

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département de Métallurgie

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

BENALIA Louggani

Thème

Etude comparative du soudage TIG et Laser Yb-YAG en
configuration Bi-spot de l'alliage d'aluminium 2024T3

Soutenu le 13 Octobre 2015

Dirigé par :

M. DJEGHLAL Professeur, ENP Alger

ENP 2015

Dédicace

Dédicace

*Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :
À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup... **Ma mère ;***

*À celui qui m'a appris comment affronter la vie en souriant
Mon père ;*

*À Mes sœurs **Fatiha, Djamila, Zahra, et Safia. ;***

*A Mes frères **Mahjoub, Mostapha, Abderazzak et Hassan ;***

*À Mes cousins et cousines Mes oncles et tantes et toute la
famille **BENALIA ;***

*À tous mes chers Amis chacun par son nom en particulier ;
Zeid & Oussama*

Mes Amis de la cité universitaire Cifosse d'annaba ;

Mes Amis de la cité universitaire Bouraoui Amar d'alger ;

Tous ceux qui m'aiment et tous ceux que j'aime.

B.Loggasní

Remercîments

Remercîments

Avant tout, je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur Mr. Med ELamine DJEGHLAL pour la confiance qu'il a placée en moi, pour sa permanente disponibilité, son investissement et ses précieux conseils qui m'ont guidé dans l'élaboration de ce travail.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury Dr. K. Abadli, Dr. I.kasser respectivement président de jury et examinateur qui ont pris le soin de consulter ce travail et de le juger. C'est vraiment un grand honneur pour moi. Merci

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui m'aidé pour la réalisation de ce travail. En particulier :

-Mr. M.CHETROUB le chef de département de Métallurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique.

- Tous les personnes du CSC travailleurs et chercheurs et notamment le chercheur Mr. Seddik OUALLAM.

- Tous mes amis et notamment les étudiant du département de métallurgie.

J'adresse également mes remerciements à tous les enseignants qui ont participé à ma formation et l'aide qu'ils m'ont fournie pendant mon cursus.

إن المثابرة من أجل تحسين مردود القطع المستعملة في مجال صناعة الطيران (نسبة المقاومة العالية إلى الكثافة) وكذا السعي إلى تخفيض وزنها وأسعارها قادتنا إلى دراسة مختلف تقنيات الإلحام المطبقة على خلائط الألمنيوم. إن الشغل الأساسي خلال عملية تلحيم خلائط الألمنيوم بالانصهار يتمثل في اجتناب العيوب التي قد تنجم عن هذه العملية (المسامية؛ التشققات....) وكذا السعي إلى تحسين مختلف الخصائص والتي لها علاقة بالبنية المجهرية. في هذا العمل استعملنا قطعا من خليط الألمنيوم 2024T3 ألحمت بطريقتين مختلفتين: تلحيم باستعمال تقنية TIG و تلحيم باستعمال حزمة ليزر عالية الطاقة من نوع Yb-YAG; في إطار دراسة تهدف إلى تحديد تأثير مختلف الشروط التطبيقية لعملية الإلحام على التطور الحاصل لخصائص الشريط الملحوم؛ وبالتحديد دراسة التطور الحاصل للبنية الهندسية لهذا الشريط وكذا بنيته المجهرية وخصائصه الميكانيكية بدلالة شروط العمل لكل من التقنيتين.

كلمات مفتاحية

خليط الألمنيوم 2024T3؛ تلحيم بتقنية TIG؛ تلحيم بالليزر Yb-YAG؛ بنية مجهرية؛ خصائص.

Résumé

Pour la fabrication aérospatiale, la persévérance pour améliorer le rendement (haute résistance au rapport de densité) et la réduction du poids et des coûts a motivé l'étude des techniques de soudage applicables aux alliages d'aluminium. Pendant le soudage par fusion de l'alliage d'aluminium 2024T3, l'évitement de défauts (porosité, fissure,...) et l'optimisation des caractéristiques microstructure-propriétés sont des occupations fondamentales. Dans ce travail, le 2024T3 a été soudé par deux procédés de soudage : un soudage TIG et un soudage Laser a haute énergie de type Yb-YAG, dans le cadre d'une étude visant à déterminer l'influence des conditions paramétriques sur les caractéristiques de la soudure. Plus précisément, l'évolution de la géométrie de cordon, de leur microstructure et des propriétés mécaniques a été étudiée en fonction des conceptions opératoires de chacune des deux procédés.

Mots-clés

Aluminium 2024T3, soudage TIG, soudage laser Yb-YAG, microstructure, propriétés.

Abstract

In aerospace manufacturing, the perseverance to improve the performance (high resistance to density ratio) and for the reduction of weight and cost motivated the study of welding techniques for aluminum alloys. During the fusion welding of aluminum alloy 2024T3, avoidance of defects (pores, cracks...) and optimization of microstructure-properties are fundamental features occupation. In this work, the 2024T3 was been welded by the tow processes of welding: TIG welding and Yb-YAG Laser welding, as part of a study to determine the influence of parametric conditions on the characteristics of the weld. More specifically, changes in the cord geometry, their microstructure and mechanical properties have been studied as a function of operative conditions, for etch process.

Keywords

2024T3 aluminum, TIG welding, Yb-YAG laser welding, microstructure, properties.

Table des matières

Table des matières

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

I.1 Introduction.....	1
I.2 les alliages d'aluminium	1
I.2.1. Influence des éléments d'addition.....	1
I.2.2. Etat métallurgique.....	2
I.2.3 Présentation des alliages	2
I.2.3.1. Les alliages de fonderie	2
I.2.3.2. Les alliages de corroyage.....	2
I.2.4 l'alliage d'aluminium 2024T3	3
I.3 Le durcissement structural	4
I.3.1.Cas de l'alliage Al-Cu	4
I.4 Soudabilité des alliages d'aluminium.....	5
I.5 Les procédés utilisés en soudage des alliages d'aluminium	6
I.5.1 Le soudage TIG	7
I.5.1.1 Principe et mise en œuvre du procédé	7
I.5.1.2 Les paramètre du soudage TIG.....	7
I.6.1.3 avantages et inconvénients du procédé TIG.....	9
I.6.2 Le soudage Laser	9
I.6.2.1 Principe de procédés de soudage Laser	10
I.6.2.3 Les paramètres du soudage Laser.....	13
I.6.2.4 Avantages et inconvénients du procédé de soudage Laser	13

Chapitre I : Matériaux et techniques expérimentales.

II.1. Introduction	14
II.2. Présentation du matériau étudié	14
II.3. Préparation métallographique	14
II.4.Méthodes d'observation.....	15
II.5. Essai de microdureté	15

Chapitre I : Résultats et interprétations.

III.1. Introduction.....	16
---------------------------------	-----------

Table des matières

III.2 Contrôle des soudures	16
III.2.1 Contrôle visuel de soudures obtenues en soudage Laser	16
III.2.2 Contrôle visuel de soudures obtenues en soudage TIG	18
II.3. Microstructure de solidification des cordons.....	20
III.4Analyse macrographique	21
III.4.1 Analyse macrographique des soudures Laser	21
III.4.1.1 Effet de l'énergie.....	21
IV.4.1.2.Effet de position focale dans la configuration bispot.....	24
IV.5.3. Effet de l'épaisseur de la tôle	25
III.4.2 Analyse macrographique des soudures TIG.....	27
III.4.2.1 Effet de l'intensité.....	28
V.3.2. Influence du type de gaz	30
V.3.3. influence du diamètre de l'électrode de tungstène	31
III.5 Analyse micrographique	32
IV.5.1. Métal de base (MB)	33
IV.5.2. Zone fondue (ZF).....	34
IV.5.3. Zone affectée thermiquement (ZAT)	34
III.6 Essais mécanique.....	37
III.6.1 Essais de microdureté	37
III.6.1.1 Résultats de l'essai de microdureté pour le soudage Laser	37
III.6.1.2 Résultats de l'essai de microdureté pour le soudage TIG.....	40
III.7 Conclusion générale	41
Références bibliographiques.....	43

Liste des figures

Figure I. 1: Microstructure de métal de base .	4
Figure I. 2: Diagramme d'équilibre Al-Cu.	5
Figure I. 3: Schéma du procédé TIG.	7
Figure I. 4: Influence du type de courant et sa polarité sur la pénétration .	8
Figure I. 5 Principe de procédés de soudage Laser	10
Figure I. 6: Soudage Laser par conduction.	11
Figure I. 7: Schéma explicatif de la formation du capillaire.	11
Figure III. 1: Schéma de principe de la configuration bispot : orientation longitudinale (droite) et transversale (gauche).	12
Figure III. 2: Orientation du bispot par rapport à l'axe de soudage.	12
Figure III. 3: Aspect des soudures Laser.	17
Figure III. 4: Défauts de soudage Laser.	17
Figure III. 5: Structure de solidification classique en chevron pour le soudage Laser (loupe binoculaire, G 6.7).	18
Figure III. 6: Les stries de solidification pour le soudage Laser ; V=2m/min (droite) ; V=5m/min (gauche).	18
Figure III. 7: Manque de pénétration.	18
Figure III. 8: Fissuration à froid.	19
Figure III. 9: Perçage.	19
Figure III. 10: Inclusions.	19
Figure III. 11: Structure de solidification classique en chevron pour le soudage TIG.	20
Figure III. 12: Coupes transverses de cordons :(a) V= 4 m/min ; (b) V=3,5 m/min.	21
Figure III. 13: Macrographies de coupes transversales en configuration bispot.	22
Figure III. 14: Influence de l'énergie linéique sur la largeur (cas bispot).	23
Figure III. 15: Influence de l'énergie linéique sur la profondeur (cas bispot).	23
Figure III. 16: Influence de l'énergie linéique sur la surface fondue (cas bispot).	24
Figure III. 17: Macrographie des cordons à position focale -2mm.	24
Figure III. 18: Macrographies de cordons de soudures.	26
Figure III. 19: Influence de l'épaisseur de la pièce a soudée sur (a) la largeur et (b) la profondeur de pénétration.	27
Figure III. 20: Soudage de l'éprouvette 1.	29
Figure III. 21: Soudage de l'éprouvette 2.	29
Figure III. 22: Soudage de l'éprouvette 3.	30
Figure III. 23: Soudage de l'éprouvette 4.	30
Figure III. 24: Influence du diamètre d'électrode sur la largeur du cordon de soudure pour le soudage TIG : (a) D=3mm ; (b) D=2.5mm.	32
Figure III. 25: Représentation schématique des différentes zones d'un joint soudée. [16].	33
Figure III. 26: Microstructure de métal de base (a) G100 ; (b) G200.	33
Figure III. 27: Microstructure de la zone fondue (grain allongé).	34
Figure III. 28: Microstructure de la zone fondue (grains équiaxes).	34
Figure III. 29: Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT). À droite G200, à gauche G500.	35
Figure III. 30: Soufflures dans la ZF pour le soudage TIG GX50.	35
Figure III. 31: Fissuration au niveau de la ZAT pour le soudage TIG GX50.	35
Figure III. 32: Formation de caniveaux pour le soudage TIG. GX50.	36
Figure III. 33: Microfissuration GX200.	36
Figure III. 34: Défauts de soudage Laser.	36
Figure III.35: Empreintes de l'essai de microdureté GX50.	37

Liste des figures

Figure III. 36: Filiations de microdureté pour le soudage Laser en configuration bispot à position focale $\frac{1}{4}$. -----	38
Figure III. 37: Filiations de microdureté pour le soudage Laser en configuration bispot à position focale $\frac{1}{2}$. -----	39
Figure III. 38: Profils de microdureté de soudure pour le soudage TIG. -----	40

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Influence des éléments d'addition sur les propriétés d'alliage d'aluminium .	1
Tableau I. 2: Normalisation des états métallurgiques .	2
Tableau I. 3: Le classement en série des alliages d'aluminium .	3
Tableau I. 4 : Composition chimique (% massique) de l'alliage 2024 .	3
Tableau I. 5: Propriétés physique et mécanique .	3
Tableau II. 1: Composition chimique de l'alliage 2024T3 (%massique).	14
Tableau III. 1: Les mesures de cordons en configuration bispot.	22
Tableau III. 2 : Influence de l'intensité de courants de soudage TIG.	28
Tableau III. 3: Influence de gaz de protection.	31
Tableau III. 4: Valeurs de microdureté pour le soudage Laser a position focale $\frac{1}{4}$.	38
Tableau III. 5: Valeurs de microdureté pour le soudage Laser a position focale $\frac{1}{2}$.	39

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières années, il y a un intérêt d'innover dans les composants aéronautiques et automobiles produit par usinage des pièces forgées et moulées ou fixés mécaniquement (par exemple : le rivetage) ou par des joints soudés. En particulier, l'industrie aérospatiale cherche continuellement des améliorations de performance tout en augmentant la résistance au rapport de poids ainsi que des réductions des coûts de fabrication. Par conséquent, l'utilisation des procédés de soudage sans augmentation excessive de l'épaisseur de la pièce, présente des avantages considérables dans le processus de fabrication des composants aérospatiaux, à la fois en termes d'économies de poids et de la réduction des coûts.

Le comportement des alliages d'aluminium au soudage diffère d'une manière significative de ceux des matériaux conventionnels comme l'acier. La soudabilité de ces alliages est influencée par les propriétés physiques des alliages à savoir : la grande conductibilité thermique, la formation d'une couche d'oxyde (Al_2O_3) à la surface, un coefficient de dilatation thermique élevé, une haute solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium à l'état liquide.

Tous ces paramètres engendrent lors du soudage des défauts tels que l'apparition d'une large zone de fusion, la fissuration à froid et à chaud, les porosités et les manques de pénétrations qui apparaissent surtout dans certains alliages à durcissement structural (cas du 2024). Tels sont les défis qui sont lancés pour souder ces alliages et en diminuer le taux de réparation sans parler des propriétés mécaniques affectées lors du soudage. Bien que le procédé de soudage à l'arc TIG est généralement choisi pour souder les alliages d'aluminium ; le procédé de soudage à haute densité d'énergie comme le soudage par laser offre un grand potentiel pour souder les alliages d'aluminium en raison de la distribution de l'énergie dans la matière qui est différent au procédé classique TIG. Pour le procédé TIG l'énergie est déposée à la surface de la tôle métallique puis transféré par conduction dans la matière, ce qui n'est pas le cas pour le procédé de soudage laser où l'énergie est distribuée en profondeur de la matière le long de paroi d'un capillaire. C'est le déplacement de cette colonne de vapeur dans la matière qui est à l'origine des cordons de soudures étroits et profonds, caractéristique du soudage laser.

Ainsi ce travail comprend les points suivants :

- Une partie théorique constituée d'une recherche bibliographique sur les alliages d'aluminium, leur soudabilité et le phénomène de durcissement structural ainsi qu'un rappel des principes de mise en œuvre de l'opération du soudage pour les deux procédés de soudage TIG et Laser.
- Le chapitre III : présentation des matériels utilisés ainsi qu'un rappel de différentes techniques expérimentales utilisées pour la réalisation de ce travail.
- Le chapitre IV : Les résultats obtenus et les interprétations.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

I.1 Introduction

Parmi les métaux utilitaires, l'aluminium occupe la seconde place après les métaux ferreux. Il est utilisé soit pur, soit raffiné ou allié. Les éléments d'addition les plus couramment ajoutés à l'aluminium sont : le silicium, le cuivre, le manganèse, le zinc, le magnésium, le titane...etc.

I.2 les alliages d'aluminium

L'aluminium pur ne présente que peu d'intérêt, car ses propriétés physico-chimiques sont médiocres. Ses alliages, eux, sont des matériaux de choix dans des secteurs comme l'aéronautique et l'automobile.

I.2.1. Influence des éléments d'addition

La plupart des propriétés physiques (densité, température de fusion, coefficient de dilatation thermique, et conductivités électriques et thermiques) sont changées par l'addition d'un ou plusieurs éléments d'alliage. Dans le tableau suivant on cite les différents effets des éléments d'addition sur les propriétés d'alliage d'aluminium.

Tableau I. 1 : Influence des éléments d'addition sur les propriétés d'alliage d'aluminium [2].

Elément d'addition	Influence
Cuivre	<ul style="list-style-type: none">- Améliorer les caractéristiques mécaniques.- Facilité d'usinage.- Diminue la résistance à la corrosion.- Rend le soudage très difficile.
Manganèse	<ul style="list-style-type: none">- Propriétés mécaniques améliorées grâce à des précipités de phase Al_6Mn.- Bonne aptitude à la mise en forme.- Bonne résistance à la corrosion.- Soudables.
Magnésium	<ul style="list-style-type: none">- Propriétés mécaniques améliorées grâce à la mise en solution solide du magnésium.- Bonne aptitude à la mise en forme.- Excellente soudabilité.- Bonne résistance à la corrosion.- Aptitude à l'anodisation.
Silicium	<ul style="list-style-type: none">- Propriétés mécaniques médiocres.- Faible ductilité.- Excellente coulabilité.- Bonne résistance à la corrosion.- Diminuer l'usinabilité (car le Si est un élément dur est abrasif).
Zinc	<ul style="list-style-type: none">- très bonnes propriétés mécaniques.- résistance à la corrosion médiocre.- soudabilité moyenne.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

I.2.2. Etat métallurgique

On peut obtenir des alliages d'aluminium en divers états : recuits, écrouis ou trempés et vieillis. On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles. Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie [3]. On distingue 5 états fondamentaux :

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

Symbole	Etats de base
F	Brut de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui
T	Traite thermiquement
W	Trempé et non stabilisé

I.2.3 Présentation des alliages

Les alliages d'aluminium sont repartis en deux grandes familles, les alliages de fonderie et les alliages de corroyage.

I.2.3.1. Les alliages de fonderie

Les alliages de moulage sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules. On élabore des pièces aux formes plus ou moins complexes : poignés de portes, bloc moteurs,...etc. [4].

Les alliages de moulage continuent d'être désignés sous formes alphanumérique suivant la norme AFNOR NF A02-1004 dans lesquelles les lettres qui suivent le A correspondent aux éléments d'addition :

Lettres	Elément d'addition
U	Cuivre
M	Manganèse
S	Silicium
G	Magnésium
Z	Zinc
T	Titane

Ces lettres sont suivies de l'indication numérique de la teneur de l'élément d'addition si celle-ci dépasse 1% [4]. Exemple : AS7G : alliage à 7% de silicium et a moins de 1% de magnésium.

I.2.3.2. Les alliages de corroyage

Les alliages de corroyage qui sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et en suite transformés en demi-produits : tôle, profilés,... Par laminage ou par filage...etc. [4].

Depuis le 1^{er} janvier 1976, les alliages d'aluminium de corroyage sont désignés sous forme numérique par un nombre de 4 chiffres [4]. Dont laquelle le premier chiffre indique le

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

groupe auquel appartient l'aluminium ou l'alliage ; ce chiffre vont de 1 à 9. le deuxième chiffre permet d'identifier des variations où certaines parties ont des teneurs contrôlées pour le groupe 1 (Aluminium non allié) et pour les groupes de 2 à 9, il sert aux modifications successives de l'alliage [4]. Les deux derniers chiffres, ils servent seulement à identifier l'alliage.

Tableau I. 3: Le classement en série des alliages d'aluminium [4].

