

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

Thème :

***Etude du soudage TIG alternatif et pulsé de
l'alliage d'aluminium 2219 T3.***

Proposé et dirigé par :

Pr. Med Lamine DJEGHLAL.

Étudié par :

M^{lle} BELHADJ Fatiha

10, Avenue Hassan Badi, BP N° 83 El-Harrah, Alger.

JUIN 2013.

Remerciements

Louange à notre Seigneur « ALLAH », qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incité à acquérir le savoir, qui m'a donné la patience, la santé et la volonté tout au long de mes études. C'est à lui que j'adresse toute ma gratitude en premier lieu.

Je tiens à remercier mon promoteur Pr. Med Lamine DJEGHLAL pour avoir accepté de m'encadrer, merci pour son attention, sa bienveillance et son appui sans faille ont été des encouragements décisifs pour mener à terme cette étude. Ses suggestions et son soutien m'ont été très précieux. Je lui exprime ma vive et respectueuse gratitude. C'est un réel plaisir de travailler avec vous. Merci.

Je remercie par anticipation les membres du jury Pr.M.ABADLI pour avoir accepté la présidence du jury de soutenance et les examinateurs Pr.E.SALHI, Pr. M.BOUABDELLAH. C'est vraiment un grand honneur pour moi. Merci.

Je souhaiterais également remercier tous mes enseignants du département de métallurgie de l'ENP pour avoir participé à ma formation.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à tonton SALAH qui n'a pas cessé de m'encourager, de m'aider durant tout mon cursus et durant les moments difficiles sans oublier tonton DOUADI. Merci.

Je tiens à remercier sincèrement Mr Liamine KABA qui a été toujours disponible malgré ses nombreuses occupations, et dont les encouragements et les conseils judicieux me furent d'une très grande utilité.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail surtout ceux du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle spécialement le sous-directeur Mr BADJI.

Durant toute cette période que j'ai mis pour réaliser ce travail, j'ai fait connaissance avec beaucoup de personnes. Certaines m'ont marqué par leur savoir, d'autres par leur gentillesse et leurs encouragements je cite Mr. AZZAZ Professeur à Bab- Ezzouar.

Je voudrais aussi exprimer ma profonde gratitude à mes parents, mes frères et mes sœurs.

Finalement, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué d'une quelconque manière à l'aboutissement de ce travail.

*D*édicaces

A mes très chers parents

A mes chers sœurs : Kheira et Sabrina.

*A mes frères : Kader, boumediene,
Baghdadi et Mouloud.*

*A mes adorables neveux : Younes et
Abderrahmane.*

A ma jolie nièce Imène.

*A tous mes amis et spécialement les magnifiques
MINOU, AMINA, Chafik et Youcef.*

*A tous mes collègues et amis de métallurgie
sans exception.*

ملخص:

إن إلام خلائط الألمونوم له دور فعّال في شتى المجالات الصّناعية: صناعة الطائرات، السيارات وغيرها، تطبيق اللحام يسمح في الواقع بربح في الوزن مصحوب بتخفيض مهم بالسعار. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم، في ميدان الإلام التطبيقي، تأثير عوامل الإلام الناجمة عن تقنية TIG وطبيعة التيار على خليط الألمونوم 2219T3 في موضع اللحام وهذا باستنباط الخصائص المميزة في مجال قابلية اللحام، ومعرفة العلاقة بين البنية المجهرية وما يقابلها من تطور في الميزات الميكانيكية في مختلف أنحاء الشريط الملحم وامكانية تحديد هذه المميزات وربطها بالأدوار الحرارية للإلام المولدة بتقنية التلحيم TIG.

الكلمات المفتاحية: اللحام، تقنية TIG , pulse , تخصيص، الدورة الحرارية ، الألمونوم.

Résumé :

Le soudage des alliages d'aluminium présente un intérêt particulier dans le cadre de son application dans diverses industries automobile, aéronautique et autres .L'application du soudage permettrait en effet un gain de poids associé à une réduction des coûts intéressante. Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de soudabilité opératoire, l'influence des paramètres de soudage TIG et la nature du courant sur les caractéristiques de la soudure. Les évolutions des caractéristiques mécaniques et microstructurales au travers du joint seront déterminées et reliées aux cycles thermiques du soudage engendré par le procédé TIG.

Mots clés :

Soudage, procédé TIG, pulsé Aluminium, Cycles thermiques, Caractérisation.

Abstract:

The welding of aluminium alloys has a particular interest within the framework of its application in various aeronautical and automobiles and others industries. The use of welded aluminium would indeed allow a profit on weight associated to an interest in costs reduction.

This work will consist in the evaluation, in the field of operational weldability, the influence of the welding TIG parameters on the weld characteristics. The evolutions of the mechanical and microstructural characteristics of joint will be finding out and will be connected to thermal cycle of welding related to TIG process.

Keywords:

Welding, TIG process, Aluminium, Thermals cycles, Characterisation.

1. Table de matière

Introduction générale.....	1
Chapitre I :	3
Généralités sur l'aluminium et ses alliages	3
1. Historique.....	3
2. Etat naturel de l'aluminium.....	3
3. Fabrication de l'aluminium	3
3.1. Extraction de l'alumine de la bauxite.....	3
3.2. Fabrication de l'aluminium par électrolyse de l'alumine	4
4. Propriétés de l'aluminium	4
4.1. Propriétés physique	4
4.2. Les atouts de l'aluminium	5
5. Classification	6
5.1. Les alliages d'aluminium	6
5.1.1. Les alliages de moulage.....	7
5.1.2. Les alliages de corroyage	7
6. Domaines d'application de l'aluminium	16
Chapitre II : Soudage : procédés, phénomènes physiques et métallurgiques.	18
1. Introduction.....	18
2. Définition du soudage	18
3. Condition d'installation de la liaison métallique	18
3.1. Processus d'activation de surface.....	18
3.2. Elimination des gênes à l'installation de la liaison	19
4. Procédés de soudage	20
4.1. 1ère catégorie : soudage par pression.....	21
4.2. 2ème catégorie : Soudage par fusion.....	21
4.2.1. Principaux procédés de soudage à l'arc.....	24
5. Formation de soudure.....	33
5.1. Zone fondue.....	34
5.2. Zone de liaison	34
5.3. Zone affectée thermiquement.....	34
5.4. Zone de métal de base	35
6. Comportement des différents alliages d'aluminium.....	35

Chapitre III :	31
Dispositif expérimental	31
1. Matériaux	36
1.1. Composition chimique du métal de base	36
1.2. Composition chimique du métal d'apport	36
2. Préparation de surface	36
3. Equipements du poste de soudage TIG	37
4. Enrobage	38
5. Polissage	39
6. Microscopie optique	40
7. Microscope Electronique à Balayage	41
7.1. Principe de Microscope Electronique à Balayage	41
7.2. Détection des signaux	42
7.3. Fonctionnement	43
8. Diffraction par rayon X	43
9. Micro-duromètre	45
Chapitre IV-partie A :	36
Mode opératoire	36
1. Introduction	47
2. Le cycle de soudage en courant continu pulsé	47
3. Les étapes du cycle de soudage en courant continu pulsé	47
3.1. Le pré-gaz	47
3.2. L'amorçage et la montée en intensité de l'arc	48
3.3. Intensité de soudage programmée	48
3.4. Evanouissement de l'arc électrique de soudage	48
3.5. Le post gaz	48
4. Le soudage TIG de l'alliage d'aluminium 2219T3	49
4.1. Le réglage du poste TIG	49
4.2. Première plaque : soudage en courant alternatif	50
4.3. Deuxième plaque : soudage en courant continu pulsé	51
5. Comparaison des deux plaques (control visuel)	53
5.1. vitesse de soudage	56
5.2. La largeur des cordons	56
Chapitre IV.B :	47

Caractérisation métallurgique	47
1. Etude métallographique	59
1.1 Préparation des Echantillons.....	59
1.2 La macrographie des soudures	60
1.3 Micrographie.....	61
1.3.1. Métal de base.....	61
1.3.2. La soudure 1(en courant alternatif)	64
1.4 Caractérisation mécanique des soudures	75
1.4.1 Analyse des micro-duretés des soudures TIG	75
Conclusion générale	78

Table de figures

Figure I. 1 :La solution solide de substitution Al-Cu	10
Figure I. 2 : La solution solide de substitution Al-Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C.....	11
Figure I. 3 : Influence de la température sur la maturation du 2024	12
Figure I. 4:Courbes typiques de revenu : cas 2024	13
Figure I. 5: diagramme d'équilibre Al-Cu	14
Figure I. 6 : les zones de Guinier-Preston	15
Figure I. 7 : Formation des précipités θ''	15
Figure I. 8 : Formation des précipités θ'	16
Figure I. 9 : Formation de la phase d'équilibre	16
Figure II. 1 : schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage	23
Figure II. 2 : Le soudage à l'électrode enrobée	24
Figure II. 3 : Soudage sous flux en poudre : principe	25
Figure II. 4 : Soudage semi-automatique : principe	25
Figure II. 5 : Soudage à l'électrode réfractaire : principe	26
Figure II. 6:Effet du courant continu sur la soudure	28
Figure II. 7 : Effet du courant alternatif sur la soudure.....	29
Figure II. 8 : Formes des électrodes en fonction du courant	29
Figure II. 9 : exemple de courant pulsé	30
Figure II. 10 : Effet du courant continu ou alternatif sur la soudure.....	31
Figure II. 11 : différentes zones de soudure	34
Figure III. 1:brosse métallique.....	37
Figure III. 2:Le poste de soudage est de type: FIM467-A Lincoln SQUAREWAVE TIG 355 CR99-15.....	38
Figure III. 3: Enrobage à froid.....	39
Figure III. 4:Papiers abrasifs.....	39
Figure III. 5:Polissage de finition.....	40
Figure III. 6: la polisseuse utilisée de type« MECAPOL P200 ».....	40
Figure III. 7 : microscope optique.....	41
Figure III. 8: les interactions électron-matière et les émissions associées	41
Figure III. 9: Poire d'interaction	42
Figure III. 10: microscope électronique à balayage.....	43
Figure III. 11: Diffractomètre des rayons X	44
Figure III. 12: Famille de plans réticulaires de distance d, sur lesquels diffracte un faisceau de rayons X	44
Figure III. 13: micro-duromètre.....	46
Figure III. 14: essai Vickers	46
Figure IV-A. 1 : Cycle de soudage en courant pulsé.....	47

Figure IV-A. 2: le poste TIG.	50
Figure IV-A. 3: aspect général des cordons des soudures réalisés en courant alternatif.	51
Figure IV-A. 4: réglage du courant pulsé.	52
Figure IV-A. 5 : aspect général des cordons des soudures réalisés en courant pulsé.	53
Figure IV-A. 6: Mouvement rectiligne du déplacement de la torche.	54
Figure IV-A. 7 : faces endroits et envers respectivement des deux plaques.	55
Figure IV-A. 8 : histogramme de la vitesse des deux plaques.	56
Figure IV-A. 9 : histogramme des largeurs des cordons en fonction de l'intensité.	57

Figure IV-B. 1 : aspect général des cordons de soudure.	60
Figure IV-B. 2 : microstructure du métal de base.	61
Figure IV-B. 3 : topographie du métal de base en électrons secondaires.	62
Figure IV-B. 4 : métal de base avec électrons rétrodiffusés.	62
Figure IV-B. 5 : Spectre d'analyse sur un précipité.	63
Figure IV-B. 6 : Spectre d'analyse de la surface.	63
Figure IV-B. 7 :: Corrélation entre le diagramme binaire A-B (Al-Cu) et les différentes zones d'un joint soudé	64
Figure IV-B. 8 : zones de transformations structurales (ZF-ZL-ZAT).	65
Figure IV-B. 9 : Les différentes zones de transformations structurales.	65
Figure IV-B. 10 : Les différentes zones de transformations structurales.	66
Figure IV-B. 11 : zone fondue.	66
Figure IV-B. 12 : hétérogénéités de la zone fondue.	67
Figure IV-B. 13 : Zone de liaison.	68
Figure IV-B. 14 : zone affecté thermiquement.	69
Figure IV-B. 15: répartition chimique sur toute la surface.	69
Figure IV-B. 16 : analyse chimique du précipité blanc au niveau du joint de grain.	70
Figure IV-B. 17 : analyse chimique du précipité noir au niveau du joint de grain.	71
Figure IV-B. 18 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone de liaison (ZPF).	72
Figure IV-B. 19 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone de fusion (ZF).	72
Figure IV-B. 20 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone affectée thermiquement (ZAT).	73
Figure IV-B. 21 : Microstructure de soudage en fonction de la vitesse d'avancée	73
Figure IV-B. 22 : le spectre d'échantillon soudé.	75
Figure IV-B. 23 : profil de mesure de la micro-dureté.	75
Figure IV-B. 24: profil de micro-durté de la soudure alternatif.	76
Figure IV-B. 25: Profil de micro-durté de la soudure en pulsé.	77

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Propriétés physique de l'aluminium	4
Tableau I. 2 : Familles des alliages de corroyage.	8
Tableau I. 3 : Définition de l'état métallurgique suivant la norme EN515.....	9
Tableau II. 1 : Classification des procédés de soudage	20
Tableau III. 1: composition chimique du 2219.	36
Tableau III. 2 : composition chimique du métal d'apport ER5553	36
Tableau IV-A. 1 : résultats du soudage en courant alternatif	51
Tableau IV-A. 2 : résultats du soudage en courant pulsé.	52
Tableau IV-A. 3 : paramètres de soudage de la soudure 1.....	57
Tableau IV-A. 4 : paramètres de soudage de la soudure 2.....	58
Tableau IV-B. 1: Composition du réactif d'attaque.	60

Introduction générale

L'aluminium par ses différentes caractéristiques optimales (recyclage, légèreté et résistance à la corrosion) a toujours été l'un des matériaux les plus utilisés dans divers domaines : aéronautique, automobile, bâtiment, industrie maritime etc....

Ces différentes applications qui demandent des assemblages simples ou compliqués imposent des opérations de rivetage qui confèrent au matériau des complications post-travail donnant à ce dernier un caractère néfaste, ce qui a amené les différents acteurs industriels et les chercheurs à se pencher sur le problème en préconisant la soudabilité de ces divers matériaux.

Ces dernières années, le soudage des alliages d'aluminium prend de plus en plus d'ampleur et reste jusqu'à présent un domaine de recherche d'actualité pour, notamment les différentes avaries qu'ils peuvent produire. Notre travail rentre dans le cadre d'un vaste projet de recherche du centre de soudure et contrôle (CSC) et le Département de Métallurgie de l'ENP, collaboration entre S.Ouallam et M.E.Djeghlal. La soudabilité des alliages d'aluminium et de magnésium reste une nouveauté en Algérie.

Les alliages d'aluminium de la série 2000 dits à durcissement structural présentent une difficulté majeure pour leur soudabilité notamment, les alliages utilisés en aéronautique tel que le 2024 et le 2219, thème de notre travail.

Parmi les procédés de soudage connus, le procédé TIG est le plus indiqué pour les alliages d'aluminium. Ce dernier est utilisé pour le soudage des aciers inoxydables, des métaux légers etc..., mais il convient particulièrement pour le soudage des matériaux d'épaisseur comprise entre 1 et 3 mm.

On note qu'avec le développement technologique des procédés de soudage, de nouvelles sources de chaleur sont appliquées comme l'apparition du soudage TIG par courant pulsé et courant alternatif et d'autres techniques d'assemblages telles que le soudage par laser et par friction.

Dans notre travail, nous avons tenté à travers certains paramètres technologiques de comprendre l'influence de la vitesse de soudage, des sources de chaleur, des intensités de charge afin de visualiser les cordons de soudures et surtout de comprendre les effets synergiques relatifs à la soudabilité de l'alliage 2219T3.

Notre travail est réparti en deux parties principales, la première concerne l'étude bibliographique qui comporte deux chapitres.

Le premier chapitre traite des généralités sur l'aluminium et ses alliages et le deuxième sur la métallurgie de soudage de l'aluminium et ses alliages.

La deuxième partie de notre travail est consacrée à l'étude expérimentale. Cette partie comprend deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons les méthodes expérimentales utilisées et le dispositif expérimental, et le deuxième chapitre regroupe les résultats et discussions qui concernent les modes opératoires et les caractérisations métallurgiques. Nous terminons par une conclusion générale suivie de références bibliographiques.

Chapitre I :

Généralités sur l'aluminium et ses alliages

1. Historique

Au XVIII^e siècle la chimie connaît une véritable révolution grâce au savant Antoine Lavoisier (1743-1794) qui à propos de l'aluminium déclarait : « il est hautement probable que l'alumine est l'oxyde d'un métal dont l'affinité pour l'oxygène est si forte qu'il ne peut être dominé ni par le carbone ni par n'importe quel autre agent de réduction connu ».

Cependant il faut attendre le début du XIX^e siècle pour qu'en 1825 le savant Danois Hans Christian Oersted (1777-1851) isole le minerai en utilisant le potassium sur le chlorure d'aluminium. Deux ans plus tard, en 1827, le chimiste allemand Friedrich Wöhler (1800-1882) souligne deux qualités de ce nouveau métal : sa masse et sa malléabilité [1].

En 1854, un perfectionnement introduit par Hernie Sainte Claire est de remplacer le chlorure simple par le chlorure double d'aluminium et de sodium, le mérite essentiel de cette nouvelle méthode est d'être utilisable à l'échelle industrielle à ce titre Le savant français doit être considéré comme le créateur de l'industrie de l'aluminium [2].

2. Etat naturel de l'aluminium

Le gisement du minerai de départ, la bauxite, est très nombreuse et importante sur tout le globe terrestre, est un mélange d'oxyde d'aluminium, l'alumine (40 à 60 %), d'oxyde de silicium, la silice (2 à 12 %), d'oxyde de fer (18 à 25 %), d'oxyde de titane (2 à 4 %) et d'eau (10 à 15 %).

3. Fabrication de l'aluminium

3.1. Extraction de l'alumine de la bauxite

L'extraction de l'alumine s'effectue par attaque de la bauxite à température et pression élevées au moyen d'une solution de soude caustique (procédé Bayer). Les impuretés insolubles sont séparées de la solution par décantation et filtration et portent le nom de « boues rouges » en raison de leur couleur due à la présence d'oxyde de fer de la solution épurée, refroidie et diluée, on peut tirer l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$. Celui-ci est calciné à 1200 °C pour donner l'alumine Al_2O_3 , qui se présente sous la forme d'une poudre de couleur blanche [3].

3.2. Fabrication de l'aluminium par électrolyse de l'alumine

L'alumine est mélangée à de la cryolithe, et ce mélange est liquide à 1000 °C. L'électrolyse de l'alumine se fait dans une grande cuve peu profond de dont le fond est garni de graphite qui sert de cathode (pôle -). Les anodes (pôle +) sont faites avec de la pâte de coke et de brai précuite et plongent dans le bain, Le passage du courant continu décompose l'alumine : en l'aluminium liquide à 1 000 °C se dépose à la cathode, au fond de la cuve, et l'oxygène se dégage aux anodes en les brûlant. Celles-ci sont donc consommées et changées régulièrement. L'aluminium est récupéré par siphonage dans une poche de coulée [3].

4. Propriétés de l'aluminium

4.1. Propriétés physique

L'aluminium, symbole chimique **Al**, Il appartient au groupe **IIIA** du « tableau de la classification périodique des éléments ».il a une structure cubique a face centré **CFC** stable à toute température avec une arête $a = 0,4049596 \text{ nm}$ à 298 k [4].

Le tableau I.1 résume Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié.

Tableau I. 1 : Propriétés physique de l'aluminium [5].

Propriété	Unité	Valeur	Remarque
Numéro atomique		13	
Masse volumique	Kg.m^{-3}	2 698	
Point de fusion	°C	660,45	sous $1\ 013.10^{-3} \text{ bar}$
Point d'ébullition	°C	2 056	sous $1\ 013.10^{-3} \text{ bar}$
Energie interne et massique u	J.kg^{-1}	$3.98\ 10^5$	
Capacité thermique massique C_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	897	à 25 °C
Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	237	à 27 °C
Résistivité électrique	$10^{-9} \Omega.\text{m}$	26,548	à 25 °C
Module d'élasticité longitudinal E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson		0,33	

4.2. Les atouts de l'aluminium

En plus de ces propriétés, l'aluminium présente aussi autres propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs :

- ✓ **La légèreté** : Les découvreurs d'aluminium avaient été impressionnés par la faible densité de ce métal, soit trois fois moindre que celle des aciers, l'allègement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier ordinaire ou en acier inoxydable[2].

- ✓ **La tenue à la corrosion** : Grace à la couche d'oxyde qui se forme à leur surface, les alliages d'aluminium sont résistants à la corrosion. Afin d'améliorer ces prédispositions, l'anodisation peut rendre cette couche protectrice plus épaisse et adaptée à l'exposition[2].

- ✓ **Conductibilité et conductivité électriques** : La conductibilité électrique de l'aluminium pur atteint 60% de celle du cuivre. Un conducteur en aluminium, dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, dépense moins de calories et a un échauffement moindre [2].

- ✓ **La facilité de mise en œuvre** : Pour travailler les alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaire, dans la plus part des cas, de disposer d'équipements ou de machines-outils spécifiques. En revanche, il est recommandé d'affecter un atelier pour alliages d'aluminium séparé de celui des aciers et surtout de celui des alliages cuivreux [5].

- ✓ **Le recyclage** : L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusion de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai [5].

- ✓ **L'aptitude aux traitements de surface** : L'aluminium supporte une grande variété de traitements de surface plus qu'aucun autre métal. Les deux plus connus sont l'anodisation et le laquage (prélaquage pour les laminés et thermo-laquage pour les profilés) [3].

5. Classification

Les alliages d'aluminium peuvent être classés suivant plusieurs méthodes :

Suivant leur composition chimique :

- Aluminium à divers degrés de pureté.
- Les alliages avec une classification à partie de l'élément d'alliage principal :
Cu, Mg, Mn, Zn, Si.

Suivant le mode de fabrication des demi-produits, on distingue :

- Alliages moulés ;
- Alliages corroyés.

Suivant la possibilité de durcissement par traitement, on distingue :

- Alliages susceptibles de durcissement structural ;
- Alliages non susceptibles de durcissement structural (écrouissage) [6].

5.1. Les alliages d'aluminium

Les produits en aluminium appartiennent tous à l'une des huit familles d'alliages. Les alliages d'une même famille présentent un ensemble de propriétés communes, par exemple : l'aptitude au moulage, les caractéristiques mécaniques, l'aptitude au filage, la résistance à la corrosion, etc. celles-ci peuvent varier notablement d'une famille à l'autre [5].

5.1.1. Les alliages de moulage

Les alliages d'aluminium destinés à la fonderie (ou moulage) sont assez différents de ceux destinés au corroyage. La famille absolument prédominante est celle des Al-Si, ceci en raison des excellentes propriétés de fonderie que confère le silicium aux alliages d'aluminium.

Les principaux alliages de moulages sont :

- aluminium non allié, famille 1000 ;
- alliages au silicium, famille 4000 ;
- alliages au cuivre, famille 2000 ;
- alliages au magnésium, famille 5000 ;
- alliages au zinc, famille 7000 [5].

5.1.2. Les alliages de corroyage

D'un point de vue métallurgique, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés. Ce sont :

- les alliages à durcissement par écrouissage ;
- les alliages à durcissement structural.

Le tableau I.2 montre les différentes familles des alliages de corroyage et leur mode de durcissement.

Tableau I. 2 : Familles des alliages de corroyage [5].

Mode de durcissement	Famille	Elément d'alliage	Etendue de la teneur (%)	Eléments d'addition	Résistance mécanique R_m (MPa)
Durcissement par écrouissage	1000	Aucun		Cu	50-160
	3000	Manganèse	0,5 à 1,5	Mg, Cu	100-240
	5000	Magnésium	0,5 à 5	Mn, Cr	100-340
	8000	Fer et silicium	Fe : 0,6 à 2 Si : 0,3 à 1		130-190
Durcissement structural	6000	Magnésium et silicium	Mg : 0,5 à 1,5 Si : 0,5 à 1,5	Cu, Cr	200-320
	2000	Cuivre	2 à 6	Si, Mg	300-480
	7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 à 7 Mg : 1 à 2	Cu	Sans cuivre 320-350 Avec cuivre 430-600
	4000	Silicium	0,8 à 1,7		150-400

5.1.2.1. Durcissement par écrouissage

Le durcissement par écrouissage correspond à une modification de structure provoquée par une déformation plastique, il se produit lors de la fabrication d'un demi produit pendant le laminage, le tréfilage, l'étirage,...etc. L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté et par une perte de ductilité, mais l'augmentation progressive de la résistance mécanique atteint toujours une limite au -delà de laquelle toute déformation devient difficile, voire impossible, il faut alors si on veut poursuivre, pratiquer des traitements thermiques de recuit [5].

5.1.2.2. Durcissement structural par traitement thermique

Le durcissement structural des alliages d'aluminium est dû à des transformations métallurgiques à la suite des traitements thermiques de mise en solution, de trempe et de revenu, aboutissant à des précipités de phases durcissantes [7].

5.1.2.2.1. Désignation des états métallurgiques

Les états métallurgiques des alliages à durcissement structural sont tous désignés par la lettre T suivi d'un à cinq chiffres dont on trouvera la définition précise dans la norme* EN 515 dans le **tableau I.3**.

Tableau I. 3 : Définition de l'état métallurgique suivant la norme EN515 [5].

Etat	Mise en solution	Traction contrôlée	Ecrouissage	Maturation	Revenu normal	Sur-revenu
T3						
T351						
T4						
T6						
T7351						
T8						

La mise en solution

La première étape de ce traitement, qui se fait à température élevée, est le traitement de mise en solution solide jusqu'à dissolution complète des éléments d'alliages. Cela consiste à dissoudre dans le métal de base, par un maintien à température élevée, les éléments d'alliage

qui s'y trouvent en phases séparées. Par refroidissement brutal de la solution solide ainsi obtenue, on obtient un état trempé [3].

✚ La trempe

L'opération de trempe consiste à refroidir l'alliage rapidement après la mise en solution pour empêcher la décomposition de la solution solide avec formation de ces précipités d'équilibre grossiers. Elle permet en outre de piéger les très nombreuses lacunes stables à haute température, immédiatement après la trempe jusqu'à la température ambiante. On obtient une solution solide sursaturée en soluté et en lacunes où les atomes de soluté sont positionnés de manière aléatoire aux nœuds du réseau cubique à faces centrées de l'aluminium comme le montre la **figure I.1** et forment une solution solide de substitution [8].

