdi Ines

M.C. Université de Biskra
M.C. Université de Biskra
M.C. Université de Biskra



A la mémoire de mon cher père

A ma chère mère

A mes sœurs

A mes frères

Remerciements

Au terme de ce travail, avons toute chose, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force et la patience.

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Dr Chérifi-Bennadji Nedjema pour m'avoir constamment guidé tout au long de ce projet et pour ces conseils précieux.

Je remercie M^{me} Ghebghoub Fatima d'avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie M^{me} Hamdi Ines d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie également tout les membres des laboratoires, où j'ai accompli ce travail, pour leur aide et leurs conseils.

J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université-Biskra pour leur aide, soutien et leurs conseils, sans oublier tout le staff administratif du département de chimie Industrielle.

Merci à tous les collègues et à tous les personnels pour leur encouragement

Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribué de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.



Sommaire



Sommaire

Liste des figures.....	<i>i</i>
Liste des tableaux.....	<i>ii</i>
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'aluminium

I.1. Définition du soudage.....	3
I.2. Les types d'assemblage.....	3
I.2.1. L'assemblage bout à bout.....	3
I.2.2. L'assemblage d'angle.....	3
I.2.3. L'assemblage en recouvrement.....	4
I.3. Caractéristiques de la soudure.....	4
I.3.1. Zone fondue (ZF).....	4
I.3.2. La zone affectée thermiquement (ZAT).....	4
I.3.3. Le métal de base (MB).....	5
I.3.4. La zone de liaison.....	5
I.4. Processus de soudage.....	5
I.4.1. Soudage par fusion.....	5
I.4.1.2. Soudage au gaz (oxyacétylénique).....	5
I.4.1.3. Soudage à l'arc.....	6
2.1. Soudage à l'arc avec électrode fusible.....	6
a. Manuel metal arc (MMA).....	6
b. Soudage à l'arc submergé.....	6
2.2. Soudage à l'arc sous protection gazeuse.....	6
a. Soudage MAG/MIG.....	6
b. Soudage TIG.....	7
c. Soudage plasma.....	8
I.4.1.3. Soudage par faisceau à haute densité d'énergie.....	9
3.1. Soudage par faisceau d'électrons.....	9
3.2. Soudage laser.....	9
I.4.2. Soudage par pression.....	9

I.5. Paramètres influents sur la soudure.....	10
---	----

Chapitre II : Caractéristiques et traitement thermique de l'aluminium série 1000

II.1. L'aluminium.....	11
II.2. La vue chimique d'aluminium.....	11
II.2.1. Structure atomique.....	11
II.2.2. Structure cristalline.....	11
II.3. Propriétés de l'aluminium.....	12
II.4. Aspects métallurgiques de l'aluminium.....	12
II.5. Les alliages d'aluminium.....	13
II.5.1. Alliages aluminium-cuivre de la série 2000.....	14
II.5.2. Alliages aluminium-manganèse de la série 3000.....	14
II.5.3. Alliages aluminium-silicium de la série 4000.....	14
II.5.4. Alliages aluminium-magnésium de la série 5000.....	14
II.5.5. Alliages aluminium- magnésium -silicium de la série 6000.....	14
II.5.6. Alliages aluminium-zinc de la série 7000.....	15
II.5.3. Alliages d'aluminium de la série 8000.....	15
II.6. L'Aluminium non allié série 1000.....	15
II.6.1. Caractéristique de l'aluminium non allié.....	15
II.6.2. Les différentes nuances d'aluminium famille 1000.....	16
II.6.2.1. L'aluminium 1080 A ($Al \geq 99,80\%$).....	16
II.6.2.2. L'aluminium 1050 A ($Al \geq 99,50\%$).....	16
II.6.2.3. L'aluminium 1070 A ($Al \geq 99,70\%$).....	16
II.6.2.4. Les aluminiums 1100 et 1200 ($Al \geq 99,00\%$).....	16
II.6.2.5. L'aluminium 1370.....	16
II.6.2.6. L'aluminium 1350.....	16
II.6.2.7. L'aluminium 1310.....	16
II.6.2.8. L'aluminium 1340.....	17
II.6.2.9. L'aluminium 1110 ($Al \geq 99,10\%$).....	17
II.6.2.10. L'aluminium 1358 ($Al \geq 99,85\%$).....	17
II.6.2.11. L'aluminium 1190 ($Al \geq 99,90\%$).....	17
II.6.2.12. Aluminiums ultra-purs.....	17

II.7. Traitements thermiques d'aluminium et leurs alliages.....	17
II.7.1. Traitements d'homogénéisation.....	18
II.7.2. Traitements d'adoucissement.....	18
II.7.2.1. Le traitement de restauration.....	18
II.7.2.1. Le traitement de recristallisation.....	18
II.7.3. Traitements de trempe structurale.....	18

Chapitre III : Les matériaux étudiés et méthodes expérimentales

III.1. Préparation des échantillons.....	20
III.1.1. Le choix des métaux de base et d'apport.....	20
a) Le métal de base.....	20
❖ Identification du métal de base.....	20
❖ Composition chimique.....	20
❖ Caractéristiques mécaniques.....	21
b) Le métal d'apport.....	21
❖ Composition chimique.....	21
❖ Caractéristiques physiques du métal d'apport.....	22
III.1.2. Le procédé de soudage.....	22
III.2. Préparation des joints soudés.....	24
III.2.1. Traitement thermique.....	24
III.2.2. Polissage mécanique.....	24
III.2.3. Attaque chimique.....	25
III.3. Méthodes expérimentales.....	25
III.3.1. MO (Microscope optique).....	25
III.3.1. DRX (Diffraction des Rayons X).....	26
III.3.3. Mesures de microdureté.....	27
❖ Essai de dureté Vickers.....	27

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1. Etude microstructurale des joints soudés par microscope optique (MO).....	30
IV.1.1. Métal de base (MB).....	30
IV.1.2. Zone affectée thermiquement (ZAT).....	31
IV.1.3. Zone fondue (ZF).....	32
IV.2. Etude par diffraction des rayons X.....	33
IV.2.1. L'état non traité.....	33
a) Les spectres de DRX.....	33
b) Décalage des pics.....	35
IV.2.2. L'état traité à 250 °C.....	36
a) Les spectres de DRX.....	36
b) Décalage des pics.....	36
IV.2.3. L'état traité à 300 °C.....	37
a) Les spectres de DRX.....	37
b) Décalage des pics.....	37
IV.3. Caractérisation par la microdureté Vickers (Hv).....	38
Conclusion générale.....	40
Références Bibliographiques.....	41

Liste des figures

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Figure I.1	Schéma représentant les principaux types d'assemblage.	4
Figure I.2	Cordon de soudure.	5
Figure I.3	Représentation schématique de procédé MAG/MIG.	7
Figure I.4	Représentation schématique de procédé TIG.	8
Figure I.5	Soudage à l'arc par jet de plasma.	9
Figure II.1	Structure cristalline « cubique à face centrée » de l'aluminium.	12
Figure III.1	Soudage Tungsten Inert Gas (TIG): (a) processus global; b) zone de soudage.	23
Figure III.2	Polisseuse type FORCIPOL 2V.	24
Figure III.3	Microscope optique de type Hund WETZLAR.	25
Figure III.4	Diffractomètre de type Bruker D8 Advance.	26
Figure III.5	Principe de dureté Vickers.	27
Figure III.6	Microduromètre de pénétration Vickers.	28
Figure IV.1	Micrographies optiques du métal de base de joints soudés : a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c) 300 °C.	29
Figure IV.2	Micrographie optique des particules intermétalliques.	30
Figure IV.3	Micrographies optiques de la zone affectée thermiquement de joints soudés : a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c) 300 °C.	31
Figure IV.4	Micrographies optiques de la zone fondue de joints soudés : a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c) 300 °C.	32
Figure IV.5	Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé non traité.	33
Figure IV.6	Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité à 250 °C pendant 4 heures.	36
Figure IV.7	Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité à 300 °C pendant 4 heures.	37
Figure IV.8	Les profils de microdureté des joints soudés : non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C.	39

Liste des tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Tableau II.1	Propriétés mécanique de l'aluminium.	13
Tableau II.2	Désignation des alliages d'aluminium.	13
Tableau III.1	la composition chimique du métal de base.	20
Tableau III.2	Les caractéristiques mécaniques du métal de base.	21
Tableau III.3	Composition chimique du métal d'apport (Al 99, 70%).	21
Tableau III.4	Paramètres de soudage TIG.	23
Tableau IV.1	Fiche ICDD d'aluminium 1050A.	34
Tableau IV.2	Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé non traité.	35
Tableau IV.3	Résultats de la microdureté des échantillons (non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C).	39



Introduction générale



Introduction générale

L'aluminium et ces alliages jouent un rôle important dans l'industrie, ils occupent la deuxième place dans la construction de différentes pièces après le fer. Ils sont utilisés dans l'industrie automobile et aéronautique du fait de leur bon compromis densité/propriétés mécaniques (une faible densité d'aluminium et très bonnes propriétés mécaniques). Ces alliages sont naturellement bien estimés pour les applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées pour lesquelles le prix n'est pas le seul argument déterminant.

De nombreuses industries réalisent des assemblages d'éléments métalliques par soudage (chaudronnerie, menuiserie métallique, constructions navale, et automobile,...). Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. [1]

De nombreuses recherches se sont focalisées sur l'amélioration des procédés de soudage et l'innovation de nouvelles techniques pour élargir son application dans les différents domaines d'industries. Le procédé conventionnel TIG est mieux classé pour le soudage de l'aluminium et ses alliages et il a la particularité d'assembler des pièces à faible épaisseurs de 0.5 à 3 mm.

Les traitements thermiques des métaux sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un métal de composition déterminée, les buts principalement recherchés étant l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité. [2]

Ce mémoire de Master a été réalisé dans le but d'étudier l'évolution de la microstructurale du joint soudé de l'aluminium 1050A sous l'effet de traitement thermique par recuit.

Dans ce travail nous avons utilisé différentes techniques de caractérisation telle que l'observation métallographique par microscopie optique (MO), l'analyse de diffraction des rayons X (DRX) et les mesures de la microdureté Vickers (Hv).

En plus de cette introduction générale ce mémoire est constitué de :

-Une partie théorique qui regroupe deux chapitres. Le premier chapitre concerne les généralités sur le soudage d'aluminium, un deuxième chapitre qui développe les caractéristiques et le traitement thermique de l'aluminium série 1000.

-Une partie expérimentale est constituée de deux chapitres principaux, le premier concerne les matériaux étudiés et méthodes expérimentales et le second regroupe les principaux résultats expérimentaux obtenus.

Et enfin une conclusion générale comprenant les principaux points qui découlent de cette étude.

Chapitre I:



Généralités sur le soudage d'aluminium

1.1. Définition du soudage

Le soudage se définit comme un procédé d'assemblage permanent de deux ou plusieurs pièces par fusion localisée du métal à des températures adaptées avec ou sans application de pression et avec ou sans apport de métal. [3]

Le soudage a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité physique entre les pièces à assembler est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée. [4]

1.2. Les types d'assemblage

Les assembles mécano-soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications. Selon les contraintes liées à ces applications, une distinction est faite si le métal d'apport permettant de réaliser la soudure est de nature différente de celle des pièces à assembler (soudure hétérogène) en opposition à une soudure réalisée avec un métal d'apport identique à celui des pièces à souder (soudure autogène). Différents types d'assemblages peuvent être rencontrés. Il en existe trois principaux types, ayant chacun ses particularités et répondant à des besoins bien précis : [3]

1.2.1. L'assemblage bout à bout

C'est la technique la plus courante et la plus facile à utiliser. La soudure est réalisée entre deux pièces plates disposées de façon parallèle (figure. I.1(a)). Si la soudure est réalisée sur la totalité de l'épaisseur, le terme de soudure à pénétration complète est affecté, sinon il s'agit d'une soudure à pénétration partielle. Un métal d'apport est parfois nécessaire mais les épaisseurs à souder ne peuvent dépasser 5mm. L'assemblage bout à bout peut nécessiter une préparation des bords. On parle alors de soudage bout à bout en chanfrein en X (figure. I.1(b)) ou V (figure. I.1(c)) ou à bords relevés (figure. I.1(d)) :

1.2.2. L'assemblage d'angle

Il est utilisé pour assembler deux pièces d'angle. Les pièces sont disposées à angle droit (figure. I.1(e)) ;

1.2.3. L'assemblage en recouvrement

Il est utilisé lorsque deux pièces sont placées l'une sur l'autre et se chevauchent sur une certaine distance le long du bord. La soudure peut être effectuée sur une ou deux faces. C'est la technique la plus courante pour souder des plaques d'épaisseurs différentes (figure. I.1(f)).

