



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Research Centre in Industrial Technologies

Département : Métallurgie

Entreprise : Centre de recherche en technologies industrielles CRTI

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en génie des matériaux

Soudabilité de l'alliage de titane TA6V par le procédé TIG

Réalisé par :
FERRAH Younes

Soutenu le 04 juillet 2023, Devant le jury composé de :

Président	Mr. DAIMELLAH Abderrahmane	ENP
Examineur	Mr. HELLAL Fatah	ENP
Encadrant	Mr. ABADLI Kamel	ENP
Encadrant	Mr. OUALLAM Seddik	CRTI
Invitée	Mme. TADJER Noussaiba	ENP



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Research Centre in Industrial Technologies

Département : Métallurgie

Entreprise : Centre de recherche en technologies industrielles CRTI

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en génie des matériaux

Soudabilité de l'alliage de titane TA6V par le procédé TIG

Réalisé par :
FERRAH Younes

Soutenu le 04 juillet 2023, Devant le jury composé de :

Président	Mr. DAIMELLAH Abderrahmane	ENP
Examineur	Mr. HELLAL Fatah	ENP
Encadrant	Mr. ABADLI Kamel	ENP
Encadrant	Mr. OUALLAM Seddik	CRTI
Invitée	Mme. TADJER Noussaiba	ENP

Remerciements

En premier lieu nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier très fort Monsieur OUALLAM Seddik et Madame TADJER Nous-saiba de m'avoir soutenu et accompagné tout au long de la phase de préparation de ce mémoire.

Je remercie aussi toute l'équipe du CRTI avec laquelle j'ai eu l'occasion de partager des moments très riches, pour leur aide et leur bienveillance.

J'adresse mes plus profonds remerciements au Docteur ABADLI qui a assuré mon encadrement tout au long de cette étude.

Je remercie aussi Monsieur DAIMELLAH , Professeur à l'École Nationale Polytechnique d'avoir accepté de présider le Jury de ma soutenance.

J'exprime mes remerciements au Professeur HELLAL pour le vif intérêt qu'il a porté à mon projet en ayant accepté de l'examiner et de faire partie du des membres du Jury.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants qui m'ont aidés et qui ont contribué à ma formation durant toute la période de mes études.

Dédicace

A mes parents chéris, à ma famille aimante et à mes amis précieux,

Cette dédicace est pour vous, pour vous dire combien vous êtes importants pour moi. Vous êtes la force qui me pousse à toujours aller de l'avant, le sourire qui éclaire mes jours les plus sombres et le refuge sûr dans le tumulte de la vie.

À mes parents, merci de m'avoir offert la vie, l'éducation et l'amour inconditionnel. Vous êtes mes premiers professeurs et les gardiens de mes rêves. Vous avez formé les fondations sur lesquelles je construis ma vie et pour cela, je serai éternellement reconnaissant.

À ma famille, merci d'être mon ancrage et mon phare. Chacun de vous, à sa manière unique, a contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui. Vous êtes le lien qui me relie au passé, tout en m'accompagnant vers l'avenir.

Et à mes amis, merci d'être là pour moi, dans les moments de joie et dans les moments de défi. Vous êtes les frères et sœurs que j'ai choisis, les compagnons de voyage sur cette aventure qu'est la vie.

Je dédie à vous tous chaque victoire, chaque réalisation et chaque moment de bonheur. Votre soutien, votre amour et votre amitié sont les plus grands cadeaux que je pourrais jamais demander. Ensemble, nous faisons face à tout ce qui peut se présenter sur notre chemin, et je suis convaincu que les meilleures choses sont encore à venir.

Avec toute ma gratitude et mon amour,

ملخص

السبيكة TA6V هي السبيكة الأكثر استخدامًا من التيتانيوم في الصناعة، في الواقع، غالبًا ما يتم اختيارها لصناعة القطع الهيكلية في الطائرات والمروحيات والزراعات الطبية ومكونات السيارات وغيرها من التطبيقات المطلوبة، وذلك بفضل خصائصها الفيزيائية والكيميائية الأساسية وكذلك التوافق الحيوي. وبالتالي، فإن عمليات اللحام التي يتم تطبيقها عليها تشكل مصدر قلق كبير للمهندسين.

الهدف من هذا العمل هو دراسة قابلية لحام سبيكة التيتانيوم TA6V باستخدام تقنية TIG، بالتركيز على تأثير هذه العملية على السلوك المعدني والميكانيكي لسبيكة TA6V. للقيام بذلك، تم اتباع بروتوكول تجريبي صارم لإنشاء توصيف معدني وميكانيكي اشتمل على عدة أنواع من التحليلات، بما في ذلك التحليل بواسطة DRX، واختبارات الشد المفسرة بواسطة ترابط الصور الرقمية، الخ

تم تفسير النتائج التي تم العثور عليها وقدمت معلومات حاسمة تمكننا من تقييم جودة اللحامات وتأثيرها على هيكل وخصائص المادة المطروحة

كلمات مفتاحية :

سبيكة TA6V ، قابلية اللحام ، لحام بواسطة تقنية TIG ,توصيف.

Abstract

The TA6V alloy is the most widely used titanium alloy in industry, indeed it is often chosen for the manufacture of structural parts in airplanes, helicopters, medical implants, automotive components, and other demanding applications, all thanks to its indispensable physico-chemical properties as well as its biocompatibility. It therefore naturally follows that the welding processes applied to it are a major concern for engineers.

This work aims to study the weldability of the TA6V titanium alloy using the TIG process, highlighting the effects of this welding process on the metallurgical and mechanical behavior of the TA6V alloy. To do this, a rigorous experimental protocol was followed to establish a metallurgical and mechanical characterization that included several types of analyses, notably analysis by XRD, tensile tests interpreted by digital image correlation, etc.

The results found were interpreted and provided crucial information allowing us, among other things, to evaluate the quality of the welds and their impact on the structure and properties of the material in question.

Keywords : TA6V Alloy, Welding by TIG process , Weldability, Characterization.

Résumé

L'alliage TA6V est l'alliage de titane le plus utilisé en industrie, en effet il est souvent choisi pour la fabrication de pièces structurales dans les avions, les hélicoptères, les implants médicaux, les composants automobiles et d'autres applications exigeantes, tout ça grâce à ses propriétés physico-chimiques incontournables ainsi qu'à sa bio-compatibilité. Il s'en suit donc naturellement que les procédés de soudage qui lui sont appliqués font l'objet de préoccupation majeure pour les ingénieurs .

Ce travail a pour objectif d'étudier la soudabilité de l'alliage TA6V de titane par procédé TIG, en mettant en exergue les effets de ce procédé de soudage le comportement métallurgique et mécanique de l'alliage TA6V. Pour ce faire, il a été question de suivre un protocole expérimental rigoureux pour établir une caractérisation métallurgique et mécanique qui a regroupé plusieurs types d'analyses notamment l'analyse par DRX, les essais de traction interprétés par corrélation d'images numériques etc.

Les résultats trouvés ont été interprétés et ont fourni des informations cruciales nous permettant entre autres d'évaluer la qualité des soudures et leur impact sur la structure et les propriétés du matériau en question.

Mots clés : Alliage TA6V, soudage par procédé TIG, soudabilité, caractérisation.

Table des matières

Table des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	15
1 Généralités sur le titane et l'alliage Ti-6Al-4V	17
1.1 Introduction	18
1.2 Structure Cristalline	20
1.3 Transformation Beta/Alpha	21
1.4 Alliages de titane	23
1.4.1 Effets des éléments d'alliage	23
1.4.2 Les principales familles d'alliage de titane	27
1.4.3 Microstructure des alliages de titane	28
1.4.4 Les phases rencontrées dans les alliages de titane	30
1.5 L'alliage TA6V :	32
1.5.1 Diagramme T.T.T. du TA6V	34
1.5.2 Diagramme T.R.C. du TA6V	35
1.5.3 Caractéristiques physiques :	36
2 Procédés de soudage	37
2.1 Généralités :	38
2.2 Soudage TIG :	39
2.2.1 Principe du procédé TIG :	39
2.2.2 Equipements :	40
2.2.3 Effet de divers paramètres d'entrée sur les performances du TIG :	42
2.3 La soudabilité du TA6V :	50
2.3.1 Les procédés de soudage :	52
2.4 Les défauts de soudure du titane et ses alliages :	52
2.5 Zones caractéristiques lors du soudage de l'alliage TA6V :	54

2.6	Evaluation préliminaire de la qualité d'une soudure :	55
3	Matériaux et techniques expérimentales	57
3.1	Matériau étudié	58
3.2	Equipements du poste soudage TIG	58
3.3	Préparation des éprouvettes	60
3.3.1	Nettoyage de la surface	60
3.3.2	Le bridage	60
3.4	Opération de soudage	60
3.5	Préparation métallographique	61
3.5.1	Enrobage et polissage	61
3.5.2	Attaque chimique	62
3.6	Macroscopie	63
3.7	Microscope optique	63
3.8	Test de traction	64
3.9	Analyse par corrélation d'images numérique CIN	66
3.9.1	Mode opératoire pour l'obtention du mouchetis	67
3.10	Microdureté	70
3.11	Diffraction des Rayons X	71
4	Résultats et discussions	74
4.1	Introduction	75
4.2	Métal de base :	75
4.3	Soudage :	76
4.3.1	Soudage d'alliage de titane TA6V de 1mm d'épaisseur avec un courant continu :	76
4.3.2	Soudage d'alliage de titane TA6V de 2mm d'épaisseur avec un courant continu :	80
4.3.3	Soudage d'alliage de titane TA6V de 2mm d'épaisseur avec un courant pulsé :	82
4.4	Caracterisation metallurgique :	83
4.5	Essai de traction et analyse par corrélation d'images numé- rique :	88
4.5.1	Essai de traction sur une tôle de 1mm d'épaisseur sou- dée par procédé TIG avec un courant continu :	88
4.5.2	Essai de traction sur une tôle de 2mm d'épaisseur sou- dée par procédé TIG avec un courant pulsé :	94
4.6	Microdureté :	101

4.7 Diffraction des Rayons X :	102
Conclusion générale	105
Références bibliographiques	108
Annexes	112
A Matériaux et dispositifs expérimentales	113

Table des figures

1.1	Densité des métaux sélectionnés [2]	19
1.2	Structure cristalline de la phase hc (hexagonal compact) et cc (cubique centré) [2]	21
1.3	Transformation Beta/Alpha selon la relation de Burgers [2]	22
1.4	Transition du réseau cubique centré vers le réseau hexagonal compact dans les cristaux de zirconium .	23
1.5	Effet des éléments d'alliage sur les diagrammes de phase des alliages de titane [3]	24
1.6	Influence de la microstructure des alliages de Ti sur leurs propriétés mécaniques [25]	28
1.7	Microstructures lamellaires obtenues par refroidissement à :	29
1.8	Microstructure équiaxe de l'alliage Ti6242S (quasi α) [3]	30
1.9	Microstructure duplex avec (a) vitesse de refroidissement lente et	30
1.10	Diagramme pseudo-binaire applicable aux alliages de titane [21]	31
1.11	Le diagramme d'équilibre Ti-Al [24]	33
1.12	Le diagramme d'équilibre Ti-V [24]	34
1.13	Diagramme TTT après remise en solution à 1025°C, 30 min [23]	35
1.14	Diagramme TRC du TA6V [23]	36
2.1	Classification des processus de soudage en fonction de la source d'énergie utilisée [26]	39
2.2	Le principe du procédé TIG [27]	40
2.3	Classifications des électrodes de tungstène [29]	41
2.4	Effet de la longueur d'arc sur la tension [31]	42
2.5	Les trois types de polarité [29]	44

2.6	Principe du courant pulsé sur le TIG [33]	44
2.7	Effet de la vitesse de soudage sur la structure dans le métal soudé [27]	46
2.8	Diamètres d'électrode et intensités de courant recommandés en utilisant l'argon [36]	47
2.9	Effet de l'affûtage de l'électrode sur la forme et la distribution de la densité de puissance de l'arc [27] .	48
2.10	Effet de l'angle de pointe de l'électrode sur la forme de l'arc [27]	48
2.11	Propriétés de protection gazeuse utilisées dans le soudage TIG [27]	49
2.12	Evolution de la tension d'arc sous argon et sous hélium suivant l'intensité appliquée [38]	50
2.13	Zones caractéristiques lors du soudage du TA6V [22]	54
2.14	Analyse d'un cordon de soudure de TA6V pendant le soudage [23]	55
2.15	Indicateur de la soudure [23]	56
3.1	Poste de soudage TIG Dynasty 350 (CRTI)	59
3.2	Bridage	60
3.3	Polisseuse (CRTI)	62
3.4	Macroscopie (CRTI)	63
3.5	Microscopie optique (CRTI)	64
3.6	Eprouvette de traction selon la norme ASTM E8M .	65
3.7	Eprouvette de traction non normalisée	65
3.8	Machine de traction (CRTI)	65
3.9	Images photos du dispositif CIN a) le dispositif complet b) écran d'acquisition	67
3.10	Outils nécessaires pour la réalisation du mouchetis .	68
3.11	Eprouvette revêtue en blanc	69
3.12	Technique de création du mouchetis (couleur noir) .	69
3.13	Taille et allure du mouchetis	70
3.14	Microduromètre vickers (USTHB)	71
3.15	Principe de la loi de Bragg	72
4.1	Tableau présentant la composition chimique moyenne de TA6V	75
4.2	Microstructure du métal de base	76

4.3	Echantillon 01 (soudure avec un courant continu) . .	78
4.4	Echantillon 02 (soudure avec un courant continu) . .	79
4.5	Echantillon 03 (soudure avec un courant continu) . .	79
4.6	Echantillon 04 (soudure avec un courant continu) . .	80
4.7	Echantillon 05 (soudure avec un courant continu) . .	81
4.8	Echantillon 06 (soudure avec un courant continu) . .	82
4.9	Echantillon 07 (soudure avec un courant pulsé)	83
4.10	Macrographie d'une soudure avec un courant continu	84
4.11	Macrographie d'une soudure avec un courant pulsé .	85
4.12	ZF et ZAT d'une soudure CC(1mm)	85
4.13	ZF et ZAT d'une soudure CP(2mm)	86
4.14	surface des grains dans les zones affectées thermique- ment des deux soudures	87
4.15	superposition des courbes de traction des trois éprou- vettes	88
4.16	Éprouvette 1 (soudure avec courant continu) (GOM)	91
4.17	Éprouvette 2 (soudure avec courant continu) (GOM)	92
4.18	Éprouvette 3 (soudure avec courant continu) (GOM)	93
4.19	superposition des courbes de traction des trois éprou- vettes	94
4.20	Éprouvette 1 (soudure avec courant pulsé) (GOM)	96
4.21	Éprouvette 2 (soudure avec courant pulsé) (GOM)	98
4.22	Éprouvette 3 (soudure avec courant pulsé) (GOM)	100
4.23	Les valeurs moyennes de la microdureté	101
4.24	Résultats de la diffraction des rayons X d'une soudure avec un courant continu et du métal de base	103
A.1	Interface du logiciel GOM Correlate	114
A.2	Interface de travail	114
A.3	Illustre comment importer des images	115
A.4	Sélection des images	115
A.5	capture d'écran de l'étape 5	116
A.6	La première image pour notre test	116
A.7	Zone d'intérêt et taille du maillage	117
A.8	Choix du sens de la corrélation	118
A.9	Traitement terminé	119

A.10 Visualisation des résultats à partir des images de référence montrant le gradient de déformations sur une succession d'images sélectionnées au préalable 119

Liste des tableaux

- 4.1 **Tableau récapitulatif de la composition chimique de l'alliage AMS 4951** 76
- 4.2 Les paramètres de soudage de la soudure TIG avec courant continu 77
- 4.3 Les paramètres de soudage des soudure TIG de 1mm d'épaisseur avec courant continu 78
- 4.4 Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant continu 81
- 4.5 Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant pulsé 82
- 4.6 Propriétés mécaniques des éprouvettes d'une soudure avec un courant continu 89
- 4.7 Propriétés mécaniques des éprouvettes d'une soudure avec un courant pulsé 94
- 4.8 Les valeurs moyennes de la microdureté 102

Introduction générale

Depuis son développement dans les années 1950, l'alliage TA6V occupe une place prépondérante dans l'industrie en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles, sa légèreté et de sa résistance à la corrosion. Les caractéristiques et les performances uniques de cet alliage de titane, ont fait de lui un matériau largement utilisé dans des applications aérospatiales, médicales, pétrolières et automobiles.

Le TA6V est employé en industrie de aéronautique du fait, notamment, de son rapport dureté/ductilité particulièrement élevé et de sa résistance à la fatigue très intéressante. Aussi, L'alliage présente par ailleurs une bonne résistance à la corrosion, y compris à des températures et dans des conditions extrêmes. Pour toutes ces raisons, les structures d'avions, les attaches, moyeux, joints ou autres composants complexes de turboréacteurs et plus généralement, les pièces structurelles critiques et les éléments exposés à des températures extrêmes, sont autant de pièces que l'on peut fabriquer à base de TA6V. Sa résistance à la corrosion en fait également un matériau idéal pour les environnements marins, où il est utilisé dans la construction navale, et les systèmes de traitement de l'eau salée.

Dans le domaine médical aussi, l'alliage TA6V est très utilisé pour la fabrication d'implants et de prothèses. Sa biocompatibilité élevée, associée à sa résistance mécanique, en fait un choix privilégié pour les applications orthopédiques et dentaires. De surcroît, cet alliage est également utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière pour sa résistance à la corrosion dans des environnements agressifs, tels que les équipements de forage.

Le présent rapport de projet de fin d'études intitulé "Étude de la soudabilité de l'alliage TA6V de titane par procédé TIG" vise à approfondir notre compréhension du soudage de cet alliage en faisant notamment une analyse détaillée des soudures de l'alliage TA6V par la méthode TIG. Nous évaluerons entre autres, la qualité des joints de soudure, la variation des caractéristiques mécaniques etc, et pour ce faire nous passerons par diverses

méthodes expérimentales pour établir notamment une caractérisation de l'alliage après soudage.

- Le premier chapitre de ce rapport se concentre sur la présentation et la description détaillée de l'alliage d'étude, à savoir l'alliage de titane TA6V. Cet alliage est composé de 90% de titane, 6% d'aluminium et 4% de vanadium, ses propriétés font de lui un choix privilégié pour de nombreuses applications exigeantes citées plus haut.
- Le deuxième chapitre de ce rapport portera sur le soudage des alliages TA6V, en mettant en évidence les avancées historiques et les développements récents dans ce domaine. Il examinera la soudabilité de cet alliage, ainsi que les effets des paramètres de soudage sur ce dernier. Cette revue de la littérature permettra d'identifier les principales difficultés rencontrés lors du soudage de l'alliage TA6V.
- Le troisième chapitre se concentrera sur le matériel et les techniques expérimentales employées tout au long de ce projet. Les procédures de soudage TIG utilisées seront expliquées en détail, de même que les paramètres de soudage tels que la vitesse, le courant et la protection gazeuse. Des précautions particulières seront prises en compte pour garantir la reproductibilité des résultats expérimentaux.
- Enfin, le quatrième chapitre présentera les résultats expérimentaux obtenus lors des soudures réalisées sur l'alliage TA6V avec la technique TIG. Ces résultats seront soigneusement analysés, interprétés et comparés.

En conclusion, ce rapport de projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre de l'étude approfondie du soudage et de la soudabilité de l'alliage TA6V de titane par procédé TIG. Comprendre les caractéristiques et les défis liés au soudage par procédé TIG ce matériau, permettra par la suite d'améliorer les techniques de soudage utilisés et à exploiter pleinement le potentiel de l'alliage TA6V dans diverses applications industrielles.

Chapitre 1

Généralités sur le titane et l'alliage Ti-6Al-4V

1.1 Introduction

En 1791, le révérend britannique, minéralogiste et chimiste, William Gregor, fut le premier à découvrir le titane. Quatre ans plus tard, Martin Klaproth, un chimiste berlinois, isola indépendamment l'oxyde de titane. L'histoire des enfants mythologiques grecs d'Uranos et Gaia, les Titans, lui a fourni l'inspiration pour le nommer titane. Il a fallu plus de 100 ans pour isoler le métal. Les premiers alliages, y compris l'actuel Ti-6Al-4V très populaire, ont été développés à la fin des années 1940 aux États-Unis. Aujourd'hui, un grand nombre d'alliages de titane ont ouvert la voie à une expansion massive des métaux légers dans de nombreuses applications industrielles. [1]

Le titane et ses alliages se distinguent principalement par leur grande résistance spécifique et leur excellente résistance à la corrosion, avec seulement la moitié du poids des aciers et des superalliages à base de Ni (voir tableau 1.1). Cela explique leur succès précoce dans l'aérospatiale et l'industrie chimique. Mais d'autres marchés tels que l'architecture, le traitement chimique, la médecine, la production d'énergie, la marine, les sports et les loisirs, et les transports voient une application croissante du titane.

Le titane n'est pas réellement une substance rare puisqu'il est le neuvième élément le plus abondant et le quatrième métal structurel le plus abondant dans la croûte terrestre, dépassé seulement par l'aluminium, le fer et le magnésium. Malheureusement, il est rarement trouvé en haute concentration et jamais à l'état pur. Ainsi, la difficulté à traiter ce métal le rend cher.

Les métaux varient considérablement en poids. Avec une densité de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$, le lithium a la densité la plus faible tandis que l'osmium et l'iridium sont les métaux les plus lourds avec une densité de $22,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Le point de séparation entre les métaux légers et lourds est de 5 g.cm^{-3} . Par conséquent, le titane avec une densité de $4,51 \text{ g.cm}^{-3}$ est le métal léger le plus lourd. Bien qu'il soit deux fois plus lourd que le métal léger classique - l'aluminium - il a seulement environ la moitié du poids spécifique du fer ou du nickel. [2]

La figure 1.1 montre la position de la densité du titane par rapport à d'autres métaux.

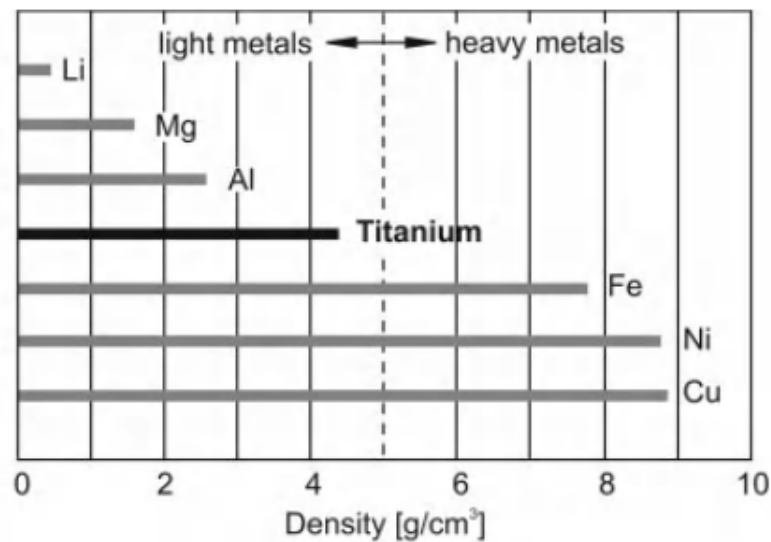


FIG. 1.1 : Densité des métaux sélectionnés [2]

Certaines des caractéristiques de base du titane et de ses alliages sont répertoriées dans le Tableau 1.1 et comparées à celles d'autres matériaux métalliques structuraux à base de Fe, Ni et Al.

Bien que le titane ait le plus haut rapport résistance/densité, il n'est le matériau de choix que pour certaines zones d'application de niche en raison de son prix élevé. Ce prix élevé est principalement le résultat de la grande réactivité du titane avec l'oxygène, qui conduit à la formation immédiate d'une couche d'oxyde de surface stable et adhérente lorsqu'il est exposé à l'air, résultant en une résistance supérieure à la corrosion du titane dans divers types d'environnements agressifs, en particulier dans les environnements acides aqueux.

La température de fusion beaucoup plus élevée du titane par rapport à l'aluminium, le principal concurrent dans les applications structurales légères, donne un avantage définitif au titane à des températures d'application d'environ 150°C .