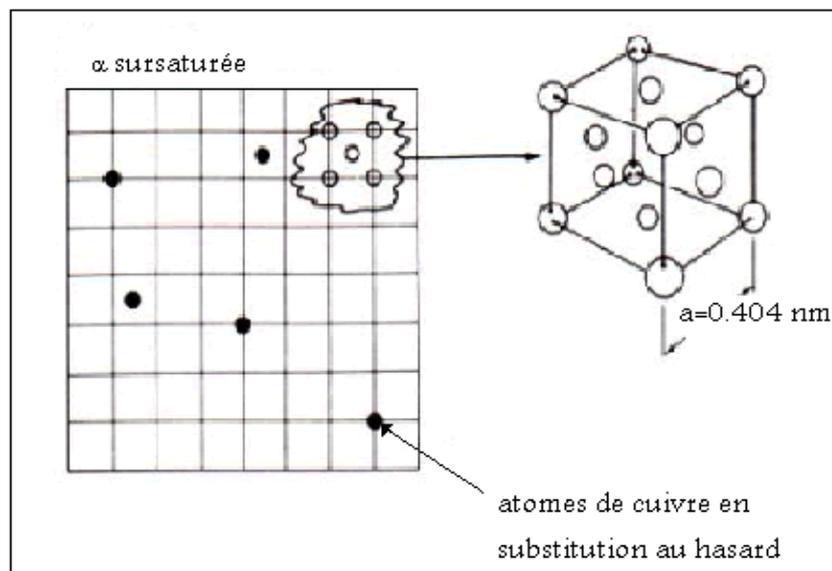


Figure I. 1 : La solution solide de substitution Al-Cu [9].

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés. Dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés. **Figure I.2**

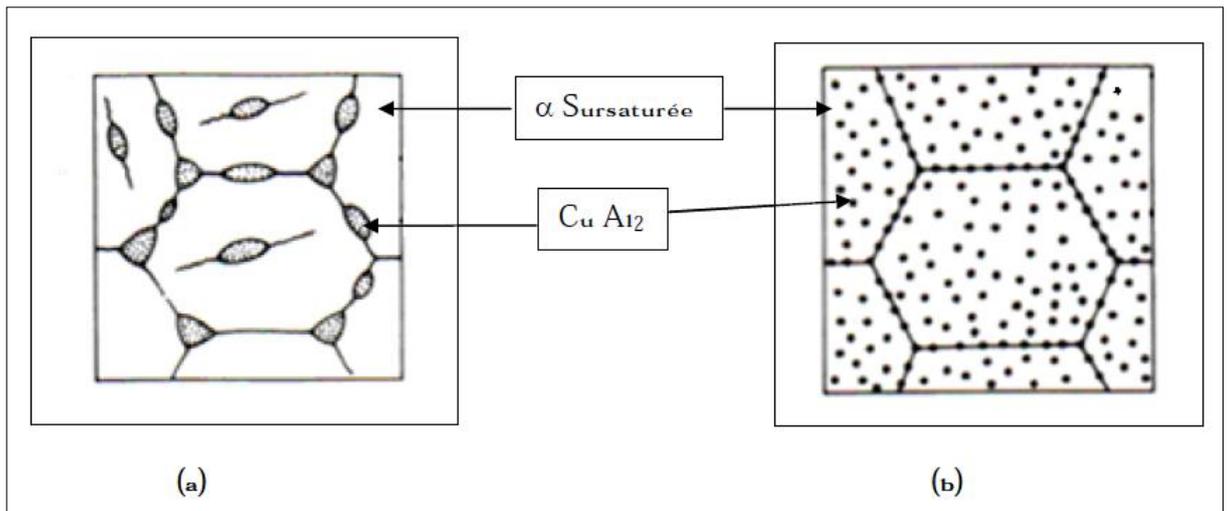


Figure I. 2 : La solution solide de substitution Al-Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C [9].

✚ La maturation

Ou vieillissement naturel est le maintien, après la trempe, à température ambiante ou inférieure. Cette étape permet une décomposition lente de la solution solide sursaturée et la formation de petits amas d'atomes de soluté, les zones de « Guinier-Preston » ou GP. L'étape de maturation peut s'accompagner d'un écrouissage (ou traction contrôlée) de 1 à 2% de déformation du matériau de manière à relaxer les contraintes et à augmenter la densité de lacunes par déformation plastique, et donc à augmenter la densité des sites de germination des précipités durcissants [10].

La figure suivante montre l'influence de la température sur maturation de l'alliage 2024.

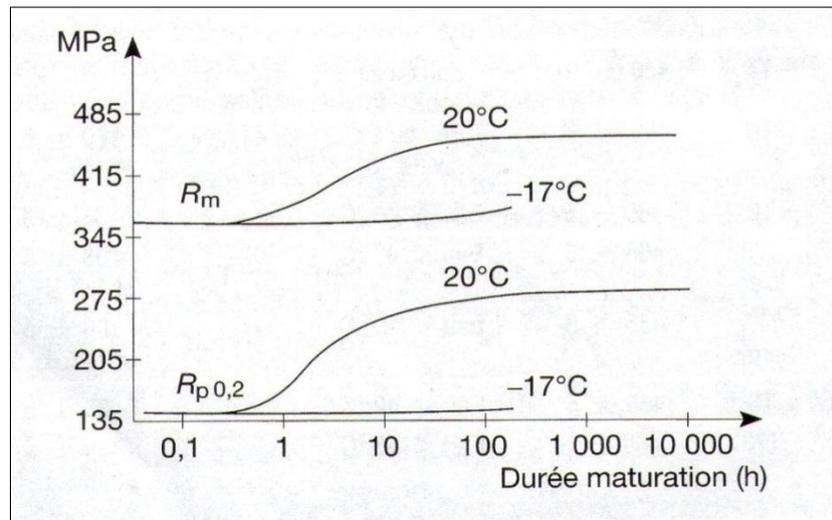


Figure I. 3 : Influence de la température sur la maturation du 2024 [5].

✚ Le revenu

C'est un chauffage ultérieur à des températures inférieures aux températures de mise en solution, typiquement de l'ordre de 100 à 200°C. Cette étape permet d'accélérer les phénomènes de décomposition de la solution solide sursaturée et donc la précipitation, responsable du durcissement de l'alliage.

Au cours du revenu, il y a précipitation abondante d'éléments durcissants qui sont les composés intermétalliques : Al_2CuMg pour l'alliage 2024 T3 et Al_2CuMn pour l'alliage 2219 T3.

Cette précipitation se traduit par une augmentation des propriétés mécaniques. Le durcissement est fonction de la température et de la durée de maintien [10].

Les conditions de revenu : température, durée, temps d'attente entre trempe et revenu, sont propres à chaque alliage. Au cours d'un revenu isotherme, l'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps prend l'allure d'une courbe en forme de cloche (figure I.4) avec un maximum pour la durée t [5].

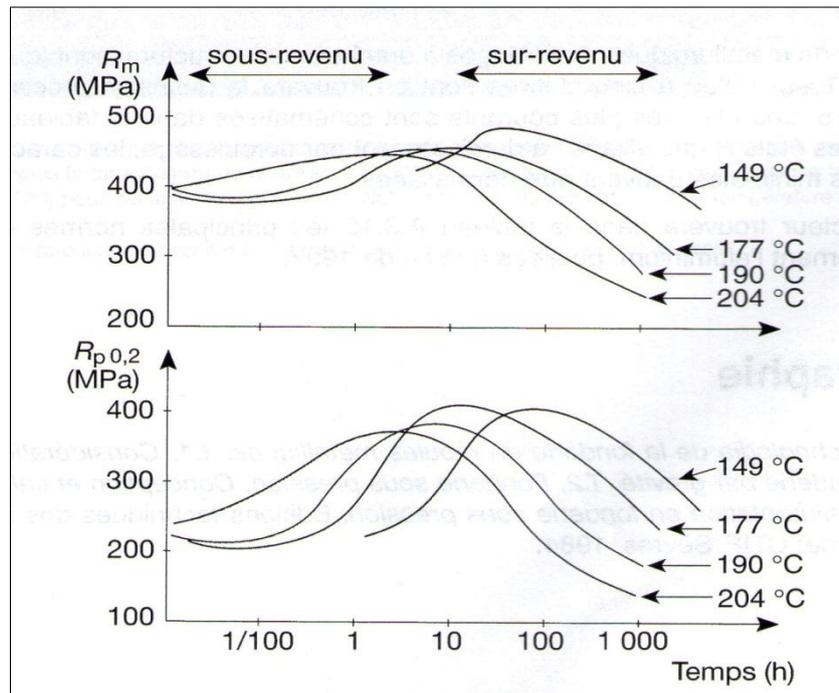


Figure I. 4: Courbes typiques de revenu : cas 2024 [5].

5.1.2.3. Séquence de précipitation

A. Alliages d'aluminium - cuivre (serie2000)

La séquence de décomposition est la suivante :

Solution solide initiale \rightarrow zones GP \rightarrow θ'' \rightarrow θ' \rightarrow θ -Al₂Cu

Les courbes de solvus métastables des zones **GP** et des phases de transition comme le montre la figure I.6 sont données sur les zones GP sont formées de disques plans parallèles aux plans $\{100\}$ de la matrice, notés $\{100\}$ Al. Elles seraient constituées soit de monocouches, soit de couches superposées pouvant contenir jusqu'à 50 % d'atomes de cuivre (25 à 45 % d'après Hono et coll.). Les structures des précipités sont représentées sur La phase θ'' , cohérente, précipite sous forme de plaquettes parallèles aux plans $\{100\}$ de la matrice, soit par précipitation homogène en présence des zones GP, soit par précipitation hétérogène sur les zones GP. La phase θ' semi-cohérente précipite en plaquettes préférentiellement par germination hétérogène et croissance sur les dislocations, au détriment de la phase θ'' cohérente, lors d'un sur-revenu ou après un écrouissage entre la trempe et le

revenu. La précipitation séquentielle ou mixte de ces phases métastables conduit à un durcissement structural progressif avec la durée du revenu [8].

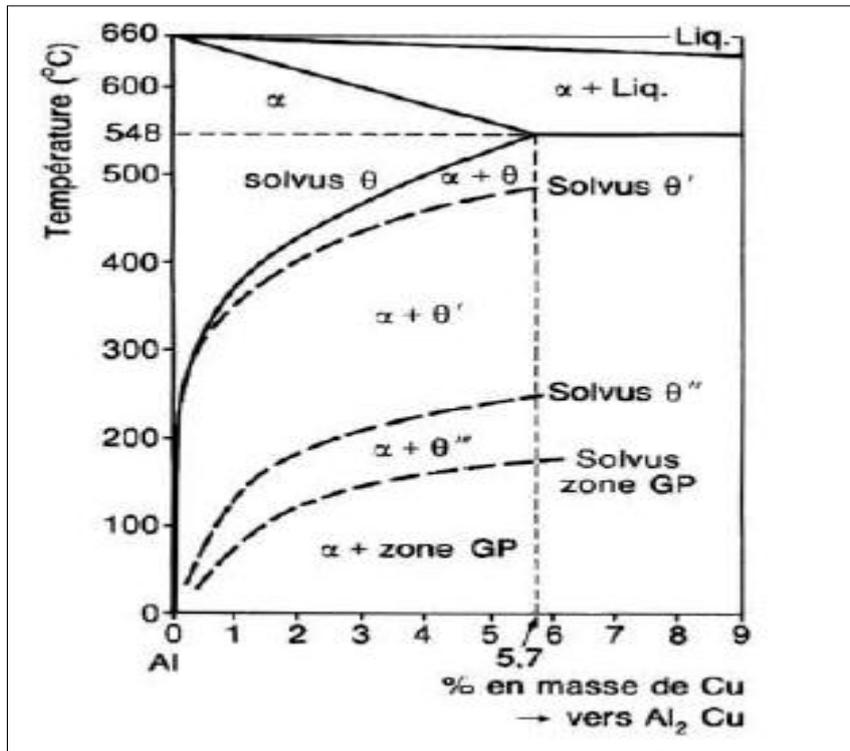


Figure I. 5: diagramme d'équilibre Al-Cu [8].

A.1. Les zones de GUINIER-PRESTON ou GP

Au cours du maintien de l'alliage à température ambiante ou à basse température après la trempe, la solution solide sursaturée est donc métastable. Au cours de cette phase, appelée maturation ou encore vieillissement naturel, l'alliage durcit progressivement et spontanément et la solution solide se décompose pour donner naissance à la formation de petits amas d'atomes de soluté (les zones de Guinier-Preston ou zone GP) en très grande densité (de l'ordre de 10^{17} à $10^{18}/\text{cm}^3$) : c'est la pré- précipitation. Ces amas ou essaims d'atomes sont toujours situés aux nœuds du réseau de la matrice aluminium, et sont constitués de petites portions de plans cristallographiques du réseau d'aluminium enrichis en atomes de soluté. Ces zones GP introduisent des distorsions élastiques dans le réseau de la matrice. L'enrichissement chimique local en soluté et les déformations élastiques qui en résultent expliquent que dans certains cas, cette précipitation est facilitée par la présence de défauts de structure tels que les dislocations qui favorisent une diffusion plus élevée des atomes solutés ou accommodent des champs de déformation élastique adaptés [8].

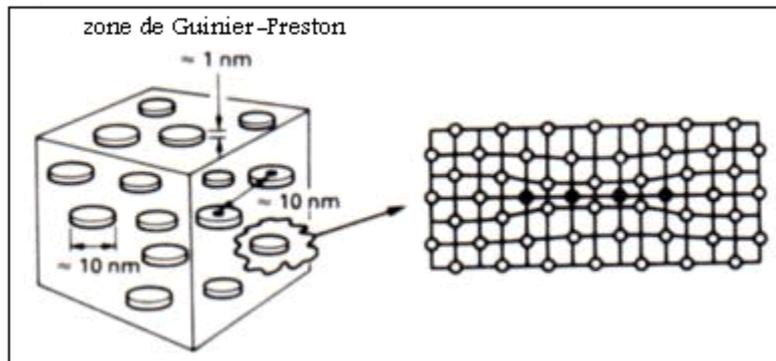


Figure I. 6 : les zones de Guinier-Preston [9].

A.1.1. Formation des précipités θ''

Certaines zones GP croissent pour former les précipités θ'' . Les autres zones GP se dissolvent alors et le cuivre ainsi libéré est incorporé par diffusion aux précipités θ'' qui grossissent.

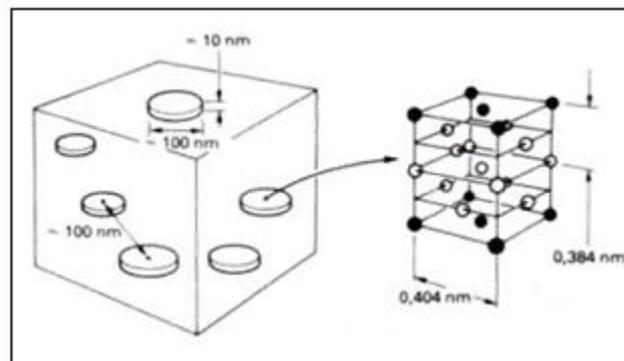


Figure I. 7 : Formation des précipités θ'' [9].

Les faces des disques sont cohérentes avec la matrice. Les côtés des disques le sont aussi mais l'écart paramétrique génère des contraintes élastiques de cohérence.

A.1.2. Formation des zones θ'

Des précipités θ' germent sur les dislocations de la matrice. Les précipités θ'' se dissolvent alors et le cuivre libéré est incorporé à la phase θ' qui grossit (**figure I.8**).

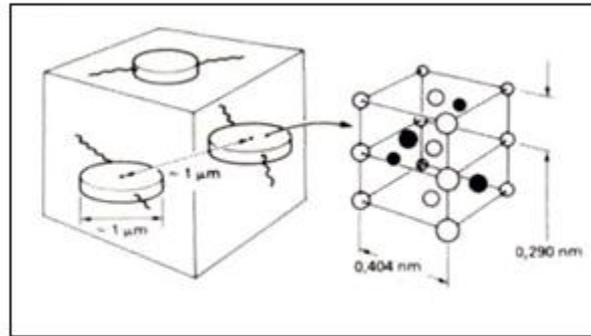


Figure I. 8 : Formation des précipités θ' [9].

A.1.3. Formation de la phase d'équilibre θ

La phase d'équilibre θ (Al_2Cu) germe aux joints des grains et aux interfaces ($\theta'/\text{matrice}$) comme le montre la figure I.9. Les précipités θ' se dissolvent et transfèrent le cuivre à la phase θ qui précipite. Le précipité Al_2Cu est complètement incohérent avec la matrice. Il ne croît plus sous forme de disques, mais sous forme de globules [15].

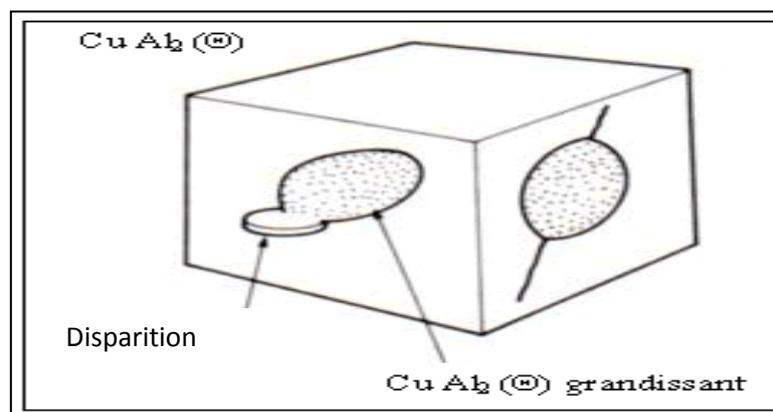


Figure I. 9 : Formation de la phase d'équilibre [9].

6. Domaines d'application de l'aluminium

Les domaines d'applications des alliages d'aluminium sont innombrables et touchent pratiquement tous les secteurs de l'activité humaine, qu'elle soit industrielle, commerciale, artistique, etc. [11].

✓ Aéronautique

En 1903, les frères Wright écrivent une page de l'histoire de l'aviation en réalisant le premier vol mondial propulsé par un moteur allégé à l'aide d'éléments en aluminium. Aujourd'hui, l'aluminium joue un rôle essentiel dans l'industrie aéronautique. Il représente plus de 60% du poids structurel de l'Airbus A380, et jusqu'à 80% pour les appareils destinés aux courts et moyen-courriers.

✓ Les applications marines

C'est dans les années 1920 que les applications marines de l'aluminium ont commencé à se répandre grâce au développement de nouveaux alliages pour ce marché. Aujourd'hui, plus de 1 000 navires à grande vitesse sont en service. La coque de la plupart d'entre eux est en aluminium, les superstructures sont toujours en aluminium et plus de la moitié des yachts de luxe ont leurs coques en aluminium.

✓ Industrie ferroviaire

Dans les années 1980, l'aluminium devient le métal de prédilection pour réduire les coûts d'utilisation et augmenter l'accélération des métros, des tramways, des trains interurbains (TER) et des trains à grande vitesse (TGV). En 1996, la SNCF met en service le TGV Duplex. Il permet de transporter 40% de passagers supplémentaires et, grâce à sa structure en aluminium, il pèse 12% de moins que la version en acier à un seul étage [12].

✓ Emballage

Boîtes de conserve, boîtes de boisson, feuille mince... L'aluminium n'est pas toxique, il est facile à mettre en forme, il a une bonne résistance à la corrosion et peut être recyclé économiquement. Pour ces raisons l'aluminium est très utilisé pour les boîtes boissons (100 % aux États-Unis, 50 % en Europe qui est en retard pour le recyclage des boîtes), beaucoup de produits sont enveloppés dans de la feuille mince aluminium avec ou sans papier (aluminium ménager, beurre, cigarettes, chocolat...) [13].

*Chapitre II : Soudage : procédés,
phénomènes physiques et
métallurgiques.*

1. Introduction

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage [14].

2. Définition du soudage

Cette opération consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est voisine de celle du matériau constituant les éléments à réunir.

Il convient de souligner ici l'importance que prend le terme continuité qui sous-entend à la fois :

- celle provenant des forces de liaisons atomiques (ou moléculaires).
- celle découlant de la géométrie des parties assemblées.
- et, à un degré moindre, celle résultant des constituants chimiques, physico-chimiques donc des caractéristiques physiques des parties assemblées qui seront par la suite définies par le terme matériau de base [15].

3. Condition d'installation de la liaison métallique

Installer la liaison métallique consisterait, théoriquement, à rapprocher les surfaces à unir de telle sorte que les atomes superficiels parviennent à des distances de l'ordre de grandeur des distances inter-nœuds de leur système cristallin propre. Cette opération, qui supposerait au départ que les surfaces soient chimiquement propres et dans un état de poli spéculaire, n'est pas réalisable pratiquement.

Donc les deux conditions d'installation de la liaison métallique sont : l'activation de la surface et l'élimination des gênes.

3.1. Processus d'activation de surface

Il existe trois types d'activation de surface :

- le plus efficace est la fusion qui, simultanément, peut assurer leur nettoyage. La liaison métallique est créée par la solidification. Différents processus peuvent être mis en œuvre:
 - Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle et participent donc à la formation d'un bain de métal fondu (avec, éventuellement, l'addition d'un métal d'apport) qui se solidifie sans action mécanique.
 - Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle mais une action mécanique extérieure chasse le métal fondu et crée l'assemblage en mettant en contact les surfaces à la température du solide.
 - Les deux pièces à assembler subissent une fusion localisée et participent à la formation d'un noyau captif de métal fondu qui au cours de la solidification est compacté par l'action d'un effort extérieur de compression.
- Activation de surface par échauffement sans fusion. En général elle est complétée par une action mécanique qui permet, en outre le nettoyage et l'amélioration du contact des surfaces à assembler.
- Activation de surface par action mécanique et sans échauffement global notable des pièces à assembler. Cette action mécanique provoque une plastification de l'extrême couche de chaque surface et engendre un échauffement très localisé qui permet l'établissement de la liaison métallique.

3.2. Elimination des gênes à l'installation de la liaison

Les gênes à l'installation de la liaison métallique peuvent être de diverses sortes :

- **Irrégularités géométriques de surface** : seront susceptibles de perturber l'installation à la liaison métallique dans tous les cas où il n'y aura pas fusion superficielle des pièces à assembler. il sera alors nécessaire de procéder à une préparation des surfaces par action mécanique (meulage, usinage..).
- **Pollution de la surface (oxydes, graisses, humidité..)** : elle devra être éliminée par une action mécanique (sablage, meulage...) ou chimique (solvants, décapage, séchage...).
- **Éléments chimiques apportés par l'atmosphère ambiante** : l'opération de soudage étant généralement réalisé à l'air, ce sont surtout l'oxygène, l'azote et l'hydrogène qui peuvent être nocifs :

- Formation d'oxydes métalliques qui constituent des inclusions dans le métal solidifié ;
- Formation de soufflures dans le métal fondu par suite une baisse de la solubilité, cette soufflure peut être aggravée par formation des gaz par des réactions chimiques avec le métal [16].

4. Procédés de soudage

Dans le domaine du soudage, la classification méthodique des procédés peut s'effectuer en considérant diverses caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre ; le (ou les) paramètre(s) physique(s) (température, pression, milieu extérieur) intervenant dans le processus de continuité ;
- Le mode d'élaboration de la continuité (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- la morphologie de la liaison.

Le tableau II.1 dresse un récapitulatif des procédés de soudage les plus courants, avec un classement prioritairement basé selon le type d'énergie mise en œuvre [15].

Tableau II. 1 : Classification des procédés de soudage [15].

Type d'énergie		Désignation
Réaction chimique exothermique		Oxy-gaz Aluminothermique
Combinée (chimique + mécanique)		À la forge Diffusion
Mécanique		Explosion Friction Pression Ultrasons
Électrique à l'arc	entre 2 électrodes	Hydrogène atomique Plasma soufflé
	1 électrode réfractaire	Électrode graphite

		TIG Plasma transféré
	1 électrode fusible	Électrode enrobée
	1 fil électrode fusible	MIG Fil fourré /MAG fil fourré Sous flux en poudre Vertical sous gaz
	entre pièces	Goujons Arc tournant
Électrique par effet Joule	Résistance	Par points À la molette Par bossages Étincelage En bout
	Divers	Induction Vertical sous laitier
Rayonnement		Faisceau laser Faisceau d'électrons

Mais d'une manière très globale on classe les procédés de soudage sous deux importantes catégories :

4.1. 1ère catégorie : soudage par pression

Le soudage par pression consiste à amener le métal à l'état plastique par chauffage et de les réunir par pression ou par chocs sans avoir recours au métal d'apport. L'énergie dans ce type de procédé est mécanique. Dans ce cas la qualité des soudures dépend de la température à laquelle le métal est porté, ainsi que la force extérieure.

4.2.2ème catégorie : Soudage par fusion

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimiques...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique ;
- Soudage à l'arc sous gaz de protection ;

- Soudage par jet de plasma ;
- Soudage sous flux ;
- Soudage par résistance [20].

Les procédés de soudage par fusion mettent en jeu une source de chaleur dont la puissance spécifique est généralement élevée, dans le but de limiter les pertes calorifiques par conduction et convection, et il en résulte des modifications d'ordre physique, chimique et structural.

Physique

Sous l'effet des phénomènes thermomécaniques générés par le comportement en plasticité de dilatation et plasticité de transformation des matériaux, des modifications de forme sont observables et des contraintes résiduelles sont créées. Ces modifications sont le plus souvent nuisibles.

Chimique

La composition chimique de la zone fondue est avant tout conditionnée par la dilution. Sous l'action de la température de la source et du milieu extérieur en son voisinage, des modifications de composition chimique sont prévisibles et peuvent correspondre :

- soit à une perte d'éléments volatils constituant l'alliage d'apport en cours de transfert ou dans le bain de fusion.
- soit à une évolution par des échanges au contact d'un laitier ou d'un gaz protecteur.
- soit à une introduction d'éléments indésirables dans le bain de fusion. Sous l'action de l'air ambiant, une contamination du matériau de base porté à haute température est possible dans le cas des métaux ou alliages très réactifs (Ti, Zr et leurs alliages particuliers).

Métallurgique et structural

En un point quelconque de l'assemblage soudé en cours d'exécution, est observable un cycle thermique ($T = \Phi(t)$) comme le montre la figure II.1 qui résulte, soit du rapprochement puis de l'éloignement, soit de l'émission puis de la cessation d'activité de la source calorifique, conduisant encore à une série de modifications possibles du matériau.