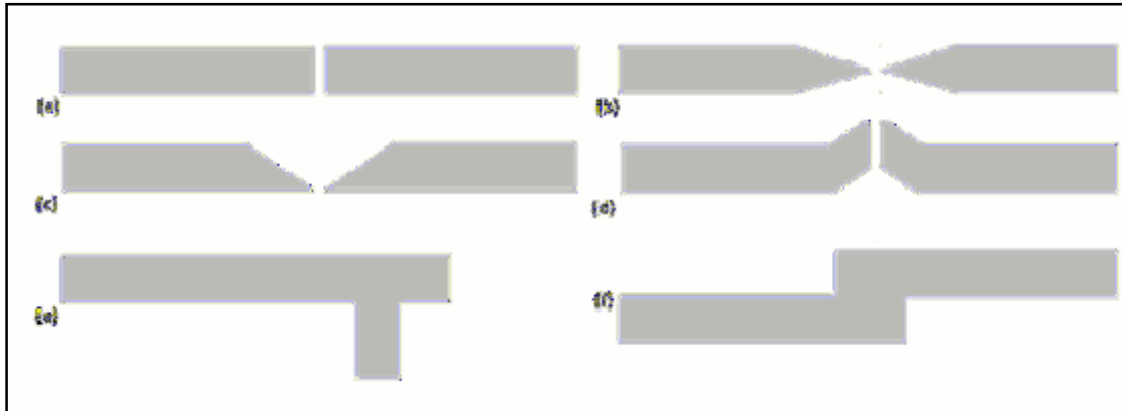


Figure I.1 : Schéma représentant les principaux types d'assemblage [3]

1.3. Caractéristiques de la soudure

1.3.1. Zone fondue (ZF)

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la participation plus ou moins importante d'un métal d'apport. Si la soudure est brute d'exécution, les grains résultant de la solidification y sont en général visibles sans grossissement. Le métal qui la constitue est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé. [5]

1.3.2. La zone affectée thermiquement (ZAT)

Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou importantes de la structure métallurgique. [6]

1.3.3. Le métal de base (MB)

Le métal de base est la partie de l'assemblage où la température n'a eu aucune influence sur les propriétés métallurgiques du matériau. Celui-ci garde les propriétés métallurgiques qu'il possédait avant le soudage. [7]

1.3.4. La zone de liaison

Cette zone située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé. [8]

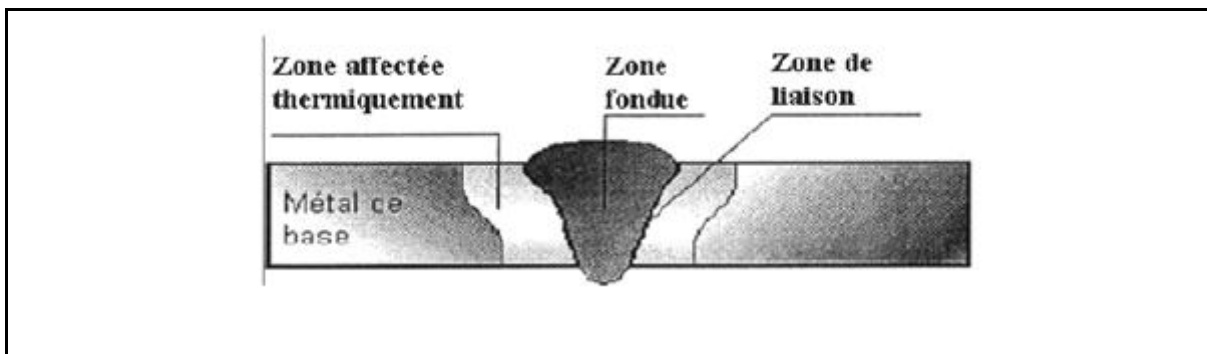


Figure I.2 : Cordon de soudure [8]

1.4. Processus de soudage

Les procédés de soudage sont classés en deux grandes familles de procédés de soudage, soit le soudage par fusion et le soudage par pression.

1.4.1. Soudage par fusion

1.4.1.1. Soudage au gaz (oxyacétylénique)

C'est l'un des procédés de soudage les plus anciens et longtemps été le plus répandu. Beaucoup moins utilisé aujourd'hui, il a toujours le triple avantage de sa polyvalence, de sa simplicité de mise en œuvre et du faible coût du matériel nécessaire. Il convient parfaitement pour les travaux de réparation ou de construction ou encore pour le soudage de tubes et de structures faits de matériaux (comme la fonte) particulièrement sujets à la fissuration, avec des parois de 0,5 à 6 mm d'épaisseur. Il est également très utilisé pour la soudure de métaux non ferreux ainsi que pour le placage ou le rechargement dur, mais aussi pour le coupage, le chauffage et le redressage à la flamme. [9]

1.4.1.2. Soudage à l'arc

2.1. Soudage à l'arc avec électrode fusible

a. Manuel metal arc (MMA)

Dans ce procédé, la chaleur nécessaire est produite par le passage du courant électrique, sous forme d'arc lumineux, entre la pièce de métal de base et l'électrode enrobée. La température de cet arc varie en général entre 4000 et 4500° C.

L'arc provoque la fusion progressive du métal de l'électrode et celle du métal de base au point où l'arc l'atteint, ainsi que le passage du métal de l'électrode sur le métal de base. [10]

b. Soudage à l'arc submergé

Le soudage sous flux en poudre est un procédé automatisé, quoiqu'on le rencontre très rarement sous forme semi-automatique. Il originerait des États-Unis et aurait été inventé aux environs de 1935-37.

On l'utilise principalement pour le soudage des "aciers" et de sections importantes, par exemple dans le cas de constructions navales, d'appareils à pression, de poutres, de tubes de gros diamètre, de réservoirs, de réacteurs nucléaires, etc. [10]

2.2. Soudage à l'arc sous protection gazeuse

a. Soudage MAG/MIG

Découvert au cours de la deuxième guerre mondiale, le développement du procédé MIG-MAG (nommé aussi Gas Metal Arc Welding, GMAW) visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

- Le procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO₂), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O₂).

- Le procédé MIG (Metal Inert Gas) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He). [11]

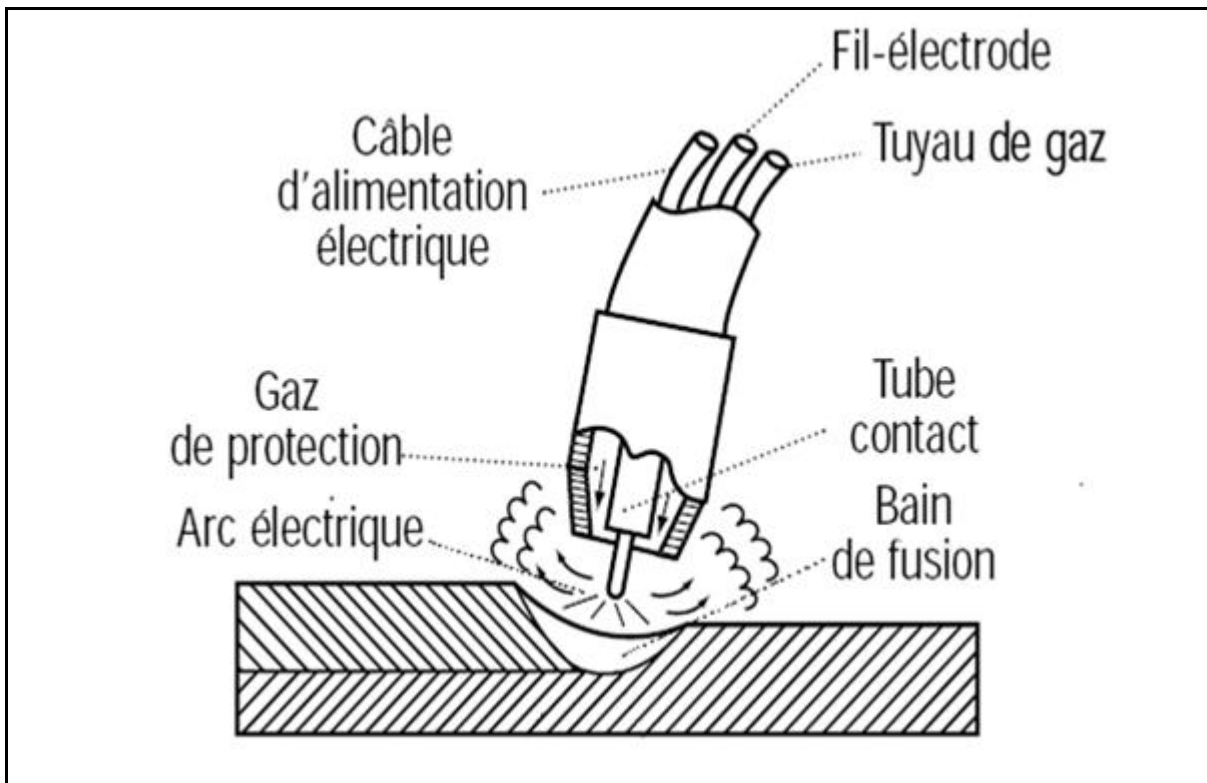


Figure I. 3 : Représentation schématique de procédé MAG/MIG [8]

b. Soudage TIG

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), également appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est à dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder.

L'électrode et le bain fondu sont protégés contre l'oxydation de l'air par un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur. Parfois un mélange Argon-Hélium est utilisé pour augmenter la pénétration du bain de fusion, l'ajout d'Hélium permettant d'augmenter la tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation plus élevé de celui-ci. L'Hydrogène, parfois présent dans le mélange gazeux, joue un rôle similaire à l'Hélium. [12]

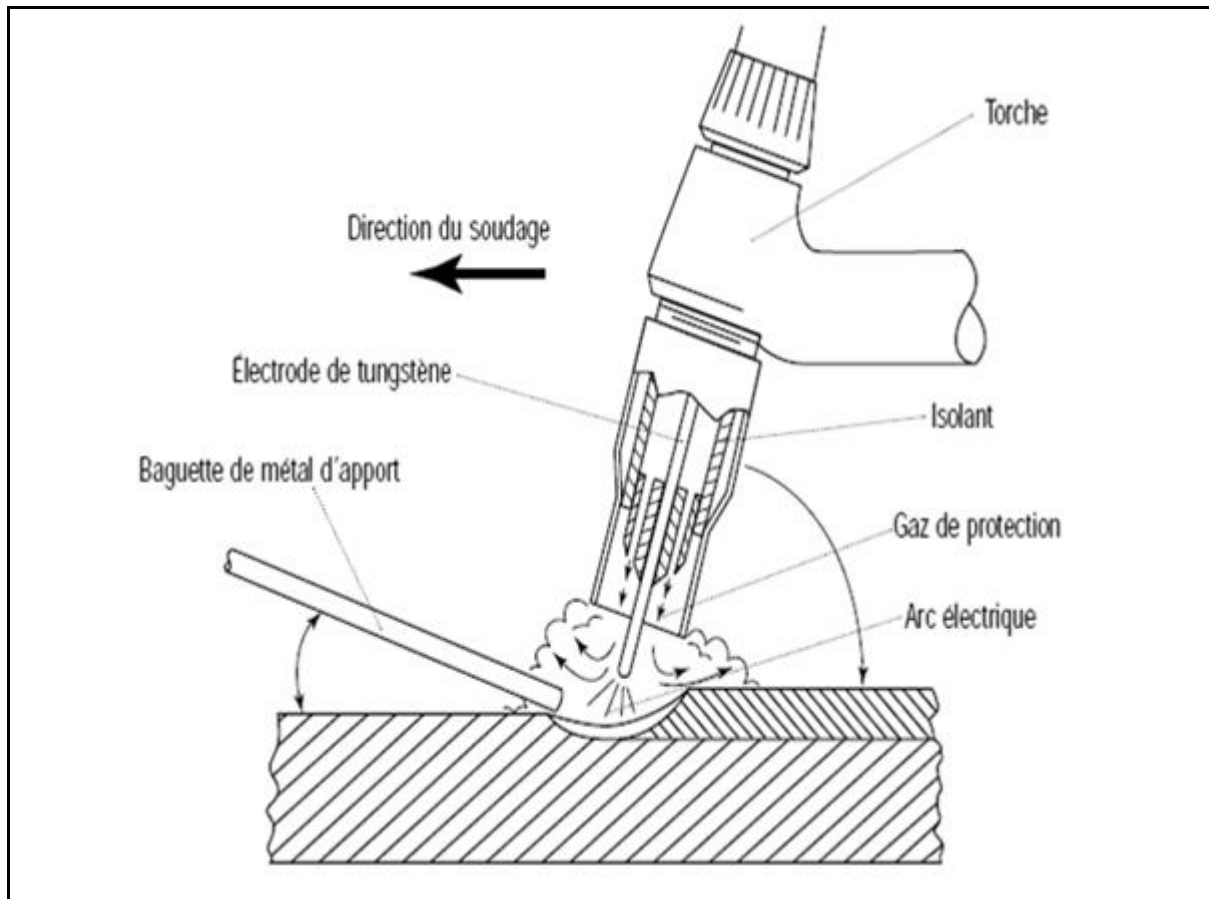


Figure I. 4 : Représentation schématique de procédé TIG [8]

c. Soudage plasma

Le procédé ressemble au soudage TIG. Une électrode en tungstène (parfois en zircon) produit un arc électrique qui ionise un gaz tel l'argon (ou un mélange argon-hydrogène). Ce gaz passe aussi à travers un orifice et est dirigé en un faisceau sur le métal de base. La zone de chaleur est étroite et bien définie. Un deuxième gaz (tel l'hélium) entoure le tout afin d'assurer la protection du bain de soudure. [10]