Groupe	Alliage	Système	Teneur de l'élément d'additions principales
1xxx	1000	Aluminium non allié	
2xxx	2000	Aluminium-Cuivre	Cu : 2 à 6%
3xxx	300	Aluminium-Manganèse	Mn : 0.5 à 1.5%
4xxx	4000	Aluminium-Silicium	Si : 3 à 22%
5xxx	5000	Aluminium-Magnésium	Mg : 0.5 à 7%
6xxx	6000	Aluminium-Silicium-Magnésium	Mg : 0.5 à 1.5% Si : 0.5 à 1.5%
7xxx	70000	Aluminium-Zinc	Zn : 1 à 8%
8xxx	8000	Aluminium+ Autre éléments (Li, Fe,..)	

I.2.4 l'alliage d'aluminium 2024T3

L'alliage d'aluminium 2024 fait partie des alliages de la série 2XXX, dont les principaux éléments d'addition sont le cuivre et le magnésium. D'autres éléments tels que le fer, le manganèse et le silicium peuvent être présents dans l'alliage (Tableau I.4).

Tableau I. 4 : Composition chimique (% massique) de l'alliage 2024 [6].

Aluminium	Composition chimique (%massique)								
	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autre
2024	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	<0,5	<0,5	<0,25	<0,5	<0,1	<0,15

Les propriétés physiques et mécaniques sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau I. 5: Propriétés physique et mécanique [7].

Alliage	R _e (2%) (MPa)	R _r (MPa)	A% L ₀ =50mm	Résistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D ²)	Contrainte de la fatigue (MPa) 500MHz
2024 T3	345	485	18	285	120	140

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

Les observations au microscope optique de l'alliage étudié mettent en évidence que sa structure est de type granulaire allongée, provoquée par le laminage (Figure I.1). Ce dernier, est entouré par de petites particules plus ou moins espacées représentative de la précipitation au joint de grain.

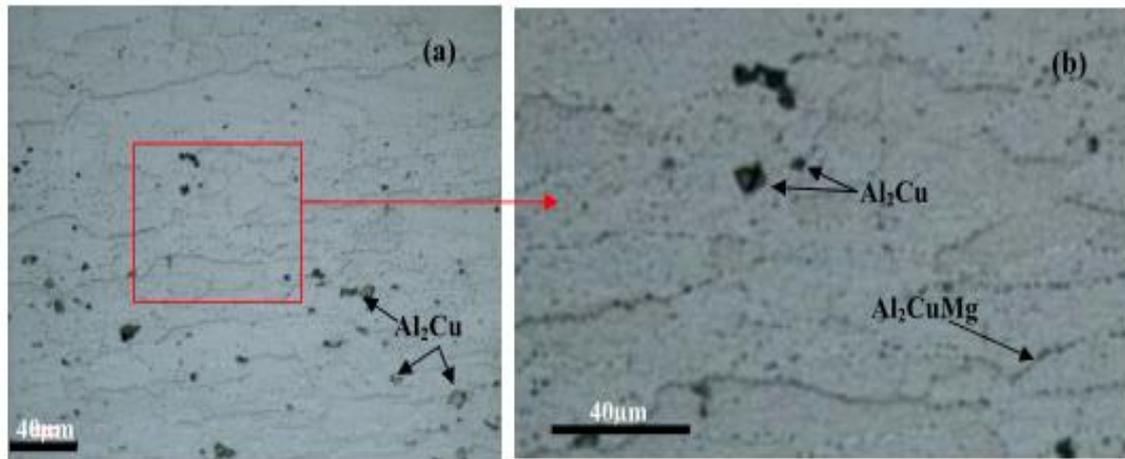


Figure I. 1: Microstructure de métal de base [8].

Enfin la composition de l'alliage seule n'est pas suffisante pour conférer au matériau les propriétés mécaniques requises pour les applications industrielles ; c'est pourquoi on a recours à des traitements thermiques, qui, selon les cas, produisent un adoucissement ou un durcissement, ainsi que des changements de comportement vis-à-vis de la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, de l'allongement ...etc. [9].

I.3 Le durcissement structural

Le durcissement d'un alliage lors de la maturation ou du revenu est dû à l'interaction des dislocations avec les zones GP et les phases précipitées, en ce sens que la présence de ces particules précipitées tend à bloquer le mouvement des dislocations, rendant ainsi plus difficile la propagation de la déformation et augmentant, par conséquent, la résistance mécanique de l'alliage.

Le durcissement structural des alliages d'aluminium s'effectue en 3 principales étapes :

- Mise en solution à une température suffisamment élevée pour mettre en solution le plus grand nombre d'éléments durcissant ;
- Refroidissement rapide ou trempe à l'eau ou à l'huile ; On évite ainsi le nez de la courbe TTT et on obtient à température ambiante une solution solide fortement sursaturée.
- Maturation ou revenu pendant lesquels se produit la décomposition contrôlée de la solution solide sursaturée. C'est cette dernière étape qui sera responsable du durcissement structural par précipitation.

I.3.1.Cas de l'alliage Al-Cu

Pour élucider le phénomène de durcissement structural dans le cas de l'alliage Al-Cu on se réfère aux diagrammes d'équilibre Al-Cu ci-dessous :

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

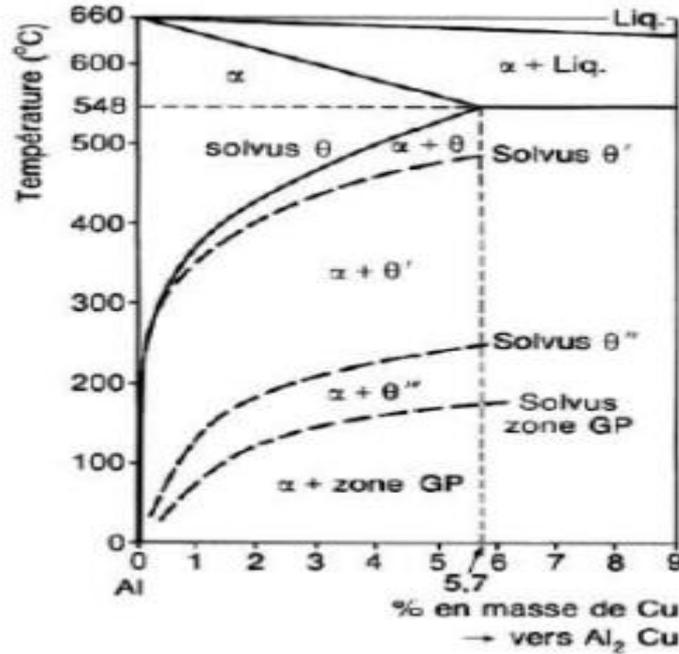


Figure I. 2: Diagramme d'équilibre Al-Cu [12].

Alors dans le cas d'un alliage Al-Cu (figure I.2) la séquence de décomposition est la suivante :

Solution solide sursaturée $\alpha \rightarrow$ Zones Guinier Preston P \rightarrow phase $\theta'' \rightarrow$ Phase $\theta' \rightarrow$ Phase θ

Les courbes de solidus métastables des zones **GP** et des phases de transition comme le montre la figure I.2 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

I.4 Soudabilité des alliages d'aluminium

Le comportement des alliages d'aluminium au soudage diffère d'une manière significative de ceux des matériaux conventionnels comme l'acier. La soudabilité de ces alliages est influencée par les propriétés physiques des alliages à savoir :

- La grande conductibilité thermique (3 à 5 fois celle de l'acier).
- Module d'élasticité relativement faible (3 fois plus faible que celui de l'acier) favorable pour la réduction des contraintes résiduelles dues au soudage.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

- Coefficient de dilatation thermique élevé qui peut être la cause de déformations, d'où l'intérêt également de moyens de chauffage puissants, rapides et localisés.

- Oxydation superficielle : très stable thermiquement, la pellicule d'oxyde (alumine Al_2O_3) qui recouvre naturellement l'aluminium fait obstacle à la bonne liaison entre métal de base et métal d'apport, aussi le procédé de soudage retenu doit-il assurer simultanément une fonction décapage ou élimination de la couche d'oxyde et une fonction protection qui a pour but d'éviter la ré-oxydation du bain l'aluminium liquide au moment du soudage.

- Solubilité de l'hydrogène : l'aluminium liquide est susceptible de dissoudre des quantités importantes d'hydrogène ce qui se traduira au moment de sa solidification par la présence de porosités pouvant s'avérer rédhibitoires pour la qualité du joint soudé. L'hydrogène peut provenir de la décomposition, soit de l'eau de l'atmosphère ambiante ou de l'alumine hydratée superficielle, soit de produits organiques recouvrant la surface à souder (huile de coupe, huile de protection, corps gras divers...) [8].

Tous ces paramètres engendrent lors du soudage des défauts tels que la fissuration à chaud, les porosités et les manques de pénétrations qui apparaissent surtout dans certains alliages à durcissement structural (cas du 2024).

I.5 Les procédés utilisés en soudage des alliages d'aluminium

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que : le type d'énergie mise œuvre, les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur), le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) et la morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

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

La première catégorie est le soudage par pression qui 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.

La deuxième catégorie est le soudage par fusion où 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 (MIG, MAG, TIG...)
- Soudage Laser
- Soudage par jet de plasma.
- Soudage par résistance [13]

Dans le cadre de ce travail nous nous intéresserons du deux procédé de soudage : Le soudage TIG et le soudage LASER.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

I.5.1 Le soudage TIG

Dans un contexte industriel qui réclame un degré de qualité de plus en plus élevé, le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui, dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. Le procédé TIG est l'un des procédés conventionnels utilisés pour le soudage d'aluminium.

I.5.1.1 Principe et mise en œuvre du procédé

Par définition, le terme TIG est l'abréviation de (Tungsten Inert Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par G.T.A.W (Gas Tungsten Arc Welding).

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 [15].

À l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base (par exemple : courant continu pour les aciers inoxydables), on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport (éventuel) formant ainsi le joint soudé après refroidissement. Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de l'air le métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène. [14]

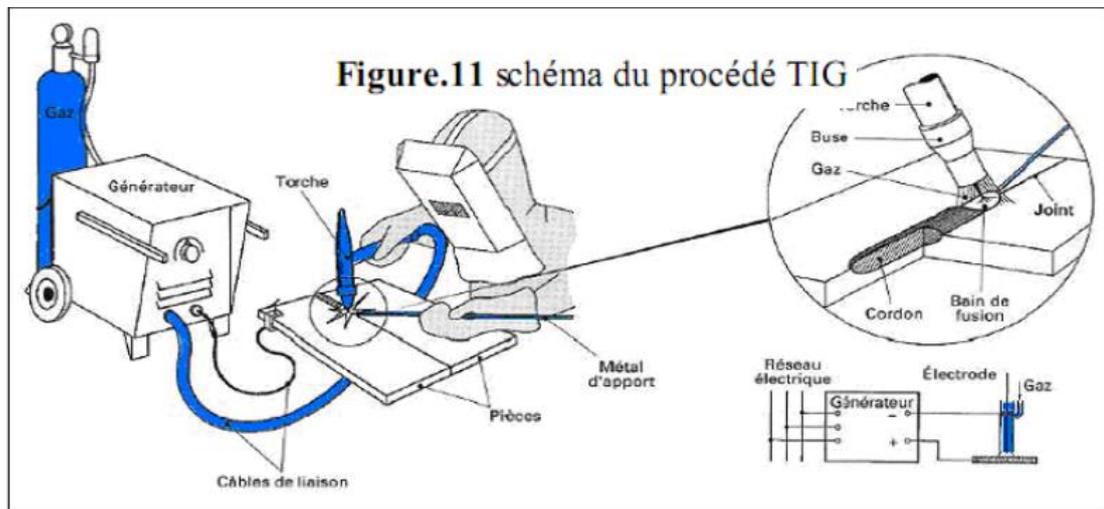


Figure I. 3: Schéma du procédé TIG [14].

I.5.1.2 Les paramètres du soudage TIG

Les paramètres de soudage contrôlent la forme du cordon de soudure, sa morphologie, son état métallurgique ainsi que les dimensions de la zone affectée thermiquement au voisinage du cordon de soudure. On cite les principaux paramètres qui interviennent lors du soudage TIG.

a) Nature du courant et effet de la polarité :

Les procédés de soudage à l'arc peuvent être utilisés en courant continu (DC), avec électrode négative (EN) ou positive (EP), ou en courant alternatif (AC). Ces différentes

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

configurations présentées sur la figure ci-dessous se traduisent par des différences de morphologies du bain de fusion.

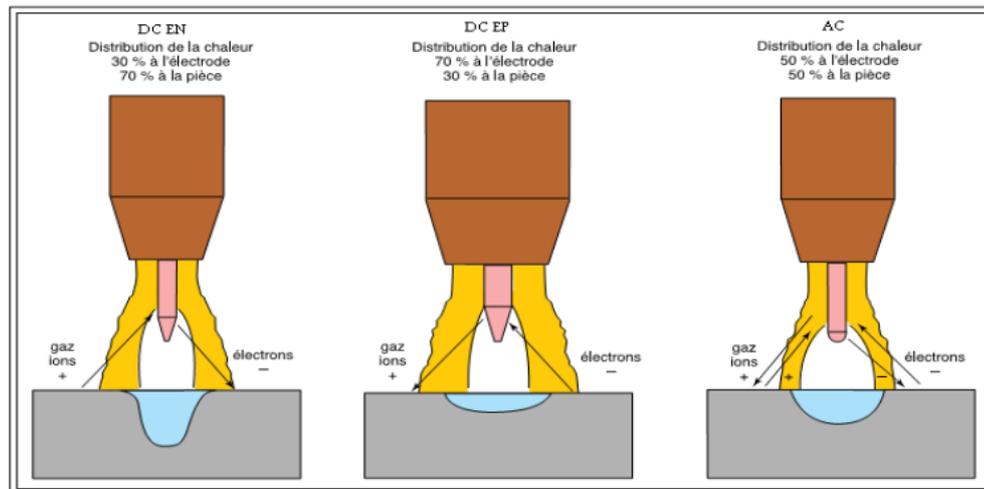


Figure I. 4: Influence du type de courant et sa polarité sur la pénétration [15].

a).1 Courant continu polarité négative (DC EN) :

En courant continu, lorsque l'électrode est connectée à la borne négative (DC-), les électrons sont émis de l'électrode de tungstène vers la pièce de travail de polarité positive. Ces électrons hautement énergétiques rentrent en collision avec la pièce en abandonnant leur énergie cinétique et génèrent un échauffement considérable. Il en résulte une pénétration importante, un cordon de soudure étroit mais aussi un apport de chaleur significatif pouvant induire des contraintes résiduelles et des déformations non désirables.

a).2 Courant continu polarité positive (DC EP) :

Lorsque l'électrode est connectée à la borne positive (DC+) l'effet de l'apport de chaleur des électrons par leur énergie cinétique se concentre sur l'électrode plutôt que sur la pièce à souder. Ceci nécessite un refroidissement plus important des électrodes et cela engendre un cordon moins pénétrant, plus large, et un faible échauffement de la pièce de travail. De plus les ions positifs qui rentrent en collision avec la pièce de travail en provenance de l'électrode positive ont un effet nettoyant sur la surface oxydée. Ce mode de soudage est préconisé pour les faibles épaisseurs des métaux s'oxydant rapidement comme l'aluminium et le magnésium.

Cependant, ce mode présente un inconvénient qui est le risque de fusion de l'électrode de tungstène ceci pouvant produire un défaut d'inclusion de tungstène dans le cordon de soudure.

a).3 Courant Alternatif (CA) :

Le soudage en courant alternatif réunit à la fois les deux caractéristiques du courant continu. Pendant l'alternance positive, il y a un fort effet de nettoyage du bain de fusion et, pendant l'alternance négative, la chaleur est plus concentrée dans le bain de fusion, ce qui a pour effet d'augmenter la pénétration.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

b) La vitesse de soudage

Ce paramètre influe 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 affectée thermiquement 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 [14]

c) Les gaz de protection en TIG :

Les gaz inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient à presque tous les cas d'application. L'hélium, plus coûteux que l'argon, est utilisé lorsque l'on peut tirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quant aux mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix [14].

I.6.1.3 avantages et inconvénients du procédé TIG

Avantages:

- Produits de hautes qualités, et soudure de basse déformation.
- Peut être employé avec ou sans métal d'apport.
- Peut être employé avec une gamme d'alimentation d'énergie différente.
- Procède utilisé presque pour tous les matériaux.
- Commande précise pour la température de soudage.
-

Inconvénients:

- Basse production de déposition que le soudage à l'électrode.
- Moins économique que le soudage à l'électrode pour les profondeurs supérieures à 9,5 mm.
- Difficulté de protection de la zone de soudure envers l'environnement venteux

I.6.2 Le soudage Laser

En 1916, Albert Einstein définit les lois d'émission de photons (lumière) par stimulation (pompage optique) et émet le principe de l'émission stimulée qui ouvre la porte à une nouvelle technologie : le LASER « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » soit en français Lumière Amplifiée par Stimulation d'Emission de Rayonnement [16]. Le faisceau Laser est caractérisé par sa longueur d'onde (le rayonnement est monochromatique), sa divergence (φ en mrad), son faible diamètre, sa cohérence temporelle et spatiale.

Au cours des dernières années l'utilisation du Laser en tant que procédé de soudage s'est accélérée. Implanté dans un premier temps dans le secteur automobile grâce à

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

son adaptabilité aux cadences élevées, son développement dans d'autres secteurs industriels n'a pas tardé.

I.6.2.1 Principe de procédés de soudage Laser

Le faisceau Laser est orienté par un jeu de miroirs ou par fibre optique de la source vers une tête de soudage où il passe par un système de focalisation permettant de réduire son diamètre. Après focalisation, le faisceau est envoyé directement sur la surface des pièces à souder. L'effet du rayon Laser sur la matière est dû à son absorption en surface où il se transforme en chaleur.