- Modifications lors de la **phase d'échauffement**, et selon la température maximale atteinte :
 - élimination des états écrouis par restauration/recristallisation ;

- revenu et sur-revenu des états trempés ;
 - mise hors solution de constituants (précipitation, vieillissement, durcissement...)
 - mise en solution avec ou sans changement de phase (austénitisation des aciers, mise en solution solide α des alliages d'aluminium) ;
 - grossissement de grain et surchauffe ;
 - fusion (et dissolution des gaz) dans le liquide.
- Modifications lors de la **phase de refroidissement**, et selon la température maximale atteinte, le temps de maintien à cette température et la vitesse de refroidissement :
- transformation avec création de constituants hors d'équilibre (dans le cas des aciers, la transformation peut être martensitique, perlitique ou intermédiaire) ;
 - précipitations de composés ;
 - diffusion des gaz (en particulier H+) [15].

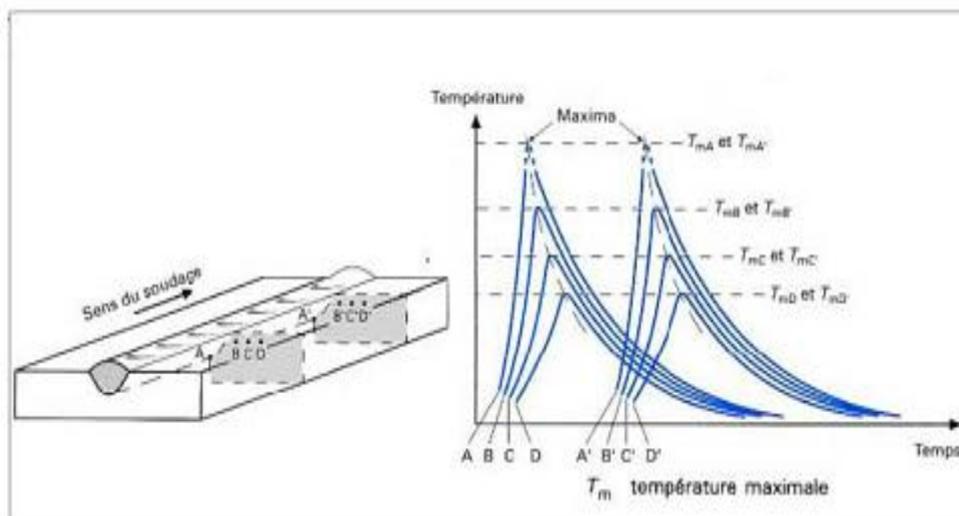


Figure II. 1 : schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [21].

4.2.1. Principaux procédés de soudage à l'arc

Ils se caractérisent chacun par deux éléments essentiels :

- La nature de l'électrode: baguette, fil fusible ou tige réfractaire ;
- La nature du milieu : gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante [17].

On distingue ainsi :

- Le **soudage à l'électrode enrobée** (ou baguette), se conduisant à la main et appelé également soudage manuel, la **figure II.2** résume son principe

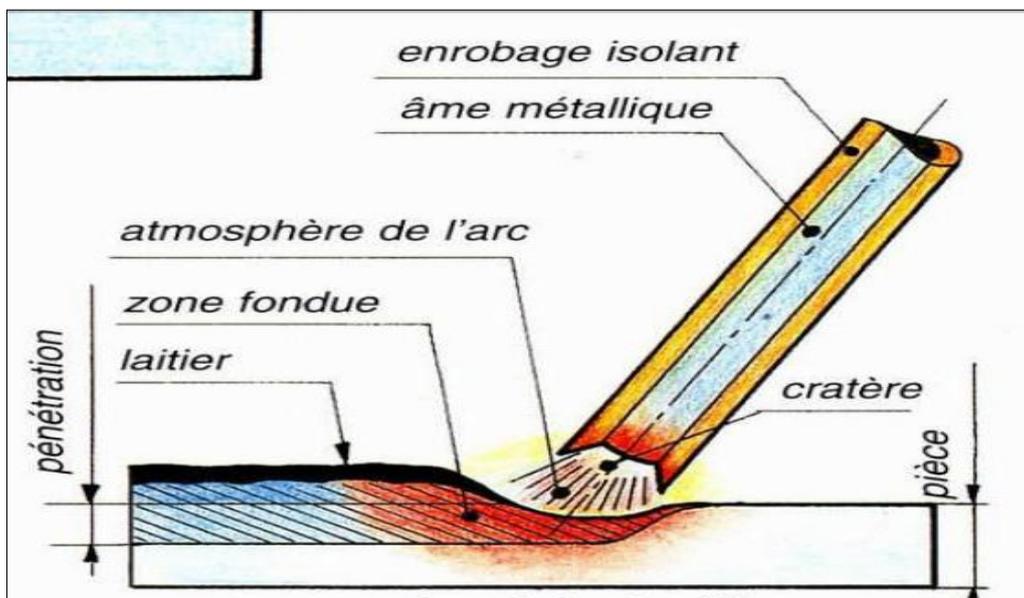


Figure II. 2 : Le soudage à l'électrode enrobée [19].

- Le **soudage sous flux en poudre**, utilisant comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue, le flux assure la protection du bain. La figure suivante résume le principe de ce procédé :

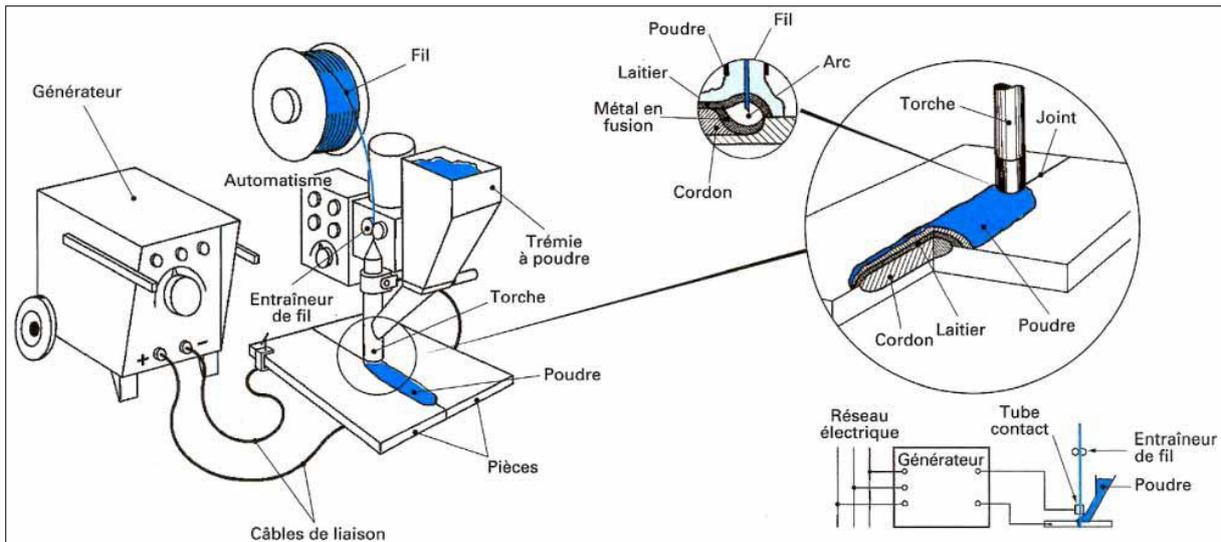


Figure II. 3 : Soudage sous flux en poudre : principe [17].

- Les soudages semi-automatique et automatique sous gaz. L'électrode est également un fil fusible, et la protection est réalisée par un gaz inerte (soudage MIG) ou actif (soudage MAG). La figure suivante décrit le principe :

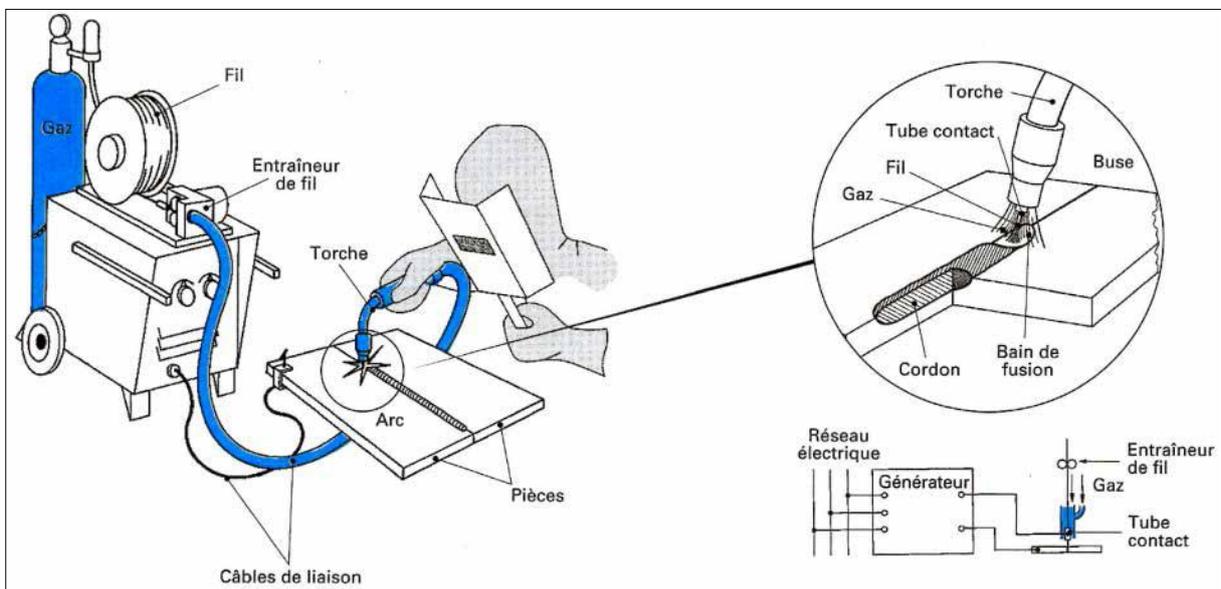


Figure II. 4 : Soudage semi-automatique : principe [17].

Le soudage à électrode de tungstène non fusible (TIG). La protection est réalisée par un gaz nécessairement inerte. L'apport de métal, facultatif, s'effectue indépendamment [17].

4.2.1.1. Le procédé TIG

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas).

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrodes fusibles [17].

Le principe du soudage à l'électrode réfractaire est représenté sur la **figure II.5** sous sa forme manuelle.

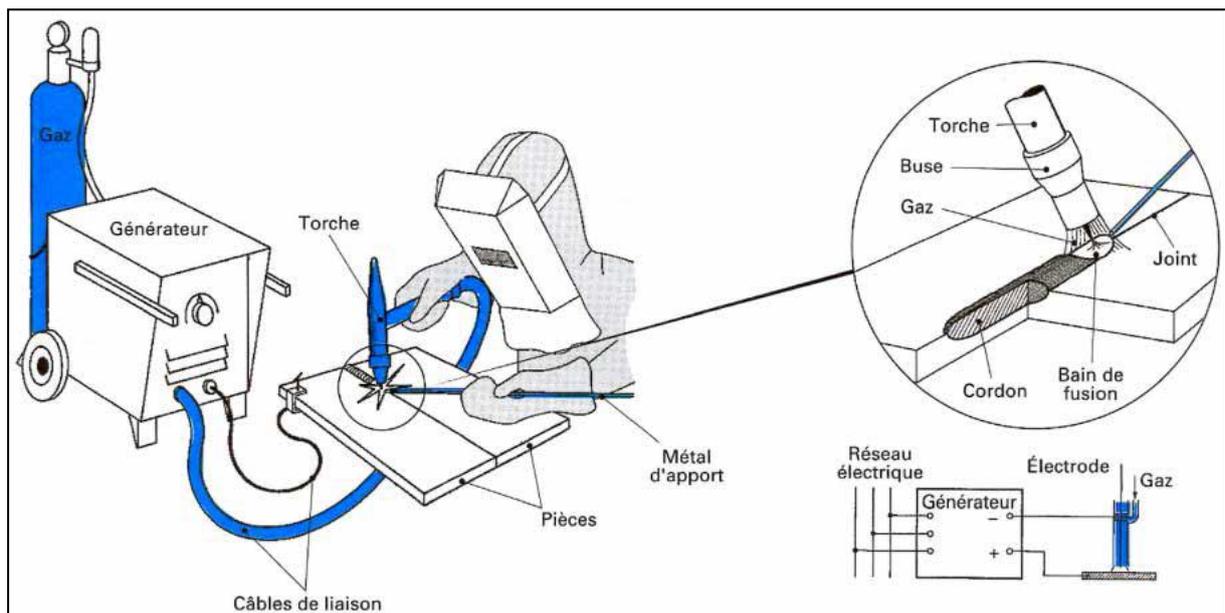


Figure II. 5 : Soudage à l'électrode réfractaire : principe [17].

4.2.1.1.1.Électrode

Le tungstène, pur ou additionné de thorium (1 à 2 %) et/ou de zirconium (0,5 %), est l'unique matériau susceptible de constituer l'électrode réfractaire du procédé TIG. Compte tenu des densités de courant admissibles, les électrodes de tungstène ont des diamètres de quelques millimètres. Les longueurs, de quelques décimètres, sont déterminées par les dimensions des torches [17].

Une électrode en tungstène pur possède un point de fusion de 3400°C, permettent de souder les alliages d'aluminium et le bout doit être rond [18].

4.2.1.1.2. Protection gazeuse

Elle Protège le métal en fusion et l'électrode tungstène des agents oxydants de l'air ambiant. Le gaz est utilisé pour favoriser l'ionisation de l'arc et pour travailler en atmosphère inerte. (Inerte) signifiant que le gaz n'introduit pas de changements significatifs du point de vue chimique. Le gaz protecteur inerte ne prend pas une part active dans le procédé de soudage [18].

Les seuls gaz inertes utilisables du fait de leurs caractéristiques dans le procédé TIG sont l'**argon** et l'**hélium** on peut également employer un mélange des deux et obtenir un compromis entre leurs effets respectifs, ou les additionner d'un réducteur [17].

4.2.1.1.3. Métal d'apport

Les soudures en chanfrein nécessitent un apport de métal. Celui-ci est introduit directement à l'avant du bain, à partir de baguettes nues, en soudage manuel [17].

Pour les épaisseurs fines, il est possible de souder sans apport de métal .Les épaisseurs supérieure à 1,5 mm un apport de métal est indispensable. La nuance du métal et son diamètre sont à étudier en fonction de la nature du métal de base et de son épaisseur[18].

4.2.1.1.4. Courant d'arc

On peut employer en soudage TIG l'un des trois arrangements suivants :

1. Courant continu

1.1.Courant continu polarité directe

C'est en réalité un courant constant affecté d'une ondulation caractérisée par son taux T , qui résulte de la technologie du générateur, surtout lorsqu'il est un redresseur polyphasé. C'est alors une fonction périodique alternative à la fréquence du réseau ou à l'un de ses multiples. La présence d'une ondulation de courant se traduit par l'apparition d'ondulation de fusion à la surface du cordon ; elle n'est pas gênante lorsqu'elle est limitée. Dans le cas contraire, elle peut correspondre à un élargissement inutile en surface de la zone thermiquement affectée.

1.2. Courant continu, polarité inverse

La pièce devient cathode. Son pouvoir émissif est essentiel dans la conduite de ce type de soudage. Dans le cas des alliages d'aluminium, la polarité inverse a un effet décapant par des oxydes, libération d'oxygène et d'électrons de liaison. La température à la pièce est moindre, et cela permet de diminuer ses effets, si besoin est, (métaux tendres, micro soudage), la figure suivante entre l'effet du courant continu sur la soudure :

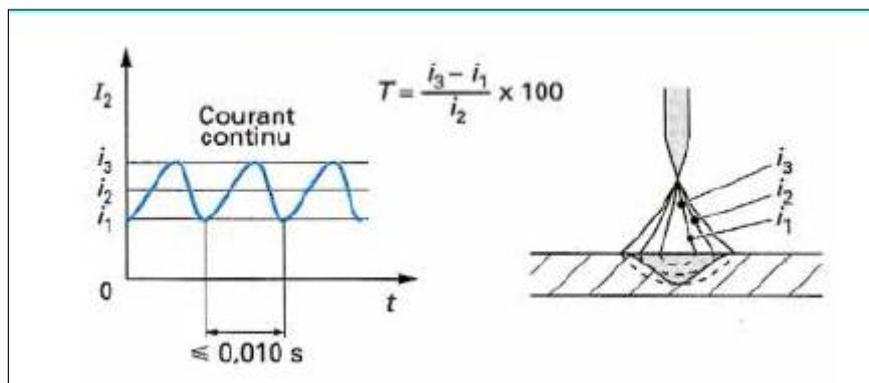


Figure II. 6: Effet du courant continu sur la soudure [17].

2. Courant alternatif

Il allie les deux effets précédents et se justifie essentiellement dans le soudage des alliages d'aluminium et de magnésium. En fait, jusqu'à ces derniers temps, cette situation a été facilement obtenue par l'emploi de générateurs alternatifs à 50 Hz et pouvant fournir, grâce à des concepts électrotechniques, des ondes carrées. Actuellement, l'électronique de puissance permet de réaliser des générateurs délivrant une polarité variable plus appropriée. La séquence la plus efficace consiste à diminuer le temps inverse autour de 3 ms, d'augmenter le courant correspondant à 1,3fois l'intensité directe, réglée elle pour une durée de 20 ms. L'effet décapant est obtenu sans affecter l'effet thermique principal [17]. La figure II.7 montre l'effet du courant alternatif sur la soudure.

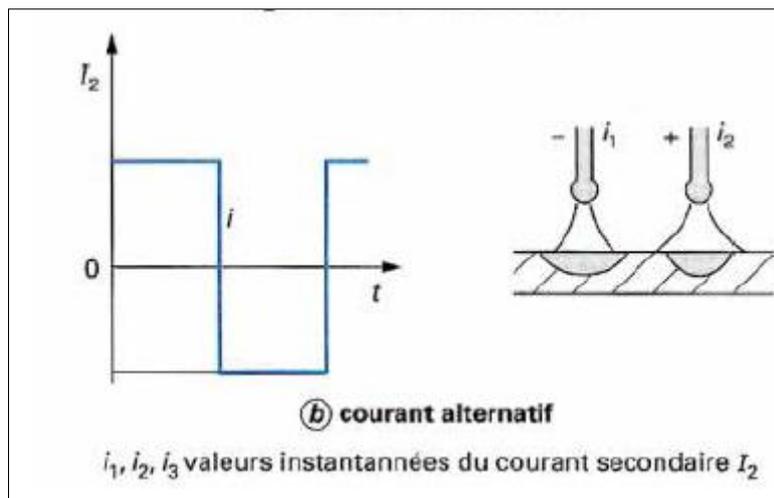


Figure II. 7 : Effet du courant alternatif sur la soudure [17].

La nature du courant se traduit par des différences de morphologies du bain de fusion comme le montre la figure II.8

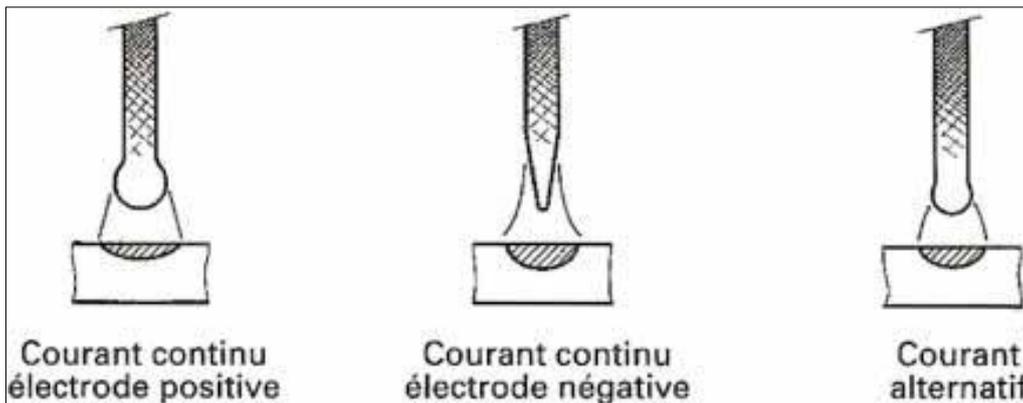


Figure II. 8 : Formes des électrodes en fonction du courant [17].

3. Le courant pulsé

Le soudage TIG par impulsion consiste à faire varier périodiquement l'intensité du courant de soudage d'une valeur de base I_b à une valeur de pointe I_p (figure II.9). Il en résulte une valeur moyenne du courant de soudage $I_m = 1/T \int_0^T i dt$ qui, dans le cas d'ondes rectangulaires (figure II.7) est égale :

$$I = I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b / T$$

- Le courant de pointe I_p ;
- La durée de passage de ce courant t_p ;

- Le courant de base I_b ;
- La durée de passage de ce courant t_b ;
- La valeur moyenne du courant I_e ;
- La durée du cycle T ou la fréquence des impulsions.

Cette modulation du courant permet une régulation du cycle thermique en particulier, il est possible de procéder à la fusion de petite partie seulement du métal de base pendant les temps de passage du courant de pointe I_p , avec solidification au moins partielle pendant les temps de passage du courant de base I_b . Ainsi, la quantité de métal fondu est moins grande, le bain de fusion est moins important, ce qui facilite son maintien en particulier pour le soudage en position. Avec une onde de courant pulsé à basse fréquence, on obtient ainsi un cordon de soudure formé d'une suite de points de soudage se chevauchant. En outre, l'énergie thermique fournie est plus faible que dans le cas du soudage à courant constant I_p , ce qui est préférable du point de vue métallurgique.

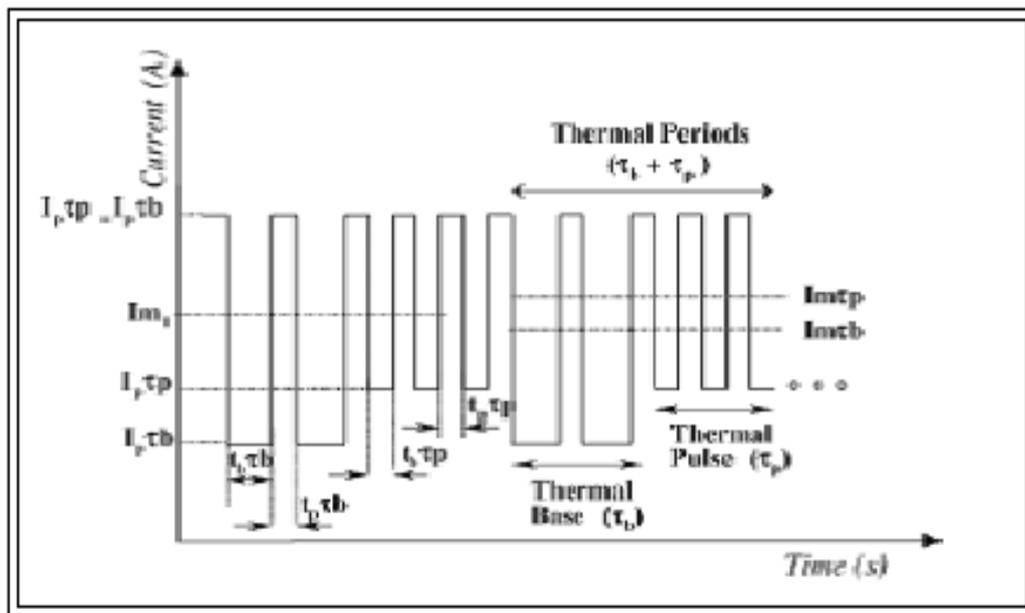
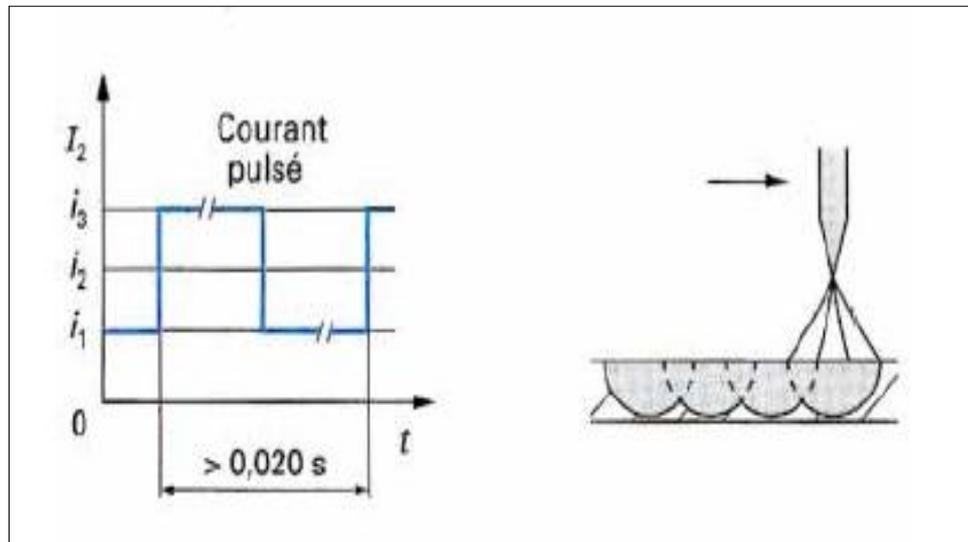


Figure II. 9 : exemple de courant pulsé [22].

La figure II.10 montre l'effet du courant pulsé sur la soudure.



3.1. Durée et fréquence des impulsions

Ces paramètres sont fonction de l'épaisseur de la tôle et des propriétés du matériau, de façon à toujours avoir un temps de passage du courant de base suffisant pour permettre une évacuation satisfaisante sur la vitesse de croissance des cristaux et sur le processus de solidification. Intermédiaire et on peut obtenir des grains ordonnés le long du cordon ou en son milieu.

Les fréquences couramment utilisées vont de 2 à 10 Hz mais sont pénibles pour l'opération en soudage manuel [22].

3.2. Vitesses de soudage

Ce paramètre influence largement la géométrie du joint soudé, c'est-à-dire sa profondeur de pénétration et sa largeur. Si la vitesse de soudage est élevée et le courant efficace faible, la zone thermiquement affectée et la zone fondue restent faibles, ce qui évite la surchauffe du métal de base.

Toutefois, aux vitesses de soudage élevées, des caniveaux peuvent apparaître aux bords de la soudure ; ceux-ci sont dus aux effets de puissance de l'arc, effet qui dépend du courant de soudage [22].