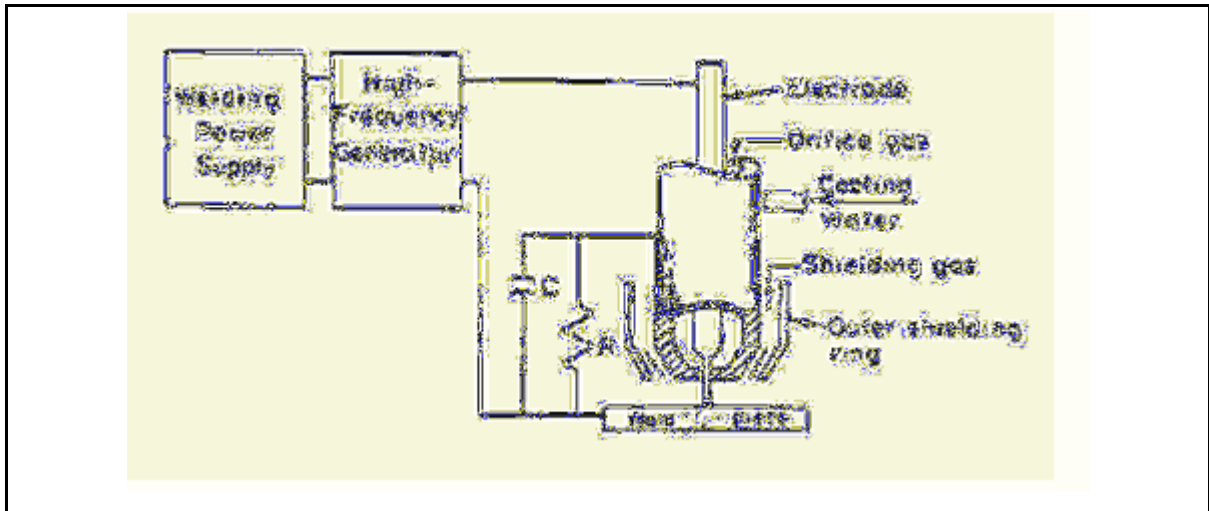


Figure I. 5 : Soudage à l'arc par jet de plasma [10]

1.4.1.3. Soudage par faisceau à haute densité d'énergie

3.1. Soudage par faisceau d'électrons

Utilise l'énergie cinétique des électrons projetés dans une enceinte sous vide et focalisés sur la pièce à souder pour créer une zone fondue.

3.2. Soudage laser

En 1916, Albert Einstein définit les lois d'émission de photons (lumière) par stimulation (pompage optique) et émet le principe de l'émission stimulée qui ouvre la porte à une nouvelle technologie: le LASER « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» soit en français l'amplification de lumière par émission stimulée de radiations.

Le faisceau laser est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde, sa puissance ainsi que par sa section. Il est généré dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement transparent et contenant un milieu actif, dit lasant, généralement solide ou gazeux. Le milieu actif est excité par une source d'énergie qui induit dans la cavité une émission stimulée. [13]

1.4.2. Soudage par pression

Dans toutes les variantes du soudage par pression, les pièces à souder sont pressées l'une contre l'autre. Le forgeage traditionnel peut être considéré comme une forme de soudage par pression consistant à chauffer au rouge le métal dans un feu de forge afin de l'assouplir et de pouvoir le forger. Dans certains cas les pièces à assembler sont chauffées

jusqu'à leur point de fusion alors que, dans d'autres, la soudure se fait sans apport de chaleur. [9]

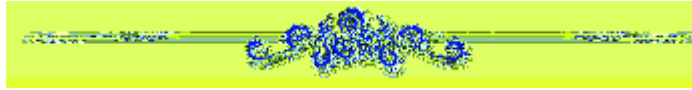
On distingue généralement huit types de soudages par pression :

- Soudage par résistance (par points, à la molette, par bossages, bout à bout par résistance, étincelage) ;
- Soudage par friction (par rotation, par friction-malaxage, par friction de surface) ;
- Soudage haute fréquence ;
- Soudage par ultrasons ;
- Soudage par explosion ;
- Soudage par impulsion magnétique ;
- Soudage par pression à froid ;
- Soudage par diffusion.

1.5. Paramètres influents sur la soudure

- La vitesse de soudage (avance du soudeur)
- Le choix et le débit du gaz
- Le choix et le débit du métal d'apport
- Le choix, l'affutage et le diamètre de l'électrode réfractaire
- La position de soudage
- La préparation
- La dimension et la nature des matériaux à souder. [14]

Chapitre II:



*Caractéristiques et traitement thermique
de l'aluminium série 1000*

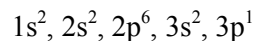
II.1. L'aluminium

L'aluminium est certes connu pour ses propriétés physico-chimiques exceptionnelles. Mais ces dernières sont reliées à plusieurs facteurs comme : la composition chimique, le procédé de fabrication, les traitements thermiques...etc. pour la composition chimique et les impuretés chimiques influent sur ses caractéristiques physico-chimiques. Aussi un traitement thermomécanique de l'aluminium modifie considérablement la forme et la distribution de ces constituants par exemple les particules intermétalliques à l'échelle microscopique et la densité des défauts ponctuels et linéaire à l'échelle nanométrique. [15]

II.2. La vue chimique d'aluminium

II.2.1. Structure atomique

L'aluminium, symbole chimique **Al**, a pour numéro atomique $Z = 13$ lequel correspondant à 13 électrons répartis sur les couches orbitales (s) et (p) de la manière suivante :



L'aluminium appartient au groupe IIIa du « tableau de la classification périodique des éléments ». Il a pour valence (unique) 3 et masse molaire 27 g/mole. [16]

II.2.2. Structure cristalline

L'aluminium est extrait de la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine (Al_2O_3). Il peut également être extrait d'autres minéraux : néphéline, leucite, sillimanite, andalousite, muscovite. Il cristallise dans le réseau c.f.c (figure II.1), et son paramètre de maille est de 0,404 nm comme indiqué dans la figure II.1. [17]

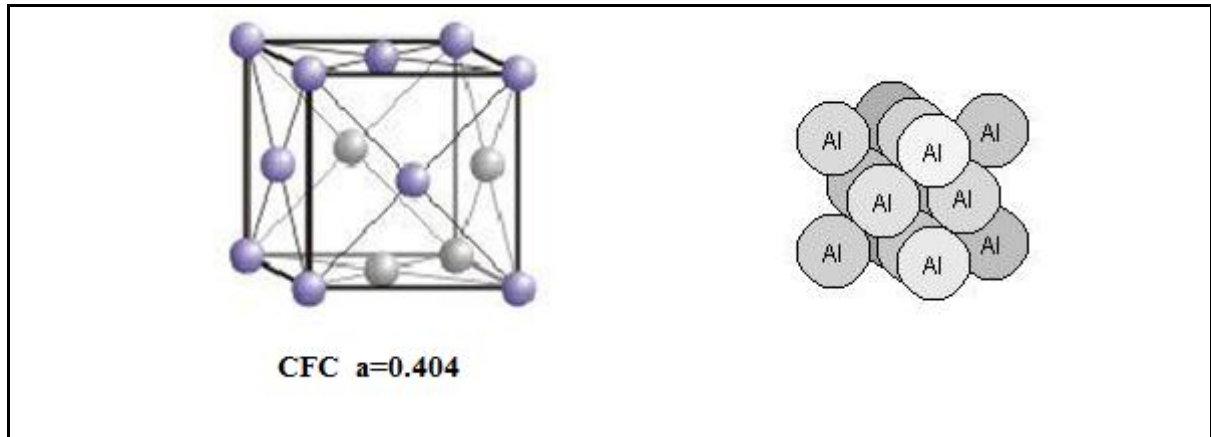


Figure II.1 : Structure cristalline « cubique à face centrée » de l'aluminium. [17,18]

II.3. Propriétés de l'aluminium

Les propriétés indiquées sont généralement celles de l'aluminium non allié dont le degré de pureté est de 99,99 %.

- Paramètre de maille : 0.404 nm à 298 K
- Masse volumique à 25 °C : 2698.7 kg/m³
- Point de fusion : 660 °C
- Coefficient de dilatation moyen entre 20 et 300 °C : $2.55.10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
- Retrait volumique : 5.6 % en cours de solidification
- Capacité thermique massique à 20 °C : $c=950 \text{ J.kg}^{-1} .\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda=217.6 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique à 20°C : $\rho=2.63 \mu\Omega.\text{cm}$. [17]

II.4. Aspects métallurgiques de l'aluminium

L'aluminium est un métal extrêmement ductile (A % jusqu'à 70 % pour l'aluminium pur à 99,99 % à l'état recristallisé). Cependant, l'intérêt suscité par la légèreté de ce métal a conduit les métallurgistes à développer des alliages d'aluminium plus résistants. Ces alliages sont classés en deux grandes familles ; les alliages de corroyage (ou de forgeage) et les alliages de fonderie (ou de moulage). [15]

Le (Tableau II.2) ci-dessous résume les principales propriétés mécaniques de l'aluminium.

Propriétés mécaniques de l'aluminium	
Module d'élasticité (MPa)	68000
Charge de rupture (MPa)	80-100
Limite d'élasticité 0.2% (Mpa)	30-40
Allongement à la rupture AR (%)	25-30

Tableau II.1: Propriétés mécaniques de l'aluminium. [15]

II.5. Les alliages d'aluminium

L'aluminium, dont les propriétés mécaniques sont faibles lorsqu'il est pur, est utilisé allié à d'autres métaux. Un alliage est constitué de trois types d'éléments : les éléments d'alliages, qui définissent sa famille ; les éléments d'additions, qui modifient certaines propriétés particulières; et les éléments d'impuretés, dont la présence n'est pas désirée, mais qui sont naturellement présentes dans le minerai de base (la bauxite) ou qui proviennent du mode d'élaboration (Fe, Si, Cu).

Les éléments d'alliage principalement rencontrés sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Ces alliages sont classés en familles selon les éléments principaux ajoutés (voir tableau II.2) et permettent d'atteindre des valeurs très variables de propriétés mécaniques. [19]

Famille	Eléments d'alliage
1000	Aucun
2000	Cuivre
3000	Manganèse
4000	Silicium
5000	Magnésium
6000	Magnésium et Silicium
7000	Zinc + Magnésium
8000	Autres éléments

Tableau II.2 : Désignation des alliages d'aluminium. [19]

II.5.1. Alliages aluminium-cuivre de la série 2000

Les alliages de la série 2000, dans lesquels le cuivre est l'élément d'alliage principal, sont moins résistants à la corrosion que des alliages d'autres séries, qui contiennent des quantités de cuivre très inférieures. Des alliages de ce type sont employés dans des applications structurales, en particulier dans l'aéronautique et les applications aérospatiales. [20]

II.5.2. Alliages aluminium-manganèse de la série 3000

L'addition de 0,8 à 1,5 % manganèse dans l'aluminium a pour effet d'augmenter légèrement les caractéristiques mécaniques.

Les alliages de cette famille présentent une bonne résistance à la corrosion atmosphérique, ce qui explique leur développement dans le bâtiment, les échangeurs tubulaires, les échangeurs brasés pour l'automobile et comme ailettes dans les échangeurs liquide/air. [16]

II.5.3. Alliages aluminium-silicium de la série 4000

Les alliages de la série 4000 n'ont pas le poids industriel des alliages des séries 1000, 2000, 3000, 5000, 6000 et 7000. Il apparaît cependant nécessaire de mentionner ceux qui reçoivent des applications industrielles significatives. [21]

II.5.4. Alliages aluminium-magnésium de la série 5000

Les alliages aluminium-magnésium constituent une famille importante et variée d'alliages industriels. Ces alliages présentent : [20]

- une bonne aptitude au soudage, à l'exception des alliages titrant entre 1,8 et 2,2 % de magnésium. La résistance mécanique d'un joint soudé est sensiblement égale à celle mesurée en pleine tôle à l'état recuit.
- un bon comportement aux basses températures.
- une excellente résistance à la corrosion, qu'ils soient soudés ou non. Leur tenue à la corrosion en milieu marin en a fait les alliages « marine » par excellence.
- une aptitude aux traitements de surface. Brillantage ou anodisation leur confèrent de très beaux aspects de surface, surtout si l'alliage est élaboré à partir d'une base faiblement chargée en fer et silicium, ce qui est le cas du 5657 (base 1080).