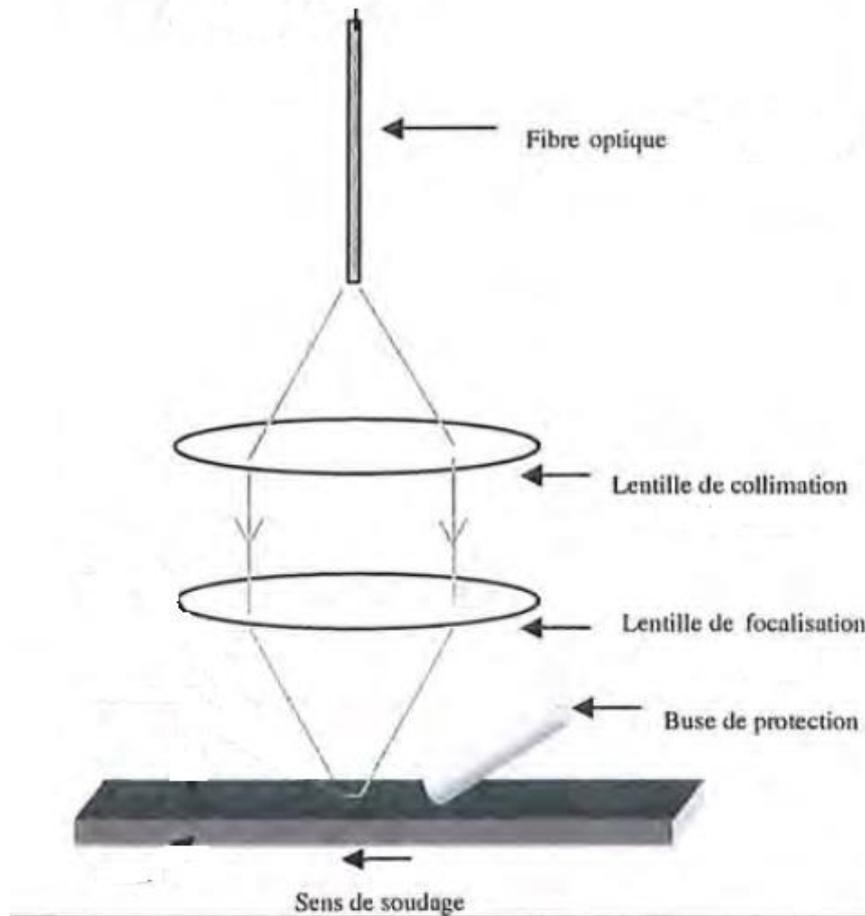


Figure I. 5 Principe de procédés de soudage Laser

Le processus de soudage par faisceau Laser se caractérise par des densités de puissances Laser élevées comprises entre 1 et 20 MW/cm². On distingue deux modes de soudage Laser :

a) Le soudage Laser par conduction

Ce mode nécessite une faible densité de puissance (< 1 MW/cm²). Dans son principe, ce processus est proche du soudage conventionnel, les faibles densités de puissances impliquées n'affectant que superficiellement le métal à souder. Dès lors, les cordons de soudure obtenus sont peu profonds et étroits. A la différence des processus conventionnels, le soudage Laser par conduction permet d'obtenir des zones affectées thermiquement (ZAT) moins larges, ce qui limite de manière importante les déformations thermiques de la tôle. C'est le principal avantage de ce type de soudage Laser face aux autres techniques de soudage conventionnel (Figure I.5).

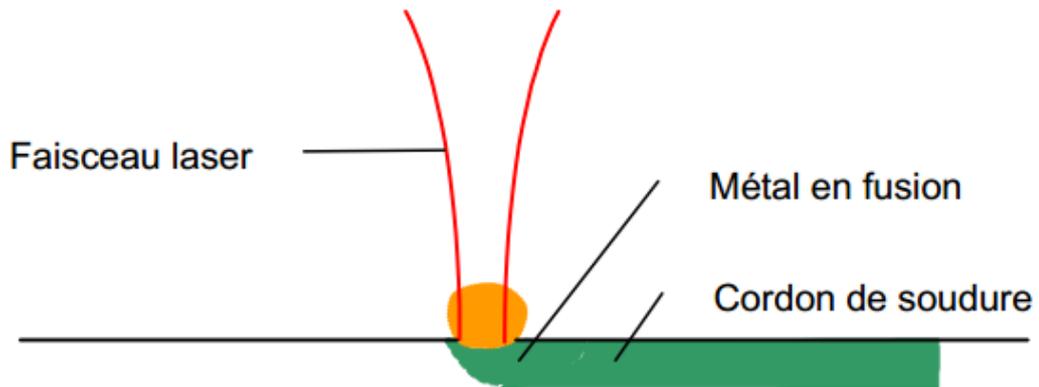


Figure I. 6: Soudage Laser par conduction.

b) Le soudage Laser par Keyhole

Le soudage Laser de forte profondeur nécessite des densités de puissance Laser à la surface du matériau beaucoup plus élevées ($>5 \text{ MW/cm}^2$) (Figure I.6). Ce processus se caractérise par un apport d'énergie important à la surface du matériau qui élève sa température au-delà de son point de vaporisation. La détente de cette phase vapeur donne lieu à une pression de recul qui enfonce localement le bain de métal en fusion dans la zone d'interaction. Un capillaire de vapeur étroit et profond se forme alors dans le bain. Typiquement le diamètre de ce capillaire est de l'ordre de celui de la tache focale du Laser et sa profondeur peut atteindre plusieurs millimètres (1 à 20 mm). Le capillaire est entouré d'un bain de métal en fusion qui, en se solidifiant, laisse place à un cordon de soudure étroit et profond.

Comme dans le cas du soudage Laser par conduction, le soudage Laser de forte profondeur conserve une zone thermiquement affecté (ZAT) étroite. Lorsque le faisceau se déplace le long du plan de joint, le métal en fusion est rejeté vers l'arrière et referme le capillaire en formant un cordon de soudure et assurant la continuité métallurgique entre les pièces

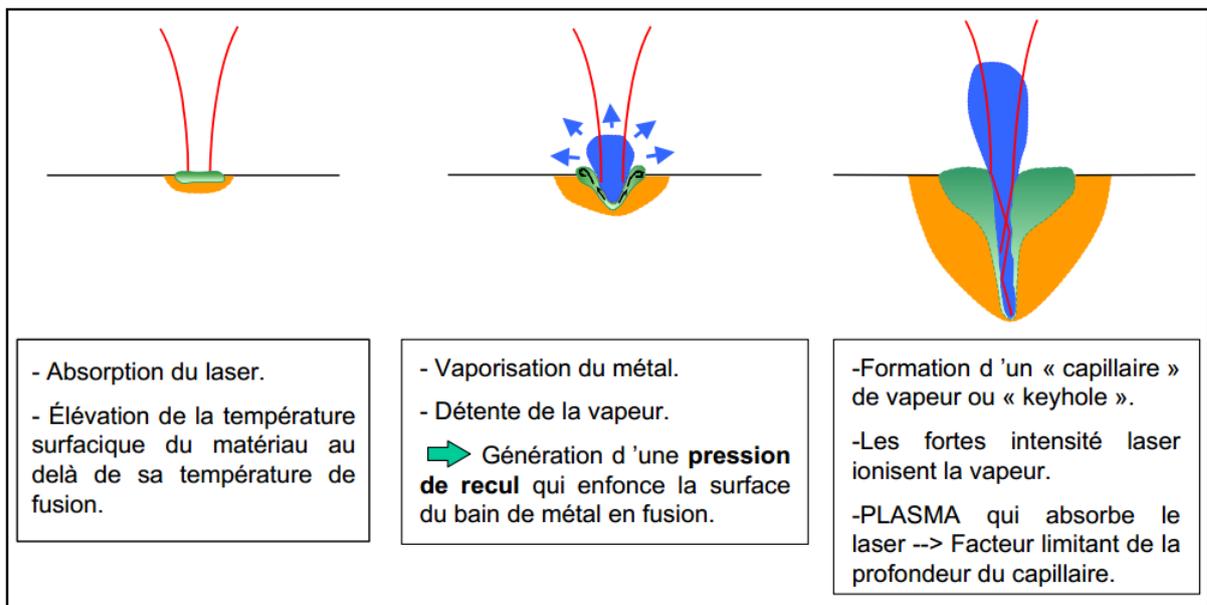


Figure I. 7: Schéma explicatif de la formation du capillaire [19].

I.6.2.2 Soudage Laser en configuration bi-spot

Dans la pratique, de nombreux cordons de soudure ont été réalisés en utilisant deux faisceaux laser intenses positionnés côte à côte. Les soudures réalisées avec cette technique particulière appelée « bi-spot », montre une amélioration certaine de la qualité des cordons. Ces derniers présentent moins de porosités et les aspects surfaciques des cordons sont plus lisses. Ces constatations sont d'autant plus significatives lorsque l'on soude des métaux très visqueux en phase liquide tel que l'aluminium.

Ce mode de soudage Laser est obtenu par insertion d'un prisme entre la lentille de collimation et la lentille de focalisation, qui permet de dédoubler le faisceau. La figure ci-dessous rappelle le principe d'obtention de la configuration bispot.

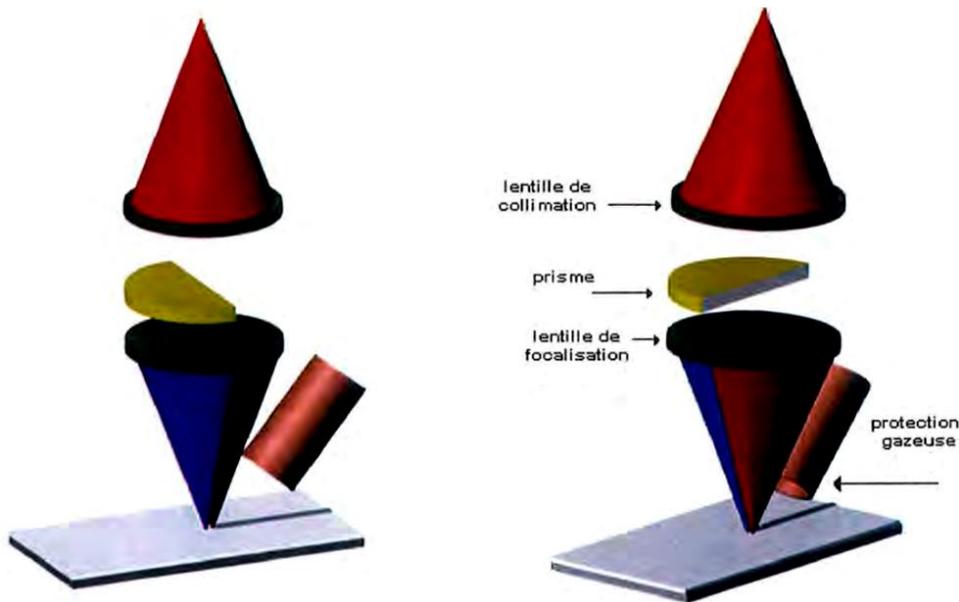


Figure III. 1: Schéma de principe de la configuration bispot : orientation longitudinale (droite) et transversale (gauche).

Pour l'ensemble des essais réalisés en configuration bispot, la distance focale de la lentille de focalisation est de 300 mm. Deux orientations de spots longitudinale et transversale prouvent obtenues dans ce cas comme le montre la figure ci-dessous.



Figure III. 2: Orientation du bispot par rapport à l'axe de soudage.

Chapitre I : Généralités sur le soudage d'alliages d'aluminium

- a) Configuration longitudinale (tandem) Spots l'un derrière l'autre selon l'axe défini par le plan de joint
- b) configuration transverse Spots côte à côte selon l'axe défini par le plan de joint

I.6.2.3 Les paramètres du soudage Laser

Différents paramètres opératoires du soudage Laser peuvent être optimisés afin d'obtenir une géométrie de cordon adaptée et une qualité de soudage maximale. Ces différents paramètres opératoires sont les suivants :

- la puissance Laser : elle peut être continue ou impulsionnelle.
- la vitesse de soudage : comme pour le procédé de soudage TIG, l'augmentation de la vitesse de soudage à une puissance fixe conduit à des bains fondus moins pénétrés et des cordons de soudure moins larges.
- le diamètre de la tache focale : elle est déterminée à travers les optiques utilisées (fibre optique utilisée pour le transport du Laser collimation et focalisation).
- la position du point de focalisation : dans le cas du soudage, on focalise soit en surface, soit dans la matière, soit en dehors de la tôle à souder.
- le gaz de protection : il permet d'éviter l'oxydation des tôles ainsi que les porosités dans le cordon de soudure. La difficulté est d'adapter au mieux le gaz de protection au matériau utilisé et à la configuration de soudage.

I.6.2.4 Avantages et inconvénients du procédé de soudage Laser

Le soudage Laser présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients

Avantages :

- une soudure sans métal d'apport.
- une pénétration importante.
- une zone affectée par la chaleur transversalement très réduite.
- des déformations limitées.
- une vitesse de soudage élevée.
- le soudage en angle, ainsi que des zones réputées difficiles voire impossibles d'accès pour d'autres techniques [16].

Inconvénients :

- par rapport aux procédés classiques de soudage, la technologie Laser est coûteuse. En plus de la nécessité d'appareils annexes comme une table de soudage commandée numériquement. Mais le surcoût est vite compensé par les avantages décrits précédemment.
- l'accostage des pièces demande beaucoup de rigueur pour le soudage bord à bord, une bonne maîtrise du jeu entre les deux pièces est demandée afin de respecter les tolérances d'accostage serrées et d'assurer une bonne interaction Laser-matière tout au long de la ligne de soudure.

Chapitre II :
Matériaux et techniques
expérimentales.

II.1. Introduction

Le présent chapitre est consacré à la description du déroulement des essais conduits sur le matériau sujet de l'étude. Nous allons donc présenter en premier lieu le matériau. Ensuite nous décrirons les techniques utilisés pour la préparation métallographique des échantillons. Puis nous détaillerons les étapes du déroulement des caractérisations macro et microscopiques ainsi que les essais mécaniques faites pour la caractérisation mécanique.

II.2. Présentation du matériau étudié

Le matériau que nous avons utilisé est un alliage d'aluminium de nuance 2024T3. C'est un alliage de corroyage, qui, selon la norme NF A 02-104, a subi un traitement de mise en solution, trempé, écroui et enfin muri (vieillessement naturel) avec une composition chimique donnée par le tableau ci-dessous.

Tableau II. 1: Composition chimique de l'alliage 2024T3 (%massique) [8].

Eléments	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Autres
Teneurs en masse %	92.42	4.91	1.98	0.59	0.008	0.092

II.3. Préparation métallographique

L'étude métallographique nécessite une bonne préparation de la surface. L'obtention d'une surface d'examen nécessite une série d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique.

Après le prélèvement des échantillons, nous avons procédé les étapes suivantes :

- ✓ L'enrobage à froid nécessite l'investissement des résines thermodurcissables et des moules en caoutchouc, il est choisi en fonction de la forme de la pièce et les traitements que le matériau a subi pour ne pas affecter les changements structuraux qu'il peut présenter et bien sûr pour faciliter la préhension et la manipulation des échantillons.
- ✓ Le polissage mécanique est basé sur l'utilisation de papiers abrasifs à grains de plus en plus fins afin d'obtenir une surface optimale pour l'observation microscopique. Il faut donc polir progressivement pour effacer les imperfections, rayure et autre, et faire disparaître les dommages et les déformations de la surface.

Le polissage de finition est ensuite accompli sur les draps feutre à suspension d'alumine, de taille des grains de 1µm, dans le but d'éliminer les rayures persistantes issues du polissage

- ✓ Attaque chimique : Afin de révéler les microstructures des échantillons, nous avons utilisé un réactif de Keller (chlorhydrique-acide fluorhydrique), d'une composition

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales

arrêtée, qui permet d'attaquer la région des grains. Ce réactif est réalisé avec des acides précis dans la composition suivant :

- 190 ml de H₂O ;
- 5 ml de l'acide nitrique HNO₃ ;
- 3 ml de l'acide chlorhydrique HCl ;
- 2 ml de l'acide fluorhydrique HF.

L'attaque chimique a duré d'environ 60 sec, selon le cas, jusqu'à observation de la microstructure. Les échantillons ont été ensuite rincés à l'eau du robinet puis séchés convenablement.

II.4.Méthodes d'observation

La macrographie et la micrographie constituent deux méthodes optiques d'examen direct de la surface des métaux. Elles présentent un très grand intérêt car elles fournissent à une échelle différente de nombreux renseignements sur la texture et la structure des métaux et alliages.

Macrographie : C'est l'étude des surfaces polies, à faible grossissement (<50).

Les observations ont été effectuées au microscope optique de type OPTIKA, de grossissements allant de 6.7 à 50, relié à une caméra. Les macrographies ont été prises par l'intermédiaire du logiciel d'analyse d'image NIS-Élément D 4 qui permet de traiter et de sauvegarder les images.

Micrographie : L'étude micrographique se fait par réflexion par microscope métallographique. Nous avons utilisé un microscope optique qui présente de nombreuses fonctionnalités : fond clair, fond noir, polariseurs croisés, contraste de phase. Il est d'un grossissement allant de 50 à 1500. Il est aussi muni d'une caméra qui permet de visualiser les échantillons sur un écran d'ordinateur. Les micrographies ont été prises par l'intermédiaire du logiciel d'analyse d'image NIS-Élément D 4 qui permet de lire et de sauvegarder les images.

II.5. Essai de microdureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La microdureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur sur la surface de matériaux contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou ; en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

Essai de dureté Vickers (HV) sur les assemblages soudés

Dans le cas de la microdureté Vickers le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de 136° au sommet. La charge de l'essai pour la microdureté est de 50 gf. Cette charge est appliquée d'une manière progressive et constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte, elle est ainsi maintenue pour une période de temps de 15 secs.

Chapitre III :

Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Le présent chapitre est consacré à une étude comparative entre les deux procédés de soudage : le soudage TIG et le soudage Laser de Type : Yb-YAG en configuration Bispot. Nous allons étudier en premier lieu, les effets des différents paramètres de soudage (énergie, vitesse de soudage...etc.) sur la morphologie et les dimensions des cordons de soudure obtenues. Puis nous étudions les variations de l'ordre métallurgique, induites par les différentes conditions de soudage pour les deux procédés en termes de microstructure, de microdureté et de traction.

III.2 Contrôle des soudures

L'une des étapes qui suit le soudage est le contrôle non destructif, il permet de détecter toutes les imperfections qui peuvent se produire lors du soudage. Parmi les méthodes non destructives pour le contrôle des soudures d'aluminium nous retrouvons :

- Le contrôle visuel.
- Le contrôle radiographique.
- Le contrôle par ressuage.
- Le contrôle par ultrasons.

Dans notre travail, on fait des contrôles visuels à l'œil nu pour les deux procédés de soudage.

III.2.1 Contrôle visuel de soudures obtenues en soudage Laser

Les cordons obtenus sont généralement pénétrants. L'aspect de surface est homogène tout au long du cordon et lisse aussi. Mais on y détecte la présence de caniveaux et de projections de matière entraînant des surépaisseurs locales et de morphologie défavorable (Figure II.2). Ce phénomène semble lié aux propriétés physiques des alliages d'aluminium qui sont l'origine de la majorité des défauts rencontrés en soudage Laser. En effet, du fait de faibles tensions de surface, et de faible viscosité (particulièrement faibles pour les alliages d'aluminium), le bain est facilement déformé.