3.3. Avantage des pulsations de courant en soudage e TIG

On conçoit que la possibilité de moduler ainsi les énergies mise en œuvre et donc les apports thermiques à la pièce à souder présente des avantages incontestables :

- La pénétration souhaitée est obtenue par des surintensités passagères et non plus par le passage permanent du courant, ce qui conduit à un volume de bain de fusion plus réduit et donc un bain plus étroit ;
- Limitation de l'apport calorifique, ce qui est bénéfique du point de vue métallurgique ;
- La limitation du volume de métal fondu a comme conséquence une réduction des déformations dues au retrait ;
- L'électrode de tungstène peut généralement supporter pendant des intervalles de temps réduits une densité de courant plus élevés, ce qui conduit à une pénétration plus forte et donc à une augmentation des épaisseurs maximales soudables ;
- On sait que lorsque l'on soude des métaux bons conducteurs de la chaleur, l'intensité du courant de soudage doit se trouver entre une valeur suffisamment élevée pour que la température de fusion puisse être rapidement atteinte et suffisamment basse pour ne pas risquer d'effondrement en fin de soudage lorsque toute la pièce est portée à haute température. Dans le cas du courant pulsé, il y a à chaque pointe de courant un apport de chaleur à une vitesse supérieure à celle de dispersion dans la masse de la pièce, ce qui permet la fusion ; ces bains de fusion étant formés successivement, l'échauffement général de la pièce est limité, ce qui améliore les conditions de soudabilité opératoire à la fin du soudage.
- Le procédé TIG demande que l'accostage des deux pièces à souder soit très précis ; un écartement de quelques dixièmes de millimètres conduit souvent à la formation de deux lignes de fusion au lieu d'un bain unique de soudage. La pulsation du courant conduit, par effet magnétique, à un mouvement incessant de flux et de reflux du métal liquide, ce qui favorise le maintien d'un pont liquide entre les pièces à assembler. Par suite, il y a une meilleure maîtrise de la zone de fusion et un comportement amélioré sur joints mal préparés.

Ces avantages des pulsations de courant conduisent aux conditions suivantes :

- a. Moindre absorption de gaz par la zone de fusion ;
- b. Refroidissement plus rapide ;
- c. Réduction de la zone affectée thermiquement ;
- d. Réduction de la fissuration à chaud ;
- e. Structure à grains fins, résilience et plasticités améliorées ;
- f. Plus grande souplesse opératoire.

D'autre part, on constate qu'il y a un auto-nettoyage de l'électrode de tungstène, de sorte que l'arc est maintenu dans l'axe de l'électrode alors que dans le soudage à courant constant il y a souvent formation d'impuretés ponctuelles d'aspects très brillant, plus émissives que le reste de l'électrode et qui dévient l'arc du côté où elles se forment [22].

La modulation est utilisée avec bénéfice dans les cas suivants : soudage d'épaisseurs inégales, en position, d'alliages d'aluminium ou en accostage difficile. Les générateurs modernes à transistors sont dotés de la fonction courant pulsé. De plus, il est également possible de pulser l'arrivée de fil d'apport à la même fréquence et cela apporte de nouveaux paramètres dans l'emploi de ce procédé [17].

5. Formation de soudure

L'arc est donc la source de chaleur extérieure produisant, localement sur la pièce et indépendamment du transfert de métal, un flux de chaleur d'allure globalement gaussienne et de valeur suffisante pour obtenir un gradient conduisant à la fusion et à la formation du cordon de soudure.

La liaison métallique est obtenue par l'intermédiaire du métal provenant de l'électrode, ou métal déposé, et par l'intermédiaire également des deux zones attenantes, plus ou moins importantes, dans lesquelles le métal de l'électrode s'est dilué dans le métal de base [17]. **La figure II.11** montre les différentes zones de soudure .

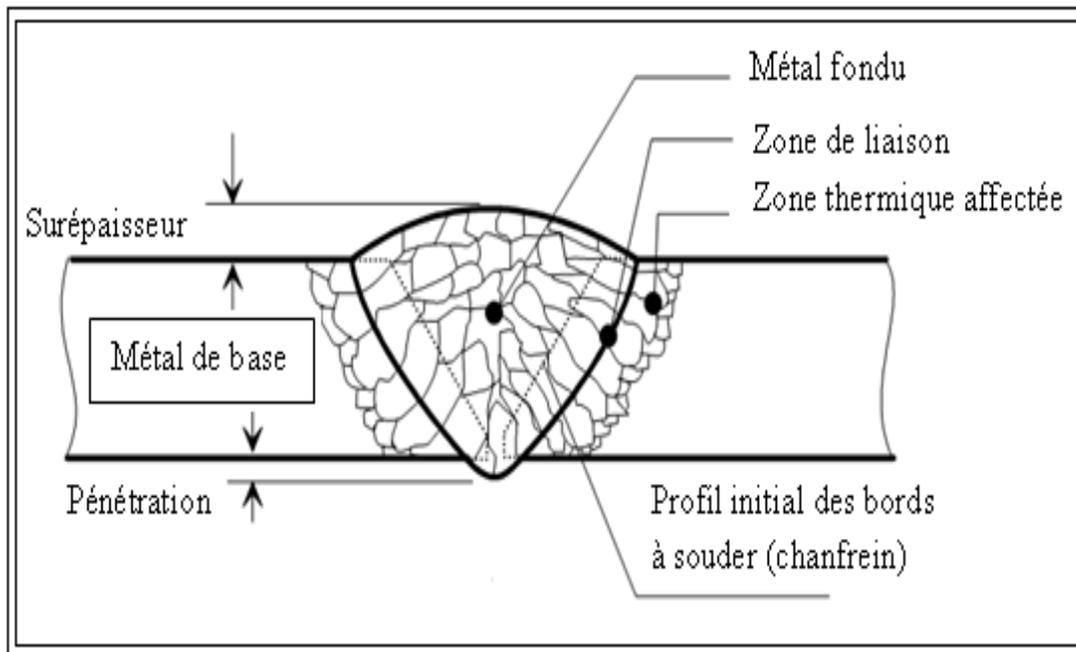


Figure II. 11 : différentes zones de soudure [9].

5.1. Zone fondue

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 précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

5.2. Zone de liaison

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion, elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre.

5.3. Zone affectée thermiquement

Le cycle thermique de soudage provoque au sein de cette zone, à partir de l'état initial, une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement. Chaque transformation étant caractérisée par une température minimale, la limite extérieure de la zone affectée correspondante coïncide avec l'isotherme caractéristique de cette température.

5.4. Zone de métal de base

Le métal de base est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que la structure métallurgique inchangé [23].

6. Comportement des différents alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium ne se comportent pas tous de manière identique, et trois classes d'alliages sont à distinguer :

- Les alliages sans durcissement structural (familles 1000,3000 et 5000). Ils ont une bonne soudabilité. Lorsqu'ils sont utilisés à l'état recuit, ils ne subissent pas de perte sensible de caractéristiques mécaniques au niveau de la soudure. En revanche lorsqu'ils sont à l'état écroui, le durcissement dû à l'écrouissage disparaît au voisinage de la soudure ;
- Les alliages à durcissement structural exempts de cuivre (famille 6000 et certains alliages de la famille 7000).Le cycle thermique de soudage affecte les caractéristiques mécaniques du métal de base qui est généralement à l'état trempé-revenu. Cette perte est définitive pour les alliages de la famille 6000 sauf s'il est possible d'effectuer un nouveau traitement de revenu sur la structure soudée. Les alliages de la famille 7000 retrouvent une partie notable de leurs caractéristiques initiales par maturation à la température ordinaire ;
- Les alliages à durcissement structural contenant du cuivre (famille 2000 et certains alliages de la famille 7000) sont dans l'ensemble difficilement soudables parce que, d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure, et que, d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Toutefois, ces alliages sont plus ou moins sensibles à ces phénomènes.

L'utilisation du procédé TIG à grande concentration d'énergie et a protection gageuse accrue permet une amélioration notable des résultats [3].

Chapitre III :

Dispositif expérimental

1. Matériaux

1.1. Composition chimique du métal de base

L'alliage étudié est le 2219T3. C'est un alliage Al-Cu-Mn qui présente un durcissement structural après traitement thermique. L'état initial de l'alliage est dénommé T3. Cet état correspond à un traitement de trempe après mise en solution (550°C environ) suivi d'un laminage à froid et mûrissement (vieillessement naturel).

- On a réalisé des soudures sans métal d'apport sur des plaques carrées (150x150) mm de surface et 2mm d'épaisseur ;
- Et des tôles de 2 mm d'épaisseur avec métal d'apport ; la composition chimique donnée par analyse EDX est présentée par le **tableau III.1**.

Tableau III. 1: composition chimique du 2219.

Composition	Cu	Mn	Al
Teneur en % Massique	5,92	0,22	93,85

Et d'après la bibliographie [24] l'alliage 2219 peut contenir 0,3 % Fe, 0,2 Si, et 0,1 Zn.

1.2. Composition chimique du métal d'apport

Le métal d'apport est un alliage d'aluminium de nuance ER5553 selon la norme américaine AWS A5.12. (American Welding Society) avec une composition chimique donnée par le tableau suivant :

Tableau III. 2 : composition chimique du métal d'apport ER5553 [25]

Elément	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Cr	Ti
Teneur %massique	0.25	0.10	2,4-3	0,5-1	0.25	0.40	0.05-0.2	≤0,15

2. Préparation de surface

L'assemblage de pièces en aluminium nécessite ainsi une préparation particulière afin de minimiser pour ne pas dire éliminer les défauts (porosités, fissuration à chaud). Il faut trouver les bonnes procédures de nettoyage des bords à souder, mais aussi la façon d'isoler de toute contamination extérieure (poussières, graisses, autres alliages métalliques) des alliages

soumis à une opération de soudage. Les techniques de nettoyage des bords à souder sont soit chimiques, soit mécanique où la combinaison des deux [26].

La figure III.1 montre une brosse métallique qui était utilisé pour le nettoyage des plaques

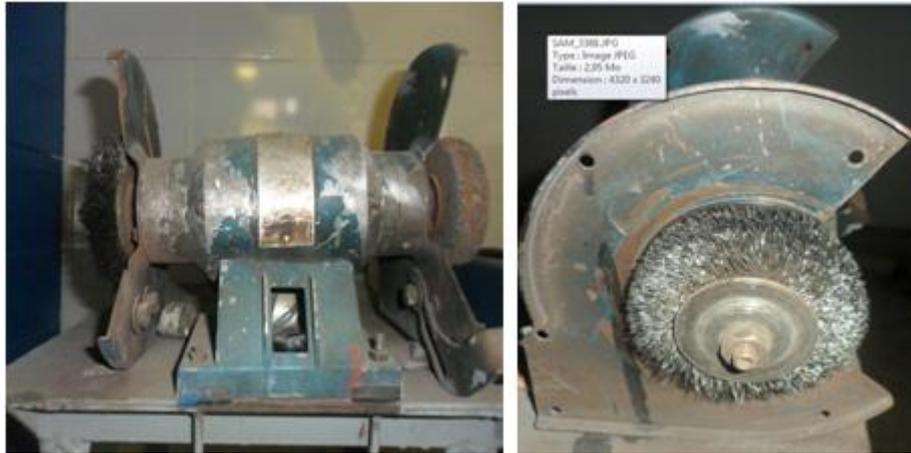


Figure III. 1: brosse métallique.

3. Equipements du poste de soudage TIG

Les procédures expérimentales sont entièrement conçus, réalisés et mise au point à l'atelier de soudage du CSC dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cette équipement est présentée dans **la figure III.2**.



Figure III. 2:Le poste de soudage est de type: FIM467-A Lincoln SQUAREWAVE TIG 355 CR99-15.

Ce type de poste TIG possède toutes les caractéristiques citées déjà dont principalement la possibilité d'utiliser un courant continu avec un amorçage de l'arc sans contact à haute fréquence (HF) pour le soudage des aciers inox, un courant alternatif avec une HF en continue avec la fonction SQUARE WAVES (onde carrée) qui permet de favoriser l'une ou l'autre des actions de pénétration ou de nettoyage de l'oxyde d'alumine (dans le cas du soudage des alliages d'aluminium) et un courant pulsé avec différentes fréquences. Autres caractéristiques de ce poste, l'acquisition des paramètres de soudage (Intensité, Tension) grâce à un afficheur digital et le suivi des différentes étapes du cycle de soudage.

4. Enrobage

Le matériel utilisé est présenté dans la figure ci-dessous :

	
ENROBAGE À FROID TECHNOVIT 4071	ACCESSOIRES POUR L'ENROBAGE Moules d'enrobage en caoutchouc silicone

Figure III. 3: Enrobage à froid.

5. Polissage

Des draps de différentes granulométries sont employés : 80, 120, 180, 400, 600, 800, 1000

(Figure II.4)

DRAPS DE POLISSAGE	
PAPIERS	GRAIN
Papier abrasif rigoureux	120 180 400
Papier abrasif lisse	600 1000

Figure III. 4: Papiers abrasifs.

Pour affiner le polissage, il est exigé de passer par l'étape de finition qui consiste à passer l'échantillon par le papier feutre avec une solution d'alumine de 5 et 3 μm et suivis d'une pâte diamantée soluble dans l'eau (0,3 μm), **figure II.4.**

	
<p>ABRASIFS À BASE DE DIAMANTS PÂTE DIAMANTÉE • soluble à l'eau</p>	<p>SUSPENSION DIAMANTÉE • soluble à l'eau (POLYCRISTALLINE (CHROMIC OXIDE POLISHING ABRASIVE)).</p>

Figure III. 5:Polissage de finition.

Le polissage est réalisé au niveau du département de métallurgie à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP). La polisseuse utilisée est de marque : MECAPOL P200.**figure III.6.**



Figure III. 6: la polisseuse utilisée de type« MECAPOL P200 ».

6. Microscopie optique

L'observation microscopique a été effectuée au niveau du laboratoire de Métallurgie à l'Ecole Nationale Polytechnique, le microscope utilisé est de type (Optika view), avec des grossissements de (Gx10, Gx50), **figure III.7.**

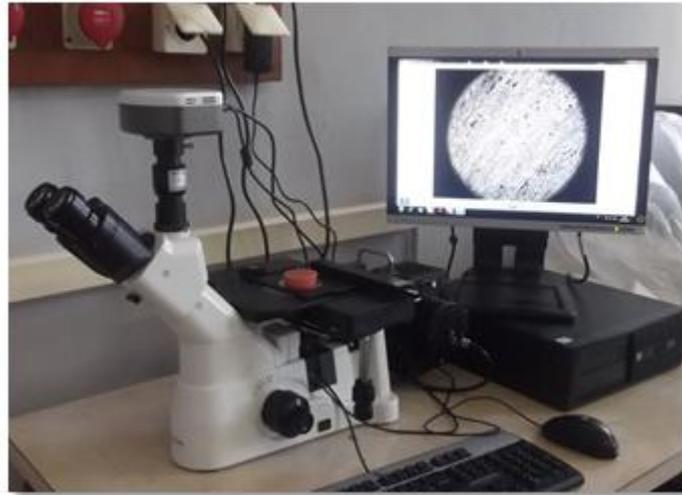


Figure III. 7 : microscope optique.

7. Microscope Electronique à Balayage

7.1. Principe de Microscope Electronique à Balayage

Le fonctionnement du MEB est basé sur l'émission d'un faisceau d'électrons produit par une cathode qui balaye totalement la surface de l'échantillon. L'interaction du faisceau avec l'échantillon provoque un certain nombre d'émission électronique et électromagnétique Figure III.8.

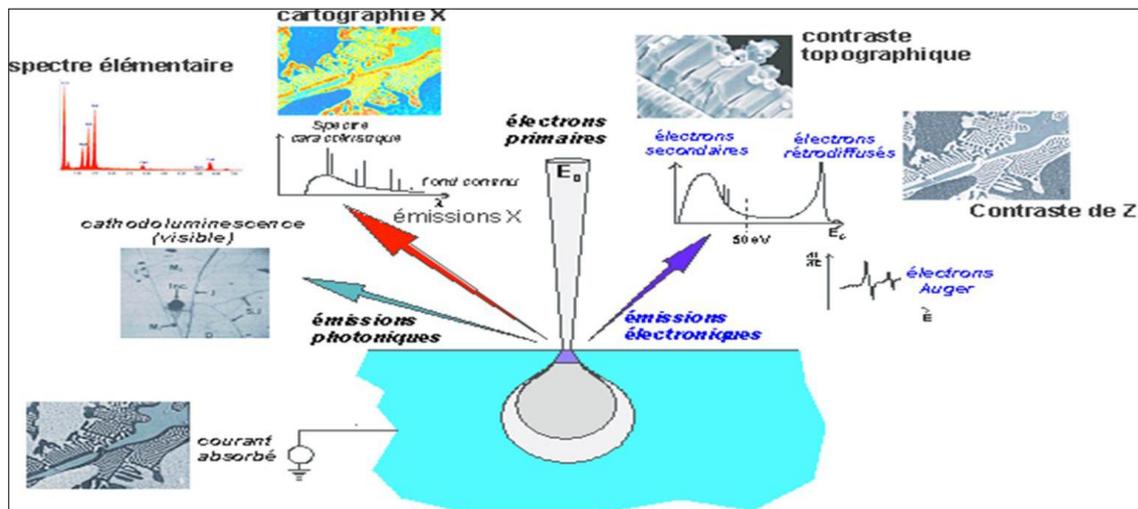


Figure III. 8: les interactions électron-matière et les émissions associées [28].

Ces électrons qui irradient notre échantillon pénètrent dans le matériau et provoquent un volume appelé " poire d'interaction " (figure III.9), le volume de cette poire dépend de numéro atomique moyen de l'échantillon et de l'énergie des électrons incidents. Dans ce

volume d'interaction les électrons du faisceau perdent leur énergie par collision multiple avec les atomes de matériaux génèrent de nombreux phénomènes secondaires :

- rémission d'électrons et de photon ;
- absorption d'électron ;
- courant induit ;
- potentiel électrique ;
- élévation de la température locale ;
- vibration du réseau [28].

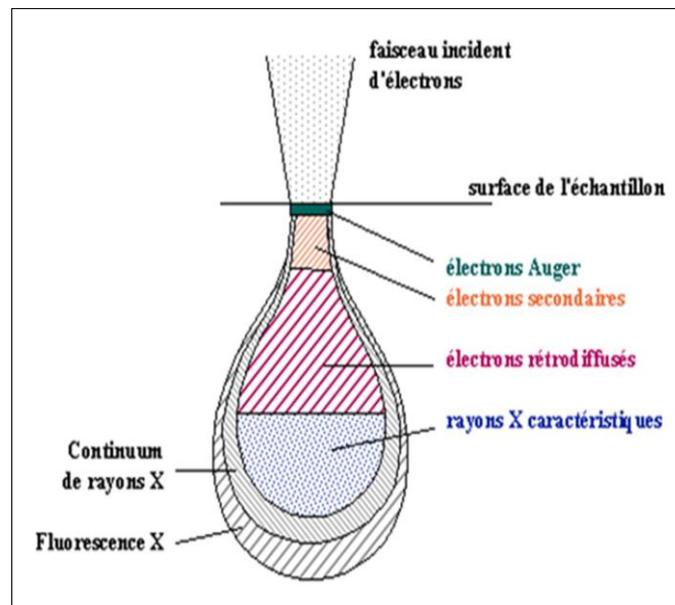


Figure III. 9: Poire d'interaction [28].

7.2. Détection des signaux

Le microscope électronique à balayage possède trois types de détecteur :

- un détecteur des électrons secondaires ;
- un détecteur des électrons rétrodiffusés ;
- un détecteur des photons X ;

Les émissions non détectées se dissipent en chaleur des parois de la chambre de l'échantillon, ou sont mise à la terre.

7.3. Fonctionnement

Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Le microscope à balayage utilise un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon [28]. La figure suivante montre le MEB utilisé à BAB EZZOUAR.



Figure III. 10: microscope électronique à balayage.

8. Diffraction par rayon X

Au cours des dernières décennies, plusieurs techniques de diffraction ont été développées de façon à déterminer la structure et l'étude des propriétés microstructurales de matériaux cristallins. On peut citer, entre autres, la diffraction par rayons X (**Figure III.11**).



Figure III. 11: Diffractomètre des rayons X [29].

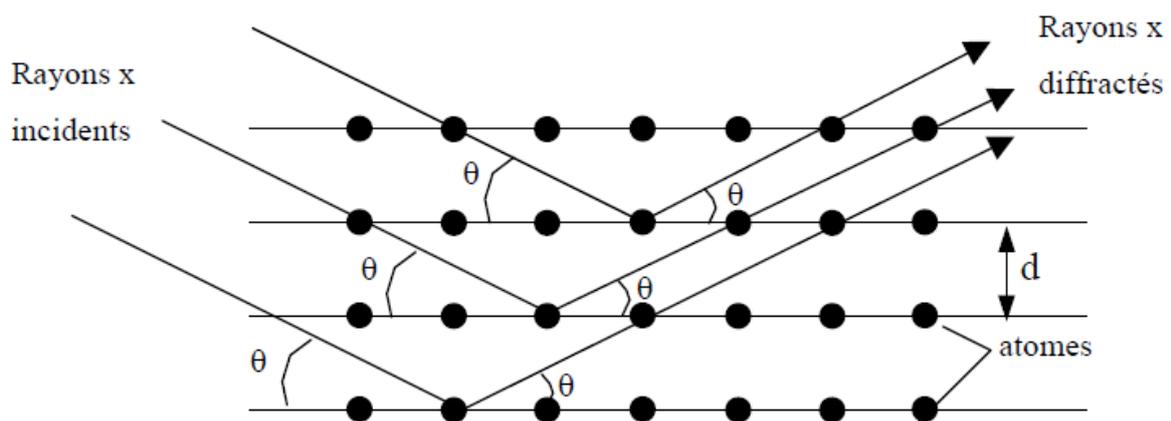


Figure III. 12: Famille de plans réticulaires de distance d , sur lesquels diffracte un faisceau de rayons X [29].

Les rayons X, qui ont des longueurs d'onde inférieures à 1 nm, permettent d'observer ces phénomènes de diffraction par les cristaux. Ainsi, en éclairant un cristal avec un faisceau de rayons X, on obtient une figure de diffraction constituée de pics caractéristiques des plans réticulaires diffractants. La position de chaque pic, c'est à dire l'angle de diffraction θ , dépend de l'orientation et de la distance réticulaire de la famille de plans diffractants (**Figure III.12**). Cet angle θ vérifie la relation de Bragg :

$$2d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Où :

d_{hkl} est la distance réticulaire des plans d'indices (h,k,l) ;

λ la longueur d'onde des rayons X utilisés.

La diffraction de rayons X est donc une technique permettant de caractériser les différentes phases cristallines contenues dans un échantillon, et de suivre leur évolution lorsque l'échantillon est soumis à divers traitements.

- **Le paramètre de maille**

La connaissance de la position des pics de diffraction et des indices de Miller (h, k, l) des plans diffractants associés nous permet d'accéder au paramètre de maille selon la structure cristalline du matériau en question (CFC, CC, HC).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad \Longrightarrow \quad a = \frac{n \cdot \lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

Où:

a : Paramètre de maille (nm) ;

h,k,l : Indices de Miller des domaines diffractant ;

d_{hkl} : Position des pics de diffraction (nm) ;

$\lambda = 15,40598$ nm, est le faisceau provenant de l'anticathode en cuivre.

On pourra cependant, calculer le paramètre de maille pour chaque pic de diffraction

9. Micro-duromètre

L'essai de micro-dureté de certains échantillons est réalisé au niveau du laboratoire de Métallurgie du centre de recherche de soudage et contrôle(CSC).



Figure III. 13: micro-duromètre.

- **Principe**

Le principe est de réaliser des empreintes par une pyramide droite à base carrée à l'aide d'une charge F . Le choix de F dépend de la dimension du pénétrateur utilisé et de l'épaisseur de l'éprouvette (figure III.7). La dureté de Vickers « Hv » est définie par :en Kg/mm^2

F : la charge appliqué.

d : la diagonal de l'empreinte

Comme $\alpha = 136^\circ$ est fixe on peut écrire : $Hv = 1.8544 F/d^2$

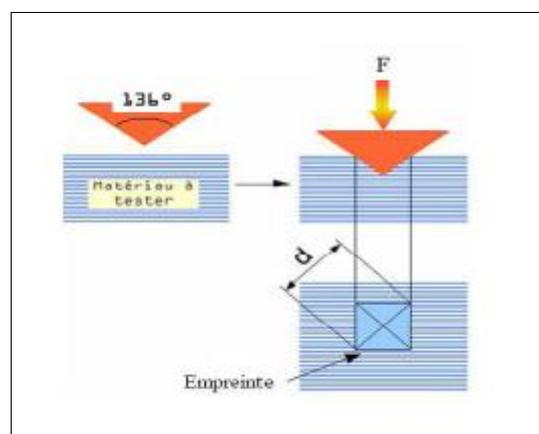


Figure III. 14: essai Vickers

Chapitre IV-partie A :

Mode opératoire

1. Introduction

Afin de comprendre le soudage de l'alliage d'aluminium 2219T3, on a réalisé des soudures avec courant alternatif puis avec courant continu pulsé pour arriver à tirer l'influence du type du courant sur le soudage de cet alliage.

Chaque courant possède ses propres caractéristiques comme indiqué dans la partie bibliographique. Le soudage en courant pulsé passe par un cycle représentatif de l'enchaînement du cycle thermique.

2. Le cycle de soudage en courant continu pulsé

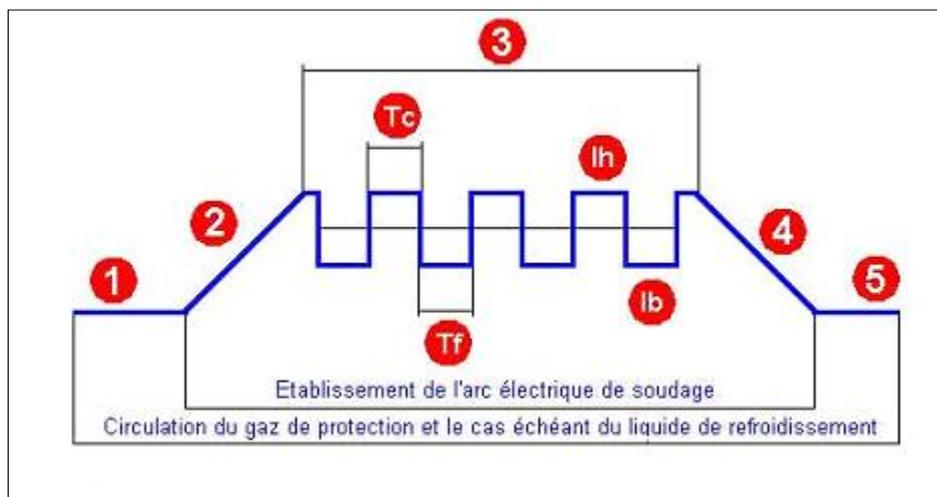


Figure IV-A. 1 : Cycle de soudage en courant pulsé.