II.5.5. Alliages aluminium- magnésium -silicium de la série 6000

La série 6000 contient des additions de magnésium et de silicium et parfois un peu de cuivre, de chrome ou de manganèse. Les alliages sont faits pour obtenir les plus grands niveaux de résistance par la précipitation de la phase Mg₂Si.

Les alliages Al-Mg-Si sont performants aux basses températures mais leurs propriétés mécaniques et électriques peuvent diminuer plus ou moins rapidement lorsque la température atteint des valeurs de l'ordre de 150 à 200°C du fait de l'évolution de la microstructure. L'utilisation des alliages de la série 6000 dans les câbles électriques. [22]

II.5.6. Alliages aluminium-zinc de la série 7000

Les alliages aluminium-zinc comprennent différentes sous-familles mais la principale est constituée par les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu. [22]

II.5.7. Alliages d'aluminium de la série 8000

Ces alliages, qui correspondent à ceux qui du point de vue composition n'entrent dans aucune des séries précédentes, comprennent différentes sous-familles à propriétés bien spécifiques. [18]

II.6. L'Aluminium non allié série 1000

Cette série concerne en fait les produits à base d'aluminium pratiquement pur. Ils contiennent toutefois des impuretés résiduelles et le troisième chiffre de la numérotation indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 %. Par exemple un alliage 1050 contiendra 99.5 % d'aluminium.

Ces alliages sont utilisés dans de nombreuses applications relevant souvent de la grande consommation, comme des échangeurs, des cuves, du bardage pour bâtiment, du matériel ménager ou des produits d'emballage. [23]

II.6.1. Caractéristique de l'aluminium non allié

L'aluminium le plus couramment utilisée est de nuance (1199) obtenu généralement soit par raffinage électrolytique, soit par ségrégation (purification par cristallisation fractionnée).

L'aluminium pur est caractérisé par une excellente aptitude à la déformation plastique, un excellent comportement aux agents atmosphériques et l'environnement marin et surtout par la possibilité d'obtenir de très beaux états de surface après brillantage et anodisation, d'où ses applications dans la décoration, la bijouterie, les réflecteurs. L'application principale (70 % de la production) de l'aluminium raffiné avec un degré de pureté compris entre 99,99 et 99,999% réside dans la fabrication des condensateurs électrolytiques. [24]

II.6.2. Les différentes nuances d'aluminium famille 1000

L'aluminium pur est utilisé dans plusieurs domaines tels que la décoration, l'industrie alimentaires et chimiques et souvent comme fils de conduction électrique, et les différentes nuances de l'aluminium pur sont : [15]

II.6.2.1. L'aluminium 1080 A ($Al \geq 99.80 \%$)

Ce matériau possède une bonne aptitude, de très beaux états de surface après brillantage et anodisation et une très bonne résistance à la corrosion, il a de nombreuses applications dans les domaines de la décoration, des industries alimentaires et chimiques.

II.6.2.2. L'aluminium 1050 A ($Al \geq 99.50 \%$)

Celui-ci très utilisé dans des applications variées dans les domaines : du bâtiment, de l'industrie chimique et alimentaire, mécanique, l'emballage du matériel ménagé. [21]

II.6.2.3. L'aluminium 1070 A ($Al \geq 99.70 \%$)

Ce matériau possède des propriétés proches à celles des nuances 1080 A et 1050 A

II.6.2.4. Les aluminiums 1100 et 1200 ($Al \geq 99.00 \%$)

Ces matériaux remplacent le 1050 A chaque fois que leur plasticité est suffisante et que leur aspect de surface est compatible avec une application donnée.

L'utilisation intensive de l'aluminium dans la fabrication des conducteurs électriques est essentiellement due à l'association exceptionnelle :

- D'une conductivité électrique élevée.
- D'une faible densité

C'est pour cette raison qu'il y a eu plusieurs nuances de conducteurs en aluminium 1370, 1350, 1310, 1340, 1110, 1385, et 1190 ...etc. [21]

II.6.2.5. L'aluminium 1370

Celui-ci est le plus couramment utilisé comme fils pour les câbles nus aériens (câbles homogènes ou câbles mixtes aluminium-acier

II.6.2.6. L'aluminium 1350

Cette nuance est réservée à la fabrication des fils tréfilés à l'état H16 (3/4 dur) pour câbles isolés de transport d'énergie électrique.

II.6.2.7. L'aluminium 1310

Celui-ci est caractérisé par les additions de magnésium (0.08 à 0.25 %) et du fer à des teneurs élevée mais contrôlée (0,50 à 0,80 %) a été spécialement mis au point pour la fabrication :

- Des fils pour câbles souples isolés en automobile, électroménager, aéronautique, marine, soudage.
- Des fils pour câbles téléphoniques de réseau urbain (diamètre 0.5 à 0.8 mm)

II.6.2.8. L'aluminium 1340

Celui-ci ne se différencie du 1310 que par l'absence de magnésium et est réservé à la fabrication des fils émaillés pour le bobinage, mais peut être utilisé pour les câbles souples et les câbles téléphoniques. [15]

II.6.2.9. L'aluminium 1110 ($Al \geq 99,10\%$)

Celui-ci est utilisé pour la fabrication de fils fins de diamètres inférieurs à 0.7mm

2.6.2.10. L'aluminium 1358 ($Al \geq 99,85\%$)

Ce matériau est utilisé pour la fabrication des conducteurs isolés.

II.6.2.11. L'aluminium 1190 ($Al \geq 99,90\%$)

Celui-ci est utilisé pour la fabrication des fils exigeant une très bonne conductivité (par exemple, fils pour connexion électronique)

II.6.2.12. Aluminiums ultra-purs (entre 99,999 et 99.9995, voir 99,9999 %)

Ces matériaux peuvent être obtenus par une purification supplémentaire par fusion de zone.

Les applications de l'aluminium ultra pur concernent la microélectronique (circuits intégrés) et exigent un contrôle sévère de certaines impuretés, ces types d'aluminium sont actuellement commercialisés avec des teneurs en uranium et thorium <100 parties par trillion (tolérances exigées car impuretés sont susceptibles de créer des erreurs de logiciels dans les mémoires à haute capacité). [15]

II.7. Traitements thermiques d'aluminium et leurs alliages

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : la trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement.

Où les alliages d'aluminium subissent un durcissement structural, a partir du dernier traitement qui est très important et très spécifique.

II.7.1. Traitements d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450 à 610°C, qui ont pour but général de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide. [25]

II.7.2. Traitements d'adoucissement

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans les cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium.

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

II.7.2.1. Le traitement de restauration : est effectué à 200-300 °C pendant une à 8 heures; la structure ne se modifie pas, pourtant les caractéristiques mécaniques évoluent d'autant plus que la température est plus élevée et le temps de maintien est plus long. Au niveau atomique il n'y a qu'une réorganisation des dislocations engendrées par l'écrouissage : certains s'annihilent, d'autre se réarrangent au joints et sous joints de grains d'où la malléabilité de l'alliage.

II.7.2.2. Le traitement de recristallisation : est effectué à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures, les atomes se regroupent suivant des nouvelles directions pour former un petit cristal d'orientation quelconque. Avec le temps de nouveaux atomes viennent s'agglutiner autour du petit cristal jusqu'à ce que les nouveaux grains se rejoignent pour donner la structure macrographique de recristallisation primaire. Si l'on augmente la température ou la durée de maintien, on obtient des structure de recristallisation secondaire à très gros grains. Au contraire, Si l'on stoppe ce traitement de recuit par un temps trop court, on obtient des états partiellement recristallisés. [25]

II.7.3. Traitements de trempe structurale

Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend une mise en solution solide suivie:

- d'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide existant à des températures plus élevées;
- d'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (=maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage. [25]

Chapitre III:



*Les matériaux étudiés et méthodes
expérimentales*

III.1. Préparation des échantillons

III.1.1. Le choix des métaux de base et d'apport :

a) Le métal de base :

Le métal de base utilisé dans notre travail est sous forme de tôles d'une épaisseur de 1,6 mm. Il nous a été fourni par la société Algérienne ENIEM (ENTREPRISE NATIONALE DES INDUSTRIES DE ELECTROMENAGER) à Tizi Ouzou, atelier d'assemblage, unité froid, sous forme des tôles d'aluminium où elles sont utilisées pour les parois d'évaporateur des réfrigérateurs électriques

❖ Identification du métal de base

La nuance de métal de base est du type alliage 1050A. C'est un aluminium pur industriel d'une pureté de 99,50%, alors l'élément de constitution de base est l'aluminium d'un réseau cristallin d'atomes d'Al cubique à faces centrées. Des impuretés (fer, silicium...) sont également présentes en faible quantité massique.

❖ Composition chimique :

La composition chimique du métal de base elle est présentée dans le tableau III.1 :

Éléments	(% mass)
Al	99,5
Si	0,3
Fe	0,4
Cu	0,05
Zn	0,07
Ti	0,05
Autres	0,03

Tableau III.1 : la composition chimique du métal de base

Fournies par la société ENIEM. [26]

❖ *Caractéristiques mécaniques :*

Le tableau III.2 présente les principales caractéristiques mécaniques de métal de base.

Propriétés	Critères
résistance à la traction Rm	min. 110N/mm ²
	max. 150N/mm ²
limite élastique Rp 0.2	min. 90N/mm ²
Allongement A5 A10	min. 6%
	min. 4%
Dureté Brinell (HB) 2.5/62.5	35

Tableau III.2 : Les caractéristiques mécaniques du métal de base

Fournies par la société ENIEM. [26]

b) *Le métal d'apport*

Le métal d'apport est sous forme de barres d'aluminium du type alliage 1070A, d'un diamètre de 2,4 mm et une longueur d'un mètre, utilisé au niveau de la société ENIEM pour l'assemblage par soudage TIG de l'évaporateur et du tube de jonction.

❖ *Composition chimique*

Le tableau III.2 présente la composition chimique du métal d'apport

Eléments	% mass.
Al	99,7
Si	<0,2
Fe	<0,25
Cu	<0,04
Mn	<0,03
Zn	<0,04
Ti	<0,03
Mg	<0,03
Autres	<0,03

Tableau III. 3: Composition chimique du métal d'apport (Al99, 70%)

Fournie par ENIEM. [26]

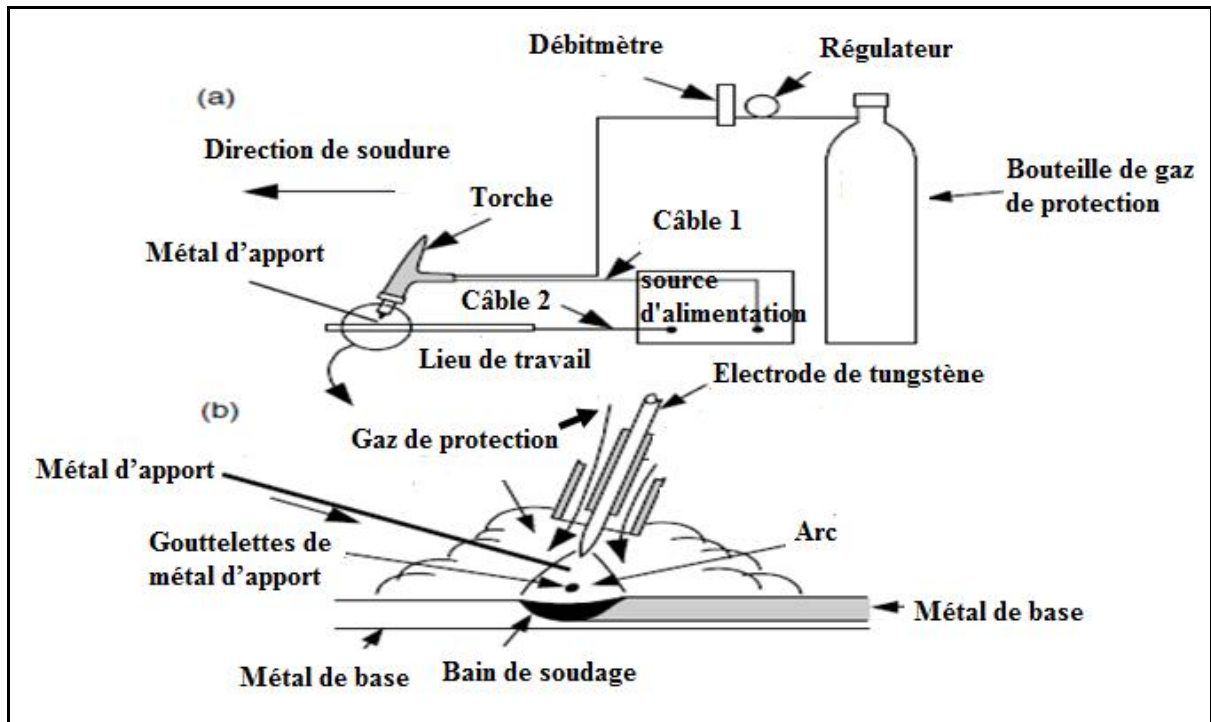
❖ *Caractéristiques physiques du métal d'apport*

Les caractéristiques physiques du métal d'apport sont les suivantes:

Resistance à la traction :	> 7,5 Kgf/ mm ²
Essai de pliage	-Absence de fente > 3mm
	- Et autres défauts.