Chapitre III : Résultats et interprétations

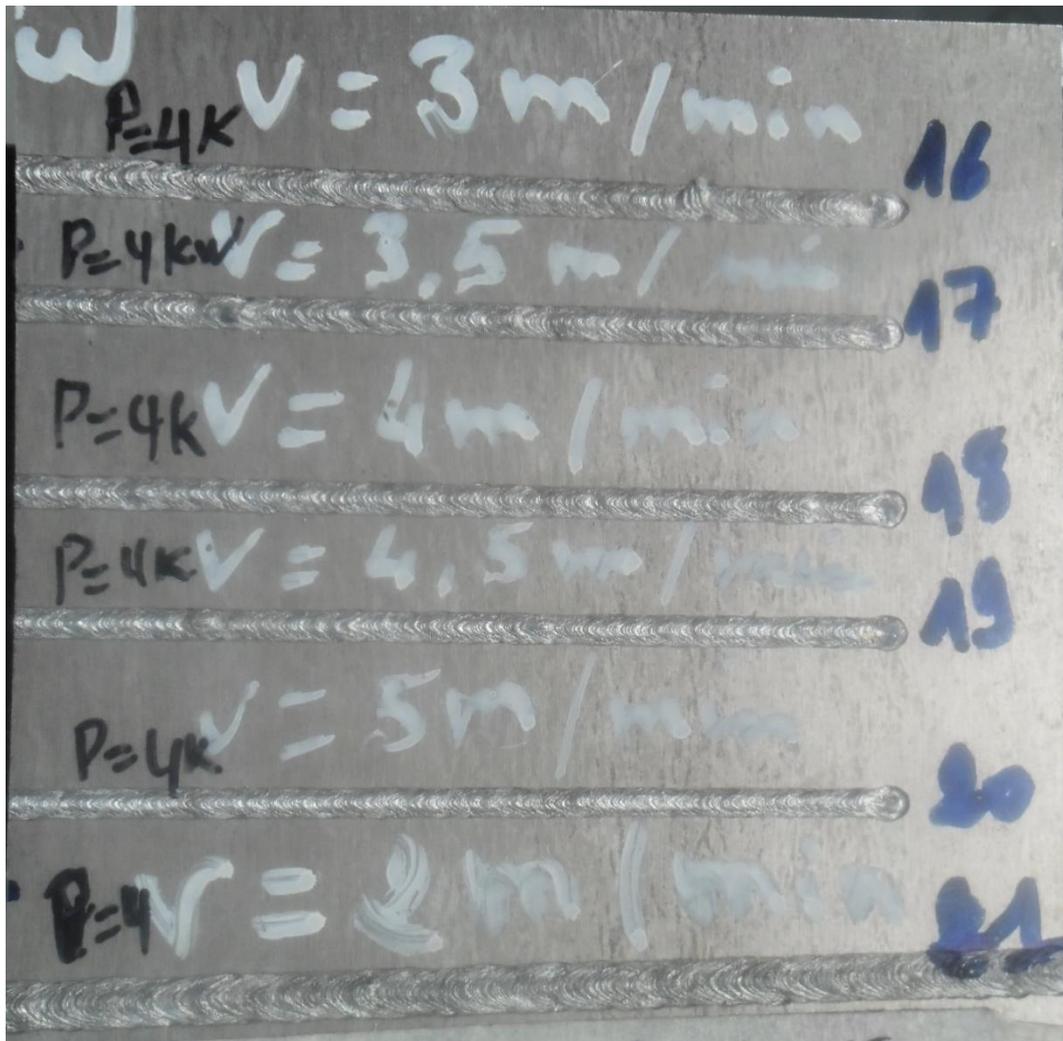


Figure III. 3: Aspect des soudures Laser.

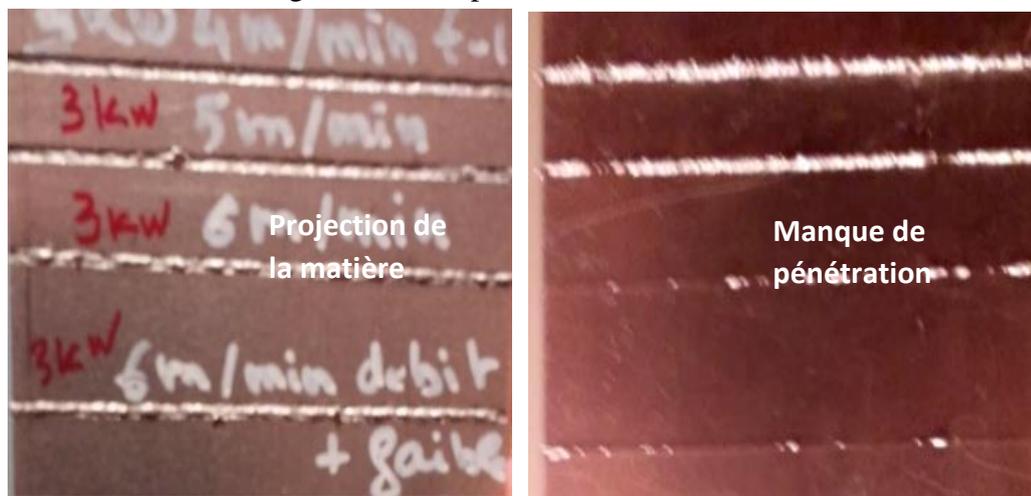


Figure III. 4: Défauts de soudage Laser.

Dans la figure III.3., on remarque une structure de solidification classique en chevron de forme (>>>>) qui est générée par des distances inter-chevron différentes selon la vitesse de solidification, les distances inter-chevron augmentent pour des vitesses de solidification lente (Figure III.4). La largeur moyenne mesurée du cordon est de 3mm sur la face endroit.

Chapitre III : Résultats et interprétations

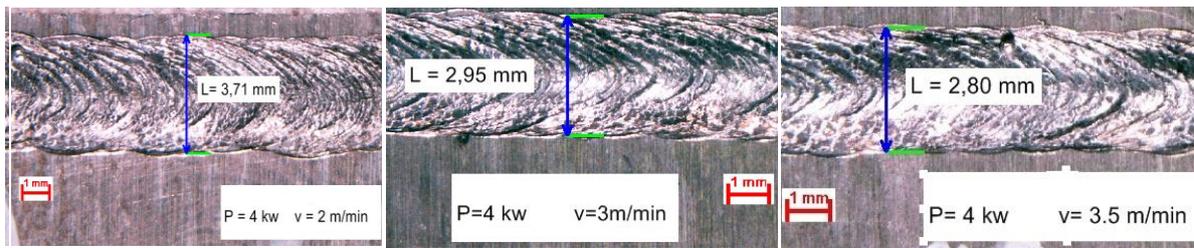


Figure III. 5: Structure de solidification classique en chevron pour le soudage Laser (loupe binoculaire, G 6.7).

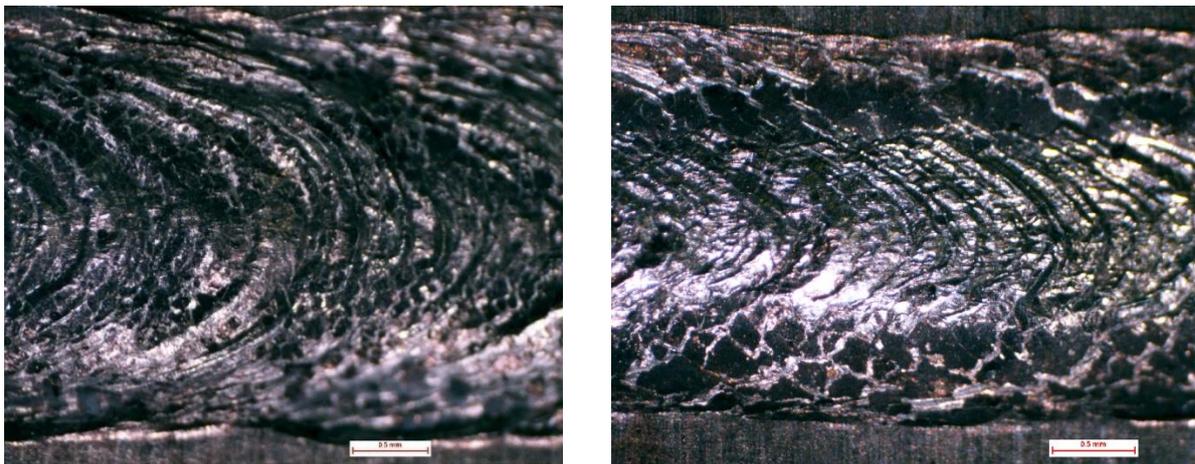


Figure III. 6: Les stries de solidification pour le soudage Laser ; V=2m/min (droite) ; V=5m/min (gauche).

III.2.2 Contrôle visuel de soudures obtenues en soudage TIG

Ce contrôle nous a permis de détecter des défauts superficiels sur les soudures, tels les défauts de manque de pénétration (figure III.5), des fissurations à chaud et à froid (figure III.6), des inclusions de tungstène sont observés (figure II.7I) et perçage de tôles (figure III.8).

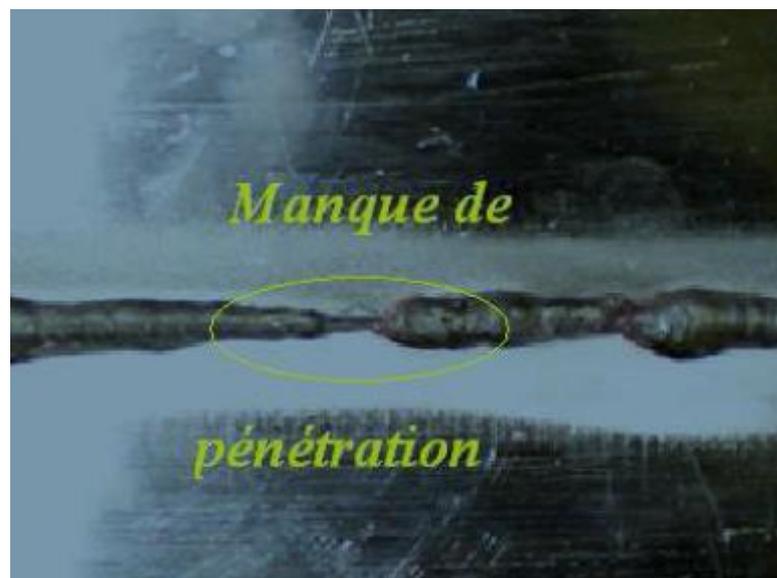


Figure III. 7: Manque de pénétration.

Chapitre III : Résultats et interprétations



Figure III. 8: Fissuration à froid.



Figure III. 9: Perçage.



Figure III. 10: Inclusions.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Une structure de solidification classique en chevron de forme (\gggg) qui est générée par des distances inter-chevron différentes selon la vitesse de solidification, est aussi observée pour ce procédé de soudage mais avec des défauts plus ou moins marqués tels que la concavité, le parçage La largeur moyenne mesurée du cordon est de 7.5 mm sur la face endroit (Figure III.9).

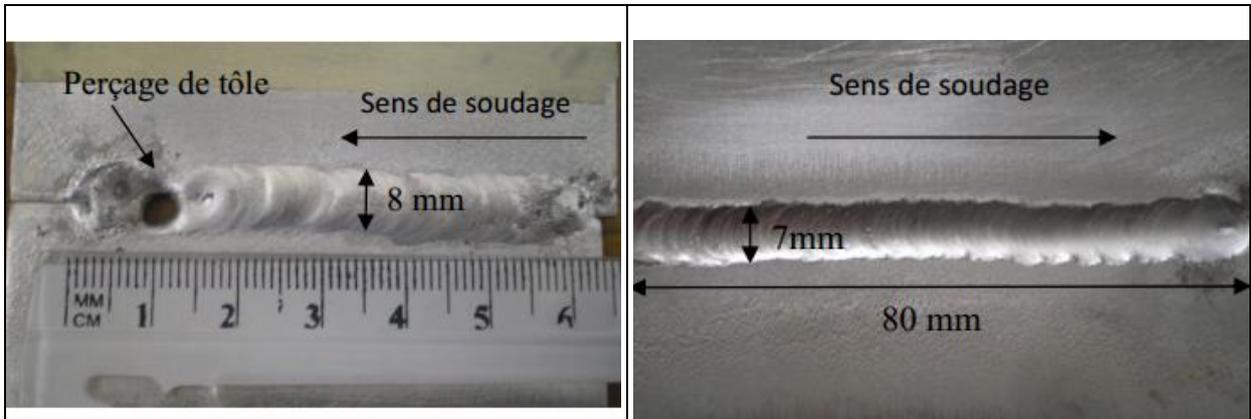


Figure III. 11: Structure de solidification classique en chevron pour le soudage TIG.

Conclusion :

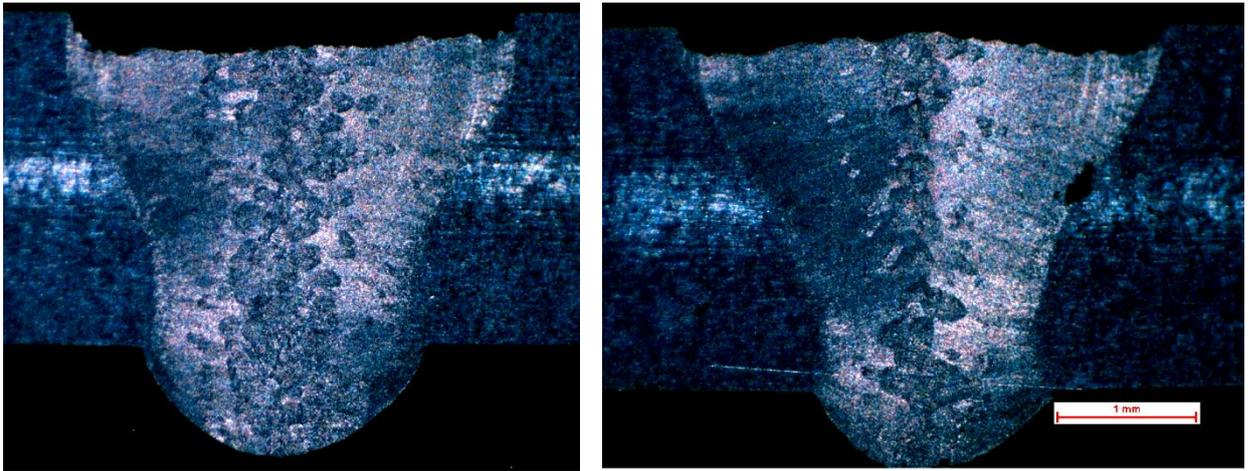
Si on compare les aspects des surfaces générés par deux types de soudage, on conclut que le soudage TIG conduit à des cordons plus larges et présente plusieurs types de défauts (manque de pénétration, des fissurations à chaud et à froid, des inclusions de tungstène). Alors que le soudage Laser en configuration bispot nous donne des cordons de soudure étroits, avec des surfaces plus lisses et présente moins de défauts. Mais on constate qu'il y a un manque de pénétration dans certains cas où l'énergie de soudage est relativement basse et qu'il y a aussi des défauts de projection de la matière.

Dans les deux cas on remarque une structure de solidification classique en chevron de forme (\gggg) qui est générée par des distances inter-chevron différentes selon la vitesse de solidification, les distances inter-chevron augmentent pour des vitesses de solidification lente.

Le procédé de soudage Laser donne des cordons de soudure de largeur de l'ordre de 3mm, avec des cordons de soudure plus large pour le procédé de soudage TIG, elle est de l'ordre de 7.5mm.

II.3. Microstructure de solidification des cordons

Pour les deux procédés de soudage, deux zones distinctes sont observables sur les macrographies comme nous montre la Figure III.10. Une première zone proche des bords du cordon formée de grains allongés de type basaltique, est issue des gradients de température ΔT importants et des faibles vitesses de solidification. Au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone centrale du cordon, on observe la formation de grains équiaxes favorisés par des vitesses de solidification importantes et des gradients thermiques ΔT réduits. La distribution des structures basaltiques et équiaxes dans le cordon varie en fonction de la vitesse de soudage : plus on augmente la vitesse de soudage, plus on réduit l'importance de la structure basaltique au profit de la croissance d'une structure équiaxes fine.



(a)

(b)

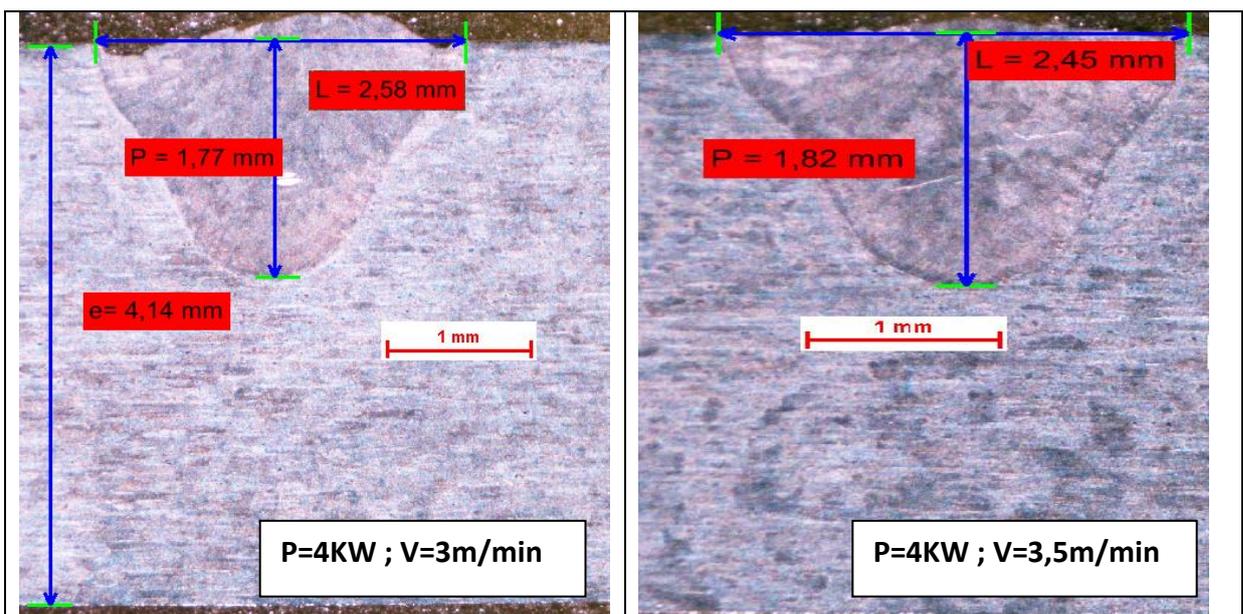
Figure III. 12: Coupes transverses de cordons :(a) $V=4$ m/min ; (b) $V=3,5$ m/min.