La grande réactivité du titane avec l'oxygène limite la température d'utilisation maximale des alliages de titane à environ 600°C . [3]

	Ti	Fe	Ni	Al
Melting Temperature (°C)	1670	1538	1455	660
Allotropic Transformation (°C)	$\beta \xrightarrow{882} \alpha$	$\gamma \xrightarrow{912} \alpha$	-	-
Crystal Structure	bcc \rightarrow hex	fcc \rightarrow bcc	fcc	fcc
Room Temperature E (GPa)	115	215	200	72
Yield Stress Level (MPa)	1000	1000	1000	500
Density (g/cm ³)	4.5	7.9	8.9	2.7
Comparative Corrosion Resistance	Very High	Low	Medium	High
Comparative Reactivity with Oxygen	Very High	Low	Low	High
Comparative Price of Metal	Very High	Low	High	Medium

TAB 1.1 : Certaines caractéristiques importantes du titane et des alliages à base de titane par rapport à d'autres matériaux métalliques structurels à base de Fe, Ni et Al [3]

1.2 Structure Cristalline

Le titane pur présente une transformation de phase allotropique à 882°C , passant d'une structure cristalline cubique centrée (Phase β) à des températures plus élevées à une structure cristalline hexagonale compacte (Phase α) à des températures plus basses. La température exacte de la transformation est fortement influencée par les éléments interstitiels et substitutionnels et dépend donc de la pureté du métal. La cellule unitaire hexagonale de la phase α est montrée dans la Figure 1.2, indiquant également les valeurs à température ambiante des paramètres de la maille a (0.295 nm) et c (0.468 nm). Le ratio $\frac{c}{a}$ résultant pour le titane α pur est de 1.587, plus petit que le ratio idéal de 1.633 pour la structure cristalline hexagonale compacte. La Figure 1.2 (a) indique également les trois types de plans de maille les plus denses. Le plan (0002), est appelé plan basal, l'un des trois plans $\{1010\}$, sont appelés plans prismatiques, et l'un des six plans $\{1011\}$ sont appelés plans pyramidaux. Les trois axes "a1", "a2" et "a3" sont les directions d'empilement denses avec les indices $\langle 1120 \rangle$. La maille cubique centrée (cc) de la phase β est illustrée dans la Figure 1.2 (b), indiquant également une variante des six plans de maille $\{110\}$ les plus densément emballés et la valeur du paramètre de maille du titane β pur à 900°C ($a = 0.332$ nm). Les directions d'empilement dense sont les quatre directions

$\langle 111 \rangle$. [3]

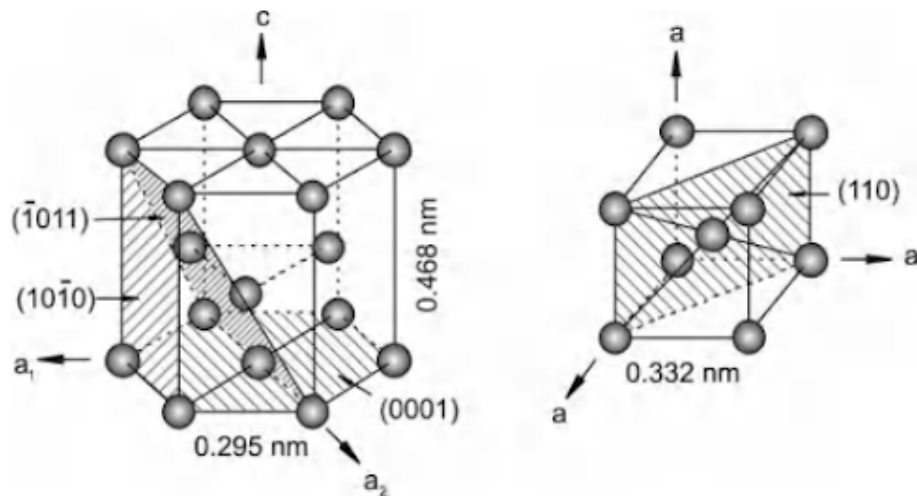


FIG. 1.2 : Structure cristalline de la phase hc (hexagonal compact) et cc (cubique centré) [2]

La déformation plastique et le taux de diffusion sont étroitement liés à la structure cristalline respective. De plus, le réseau cristallin hexagonal provoque une anisotropie distinctive du comportement mécanique pour le titane alpha. L'anisotropie élastique est particulièrement prononcée. Le module de Young des monocristaux de titane varie constamment entre 145 GPa pour une charge verticale par rapport au plan basal et seulement 100 GPa parallèle à ce plan. [2]

1.3 Transformation Beta/Alpha

Lors du refroidissement depuis le champ de phase beta du titane, les plans d'empilements les plus denses de la phase bcc beta $\{110\}$ se transforment en plans basaux $\{0001\}$ de la phase hexagonale alpha. La distance entre les plans basaux en alpha est légèrement plus grande que la distance correspondante entre les plans $\{110\}$ en beta. Par conséquent, la transformation beta/alpha provoque une légère distorsion atomique (Figure 1.3). Cela conduit à une légère contraction de l'axe "c" par rapport à l'axe "a" dans le hcp alpha et réduit le ratio $\frac{c}{a}$ en dessous de la valeur des structures atomiques hexagonales idéalement empilées. Une légère augmentation du volume est observée macroscopiquement lors du refroidissement à travers la température de transformation beta/alpha. [2]

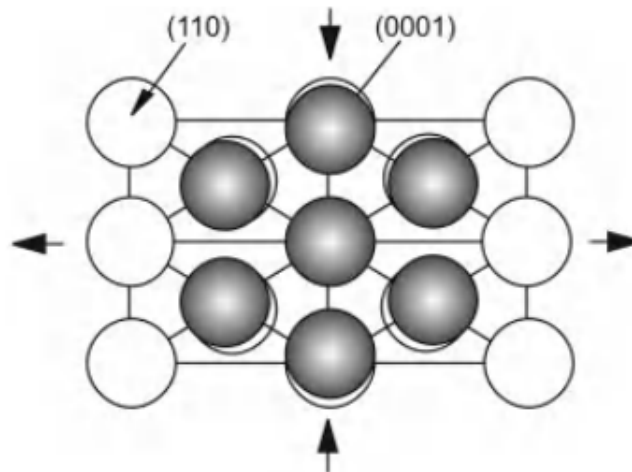


FIG. 1.3 : Transformation Beta/Alpha selon la relation de Burgers [2]

D'un point de vue cristallographique, le zirconium et le titane ont un comportement semblable. Burgers [4] explique que l'obtention de la maille primitive du réseau hexagonal pseudo-compact du zirconium est possible par un cisaillement le long d'un plan de la famille $\{112\}$ qui est perpendiculaire au plan (110) du cubique centré. Ce cisaillement a lieu dans la direction parallèle à l'une des deux directions $[111]$ du plan (110) de la maille cubique centrée (voir Figure 1.4).

Les relations d'orientations ainsi obtenues sont :

$$\begin{aligned} (110)_\beta &|| (0001)_\alpha \\ [111]_\beta &|| [1120]_\alpha \end{aligned}$$

Comme la Figure 1.4 l'illustre, il n'y a qu'un seul plan (0001) dans la maille hexagonale et six (06) plans (110) dans la maille cubique, chacun contenant deux directions $[111]$. Un cristal cubique peut donc se transformer en douze (12) cristaux hexagonaux orientés différemment.

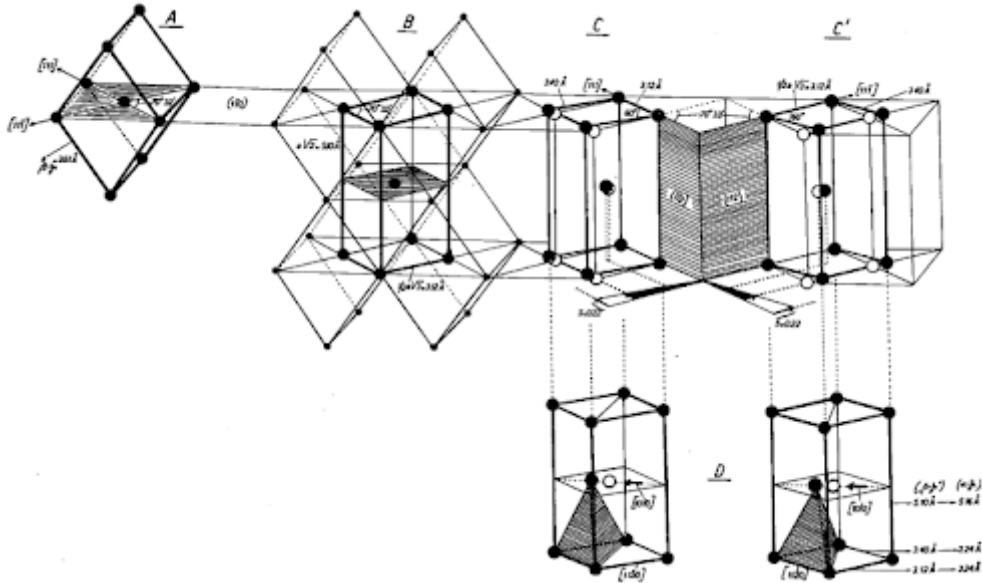


FIG. 1.4 : Transition du réseau cubique centré vers le réseau hexagonal compact dans les cristaux de zirconium

La figure 1.4 illustre comment deux positions du réseau hexagonal correspondent à un plan $\{110\}$ défini. [4]

1.4 Alliages de titane

1.4.1 Effets des éléments d'alliage

Les éléments d'alliage dans le titane sont classés selon leurs tendances à stabiliser alpha ou beta, ils augmentent ou diminuent la température de transformation alpha/beta du titane pur.

En fonction de leur influence sur la température de transition beta-alpha, les éléments d'alliage du titane sont classés comme neutres, stabilisateurs alpha, ou stabilisateurs beta (Figure. 1.5). [2]

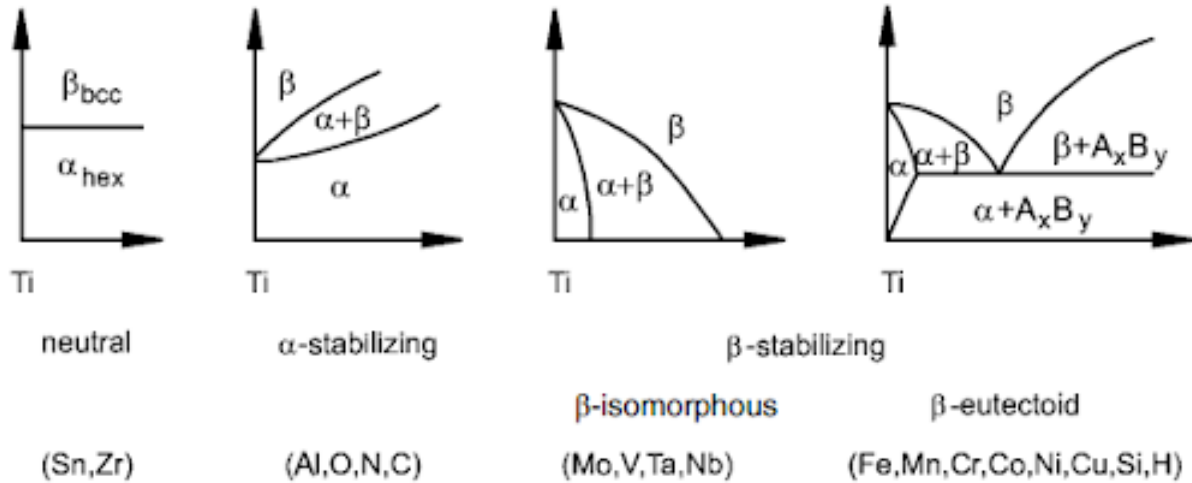


FIG. 1.5 : Effet des éléments d'alliage sur les diagrammes de phase des alliages de titane [3]

Éléments alphas :

L'addition des éléments alphas au titane conduit à l'augmentation de la température de transformation ou de formation de la phase β ($T\beta$) et donc à la stabilisation de la phase α à plus haute température. Les éléments alphas sont également appelés « alpha-stabilisants ». Kahveci et al. [5] ont étudié le phénomène sur l'alliage TA6V.

L'oxygène, le carbone et l'azote sont des éléments fortement alphas. En raison de leur taille comparable à la taille des sites octaédriques, ces éléments se placent en insertion dans les sites octaédriques disponibles de la maille α [6,7]. Pour comprendre le comportement de l'alliage du Ti, nous exprimons l'effet des éléments α -gènes sous la forme d'une teneur équivalente en Al selon l'équation suivante [3] :

$$[Al]_{eq} = [Al] + \frac{1}{6}[Zr] + \frac{1}{3}[Sn] + 10([O] + [C] + 2[N])$$

L'oxygène a une influence importante sur la dureté des alliages. Liu et Welsch [8] affirment que c'est l'élément ayant la plus grande influence sur les propriétés mécaniques.

L'azote augmente la dureté de l'alliage en formant des composés Ti_2N/TiN [9]. Ce phénomène appelé nitruration peut être recherché pour améliorer les propriétés en frottement des alliages de titane, mais rend aussi l'alliage fragile.

L'aluminium joue également le rôle d'élément durcissant : il augmente le

module d'Young de l'alliage et diminue sa ductilité et sa plasticité [10,11]. De plus, l'aluminium accroît le rapport $\frac{c}{a}$ de la maille de titane α . Il permet d'améliorer la tenue à l'oxydation notamment en fluage. La quantité d'aluminium dans l'alliage ne doit cependant pas excéder 6% en masse car au-delà de cette concentration, des précipités de Ti_3Al (appelés phase α_2) apparaissent dans le matériau et le fragilisent [12,13,14].

Éléments bétagènes :

Les éléments bétagènes ont également un impact sur les propriétés mécaniques des alliages de titane, mais cet impact est moindre comparé à l'effet produit par les éléments alphagènes [15]. Ils ont pour principal effet d'abaisser la température $T\beta$ et accroissent donc le domaine de stabilité de la phase β . Nous exprimons aussi l'effet des éléments β -gènes sous la forme d'une teneur équivalente en Mo selon l'équation suivante [16] :

$$[Mo]_{eq} = [Mo] + \frac{1}{5}[Ta] + \frac{1}{3.6}[Nb] + \frac{1}{2.5}[W] + \frac{1}{1.5}[V]$$

Le vanadium, le molybdène, le niobium et le tantale sont des éléments bétagènes isomorphes, ce qui signifie qu'ils sont miscibles en toutes proportions dans la phase β . L'utilisation du vanadium augmente la ductilité de l'alliage mais il diminue la tenue à l'oxydation. L'utilisation du molybdène comme élément d'alliage permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques comme le fluage aux températures moyennes. Il augmente la ductilité, la tenue à l'oxydation et ralentit la précipitation Ti_3Al [10]. Un alliage de titane bénéficiant des avantages du vanadium et de ceux de l'aluminium est l'alliage TA6V. Dans leur travail, Lütjering et al. [17] se sont aperçus que le module d'Young du titane dépendait de la teneur en vanadium. Ils montrent que plus la quantité de vanadium ajoutée au titane est importante, plus le module élastique de l'alliage est important. Ainsi, à 20% at. de V, le module d'Young de l'alliage est de 74 GPa et il atteint 87 GPa lorsque la proportion de V est de 30% at.

Les éléments bétagènes eutectoïdes sont susceptibles de former des précipités solides. Les principaux sont le manganèse, le fer, le chrome, le nickel, le cuivre, l'hydrogène et le silicium. Le chrome améliore la résistance mécanique mais abaisse la ductilité. Le silicium améliore la tenue au fluage par formation de précipités de siliciures fragilisants qui permettent de bloquer le mouvement des dislocations [18]. Pour éviter de trop fortes chutes de

ductilité, la teneur en Si est généralement inférieure à 1% massique. Le fer permet d'améliorer le compromis résistance/ductilité/fluage à moyenne température (200 à 400°C) [10]. Il diminue fortement $T\beta$. Enfin, l'hydrogène est plus considéré comme une pollution qu'un élément d'addition volontairement ajouté à l'alliage. Il n'en reste pas moins un élément bêtagène eutectoïde pouvant former des précipités d'hydrures entraînant une diminution de la ductilité de l'alliage [14].

Les éléments bêtagènes eutectoïdes ont un effet stabilisateur de la phase β plus important que les éléments bêtagènes isomorphes.

Éléments neutres :

Parmi les éléments neutres, l'étain participe au durcissement de la phase α , et ne modifie pas la température $T\beta$. Il permet en revanche d'améliorer la tenue au fluage et le compromis résistance mécanique/ductilité aux températures cryogéniques [10].

Le zirconium et le hafnium entrent dans le réseau cristallin en se substituant aux atomes de titane. Ils durcissent les phases α et β et améliorent le compromis résistance mécanique/ductilité des alliages $\alpha + \beta$. Leur effet sur la température de transus- β est négligeable [19].

1.4.2 Les principales familles d'alliage de titane

En se basant sur les phases présentes, les alliages de titane peuvent être classés soit comme des alliages α , des alliages β ou des alliages $\alpha + \beta$. [20]

- Les alliages α : Constitués de 100% de phase α , ces alliages contiennent essentiellement des éléments d'addition de type α -gènes. Ainsi, leur composition chimique ne permet pas de retenir la phase β à température ambiante.
- Les alliages β : Constitués de 100% de phase β . La concentration en éléments β -gènes permet, dans ce cas, de stabiliser la phase β à la température ambiante qui ne se décomposera pas suite à un traitement thermique ultérieur.
- Les alliages $\alpha + \beta$: Cette famille représente la grande majorité des alliages de titane développés sur le marché. Elle-même est divisée en trois sous-groupes [16] :
 - Les alliages quasi α : Ces alliages sont obtenus par l'ajout d'une faible quantité d'éléments β -gènes ce qui permet de retenir une faible proportion de phase β stable, ils sont proches des alliages α .
 - Les alliages quasi β : Ces alliages possèdent très peu de phase α , la concentration en éléments β -gènes pour ces alliages est suffisante pour déplacer les points Ms et Mf (températures de début et fin de transformation martensitique de la phase β en phase α' hexagonale en cas de trempe rapide) en dessous de la température ambiante.
 - Les alliages $\alpha + \beta$: Alliages biphasés proprement dit. Les éléments α -gènes et β -gènes sont présents en quantité suffisante pour obtenir un large domaine biphasé ($\alpha + \beta$) et par conséquent une plus grande variété de microstructures à température ambiante.

Parmi ces alliages on retient le TA6V qui fait l'objet de notre travail.

Le comportement de chaque catégorie d'alliage face à des sollicitations précises est différent, c'est pourquoi on choisit une classe d'alliage en fonction des besoins recherchés (Figure 1.6) .

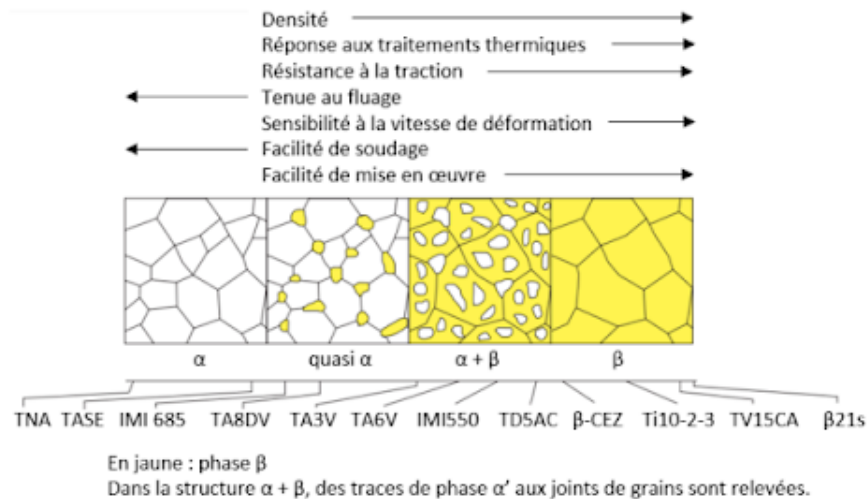


FIG. 1.6 : Influence de la microstructure des alliages de Ti sur leurs propriétés mécaniques [25]

Dans le tableau 1.2, les différences essentielles entre les trois classes d'alliages – α , $\alpha + \beta$ et β – sont résumées sur la base des propriétés physiques, mécaniques et technologiques.

	α	$\alpha + \beta$	β
Density	+	+	-
Strength	-	+	++
Ductility	-/+	+	+/-
Fracture toughness	+	-/+	+/-
Creep strength	+	+/-	-
Corrosion behavior	++	+	+/-
Oxidation behavior	++	+/-	-
Weldability	+	+/-	-
Cold formability	--	-	-/+

TAB 1.2 : Propriétés des alliages α , $\alpha + \beta$ et β [2]

1.4.3 Microstructure des alliages de titane

En fonction du traitement thermique appliqué et de la méthode de mise en œuvre des alliages de titane, quatre microstructures peuvent être observées [3] :

- **Microstructure en aiguilles** : Cette morphologie résulte de l'ap-

parition des phases α' et α'' qui sont des phases intermédiaires entre α et β . La phase α' est une phase hexagonale obtenue par trempe rapide de la phase β métastable. Sa composition chimique est donc la même que la phase β métastable car le refroidissement rapide empêche la diffusion solide. La phase α'' est une phase orthorhombique pouvant apparaître dans la phase β par traitement thermique ou si des contraintes existent dans le matériau. Ces phases se présentent alors sous la forme de fines aiguilles.

- **Microstructure lamellaire** : Cette microstructure est composée de phases α lamellaires dans une matrice β d'ex grains β . Les proportions entre ces phases et leurs tailles dépendent des vitesses de refroidissement (Figure 1.7) et des durées de maintien en température. L'augmentation de la largeur de la phase lamellaire α diminue la résistance à la traction, la ductilité, la ténacité et la tenue à la fatigue des alliages mais améliore leur résistance au fluage. A contrario, l'enchevêtrement fort des lamelles augmente la ténacité de l'alliage car dans ces conditions, elles sont en mesure de bloquer la propagation des fissures.

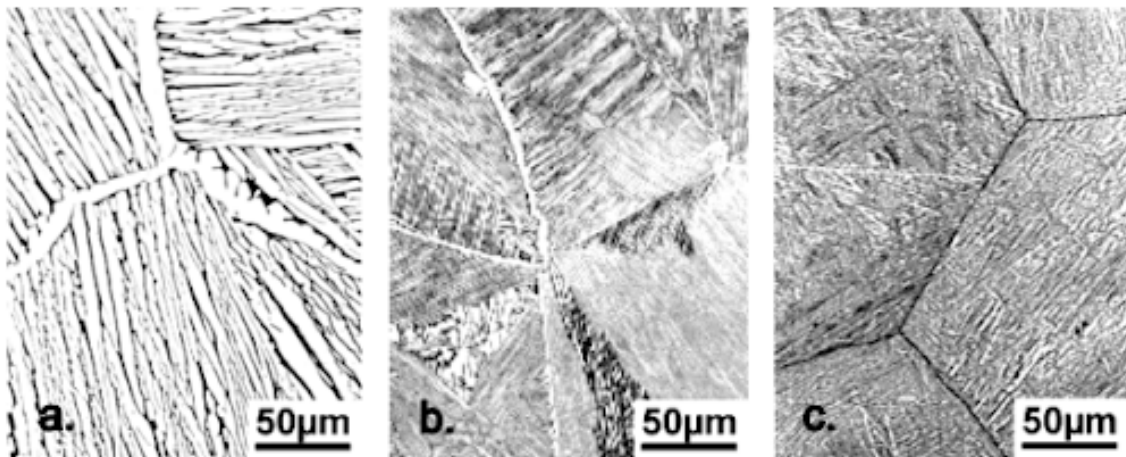


FIG. 1.7 : Microstructures lamellaires obtenues par refroidissement à :
a) $1\text{ }^{\circ}\text{K}/\text{min}$, b) $100\text{ }^{\circ}\text{K}/\text{min}$ et c) $8\ 000\text{ }^{\circ}\text{K}/\text{min}$ [3]

- **Microstructure équiaxe** : Cette microstructure se compose de grains α équiaxes avec des traces possibles de phase β résiduelle pour les alliages α , quasi- α et $\alpha + \beta$; ou de grains de phase β avec des traces possibles de phases α pour les alliages β et quasi- β (Figure 1.8) . Tout comme dans le cas d'une structure lamellaire, l'augmentation de la taille des grains équiaxes de phase α a pour effet de diminuer la

ductilité, la résistance à la traction, la ténacité et la tenue à la fatigue des alliages mais améliore leur résistance au fluage.

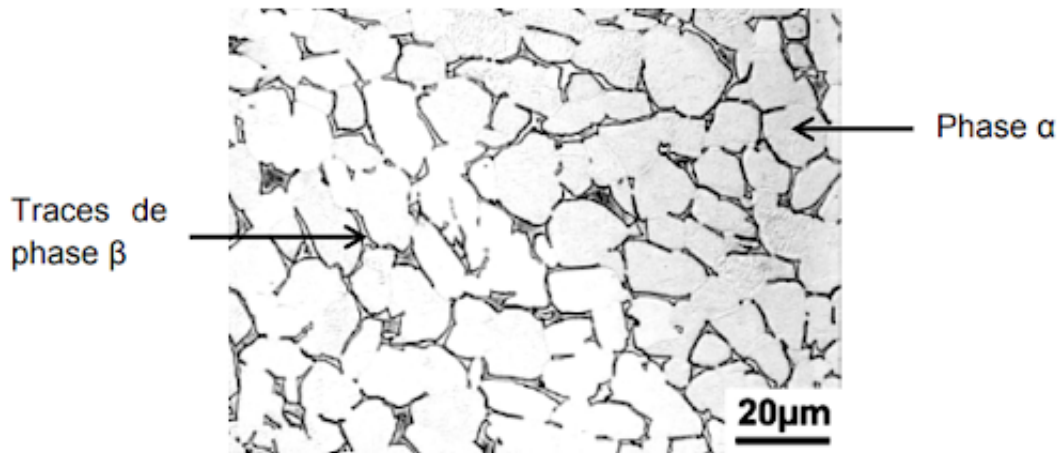


FIG. 1.8 : Microstructure équiaxe de l'alliage Ti6242S (quasi α) [3]

- **Microstructure bimodale ou duplex** : Cette microstructure est une combinaison des microstructures lamellaire et équiaxe (Figure 1.9). Elle est reconnaissable par ses grains monophasés mélangés avec des lamelles alternativement de phase α et de phase β .

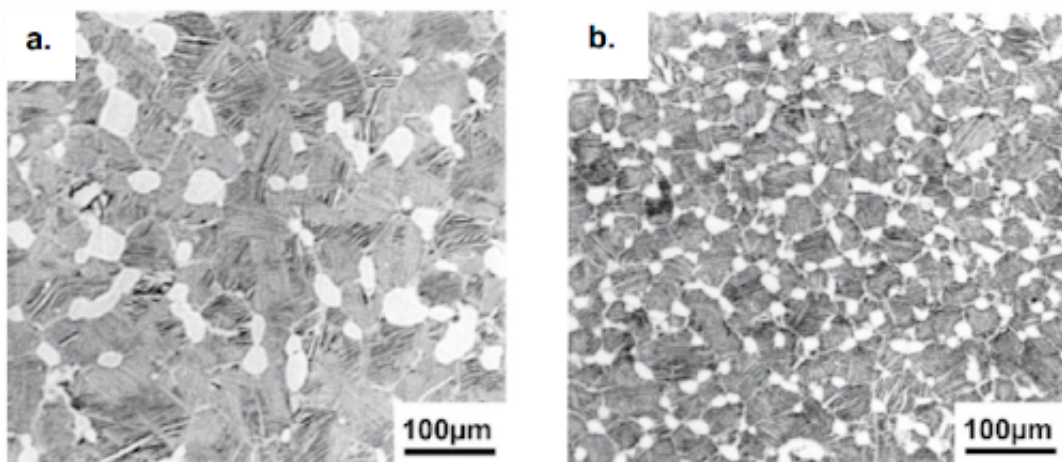


FIG. 1.9 : Microstructure duplex avec (a) vitesse de refroidissement lente et (b) vitesse de refroidissement élevée [3]

1.4.4 Les phases rencontrées dans les alliages de titane

Les caractéristiques mécaniques des alliages de titane sont fortement dépendantes de la microstructure, celle-ci étant elle-même tributaire des

transformations induites lors des traitements thermiques ou thermomécaniques du matériau. Ainsi, les propriétés d'usage telles que la résistance, la ductilité, la ténacité, la fatigue et le fluage sont étroitement liées à la microstructure, notamment à la forme et à la taille de la phase α (Figure 1.10). [21]

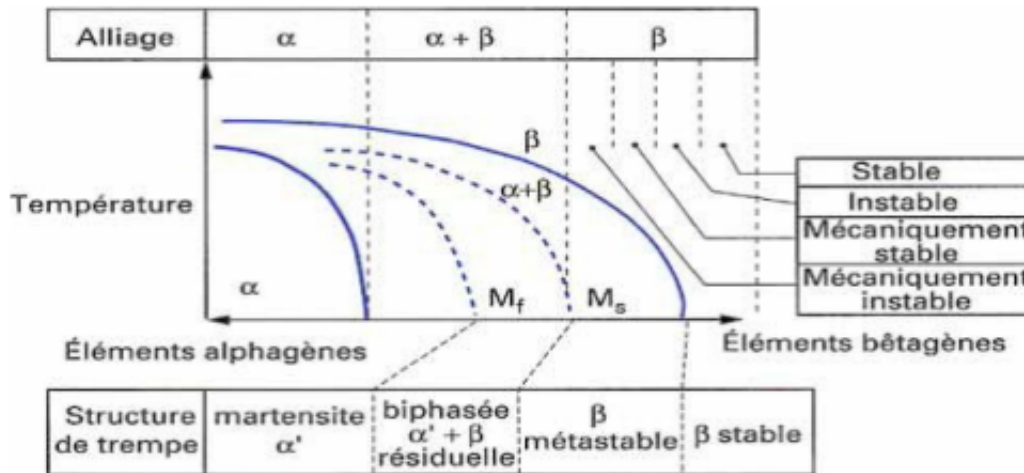


FIG. 1.10 : Diagramme pseudo-binaire applicable aux alliages de titane [21]

a. Phase α :

Il s'agit de la phase basse température de structure cristallographique pseudo-hexagonale compacte dont certains auteurs BARTLO distinguent :

- La phase α primaire (Grain boundary) (α GB) : Qui reste présente lorsque le matériau est traité thermiquement dans le domaine biphasé, la proportion de phase présente dépend bien sûr de la température de traitement.
- La phase α dite aciculaire (Widmanstatten) (α WI) : Formée au cours du refroidissement par germination et croissance le long d'un ensemble de plans cristallographiques préférentiels de la matrice β .

b. Phase β :

Elle possède la structure cubique centrée du titane β , forme allotropique de haute température, on distingue plusieurs formes de phase β :

- Phase β stable (β S) : Phase β retenue à l'ambiante, stable et impossible à transformer par traitement thermique. La stabilisation de cette phase provient d'une concentration supérieure en élément bêta-gène (principalement le vanadium) obtenue par refroidissement lent.