Le cycle de soudage en courant continu pulsé se décompose en 5 étapes principales comme montre la Figure VI-A. 1.

3. Les étapes du cycle de soudage en courant continu pulsé

3.1. Le pré-gaz

Aussitôt que le soudeur actionne la gâchette de la torche de soudage TIG, elle se déclenche la temporisation du cycle de pré gaz qui permet la chasse de l'air ambiant présent à l'intérieur de la buse, l'inertage de l'électrode infusible et de la zone à souder avant l'allumage de l'arc électrique.

3.2. L'amorçage et la montée en intensité de l'arc

Après la fin du temps de pré gaz, l'arc s'amorce sur la pièce soit par l'intermédiaire d'un courant à haute fréquence, soit par start touch ou lift start. La montée progressive ou pente montante de l'intensité de soudage programmée est disponible à l'aide d'une temporisation. Elle autorise un préchauffage de la zone avant formation du bain.

3.3. Intensité de soudage programmée

Cette étape est caractérisée par :

- Intensité haute (I_h) ;
- Intensité basse (I_b).

Ces intensités (I_h) et (I_b) sont sélectionnées selon l'épaisseur du matériau, la nuance du matériau, la position de soudage et le type de préparation de joint.

- Temps chaud (t_c): Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité haute (I_h) sélectionnée lors du soudage.
- Temps froid (t_f): Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité basse (I_b) sélectionnée lors du soudage.

3.4. Evanouissement de l'arc électrique de soudage

Aussitôt que le soudeur actionne la gâchette de la torche de soudage TIG, le cycle d'évanouissement de l'arc de soudage se déclenche. La descente progressive ou pente descendante de l'intensité de soudage programmée est disponible à l'aide d'une temporisation. Cette fonction permet de limiter ou d'éliminer le cratère de terminaison du cordon ou retassure de terminaison.

3.5. Le post gaz

La temporisation du cycle de post gaz permet l'inertage de l'électrode de tungstène et de la zone soudée après l'extinction de l'arc électrique pendant un temps de 3 à 30 secondes pour limiter l'oxydation par l'air ambiant.

4. Le soudage TIG de l'alliage d'aluminium 2219T3

On a réalisé les soudures sur deux plaques similaires de forme carré (150x150) mm et d'épaisseur 2 mm de l'alliage d'aluminium 2219T3.

La première plaque était soudée avec un courant alternatif et la deuxième avec un courant continu pulsé, la protection était assurée par l'argon industriel avec un débit de 8L/min, une fréquence $f=2\text{Hz}$ et on a fait varier l'intensité de chaque courant.

4.1. Le réglage du poste TIG

La figure qui se suit montre les commandes essentiels du réglage du poste TIG tel que :

- (1) : commande de réglage du courant (alternatif ou continu) ;
- (2) : commande qui sert à activer et désactiver le courant pulsé ;
- (3) : commande pour mesurer le voltage lors du soudage ;
- (4) : commande de réglage de l'intensité du courant du soudage ;
- (5) : écran d'affichage ;
- (6) : la commande qui permet de régulariser le rapport du courant haut ou/ et bas pendant sa durée de passage sur la période (La durée de passage (t_h , t_b)) ;
- (7) : commande de la régulation de courant bas en pourcentage de courant haut ;
- (8) : la commande de régulation la fréquence (nombre de pulsations par seconde).

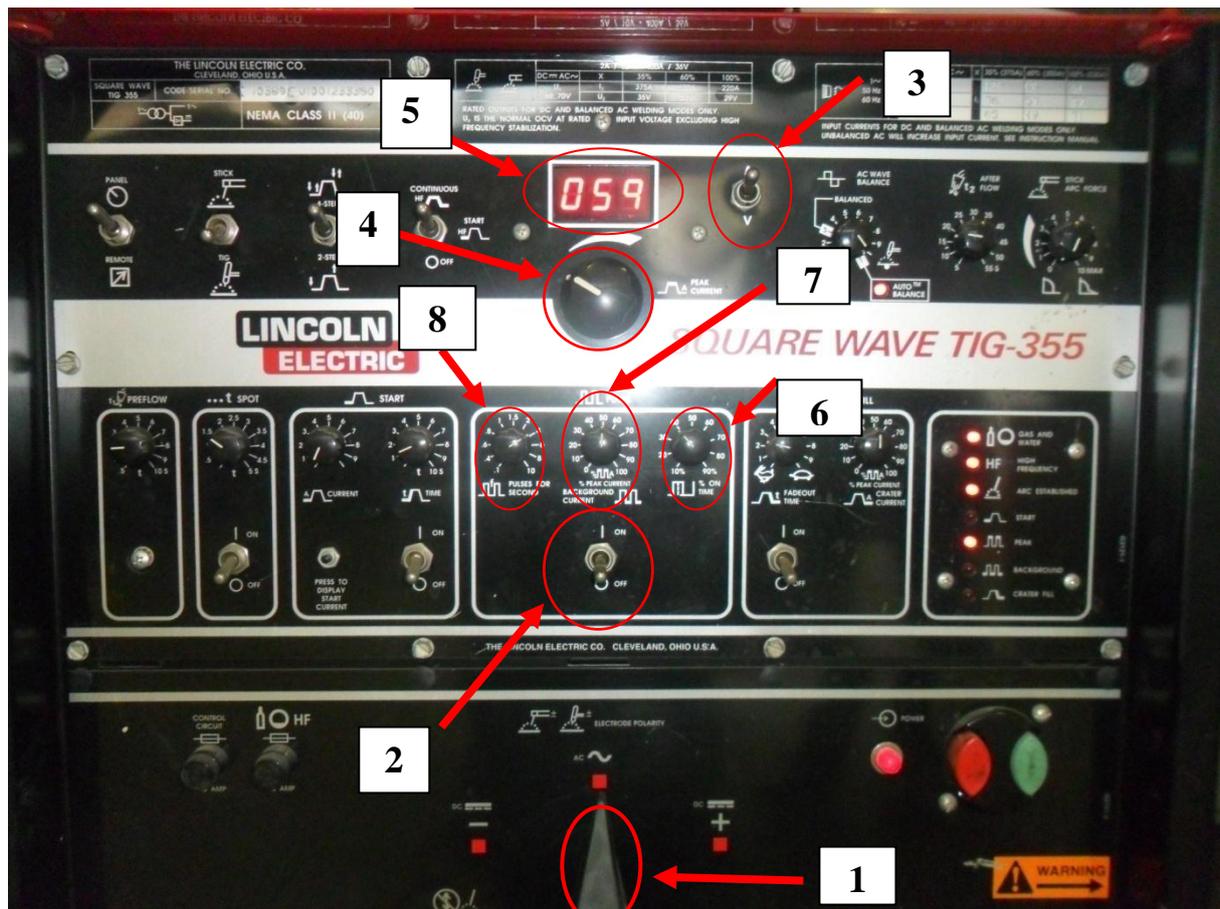


Figure IV-A. 2: le poste TIG.

4.2. Première plaque : soudage en courant alternatif

On a réalisé six cordons en courant alternatif en augmentant l'intensité du courant, en mesurant le temps nécessaire pour réaliser chaque cordon durant l'opération du soudage. On a pris le voltage, ce qui nous a permis de calculer la vitesse nécessaire pour la réalisation de chaque cordon.

Où la vitesse est définie par la longueur soudée par le temps pris pour réaliser ce cordon :

$$V = x / tps \text{ (mm/s).}$$

Les numéros des cordons sont indiqués sur la figure (IV.A.3).Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Tableau IV-A. 1 : résultats du soudage en courant alternatif

Cordon	Longueur (mm)	Intensité (A)	Temps (s)	Voltage (v)	Vitesse (mm/s)
1	132	60	51	17	2,5
2	131	70	37	18	3,5
3	131	80	33	17	3,9
4	130	90	24	17	5,4
5	132	100	18	18	7,3
6	129	120	19	22	6,7

La Figure IV-A. 3 montre ces cordons de soudure en face endroit et face envers

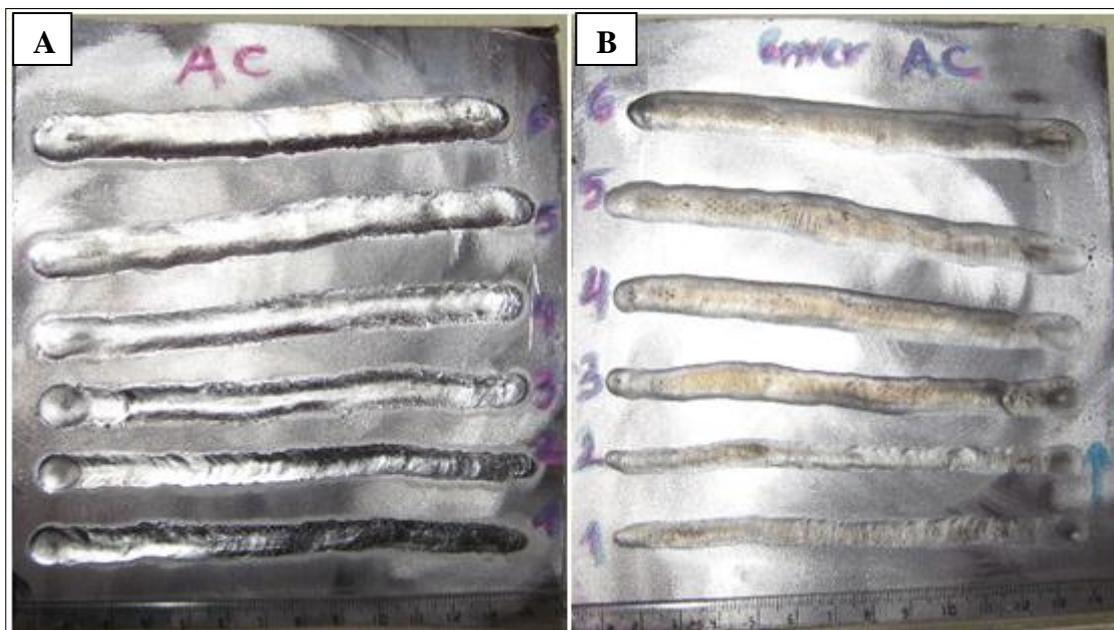


Figure IV-A. 3: aspect général des cordons des soudures réalisés en courant alternatif.

A : face endroit, B : face envers.

4.3. Deuxième plaque : soudage en courant continu pulsé

On a gardé la même fréquence et le même débit de protection et on a fait les mêmes opérations (mesure du temps et voltage) , mais en activant la commande (2) c'est-à-dire, on soude avec un courant pulsé qui est doté d'autres fonctions que l'alternatif, ce qui a tendance à utiliser d'autres commandes :

- la commande (7) (figure IV.A.4) de courant bas en pourcentage de courant haut égal à **50%**.
- la commande (6) (figure IV.A.4) du temps chaud et du temps froid à un pourcentage de cycle de pulsation du courant haut égal à **50%** c'est-à-dire que la durée de chauffage au courant haut et celle du refroidissement au courant bas reste la même.



Figure IV-A. 4: réglage du courant pulsé.

On varie toujours l'intensité du courant et on prend les mêmes valeurs que précédemment, les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

Tableau IV-A. 2 : résultats du soudage en courant pulsé.

Cordon	Longueur (mm)	Intensité (A)	I_{\max} (A)	I_{\min} (A)	Temps (s)	Voltage (v)	Vitesse (mm/s)
1	139	60	59	46	60	17	2,3
2	134	70	69	59	51	17	2,6
3	134	80	72	60	50	18	2,6
4	136	90	81	73	33	18	4,1
5	135	100	93	82	26	18	5,1
6	129	120	108	90	25	20	5,0

La figure suivante montre les cordons de soudures de la deuxième plaque réalisée en courant pulsé.

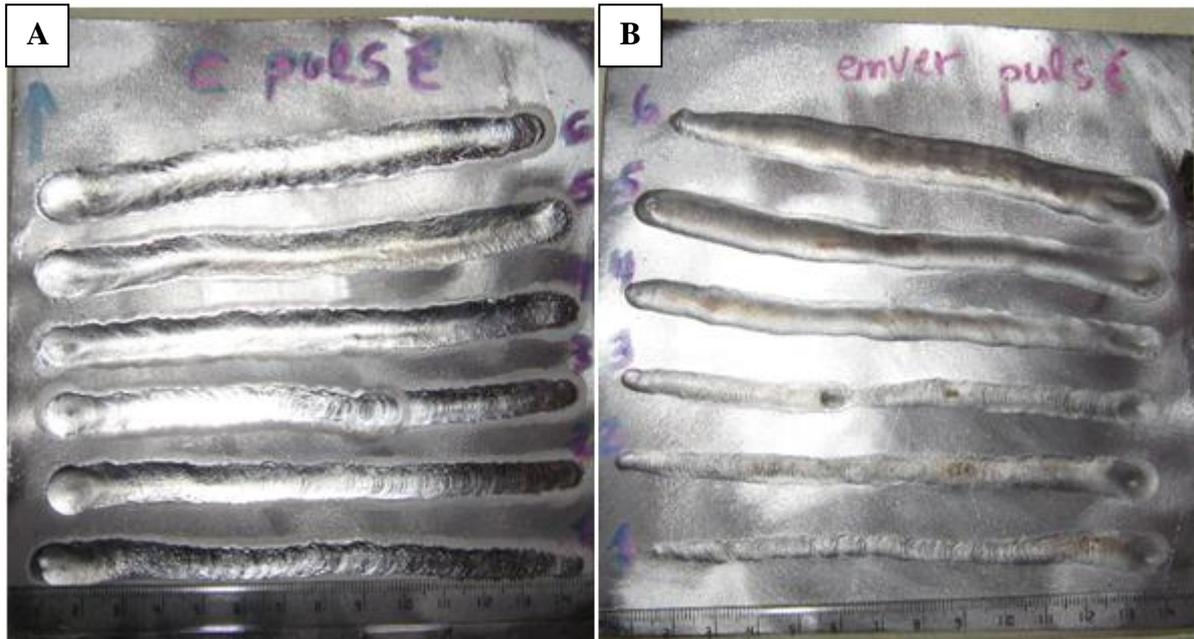


Figure IV-A. 5 : aspect général des cordons des soudures réalisés en courant pulsé.

A : face endroit, B : face envers.

5. Comparaison des deux plaques (control visuel)

L'une des étapes qui suit le soudage est le contrôle non destructif, il permet de déceler toutes les imperfections qui peuvent se produire lors du soudage.

Pour les alliages d'aluminium, le contrôle de qualité des joints soudés se fait selon la norme AWS D1.2. Parmi les techniques non destructives pour le contrôle des soudures d'aluminium nous retrouvons :

Le contrôle visuel, le contrôle radiographique, le contrôle par ressuage et le contrôle par ultrasons [27]. Dans notre travail, on a fait un contrôle visuel.

Après ce contrôle, on remarque que sur les deux plaques, on remarque des phénomènes communs qui sont visualisés comme suit (figure IV.A.7) :

- (A) : un manque de pénétration sur la face envers ;
- (B) : en fin de parcours nous avons aussi constaté un début d'effondrement du joint ;
- (C) : les stries de solidification sont de formes elliptiques ; ce qui exprime un mouvement rectiligne du déplacement de la torche comme le montre la figure(IV.A.5).

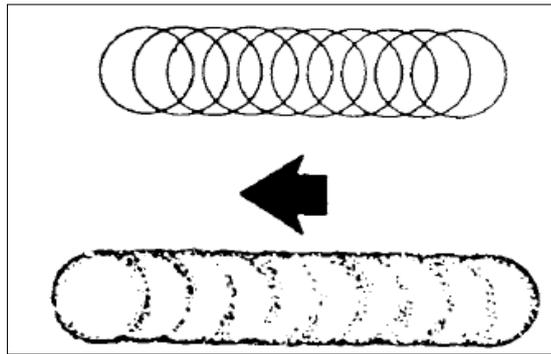


Figure IV-A. 6: Mouvement rectiligne du déplacement de la torche.

- (D) : une concavité sur la face endroit qui constitue un défaut.
- (E) : une bande blanche qui retourne aux cordons qui résulte à l'effet de nettoyage par courant.

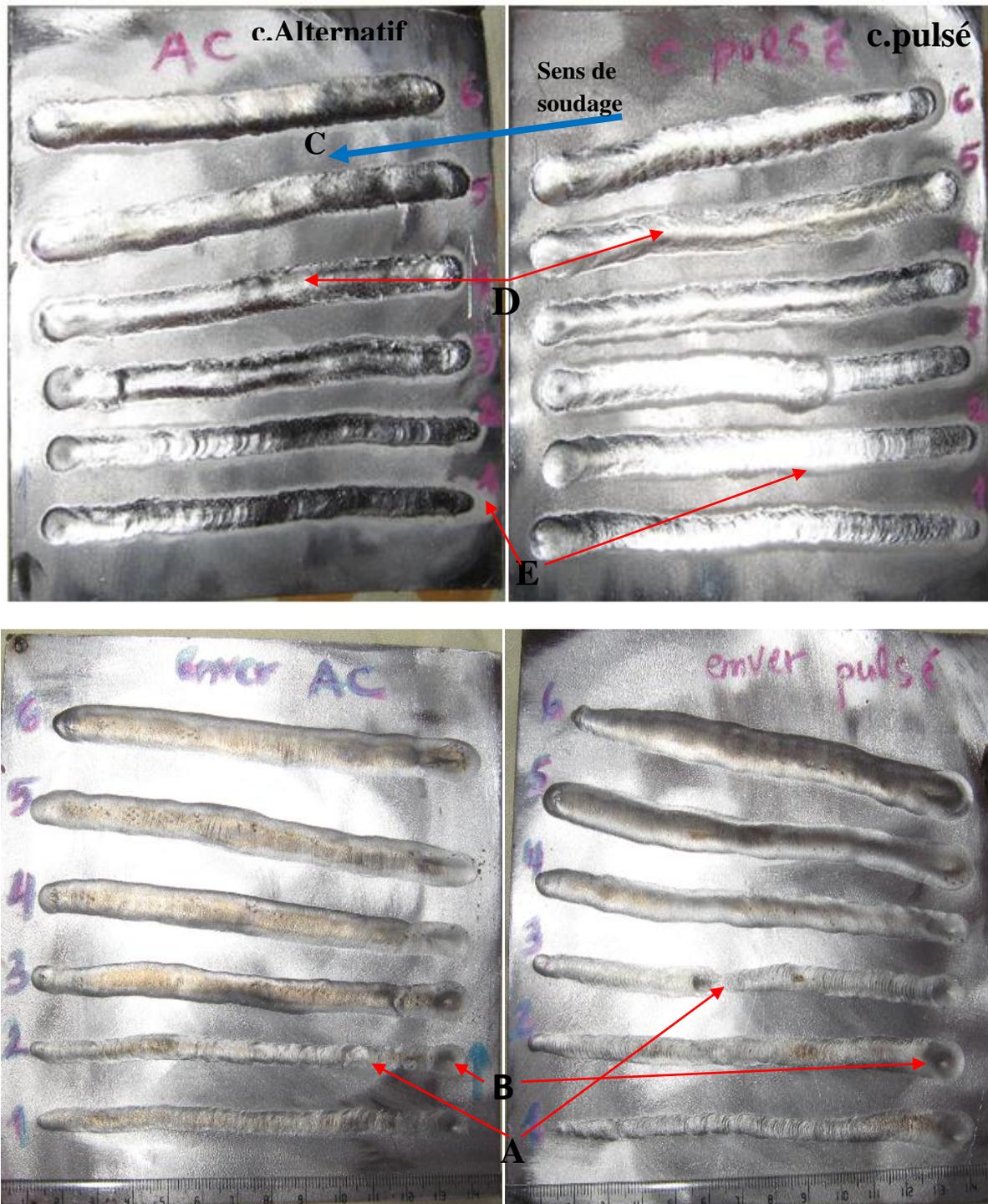


Figure IV-A. 7 : faces endroits et envers respectivement des deux plaques.

Tout ce qu'on a vu précédemment sont des points communs sur les deux plaques, notons que ces deux soudures présentent aussi des points de différence.

5.1. vitesse de soudage

La vitesse de soudage augmente avec l'augmentation de l'intensité dans les deux plaques mais de manière différente, l'historgramme suivant montre l'écart de vitesse entre les deux plaques.

La vitesse de soudage de la plaque soudée en alternatif est toujours supérieure à celle soudée en pulsé.

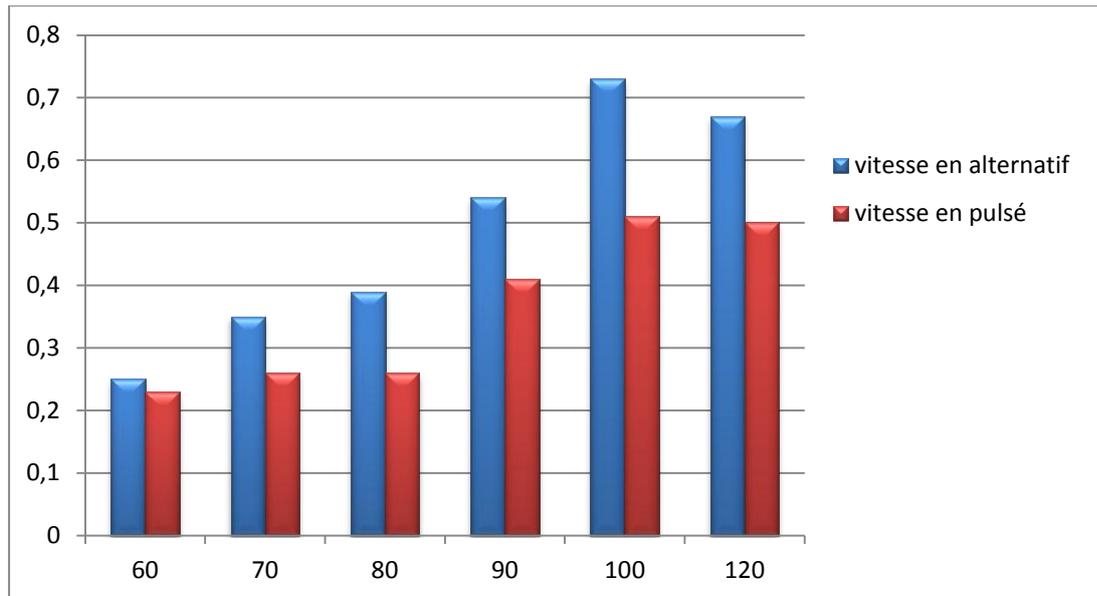


Figure IV-A. 8 : histogramme de la vitesse des deux plaques.

5.2. La largeur des cordons

On a mesuré les largeurs des cordons en face envers de chaque plaque, on a essayé de trouver une largeur moyenne sur chaque cordon. On constate que la largeur augmente au fur et à mesure que l'intensité croît dans les deux cas, mais on note que les largeurs des cordons de la plaque soudée en alternatif sont supérieures à celles qui sont soudées en courant pulsé jusqu'aux derniers cordons qui ont presque la même largeur.

L'historgramme suivant montre l'évolution de la largeur du cordon en fonction de l'intensité du courant.

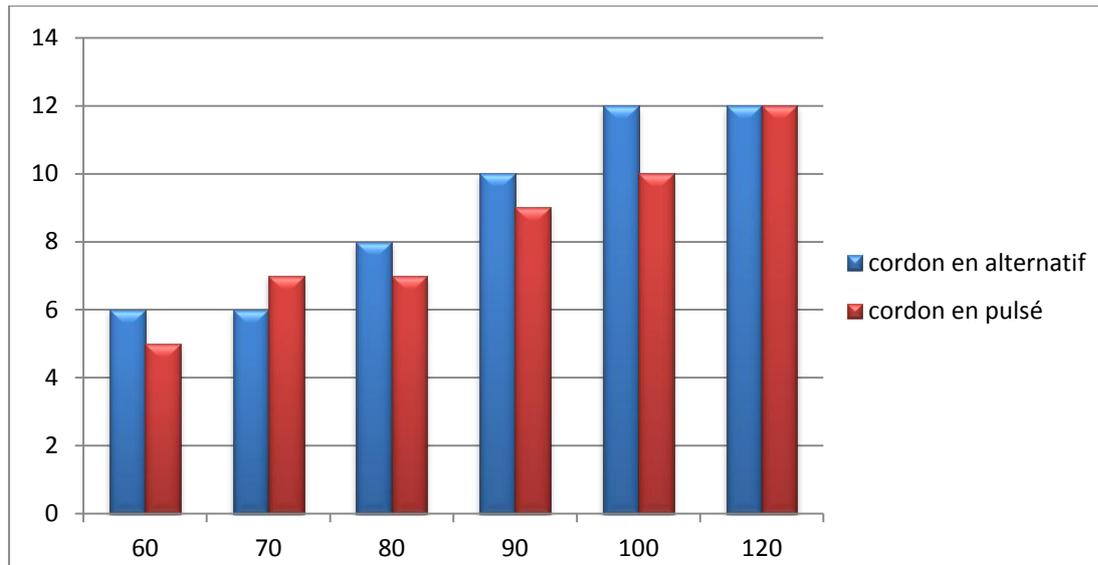


Figure IV-A. 9 : histogramme des largeurs des cordons en fonction de l'intensité.

Dans la première partie du travail on a essayé de comprendre le poste TIG et on a joué sur la nature et l'intensité du courant, la partie IV.B.2 sera consacrée à la caractérisation métallurgique des échantillons, qui ont été déjà soudées au CSC par une étudiante en Magister de Mr Djeghlal.

Les paramètres technologiques qui ont été utilisés pour réaliser ces soudures, sont présentés sur les tableaux ci-dessous :

Soudure 1 :

Soudée en courant alternatif avec métal d'apport.

Tableau IV-A. 3 : paramètres de soudage de la soudure 1.

Paramètres de soudage		
Débit	(I/s)	8
Intensité	(A)	60
Polarité		1/2
Potentiel de soudage	(V)	16
Temps de soudage	(s)	70,8
Vitesse de soudage	(mm/s)	1,61
Longueur du cordon	(mm)	114
Epaisseur du cordon	(mm)	2

Soudure2 :

Soudée en courant pulsé avec métal d'apport.

Tableau IV-A. 4 : paramètres de soudage de la soudure 2.