III.4Analyse macrographique

III.4.1 Analyse macrographique des soudures Laser

III.4.1.1 Effet de l'énergie

Pour la configuration bispot, on fait des essais de paramétrage sur des tôles de 4mm d'épaisseur en variant les vitesses pour voir l'effet de l'énergie sur la largeur et la profondeur de pénétration. Les macrographies des coupes transversales de lignes de fusion sont données dans la figure suivant :



Chapitre III : Résultats et interprétations

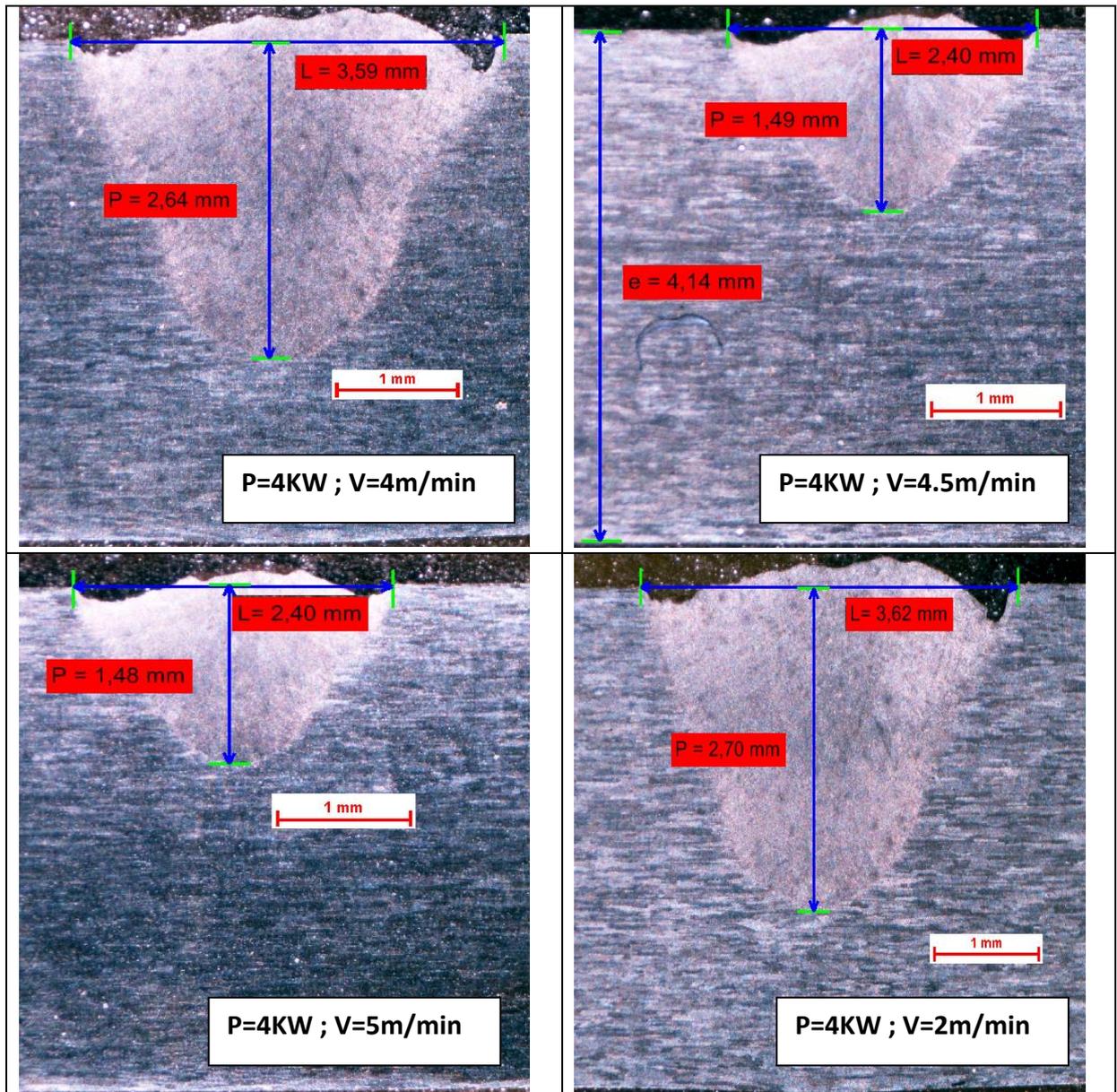


Figure III. 13: Macrographies de coupes transversales en configuration bispot.

Les valeurs de l'énergie linéique, la profondeur et la largeur ainsi que la surface de la zone fondue sont mentionné dans le Tableau III.1.

Tableau III. 1: Les mesures de cordons en configuration bispot.

P (KW)	V (m/min)	P/V (j/m)	Largeur (mm)	Profondeur (mm)	surface de la zone fondue (mm ²)
4	2	120000	3,62	2,7	4,887
4	3	80000	2,58	1,77	2,2833

Chapitre III : Résultats et interprétations

P (KW)	V (m/min)	P/V (j/m)	Largeur (mm)	Profondeur (mm)	surface de la zone fondue (mm ²)
4	3,5	68571	2,45	1,82	2,2295
4	4	60000	3,59	2,64	4,7388
4	4,5	53333	2,4	1,49	1,788
4	5	48000	2,4	1,48	1,776

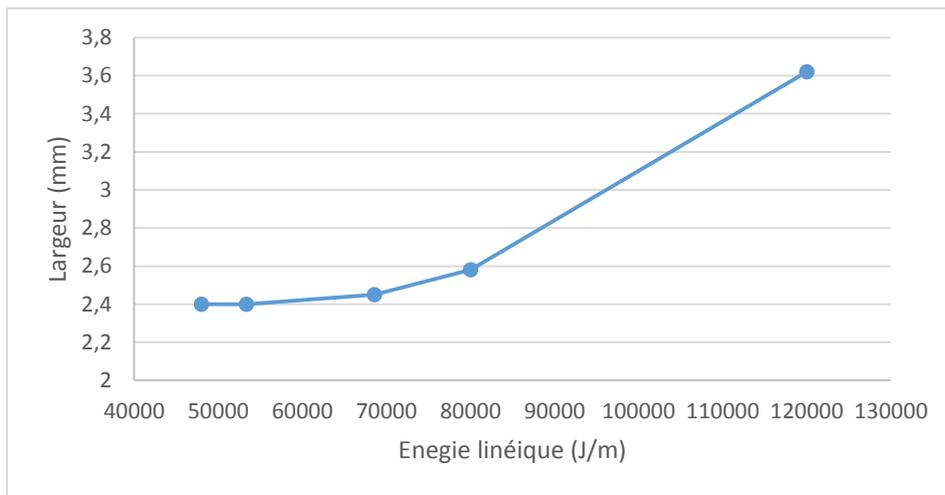


Figure III. 14: Influence de l'énergie linéique sur la largeur pour le soudage Laser.

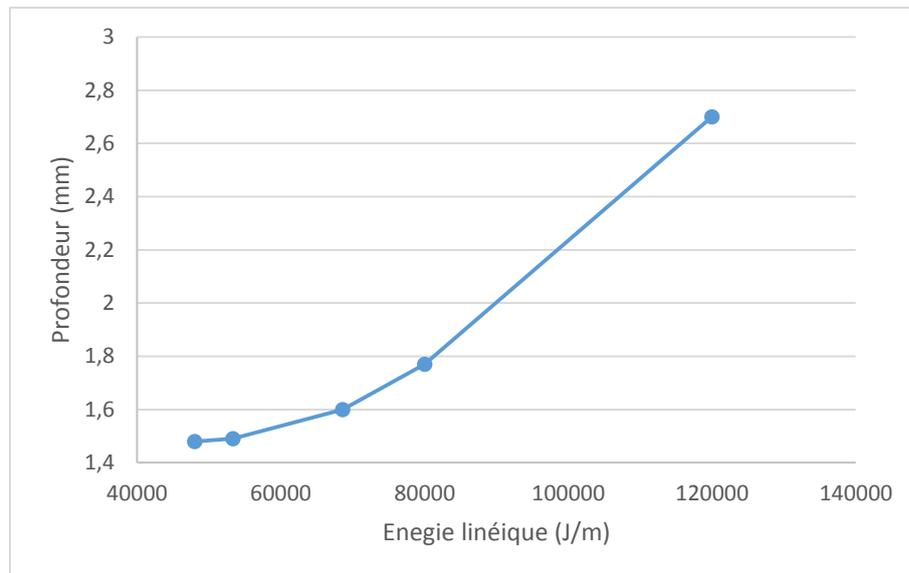


Figure III. 15: Influence de l'énergie linéique sur la profondeur pour le soudage Laser.

Chapitre III : Résultats et interprétations

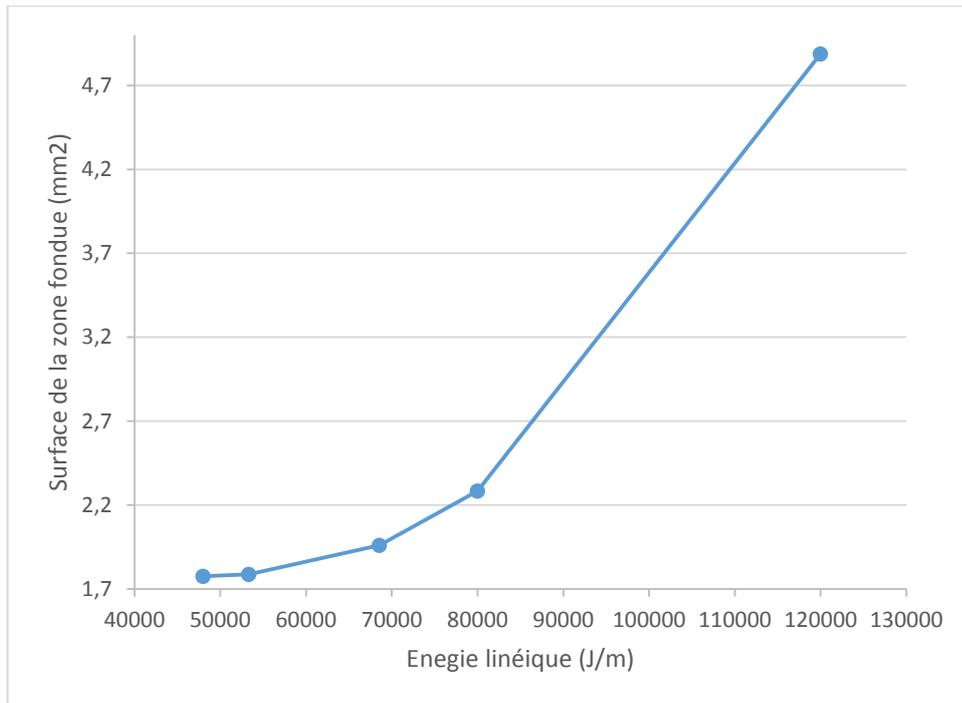


Figure III. 16: Influence de l'énergie linéique sur la surface fondue pour le soudage Laser.

A partir des Figures III.12, III.13 et III.14 on conclue que la largeur et la profondeur des cordons et ainsi la surface de la zone fondue augmentent avec l'augmentation de l'énergie linéique transmis au matériau en accord avec des vitesses de soudage décroissante.

IV.4.1.2.Effet de position focale dans la configuration bispot

La variation de l'endroit du foyer de faisceau Laser, à partir de $\frac{1}{4}$ de l'épaisseur de la tôle (-1mm) jusqu'à le milieu de la tôle (-2mm) influe sur la morphologie de cordon de soudure, comme indiqué dans la Figure III.15.

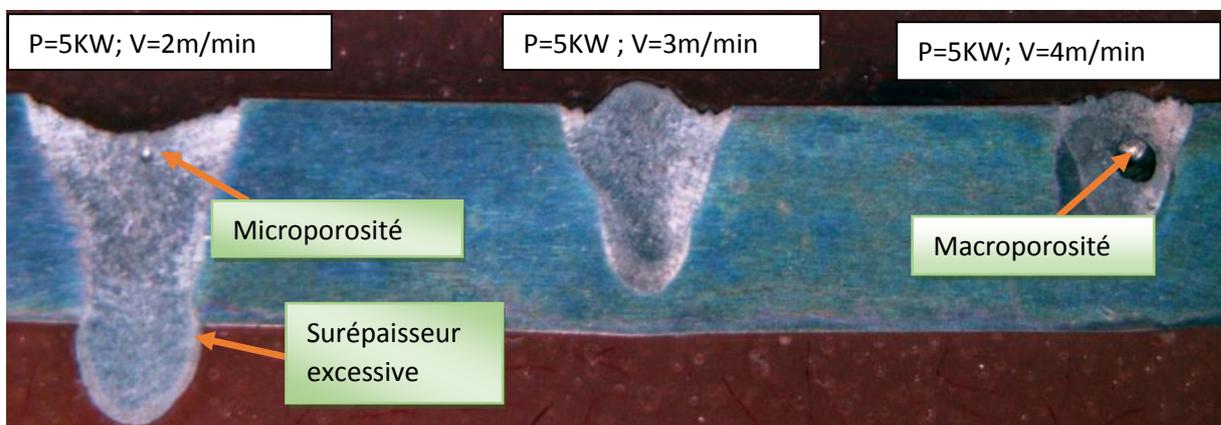


Figure III. 17: Macrographie des cordons à position focale -2mm.

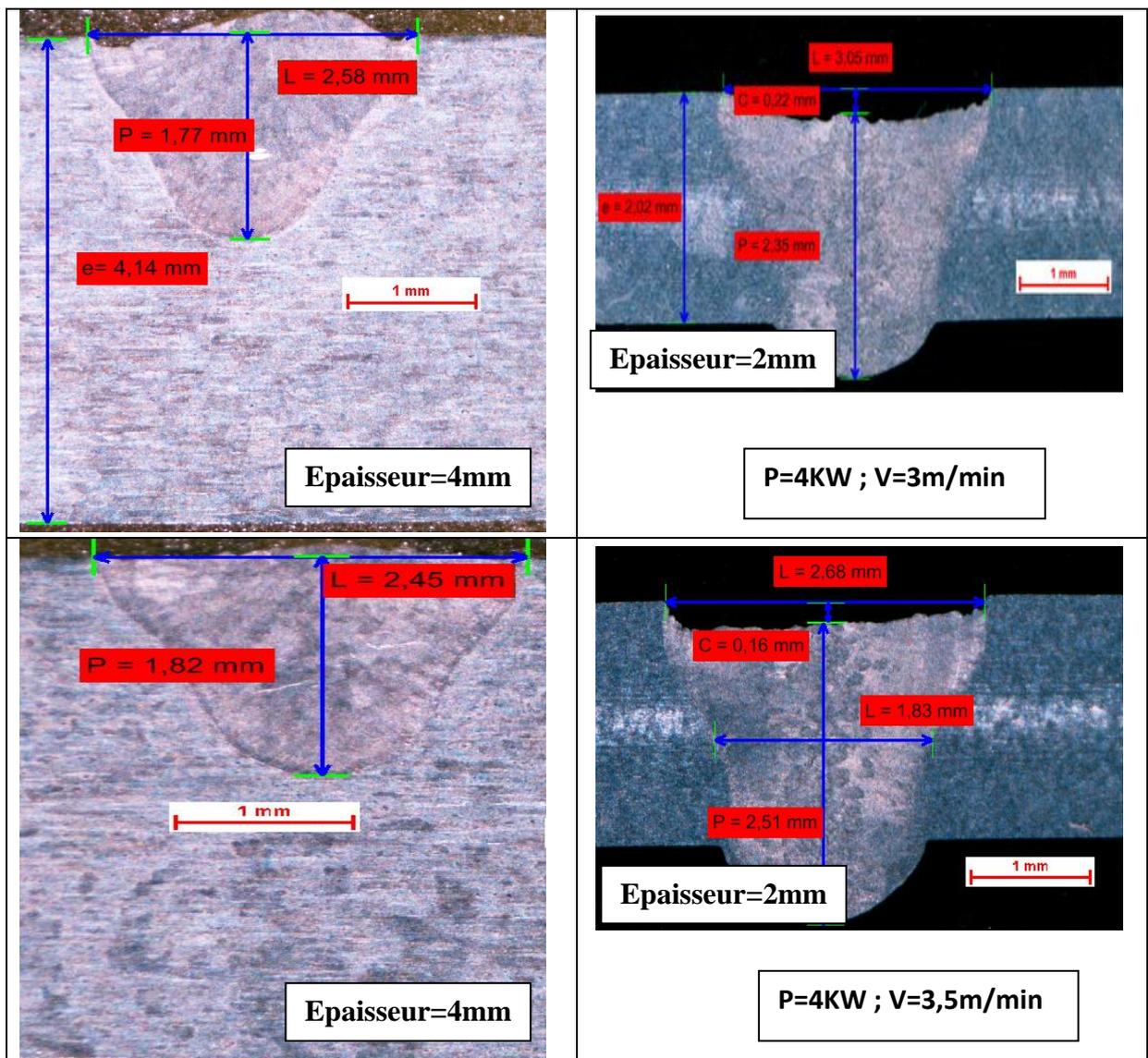
Chapitre III : Résultats et interprétations

On remarque aussi que la pénétration augmente lors de la variation de position focale de (-1mm) à (-2mm) à cause de l'augmentation de l'énergie de faisceau Laser absorbé par la tôle avec la variation de position focale à partir de dessus de la tôle au-dessous de la tôle.

On révèle aussi que la variation de position focale (cas bispot) induit des défauts de forme, comme la surépaisseur excessive qui due à un excès d'énergie absorbé [22], et des défauts métallurgiques, comme la macroporosité et microporosité, qui ont un effet sur les propriétés mécanique de la zone fondue.

IV.5.3. Effet de l'épaisseur de la tôle

Pour voir l'effet de l'épaisseur de tôle sur la morphologie de cordon (largeur, profondeur) on manipule deux tôles d'épaisseur 4mm et 2mm à différent puissances et vitesse. Les macrographies des cordons sont données dans la Figure III.16.