- Phase β transformée (β_t) : Structure biphasée composée d'un mélange de phase α et β_s . Cette « phase » est issue de la transformation de la phase β haute température lors de refroidissements lents.
- Phase β métastable (β_m) : Phase β retenue à l'ambiante, est susceptible de se transformer par traitement thermique ultérieur (en phase α à haute température et à basse température).
- Phase β résiduelle (β_r) : Phase β résiduelle résultant d'un refroidissement hors équilibre.

c. Phase Phases martensitiques :

Ce sont des phases aiguillées, obtenues par transformation martensitique de la phase β qui existe en fait sous deux formes cristallographiques :

- Phase α prime (α') : Phase hexagonale comme α , mais ayant la même composition chimique que la phase β d'origine. Elle est obtenue par trempe rapide de la phase β et transformation martensitique de cette dernière. Micro-graphiquement, cette phase a l'aspect aciculaire de la martensite.
- Phase α seconde (α'') : Phase orthorhombique, précipitant dans une phase β contenant $10 \pm 2\%$ de vanadium, lors de la trempe depuis des températures entre $750^\circ C$ et $900^\circ C$.

1.5 L'alliage TA6V :

Ti-6Al-4V est l'un des alliages de titane les plus largement utilisés. C'est un alliage alpha-beta contenant 6% en poids d'Al et 4% en poids de V. Les utilisations typiques comprennent les applications aérospatiales, les récipients sous pression, les disques de turbines à gaz d'avions, les boîtiers et les lames de compresseurs, ainsi que les implants chirurgicaux. Le Ti-6Al-4V possède une excellente combinaison de résistance et de ténacité, ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion. [22]

La composition chimique nominale de l'alliage Ti-6Al-4V est donnée dans le tableau ci-dessous :

Elément	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Wt.%	5.5 – 6.75	3.5 – 4.5	< 0.3	< 0.2	< 0.08	< 0.05	< 0.015	Balance

TAB 1.3 [4]

Puisque Al et V sont les éléments majoritaires dans l'alliage Ti6Al4V on s'intéresse aux diagrammes de phase binaires Ti-Al et Ti-V. Le diagramme Ti-Al est donné par la figure 1.11 ci-dessous :

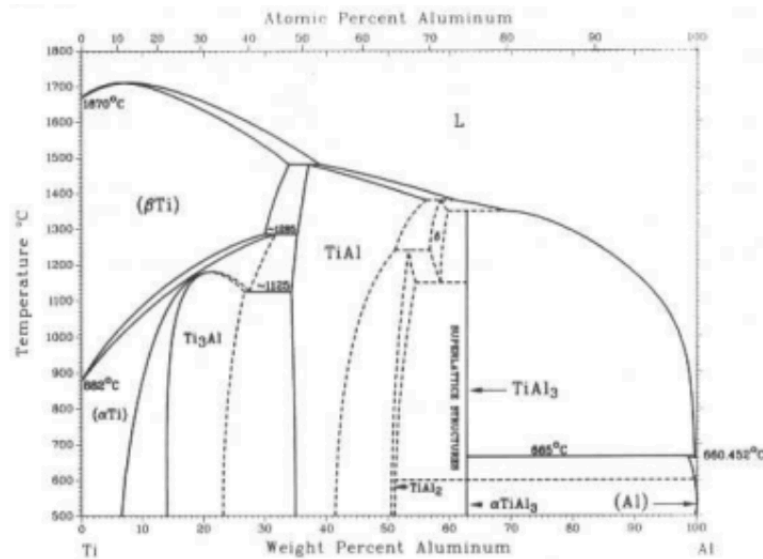


FIG. 1.11 : Le diagramme d'équilibre Ti-Al [24]

Les phases d'équilibre rencontrées dans le diagramme des phases sont : (β-Ti) de réseau cubique centré, (α-Ti) de réseau Hexagonal compact, et (Al) de réseau cubique à faces centrées ainsi que les phases intermétalliques Ti₃Al (α_2), TiAl (γ), δ et TiAl₃.

Le diagramme de phase montre que lorsque la teneur en Al augmente, on trouve la phase intermétallique Ti₃Al qui est durcissante et fragilisante. Pour éviter l'apparition de cette phase, la teneur en Al dans la plupart des alliages de titane est limitée à environ 6% [3]

Pour le Ti6Al4V la teneur équivalente en Al est limitée à 9%.

Le diagramme d'équilibre Ti-V est donné par la figure 1.12 ci-dessous :

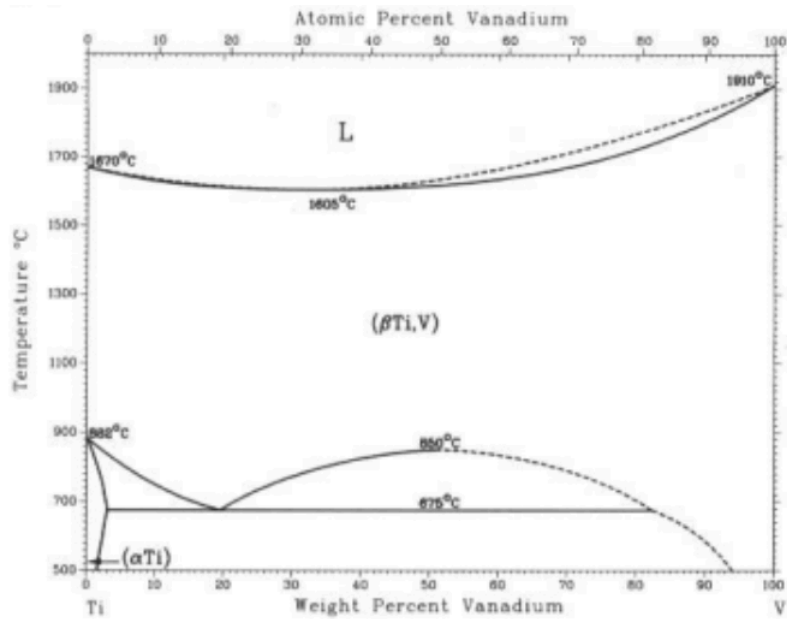


FIG. 1.12 : Le diagramme d'équilibre Ti-V [24]

Le titane et le vanadium sont totalement miscibles dans la solution solide $(\beta\text{-Ti, V})$ au-dessus de 1155 K.

1.5.1 Diagramme T.T.T. du TA6V

Les diagrammes T.T.T. caractérisent, lors d'un maintien isotherme consécutif à un brusque refroidissement, la nature et les instants de début et de fin de transformations structurales en fonction de la température. La figure 1.13 représente la cinétique de transformation du TA6V après une remise en solution à 1025°C pendant 30 minutes. [23]

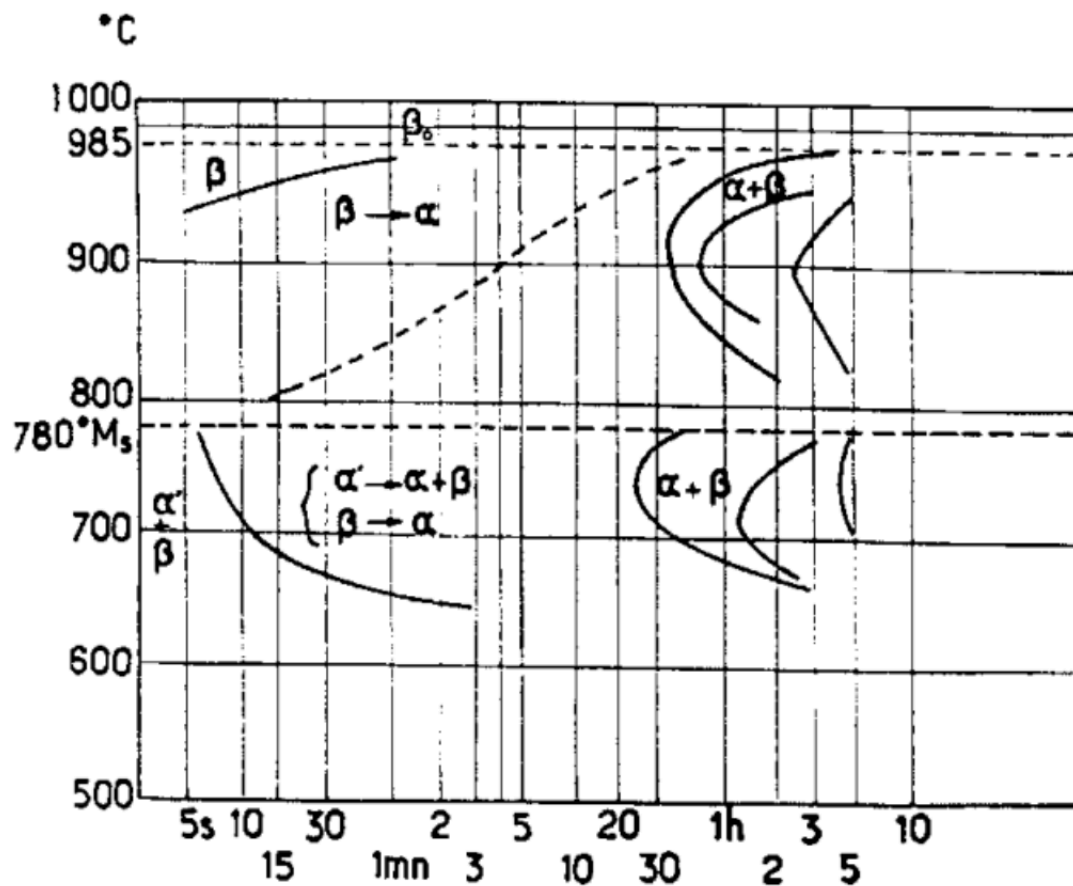


FIG. 1.13 : Diagramme TTT après remise en solution à 1025°C, 30 min [23]

1.5.2 Diagramme T.R.C. du TA6V

Les diagrammes T.R.C. caractérisent le comportement métallurgique du TA6V lors d'un refroidissement continu vers la température ambiante. Ils définissent pour un ensemble d'histoires thermiques subies par la pièce au refroidissement, les instants et les températures de début et de fin de transformations structurales relatives à chacune de ses histoires thermiques particulières et dans certains cas les pourcentages de constituants formés lorsqu'une transformation s'achève. La Figure 1.14 représente le diagramme de transformation en refroidissement continu du TA6V après une mise en solution à 1030°C pendant 30 minutes.[23]

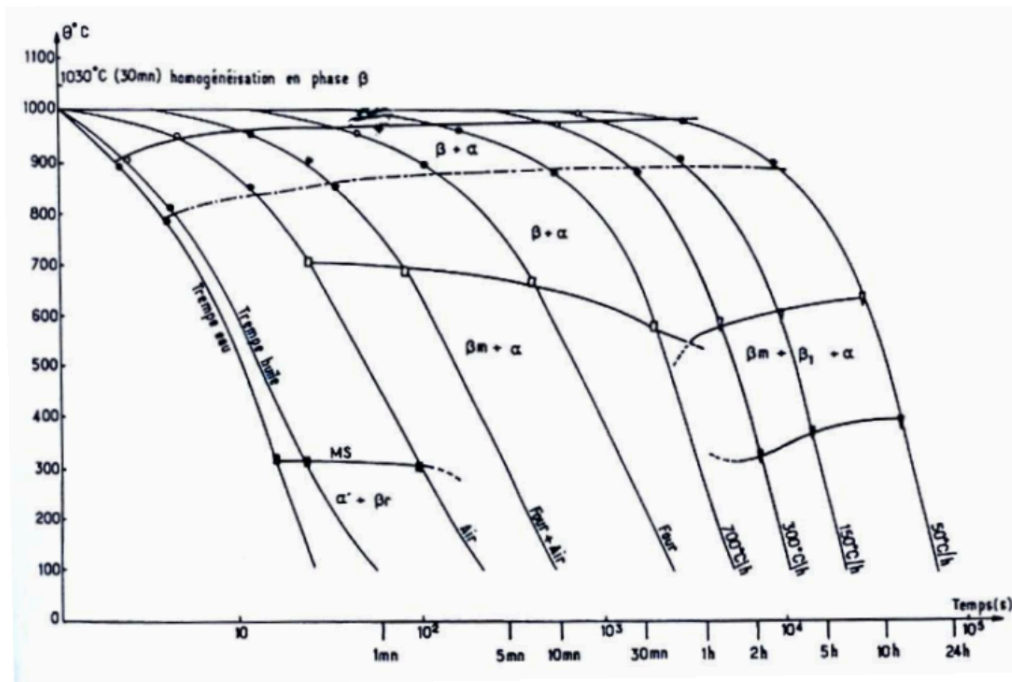


FIG. 1.14 : Diagramme TRC du TA6V [23]

1.5.3 Caractéristiques physiques :

Les principales caractéristiques physiques de cet alliage et les propriétés mécaniques à température ambiante sont données dans le Tableau 1-4 :

Propriétés	Valeurs	
T_{eb}	Température d'ébullition	3285°C
T_f	Température de fusion	1650-1675°C
T_β	Transus β	980-995°C
ρ_s	Masse volumique (20°C)	4520-4430 kg/m ³
ρ_L	Masse volumique (T= T_f)	4200 kg/m ³
M	Masse molaire	46,7 g/mol
C_{ps}	Capacité calorifique massique (20°C)	610 J/kg.K
C_{pL}	Capacité calorifique massique (T= T_f)	986 J/kg.K
α	Coefficient de dilatation thermique linéaire (20°C)	8-9 10 ⁻⁶ K ⁻¹
λ	Conductivité thermique	5,8-6,8-7,1 W/m.K
γ_{LV}	Tension de surface du liquide (T= T_f)	1,38 N/m
η	Viscosité dynamique du liquide (T= T_f)	5,2 10 ⁻³ N s/m ²
Ω_s	Résistivité électrique (20°C)	47,8-54,0 $\mu\Omega$.cm
Ω_L	Résistivité électrique (T= T_f)	168-171 $\mu\Omega$.cm
ν	Coefficient de Poisson	0,33
E	Module d'Young	106-114 GPa
$R_{p0,2}$	Limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique	990-1050 MPa
R_m	Résistance maximale à la traction	1050-1140 MPa
A	Allongement à la rupture	14-15%
σ_D	Limite d'endurance en traction (à 10 ⁷ cycles), %Rm	49%
HRC	Dureté	36
Izod	Résistance à l'impact (charpy)	10-20,3 J

TAB 1.4 Propriétés physiques du TA6V [23]

Chapitre 2

Procédés de soudage

2.1 Généralités :

Le soudage est un procédé de fabrication qui consiste à joindre deux pièces de métal en utilisant de la chaleur, de la pression ou un métal de remplissage. Avant de parler des différents procédés de soudage on introduira la notion de soudabilité. La soudabilité peut être considérée sous trois aspects différents [26] :

- La soudabilité opératoire : qui se réfère à la capacité du matériau à assurer une continuité métallique lors de la solidification ou de la diffusion utilisée pour le procédé de soudage. Un exemple de ce type de problème est la présence d'une couche d'oxyde résistante à la surface de l'aluminium ou du magnésium.
- La soudabilité métallurgique : qui concerne l'altération des propriétés du matériau à proximité de la soudure due au cycle thermique, mécanique ou thermomécanique induit par le procédé de soudage. On peut ainsi introduire les notions de zone fondue (ZF), de zone de liaison (ZL) et de zone affectée thermiquement (ZAT) qui sont des exemples de termes associés à cet aspect.
- La soudabilité constructive : qui prend en compte les modifications du comportement global de la structure soudée, telles que la sensibilité à la fissuration et la présence de contraintes résiduelles dans la zone soudée.

Les procédés de soudage peuvent être classés en fonction de la source d'énergie utilisée, comme indiqué sur la figure 2.1 suit :

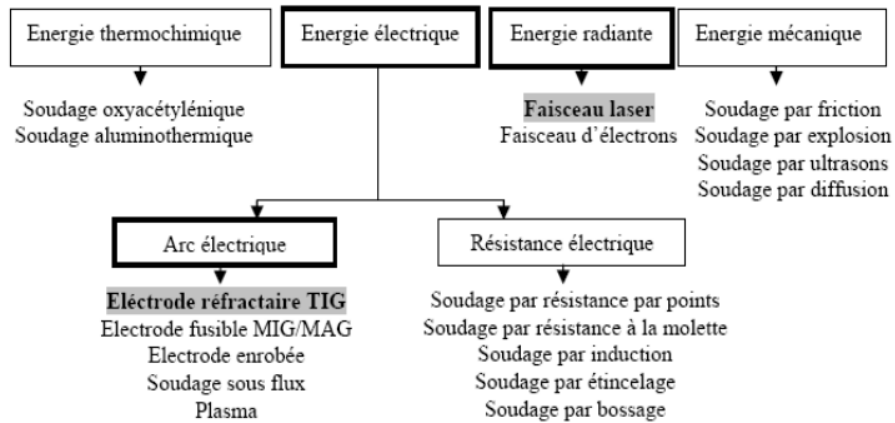


FIG. 2.1 : Classification des processus de soudage en fonction de la source d'énergie utilisée [26]

Dans notre étude, on s'intéresse au procédé TIG qui est l'un des procédés le plus utilisé pour le soudage du titane et ses alliages.

2.2 Soudage TIG :

2.2.1 Principe du procédé TIG :

Le soudage à l'arc TIG (Tungstène Inerte Gaz) appelé aussi GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) [27] est un procédé qui fait fondre et assembler des métaux en les chauffant avec un arc établi entre une électrode de tungstène non consommable et les métaux à souder. La figure 2.2 présente le principe du soudage TIG. Dans ce procédé, la torche tenant l'électrode de tungstène est reliée à une bouteille de gaz de protection ainsi qu'à une borne de la source d'alimentation électrique. L'électrode de tungstène est généralement en contact avec un tube de cuivre refroidi à l'eau, appelé tube de contact, qui est relié au câble de soudage de la borne. Cela permet à la fois au courant de soudage de la source d'alimentation d'entrer dans l'électrode et à l'électrode d'être refroidie pour éviter la surchauffe. La pièce à souder est reliée à l'autre borne de la source d'alimentation via un câble différent. Le gaz de protection passe à travers le corps de la torche et est dirigé par une buse vers le bain de fusion pour le protéger de l'air. La protection contre l'air est bien meilleure en GTAW qu'en SMAW car un gaz inerte tel que l'argon ou l'hélium est généralement utilisé comme gaz de protection et parce que le gaz de protection est dirigé vers le bain de fusion.

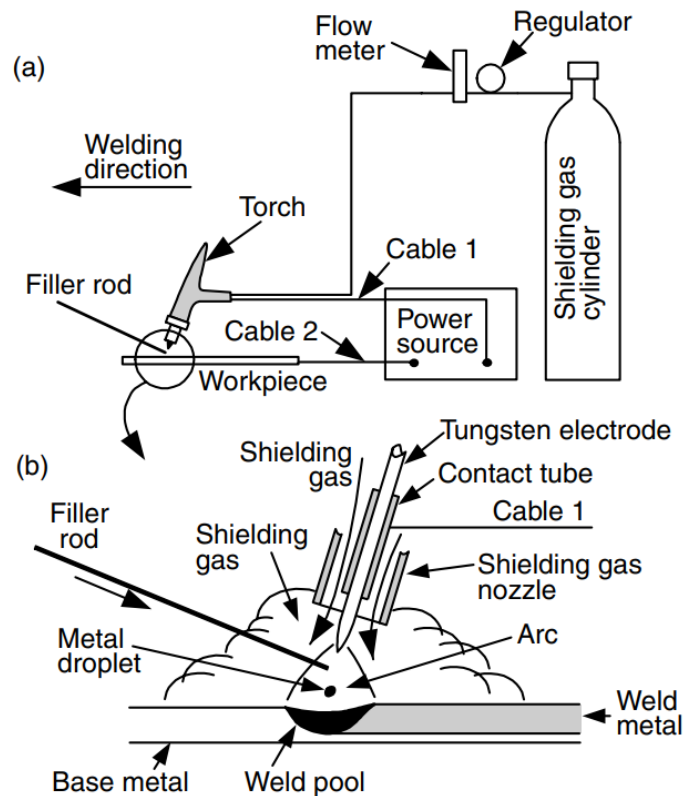


FIG. 2.2 : Le principe du procédé TIG [27]

La principale application du soudage TIG est la soudure de l'acier inoxydable, la soudure de métaux légers, tels que les alliages d'aluminium, de magnésium, de titane et la soudure du cuivre. Il convient également pour souder tous les matériaux soudables, à l'exception du plomb et du zinc, avec tous les types de joints et dans toutes les positions de soudage. Cependant, le soudage TIG convient le mieux aux matériaux minces, d'environ 0,5 mm à environ 3 mm d'épaisseur. [28]

2.2.2 Equipements :

La source d'alimentation :

Il s'agit généralement d'un appareil de soudage TIG à courant continu (CC) ou à courant alternatif (AC) qui fournit l'énergie électrique nécessaire pour créer l'arc de soudage.

La torche :

Elle est équipée d'une électrode en tungstène et d'une buse de gaz pour protéger la zone de soudure de l'oxydation. La torche de soudage TIG peut être refroidie par air ou par eau, selon les besoins de l'application.

L'électrode en tungstène :

Les électrodes de tungstène ne sont pas consommées si le processus est correctement utilisé, car elles ne fondent pas ou ne se transfèrent pas à la soudure. Les classifications des électrodes de tungstène sont basées sur la composition chimique de l'électrode, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

AWS Classification	Color^a	Alloying Element	Alloying Oxide	Alloying Oxide%
EWP	Green	—	—	—
EWCe-2	Orange	Cerium	CeO ₂	2
EWLa-1	Black	Lanthanum	La ₂ O ₃	1
EWLa-1.5	Gold	Lanthanum	La ₂ O ₃	1.5
EWLa-2	Blue	Lanthanum	La ₂ O ₃	2
EWTh-1	Yellow	Thorium	ThO ₂	1
EWTh-2	Red	Thorium	ThO ₂	2
EWZr-1	Brown	Zirconium	ZrO ₂	0.25
EWG	Gray	Not Specified ^b	—	—

FIG. 2.3 : Classifications des électrodes de tungstène [29]

Ce tableau montre également le système d'identification des couleurs pour les différentes classes d'électrodes de tungstène. Les détails des exigences pour les électrodes de tungstène sont présentés dans la dernière édition de AWS A5.12, Spécifications pour les électrodes de tungstène et d'alliage de tungstène pour le soudage et la découpe à l'arc. [29]

Le gaz de protection :

Il est utilisé pour protéger la zone de soudure de l'oxydation et peut être de l'argon, de l'hélium ou un mélange des deux. La quantité de gaz de pro-

tection utilisée doit être réglée avec précision pour assurer une protection adéquate de la zone de soudure.

2.2.3 Effet de divers paramètres d'entrée sur les performances du TIG :

2.2.3.1 Effet de la hauteur de l'arc ou de la tension de l'arc sur le bain de fusion :

La longueur de l'arc en TIG est généralement de 2 à 5mm. Si la longueur de l'arc augmente, la tension nécessaire pour maintenir la stabilité de l'arc doit augmenter, mais l'apport de chaleur à la pièce diminue en raison des pertes par rayonnement de la colonne de l'arc. Cela entraîne une diminution de la pénétration de la soudure et de la section transversale de la matière fondue avec l'augmentation de la longueur de l'arc [30].

La figure 2.4 montre L'effet de la longueur d'arc sur la tension.

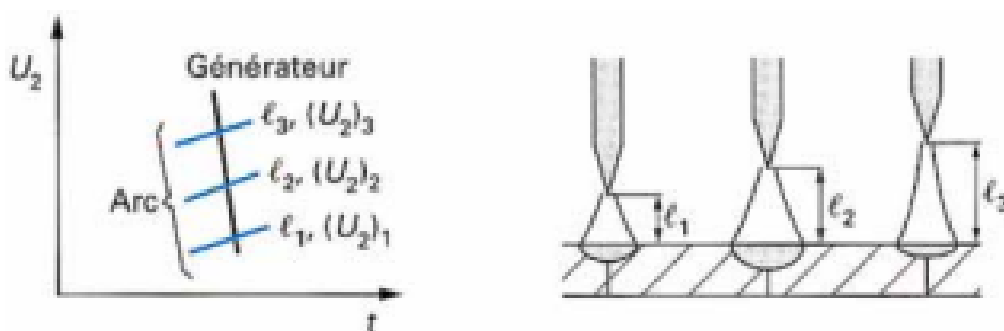


FIG. 2.4 : Effet de la longueur d'arc sur la tension [31]

2.2.3.2 Effet du courant de soudage et de la polarité :

Le courant de soudage est la variable la plus importante qui affecte le taux de fusion, le taux de dépôt, la profondeur de pénétration et la quantité de métal de base fondu. Si le courant est trop élevé, cela entraînera une pénétration excessive (les plaques plus minces fondent), une fusion excessive de l'électrode, un renfort excessif, une plus grande quantité de chaleur apportée aux plaques à joindre, ce qui entraînera une augmentation des distorsions. Si le courant de soudage est trop faible, cela entraînera une pénétration insuffisante et un manque de fusion. Le courant peut être en

courant continu (CC) ou en courant alternatif (AC). Le CC fournit un arc stable et un transfert de métal régulier, une bonne action de mouillage, une taille uniforme du cordon de soudure, particulièrement adapté pour le soudage de sections minces, et donne des soudures de meilleure qualité dans les positions de soudage verticales et en surplomb. [32]

La polarité :

Le processus TIG, ainsi que plusieurs autres processus de soudage à l'arc, peuvent être utilisés dans plusieurs modes de courant différents, y compris le courant continu (CC), avec l'électrode négative (EN) ou positive (EP), ou le courant alternatif (CA). Ces différents modes de courant ou de puissance donnent des caractéristiques d'arc et de soudure distinctes.