Paramètre de soudage	
Débit (I/s)	8
Intensité réglée (A)	75-85
Fréquence (HZ)	4
Intensité background (I%)	50
Taux de pulsation (t%)	50
Intensité maximal 'I _{max} ' (A)	71-75
Intensité minimal 'I _{min} ' (A)	59-68
Potentiel de soudage (V)	15
Temps de soudage (s)	89.4
Vitesse de soudage (mm/s)	2,24
Longueur du cordon (mm)	200

Chapitre IV.B :

Caractérisation métallurgique

1. Etude métallographique

Généralement, pour faire une étude métallographique, on suit ces étapes :

1.1 Préparation des Echantillons

- Prélèvement.
- Enrobage.
- Polissage.
- Attaque chimique.

B/La métallographie comporte :

- La macrographie.
- La micrographie.

C/ Essai de Micro-dureté.

❖ **prélèvement**

On prend des coupes transversales sur les pièces soudées, et un autre échantillon de métal de base comme référentiel de l'évolution microstructural.

❖ **Enrobage**

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymérisante.

Il existe deux types d'enrobage :

- A chaud : se fait dans une résine bakélite dans une presse.
- A froid : se fait dans un moule de résine auto-durcissante.

Ce dernier est utilisé dans tous nos travaux pour éviter toutes les transformations qui peuvent être engendrées par l'échauffement de l'alliage de l'aluminium. Il s'effectue dans des moules en plastique dans lesquels est placé l'échantillon au-dessus duquel on verse la résine liquide. Après solidification, l'échantillon est retiré du moule pour passer au polissage.

❖ **polissage**

Est une opération nécessaire avant toute observation métallographique, les échantillons doivent être parfaitement polis, Pour une bonne observation, les échantillons sont polis jusqu'à l'état de miroir.

Le polissage a été effectué avec des papiers abrasifs dans l'ordre suivant :

- Polissage grossier avec papier émeri: 180, 400, 600.
- Polissage fin avec papier émeri: 1000, 1200.

Il est préconisé en finition sur feutre pour les alliages d'aluminium d'utiliser l'alumine (5 et 3 μm).

❖ **Attaque chimique**

Pour l'observation de phases sous microscope les échantillons polis à l'état miroir sont attaqués avec des réactifs d'attaques relatives à la nature du matériau et le type de phase qu'on voudrait observer. Dans notre cas l'objectif est de montrer les grains et les précipités, on a utilisé la solution TUKER qui est composée de :

Tableau IV-B. 1: Composition du réactif d'attaque.

Éléments chimiques	Pourcentage(%)
acide fluorhydrique HF	10
acide chlorhydrique HCl	15
acide nitrique HNO ₃	25
de l'eau H ₂ O	50

1.2 La macrographie des soudures

La figure IV.B.1 présente les macrographies de toutes les soudures réalisées. Ces dernières présentent l'aspect de cordon, la distribution et les variations morphologiques et thermiques des différentes zones constituant la soudure :

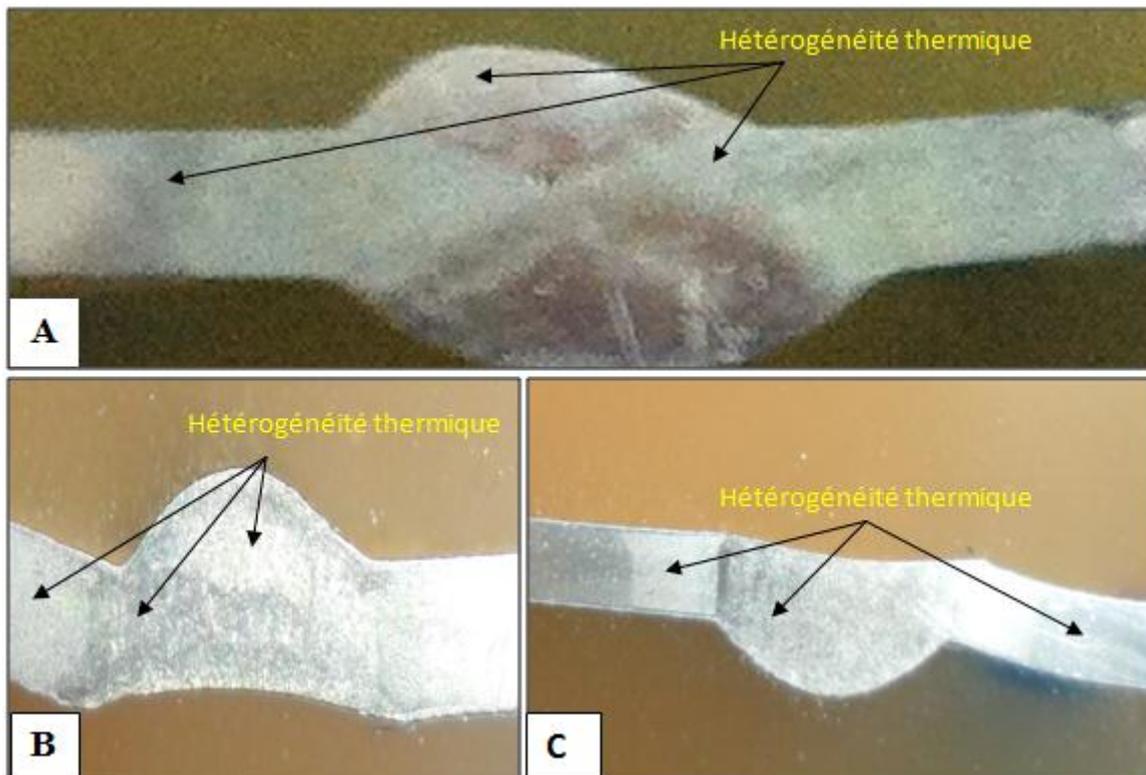


Figure IV-B. 1 : aspect général des cordons de soudure.

Tel que : (A) soudure 1 en courant alternatif avec métal d'apport (face endroit et envers).

(B, C) soudure 2 et 3 en courant pulsé avec métal d'apport (face endroit).

Les macrographies nous révèlent que la distribution de la chaleur est hétérogène entre la ZF et la zone adjacente ZAT, qui est caractérisée par une hétérogénéité et des variations structurales.

On peut clairement constater qu'il y a une différence morphologique entre les deux zones.

1.3 Micrographie

L'étude micrographique que nous présenterons nous permet de confirmer ces hétérogénéités entre les différentes zones.

1.3.1. Métal de base

❖ Métallographie optique

On commence par la micrographie du métal de base de l'alliage d'aluminium 2219T3 (métal non soudé) Figure IV.B.2

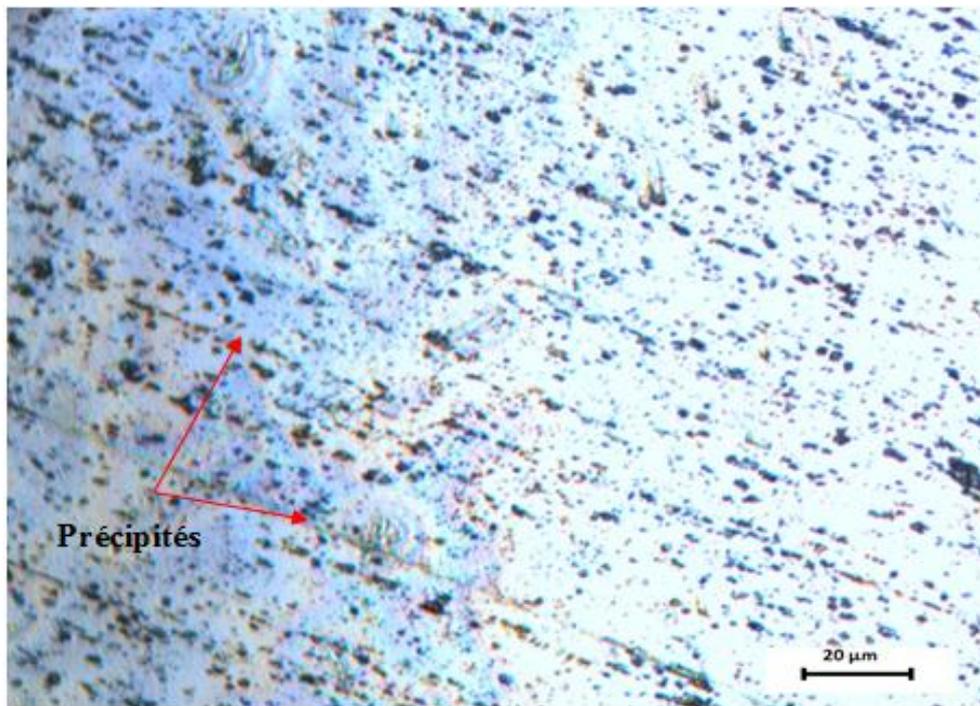


Figure IV-B. 2 : microstructure du métal de base.

La figure IV.B.1 présente les macrographies de toutes les soudures réalisées. Ces dernières présentent l'aspect de cordon, la distribution et les variations morphologiques et thermiques des différentes zones constituant la soudure. Ceci est dû à ses nombreux éléments d'addition, la structure de l'alliage 2219 est multi-phase et relativement complexe ; On dénote la présence des précipités Al_2Cu , $(MnFe)_3SiAl_{12}$, $(FeMn)Al_3$, $(MnFe)Al_6$ [24].

❖ Métallographie MEB

Afin de connaître la nature des phases observées au microscope optique, il convient d'utiliser le microscope électronique à balayage et de faire une analyse de composition des précipités.

Les électrons secondaires donnent les renseignements topographiques de la surface. La figure suivante montre la topographie du métal de base où une hétérogénéité topographique apparaît sur la surface traitée.

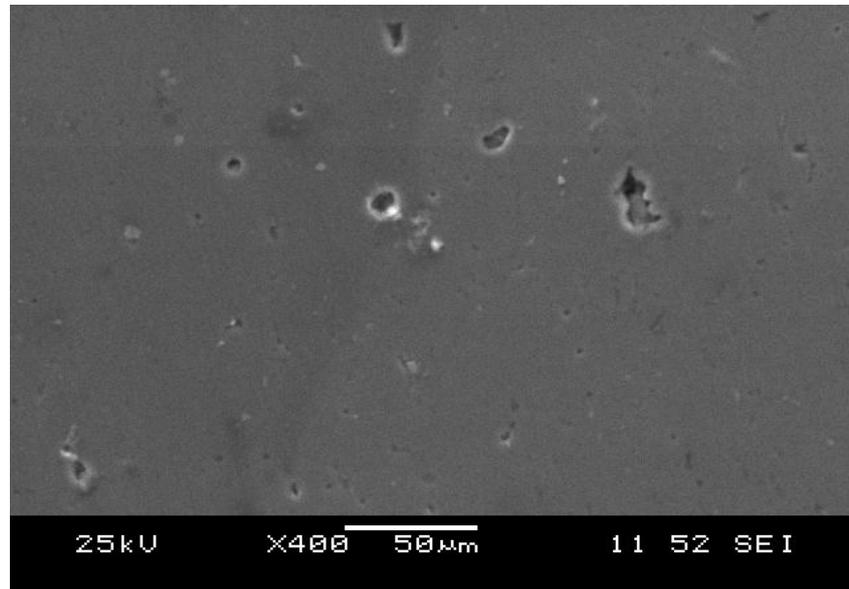


Figure IV-B. 3 : topographie du métal de base en électrons secondaires.

Dans ce qui suit, grâce au détecteur des électrons rétrodiffusés du MEB, qui sont très sensibles au numéro atomique Z de la cible, d'où leur principale utilisation : les images de répartition chimique avec une résolution de plusieurs dizaines de nanomètres, nous permet de visualiser les différents précipités rencontrés dans la matrice étudiée.

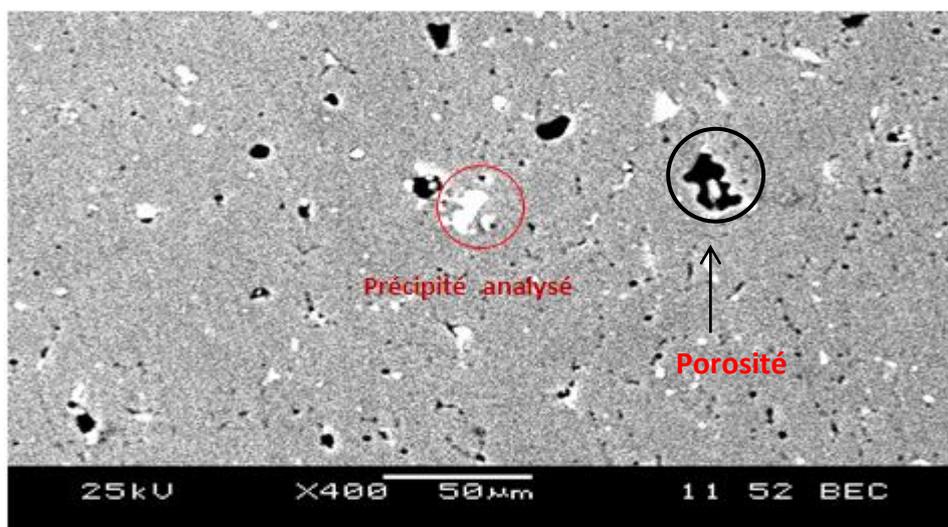


Figure IV-B. 4 : métal de base avec électrons rétrodiffusés.

Après analyse du précipité désigné à la Figure IV.B.4, on a trouvé les éléments chimiques montré par leur spectre dans la Figure IV.B.5 et leurs pourcentages massiques et atomiques.

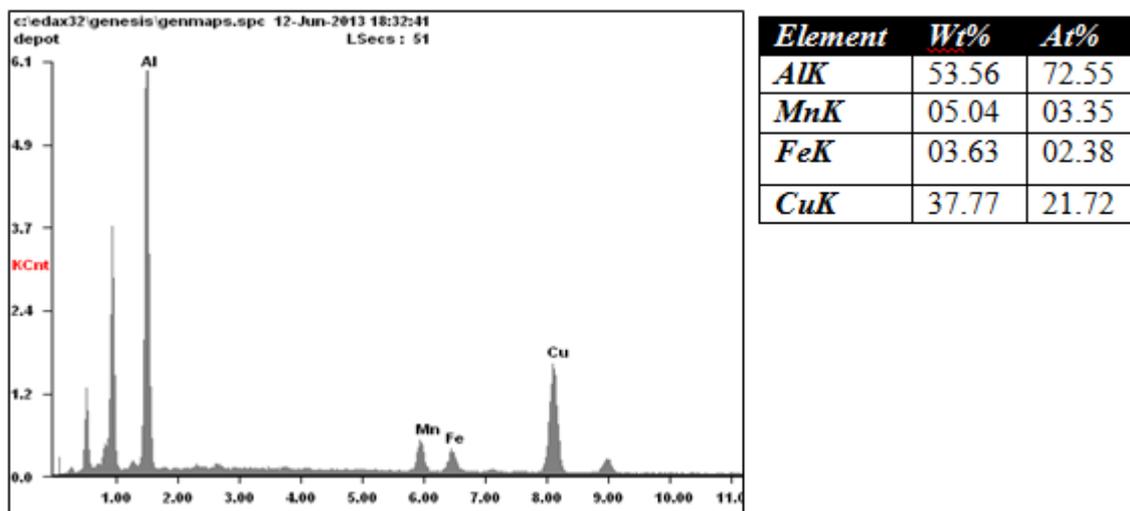


Figure IV-B. 5 : Spectre d’analyse sur un précipité.

Si on fait la répartition chimique de toute la surface c’est-à-dire sans précision de précipité, on trouve que les éléments majoritaires qui sont le cuivre et l’aluminium comme le montre la figure – dessous :

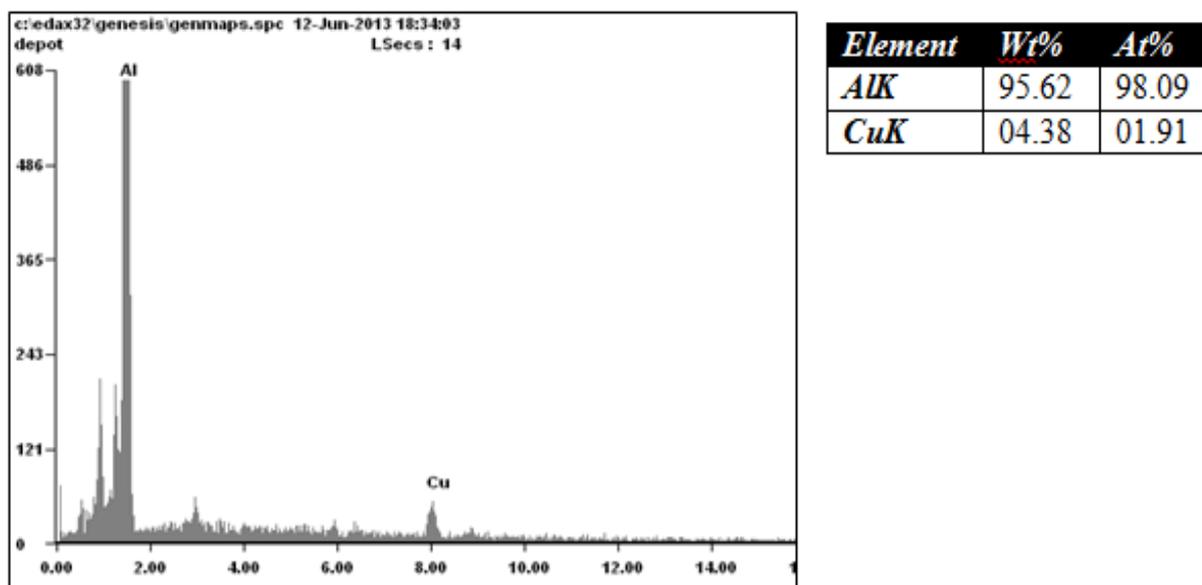


Figure IV-B. 6 : Spectre d’analyse de la surface.

La caractérisation de la chimie du métal de base, des précipités, de sa métallographie optique et électronique nous a permis de connaître l’état initial de l’alliage qui nous servira de référence pour l’analyse des transformations après soudage.

1.3.2. La soudure 1(en courant alternatif)

Les modifications microstructurales dans les joints soudés sont d'abord fonction de la température maximale atteinte, mais aussi des temps de séjour à haute température et des vitesses de refroidissement durant le soudage.

Ainsi, on pourra distinguer la zone fondue et la zone d'influence thermique dans laquelle la température de fusion n'a pas été atteinte. Lorsque les changements de phases peuvent se produire à l'état solide, on peut distinguer la partie de la zone influencée thermiquement qui s'est transformée (remise en solution) de celle qui ne s'est pas transformée durant le soudage.

En général, on pourra toujours distinguer la zone influencée thermiquement la plus proche de la zone fondue qui a été portée aux plus hautes températures de celles influencées thermiquement plus éloignées jusqu'à celle dans laquelle les températures atteintes sont trop basses pour que la microstructure du métal de base évolue. Ceci est montré sur la

Figure IV-B.7

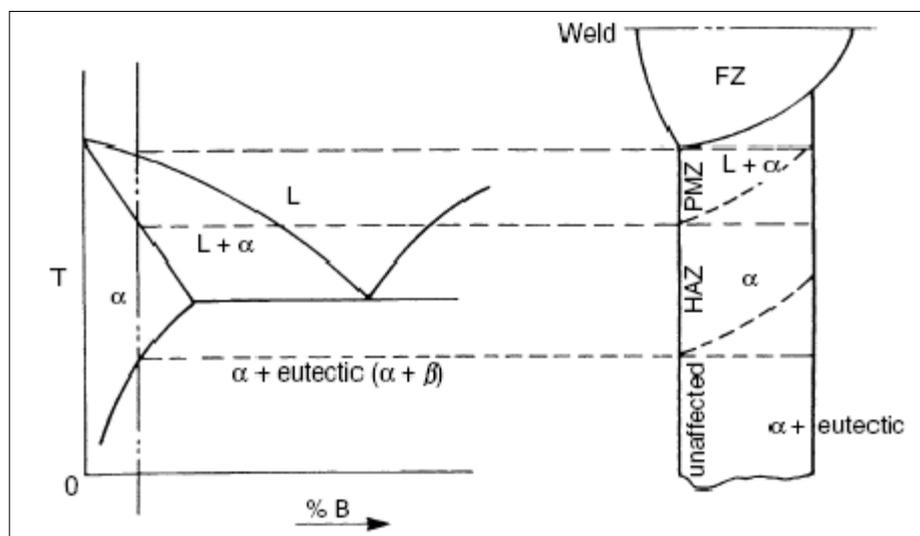


Figure IV-B. 7 : Corrélation entre le diagramme binaire A-B (Al-Cu) et les différentes zones d'un joint soudé [27]

En soudage des alliages à durcissement structural, on pourra toujours distinguer, d'une part une région plus proche de la zone fondue dans laquelle la température maximale atteinte durant le soudage a dépassé la température de la mise en solution et d'autre part, une zone plus éloignée dans laquelle la température atteinte est restée toujours inférieure à la température de remise en solution [27].

On rappelle que soudure1 a été faite en deux passes endroit et envers, à cause d'une mauvaise pénétration.

L'analyse métallographique montre clairement l'existence de trois zones, On observe les différentes zones de transformations structurales allant de la zone fondue (ZF) vers la zone à grains fins (ZAT) en passant par la zone de liaison (ZL) ou ZPF jusqu'au métal de base (**figure IV.B.4**).

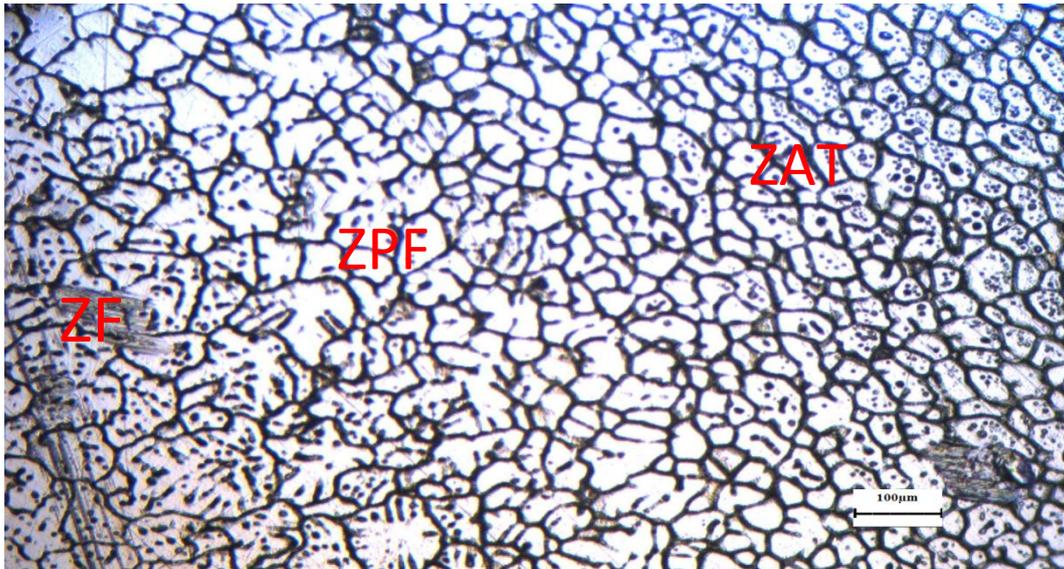


Figure IV-B. 8 : zones de transformations structurales (ZF-ZL-ZAT).

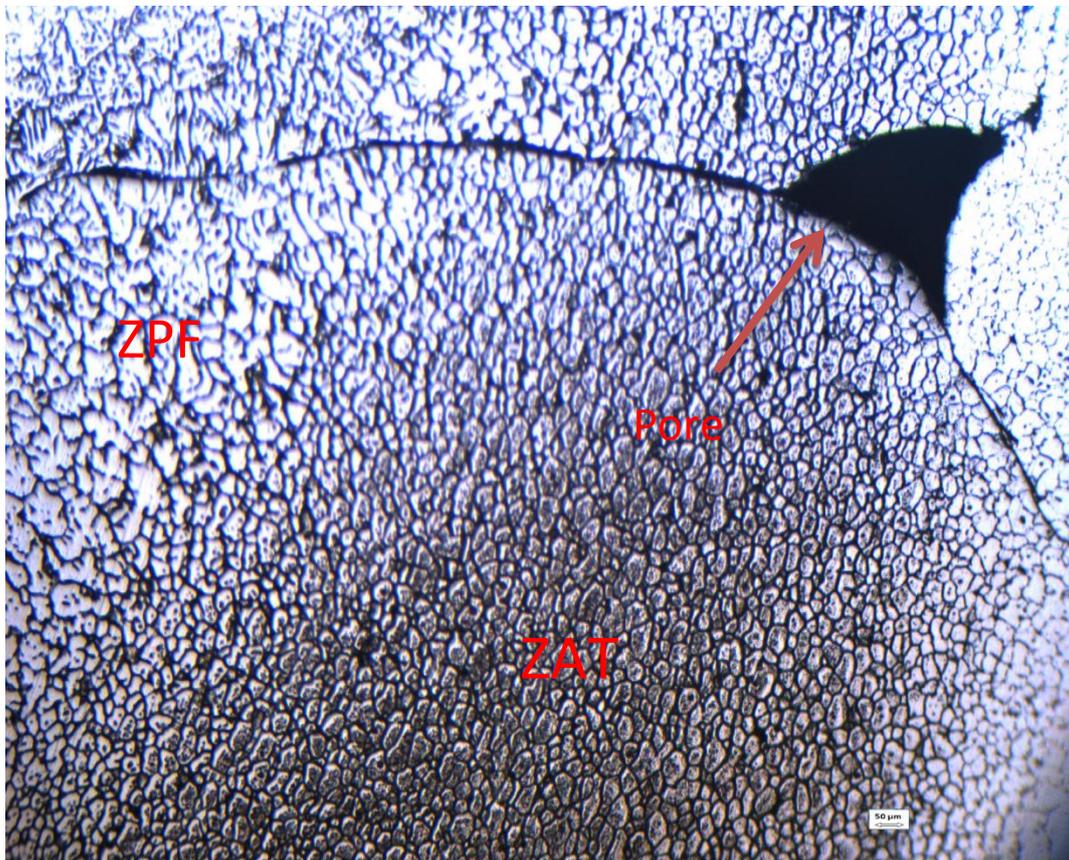


Figure IV-B. 9 : Les différentes zones de transformations structurales.

La figure ci-dessus montre un pore avec une forme hypocycloïdale, on remarque qu'une fissure prend origine au niveau d'un point triple et se propage très rapidement, elle est droite et ne passe pas à travers le joint de grain, mais elle cisaille tous les grains, ce qui constitue une preuve que cette fissure est une fissure qui peut provoquer une rupture fragile.