Chapitre III : Résultats et interprétations

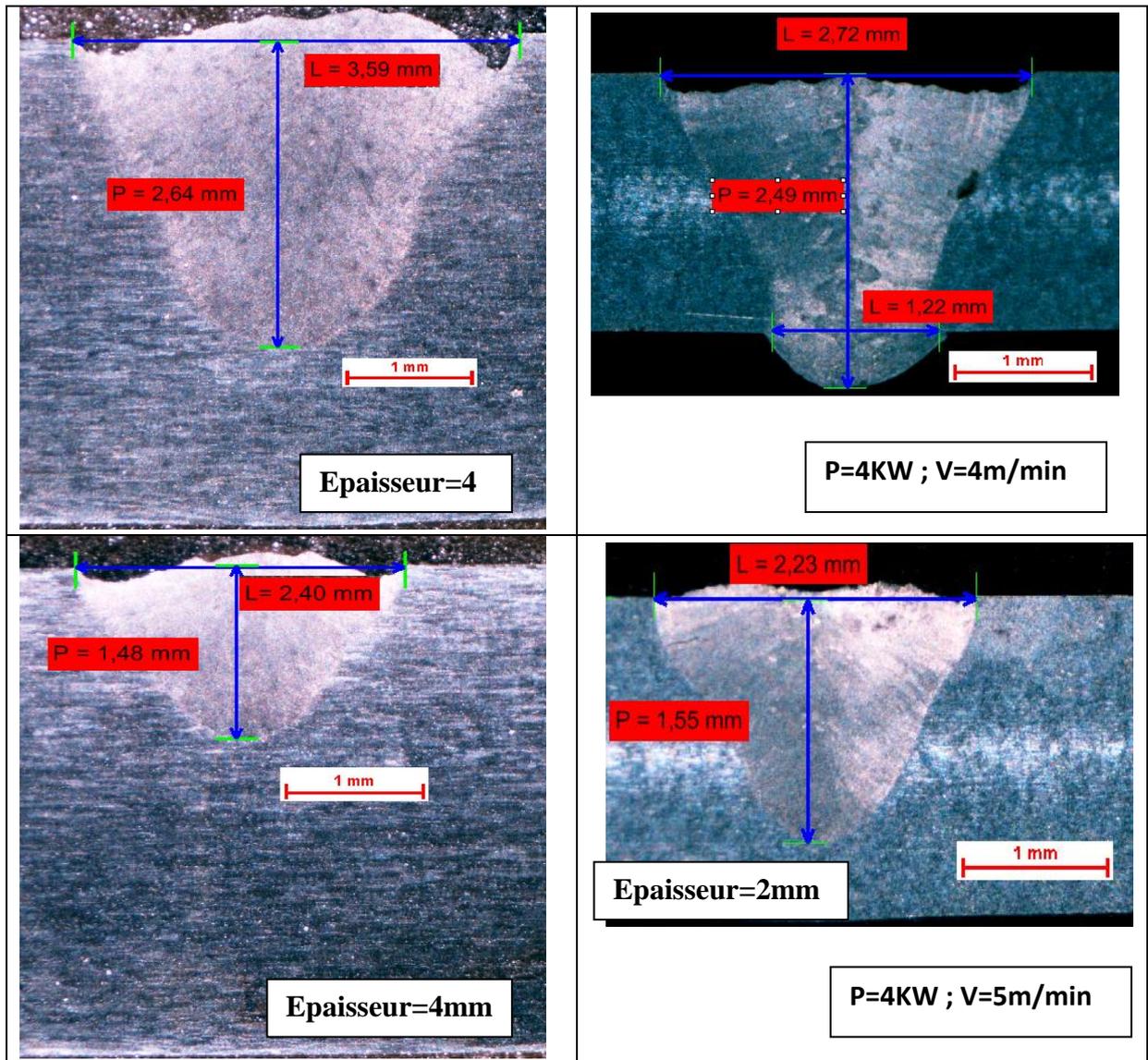
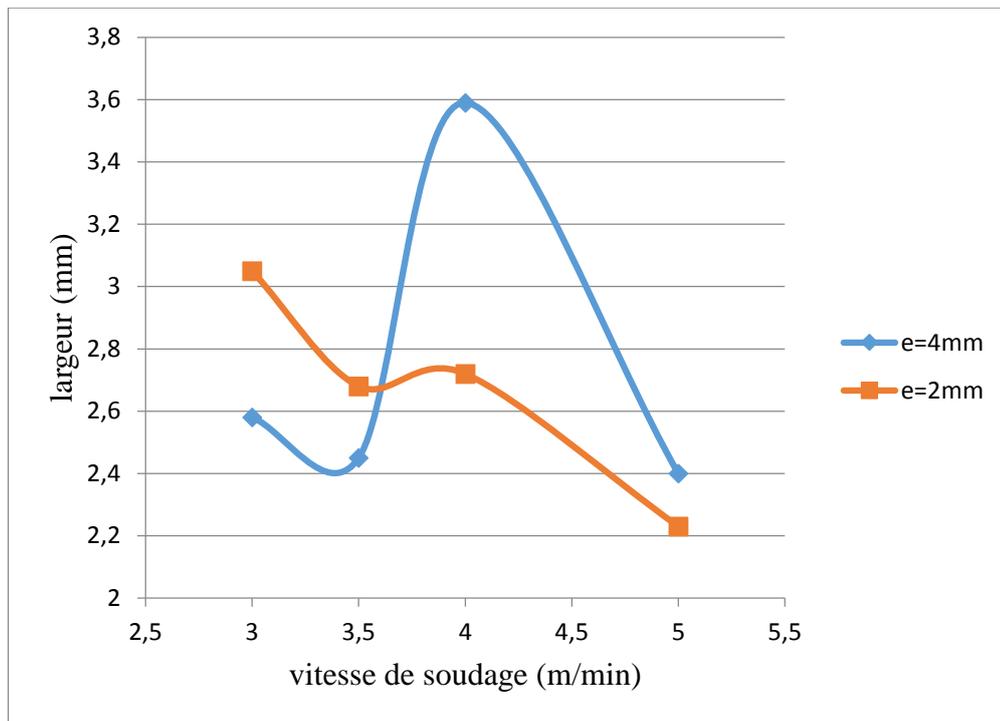


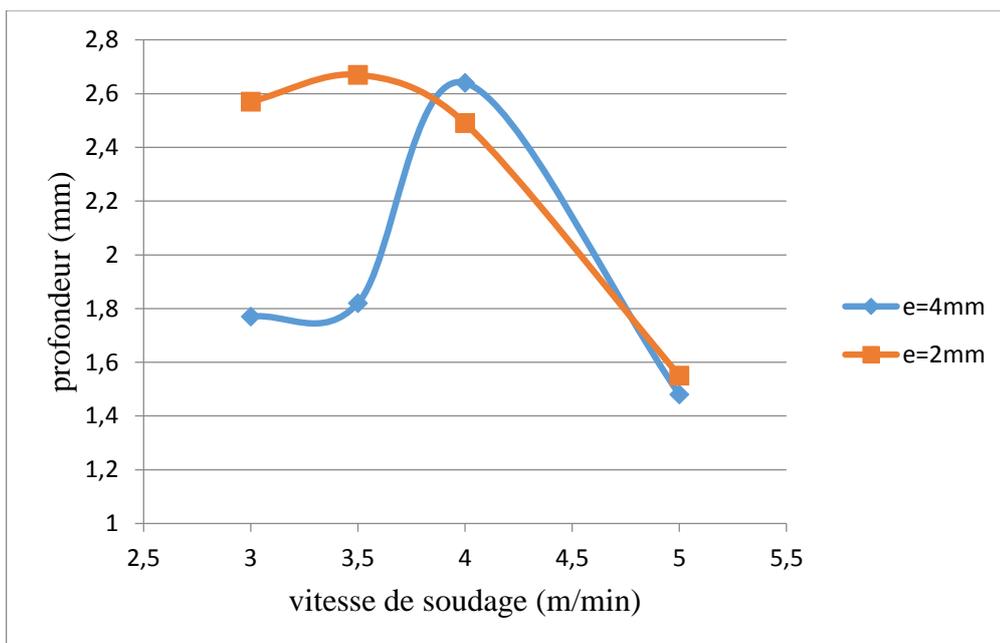
Figure III. 18: Macrographies de cordons de soudures pour le soudage Laser.

A partir de la figure ci-dessus on remarque que la plupart des cordons de soudures de la tôle de 2mm sont des cordons débouchant, due à l'excès d'énergie dans une mince épaisseur. Mais remarquons aussi que le dernier codon est non débouchant car la vitesse de soudage est élevé ce qui résulte une faible interaction de faisceau Laser-matière.

Chapitre III : Résultats et interprétations



(a)



(b)

Figure III. 19: Influence de l'épaisseur de la pièce à souder sur (a) la largeur et (b) la profondeur de pénétration.

III.4.2 Analyse macrographique des soudures TIG

Nous présentons dans cette partie les effets des différents paramètres opératoires du soudage TIG sur la macrographie des soudures obtenues. En effet, plusieurs paramètres sont testés à savoir :

- Deux types de gaz : argon industriel et argon pur.

Chapitre III : Résultats et interprétations

- Intensité du courant utilisé.
- Diamètre de l'électrode de tungstène.

Ces paramètres déterminent l'énergie nominale définie par :

$$E_n = IU / v \text{ (J/mm)}.$$

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

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

Le courant utilisé dans les opérations de soudage est un courant alternatif. Ce type de courant, nous assure une bonne pénétration pendant le cycle négatif et en même temps un bon nettoyage des films d'oxydes durant le cycle positif.

III.4.2.1 Effet de l'intensité

Afin de faire sortir l'effet de l'intensité de courant, nous manipulons des soudures réalisés avec intensités différentes.

Le tableau suivant illustre les différents paramètres utilisés pour la réalisation des soudures

Tableau III. 2 : Influence de l'intensité de courants de soudage TIG.

Paramètres	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4
I (A)	60	77	75	65
U (Volt)	14	12	12	13
V (mm/s)	0.72	1.11	0.9	1.2
E_n (J/mm)	1166.7	832	1000	705
Type de gaz	Argon industriel	Argon industriel	Argon industriel	Argon industriel
Débit de gaz (l/min)	9	10	10	9
Métal d'apport	Sans	avec	Avec	Avec
Diamètre d'électrode (mm)	2.5	3	3	2.5

Les paramètres appliqués lors du soudage de l'éprouvette 1 ont permis d'avoir :

Chapitre III : Résultats et interprétations

Une bonne pénétration avec formation de fessier.

Un bel aspect du cordon.

Une légère concavité (Figure III.18).



Figure III. 20: Soudage de l'éprouvette 1.

Pour les autres éprouvettes nous avons remarqué une amélioration de la qualité du cordon à cause de l'utilisation du métal d'apport mais nous avons remarqué un manque de pénétration dans certains endroits de l'éprouvette 3 et 4.

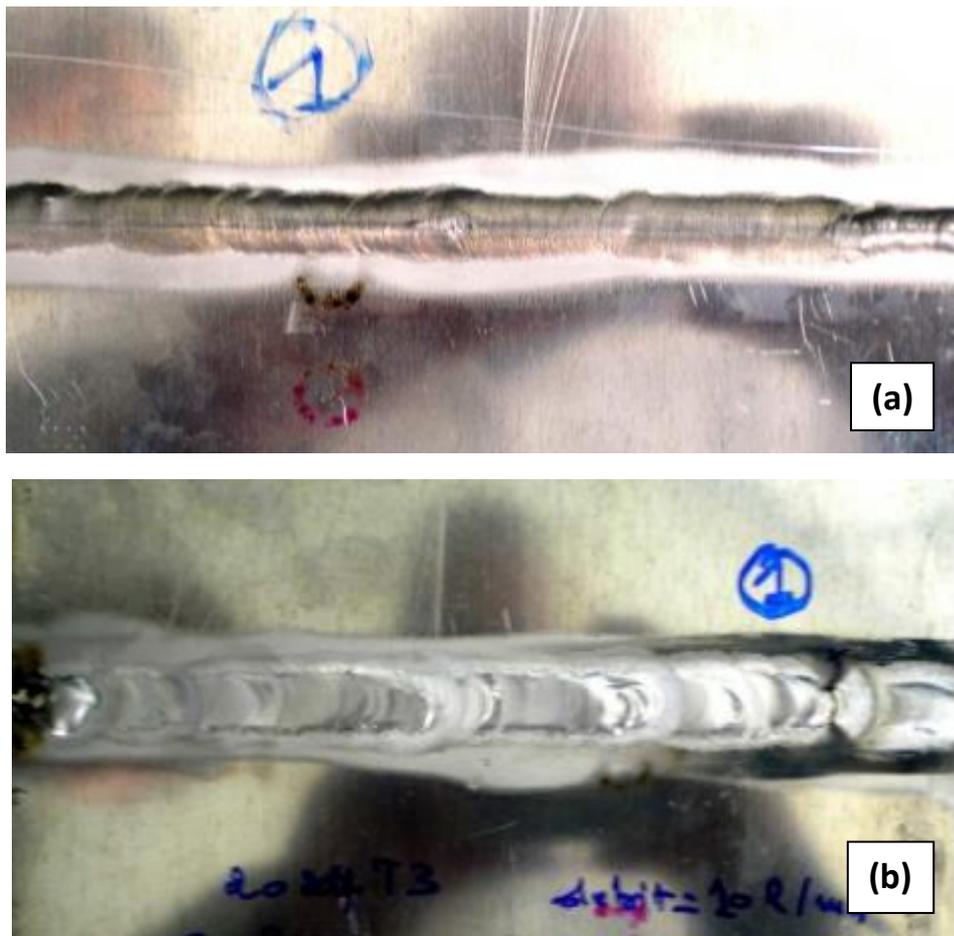


Figure III. 21: Soudage de l'éprouvette 2.

Chapitre III : Résultats et interprétations

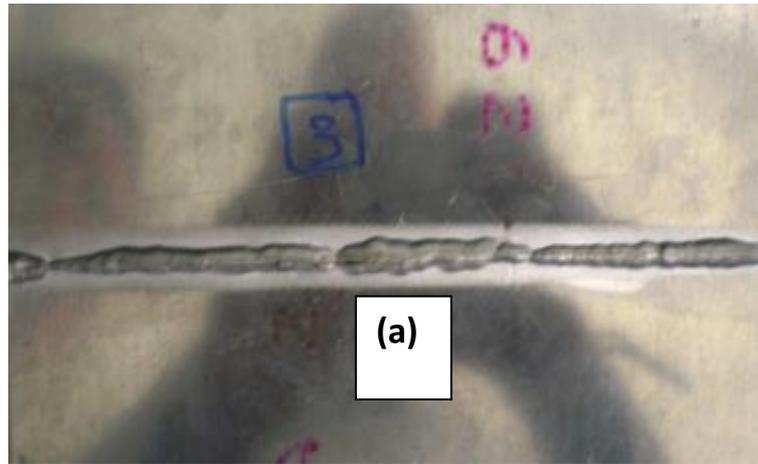


Figure III. 22: Soudage de l'éprouvette 3.



Figure III. 23: Soudage de l'éprouvette 4.

V.3.2. Influence du type de gaz

Pour apprécier l'effet du gaz sur le soudage des tôles d'aluminium 2024 T3, nous comparons les résultats obtenues pour deux types de gaz, de l'argon industriel de l'ENGI et de l'argon pur, dont les caractéristiques sont données par le certificat de conformité.

Pureté : 99,9999%

Chapitre III : Résultats et interprétations

Hydrocarbures $\leq 0,1$ ppm

H₂O $\leq 0,5$ ppm

O₂ $\leq 0,5$ ppm

N₂ $\leq 0,5$ ppm

CO + CO₂ $\leq 0,1$ ppm

Pression à 15°C : 200 Bar.

Eprouvette 5, 6, 7 et 8 :

Pour ces soudures le gaz utilisé est l'argon pur, les autres paramètres sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau III. 3: Influence de gaz de protection.

Paramètres	Eprouvette 5	Eprouvette 6	Eprouvette 7	Eprouvette 8
I (A)	50	60	60	52
U (Volt)	15	14	14	15
V (mm/s)	0.52	1.43	1.44	1.5
E _n (J/mm)	1250	587.4	583.4	520
Type de gaz	Argon pur	Argon pur	Argon pur	Argon pur
Débit de gaz (l/min)	9	9	9	9
Métal d'apport	Sans	sans	Sans	Avec
Diamètre d'électrode (mm)	2.5	2.5	2.5	2.5

On a remarqué pour les mêmes conditions de soudage (les mêmes paramètres appliqués : métal d'apport, diamètre de l'électrode de tungstène, le débit..), que l'éprouvette 4 soudée par de l'argon industriel et l'éprouvette 8 soudée par de l'argon pur, une forte énergie d'ionisation produite lors du soudage à l'argon pur, ce qui nous a imposé de diminuer l'intensité jusqu'à 52 A comparée avec celle de l'éprouvette 4 qui est de 65.

V.3.3. influence du diamètre de l'électrode de tungstène

Cette influence est bien remarquable, car les cordons soudés par l'électrode de tungstène de 3 mm de diamètre sont plus larges que ceux soudés avec l'électrode à 2.5 mm.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Autre observation qu'on a constatée est la variation de l'intensité, qui est proportionnelle au diamètre de l'électrode.

Les éprouvettes 2 et 3 sont soudées par une électrode de 3 mm. La moyenne de la largeur du cordon est de 12mm pour l'éprouvette 2, et de 10 mm pour l'éprouvette 3, par contre on a enregistré 6 à 8 mm pour les éprouvettes soudées par l'électrode de 2.5 mm (figure III.22).

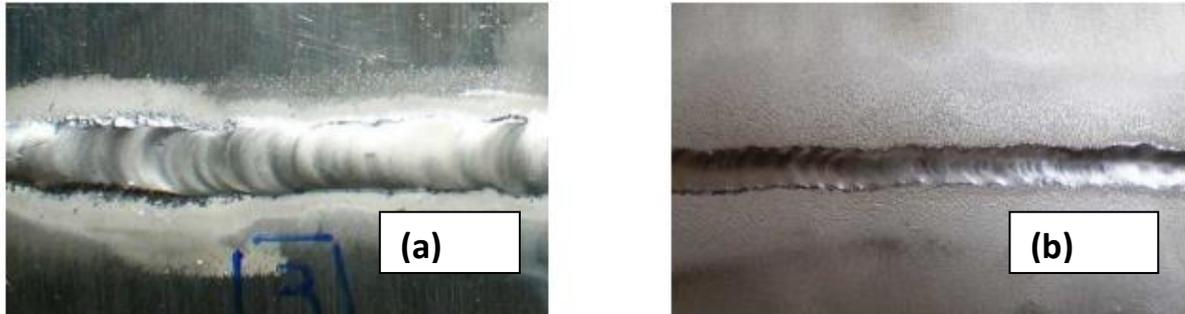


Figure III. 24: Influence du diamètre d'électrode sur la largeur du cordon de soudure pour le soudage TIG : (a) D=3mm ; (b) D=2.5mm.

Conclusion

Des résultats obtenus, on est arrivé à faire sortir les effets des différents paramètres de soudage pour chacun des procédés (procédé Laser et TIG).

En fait, pour le procédé de soudage Laser on conclue que l'augmentation de l'énergie linéique de soudage conduit à une augmentation des dimensions de cordons soudure (largeur et profondeur) ce qui nous assure une bon pénétration mais aussi cela induit un élargissement de la zone affecté par la chaleur. La variation de l'endroit du foyer de faisceau Laser, à partir de $\frac{1}{4}$ de l'épaisseur de la tôle jusqu'à le milieu de la tôle, augmente la pénétration à cause de l'augmentation de l'énergie de faisceau Laser absorbé par la tôle, mais induit des défauts de forme et des défauts métallurgiques qui ont un effet sur les propriétés.

Pour le soudage TIG, les résultats obtenus nous montrent que l'augmentation du courant de soudage conduire à une bonne pénétration mais à un élargissement du cordon de soudure.

L'utilisation des diamètres plus grands à 2.5mm nous donnera un cordon de soudure plus large ce qui n'est pas intéressant même si on obtient des résultats satisfaisants. Les impuretés dans le gaz de protection influent sur l'intensité de soudage, telle que pour un gaz industriel l'intensité utilisée est de 65 et pour un gaz d'argon pur l'intensité est de 50A.

Si on compare les résultats de l'analyse macrographique on tir que le soudage Laser nous assure une bonne pénétration et donne des cordons de soudure moins large avec moins de défauts que celles obtenues par le procédé TIG ce qui confère aux pièces soudées des bonnes propriétés métallurgique et mécaniques.

III.5 Analyse micrographique

Elle a pour but de comprendre les phénomènes métallurgiques et mécaniques induits par les cycles thermiques du soudage. Pour cela, une analyse micrographique a été effectuée pour comprendre les différentes transformations microstructurales engendrées par les effets

Chapitre III : Résultats et interprétations

thermiques du cycle thermique. Les conséquences métallurgiques du soudage de 2024 T3 sont évaluées par une mesure de microdureté à travers le cordon de soudure.

Le traitement thermique produit lors des deux procédés de soudage induit des changements microstructuraux, à différentes conditions, sur le matériau soudé (Figure III.23).