- **Électrode négative à courant continu (DCEN) :** Également appelée polarité directe, c'est la polarité la plus courante en TIG. L'électrode est connectée à la borne négative de l'alimentation électrique. Comme illustré dans la Figure 2.5, les électrons sont émis par l'électrode en tungstène et accélérés lors de leur déplacement dans l'arc. Une quantité significative d'énergie, appelée fonction de travail, est nécessaire pour émettre un électron de l'électrode. Lorsque l'électron entre dans la pièce à souder, une quantité d'énergie équivalente à la fonction de travail est libérée [27]. C'est pourquoi en TIG avec DCEN, plus de puissance (environ les deux tiers) est située à l'extrémité de travail de l'arc et moins (environ un tiers) à l'extrémité de l'électrode. Par conséquent, une soudure relativement étroite et profonde est produite mais avec une contribution de chaleur plus élevée à la pièce. [30]
- **Électrode positive à courant continu (DCEP) :** Également appelée polarité inversée. L'électrode est connectée à la borne positive de l'alimentation électrique. Comme illustré dans la Figure 2.5, l'effet de chauffage des électrons se situe désormais sur l'électrode en tungstène plutôt que sur la pièce à souder. Par conséquent, une soudure peu profonde est produite. De plus, des électrodes à gros diamètre refroidies par eau doivent être utilisées afin d'éviter que l'extrémité de l'électrode ne fonde. Les ions positifs du gaz de protection bombardent la pièce à souder, comme illustré dans la Figure 2.5, en enlevant les films d'oxyde et produisant une surface de soudure propre. Par conséquent,

DCEP peut être utilisé pour souder des feuilles minces de matériaux forts formant de l'oxyde tels que l'aluminium et le magnésium, où une pénétration profonde n'est pas nécessaire.[30]

- Courant alternatif (AC) : une pénétration raisonnablement bonne et une action de nettoyage de l'oxyde peuvent être obtenues, comme illustré dans la Figure 2.5. C'est souvent utilisé pour souder des alliages d'aluminium.

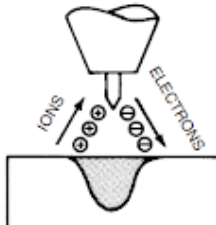
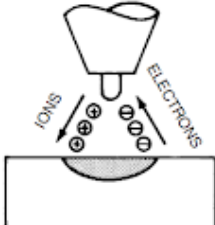
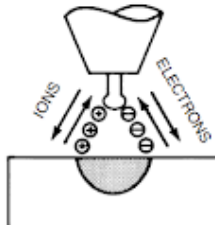
CURRENT TYPE	DCEN	DCEP	AC (BALANCED)
ELECTRODE POLARITY	NEGATIVE	POSITIVE	
ELECTRON AND ION FLOW			
PENETRATION CHARACTERISTICS			
OXIDE CLEANING ACTION	NO	YES	YES—ONCE EVERY HALF CYCLE
HEAT BALANCE IN THE ARC (APPROX.)	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END
PENETRATION	DEEP; NARROW	SHALLOW; WIDE	MEDIUM
ELECTRODE CAPACITY	EXCELLENT e.g., 3.2 mm (1/8 in.) 400 A	POOR e.g., 6.4 mm (1/4 in.) 120 A	GOOD e.g., 3.2 mm (1/8 in.) 225 A

FIG. 2.5 : Les trois types de polarité [29]

Le courant pulsé :

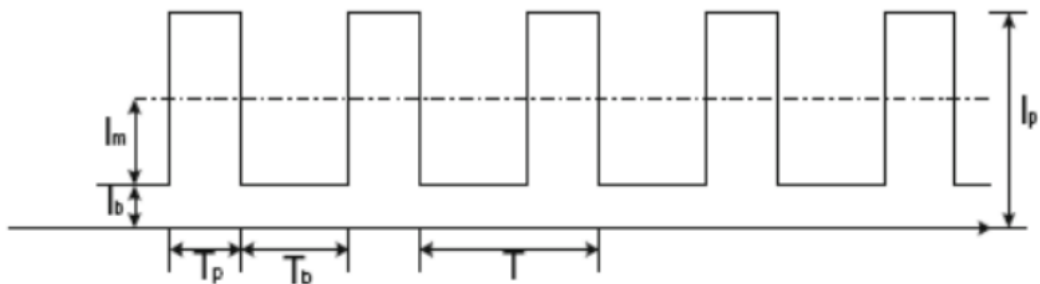


FIG. 2.6 : Principe du courant pulsé sur le TIG [33]

Le courant pulsé est défini par :

- I_p : Courant de pic en A ;
- I_b : Courant bas en A ;
- T_p : Temps de passage en courant haut (en ms) ;

- T : Période qui est égale au T_p+T_b
- La fréquence de pulsation (en Hz).

L'énergie mise en jeu en courant pulsé est définie par (figure 2.6) [33] :

$$E = (I_m \times V \times \eta) / S$$

Avec :

- V : Tension de soudage (en V) ;
- S : Vitesse de soudage (en mm/s) ;
- η : Rendement de l'arc ;
- I_m : Intensité moyenne de soudage (en A) qui est égale :

$$I_m = [I_p \times T_p + I_b \times T_b] / [T_p + T_b]$$

2.2.3.3 Effet de la vitesse de soudage :

Pour une même quantité d'énergie, l'augmentation de la vitesse de soudage entraîne une réduction de l'apport de chaleur. Le champ électromagnétique et la pression de l'arc ont moins d'influence sur le changement de vitesse de soudage car ils dépendent du courant. L'augmentation de la vitesse de soudage entraîne une diminution de la section transversale de la soudure, par conséquent la profondeur de pénétration et la largeur de la soudure diminuent également [34]. Cela montre que la vitesse de déplacement influence les mécanismes impliqués dans la formation du bain de fusion, mais elle a une influence sur le volume de matière fondue. Les vitesses de soudage normalement utilisées sont comprises entre 100 et 500 mm/min en fonction du courant, du type de matériau et de l'épaisseur du matériau [35].

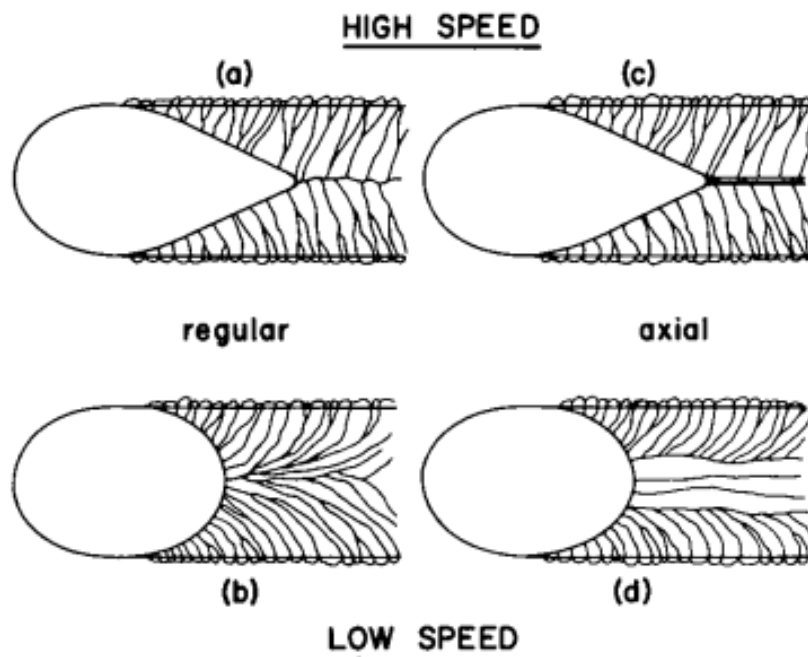


FIG. 2.7 : Effet de la vitesse de soudage sur la structure dans le métal soudé [27]

La figure 2.7 montre que le bain de fusion devient en forme de goutte d'eau à des vitesses de soudage élevées et elliptique à des vitesses de soudage faibles. Comme la limite arrière d'un bain de fusion en forme de goutte d'eau est essentiellement droite, les grains colonnaires sont également essentiellement droits afin de croître perpendiculairement à la limite du bain, comme le montre schématiquement la Figure 2.7 (a). D'autre part, comme la limite arrière d'un bain de fusion elliptique est courbée, les grains colonnaires sont également courbés afin de croître perpendiculairement à la limite du bain, comme le montre la Figure 2.7 (b). [27]

2.2.3.4 Effet du diamètre de l'électrode, de la préparation et de la contamination :

Les électrodes de tungstène avec 2% de cérium ou de thorium ont une meilleure émissivité électronique (capacité de la pointe de l'électrode à émettre des électrons), une capacité de transport de courant et une résistance à la contamination que les électrodes de tungstène pures. En conséquence, le démarrage de l'arc est plus facile et l'arc est plus stable [27]. La taille de l'électrode à utiliser est déterminée par le courant de soudage requis.

La figure 2.8 présente les intensités de courant recommandées pour différents diamètres d'électrodes en utilisant du gaz de protection argon. Des électrodes de plus petit diamètre peuvent être utilisées pour souder des matériaux plus minces ou en position décalée.

<i>Electrode diameter (mm)</i>	<i>Current (A)</i>
1.0	20-50
1.6	50-80
2.4	80-160
3.2	160-225
4.0	225-330
5.0	330-400
6.4	400-550

FIG. 2.8 : Diamètres d'électrode et intensités de courant recommandés en utilisant l'argon [36]

Les pointes de tungstène sont soit sphériques, soit meulées ou chimiquement affûtées lors de leur préparation. La méthode couramment utilisée est le meulage, qui doit être effectué avec l'axe de l'électrode perpendiculaire à l'axe de la meule. L'angle du sommet de l'électrode influence la profondeur de pénétration de la soudure et la forme de la soudure. Les angles d'électrode couramment utilisés varient entre 30° et 120° . On peut observer une pression d'arc accrue et une profondeur de pénétration pour les électrodes à petit angle avec une forte détérioration de la forme de la pointe. Les angles d'électrode de 60° à 120° maintiennent la forme de la pointe plus longtemps et produisent des soudures avec une pénétration et un rapport profondeur/largeur adéquats [35].

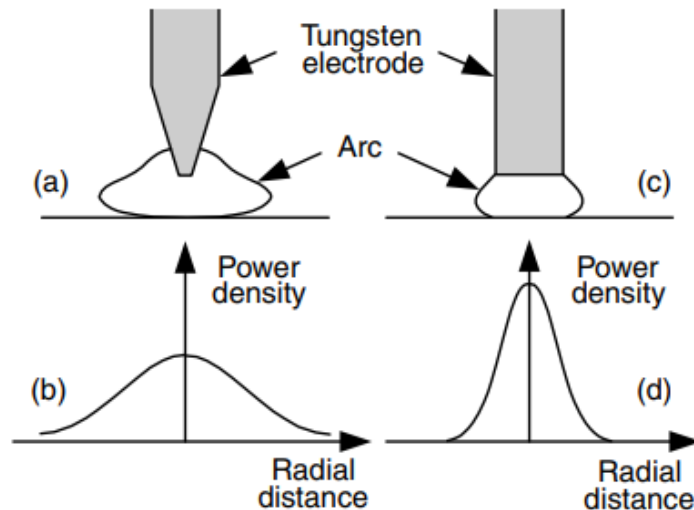


FIG. 2.9 : Effet de l'affûtage de l'électrode sur la forme et la distribution de la densité de puissance de l'arc [27]

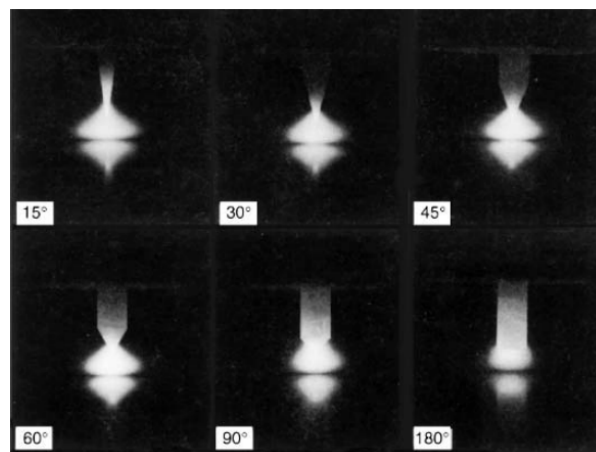


FIG. 2.10 : Effet de l'angle de pointe de l'électrode sur la forme de l'arc [27]

L'immersion accidentelle de la pointe de l'électrode dans le bain de fusion ou le contact du tungstène avec le métal d'apport sont les deux principales causes de contamination. En outre, en raison d'un gaz de protection inadéquat ou d'un débit de gaz insuffisant, l'électrode peut s'oxyder. La contamination peut provoquer des caractéristiques d'arc inadéquates et conduire à l'inclusion de tungstène dans le bain de fusion [37].

2.2.3.5 Effet du gaz de protection :

Les gaz de protection sont utilisés en TIG pour éviter la contamination atmosphérique et obtenir une meilleure stabilité de l'arc. La contamination dans la soudure peut produire de la porosité, des fissures de soudure, de

l'oxydation et même modifier la composition chimique. Les gaz à faible potentiel d'ionisation facilitent l'allumage de l'arc électrique et ceux à faible conductivité thermique tendent à augmenter la stabilité de l'arc.

<i>Gas</i>	<i>Chemical symbol</i>	<i>Molecular weight (g/mol)</i>	<i>Density (g/L)</i>	<i>Ionization potential (eV)</i>
Argon	<i>Ar</i>	39.95	1.784	15.7
Carbon dioxide	<i>CO₂</i>	44.01	1.978	14.4
Helium	<i>He</i>	4.00	0.178	24.5
Hydrogen	<i>H₂</i>	2.016	0.090	13.5
Nitrogen	<i>N₂</i>	28.01	1.25	14.5
Oxygen	<i>O₂</i>	32.00	1.43	13.2

FIG. 2.11 : Propriétés de protection gazeuse utilisées dans le soudage TIG [27]

La figure 2.11 présente les gaz typiquement utilisés comme protection dans le processus TIG. Le potentiel d'ionisation pour l'argon et l'hélium est respectivement de 15,7 et 24,5 eV (électron-volts). Comme il est plus facile d'ioniser l'argon que l'hélium, l'initiation de l'arc est plus facile et la chute de tension à travers l'arc est plus faible avec l'argon. De plus, comme l'argon est plus lourd que l'hélium, il offre une protection plus efficace que l'hélium. Avec le DCEP ou l'AC, l'argon a également une plus grande action de nettoyage des oxydes que l'hélium. Le coût inférieur rend également l'argon préférable à l'hélium pour le TIG [27] .

Nous avons vu que le choix d'un gaz n'est pas anodin, détaillons donc maintenant les particularités de chacun :

- L'argon : C'est le gaz le plus couramment utilisé en soudage TIG. Totalement inerte et relativement lourd, il assure une excellente protection du bain et de l'électrode. Par contre, la présence d'un film d'oxydes ou de dépôts de surface réduit son efficacité. Enfin, son faible potentiel d'ionisation facilite l'amorçage de l'arc et se traduit par une colonne d'arc plutôt conique. [38]
- L'hélium : Comme l'argon, l'hélium est chimiquement inerte mais a

une densité très faible. Il faut donc débiter trois fois plus d'hélium pour obtenir une protection équivalente à celle de l'argon, or son coût est supérieur. La facture gazeuse finale est quatre fois plus coûteuse qu'une soudure sous argon, ce qui explique sa faible utilisation en soudage TIG. De plus, son potentiel d'ionisation élevé conduit à un amorçage d'arc qui se révèle difficile mais les énergies incidentes sont plus importantes comparativement à l'argon et permettent d'éviter les défauts de fusion (voir Figure 2.12). Par conséquent, les vitesses de soudage associées sont plus élevées et peuvent compenser le surcoût d'utilisation de l'hélium. [38]

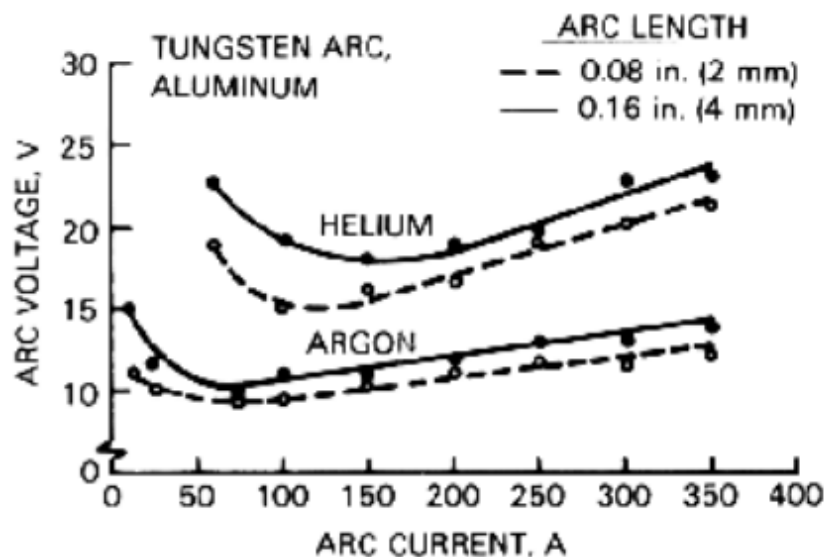


FIG. 2.12 : Evolution de la tension d'arc sous argon et sous hélium suivant l'intensité appliquée [38]

2.3 La soudabilité du TA6V :

Les alliages de titane sont facilement soudables en utilisant divers procédés [23]. Le bain de titane est fluide et mouillant, donnant, après soudure un aspect de cordon lisse dont les propriétés mécaniques et anticorrosives sont conservées en absence de pollution du bain. La fissuration à chaud ou à froid n'est pas à craindre [38,23]. Cependant, une bonne protection contre la contamination par les gaz de l'atmosphère (oxygène, azote, hydrogène) est indispensable car ils diffusent très rapidement dans l'alliage avec altération de ses propriétés mécaniques. Cette pollution atmosphérique fragilise et amoindrit la résistance à la corrosion[38,23]. Il s'ensuit

une attention toute particulière à la propreté des pièces à assembler ainsi qu'à la protection par gaz inerte. Ainsi le bain fondu, mais aussi les zones affectées thermiquement doivent être protégées tant que la température n'est pas descendue au-dessous de 430°C. Vis-à-vis de ce matériau, le soudage oxyacéthylnique, le soudage à l'électrode enrobée ou le soudage par arc submergé sont inapplicables. De même, le soudage du titane avec d'autres métaux n'est pas possible, de par la formation de composés intermétalliques fragilisants (à l'exception du zirconium, du tantale, du vanadium et du niobium). [23]

Dans le cas du soudage du titane commercialement pur, il n'y a pas de ségrégation des solutés et les risques de fissuration à chaud et à froid sont quasiment nuls. Les pertes de propriétés de résistance à la corrosion entre le cordon soudé et le métal de base ne sont pas mesurables, donc il n'y a pas besoin d'utiliser un métal d'apport de grade supérieur ou de réaliser des traitements thermiques après soudure pour éviter un déclassement de la résistance à la corrosion de la soudure (comme c'est le cas pour les aciers inoxydables ou les alliages de nickel). [23]

En ce qui concerne la soudabilité métallurgique, le TA6V est soudable avec précautions, du fait de la possibilité de transformations métallurgiques au soudage. [38,23]

La préparation des joints est également cruciale pour la soudabilité du titane. Les joints doivent être propres et exempts de contaminants tels que l'huile, la graisse et les oxydes [39].

2.3.1 Les procédés de soudage :

Les procédés T.I.G. (Tungsten Inert Gas), M.I.G. (Metal Inert Gas), le soudage plasma, le Faisceau d'Électrons et le laser sont couramment utilisés. Comme nous l'avons déjà dit, il faut assurer une protection du cordon de soudure et du métal adjacent jusqu'à ce que la température soit descendue sous 430°C afin d'éviter la contamination par l'air. Le soudage TIG ou MIG utilise de l'argon ou de l'hélium pour fournir une protection efficace qui se décompose en trois parties [23] :

- La protection primaire du lit de fusion (effectuée par la buse de la torche TIG) ;
- La protection secondaire du cordon de soudure refroidissant et de la Zone Affectée Thermiquement Z.A.T. (effectuée par un traînard de protection solidaire de la torche de soudage) ;
- La protection envers pour la face opposée de la soudure et de la Z.A.T. (traînard envers qui peut être mobile avec la torche) ;

Il arrive fréquemment que l'on réalise les soudures dans des boîtes à gants, zones hermétiquement fermées ou en surpression de gaz de protection, évitant les encombrants traînards. [23]

2.4 Les défauts de soudure du titane et ses alliages :

Les défauts de soudure du titane et ses alliages peuvent être attribués à plusieurs facteurs, notamment la contamination, la fissuration et les problèmes métallurgiques :

Contamination : La contamination par l'oxygène, l'azote et l'hydrogène est un problème majeur dans le soudage du titane. La contamination peut entraîner des soudures cassantes, une diminution des propriétés mécaniques et une décoloration de la zone affectée par la chaleur [39]. Les méthodes de

protection du gaz inerte, telles que le soudage TIG, sont essentielles pour minimiser la contamination.

Fissuration : La fissuration à chaud et la fissuration à froid peuvent survenir lors du soudage du titane et de ses alliages. Les fissures à chaud sont généralement causées par des contraintes résiduelles, des contraintes thermiques et des problèmes métallurgiques [28]. Les fissures à froid peuvent être dues à des contraintes résiduelles et à la présence d'hydrogène [40]. La préparation adéquate des joints et le contrôle du processus de soudage peuvent aider à prévenir la fissuration.

Problèmes métallurgiques : Les problèmes métallurgiques, tels que la formation d'alpha casé (un composé dur et cassant) et la modification des phases métalliques, peuvent affecter les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des soudures de titane et de ses alliages [22]. Un contrôle précis de la température, du temps de refroidissement et de la protection contre la contamination est essentiel pour minimiser ces problèmes métallurgiques [39].

Porosité : La porosité dans les soudures de titane peut résulter de l'inclusion de gaz, principalement l'hydrogène, dans le bain de fusion[28]. Le contrôle de l'atmosphère de soudage et l'utilisation de gaz de protection inerte approprié peuvent aider à réduire la porosité.

Inclusions : Les inclusions de matériaux étrangers dans les soudures de titane peuvent entraîner une diminution des propriétés mécaniques et une augmentation du risque de fissuration[40]. La préparation adéquate des joints et la propreté des surfaces de soudage sont cruciales pour minimiser les inclusions.

En somme, la soudabilité du titane et de ses alliages et la prévention des défauts de soudure dépendent principalement d'un contrôle minutieux des conditions de soudage, de la propreté des surfaces à souder et de la protection contre la contamination. En respectant ces principes, il est possible d'obtenir des soudures de haute qualité pour le titane et ses alliages dans diverses applications industrielles.

2.5 Zones caractéristiques lors du soudage de l'alliage TA6V :

Selon l'épaisseur des pièces à souder, le soudage nécessite parfois d'être réalisé en plusieurs fois. Il s'agit du soudage multipasse où le cordon de soudure est effectué par passages successifs de la torche, créant ainsi un empilement de métal jusqu'à atteindre l'épaisseur souhaitée. Quel que soit le type d'assemblage ou le procédé considéré utilisant la fusion des pièces métalliques, la structure d'une soudure typique d'un alliage TA6V est composée de 5 zones principales [41] :

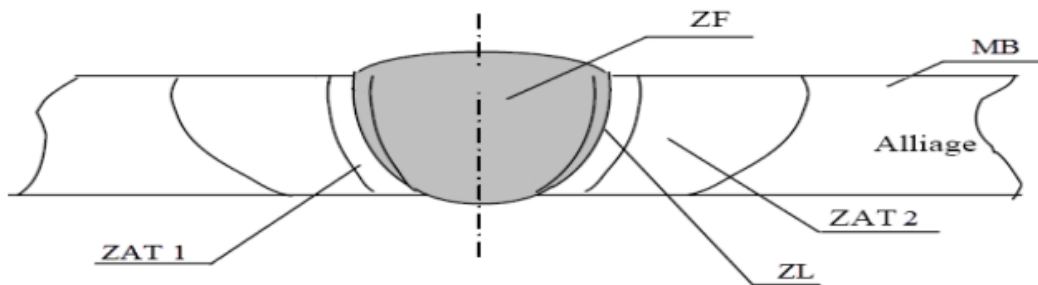


FIG. 2.13 : Zones caractéristiques lors du soudage du TA6V [22]

Les différentes zones présentées ont dans notre cas les caractéristiques observées en (Figure 2.13), à savoir :

- La Zone Fondue (Z.F) : Est où la température est supérieure au solidus du TA6V. Cette zone est séparée de la Zone Affectée Thermiquement par la ligne de fusion.
- La Zone Affectée Thermiquement (Z.A.T) : Pour l'alliage de titane TA6V, elle se décompose en deux parties :
 - Une 1ère zone affectée thermiquement (Z.A.T 1) correspondant au matériau qui a vu une température maximale conduisant à une structure monophasée β (température variant de la température de transus $T\beta$ jusqu'à la température de fusion).
 - Une 2ème zone affectée thermiquement (Z.A.T 2) correspondant au matériau dont la température n'a pas dépassé la température de transus $T\beta$ dynamique ; qui est donc restée biphasée au cours du chauffage.

- Le Métal de Base (M.B) : Cette partie de la structure soudée est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. Le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de retreint imposé à la soudure [42].

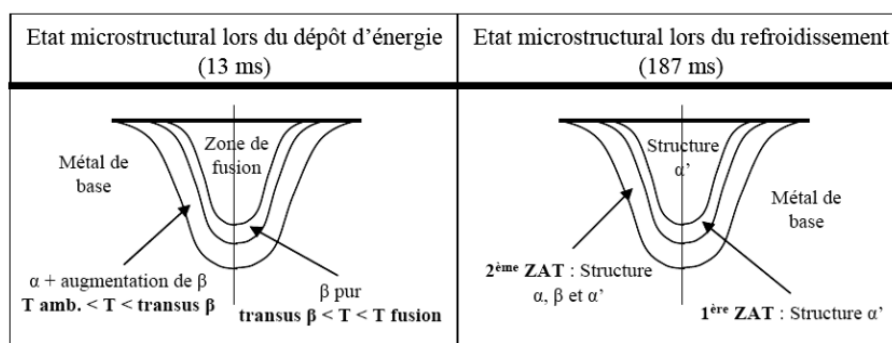


FIG. 2.14 : Analyse d'un cordon de soudure de TA6V pendant le soudage [23]

2.6 Evaluation préliminaire de la qualité d'une soudure :

La section IX du code ASME, intitulée "Boiler and pressure vessels" (Chaudières et récipients sous pression), spécifie les procédures et les résultats requis pour la fabrication de récipients sous pression. Elle met l'accent sur les tests de pliage pour identifier les éventuels problèmes de ductilité des joints soudés. En effet, maintenir une bonne ductilité est essentiel pour garantir la qualité des assemblages. La couleur de la soudure peut servir d'indicateur de la qualité de la protection, reflétant le niveau d'oxydation de la surface. Des teintes de jonction en jaune ou en bleu clair sont généralement acceptables. Cependant, toute présence d'oxyde blanc indique que la soudure doit être retirée, car toute tentative de restauration ne pourrait pas compenser l'absorption irréversible d'oxygène et d'azote, empêchant ainsi d'obtenir une qualité de soudure adéquate. (voir figure 2.15)

Couleur de la soudure	Origine et traitement
Jaune paille clair	Oxydation de surface. Eliminer par un brossage avec une brosse métallique neuve à fil inox.
Jaune paille foncé	
Bleu clair	
Bleu foncé	Contamination du métal. La soudure doit être entièrement éliminée et refaite après correction des protections gazeuses.
Gris bleu	
Gris	
Blanc (dépôt poudreux)	

FIG. 2.15 : Indicateur de la soudure [23]

Chapitre 3

Matériaux et techniques expérimentales

Il est essentiel de mettre en place des techniques expérimentales appropriées afin d'étudier les propriétés de soudabilité de l'alliage TA6V. Ce chapitre se concentre sur les différentes techniques expérimentales utilisées dans cette étude, ainsi que le matériel associé. Une description détaillée des procédures expérimentales et des équipements utilisés est fournie pour garantir la reproductibilité des résultats.