III.1.2. Le procédé de soudage

Le procédé de soudage utilisé dans notre travail est le soudage bord à bord TIG. Le soudage à l'arc au Tungsten Inert Gas (TIG) est un processus qui fond et qui rejoint les métaux en les chauffant avec un arc établi entre une électrode de tungstène non consommable, comme le montre la *Figure III.1*. La torche qui maintient l'électrode de tungstène est contactée à une bouteille de gaz de protection ainsi qu'à une borne de la source d'alimentation, comme le montre la *figure III.1a*. L'électrode de tungstène est généralement en contact avec un tube de cuivre refroidi à l'eau, appelé tube de contact, comme le montre la *figure III.1b*, qui est reliée au câble de soudage (câble 1) de la borne. Cela permet à la fois le courant de soudage provenant de la source d'alimentation d'entrer dans l'électrode et l'électrode à refroidir pour éviter une surchauffe. La pièce à usiner est reliée à l'autre borne de la source d'alimentation par un câble différent (câble 2). Le gaz de protection passe par le corps de la torche et est dirigé vers le bain de soudage pour le protéger de l'air. La protection contre l'air est bien meilleure dans le TIG car un gaz inerte tel que l'argon ou l'hélium est habituellement utilisé comme gaz de protection. [27]



*Figure III.1 : Soudage Tungsten Inert Gas (TIG): a) processus global;
b) zone de soudage. [27]*

Les paramètres de soudage résumés dans le tableau 3.4 :

Paramètres	Conditions
Distance électrode - coupon (mm)	3
Gaz de protection	100% Ar
Débit torche (l/min)	10
Intensité CA (A)	100
Voltage (V)	380
Fréquence (Hz)	50
Vitesses de soudage (mm/s)	5.5
Diamètre de l'électrode (mm)	1.6

Tableau III. 4 : Paramètres de soudage TIG.

III.2. Préparation des joints soudés

III.2.1. Traitement thermique

Les matériaux en étude sont des joints d'aluminium soudés par TIG non traités; c'est l'état initial et des joints l'aluminium soudés traités pendant 4 heures à 250°C et 300 °C en suite refroidis à l'air libre.

III.2.2. Polissage mécanique

Après une opération de découpage utilisant de l'eau de robinet comme lubrifiant, nous avons préparé des échantillons de joint soudé de dimension 20 x 6 mm, dont l'épaisseur est environ de 0.6 mm.

Les faces de ces échantillons soudés ont été polies aux disques abrasifs de granulométries (grades 120, 240, 320, 600, 800, 1000,1200) avec lubrification à l'eau et une vitesse de 160 tours / min, dans le but d'obtenir des faces miroir. A la fin, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés.



Figure III.2 : Polisseuse type FORCIPOL 2V

III.2.3. Attaque chimique

Après polissage, les échantillons soudés sont attaqués chimiquement par réactif de Poulton:

- 12 ml d'Acide chlorhydrique (HCl concentré).
- 6 ml d'Acide nitrique (HNO₃).
- 1 ml d'Acide fluorhydrique (HF 48%).
- 1 ml d'Eau distillée (H₂O).

Les échantillons sont plongés environs 15 secondes dans la solution.

III.3. Méthodes expérimentaux

III.3.1. MO (Microscope optique)

L'utilisation du microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons. [28]

Les observations métallographiques sont effectuées sur un microscope optique de marque Hund WETZLAR, avec différents grossissements. Les micrographies observées sont obtenues à l'aide d'un appareil photos numérique monté sur le microscope.

Cette technique nous permet de caractériser et de suivre l'évolution structurale du joint soudé d'une zone à une autre



Figure III.3 : Microscope optique de type Hund WETZLAR.

III.3.1. DRX (Diffraction des Rayons X)

La technique d'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée.

Les analyses ont été menées à l'aide d'un dispositif de diffraction avec data bases réalisées par ICDD. Ces acquisitions ont été réalisées sur les faces longitudinale et transversale des éprouvettes de joint soudé d'aluminium pur commercial (Al 99, 50%) pour chaque zone MB, ZAT et ZF. [14]

Dans notre étude, nous avons utilisé un diffractomètre de type BRUKER D8 ADVANCE. L'intervalle angulaire qu'il permet de mesurer s'étend de 10° à 120° sur l'échelle 2θ .

Le rayonnement X est produit par une anticathode en cuivre dont les raies $K\alpha_1$ (1.5406 Å). Les paramètres d'alimentation du tube sont: $V= 40$ kV et $I = 30$ mA.



Figure III.4: Diffractomètre de type Bruker D8 Advance.

III.3.3. Mesures de microdureté

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur.

Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère tractif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé.

Plusieurs types d'essais sont couramment utilisés, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme de pénétrateur utilisé : essai Brinell, essai Rockwell, essai Shore et l'essai Vickers. [29]

❖ Essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue (figure III.4). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur. [30]

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. En choisissant la force donnant une empreinte telle que la diagonale d doit être inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. [31]

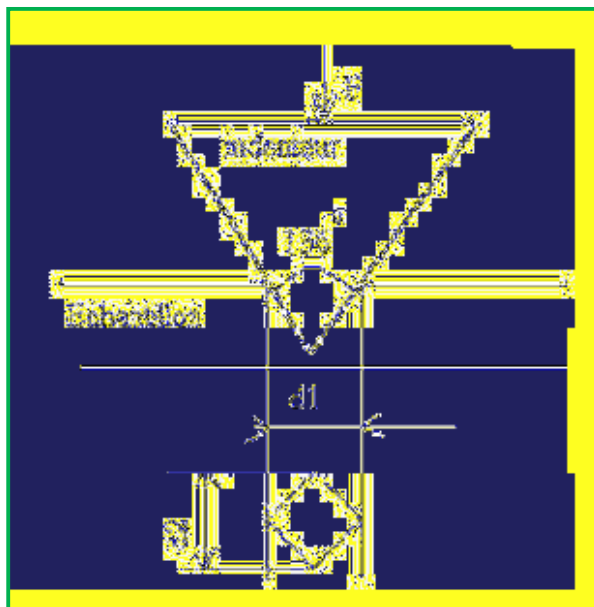


Figure III.5: Principe de dureté Vickers. [30]

Dans l'essai Vickers (Smith et Sandland 1925), une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers H_v [32] est définie par :

$$H_v = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{la surface de l'empreinte}}$$

Les mesures de microdureté ont été effectuées sur un microduromètre de pénétration Vickers. Nous avons réalisé des mesures avec une charge de 50g appliquée pendant d'environ 07secondes, pour les différents temps de recuit et pour chaque zone (MB, ZAT, ZF),



Figure III.6: Microduromètre de pénétration Vickers

Chapitre IV:



Résultats et discussions

IV.1. Etude microstructurale des joints soudés par microscope optique (MO)

On note que le refroidissement des échantillons après les traitements thermiques a été fait à l'air libre.

IV.1.1. Métal de base (MB)

L'observation métallographique du métal de base de joints soudés non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C par la microscope optique (MO) présente dans la figure IV.1

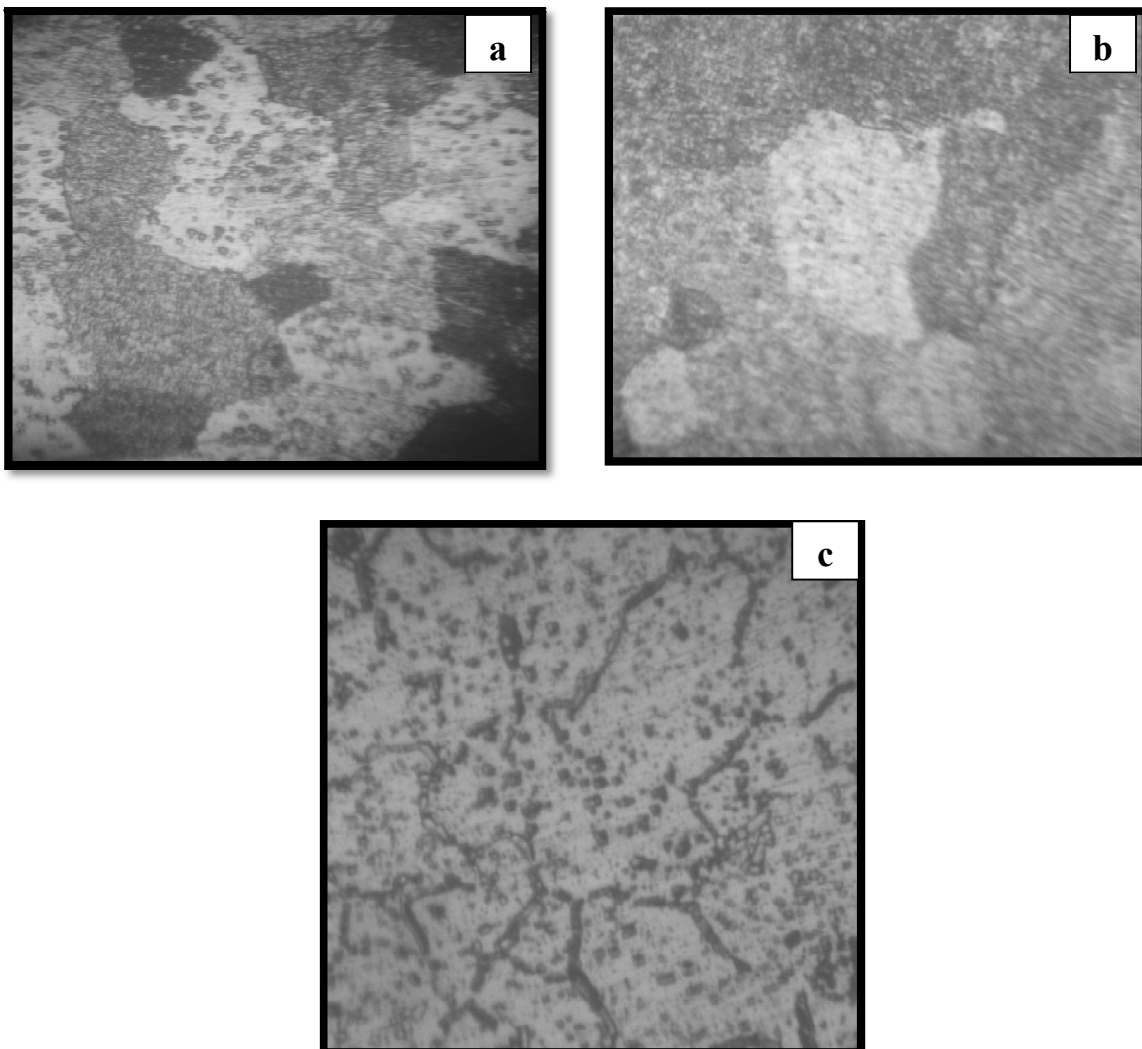


Figure IV.1 : Micrographies optiques du métal de base de joints soudés :a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c)300 °C, X16 zoom 4.

On observe dans les trois cas (non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C) (*Fig IV.2*):

- ✓ Structure homogène.
- ✓ Distribution des grains uniforme.
- ✓ Des joints de grain apparents.
- ✓ Une forme polygonale.
- ✓ Des particules rondes d'une taille remarquable, réparties d'une façon aléatoire à l'intérieur des grains et sur les joints des grains [33] :
 - particules de forme ronde et d'une taille remarquable.
 - particules en forme de tache sombre, d'une taille de quelques microns.
 - particules intermétalliques situées aux joints de grain.

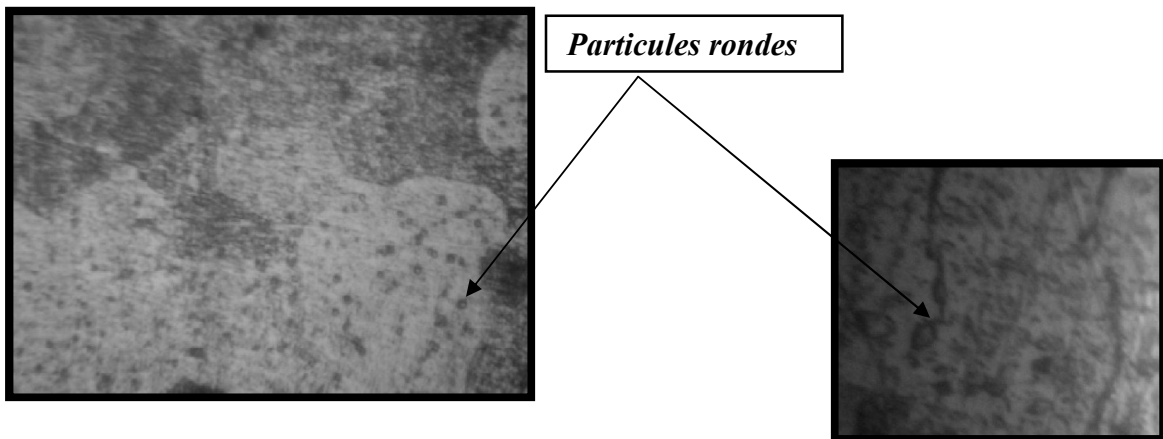


Figure IV.2 : Micrographie optique des particules intermétalliques.