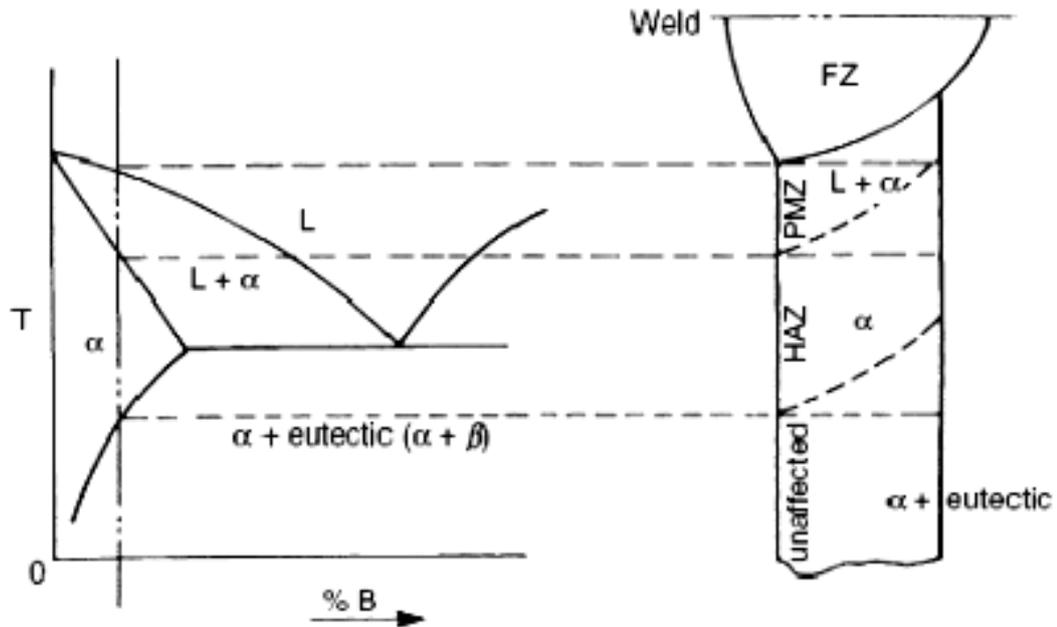


Figure III. 25: Représentation schématique des différentes zones d'un joint soudé. [16].

Pour l'analyse de microstructure, généralement, on distingue trois zones différentes : zone fondue (ZF) ; zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB).

IV.5.1. Métal de base (MB)

La structure de métal de base 2024T3 présente des grains allongés sous l'effet du laminage (Figure II.24).

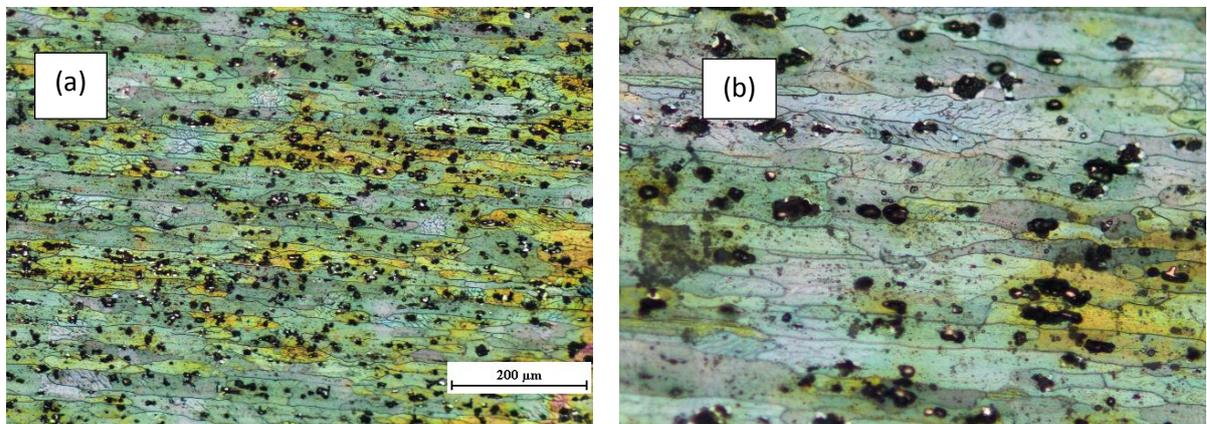


Figure III. 26: Microstructure du métal de base (a) G100 ; (b) G200.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Les particules noires dans le métal de base sont des précipités de $\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20}$, CuMgAl_2 et Cu_2FeAl_7 résultant à partir de traitement thermique puis un vieillissement à température ambiante [33], car l'alliage 2024 est dans l'état T3.

IV.5.2. Zone fondue (ZF)

Le métal de la zone fondue est complètement fondu pendant le soudage à une température qui est au-dessus de la température de liquidus de l'alliage.

La zone fondue pour une pénétration complète consiste des grains dendritique allongé et fine dans les bords de cordon (Figure III.25) qui indique une surfusion ΔT important et une faible vitesse de germination, et des grains équiaxes dans le centre de cordon induit par une faible surfusion et une vitesse de germination élevé.

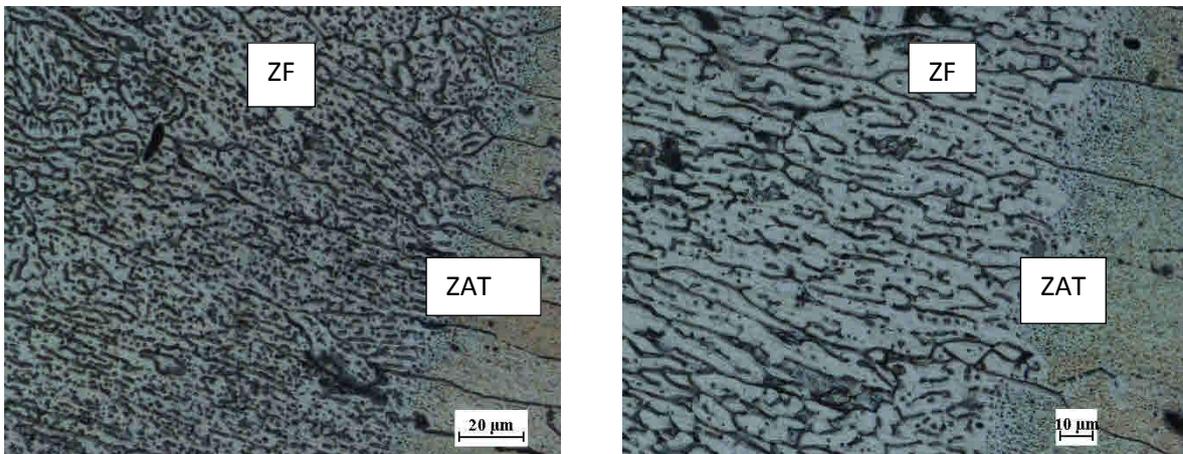


Figure III. 27: Microstructure de la zone fondue (grain allongé).

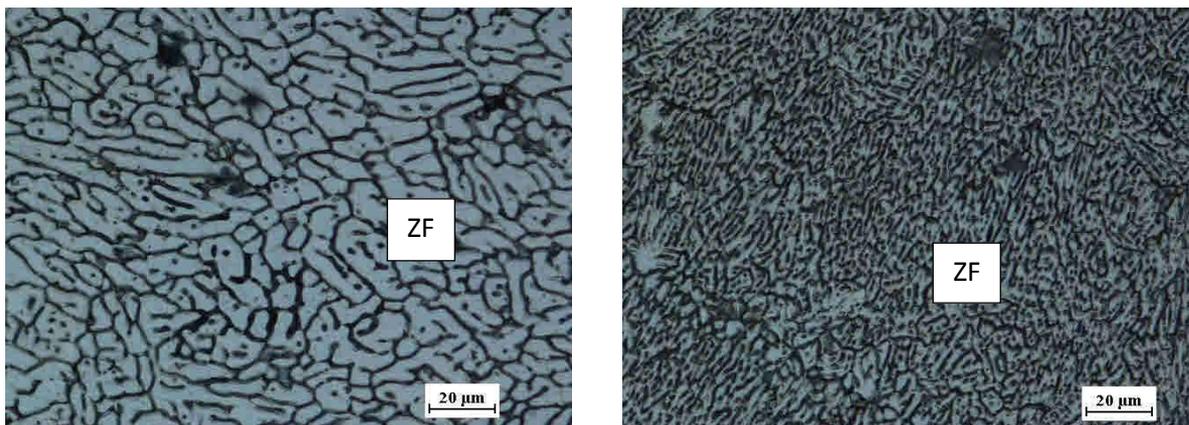


Figure III. 28: Microstructure de la zone fondue (grains équiaxes).

IV.5.3. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée thermiquement est une région de métal qui n'a pas fondu, mais sa microstructure et ses propriétés mécaniques sont changées à cause de l'interaction de chaleur de soudage et le métal de la zone, il est supposé qu'il existe entre le métal de base et la zone fondue (Figure III.27).

Chapitre III : Résultats et interprétations

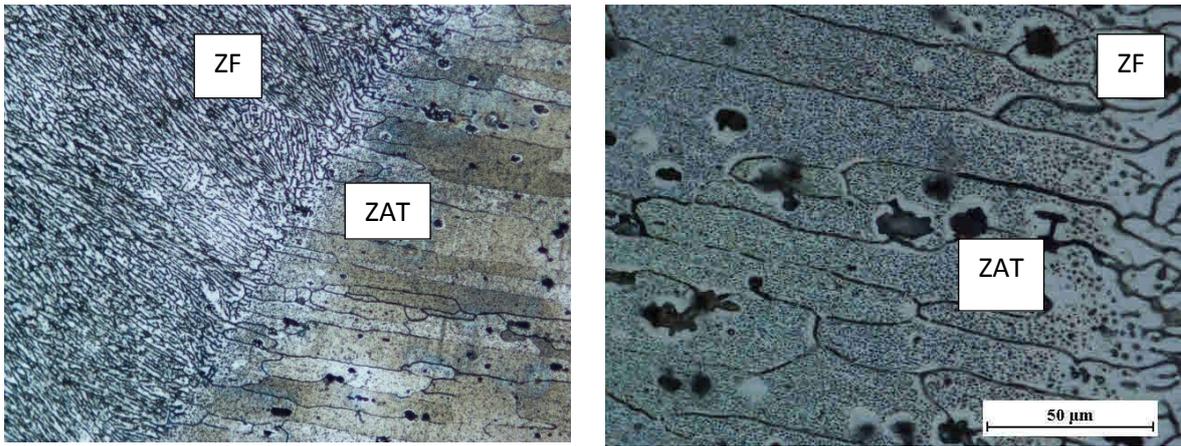


Figure III. 29: Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT). À droite G200, à gauche G500.

L'examen micrographique nous dévoile aussi les défauts internes, qui n'étaient pas visibles pour l'analyse macrographique, tels les soufflures les fissurations, les microfissurations et les macro et microporosités. Ces défauts sont présentés dans figures suivantes.

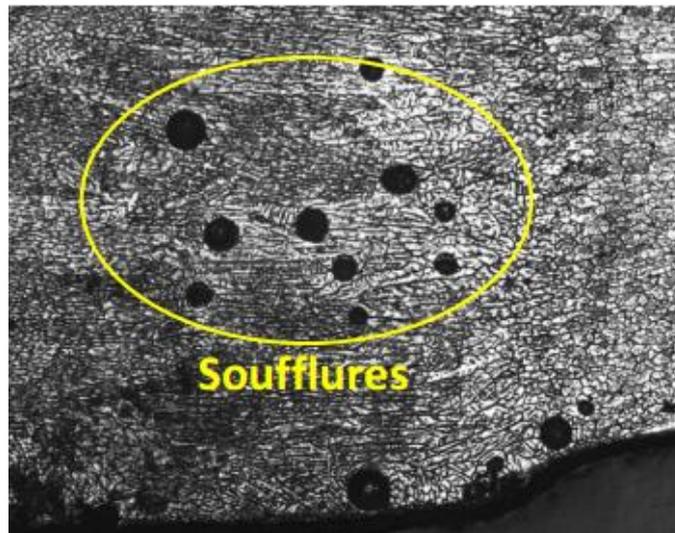


Figure III. 30: Soufflures dans la ZF pour le soudage TIG GX50.

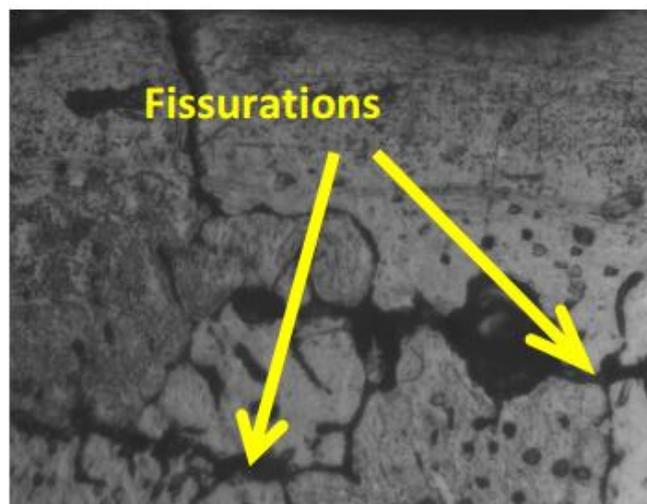


Figure III. 31: Fissuration au niveau de la ZAT pour le soudage TIG GX50.

Chapitre III : Résultats et interprétations

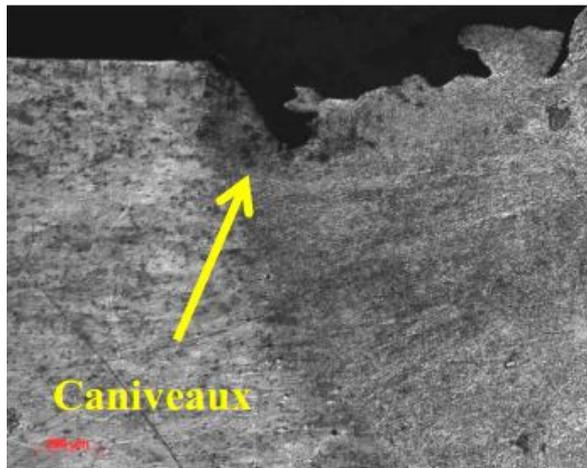


Figure III. 32: Formation de caniveaux pour le soudage TIG. GX50.

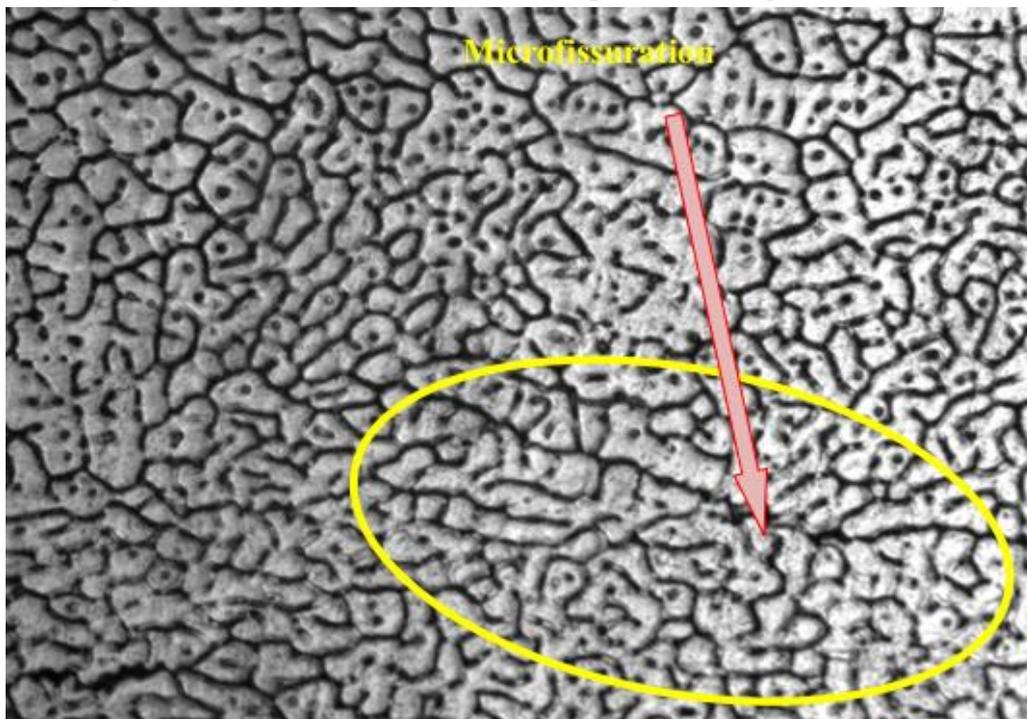


Figure III. 33: Microfissuration GX200.

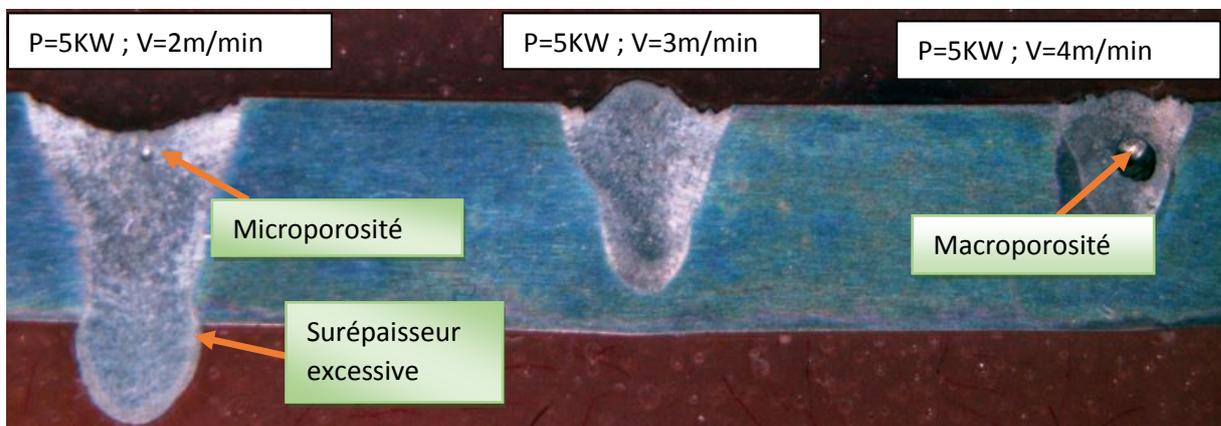


Figure III. 34: Défauts de soudage Laser.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Conclusion :

Pour les deux procédés de soudage Laser et TIG, l'analyse de microstructure, nous montre trois zones distinctes : zone fondue (ZF) ; zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB). L'éloignement de ces zones se diffère pour les deux procédés.

L'analyse micrographique nous montre aussi l'existence des défauts microstructuraux, tels les soufflures les fissurations, les microfissurations et les macro et microporosités, qui sont plus marquées dans le cas du soudage TIG.

III.6 Essais mécanique

Des essais mécaniques faites pour voir l'effet de l'opération de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage, ainsi que pour déterminer l'éloignement de différentes zones de soudure pour les deux procédés de soudage. Dans notre cas nous choisissons de faire l'essai de microdureté.

III.6.1 Essais de microdureté

Des filiations de microdureté ont été effectuées sur les cordons de soudure, afin de caractériser leur état mécanique local.

L'utilisation de la microdureté nous permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'évolution structurale obtenue. C'est un essai très utilisé dans le cas des soudures d'aluminium. Des filiations de microdureté (figure III.33) sont effectuées du centre de la ZF vers le MB avec un pas de 0.3mm sous une charge de 500g.