3.1 Matériau étudié

L'alliage de Titane utilisé pour le soudage est de nuance TA6V, les tôles à des épaisseurs de (1-2 mm) et de composition chimique moyenne présentée sur le (Tableau 3.1).

Elément	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Wt.%	5.5 – 6.75	3.5 – 4.5	< 0.3	< 0.2	< 0.08	< 0.05	< 0.015	Balance

TAB 3.1 : Composition chimique d'alliage de titane TA6V utilisé

3.2 Equipements du poste soudage TIG

Les procédures expérimentales sont entièrement conçues, réalisées et mises au point à l'atelier de soudage du CRTI dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cet équipement est présentée dans la Figure 3.1 .



FIG. 3.1 : Poste de soudage TIG Dynasty 350 (CRTI)

Ce type de poste TIG est un équipement de soudage de pointe doté d'une technologie innovante qui offre de nombreuses fonctionnalités avancées pour améliorer la productivité et la qualité du soudage. Il est capable de réaliser différents types de soudage, dont le soudage TIG (GTAW) et le soudage à l'électrode enrobée (SMAW). Il peut être utilisé avec une gamme de matériaux. Ce poste intègre plusieurs technologies de pointe pour améliorer la qualité du soudage. Par exemple, la technologie AC Auto-Balance de Miller ajuste automatiquement le temps de soudage en mode alternatif pour une pénétration optimale et un nettoyage des soudures. De plus, l'option Blue Lightning garantit un allumage stable de l'arc, même avec des longueurs de câble plus longues ou des électrodes de tungstène de différentes tailles. L'interface utilisateur est facile à utiliser et permet aux opérateurs de sélectionner rapidement les paramètres de soudage, tels que le courant de soudage, la fréquence et le type de courant (alternatif ou continu).

3.3 Préparation des éprouvettes

3.3.1 Nettoyage de la surface

Le nettoyage de surface est une étape cruciale de la préparation des éprouvettes à souder. Il s'agit d'éliminer tout contaminant potentiel de la surface de l'éprouvette, comme de la saleté, de la graisse, de l'huile, de l'oxyde ou de la rouille par un décapage mécanique en utilisant une brosse métallique et par ponçage en utilisant un papier verre. Après on utilise l'acétone qui est particulièrement efficace pour éliminer tous les contaminants qui pourraient interférer avec le processus de soudage. De plus l'acétone s'évapore rapidement et ne laisse pas de résidu, ce qui est un avantage pour les applications de soudage.

3.3.2 Le bridage

Dans le cas de soudage du titane cette étape est primordiale, car pendant le soudage les phénomènes de dilatations et retraits provoquent des déformations des tôles (figure 3.2).

La figure présente un bridage pour un soudage bout à bout.

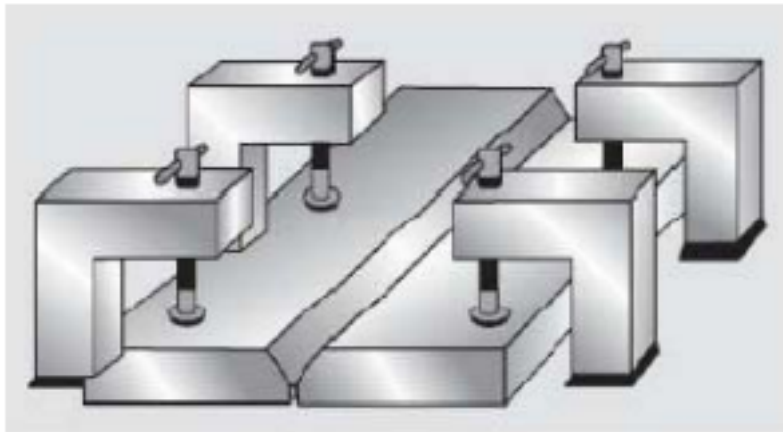


FIG. 3.2 : Bridage

3.4 Opération de soudage

Cette opération est réalisée sur plusieurs épreuves avant de réussir la soudure sur l'alliage TA6V. En effet, on a utilisé un diffuseur à tamis qui

est un accessoire qui assure un écoulement homogène du gaz et protège mieux l'électrode et le bain de fusion, et on a réalisé un système de protection à l'envers des pièces pour assurer une bonne qualité de soudage.

Dans notre étude nous avons pris le soin de faire des essais préliminaires afin d'optimiser les paramètres de soudage selon les résultats obtenus, cependant les difficultés auxquelles nous avons été confrontés au départ ont été de comprendre le comportement de ce matériau au soudage et le choix final des paramètres de soudage adéquats.

En effet, plusieurs paramètres sont testés à savoir :

- Deux types de gaz : Argon pur et argon industriel.
- Intensité et type du courant utilisé : Continu et pulsé.

Quant à la vitesse de soudage qui fait aussi partie des paramètres influents, il nous est difficile d'apprécier son influence pour la simple raison que sa mesure est sujette à des erreurs expérimentales dues à l'imprécision de l'opérateur.

3.5 Préparation métallographique

3.5.1 Enrobage et polissage

Après l'enrobage (à chaud sous pression ou à froid avec une résine époxy), des abrasifs de différentes granulométries sont employés : 800, 1000, 1200, 2400, 4000.

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 0,5 et 03 μm .



FIG. 3.3 : Polisseuse (CRTI)

Le polissage est effectué au niveau du laboratoire du CRTI.

3.5.2 Attaque chimique

L'objectif de l'attaque chimique est de révéler la structure de notre matériau.

La surface d'un échantillon de titane bien poli peut être observée sans attaque en lumière polarisée. Bien que le contraste ne soit pas très prononcé, cela permet d'effectuer une vérification générale, afin de déterminer si le polissage est suffisant.

Le réactif de Kroll est le réactif d'attaque le plus répandu pour le titane :

- 100 ml d'eau.
- (1-3 ml) d'acide hydrofluorique.
- (2-6 ml) d'acide nitrique.

La concentration peut varier en fonction de l'alliage et peut être ajustée individuellement. Le réactif de Kroll colore la phase β en brun foncé. Dans notre cas, on a utilisé 85 ml d'eau distillée, 1 ml d'acide nitrique et 5 ml d'acide hydrofluorique.

3.6 Macroscopie

Pour pouvoir apercevoir les différentes zones du soudage, mesurer leurs tailles et les délimiter, un passage au microscope est nécessaire pour nos différents échantillons. La figure 3.4 est une photo de l'équipement utilisé.



FIG. 3.4 : Macroscopie (CRTI)

3.7 Microscope optique

Le microscope optique utilisé dans le laboratoire de métallurgie au niveau du CRTI, il est de type : Zeiss de différents agrandissements X50, X100, X200, X500, X1000 (Figure 3.5), doté d'une caméra CCD avec utilisation d'un logiciel ATLAS de traitement d'images.



FIG. 3.5 : Microscope optique (CRTI)

Il est souvent utilisé pour étudier la microstructure des métaux à des échelles relativement grossières. Il peut révéler des caractéristiques telles que la taille du grain, la présence de différentes phases, les inclusions, les défauts, etc.

L'échantillon doit être correctement préparé, souvent par polissage et parfois par attaque chimique, pour révéler sa structure.

3.8 Test de traction

Le test de traction est un essai de caractérisation mécanique qui permet de déterminer les propriétés élasto-plastiques d'un matériau (module d'Young, coefficient de poisson, limite d'élasticité, résistance mécanique, ...). Les éprouvettes de traction (figure 3.6) sont extraites d'échantillons soudés dans le sens transversal au soudage avec les dimensions qui suivent la norme ASTM E8M de sorte que la soudure se trouve au centre de la partie calibrée. Notons que certaines éprouvettes ont été découpées avec des dimensions sous forme rectangulaire qui ne suivent pas de norme particulière.

Trois éprouvettes sont extraites de chaque soudure. Les tests de traction sont réalisés à température ambiante jusqu'à rupture.

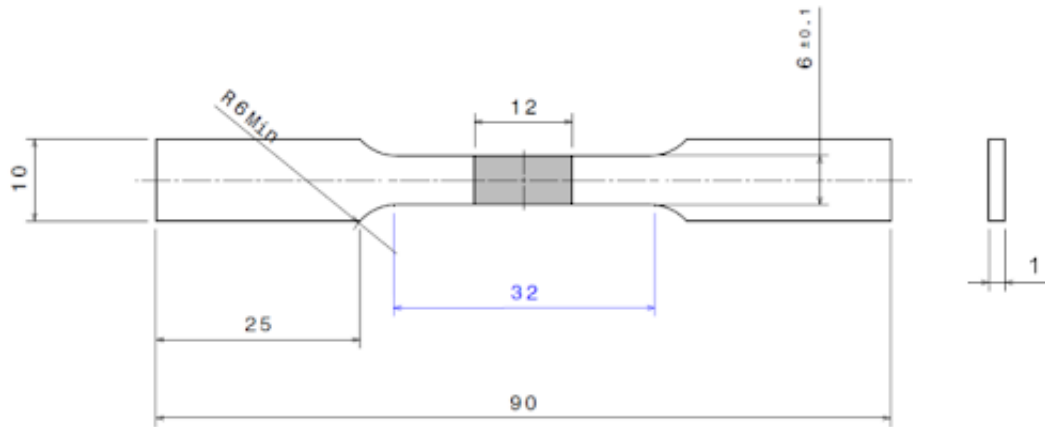


FIG. 3.6 : Epreuve de traction selon la norme ASTM E8M

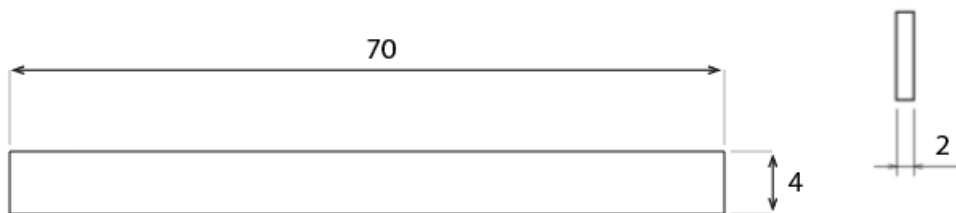


FIG. 3.7 : Epreuve de traction non normalisée

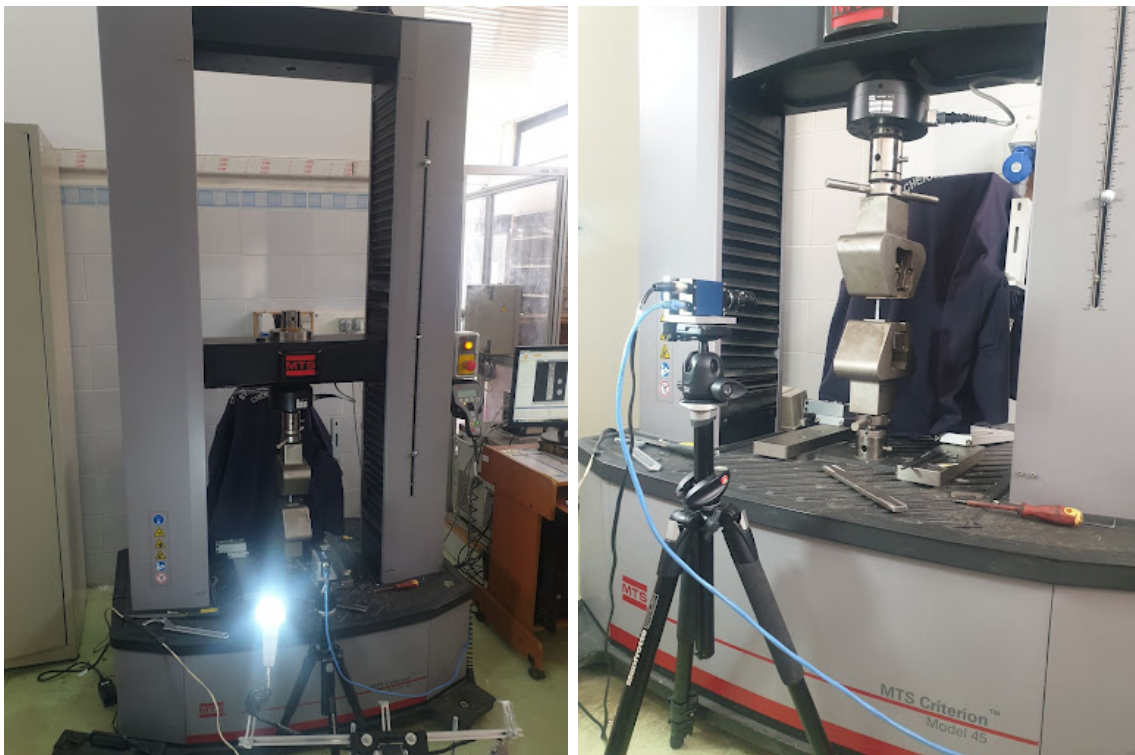


FIG. 3.8 : Machine de traction (CRTI)

L'essai de traction est effectué au niveau de l'atelier des essais mécaniques au sein du CRTI.

La machine de traction (figure 3.8) est équipée de deux mors dont l'un est mobile (le mors supérieur). Ce dernier est entraîné en translation à une vitesse constante jusqu'à la rupture de l'échantillon. La vitesse de déplacement du mors dans nos essais est égale à 0,5 mm/s. Le système d'acquisition de la machine permet d'obtenir la courbe d'évolution de la contrainte nominale en fonction de la déformation nominale.

3.9 Analyse par corrélation d'images numérique CIN

La corrélation d'image numérique (CIN) est une méthode optique sans contact pour la mesure de la similarité et la ressemblance entre deux images, en l'occurrence pour un essai de traction, elle nous permettra de faire une mesure relativement précise du déplacement et de la déformation. Un CIN bidimensionnel (2D-CIN) a été proposé pour mesurer la déformation des échantillons plans 2D par une caméra monoculaire. La surface photographiée est recouverte de motifs fins de mouchetures artificielles à contraste élevé requis obtenus en pulvérisant des points de peinture noire sur la surface entièrement recouverte de peinture blanche. Cette technique nécessite une caméra pour capturer des images et une source de lumière pour éclairer l'échantillon. L'appareil photo est monté sur un trépied pour capturer les images, l'éprouvette est montée sur n'importe quelle machine d'essai mécanique. La charge est appliquée graduellement sur l'échantillon et des images consécutives sont capturées à une certaine fréquence et ce à l'aide d'un appareil photo numérique pour détecter puis évaluer les changements surfaciques et comprendre le comportement du matériau en surface. Les images sont enregistrées dans l'ordinateur. La précision des mesures CIN dépend essentiellement du motif, de la qualité de l'image et des paramètres d'entrée pour le traitement des données. Une acquisition rapide des données est possible et convient pour détecter les déformations et les déplacements des régions élastiques aux régions plastiques.

La théorie fondamentale du CIN est basée sur le suivi de la variation planaire (2D) ou spatiale (3D) des valeurs de niveaux de gris (256 niveaux de gris) entre l'image d'origine et l'image déformée. Deux ensembles d'images ont été acquis par des caméras CCD. L'image avant la déformation s'ap-

pelle l'image de référence et après la déformation on parle d'image cible (figure 3.9). [43]

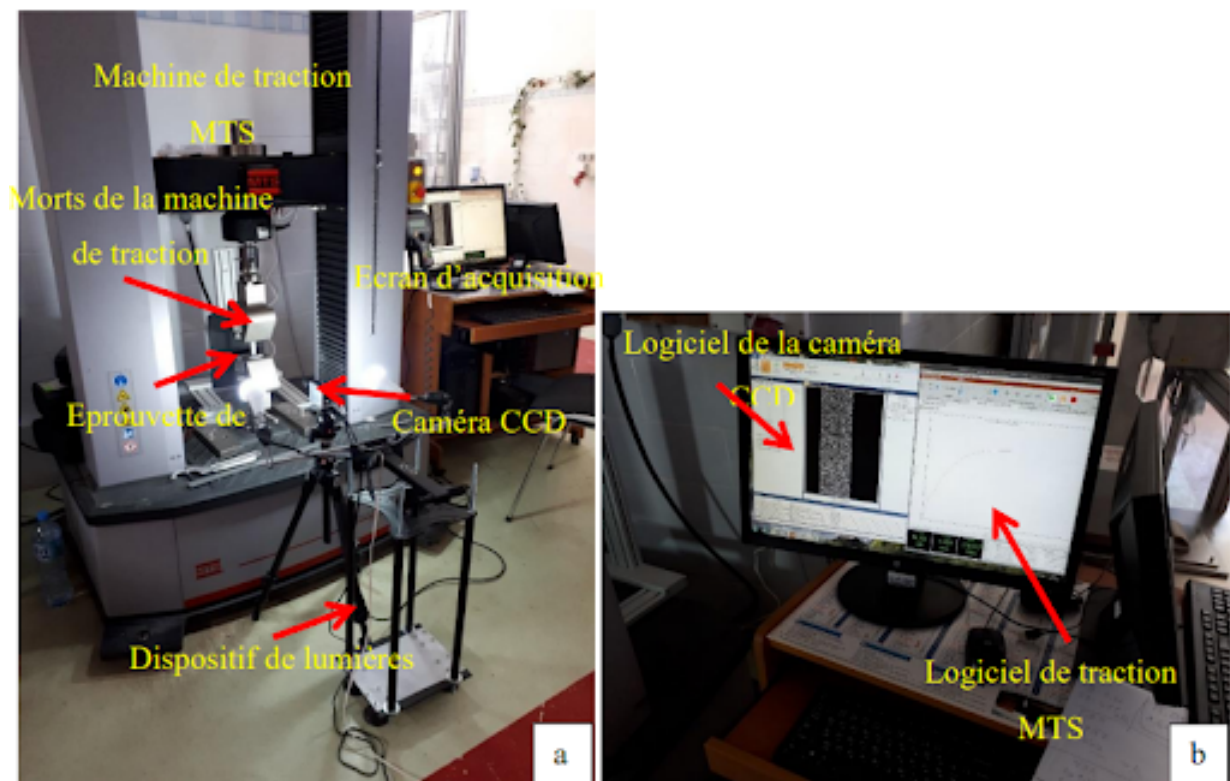


FIG. 3.9 : Images photos du dispositif CIN a) le dispositif complet b) écran d'acquisition

3.9.1 Mode opératoire pour l'obtention du mouchetis

L'obtention du mouchetis nécessite plusieurs outils, citons donc (Figure 3.10) :

- Les outils de protection (masque, tablier et gants) ;
- Papiers à verre 60 et 120 ;
- Un décapant ;
- Du papier absorbant servant à essuyer le décapant ;
- Peintures à aérosol (blanc mate, noire mate).



FIG. 3.10 : Outils nécessaires pour la réalisation du mouchetis

Les éprouvettes doivent être recouvertes d'un mouchetis afin de permettre un suivi par CIN. Ce mouchetis est effectué manuellement à l'aide de peintures blanches et noires mates.

Pour la réalisation de ce mouchetis nous avons procédé de la manière suivante :

Préparer la surface des éprouvettes par polissage dans un premier temps afin d'enlever toutes les peintures, graisses, des oxydes de titane formés ainsi que toutes rugosités et rainures générées lors de la découpe à jet d'eau pour éliminer tous risques d'initiation et propagation de fissures, qui pourraient fausser les résultats

. Un spray de décapant est ensuite nécessaire pour enlever la poussière du polissage et les impuretés pour une meilleure adhérence de la peinture.

Une fois l'éprouvette asséchée, une couche fine de peinture blanche mate est appliquée sur la surface qui nous intéresse pour la corrélation d'images numériques, tel que montré sur la figure 3.11 .



FIG. 3.11 : Epreuve revêtue en blanc

Une fois l'éprouvette séchée à l'air libre, on disposera notre éprouvette sur des feuilles blanches en masquant les mors comme montré sur la figure 3.12 .

Ainsi on arrive à la dernière étape décisive et la plus difficile qui est l'application du mouchetis sur la face blanche initialement préparée.

Après avoir bien agité la peinture à aérosol de couleur noire mate, pressez la gâchette de notre bombe aérosol progressivement le plus loin possible de l'éprouvette. Une fois la taille des gouttelettes souhaitée est obtenue et maîtrisant parfaitement la pression d'appui sur la gâchette on ramène progressivement le spray vers notre éprouvette. On maintient la pression jusqu'à l'obtention de la densité désirée (40-60% de noir dans le blanc) et de la distribution de manière la plus homogène possible (voir la figure 3.13).[33]

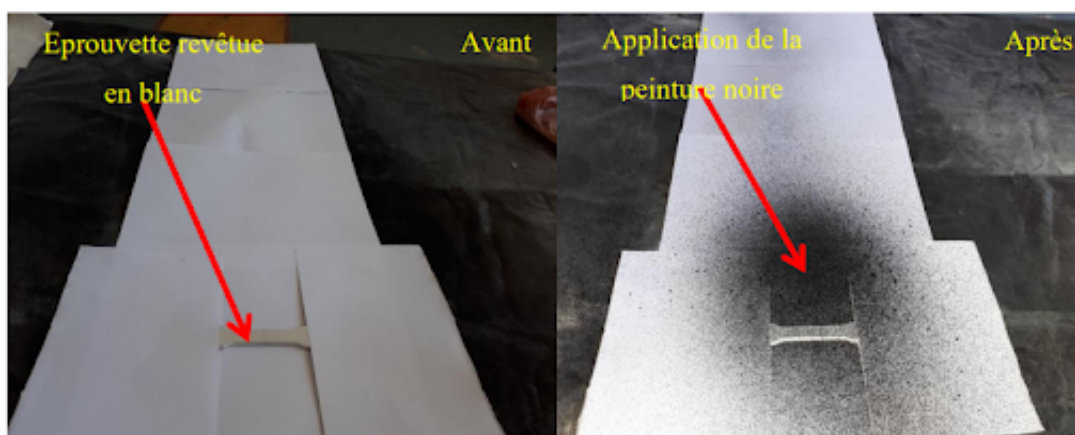


FIG. 3.12 : Technique de création du mouchetis (couleur noir)

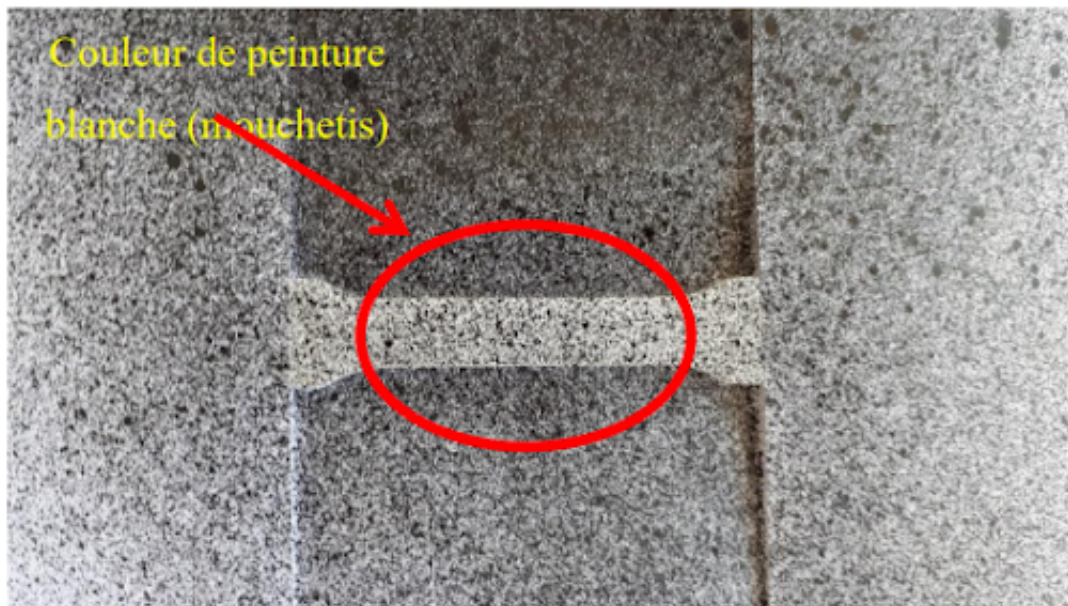


FIG. 3.13 : Taille et allure du mouchetis

Le traitement des données est réalisé par un logiciel de corrélation d'images numériques GOM Correlate dont les descriptions ainsi que les étapes sont données en annexes A.

3.10 Microdureté

La microdureté est l'une des propriétés mécaniques qui caractérisent les matériaux.

Elle exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée. Des mesures de microdureté sont réalisées dans le but de caractériser les propriétés mécaniques locales des alliages en lien avec les évolutions de microstructure.

On a réalisé une filiation longitudinale dans l'alliage TA6V sur toute la longueur de recouvrement des soudures .

Une machine automatique de microdureté HMV SHIMADZU, du laboratoire de sciences et génie des matériaux (LSGM) à l'USTHB, est utilisée. Les mesures consistent en des essais de dureté Vickers avec un indentateur en diamant. Des charges de 300g sont appliquées pendant 10 s. Le principe du test de microdureté est de mesurer les diagonales des empreintes laissées par un cône, et avec les trois charges. Le choix de la charge est en conformité avec la bibliographie.

Le choix de la charge et du temps d'appui est judicieusement fait de telle sorte à réduire la distance entre deux indentations et ainsi pouvoir détecter les variations locales de microstructure. La mesure de la microdureté VICKERS se fait par la mesure de la moyenne des diagonales, à l'aide de la formule suivante :

$$HV=1,8544 \cdot 10^3 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Tel que :

d : est la moyenne des diagonales en μm .

F : est la force appliquée en Kilo Newton.



FIG. 3.14 : Microduromètre vickers (USTHB)

3.11 Diffraction des Rayons X

Le test DRX est particulièrement utile pour étudier les effets du soudage sur la structure cristalline d'un matériau. Lorsque des soudures sont réalisées, les cycles thermiques impliqués peuvent induire des changements dans la structure cristalline, tels que la formation de phases indésirables, la modification de la taille des cristallites ou l'apparition de contraintes

résiduelles. En effectuant des tests DRX après le soudage, on peut évaluer ces changements et établir des corrélations entre les paramètres de soudage et les caractéristiques cristallographiques du matériau.