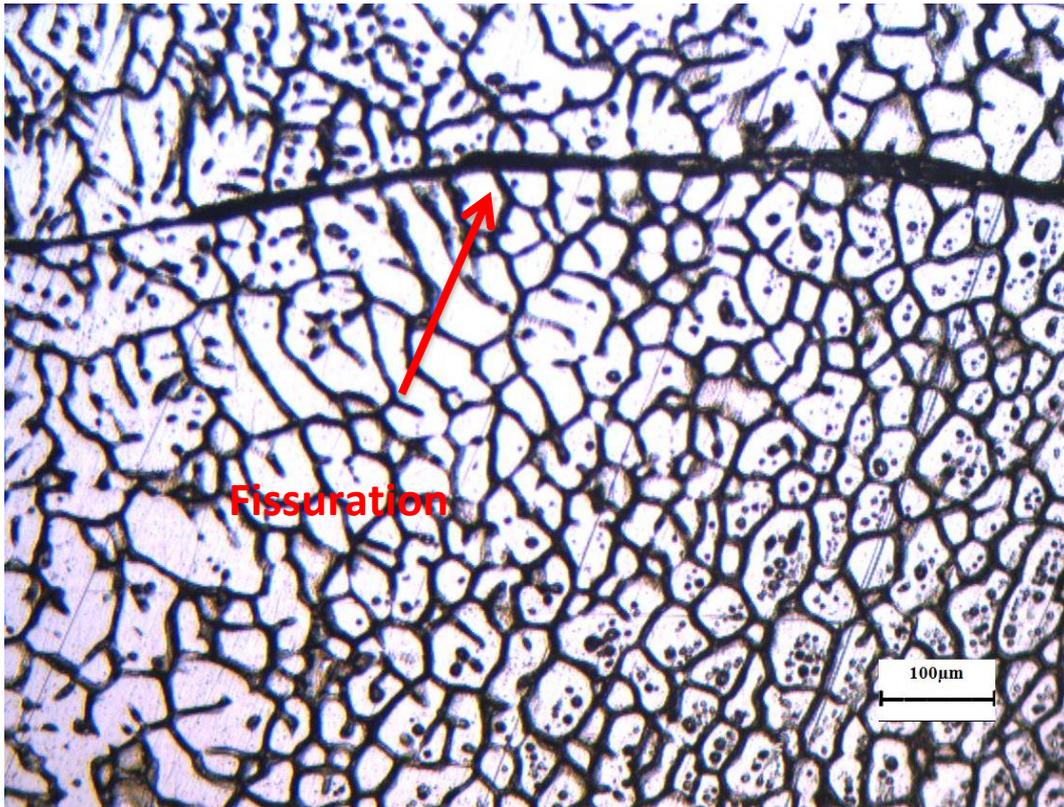


Figure IV-B. 10 : Les différentes zones de transformations structurales.

❖ Zone fondue

Les structures obtenues dans la ZF sont le produit d'une solidification de l'état liquide vers un état solide qui est caractérisée par des structures équiaxiales dendritiques avec la formation des joints de grains équiaxes dendritiques conséquence d'une solidification assez lente due à la concentration de chaleur avec une vitesse de déplacement assez lente (figure IV.B.5)[27].

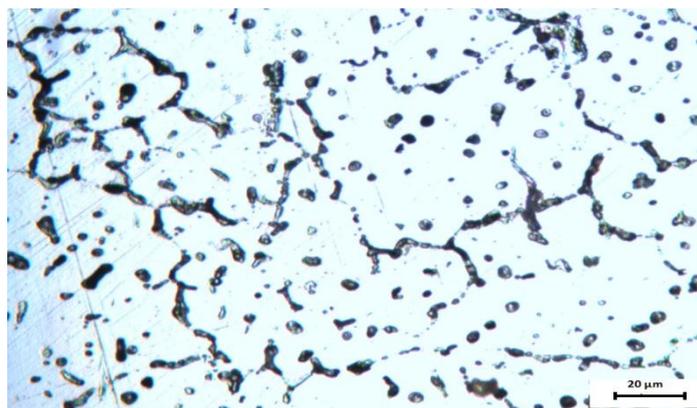


Figure IV-B. 11 : zone fondue.

Dans la zone fondue elle-même, nous avons des hétérogénéités microstructurales, par exemple la microstructure exactement au milieu de la soudure (figure IV.B.6.B) ou bien en haut (figure IV.B.8.A) n'est pas la même car la vitesse de refroidissement est différente, ce qui nous a conduit à penser directement à la deuxième passe.

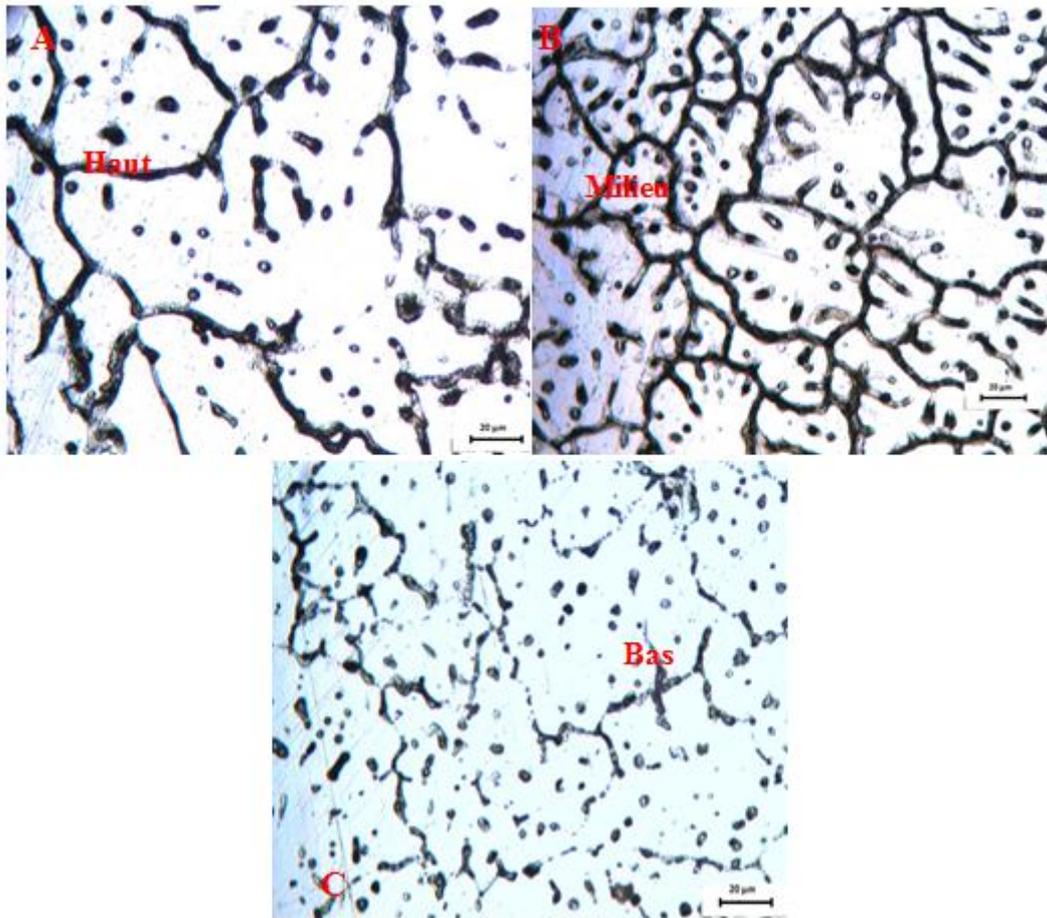


Figure IV-B. 12 : hétérogénéités de la zone fondue.

❖ Zone de liaison ou partiellement fondu

Caractérisée par une structure à gros grains allongés avec une épitaxie caractéristique d'une transformation de la zone mixte liquide solide vers un solide avec une vitesse de refroidissement relativement rapide en comparaison avec celle de la ZF. Ceci est expliqué d'une part par une surchauffe des grains (grossissement exagérée des grains), et d'autre part, par la vitesse de refroidissement rapide due au cycle thermique du soudage en cet endroit (Figure VI.B.9).

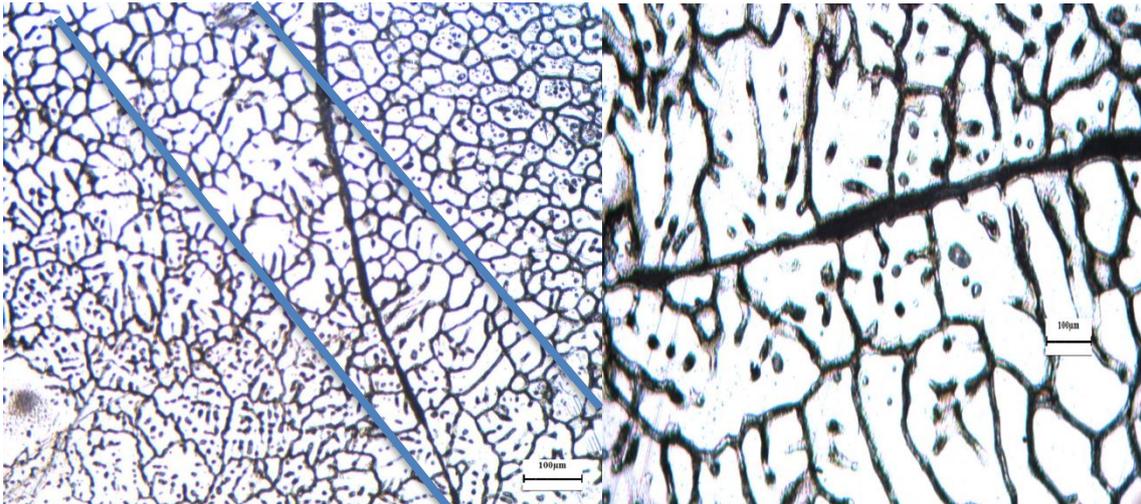


Figure IV-B. 13 : Zone de liaison.

La ZPF est la zone immédiatement après la ZF où la liquation peut se produire en raison d'un chauffage au-dessus de la température eutectique.

Les phases intermétalliques dans les alliages d'aluminium induisent la liquation qui peut se produire partiellement le long du joint de grain mais aussi dans le grain. Cette liquation de joint de grain peut affaiblir la ZPF et peut mener à la fissuration inter-granulaire sous l'effet des tensions développées pendant le soudage. Les alliages d'aluminium à durcissement structural sont connus pour être susceptibles à la fissuration dans la ZPF du joint soudé [27].

❖ La zone affectée thermiquement (ZAT)

La ZAT est la zone de transformation à l'état solide. Elle est caractérisée par l'existence de deux types de morphologie de grains. Des plages à grains fins se trouvant dans la zone adjacente à la zone PFZ et des grains plus gros se trouvant à la zone de transition ZAT-MB **figure IV.B.10**.

Les grains fins sont expliqués par les températures de mises en solution atteinte lors de l'opération de soudage et des vitesses de refroidissements lentes dans cette zone. C'est ce qui est montré dans la bibliographie [30]. Quant à la deuxième morphologie de grain dans cette zone, elle est expliquée par une mise en solution partielle en cet endroit.

C'est-à-dire, elle est composée de deux sous zones, la zone d'affinage de grains qui suit la ZPF, et la zone surmûrie la plus éloignée qui est due au cycle thermique subi lors du soudage comme le montre la figureIV.B.14.

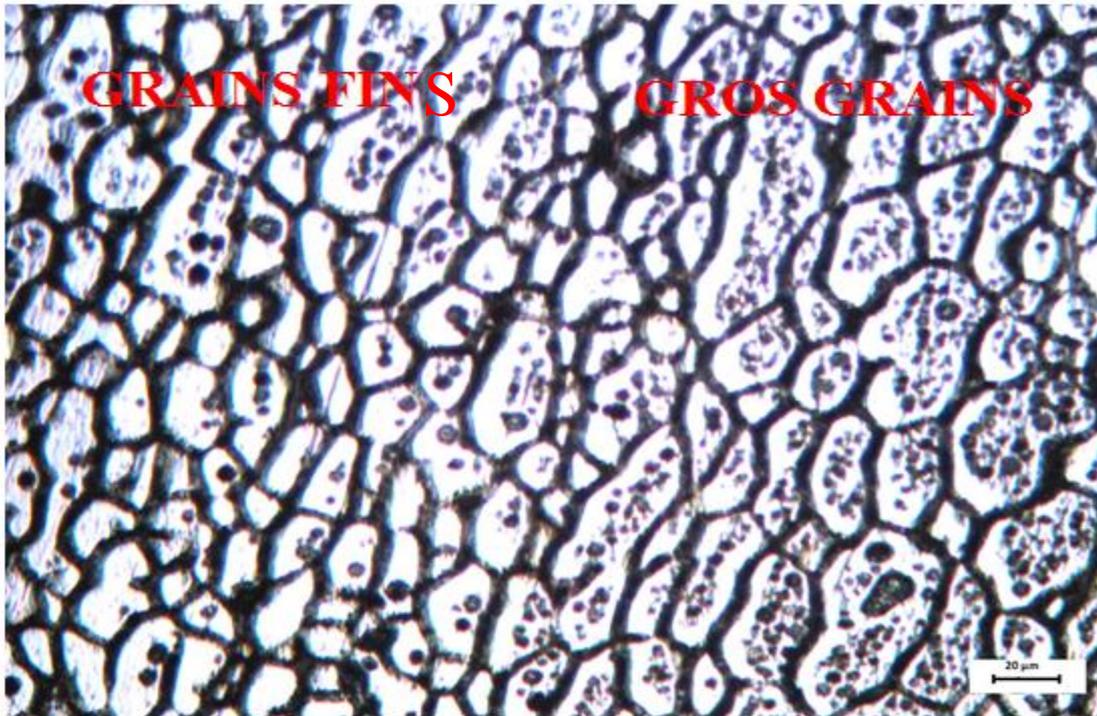
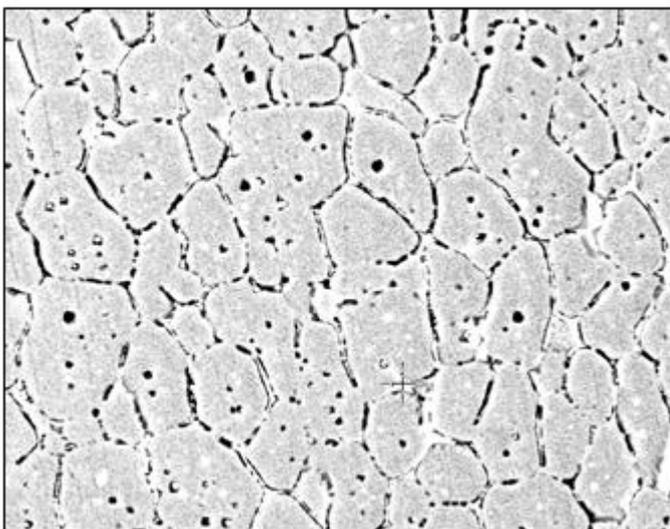


Figure IV-B. 14 : zone affectée thermiquement.

- Microscopie électronique à balayage de la ZAT :

A l'aide du microscope électronique à balayage, on arrive à bien distinguer les joints de grains qui sont constitués de deux zones qui se présentent par un noircissement et un blanchissement. Cette image est prise avec les électrons rétrodiffusés, qui nous renseigne sur les numéros atomiques et nous permet aussi d'apprécier qualitativement les éléments constitutifs des phases du joint de grain ; la répartition chimique sur toute la surface étudiée donne les constituants montrés sur le tableau joint



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>MgK</i>	02.08	02.93
<i>AlK</i>	60.33	76.74
<i>MnK</i>	00.29	00.18
<i>CuK</i>	37.30	20.15

Figure IV-B. 15: répartition chimique sur toute la surface.

Nous remarquons que l'analyse chimique de la zone blanche présente une composition chimique représentant l'Al et le Cu dont les valeurs sont portées sur la figure en dessous, jointe avec le spectre donnant ces éléments.

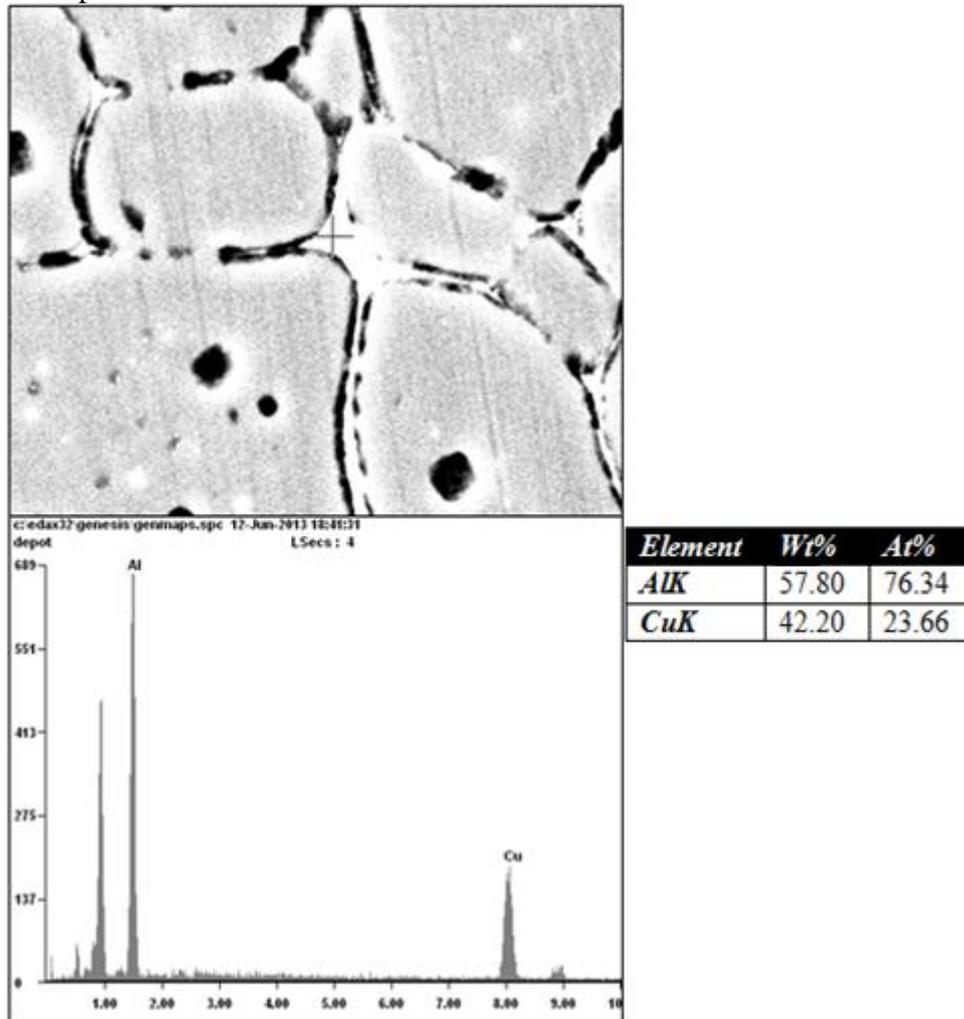


Figure IV-B. 16 : analyse chimique du précipité blanc au niveau du joint de grain.

De plus, la zone en noir étudiée présente une composition dont les éléments sont l'Al, le Cu et le Mg dont les valeurs sont portées sur la figure en dessous, le spectre donnant ces éléments est montrée aussi

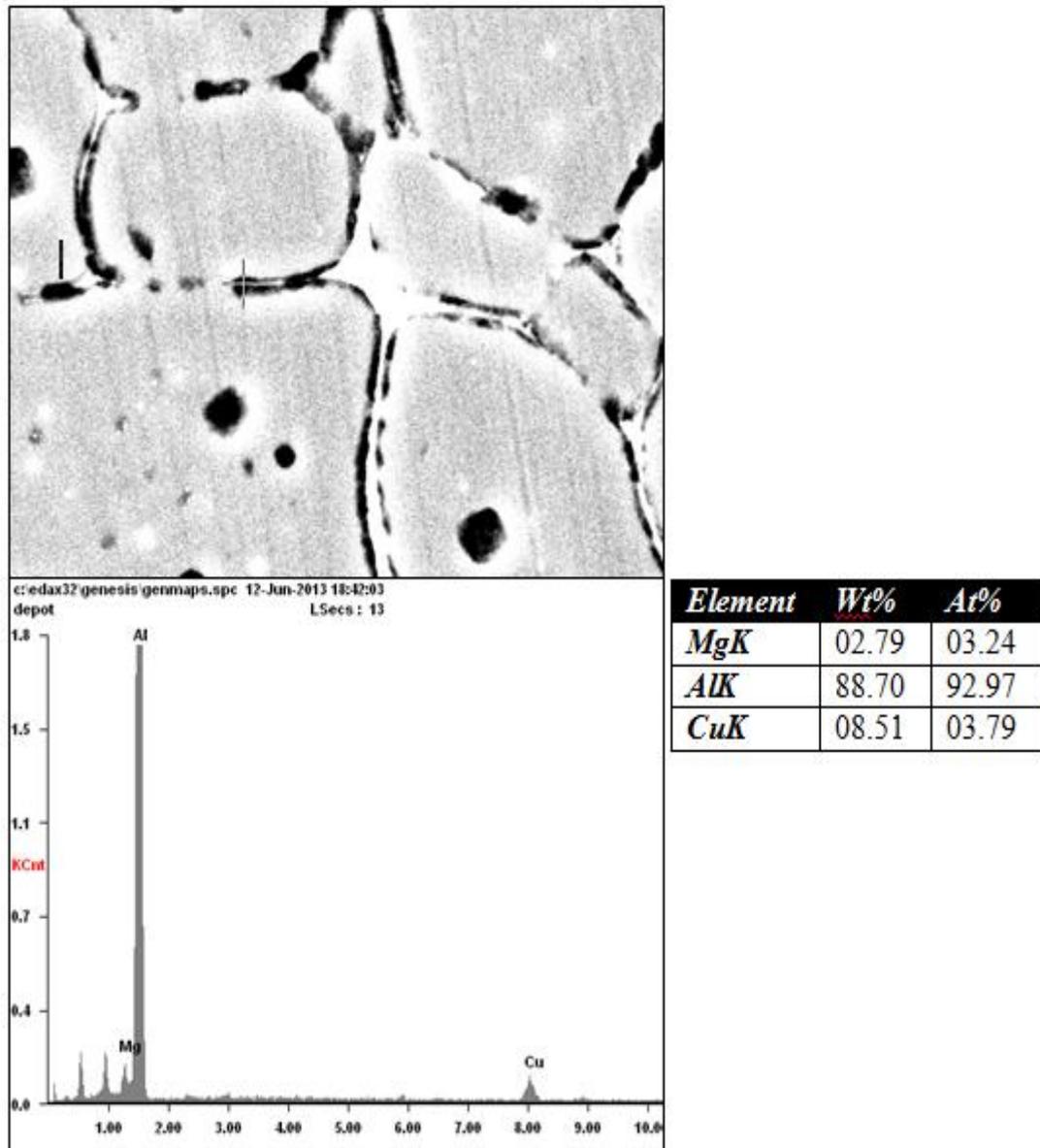


Figure IV-B. 17 : analyse chimique du précipite noir au niveau du joint de grain.

B.2.1.2. Micrographies optiques de la soudure 2

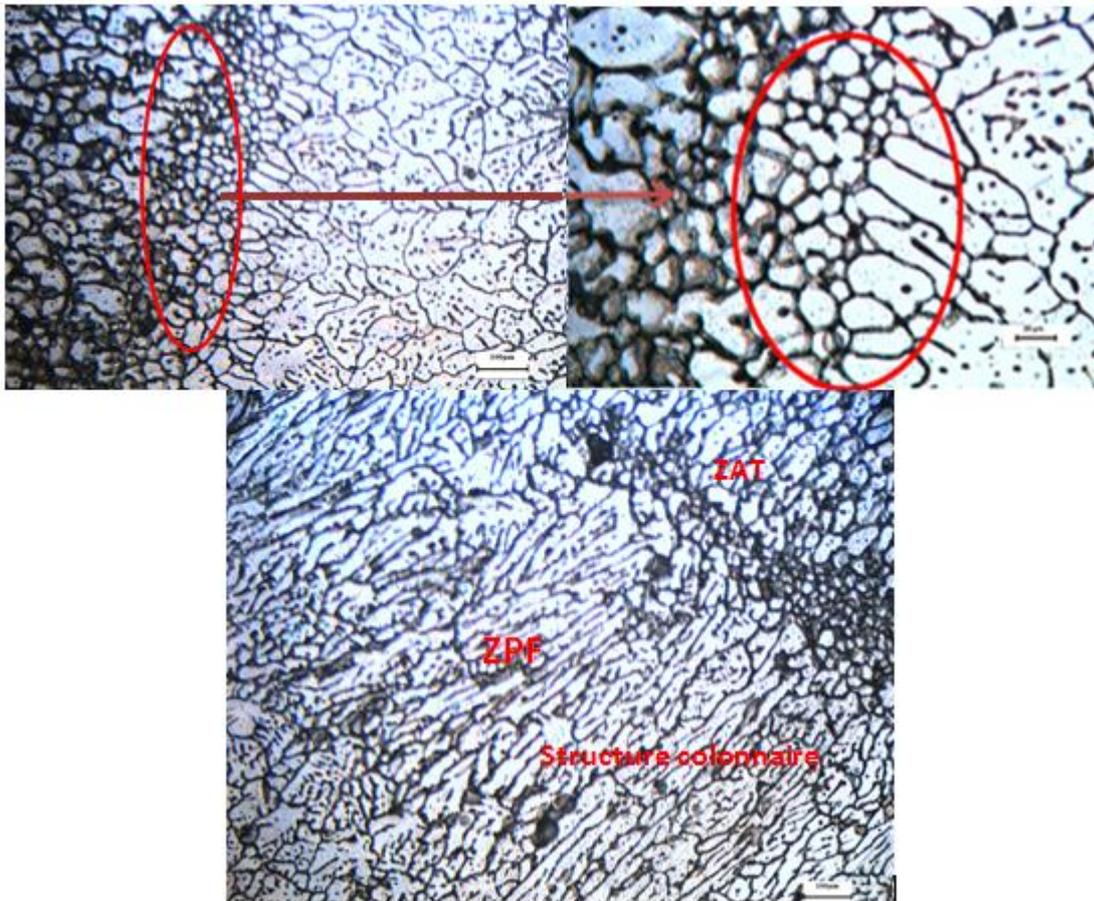


Figure IV-B. 18 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone de liaison (ZPF).