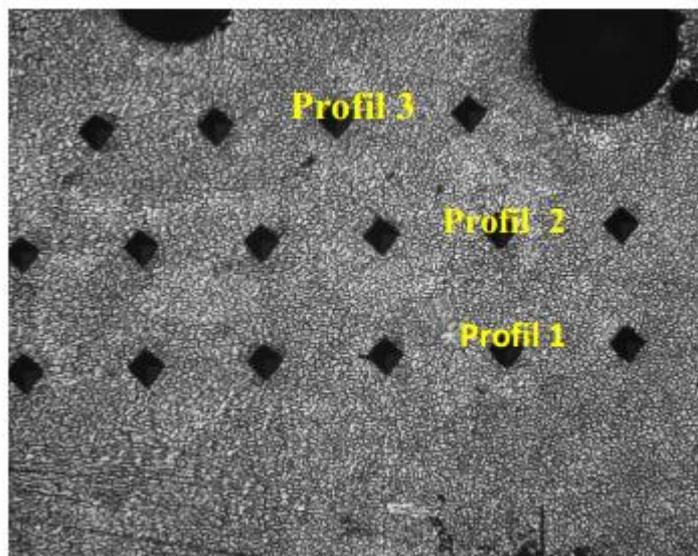


Figure III.35: Empreintes de l'essai de microdureté GX50.

III.6.1.1 Résultats de l'essai de microdureté pour le soudage Laser

Dans cette partie nous donne les résultats expérimentaux de l'essai de microdureté pour le procédé de soudage Laser en configuration bispot en variant la position focale de $\frac{1}{4}$ jusqu'au milieu de l'épaisseur de la pièce.

Chapitre III : Résultats et interprétations

a) Position focale 1/4

Les valeurs de microdureté pour la position focale 1/4, à la vitesse $V=2\text{m/min}$, sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau III. 4: Valeurs de microdureté pour le soudage Laser a position focale 1/4.

Distance (mm)	-4,8	-4,5	-4,2	-3,9	-3,6	-3,3	-3	-2,7	-2,4	-2,1
HV_{0.05}	146	151	145,9	142,6	143,5	139	140	142,5	142	141
Distance (mm)	-1,8	-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0	0,3	0,6	0,9
HV_{0.05}	138,4	140,4	137,8	118	109	107	105,3	107	118	139,6
Distance (mm)	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9
HV_{0.05}	139,7	141,8	142,5	144,8	146,3	146,8	146	148	148,1	143,9

Le profil de microdureté pour le soudage Laser à position focale 1/4 est illustré dans la Figure suivante :

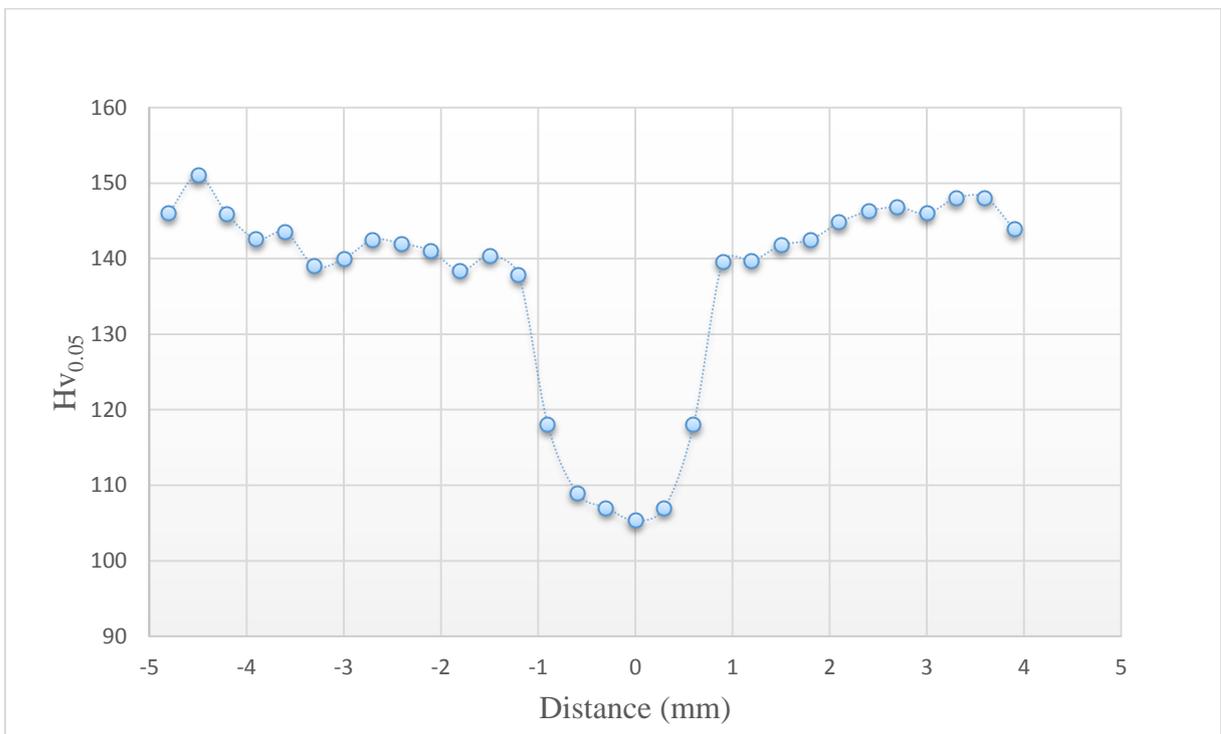


Figure III. 36: Filiations de microdureté pour le soudage Laser en configuration bispot à position focale 1/4.

b) position focale 1/2

Les valeurs de microdureté pour la position focale 1/2, à la vitesse $V=2,5\text{m/min}$, sont illustrées dans le tableau suivant :

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableau III. 5: Valeurs de microdureté pour le soudage Laser a position focale 1/2.

Distance (mm)	-4,5	-4,2	-3,9	-3,6	-3,3	-3	-2,7	-2,4	-2,1	-1,8
HV _{0.05}	147,1	150	149	148,9	139	148,5	147	146,3	146,6	142,1
Distance (mm)	-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0	0,3	0,6	0,9	1,2
HV _{0.05}	125	70	69	71	68	75	70	69	75	72
Distance (mm)	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,2
HV _{0.05}	134	142	147,5	146,4	150,6	148,8	146,9	145,7	144,1	149

Le profil de microdureté pour le soudage Laser à position focale 1/2 est illustré dans la Figure suivante :

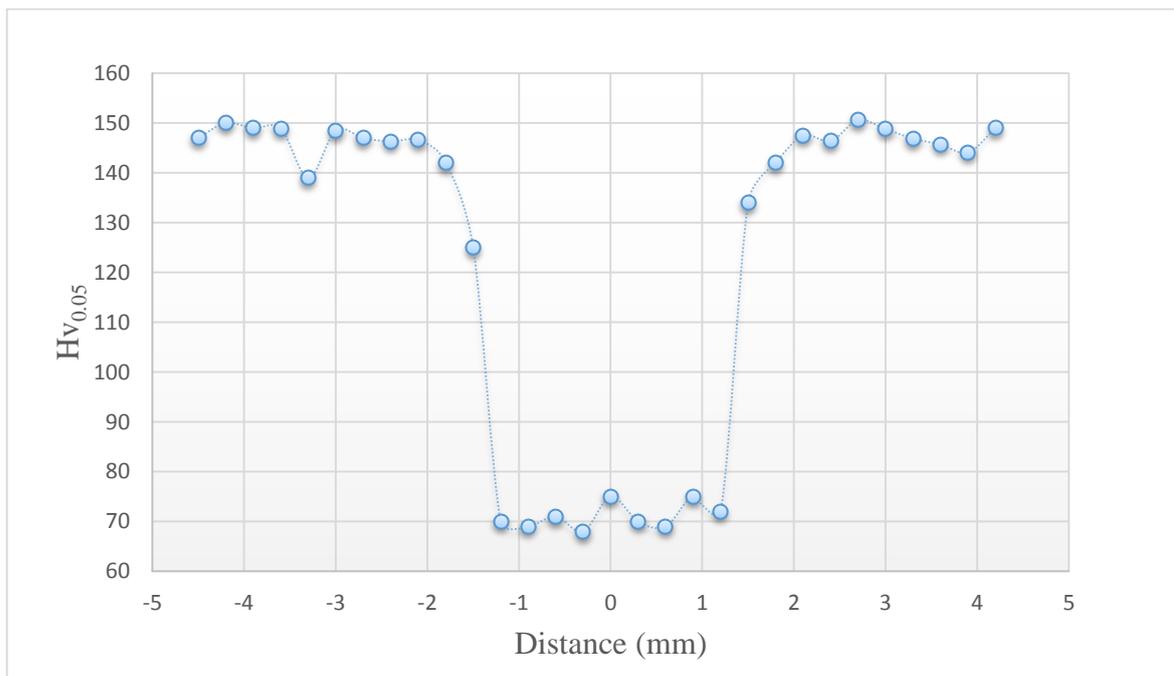


Figure III. 37: Filiations de microdureté pour le soudage Laser en configuration bispot à position focale 1/2.

Pour la position focale 1/4 on constate que le métal de base présente des valeurs de microdureté de l'ordre de 145 ± 6 Hv, les cordons de soudure (zone fondue) présentent une microdureté inférieure à celle de métal de base elles sont de l'ordre de 105-110 Hv), on attribue cette adoucissement en zone fondue à la perte du durcissement structural par dissolution [17].

Chapitre III : Résultats et interprétations

La microdureté de la zone affectée thermiquement (ZAT), qu'a aussi subi un durcissement structural, est supérieur a celui de la zone fondue.

Pour la position focale $\frac{1}{2}$ on remarque que les cordons de soudure présentent une microdureté inférieure à celle de métal de base (elle est de l'ordre de 70 à 80 Hv). Ces valeurs sont aussi inferieurs aux celles de la Zones fondue pour la position focale $\frac{1}{4}$. Ce qui confirme que la variation de position focale du haut vers le bas de la pièce augmente le taux de porosité et par conséquence la dureté de la zone fondue sera diminuer.

Enfin, à partir des deux Figures III.34 et III.35, on estime que la largeur de ZF est d'environ 1.2 mm et celle de la ZAT est d'environ 0.5mm.

III.6.1.2 Résultats de l'essai de microdureté pour le soudage TIG

Les valeurs de microdureté pour le procédé de soudage TIG sont illustrées dans le tableau suivant :

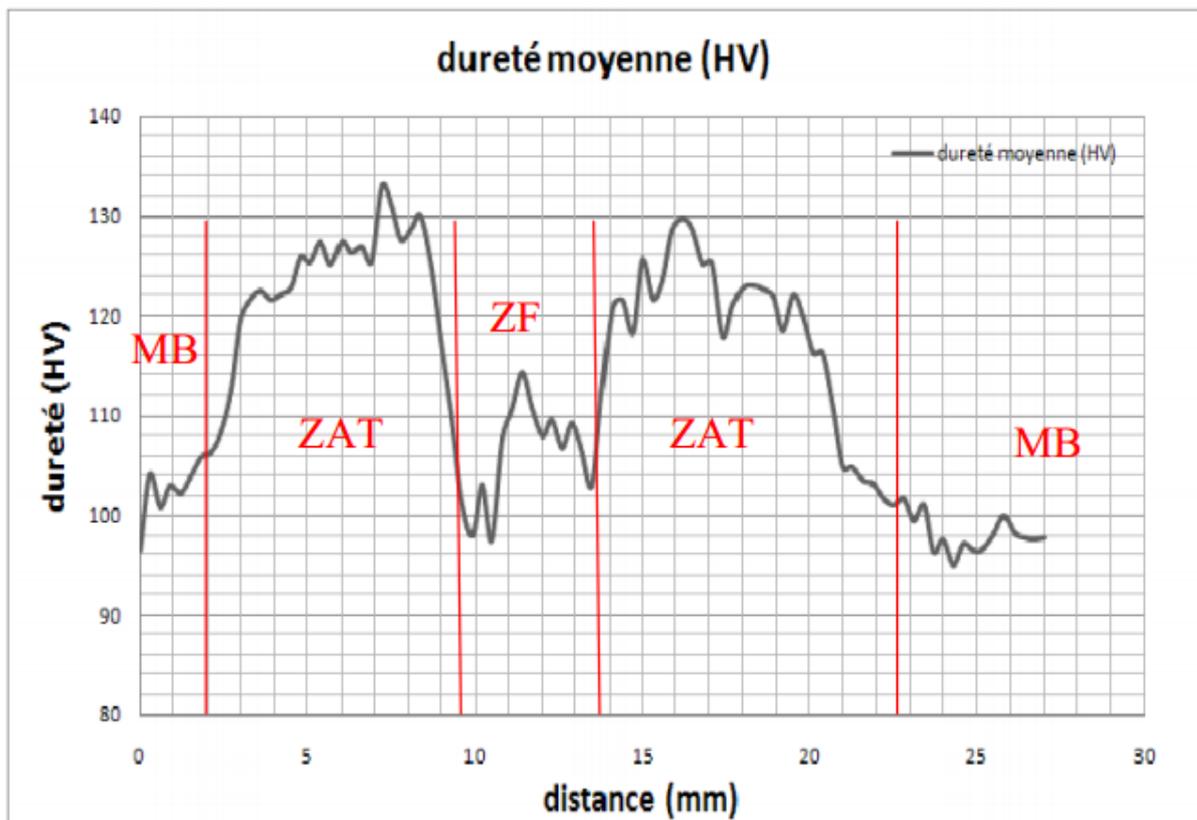


Figure III. 38: Profils de microdureté de soudure pour le soudage TIG.

Les courbes de duretés des cordons de soudures présentent une même allure que celle des soudures en Laser. On constate que les cordons de soudure (zone fondue) présentent une microdureté inférieure à celle de métal de base, elles sont de l'ordre de 95-105 Hv. La

Chapitre III : Résultats et interprétations

microdureté s'augmente dans la zone affectée thermiquement (ZAT) ou la pièce a subi un durcissement structural par précipitation.

Enfin, à partir de la Figures III.36, on estime que la largeur de ZF est d'environ 4.5 mm et celle de la ZAT est d'environ 9 mm.

Conclusion

Pour les deux procédés on remarque que Les courbes de duretés des cordons de soudures présentent une même allure. Une dureté faible dans la zone fondue, suivi d'une croissance de dans la ZAT jusqu'au métal de base ou la dureté se stabilise. 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).

Si on compare les résultats obtenus par les deux procédés, on tire que le procédé de soudage Laser conduit clairement à une amélioration de la qualité des cordons de soudures : une zone fondue avec une dureté relativement élevée et une diminution de l'éloignement de la zone affectée par la chaleur de soudage.

III.7 Conclusion générale

Des soudures autogène de l'aluminium 2024T3 réalisées par les deux procédés de soudage : le soudage TIG et le soudage laser à haute densité d'énergie de type Yb-YAG ($>10^5$ W/cm²) en configuration bispot, ont été examinés en variant les conditions opératoires afin de déterminer l'effet de ces paramètres sur la structure du cordon et sur les caractéristiques mécaniques et une comparaison entre les résultats des deux procédés.

Si on compare les aspects des surfaces générés par deux types de soudage, on conclue que le soudage TIG conduit à des cordons plus larges et présentant plusieurs type de défauts (manque de pénétration, des fissurations à chaud et à froid, des inclusions de tungstène). Alors que le soudage Laser en configuration bispot nous donne des cordons de soudure étroits, avec des surfaces plus lisses et présentant moins de défauts.

Des résultats obtenus, on est arrivé à faire sortir les effets des différents paramètres de soudage pour chacun des procédés (procédé Laser et TIG).

Si on compare les résultats de l'analyse macrographique on tire que le soudage Laser nous assure une bonne pénétration et donne des cordons de soudure moins large avec moins de défauts que ceux obtenus par le procédé TIG ce qui confère aux pièces soudées de bonnes propriétés métallurgiques et mécaniques.

Métallurgiquement, pour les deux procédés de soudage, quelles que soient les conditions opératoires, on observe des structures de solidification de type dendritique (basaltique en bord de cordon et equiaxe à cœur). Les cordons obtenus contiennent également de nombreux défauts (macro et microporosité, caniveau, fissures...). Ces défauts sont plus marqués dans le cas du soudage TIG.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Pour les deux procédés de soudage Laser et TIG, l'analyse de la microstructure, nous montre trois zones distinctes : Zone Fondue (ZF) ; Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et zone de Métal de Base (MB). L'éloignement de ces zones diffère pour les deux procédés

L'analyse de microdureté révèle du phénomène d'adoucissement au niveau de la ZF qui est due à la perte de la structure et du phénomène de durcissement structural par précipitation au niveau de la ZAT. Nous avons remarqué aussi que le soudage laser produit des zones fondues et des zones affecté thermiquement de petites largeurs (de l'ordre de 3mm pour la ZF et de l'ordre de 1mm pour la ZAT) qui conduit à une faible modification métallurgique en comparant avec le procédé TIG ou la largeur de la zone fondue atteint 8mm et la zone affectée thermiquement est de l'ordre de 6m

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Michel Dipeux ; « Aide-mémoire science de matériaux » ; Dunod ; Paris 2004

[2] ASM handbook volume 2; Propriety and selection: Nonferrous alloy and special – Purpose Materials

[3] Victor Castelhana ; Etude de différent technique induisant le durcissement des alliages d'aluminium les plus courant, en particulier des microstructures et des propriétés mécanique ; Examen probatoire ; soutenu en 18/01/2001

[4] Christian VARGEL ; Le comportement de l'aluminium et de ses alliages ; Dunod 1979

[5] Wolfgang José PRIETO YESPICA ; Etude comparative du comportement électrochimique des alliages d'aluminium 2024 T351 et 7075 T7351 en milieu neutre de sulfate de sodium ; thèse de doctorat de l'université TOULOUSE. Soutenue le 5/07/2012.

[6] J. R. Kissell, Aluminum and Its Alloys, Handbook of Materials for Product Design, TGB

Partnership, Hillsborough, North Carolina, Third Edition McGraw-Hill, Inc 2001 b, P 104 .

[7] E.A. Brandes, G.B. Brook; Smithells Light Metals Handbook; Butterworth-Heinemann (1998) PP 8-28.

[8] Seddik OUALLAM ; Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024 T3 ; mémoire de magister soutenu en 2009.

[9] Bruno Barlas ; Etude de comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliage d'aluminium de fonderie ; thèse de doctorat 05/02/2004.

[10] S. Sire, Etude de la formation du bain de fusion en soudage TIG d'un dépôt de silice application au soudage ATIG des aciers au carbone et FBTIG des alliages d'aluminium, Thèse doctorat, Ecole Centrale de Nantes (2002) P23

[11] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, An introduction to microstructures, processing and design, Engineering Materials, 2 Second Edition (1998) PP 103-110

Références bibliographiques

[12] B. Dubost, P. Sainfort, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium Technique de l'ingénieur M240

[13] R. Baus, W.Chaprau, Application du soudage aux constructions, 1979.

[14] SAF-AIR LIQUIDE, Procédés TIG Et Plasma, Ed. 1- SUY 542, 20/03/2000.

[15] Guide du soudage, Soudage à l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, Tome V, publication de la soudure autogène (Encyclopédie).

[16] Dowden J., The theory of laser materials processing, Springer Verlag , February 2009.

[17] ASM specialty handbook, « aluminum and aluminum alloys “, New York, ASM International, 1998.