- Les rayons X sont produits par l'interaction d'électrons avec une cible métallique. Ces électrons sont émis par un filament chauffé par effet Joule. Ils sont accélérés par un champ électrique créé par une différence de potentiel entre une cathode constituée par le filament et une anode constituée par la cible (l'échantillon). Cette cible est refroidie par une circulation d'eau. Un faisceau de rayons X monochromatique et parallèle qui frappe un cristal est diffracté dans une direction donnée par chacune des familles des plans réticulaires à chaque fois que la condition ou loi de BRAGG est réalisée :

$$2d \sin \theta = n$$

Avec :

n : Ordre de la diffraction.

λ : Longueur d'onde du faisceau de rayon X.

d : Distance de deux plans réticulaires.

θ : Angle d'incidence des rayons X.

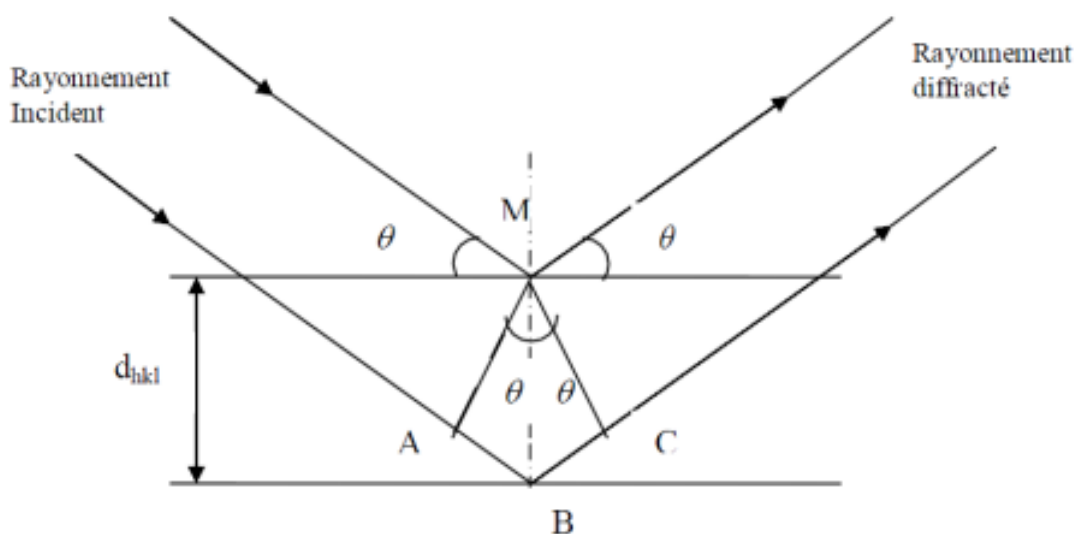


FIG. 3.15 : Principe de la loi de Bragg

Pour que la diffraction se produise, il faut que les ondes diffractées par les différents plans soient en phase, c'est-à-dire que la différence de marche des rayons rencontrant ces plans soit égale à un nombre entier. Dans ce cas, l'angle suivant lequel le faisceau de rayons X est dévié est égal à l'angle d'incidence θ et est caractéristique de la distance interplanaire ou inter-réticulaire d . Si l'on connaît la longueur d'onde du faisceau de rayons X, on peut mesurer à partir de l'angle θ l'équidistance d et ainsi identifier la structure du cristal.[44]

Pour effectuer le test DRX, on a utilisé le diffractomètre du plateau technique d'analyses physico-chimiques de l'USTHB.

Chapitre 4

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la caractérisation du matériau dont fait objet notre étude : l'alliage de titane TA6V. Nous allons pour ce faire commencer par une étude paramétrique comparative dans laquelle nous effectuerons plusieurs soudures en changeant à chaque fois les paramètres de soudage, nous ferons ensuite une caractérisation mécanique et métallurgique et finirons par une conclusion .

Il est utile de préciser que toutes les soudures ont été faites bout à bout ,et avec un métal d'apport de nuance AMS 4951.

4.2 Métal de base :

L'alliage de Titane utilisé pour le soudage est de nuance TA6V, les pièces à des épaisseurs de (1-2 mm) et de composition chimique moyenne présentée sur la figure 4.1 ci-dessous.

Elément	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Wt.%	5.5 – 6.75	3.5 – 4.5	< 0.3	< 0.2	< 0.08	< 0.05	< 0.015	Balance

FIG. 4.1 : Tableau présentant la composition chimique moyenne de TA6V

La microstructure de l'alliage est montrée sur la figure 4.2

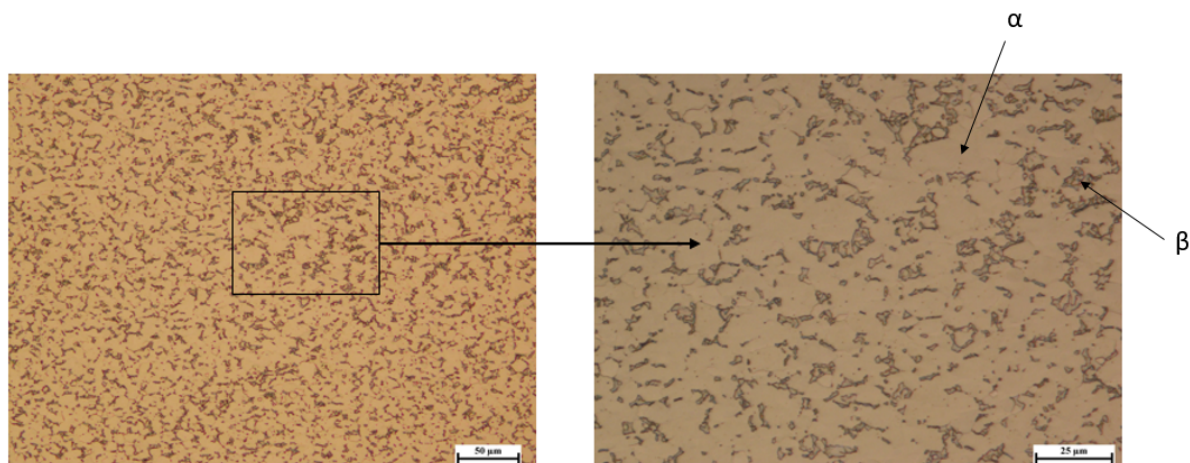


FIG. 4.2 : Microstructure du métal de base

La figure 4.2 montre la microstructure de l’alliage Ti-6Al-4V à l’état de réception. Ce dernier présente une microstructure équiaxe composée d’une matrice de phase α de couleur claire dans laquelle baignent des grains dispersés de la phase β de couleur plus foncée.

Le métal d’apport utilisé pour la passe de remplissage lors du soudage par procédé TIG est de nuance AMS 4951. Sa composition chimique est donnée dans le tableau ci-dessous.

TAB. 4.1 : Tableau récapitulatif de la composition chimique de l’alliage AMS 4951

Composition chimique				
Al 5.50 - 6.50%	V 3.50 - 4.50%	C 0.08%	N 0.05%	O 0.18% max
H 0.005% (50 ppm)	Fe 0.20%	Ti Balance		

4.3 Soudage :

4.3.1 Soudage d’alliage de titane TA6V de 1mm d’épaisseur avec un courant continu :

Au départ, nous avons réalisé une soudure préliminaire pour fixer les paramètres de soudage adéquats.

- **Soudure préliminaire :**

C'est une soudure à 2 passes dont l'intensité de courant de la première passe est plus élevée que la deuxième. La diminution de l'intensité dans la 2eme passe est relative à l'effondrement du bain de fusion lors de la réalisation de la première passe, ce qui engendre une diminution des vitesses de soudage pour assurer une bonne qualité de soudure.

Les paramètres de soudage de la soudure TIG avec courant continu sont présentés sur le tableau 4.2.

TAB. 4.2 : Les paramètres de soudage de la soudure TIG avec courant continu

	I (A)	U (Volts)	V (mm/s)	Débit de gaz (l/min)	E(J/mm)
1ere passe	45	11	2	15	173.25
2eme passe	38	10	1,5	15	177.33

La figure 4.3 montre la forme du cordon obtenu où on présente l'aspect du cordon sur la face endroit et la face envers. Selon, le sens du soudage, on constate l'élargissement du cordon au fur et à mesure du déplacement. Cette irrégularité que ce soit sur le dimensionnement du cordon ou de la forme des stries de solidification variables est relative au mode manuel et au facteur humain qui s'adapte aux comportements de l'alliage à l'apport thermique du soudage. On remarque aussi un manque de pénétration lors de la 1ere passe, cependant la pénétration lors de la 2eme passe est assez bonne. Cela est dû à la diminution de la vitesse de soudage.

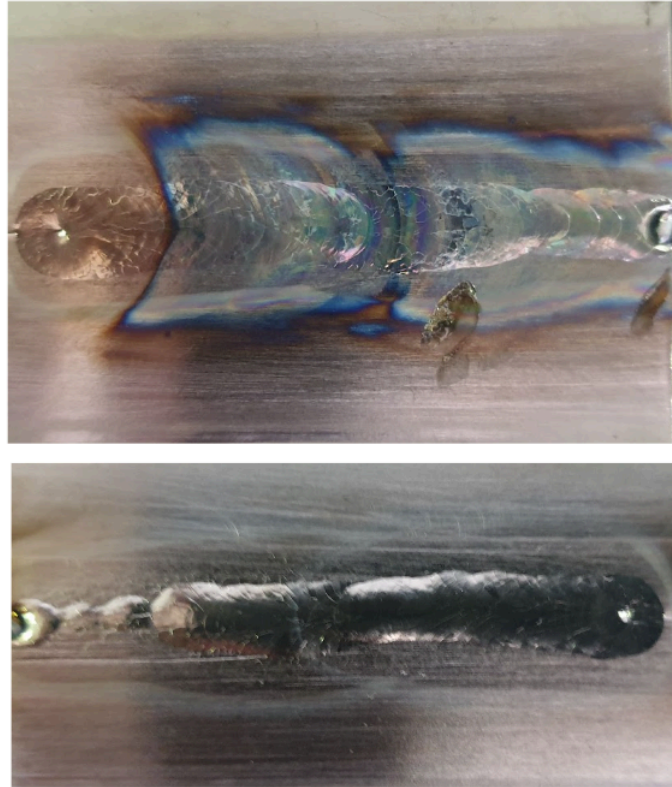


FIG. 4.3 : Echantillon 01 (soudure avec un courant continu)

En se référant aux paramètres de la 1ere soudure on a gardé les mêmes paramètres de la 2eme passe pour réaliser trois autres soudures en augmentant le débit du gaz jusqu'à 20 l/min pour assurer une bonne protection de la face endroit.

Les paramètres de soudage des soudure TIG de 1mm d'épaisseur avec courant continu sont donnés sur le tableau 4.3.

TAB. 4.3 : Les paramètres de soudage des soudure TIG de 1mm d'épaisseur avec courant continu

I (A)	U (Volts)	V (mm/s)	Débit de gaz (l/min)	E(J/mm)
38	11	1,8	20	162.55

Les figures 4.4 , 4.5 et 4.6 montrent :

- Une très bonne pénétration et un bel aspect de cordon pour l'échantillon 2.

- Un manque de pénétration dans certains endroits, et un élargissement irrégulier du cordon pour l'échantillon 3 et 4.
- Une meilleure protection de la face endroit, mais qui présente encore quelques endroits oxydés.

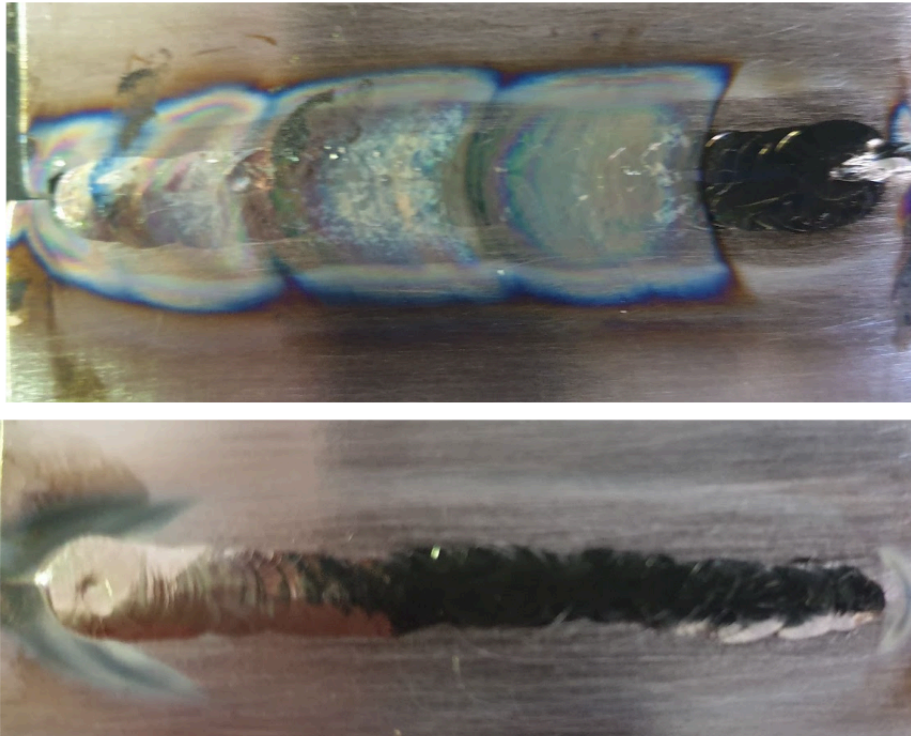


FIG. 4.4 : Echantillon 02 (soudure avec un courant continu)



FIG. 4.5 : Echantillon 03 (soudure avec un courant continu)

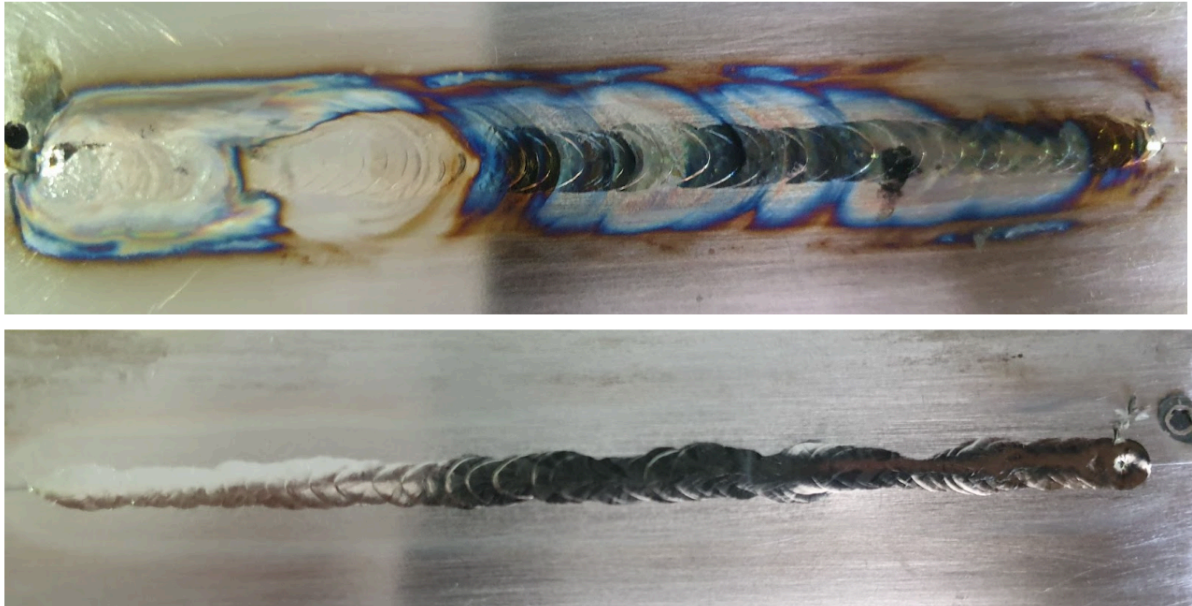


FIG. 4.6 : Echantillon 04 (soudure avec un courant continu)

4.3.2 Soudage d'alliage de titane TA6V de 2mm d'épaisseur avec un courant continu :

Nous avons constaté qu'il était nécessaire de souder les tôles de 2mm d'épaisseur des deux côtes, c'est-à-dire à la fois à l'endroit et à l'envers, à cause d'une absence de pénétration complète lors du soudage à l'endroit seulement. Et ce malgré le fait que nous avons augmenté l'intensité du courant par rapport à celle utilisée dans les soudures des tôles de 1 mm, absence de pénétration qui pourrait entraîner une faiblesse dans la jointure, rendant la structure moins résistante et plus susceptible de se rompre ou de se fissurer sous contrainte.

Cette absence de pénétration est probablement due à la faible intensité de courant appliquée. ou à la vitesse de soudage qui n'est pas adaptée à l'intensité du courant appliquée

Les figures 4.7 et 4.8 montrent l'aspect des cordons des soudures, on remarque toujours une mauvaise protection de l'endroit par rapport à l'envers du cordon qui est bien protégé.

Le gaz de protection se déplaçant avec la baguette et la température de fusion du titane étant très grande (estimée à 1668°C), la vitesse de refroidissement est toujours faible par rapport au déplacement du gaz de protection,

et donc quoi que l'on fasse, le joint de soudure aura toujours une aptitude à l'oxydation puisque le titane commence à s'oxyder à hautes températures à partir de 480°C et le refroidissement de 1668°C à 480°C prend trop de temps, empêchant ainsi le gaz de protection de faire son effet au bon moment car au moment où la température à l'endroit concerné redescend aux alentours de 500°C, le gaz se sera déjà éloigné de l'endroit en question. L'oxydation est donc quasi-systématique. Ajoutons à cela que la buse était un peu petite et ne garantissait pas toujours une bonne protection du cordon.

Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant continu sont donnés sur le tableau 4.4.

TAB. 4.4 : Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant continu

	I (A)	U (Volts)	V (mm/s)	Débit de gaz (l/min)	E(J/mm)
endroit	65	12	1,58	20	345.56
envers	65	12	1,39	20	392.8

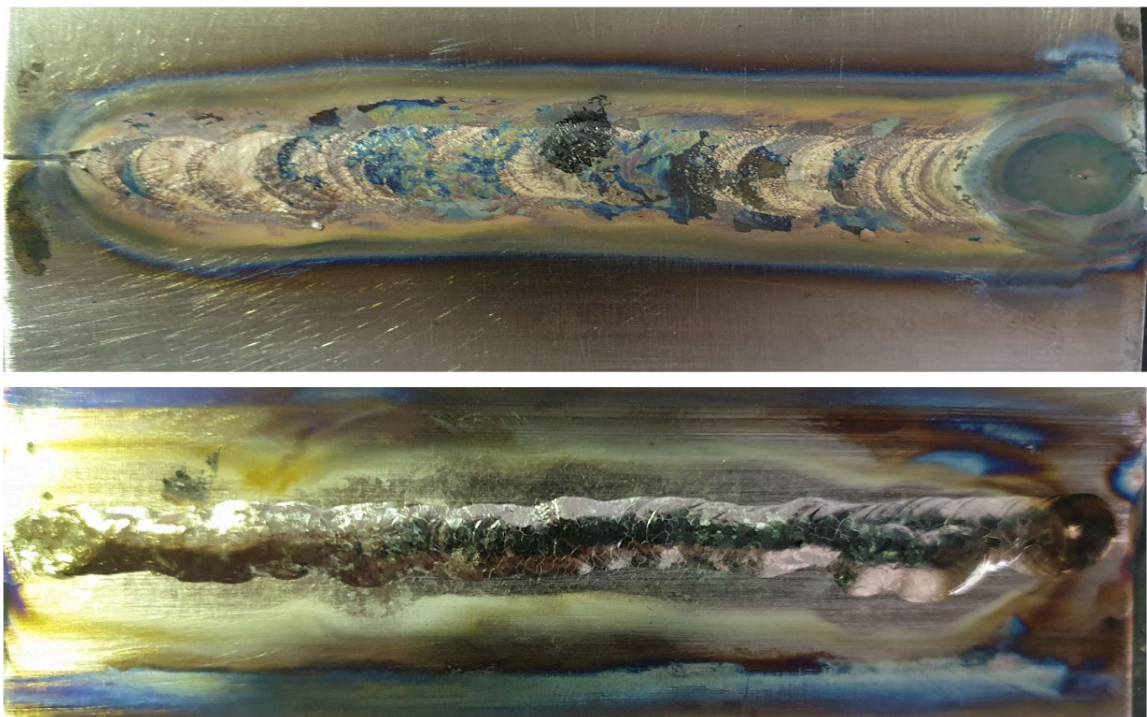


FIG. 4.7 : Echantillon 05 (soudure avec un courant continu)

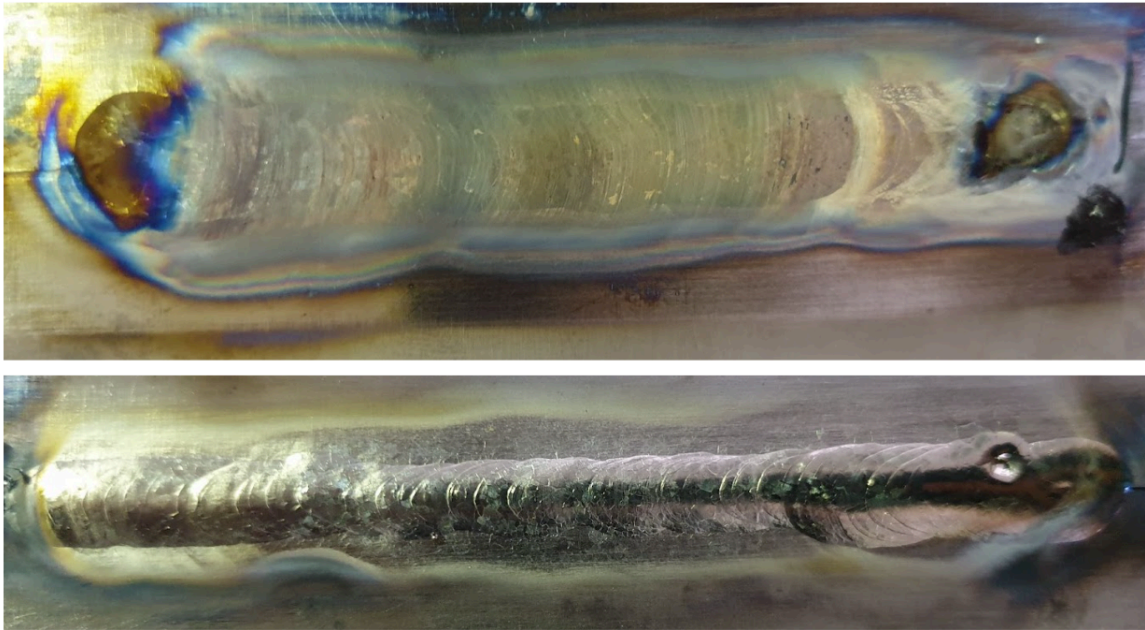


FIG. 4.8 : Echantillon O6 (soudure avec un courant continu)

4.3.3 Soudage d'alliage de titane TA6V de 2mm d'épaisseur avec un courant pulsé :

Une autre expérience de soudage de l'alliage TA6V a été menée en utilisant un courant pulsé.

Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant pulsé sont donnés sur le tableau 4.5.

TAB. 4.5 : Les paramètres de soudage des toles de 2 mm par procédé TIG avec courant pulsé

Im(A)	f (HZ)	Ip (A)	Ib (A)	U (volts)	V (mm/s)	E(J/mm)	Débit (l/min)
50	4	90	9	10	1,14	307.01	20

La figure 4.9 montre les résultats suivants :

- Une mauvaise protection de l'endroit due à un déplacement du gaz de protection trop rapide pour donner le temps au bain de fusion

de refroidir pour atteindre des températures où il ne risque plus de s'oxyder (comme expliqué plus haut dans le soudage avec courant continu).

- Un manque et une irrégularité de pénétration, en effet le manque de pénétration pourrait être dû à un mauvais choix des paramètres de soudage notamment de l'intensité du courant qui est peut être trop faible et la vitesse de soudage qui est peut être trop élevée.

Quant à l'irrégularité de la pénétration elle peut avoir plusieurs causes, par exemple ceci peut être dû à une préparation insuffisante de la pièce soudée, un mauvais nettoyage de la surface peut laisser de la rouille ou d'autres types de revêtements qui gêneraient la fusion et la pénétration. Elle peut aussi avoir pour cause un mouvement incorrect de l'électrode ou une vitesse de soudage irrégulière lors de la manipulation, un mouvement inadéquat ou irrégulier de l'électrode peut entraîner une instabilité de l'arc et une mauvaise fusion. Il est donc important de maintenir une distance et un angle constants entre l'électrode et la pièce tout en contrôlant le déplacement de l'électrode.

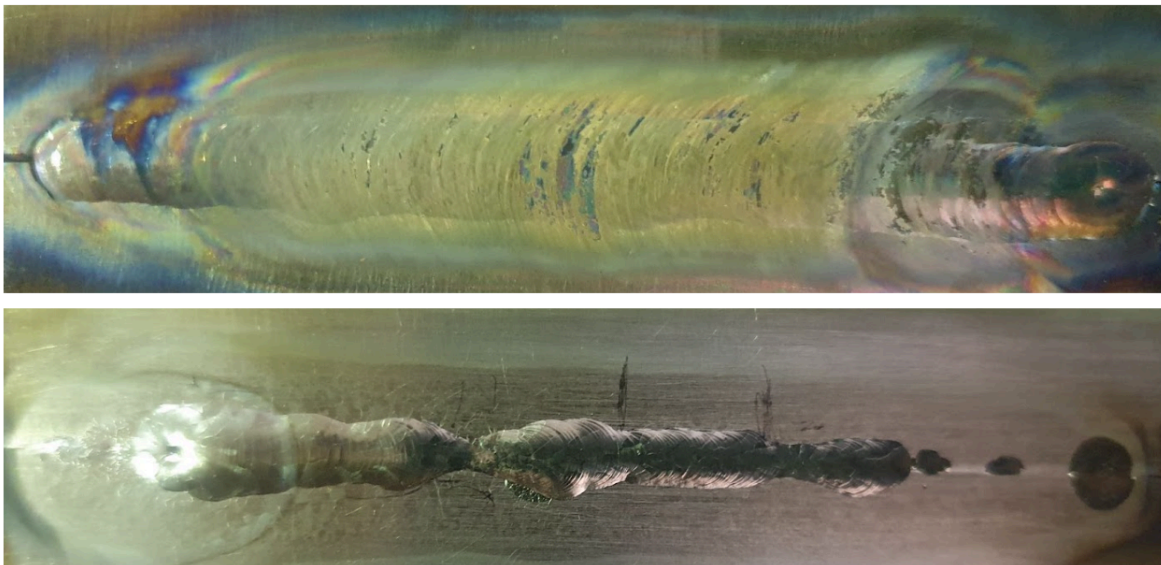


FIG. 4.9 : Echantillon 07 (soudure avec un courant pulsé)

4.4 Caractérisation métallurgique :

Dans cette section on va visualiser l'évolution des dimensions des différentes zones dans le cordon de soudure en fonction des paramètres de

soudage appliqués.

Lors de cette analyse on a effectué une coupe transversale au cordon de soudure pour deux échantillons de différents paramètres.