On remarque aussi un grossissement des grains dans les cas traités à 250 et 300 °C (*Fig IV.2. b et c*), cela est expliqué par l'effet du traitement thermique sur la taille des grains.

IV.1.2. Zone affectée thermiquement (ZAT)

L'observation métallographique montre dans les trois cas (*Fig IV.2*) :

- ✓ Structure homogène d'une forme équiaxe de grain.
- ✓ Une structure grossière en comparaison avec celle du métal de base.
- ✓ Une répartition aléatoire des particules à l'intérieur des grains et sur les joints des grains.

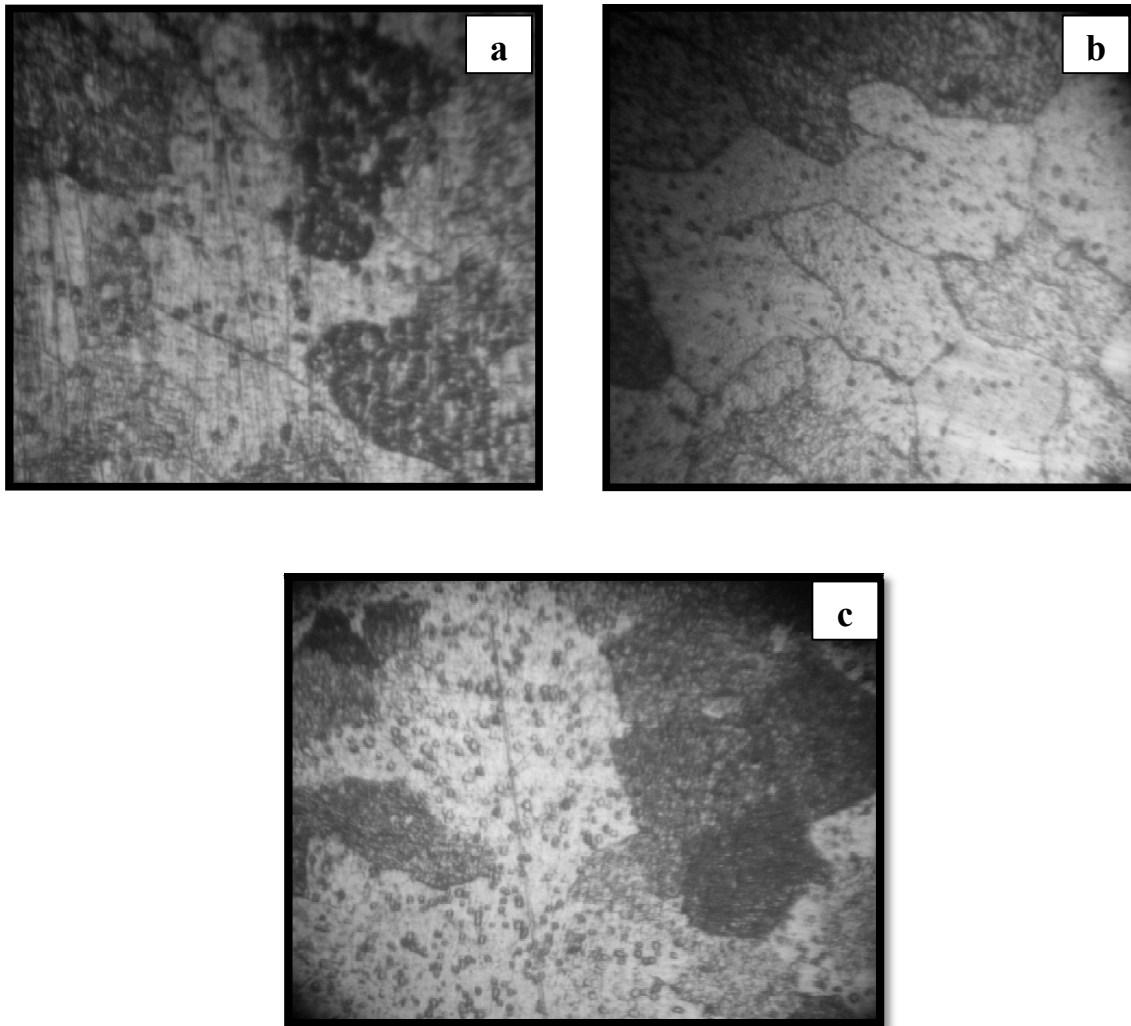


Figure IV.3 : Micrographies optiques de la zone affectée thermiquement de joints soudés :a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c) 300 °C, X16 zoom 4.

Les micrographies des cas traités à 250 et 300 °C, montre un grossissement dans la taille des grains par rapport à l'état initial, ce qui est résultat de recuit.

IV.1.3. Zone fondue (ZF)

On observe dans les trois cas (*Fig IV.3*) :

- ✓ De grains allongés de grande taille et orientés vers le centre de la soudure avec une longueur qui varie entre 800 μm et 1200 μm et une largeur moyenne de 100 μm
- ✓ Forme de grains fins et colonnaires

Cette dernière morphologie est due à l'opération de soudage et la vitesse de refroidissement du bain de fusion. [34]

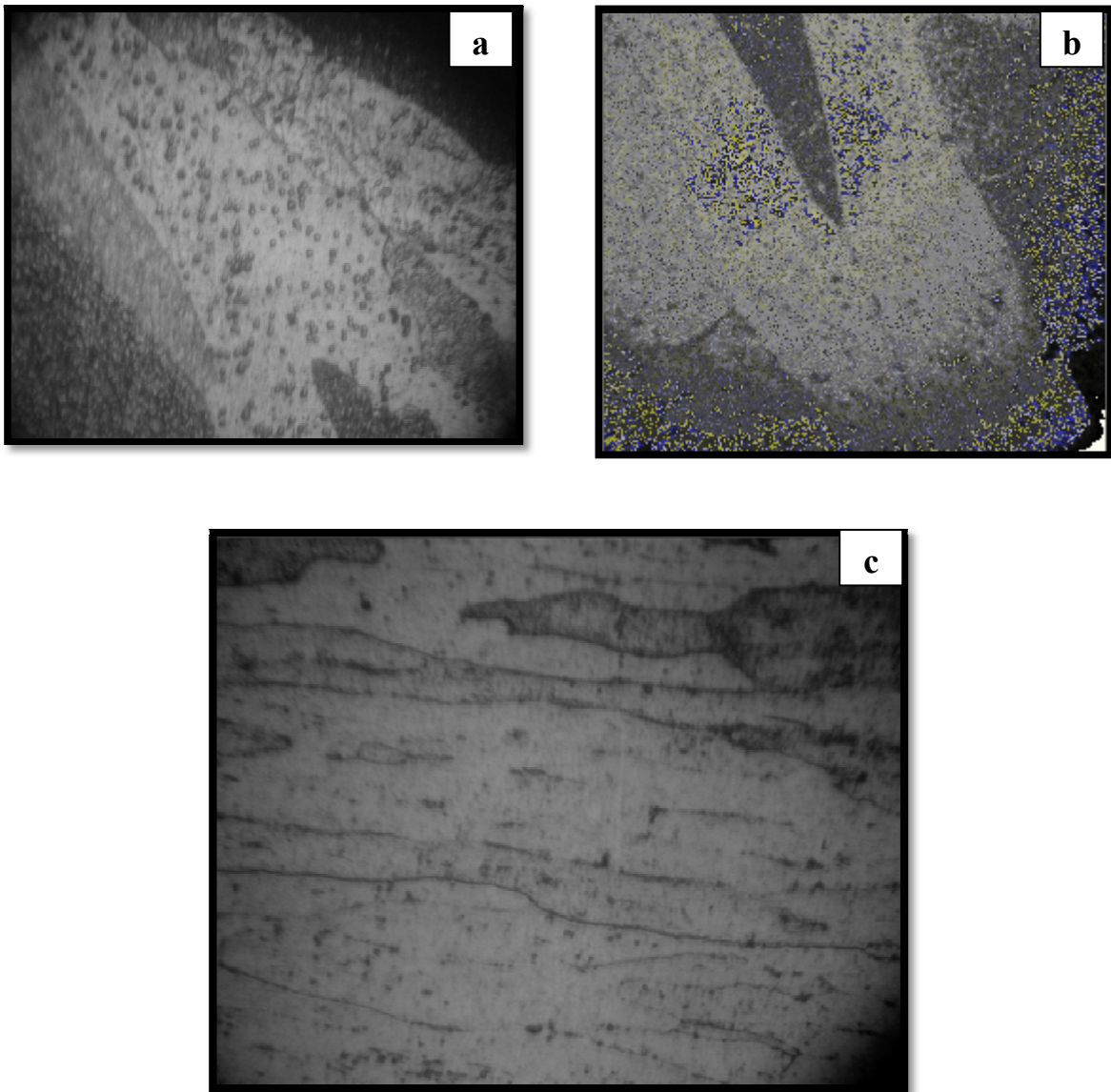


Figure IV. 4 : Micrographies optiques de la zone fondue de joints soudés : a) non traité, traité pendant 4 heures à : b) 250 °C et c) 300 °C, X16 zoom 4.

On observe après le traitement thermique la présence des particules intermétalliques distribuées de façon aléatoire à l'intérieur des grains et des particules intracellulaires dans les joints de grain.

La combinaison avec les impuretés conduit à la formation de différents types de phases intermétalliques à cause de l'insolubilité de quelques impuretés dans la matrice d'aluminium 1050A, essentiellement le Fer, car la présence de moins de 0,05% en masse du Fer dans l'aluminium et ces alliages. [35,36] conduit à la formation de :

- ✓ Phase stable Al_3Fe ,

- ✓ Des phases métastables Al_xFe_y (Al_6Fe , Al_2Fe_9) et enrichies en silicium $\alpha\text{-Al-Fe-Si}$, βAlFeSi , Al_3FeSi , Al_4FeSi_2 .

La couleur des grains différencié entre le gris, le noir et le sombre est observée dans les trois zones de notre échantillon. Cette différence est utilisée pour confirmer la présence de plus d'une seule phase. [37]

Cette microstructure indique une distribution homogène sur sa surface d'un film passif et protecteur d'alumine amorphe Al_2O_3 . [38]

IV.2. Etude par diffraction des rayons X

IV.2.1. L'état non traité

a) Les spectres de DRX

On observe dans les spectres de diffraction des rayons X des trois zones du joint soudé d'aluminium 1050A à l'état initial (Fig IV.5) :

- ✓ Présentent les mêmes pics de la matrice α - aluminium 1050A.
- ✓ Une interphase Al_2Fe s'est formée dans la ZAT et la ZF, ce qui résulte de la chaleur de soudage. [39]
- ✓ La formation des oxydes d'aluminium, ce qui explique l'oxydation par l'air libre pendant et après le soudage. [40]
- ✓ L'apparition de nouveaux pics dans le spectre de la zone affectée thermiquement et la zone fondue.

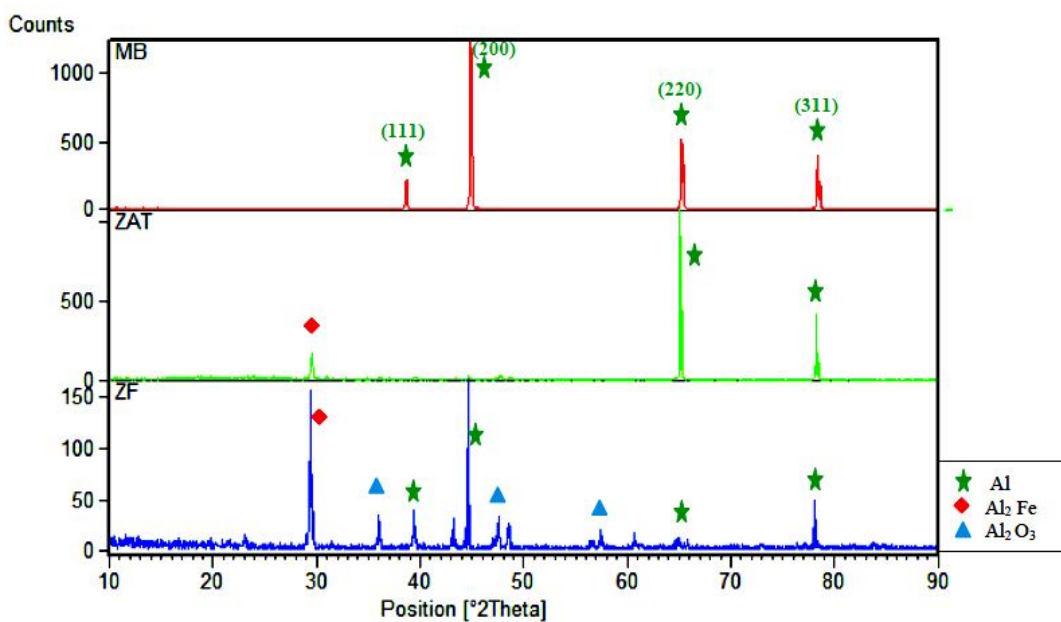


Figure IV.5 : Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé non traité.