Les figures suivantes montrent les microstructures des zones (fondue et affectée thermiquement) :

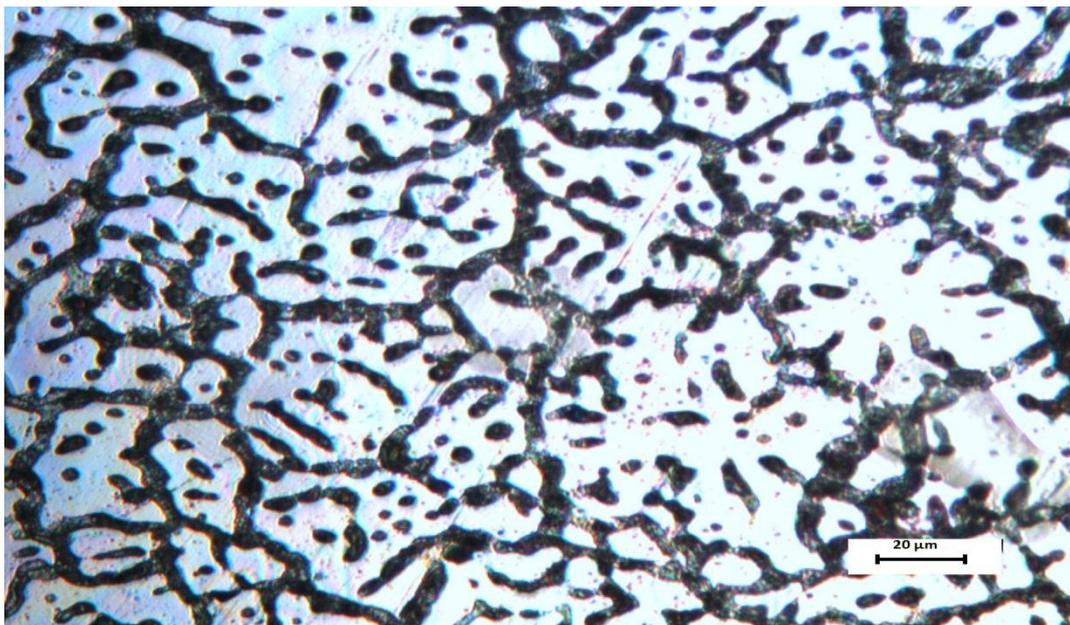


Figure IV-B. 19 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone de fusion (ZF).

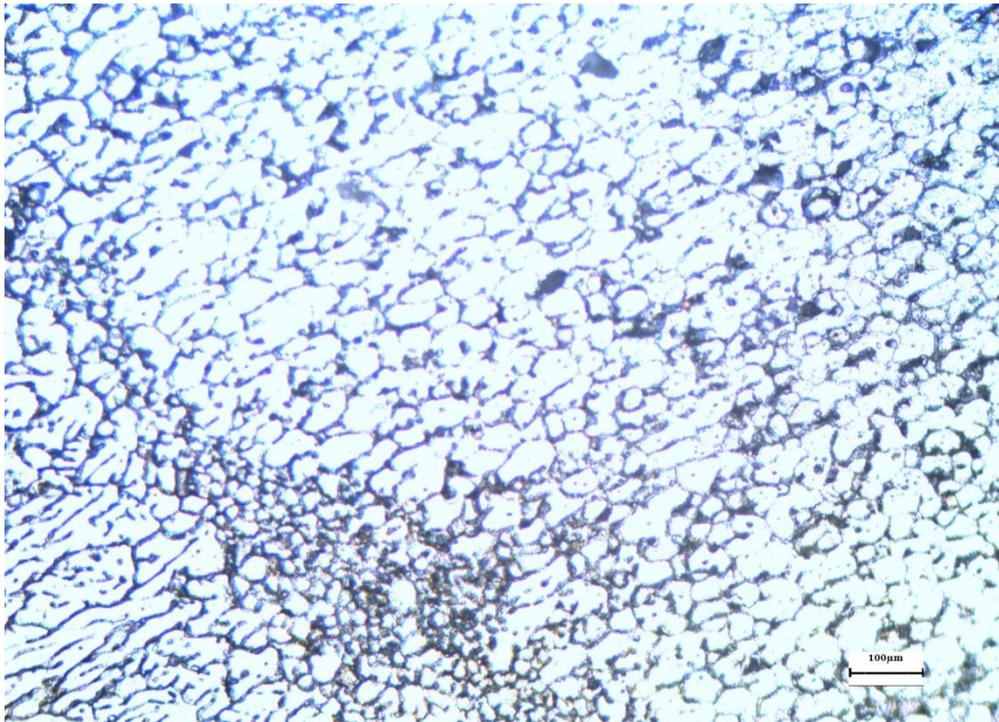


Figure IV-B. 20 : Microstructure de la soudure en pulsé -Zone affectée thermiquement (ZAT).

La soudure en courant pulsé est caractérisée par l'existence des trois zones déjà citées (ZF-ZL-ZAT) avec un affinement important des grains fins de la zone affectée thermiquement, et la zone partiellement fondue à structure dendritique colonnaire très allongée par rapport à la soudure 1. Ceci s'explique par la différence de la nature du courant appliqué qui par ailleurs, influe directement sur le mode de solidification, c'est-à-dire sur la vitesse de cette dernière et de même sur la vitesse de soudage, ce qui se traduit sur le plan microstructural par des tailles et des formes des grains différentes.

Selon la vitesse de soudage, la zone où les grains sont équiaxes peut être plus ou moins large aux dépens de la zone basaltique comme le montre la figure IV.B.10 qui correspond aux structures obtenues sur la ZPF.

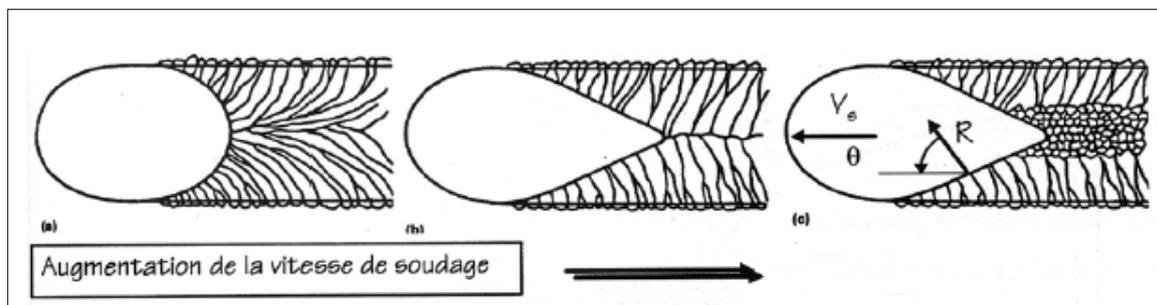


Figure IV-B. 21 : Microstructure de soudage en fonction de la vitesse d'avancée [27].

❖ Analyse par diffraction des rayons x

Le spectre de diffraction X a été enregistré à l'aide d'un diffractomètre de type Panalytical au sein du laboratoire des sciences des matériaux au département de génie mécanique de l'université de Bab Ezzouar (USTHB).

Le rayonnement X utilisé provient de l'émission $K \lambda$ du cuivre, de longueur d'onde $\lambda = 1,54066 \text{ \AA}$.

A partir du pic de diffraction, il est possible de déterminer la structure cristallographique du matériau. La position des pics est en effet reliée aux distances inter-réticulaires par la relation

de Bragg :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

Où θ est le demi-angle de diffraction des rayons X, et d_{hkl} la distance inter-réticulaire entre les plans diffractants (hkl) dits en position de Bragg.

Les spectres de diffraction d'échantillons obtenus par DRX, ont fait l'objet d'une identification avec un logiciel « Match ! » couplé à la base de données ICDD (International Center for Diffraction Data). Cette identification se fait en comparant les positions et les intensités des pics observés avec ceux de la base de données qui est le fichier PDF « Powder Diffraction File ».

La figure présente le spectre de l'échantillon soudé après identification ; elle montre l'existence de pics caractéristiques de phase Al de structure cubique, identifiées par les plans (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331), (420). Fiche ICDD : 00-004-0787 (annexe I).

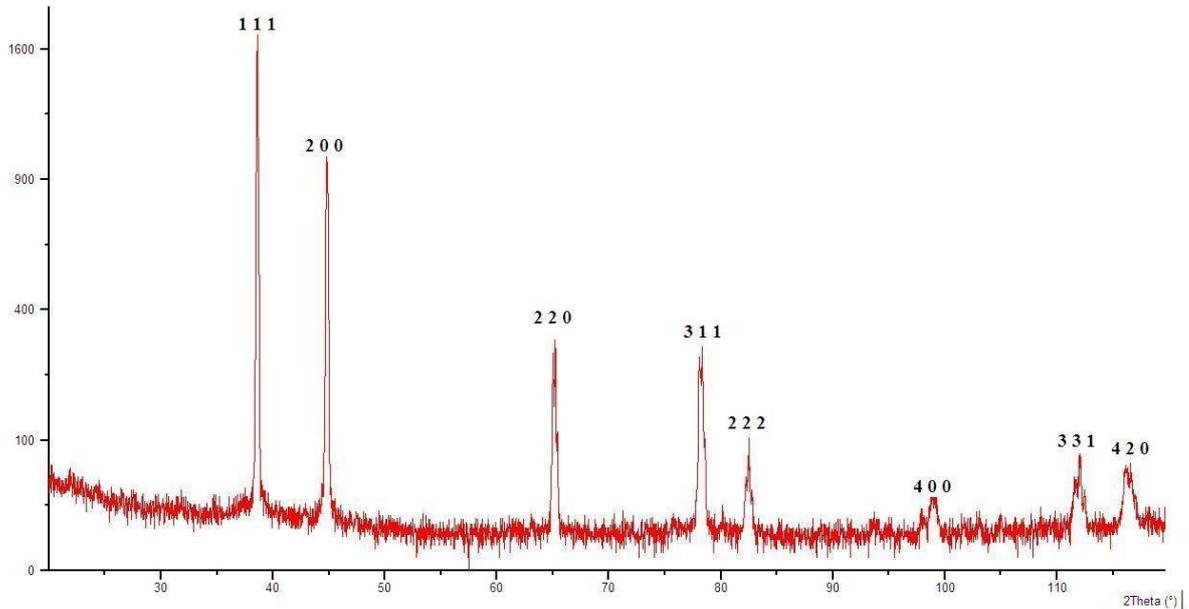


Figure IV-B. 22 : le spectre d'échantillon soudé.

1.4 Caractérisation mécanique des soudures

En général, une soudure n'est acceptée que si les essais mécaniques de traction, de pliage, de résilience et de dureté répondent à des critères de qualités conformément à une norme de référence.

Dans ce travail, on a utilisé l'essai de dureté (Micro-dureté) sur les deux soudures.

C.1. Essai de micro-dureté

L'utilisation de la micro-dureté nous permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'évolution structurale obtenue. C'est un essai très utilisé dans le cas des soudures d'aluminium. Le profil de mesure de dureté (figure IV.B.12) est effectué du centre de la ZF vers le MB avec un pas de 0.3mm sous une charge de 500g.

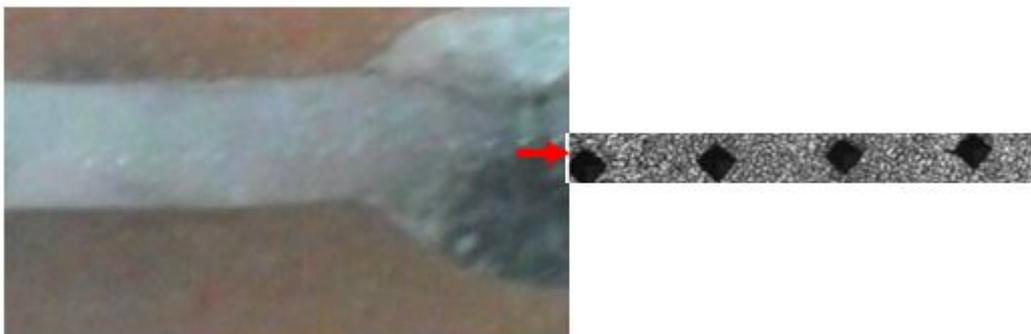


Figure IV-B. 23 : profil de mesure de la micro-dureté.

1.4.1 Analyse des micro-duretés des soudures TIG

Les courbes de duretés des cordons de soudures en courant alternatif et en courant pulsé ne présentent pas la même allure. Une dureté faible dans la zone fondue, suivi d'une croissance

de dureté dans la ZAT (qui présente une zone à grains fins et une zone à gros grains) et se stabilise dans le MB pour la soudure 1. Mais pour la soudure 2, on assiste à une dureté élevée dans la ZF contrairement au courant alternatif, puis une diminution dans la ZAT pour recroître dans la même zone et se stabilise au niveau du métal de base comme indiqué dans les figures

Les phénomènes régissant ce comportement sont difficiles à élucider. Ils dépendent de plusieurs facteurs : l'énergie mise en jeu, les cycles thermiques subits par chaque point et l'étendue de la zone d'influence thermique (l'aluminium est un très bon conducteur thermique). Les travaux de C. Genevois montrent qu'en plus des phénomènes de précipitation, on doit tenir compte de l'état structural après soudage (affinage et grossissements de grains), qui a une influence sur les propriétés mécaniques et plus particulièrement sur la dureté. Sachant que l'affinage du grain est caractéristique d'une mise en solution, les valeurs de dureté élevées correspondent au vieillissement naturel par précipitation des zones GPS et la diminution correspond à la dissolution de ces zones pour des températures entre 250°C et 300°C [27].

❖ Soudure 1 en alternatif

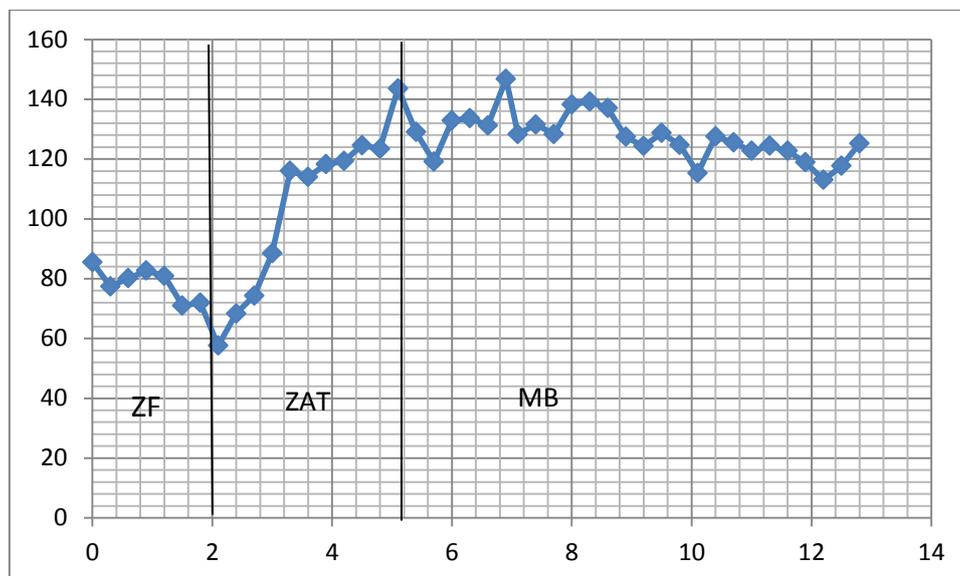


Figure IV-B. 24: profil de micro-dureté de la soudure alternatif.

❖ Soudure 2 en pulsé

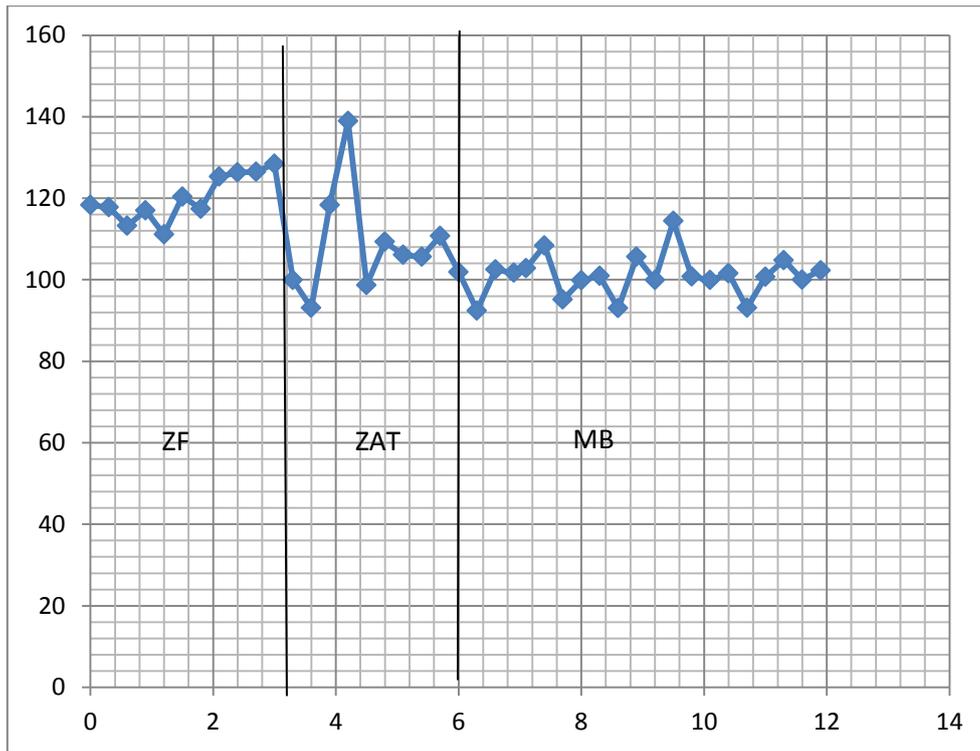


Figure IV-B. 25: Profil de micro-dureté de la soudure en pulsé.

Conclusion générale

Conclusion

Notre objectif dans cette étude, était de réussir à réaliser de bons cordons de soudures dans les deux cas alternatif et pulsé afin de pallier aux problèmes de porosités, défauts et autres.

Le problème auquel nous nous sommes confronté était la compréhension du courant pulsé et alternatif et l'influence des paramètres sur le matériau à savoir :

- la nature du courant imposé ;
- L'influence de la vitesse ;
- L'influence du temps chaud et froid du cycle du courant pulsé.

❖ A travers notre étude, nous pouvons conclure ce qui suit :

- la qualité des soudures augmente avec l'augmentation de l'intensité.
- plus l'intensité augmente, plus le temps de soudage est faible par conséquent plus la vitesse augmente.

-On a réalisé un bon cordon de soudure en courant alternatif sous une intensité 90A , un débit de 8 l/min et une fréquence égale à 2 Hz. Le rôle de la préparation de surfaces joue un rôle très important dans la réussite d'une bonne soudure.

- Le choix des paramètres de soudage, assure une continuité métallique, une bonne mouillabilité du bain de fusion, un bon aspect des cordons ainsi qu'une bonne homogénéité de ceux-ci.
- La vitesse de soudage influe directement sur le comportement mécanique de la soudure et malgré la difficulté de maîtriser cette dernière, nous sommes arrivés à visualiser la différence de vitesse entre les deux courants utilisés.

❖ Concernant la soudabilité métallurgique, on peut dire que

- pour des températures supérieures à 450°C, on peut apprécier les transformations structurales telles que l'affinage du grain juste à la limite de la zone de liaison à gros grains.

- Malgré les précautions de préparation avant soudage, des défauts de types porosité, fissuration et pore ont été décelés.

-le changement de structure remarquable avec changement de la nature du courant.

-Nous pouvons dire que les soudures à deux passes avec métal d'apport à cause du manque de pénétration, provoquent une hétérogénéité structurale remarquable dans la zone fondue.

- L'interaction entre les nombreux paramètres opératoires du soudage TIG ne permet pas de définir un aspect de soudage optimum pour une application donnée. Cependant des «fenêtres de travail» peuvent être établies en essayant de trouver les meilleurs compromis en fonction de la connaissance de l'influence des différents paramètres. En

Conclusion générale

général des combinaisons entre la tension, l'intensité et la vitesse de soudage permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

- Ces paramètres de soudage varient en fonction de l'épaisseur, de la conception des joints et de la configuration de soudage en automatique ou en manuel.

En fin , il serait intéressant de continuer cette étude en jouant sur les paramètres de soudage la nature du courant , les vitesses de soudage et surtout le contrôle des effets thermiques afin de réduire les différents défauts relatifs à la soudabilité du 2219 tout en réglant certains paramètres, et notamment le suivi des températures du bain de fusion.

A cet effet, nous préconisons à toute fin utile l'utilisation de la caméra infra-rouge pour pouvoir suivre de manière correcte les variations de température au niveau des différentes zones du cordon de soudage.

De même nous pouvons dire que l'étude à l'EBSD pourra nous renseigner sur plusieurs points d'ombre qui restent à élucider, notamment sur le plan nature morphologique des grains et ce dans la ZAT et la ZF.

Références bibliographique

- [1] M.Canton, S.Sochon, ALU TOOL, *l'aluminium matériau innovant*, édition afnor 2009, pp. 8-60.
- [2] PECHINEY, *l'aluminium Tome1*, édition Eyrolles, Paris, 1964, page 6.
- [3] L'aluminium. *Techniques de l'Ingénieur tba1066*, page 02, 20,11.
- [4] C. Vargel, *Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages*. Technique de l'ingénieur m4661, Décembre 2005, page2.
- [5] C.Vargel, *corrosion de l'aluminium et ses alliages*, auteur, édition Dunod, Paris, 1999, pp. 6 - 38.
- [6] H.Wilquin, *construire en aluminium*, le moniteur 2001, page 14.
- [7] C.Vargel, *le comportement de l'aluminium et de ses alliages*, édition Dunod, 1979, page 13.
- [8] B.Dobost, P.Sainfort, *durcissement par précipitation des alliages d'aluminium*, Techniques de l'Ingénieur, M 240, Octobre1991, pp. 04-17-19.
- [9] M.F Ashby, D.R.H.Jones, *Matériaux 2, Microstructure et mise en œuvre*, Dunod.1991.
- [10] L.Kaba, *soudage en courant pulsé des alliages d'aluminium 2024T3*, projet de fin de d'études, ENP, 2009.
- [11] S.Jacob, *Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie*. Techniques de l'Ingénieur. M4675, page 11.
- [12] B. Gilmont. *l'aluminium dans les véhicules industriels*, produit par :European Aluminium Association AISBL, www.aluminium.org .Ed.communication, Paris, Août 2011, chapitre2.
- [13] M.REBOUL, *Corrosion des alliages d'aluminium* ; Techniques de l'Ingénieur, cor325, Date de publication : 10/06/2005, page2.
- [14] C.Roland, *Procédés de soudage – Principes généraux et critères de choix*, Techniques de l'Ingénieur b7700, Date de publication : 10/08/1995, page1.
- [15] Alain MICHEL, *Pièces mécaniques soudées - Rappels et définitions*. Techniques de l'Ingénieur, bm5185, Date de publication : 10/04/2006.page 02, 3,4.

Références bibliographique

- [16] E.A. Brandes, G.B. Brook, Smithells, *Light Metals Handbook*, Butterworth-Heinemann (1998) pp. 8-28.
- [17] Roland CAZES, *Soudage à l'arc*. Techniques de l'Ingénieur. B7730, , page 3, 4, 5,6.
- [18] Antony FERNANDS, ESAB France, 11/09/2009.
- [19] jean Michel Jorion, *la soudure à l'arc*, coordination de l'ouvrage : ALAIN Thiebaut, édition : SAEP.
- [20] R. Baus, W.Chaprau, *Application du soudage aux constructions*, 1979.
- [21] Guy MURRY, *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux*. Techniques de l'Ingénieur, m715. date de publication : Date de publication : 10/01/1994
- [22] *VARIANTE DU PROCÉDÉ TIG SOUDAGE TIG PAR IMPULSION*, soudage électrique à l'électrode réfractaire; bibliothèque du Centre de Soudage de Chéraga.
- [23] W. F. Savage, E. F Nippes, *A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloys Steel, Welding Journal Research Supplement*, (1976), p. 260s-268s.
- [24] Author.J.C.Bendyk, *Aerospace structural metals Handbook, non ferrous alloys*, janvier 2013.
- [25] Documentation CSC (CHEARAGA).
- [26] W.H.Kielhorn, *Aluminum and aluminum alloys welding*, AWS handbook, vol.3, Materials and Applications, Edition 97, P 29.
- [27] S.Ouallam, *Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024T3*, Mémoire de Magister, Avril 2009.
- [28] H. AZZAZ et M .BELHAOUA, *Élaboration Et Caractérisation d'une Mousse Métallique à Base de zinc* », mémoire d'ingénieur, USTHB 2009.
- [29] L.Rodrigue, *Étude d'alliages granulaires Cu-Fe-Co, corrélation microstructure-comportements magnétiques propriétés magnéto-résistives*, thèse doctorat, université de Rouen 2005.
- [30] S.OUALLAM, A.DJEGHLAL, Jean-Eric MASSE, Laurent BARRALLIER, International Conference on NDT and Metal Industry (IC-NDT-MI'08) Annaba 12-14 May 2008. *SOUDAGE TIG SUR L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 2024 T3*.
Auteur.

Name and formula

Reference code: 00-004-0787

Mineral name: Aluminum, syn
Compound name: Aluminum
PDF index name: Aluminum

Empirical formula: Al
Chemical formula: Al

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m
Space group number: 225

a (Å): 4.0494
b (Å): 4.0494
c (Å): 4.0494
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm³): 2.70
Volume of cell (10⁶ pm³): 66.40
Z: 4.00

RIR: 3.62

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Common Phase
Educational pattern
Explosive
Forensic
Inorganic
Mineral
NBS pattern
Pigment/Dye

Quality: Star (S)

Comments

Color: Light gray metallic
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Color: Light gray metallic
Sample Preparation: The material used for the NBS sample was a melting point standard

Analysis:

sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA
The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference).
Temperature of Data Collection: Pattern taken at 25 C. Mineral species of doubtful validity, *Am. Mineral.*, **65** 205 (1980). Additional Patterns: See ICSD 64700 (PDF 01-085-1327).

References

Primary reference: Swanson, Tatge., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539*, **I**, 11, (1953)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2.33800	38.473	100.0
2	2	0	0	2.02400	44.740	47.0
3	2	2	0	1.43100	65.135	22.0
4	3	1	1	1.22100	78.230	24.0
5	2	2	2	1.16900	82.438	7.0
6	4	0	0	1.01240	99.081	2.0
7	3	3	1	0.92890	112.046	8.0
8	4	2	0	0.90550	116.574	8.0
9	4	2	2	0.82660	137.463	8.0

Stick Pattern