La figure 4.10 montre les dimensions des différentes zones rencontrées pour une soudure des tôles de 1 mm d'épaisseur avec un courant continu :

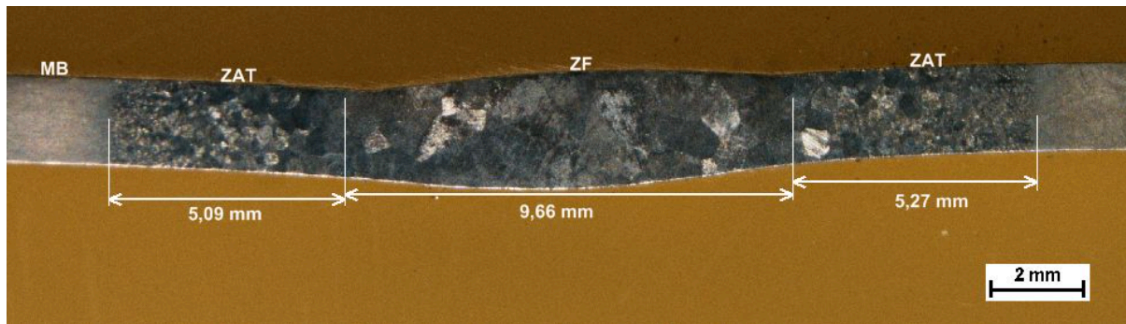


FIG. 4.10 : Macrographie d'une soudure avec un courant continu

On distingue trois zones différentes :

- Zone de fusion (ZF) de taille 9,66mm avec des grains de taille importante.
- Zone affectée thermiquement ZAT de largeur 5,27 et de 5,09mm avec un affinement de la taille des grains allant de la ZF jusqu'au métal de base.
- Métal de base (MB).

La figure 4.11 montre les dimensions des différentes zones rencontrées pour une soudure des tôles de 2 mm d'épaisseur faite avec un courant pulsé :

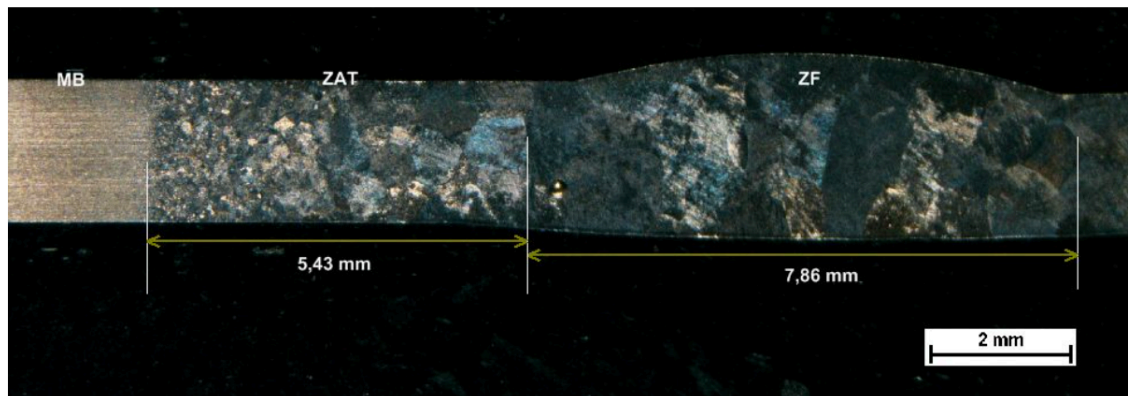


FIG. 4.11 : Macrographie d'une soudure avec un courant pulsé

On distingue les trois différentes zones : ZF de largeur 7,86 mm, ZAT de 5,43 mm et le métal de base MB.

On remarque que la taille de la ZF de la soudure avec un courant continu est plus grande par rapport à celle soudée avec un courant pulsé, et que la taille de la ZAT de la soudure avec un courant continu est faible par rapport à celle soudée avec un courant pulsé.

On remarque aussi un grossissement des grains plus importants dans la ZF de la soudure avec un courant pulsé.

Les figures 4.12 et 4.13 ci-dessous montrent les microstructures des différentes zones.

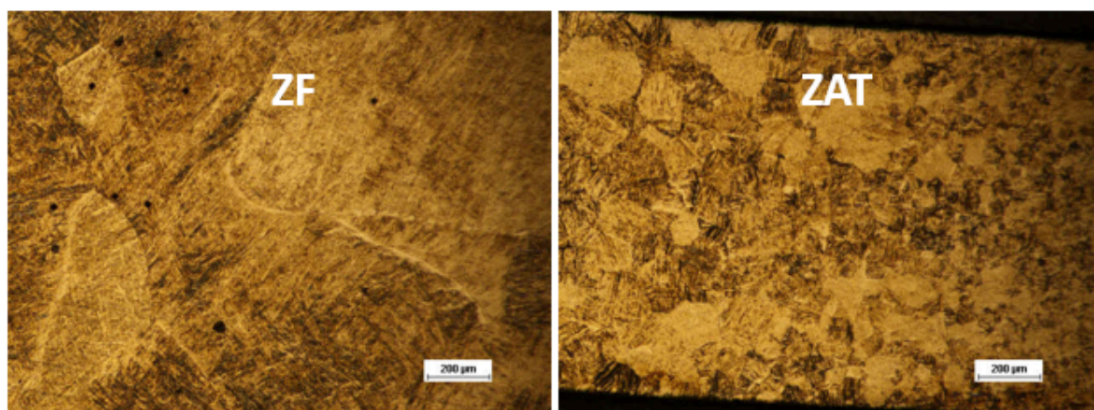


FIG. 4.12 : ZF et ZAT d'une soudure CC(1mm)

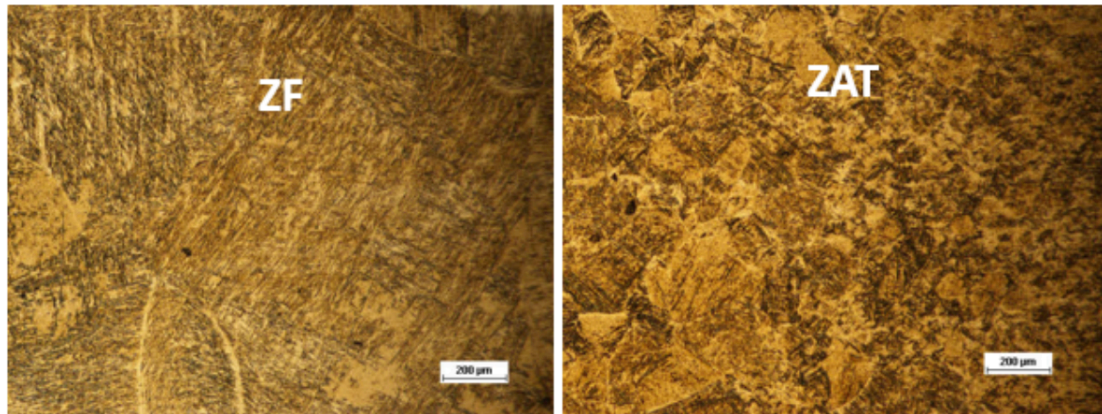


FIG. 4.13 : ZF et ZAT d'une soudure CP(2mm)

La structure de la ZF pour les deux soudures est très fine par rapport à celle du MB, composée de (α WI Widmanstätten + β r résiduelle + α GB grain boundary) + α' susceptible d'apparaître.

La zone affectée thermiquement ZAT se décompose en deux parties :

- ZAT1 : Est de structure (α WI Widmanstätten + β r résiduelle + α GB) + α' mais avec une proportion moins importante que ZF.
- ZAT2 : Constituée de phase (α WI Widmanstätten + β).

Afin de comparer le grossissement des grains de la ZAT dans les deux soudures, on a utilisé un logiciel de traitement d'images ImageJ qui nous a permis de calculer la surface des grains dans les zones affectées thermiquement des deux soudures.

les résultats sont montrés dans le tableau de la figure 4.14 :

ZAT CC			ZAT CP		
	Label	Area		Label	Area
1		10948.76	1		4133.604
2		17427.27	2		11951.98
3		17427.27	3		6066.48
4		4470.248	4		4111.886
5		9029.752	5		7492.61
6		4886.777	6		9715.056
7		6776.033	7		4777.896
8		12049.59	8		2692.996
9		14295.87	9		11944.74
10		16772.73	10		7231.997
11		7080.992	11		3112.872
12		4209.917	12		4908.202
13		7289.256	13		18090.85
14		5585.95	14		13696.64
15		5169.421	15		5899.978
16		6233.058	16		12813.45
17		6731.405	17		6254.7
18		7512.397	18		10395.54
19		10547.11	19	Mean	8071.749
20		12838.02	20	SD	4279.298
21	Mean	9364.091	21	Min	2692.996
22	SD	4420.958	22	Max	18090.85
23	Min	4209.917			
24	Max	17427.27			

FIG. 4.14 : surface des grains dans les zones affectées thermiquement des deux soudures

La moyenne de l'aire des grains dans la ZAT de la soudure avec un courant continu est de $9364.091 \mu m^2$ supérieure à celle de la soudure avec courant pulsé qui est de $8071.749 \mu m^2$. Cela peut être dû à la chaleur d'entrée qui a un impact direct sur la taille des grains dans la soudure. En général, plus la chaleur d'entrée est élevée, plus la taille des grains est grande. Cela est dû au fait qu'une chaleur d'entrée plus élevée peut entraîner une vitesse de refroidissement plus lente, ce qui donne plus de temps pour la croissance des grains. À l'inverse, une chaleur d'entrée plus faible peut entraîner une vitesse de refroidissement plus rapide, limitant ainsi la croissance des grains et conduisant à une taille de grains plus petite.

4.5 Essai de traction et analyse par corrélation d'images numérique :

Le prélèvement des éprouvettes a été effectué en suivant le schéma de la figure 3.6. Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes préalablement polies. La vitesse des essais est de 0.5 mm/min.

4.5.1 Essai de traction sur une tôle de 1mm d'épaisseur soudée par procédé TIG avec un courant continu :

On a réalisé l'essai de traction sur trois éprouvettes issues de la même soudure .

La figure 4.15 montre les courbes de traction des trois éprouvettes.

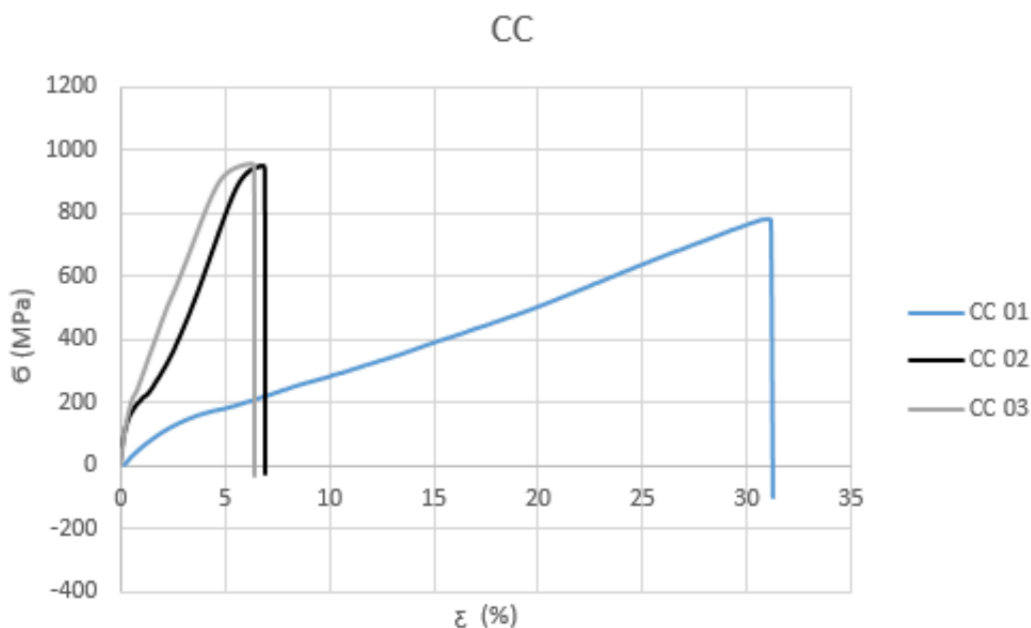


FIG. 4.15 : superposition des courbes de traction des trois éprouvettes

La résistance à la traction (R_m en MPa) ainsi que l'allongement (A %) des trois éprouvettes ont été mesurés et sont résumés dans le tableau suivant :

TAB. 4.6 : Propriétés mécaniques des éprouvettes d'une soudure avec un courant continu

	Rm(MPa)	A%	Re(MPa)	Zone de rupture
Éprouvette N°1	784.917	31.29	192.211	ZF
Éprouvette N°2	952.775	6.9	201.751	ZAT
Éprouvette N°3	956.049	6.38	231.914	ZAT
Éprouvette du Métal de Base	947.151	14-15	418.475	MB

On remarque aisément que la limite d'élasticité ainsi que l'allongement des éprouvettes N°2 et N°3 sont nettement inférieurs à ceux du métal de base, ceci est expliqué par une diminution de la ténacité et de la ductilité de notre matériau après soudage. Ceci peut être dû à plusieurs raisons, la chaleur intense appliquée à la zone de soudure et aux zones avoisinantes lors du soudage peut entraîner des changements microstructuraux. Dans la ZAT, des modifications telles que la recristallisation, la formation de zones de grains plus gros ou des changements de phase peuvent se produire. Ces modifications peuvent affaiblir les propriétés mécaniques, y compris la ténacité. En effet, lorsque des grains plus gros se forment dans la ZAT, ils peuvent présenter une structure cristalline moins homogène et plus irrégulière. Cette structure cristalline altérée peut réduire la capacité du matériau à absorber l'énergie de déformation plastique avant la rupture, ce qui entraîne une fragilité intergranulaire et une diminution de la ténacité. En d'autres termes, les grains plus gros sont souvent moins ductiles et plus fragiles.

Quant à la résistance à la traction, elle est pratiquement la même pour les deux éprouvettes N°2 et N°3, mais pour ce qui est de l'éprouvette N°1 on note une résistance à la traction inférieure par rapport aux deux autres. Cette différence peut être expliquée soit par des variations dans les paramètres du processus de soudage comme la vitesse de soudage, l'intensité du courant, la qualité du fil de soudage, et la compétence de l'opérateur qui peuvent tous entraîner des variations dans les propriétés de la soudure. Ou bien par des variations de microstructure d'un endroit à l'autre dans la même soudure due à une hétérogénéité du matériau, ce qui peut entraîner des variations de résistance à la traction. Ou encore par la manière dont les éprouvettes sont préparées pour les tests de traction, en effet si les éprouvettes ne sont pas parfaitement alignées dans la machine d'essai, cela peut entraîner une contrainte inégale et donc des résultats variables.

En outre, on observe que seule l'éprouvette N°1 présente une zone de rupture ZF comparée aux deux autres éprouvettes qui ont subi une rupture dans le MB , ceci est probablement dû à la présence de microporosités ou/et de microfissures dans l'éprouvette en question .

Il est à noter que la présence de défauts et la position de prélèvements des éprouvettes influent sur les résultats obtenus. De surcroît, le découpage peut provoquer des fissures qui n'ont pas été éliminées par polissage et dont la propagation peut par la suite être la cause de la rupture.

- **Analyse par corrélation d'images numérique :**

L'utilisation du logiciel GOM nous a permis de générer les champs de déformation des trois éprouvettes sous forme de nuances de couleurs représentant la répartition des déformations, en effet les couleurs s'étendent du bleu foncé qui représente l'absence de déformation au rouge foncé exprimant une déformation maximale en passant par le vert et le jaune qui représentent la transition entre les deux états extrêmes (déformation minimale, déformation maximale) comme le montre les figures :

– Epreuve 1 :

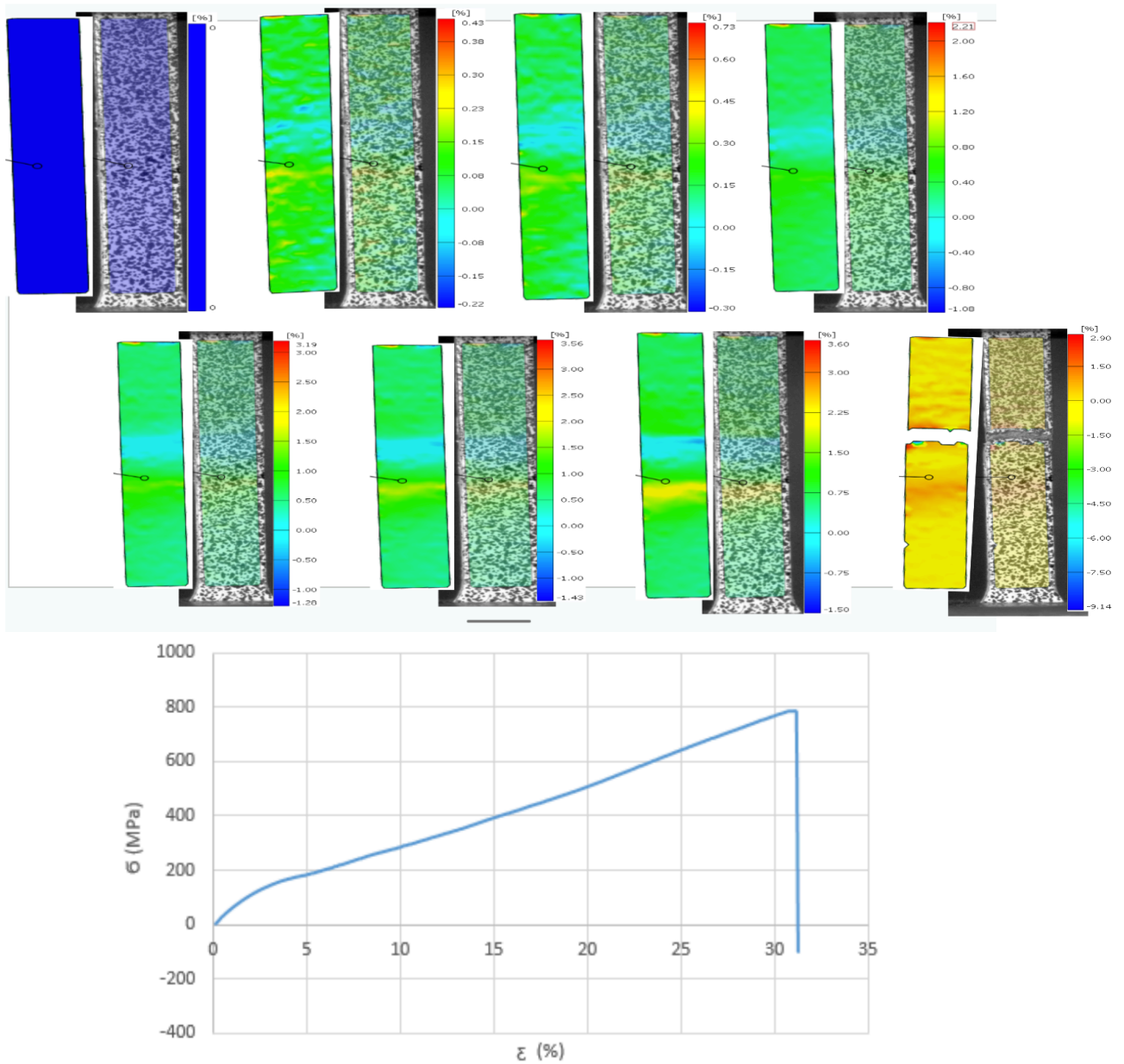


FIG. 4.16 : Épreuve 1 (soudure avec courant continu) (GOM)

A partir de la figure 4.16 , On remarque l'apparition d'une légère déformation dans la partie élastique . On observe que cette légère déformation augmente lorsque la charge appliquée augmente, et ce jusqu'à la rupture .

La courbe nous donne le comportement global du matériau étudié, mais la CIN nous révèle beaucoup plus puisqu'elle nous permet d'étudier le comportement de chaque zone de l'éprouvette séparément. Ici les déformations sont localisées à certains endroits et

comme la contrainte est l'image de la déformation, il y a localisation de contraintes qui est probablement due à la présence de défauts comme des microfissures ou des microporosités ou même la localisation des dislocations.

– Epreuve 2 :

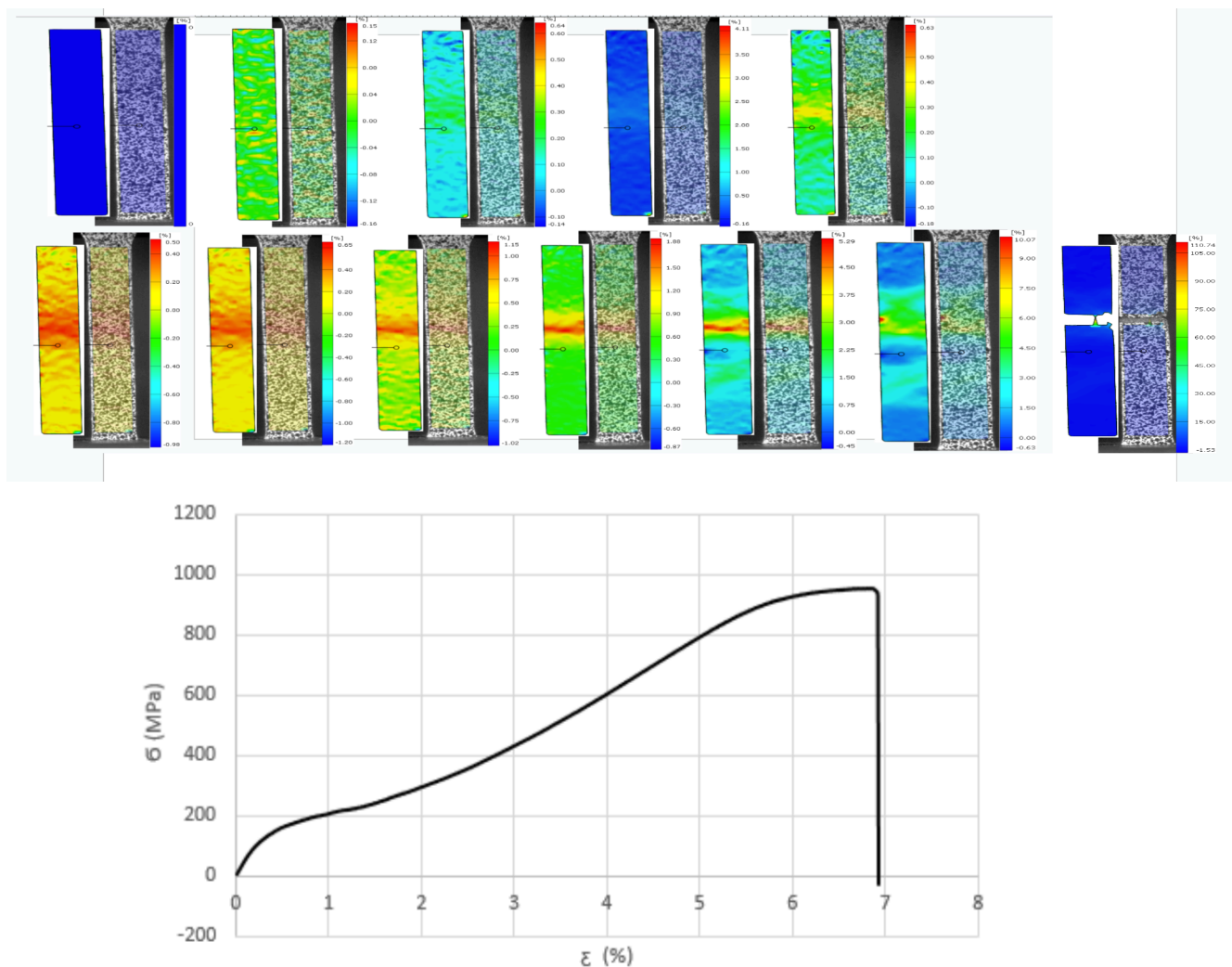


FIG. 4.17 : Épreuve 2 (soudure avec courant continu) (GOM)

En observant la figure 4.17, on remarque l'apparition d'une légère déformation dans la phase élastique, cette déformation augmente et s'amplifie (la couleur vire vers le jaune puis le rouge) au fur et à mesure que la charge appliquée augmente, on observe que la déformation tout en s'intensifiant se localise autour d'une zone spécifique qui s'avèrera être par la suite la zone de rupture.

– Eprouvette 3 :

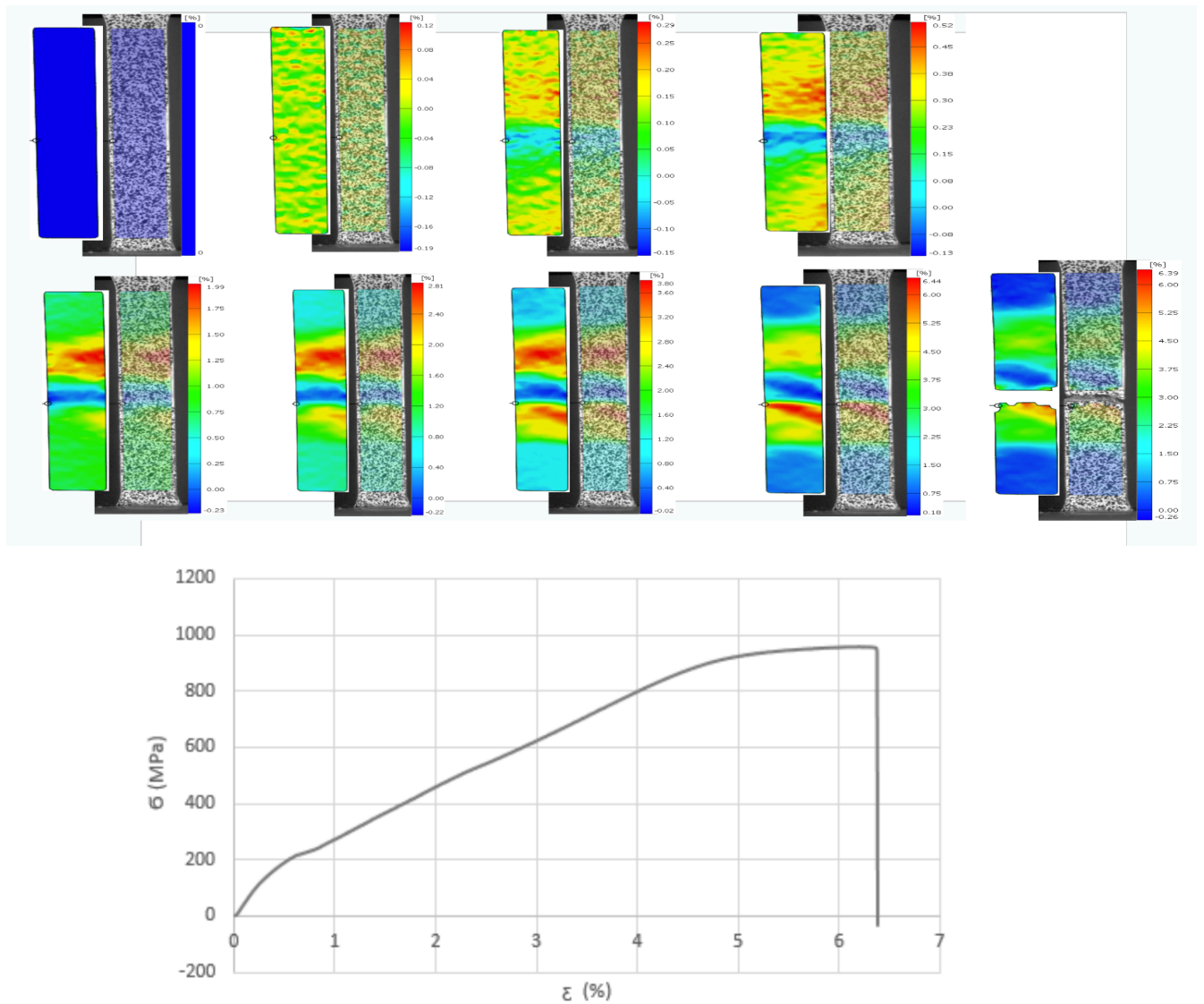


FIG. 4.18 : Éprouvette 3 (soudure avec courant continu) (GOM)

On remarque à partir de la figure 4.18 l'apparition d'une légère déformation dans la phase élastique, cette déformation augmente et s'amplifie (la couleur vire vers le jaune puis le rouge) au fur et à mesure que la charge appliquée augmente, on observe que la déformation tout en augmentant se localise autour d'une zone spécifique qui se trouve être la suite la zone de rupture.