On remarque aussi selon les fiches ICDD (Tableau IV.1) une différence d'intensité des pics caractéristiques les trois zones du joint soudé. Ceci est lié à l'existence d'une orientation privilégiée (texture), La formation des phases intermétalliques résultant de la présence des impuretés dans la solution solide d'aluminium 1050A, aussi la formation de la couche d'oxydes d'aluminium à cause des conditions de soudage.

N°	h k l	d [Å°]	2Theta [deg]	I %
1	1 1 1	2.3380	38.472	100.0
2	2 0 0	2.0240	44.738	47.0
3	2 2 0	1.4310	65.133	22.0
4	3 1 1	1.2210	78.227	24.0
5	2 2 2	1.1690	82.435	7.0
6	4 0 0	1.0124	99.078	2.0
7	3 3 1	0.92890	112.04	8.0
8	4 2 0	0.90550	116.56	8.0
9	4 2 2	0.82660	137.45	8.0

Tableau IV.1 : Fiche ICDD d'aluminium 1050A.

On remarque dans le tableau IV.2 que :

- ✓ La structure CFC est la seule structure cristalline dans le joint soudé d'aluminium avec un paramètre cristallin de 4,04Å°.
- ✓ Les pics (200), (231) et ($\bar{2}$ 31) sont les plus intense dans la MB, ZAT et ZF respectivement, ce qui veut dire que les grains ont une orientation favorisée.

On observe aussi la présence des pics de faibles intensités au niveau de la zone fondue, cette présence est ce résultat de la précipitation de phases intermétalliques telles que les composés du Fer ($Al_x Fe_y$) et les oxydes d'aluminium, ce qui explique la formation du film d'alumine pendant le soudage et au refroidissement du bain de fusion [41].

Zone	2θ	hkl	I(%)	a (A°)	Phase proposée
MB	38.6475	(111)	24.08	4.03056	Al
	44.8844	(200)	100	4.03404	Al
	65.24	(200)	61.6	4.04012	Al
	78.3655	(311)	37.29	4.04212	Al
ZAT	29.5319	(231)	12.9	11.3407	Al ₂ Fe
	65.0868	(220)	100	4.04858	Al
	78.212	(311)	37.73	4.04858	Al
ZF	29.4342	($\bar{2}$ 31)	100	11.340	Al ₂ Fe
	36.0276	(031)	12.76	-	Al(OH) ₂
	39.4103	(111)	19.15	3.9553	Al
	44.6262	(200)	29.58	4.05617	Al
	47.5618	(006)	13.66	-	Al ₂ O ₂
	64.8208	(220)	3.7	4.0633	Al
	78.1101	(311)	9.82	4.0532	Al

Tableau IV.2 : Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé non traité.

b) Décalage des pics

L'observation des spectres de diffraction des rayons X du joint soudé non traité montre qu'il y a un décalage vers les forts et les faibles angles 2θ dans les raies de diffraction des zones ZAT et ZF par rapport au spectre DRX du métal de base.

Ce décalage est produite dans les pics ($\bar{2}$ 31), (200), (220) et (311) des spectres des zones ZAT et ZF, à cause la métastabilité des interphases formées dans la matrice d' α -aluminium.

On remarque aussi un déplacement du pic (111) du spectre de ZF et l'absence de ce pic dans la ZAT, cela est expliqué par l'insolubilité des impuretés dans la matrice d' α -aluminium.

IV.2.2. L'état traité à 250 °C

a) Les spectres de DRX

On observe dans les spectres de diffraction des rayons X des trois zones du joint soudé d'aluminium 1050A traité à 250 °C pendant 4 heures (Fig IV.6) :

- ✓ Les mêmes pics de la matrice α -aluminium 1050A (cfc) mais avec une différence d'intensité par rapport à l'état non traité.
- ✓ La formation de l'interphase Al_2Fe , ce qui explique l'effet du traitement thermique.

On observe aussi la formation d'oxydes d'aluminium par l'oxydation à l'air libre [40] pendant le traitement.

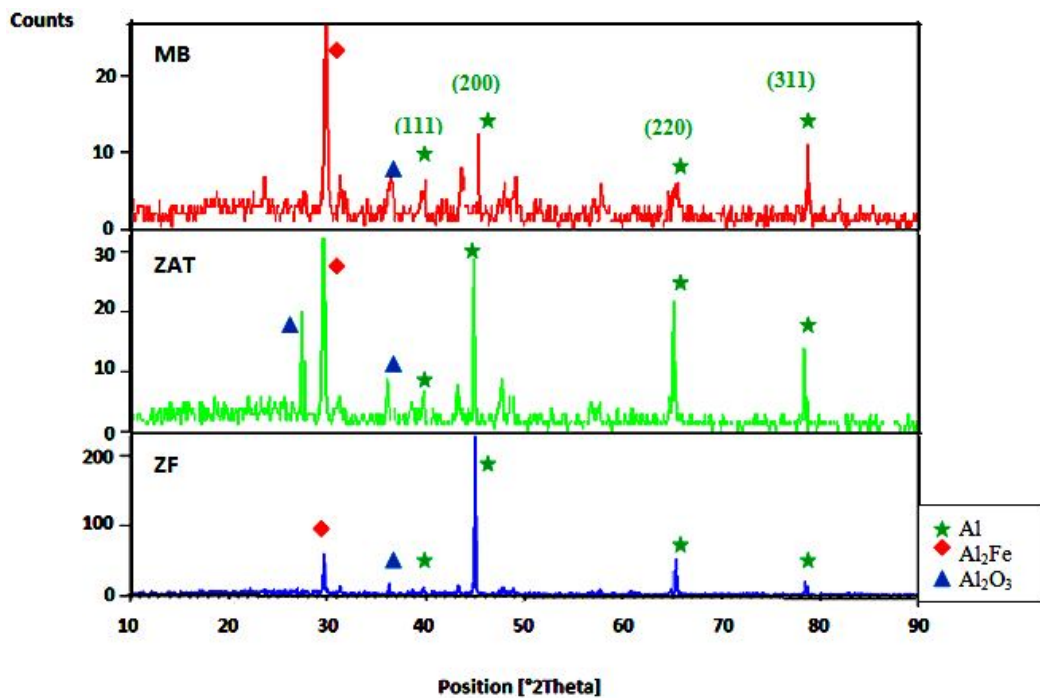


Figure IV.6 : Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité à 250 °C pendant 4 heures.

b) Décalage des pics

On observé dans les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité 250°C qu'il y a un décalage vers les forts et les faibles angles 2θ dans les raies de diffraction des zones ZAT et ZF par rapport au spectre DRX du métal de base.

Cette décalage produire dans les pics $(\bar{2}31)$, (111), (200), (220) et (311) des spectres des zones MB et ZAT, à cause la métastabilité des interphases formées dans la matrice d' α -aluminium.

On remarqué aussi un déplacement des pics ($\bar{2}31$), (200) et (220) du spectre de ZF, ce qui est résultat les forcées posées par les impuretés non solubles dans la matrice d' α -aluminium.

IV.2.4. L'état traité à 300 °C

a) Les spectres de DRX

Les spectres de diffraction des rayons X des trois zones du joint soudé d'aluminium 1050A traité à 300 °C pendant 4 heures (Fig IV.7) montrent que:

- ✓ L'apparition des interphases de type Al_xFe_y . Cette apparition est expliquée à l'insolubilité du fer dans la solution solide d'aluminium.
- ✓ La formation d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 , résultat des conditions de traitement thermique,

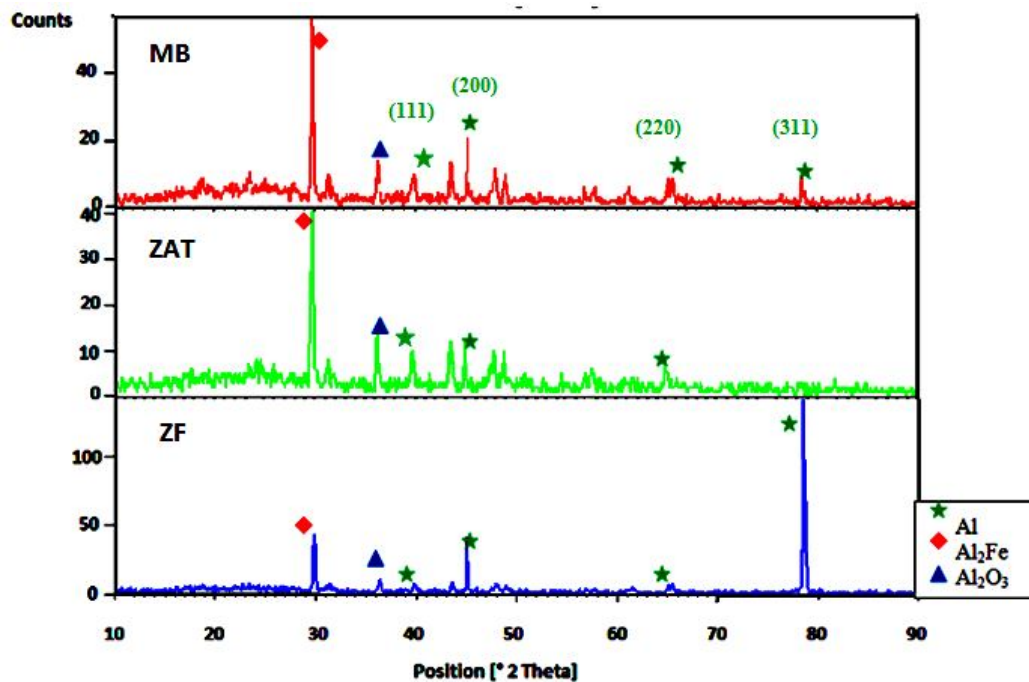


Figure IV.7 : Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité à 300 °C pendant 4 heures.

b) Décalage des pics

Les spectres de diffraction des rayons X du joint soudé traité à 300 °C montrent qu'il y a un décalage vers les forts et les faibles angles 2θ dans les raies de diffraction des zones ZAT et ZF par rapport au spectre DRX de l'état non traité.

Cette décalage produit dans le pic ($\bar{2}31$), des spectres des trois zones, à cause la métastabilité des interphases formées dans la matrice d' α -aluminium.

On remarqué aussi déplacement des pics (111), (220) et (311) du spectre de MB et l'absence de ce pic dans la ZAT et ZF, ce qui est résultat les forcées posées par les impuretés non solubles dans la matrice d' α -aluminium.

IV.2. Caractérisation par la microdureté Vickers (Hv)

Nous avons effectué un essai de microdureté sur les trois échantillons soudés, tout en balayant le métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue. Cet essai nous a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone, avec un ensemble de sept mesures prises en profil sur le joint soudé, sous une charge de 50 g appliquée pendant 07 secondes.

Le tableau IV.3 rassemble les valeurs de dureté Vickers dans le joint soudé traité et non traité thermiquement.

	Echantillon non traité	Echantillon traité à 250 °C pendant 4 heures	Echantillon traité à 300 °C pendant 4 heures
Distance (mm)	Dureté(Hv)	Dureté(Hv)	Dureté(Hv)
1	25,3	24,5	24,7
2	24,8	23,7	25,1
3	24,1	25	26,5
4	23,7	28,1	31,2
5	22,9	28,3	30,8
6	23,2	28,6	32,8
7	22,6	34,3	35,2

Tableau IV. 3 : Résultats de la microdureté des échantillons (non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C)

La figure IV.8 rassemble les duretés des joints soudés d'aluminium 1050A: le non traité, le traité à 250 et 300 °C pendant 4 heures.

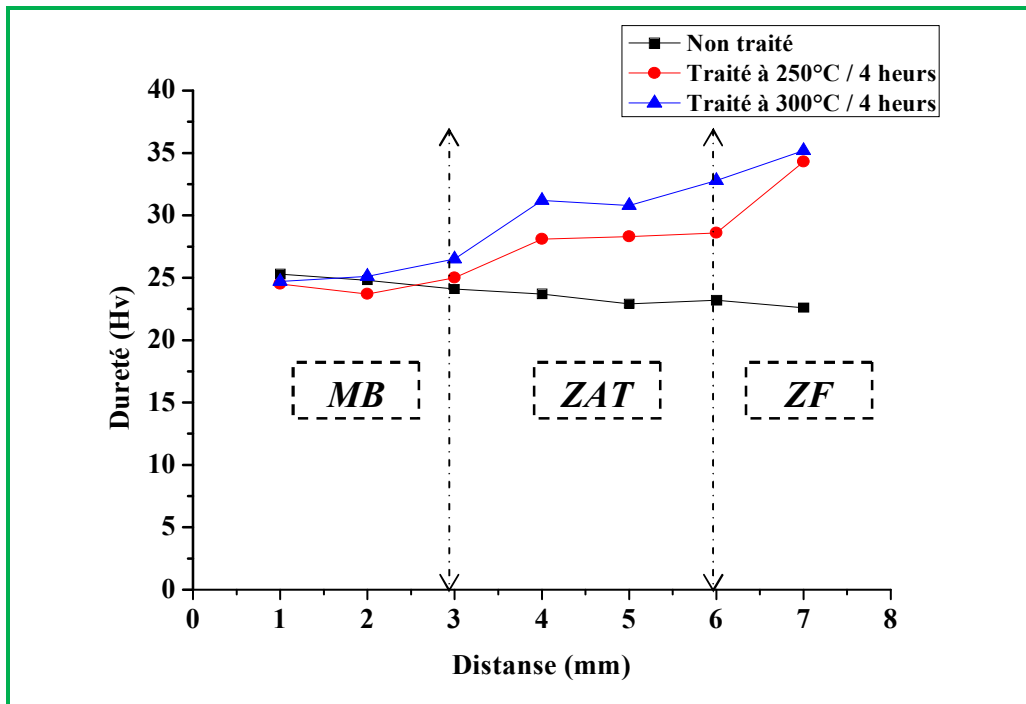


Figure IV.8 : Les profils de microdureté des joints soudés : non traité, traité pendant 4 heures à 250 et 300 °C.

A partir des graphes on remarque que :

- ✓ Une variation de la microdureté pour chaque échantillon.
- ✓ Les valeurs varient d'une zone et l'autre.
- ✓ La microdureté dans les échantillons traités à 250 et 300 °C est augmentée de la zone métal de base vers la ZAT et puis vers la ZF, par rapport à celle dans l'échantillon non traité.

L'augmentation de la dureté dans les échantillons traités à 250 et 300 °C par rapport à l'état initiale, est expliquée par l'effet de l'opération de recuit.



Conclusion générale



Conclusion générale

L'objectif de cette étude est l'étude de l'effet du traitement thermique sur les propriétés métallographiques (forme des grains, tailles des grains, texture cristallographique) et mécaniques (la microdureté des joints soudés) d'aluminium soudé (Al 1050A). Le traitement thermique étudié a été le recuit à différentes températures (250 °C, 300 °C) pendant 4 heures.

Pour cela, nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales rigoureuses et adaptées à ce genre de travaux scientifiques, telles que : la microscopie optique, la diffraction de rayons X et la mesure de la microdureté.

L'ensemble des résultats obtenus ont mis en évidence les points suivants :

- ❖ Un joint d'aluminium 1050A soudé est formé de trois zones MB, ZAT et ZF et qui sont totalement différentes du point de vue structurel.
- ❖ L'observation au microscope optique montre que dans les trois échantillons soudés il y a une structure homogène et une distribution des grains uniforme.
- ❖ Des précipités sous forme de particules intermétalliques sont observés par MO, ce qui explique le rôle des impuretés dans la formation des phases intermétalliques essentiellement le fer.
- ❖ Les traitements de recuit donnent un grossissement des grains.
- ❖ Les résultats de la diffraction des rayons X montrent la présence des pics correspondant à la structure cfc de la matrice α -aluminium, les formations des interphases de type Al_xFe_y et d'oxyde d'aluminium.
- ❖ L'augmentation de la microdureté de joint soudé d'aluminium 1050A est causée au traitement thermique.



Références



Références Bibliographies:

- [1] J.P.Planckaert, « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc. Automatique/ Robotique », Université Henri Poincaré - Nancy I, Français, 2008.
- [2] C. Chaussin et G.Hilly; « Métallurgie : alliages métalliques» tome I, 10^{ème} éd. Dunod, Paris, France.1976.
- [3] M.Stadler, « Etude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG », Thèse doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse 3, 2016.
- [4] A.Kechaou, « Etude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage », Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2013.
- [5] H.Granjon, « Bases métallurgiques du soudage », 2^{ème} éd, Paris, 2000.
- [6] E.Raouache, « Cinétique et mécanismes des transformations de phases dans un acier soudé », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [7] M.Clergé, « Simulation numérique du soudage à l'électrode enrobée d'assemblage d'angle en acier 5355 », Université de Paul Verlaine (Metz), France, 2000.
- [8] M.Hamide, « Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris, 2008.
- [9] K.Weman, « Procédés de soudage », Dunod, Paris, 2012.
- [10] M.Beausoleil, L.Binette, A.Chabot, M.Côté, A.Deschamps et C.Larose, « Fwufes de soudage : facteurs contributifs et moyens de contrôle », département de sante communautaire de l'hôpital Maisonneuve-rosemont, 1988.
- [11] E.Le Guen, « Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique », Université de Bretagne Sud, Français, 2010.
- [12] L.Depradeux, « Simulation numérique du soudage – acier 316l validation sur cas tests de complexité croissante », Thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003.
- [13] A.Belhadj, « Contribution a l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : application aux alliages de magnésium ». Sciences de l'ingénieur. Arts et Métiers Paris Tech, Français, 2009.
- [14] N.Chérifi, « Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A », Thèse doctorat, Université Mohamed Khider- Biskra, 2015.

- [15] S.Dehrib, « Etude et caractérisation d'un matériau composite poudre aluminium /alumine (Al_2O_3) », mémoire magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2015.
- [16] C.Vargel, « Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages », Techniques de l'ingénieur, vol.1, M4661, 2005.
- [17] C.Bouremel, « Etude du joint soudé d'un Alliage d'Aluminium », thèse doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2015.
- [18] P.Vigo, « Etude technique d'une structure métallo-textile à ossature en alliage d'aluminium : Conception et calcul suivant les règles AL 76 et Eurocode 9 », Matériaux composites et construction. 2013.
- [19] Q.Puydt, « Comportement mécanique de soudures en alliage d'aluminium de la série 7xxx : de la microstructure à la modélisation de la rupture. Matériaux », Institut National Polytechnique de Grenoble, Français, 2012.
- [20] M.Yakoubi, « Effet des petites déformations par compression sur le comportement à la corrosion de l'alliage d'aluminium de fonderie Al 4% Cu », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [21] R.Develay, « Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés », Techniques de l'Ingénieur, vol.2, M440, 1992.
- [22] I.Hamdi, « Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000) », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [23] M.Helie, « Corrosion des matériaux métalliques », Ellipses Edition Marketing S.A, Paris, pp. 25 ,2015.
- [24] R.Buttoudin, « l'aluminium raffiné pour les condensateurs électrolytiques », Soc des électro et électron, pp. 123, 1986.
- [25] S.Mecheri, « Etude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles », Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [26] ENIEM société, fiche technique, selon DIN 1712, 2011.
- [27] S.Kou, « WELDING METALLURG », 2^{ème} éd, John Wiley & Sons, Inc Hoboken, New Jersey Canada, 2003.
- [28] J.Barralis, G.Maeder « Précise de métallurgie: élaboration, structures-propriétés et normalisation », Nathan, Français, 2006.

- [29] D.Far, « Etude du durcissement structural de l'alliage Al-4,6 %Cu-1 %Mg-0,7 %Si (% mass) ». Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 2012.
- [30] P.Kempe, « Nanoindentation et microrayage en environnement contrôlé », Colloque SF2M Section-Ouest : Surfaces et Interfaces, indentation, rayage et abrasion, Angers, 2005.
- [31] A.Bolshakov et G.M.Pharr, « Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques» Journal of materials research, vol.13.N°4, pp. 1049-1058, 1998.
- [32] Y.T .Cheng et C.M.Cheng, « Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation», Applied physics letters, vol.73 N°5, pp. 614, 1998.
- [33] D.Panahi, D.V. Malakhov, M. Gallerneault et P. Marois , « Influence of cooling rate and composition on formation of intermetallic phases in solidifying Al-Fe-Si melts»,Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 50, N° 2, pp. 173-180, 2011.
- [34] P.Schempp, C. E. Cross, A. Pittner, G. Oder, R. Saliwan Neumann, H. Rooch, I. Dörfel, W.Österle et M. Rethmeier, «Solidification of GTA aluminium weld metal: Part I- Grain morphology dependent upon alloy composition and grain refiner content», Welding Journal, Vol. 93, pp. 53-59, 2014.
- [35] P.Campestrini, «Microstructure-related quality of conversion coating on aluminium alloys», DUP Science, 2002.
- [36] Y.Han, C. Ban, H. Zhang, H. Nagaumi, Q. Ba and J. Zhoug Cui, « Investigations on the Solidification Behavior of Al-Fe-Si Alloy in an Alternating Magnetic Field»,Materials Transactions, Vol. 47, N° 8, pp. 2092-2098, 2006.
- [37] ASM Hand Book, «Metallography and microstructures», Vol. 9, pp. 724-732, 1998
- [38] S. P. A. Alenia Aeronautica, « Anodizing process, with low environmental impact, for a work piece of aluminium or aluminium alloys». European Patent, 2002.
- [39] Y.Han, C. Ban, H. Zhang, H. Nagaumi, Q. Ba et J. Zhoug Cui, «Investigations on the Solidification Behavior of Al-Fe-Si Alloy in an Alternating Magnetic Field»Materials Transactions, Vol. 47, N° 8, pp. 2092-2098, 2006.
- [40] A.Sverdlin, «Introduction to Aluminum», Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes, Edition: G.E. Totten, D.S. MacKenzie et Marcel Dekker, New York, Vol. 1, pp. 1-32, 2003.

- [41] D.Panahi, DV. Malakhov, M. Gallerneault and P. Marois, «Influence of cooling rate and composition on formation of intermetallic phases in solidifying Al-Fe-Si melts» Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 50, N° 2, pp. 173-180, 2011.

Résumé

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris d'étudier des échantillons soudés d'aluminium 1050A. Ce mémoire a pour objectif d'étudier l'effet du traitement thermique sur les propriétés micrographiques et mécaniques de joint soudé.

Pour la caractérisation de ces échantillons nous avons utilisé différentes techniques expérimentales telles que le microscope optique, la diffraction des rayons X et le microduromètre.

L'étude par la microscopie optique, nous a permis de suivre l'effet du traitement thermique sur la microstructure du joint soudé et observée dans les trois zones : métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue. Un grossissement des grains et l'analyse diffraction des rayons X montrent que la structure (FCC) est la seule structure cristalline dans chaque zone du joint soudé d'aluminium 1050A.

Les mesures de la microdureté montrent une amélioration dans les propriétés mécaniques des zones de joint soudé essentiellement la zone affectée thermiquement et la zone fondue.

Mots clés: joint soudé, aluminium 1050A, micrographique, traitement thermique.

المخلص

في إطار العمل المنجز اعتمدنا دراسة عينات ملحومة من صفيحة الألمنيوم النقي الصناعي (A1050) ,الهدف من هذا العمل دراسة تأثير المعالجة الحرارية على البنية المجهرية لكل منطقة من العينات الملحومة. تمت دراسة هذه العينات باستعمال وسائل تجريبية, فلقد اعتمدنا أساسا على المجهر الضوئي, (MO) التحليل بالأشعة السينية (DRX) و جهاز قياس الصلادة. (Vickers) إن الدراسة بواسطة المجهر الضوئي سمحت لنا بمشاهدة مدى تأثر البنية المجهرية والنسيج البلوري بالمعالجة الحرارية حيث لاحظنا كبر حجم الحبيبات في كلا من المناطق الثلاثة: معدن الأساس, المنطقة المتأثرة بالحرارة و المنطقة المذابة واثبت لنا التحليل بالأشعة السينية أن بلورات الألمنيوم (FCC) هي البلورات الوحيدة الموجودة في كل المنطقة من العينات الملحومة. بين لنا استعمال قياس الصلادة تحسنا في الخواص الميكانيكية للمعدن خاصة في المنطقة المتأثرة بالحرارة والمنطقة المذابة حيث لاحظنا ارتفاعا في القيم المتحصل عليها. **الكلمات الدالة:** عينات ملحومة, الألمنيوم A1050, البنية المجهرية, المعالجة الحرارية.

Abstract

In this work, we have undertaken study the welded joint of 1050A aluminium. The aim of the present work is the study the effect of heat treatment on the micrographic and mechanical properties of welded joints.

For the characterization of these samples we used different experimental techniques such as optical microscope, X-ray diffraction and Hardness Vickers (Hv).

The study by optical microscopy allowed us to follow the heat treatment effect on the microstructure of the welded joint and observed in the three zones: base metal, thermally affected zone and molten zone a grain magnification and X-ray diffraction analysis showed that the structure (FCC) is the only crystal structure in each zone of the 1050A aluminum welded joint.

Measurements of microhardness show improvement in the mechanical properties of weld joint zones essentially the heat affected zone and the melted zone.

Key words: welded joint, 1050A aluminum, micrographic, heat treatment.