4.5.2 Essai de traction sur une tôle de 2mm d'épaisseur soudée par procédé TIG avec un courant pulsé :

On a effectué l'essai de traction sur trois éprouvettes issues de la même soudure .

La figure 4.19 montre les courbes de traction des trois éprouvettes.

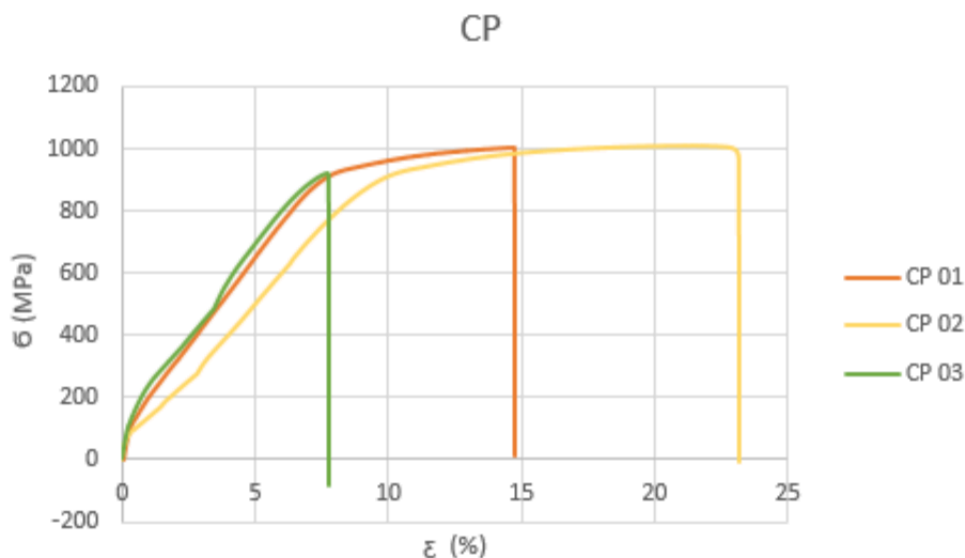


FIG. 4.19 : superposition des courbes de traction des trois éprouvettes

Les mesures de la résistance à la rupture R_m , de l'allongement $A\%$ et de la limite d'élasticité Re sont résumés dans le tableau 4.7 :

TAB. 4.7 : Propriétés mécaniques des éprouvettes d'une soudure avec un courant pulsé

	R_m (MPa)	$A\%$	Re (MPa)	Zone de rupture
Éprouvette N°1	1006.187	14.77	232.946	ZF
Éprouvette N°2	1007.640	23.13	807.947	MB
Éprouvette N°3	919.322	7.77	233.499	MB
Éprouvette du Métal de Base	947.151	14-15	418.475	MB

On remarque que les limites d'élasticité des deux éprouvettes N°1 et N°3 sont nettement inférieures à celles du métal de base ce qui suggère une plus faible ténacité après soudage . Par contre l'éprouvette N°2 présente une plus grande limite d'élasticité que celle du métal de base ce qui suggère qu'elle a une plus forte ténacité après soudage. On observe donc

l'augmentation de la ténacité et sa diminution dans la même soudure, ceci peut être dû à des variations dans les paramètres de soudage comme la vitesse de soudage, l'intensité du courant etc ... ou bien des variations de microstructure d'un endroit à l'autre dans la même soudure due à une hétérogénéité du matériau. Ou encore par la manière dont les éprouvettes sont mal-préparées pour les tests de traction.

On observe aussi que les éprouvettes N°2 et N°3 présentent un allongement presque égal à l'allongement du métal de base alors que l'éprouvette N°3 est plus grand que celui du métal de base, ce qui veut dire que la ductilité reste la même après soudage pour les éprouvettes N°2 et N°3 et augmente dans le cas de l'éprouvette N°3.

Quant à la résistance à la rupture, elle reste toujours assez proche de celle du métal de base .

- **Analyse par corrélation d'images numérique :**

- Eprouvette 01 :

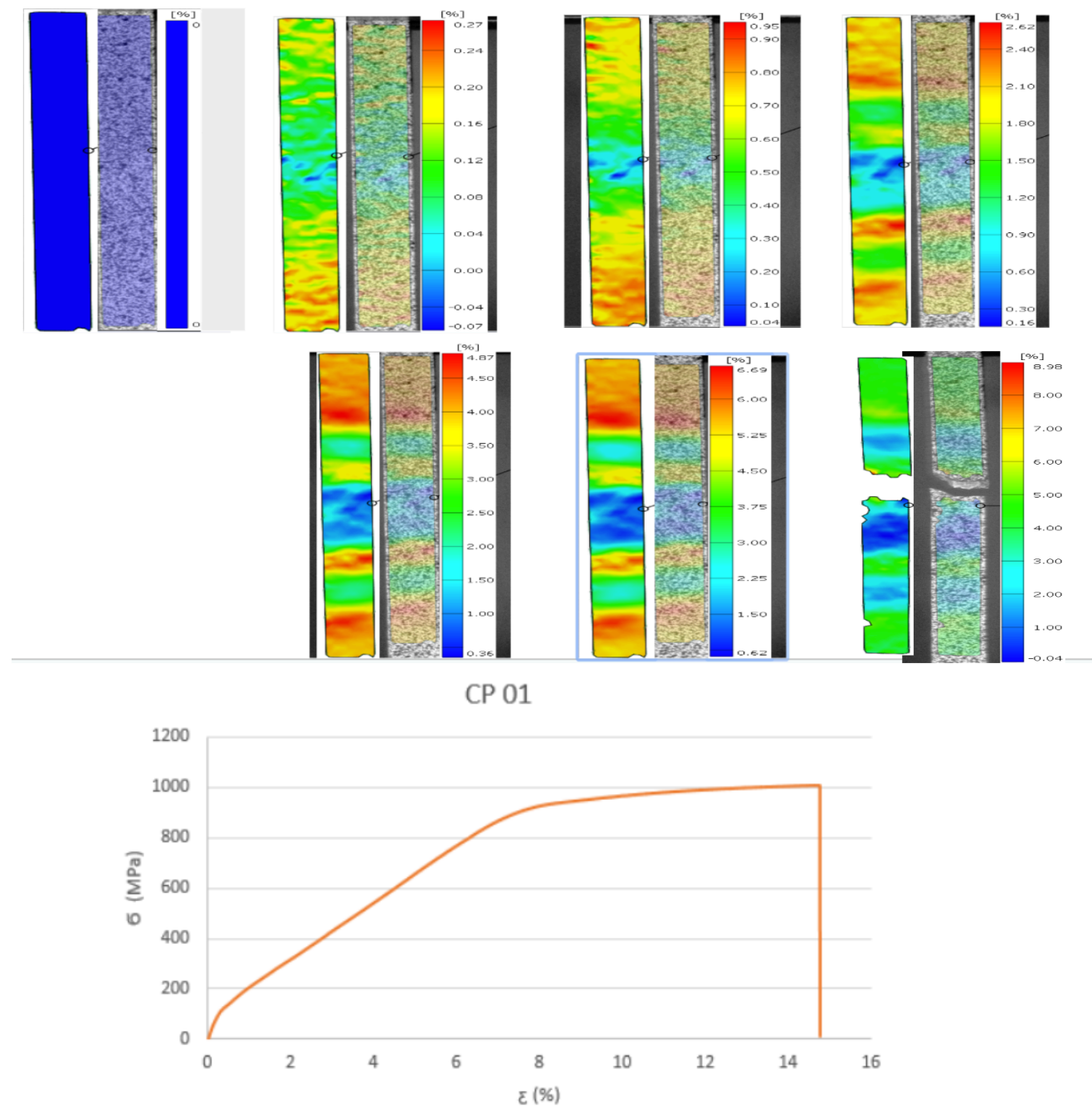


FIG. 4.20 : Éprouvette 1 (soudure avec courant pulsé) (GOM)

On remarque l'apparition d'une légère déformation dès le début de l'application de la charge dans la zone élastique, puis cette déformation augmente et s'intensifie et se localise surtout dans les deux extrémités de l'éprouvette où elle persistera et s'amplifiera davantage jusqu'à rupture. Ici la zone de rupture se situe vers le milieu de l'éprouvette, elle ne coïncide pas avec la zone de déformation maximale qui quant à elle se situe vers l'extrémité de l'éprouvette, ceci peut être dû à une hétérogénéité dans

la structure de notre matériau, c'est à dire qu'il se peut qu'il y ait variations locales de la microstructure ou de la composition chimique (ségrégation), ou bien présence de défauts tels que des microfissures ou des inclusions .

– Epreuve 02 :

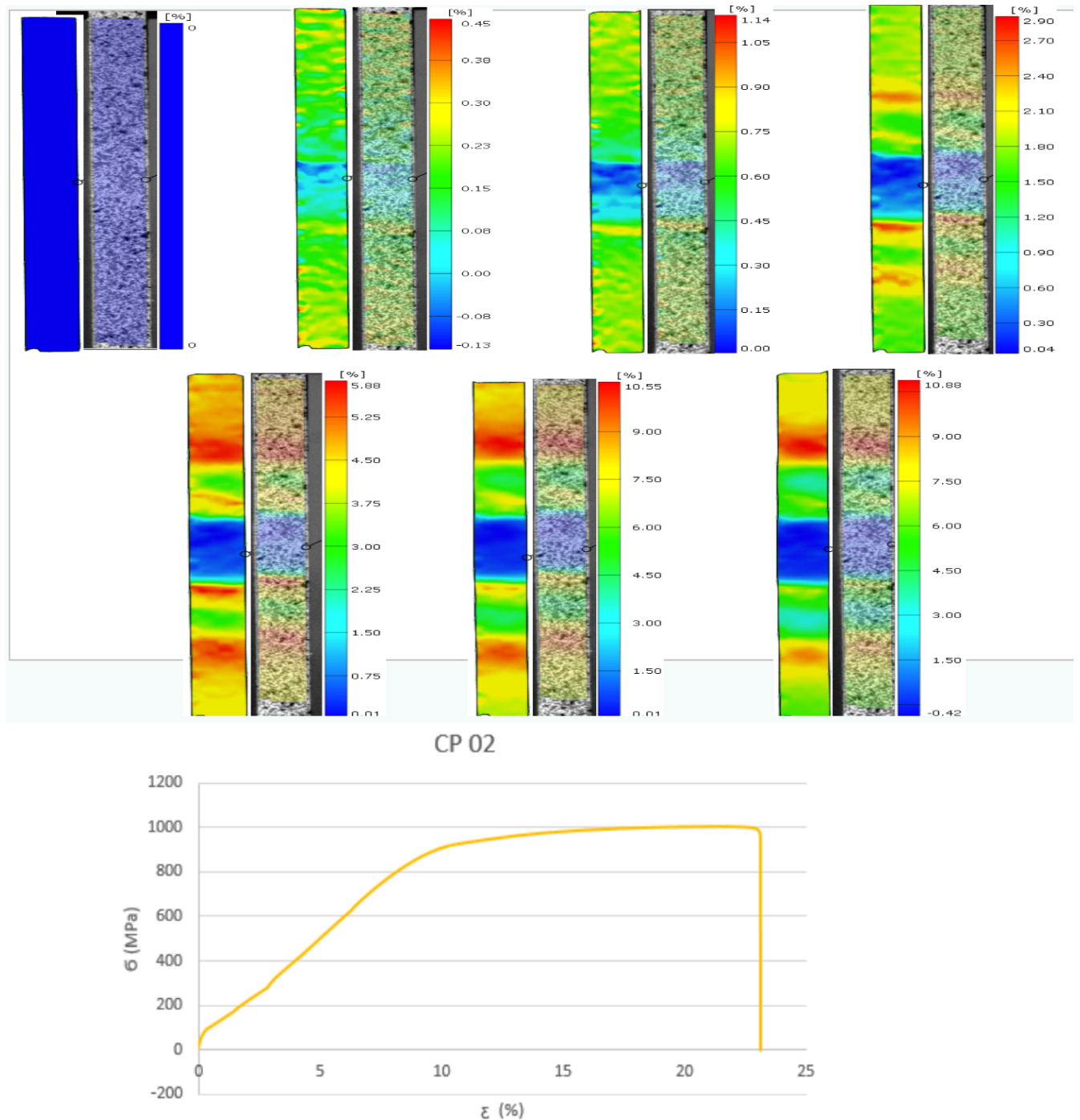
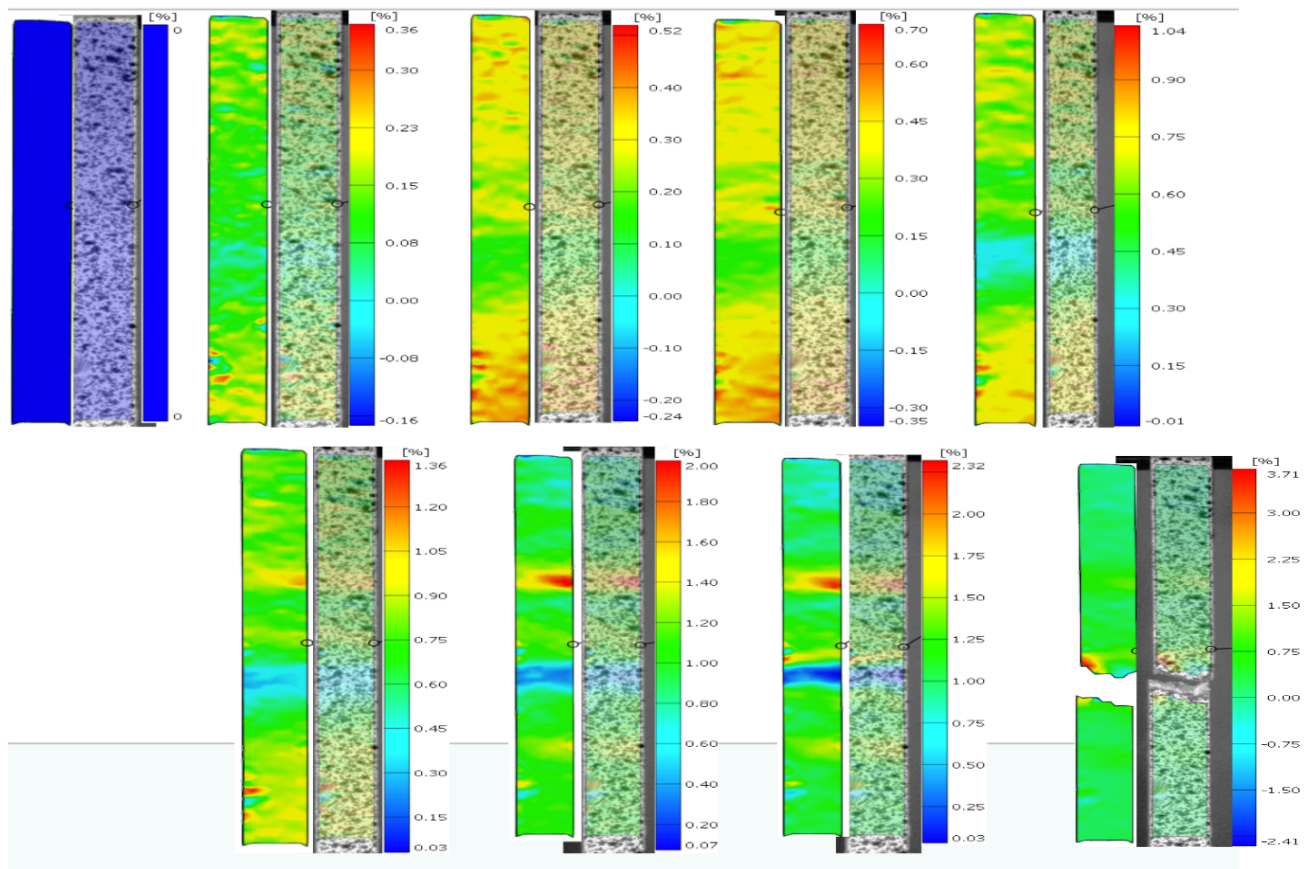


FIG. 4.21 : Épreuve 2 (soudure avec courant pulsé) (GOM)

Ici aussi la rupture ne coïncide pas avec la zone de déformation maximale, elle est même hors du champ de vision de la caméra utilisée, ceci peut être expliqué par l'absence de chanfrein dans la forme de l'éprouvette, en effet, on sait que la conception des

éprouvettes avec chanfrein permet de localiser les déformations et les contraintes dans la zone utile . Comme les éprouvettes utilisées dans l'essai avec courant pulsé ne sont pas chanfreinés la distribution des contraintes n'est pas localisée, il n'y donc pas de limitation des contraintes dans la zone utile, ces dernières sont distribuées tout au long de l'éprouvette et la rupture peut donc avoir lieu dans n'importe quelle zone de l'éprouvette.

– Epreuve 03 :



CP 03

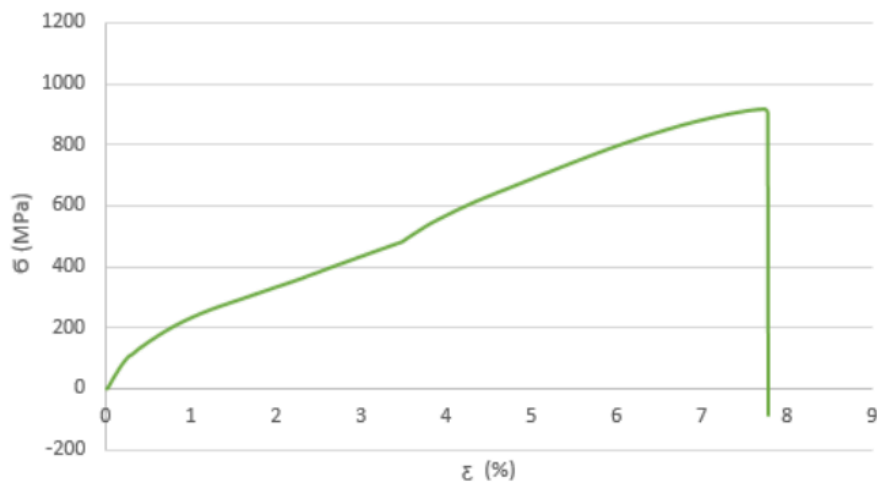


FIG. 4.22 : Épreuve 3 (soudure avec courant pulsé) (GOM)

On remarque l'apparition d'une petite déformation au départ dans la zone élastique, puis cette déformation s'accroît davantage jusqu'à rupture. Ici la zone de rupture se situe vers le milieu de l'éprouvette, elle ne coïncide pas avec la zone de déformation

maximale qui quant à elle se situe au milieu de la partie supérieure de l'éprouvette, ceci peut être dû à une hétérogénéité dans la structure de notre matériau, c'est à dire qu'il se peut qu'il y ait variations locales de la microstructure ou de la composition chimique (ségrégation), ou bien présence de défauts tels que des microfissures, dislocations ou inclusions .

- Pour résumer, pour les soudures avec un courant continu les zones de rupture coïncident avec les zones de déformations maximales comme le montre les résultats de la CIN, ce n'est pas le cas des soudures avec un courant pulsé où l'on a trouvé grâce à la CIN que les ruptures se produisaient dans des zones différentes des zones de contraintes maximales. On peut expliquer ça par des défauts de soudure, des hétérogénéités dans le matériau ainsi que l'absence de chanfreinage dans la forme des éprouvettes en CP ce qui met en évidence le rôle important des chanfreins dans la limitation des contraintes dans la zone utile.

4.6 Microdureté :

Les valeurs de la microdureté moyenne mesurées sur les différentes zones du cordon de soudure sont récapitulées dans les graphes ci-dessous :

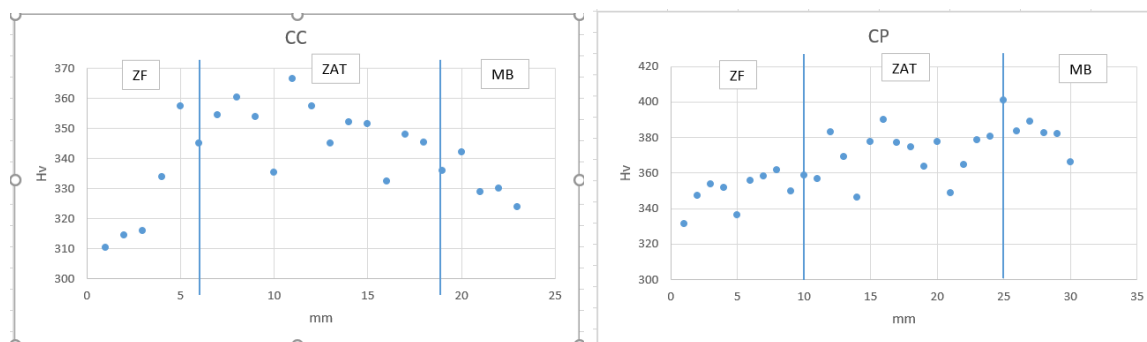


FIG. 4.23 : Les valeurs moyennes de la microdureté

TAB. 4.8 : Les valeurs moyennes de la microdureté

	ZF	ZAT	MB
soudure avec courant continu	330 Hv	351 Hv	332 Hv
soudure avec courant pulsé	350 Hv	370 Hv	384 Hv

Nous constatons que la valeur moyenne de la microdureté mesurée dans la (ZAT) est plus importante par rapport à celle de la (ZF) et le métal de base (MB) pour la soudure avec un courant continu.

Cependant la valeur moyenne de la microdureté mesurée dans le métal de base pour la soudure avec un courant pulsé est plus importante par rapport à celle de la (ZAT) et de la (ZF).

Ces résultats ne sont pas ce qu'on escomptait car ils sont différents de ceux fournis par la littérature. En effet, la valeur de la microdureté mesurée dans la (ZF) est plus importante par rapport à celle de la (ZAT) et le métal de base (MB). Ceci est dû à la structure aciculaire de la martensite α' (phase durcissante).

4.7 Diffraction des Rayons X :

L'analyse DRX a été effectuée pour déterminer les différentes phases présentes au niveau du métal de base et du cordon de soudure (échantillons soudés avec courant continu), les résultats obtenus ont été traités dans le logiciel highscore pour déterminer les différentes phases détectées, et les résultats ont été dessinés sur origin.

Les spectres de diffraction des rayons X (DRX) sont présentés dans la figure 4.23

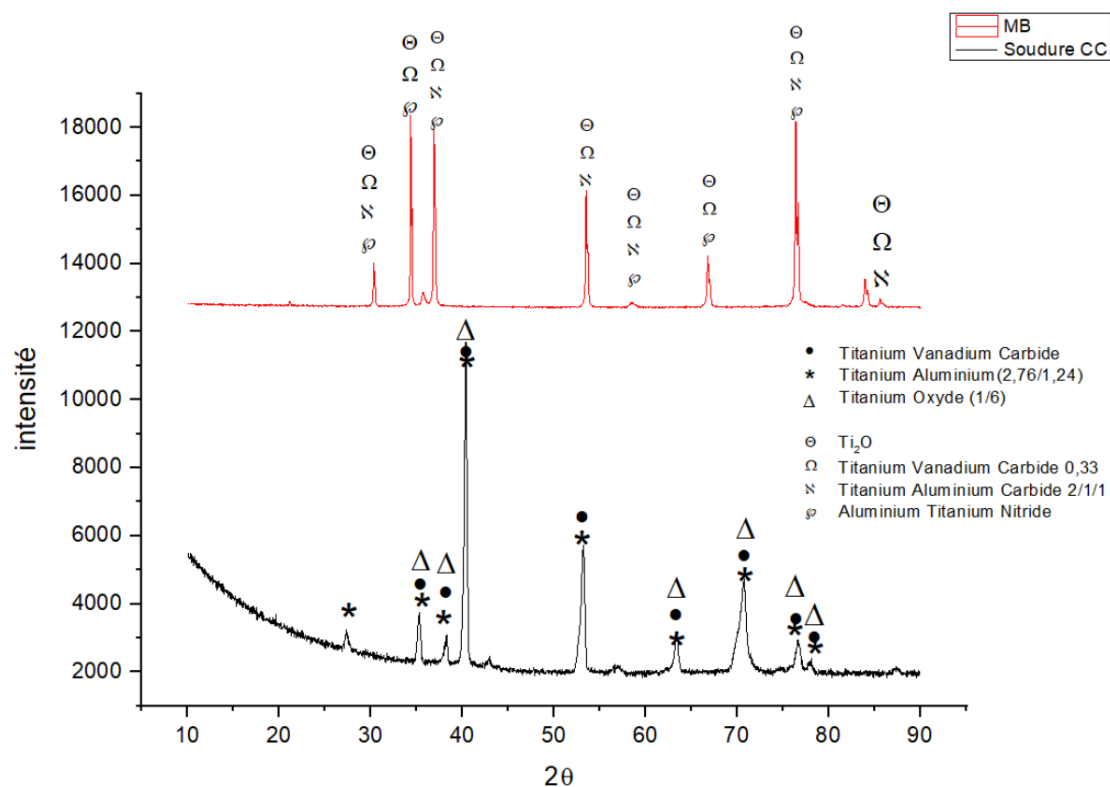


FIG. 4.24 : Résultats de la diffraction des rayons X d'une soudure avec un courant continu et du métal de base

Pour le métal de base on observe la présence des pics de dioxyde de titane TiO_2 car le titane a une affinité modérée avec l'oxygène, ce qui signifie qu'il réagit lentement avec l'oxygène dans l'air pour former une fine couche de dioxyde de titane (TiO_2) à sa surface. Cette couche, également appelée couche d'oxyde, protège le titane de toute corrosion ultérieure en formant une barrière protectrice entre le métal et l'environnement.

Des pics de nitrure d'aluminium ont été observés car le procédé de soudage a été effectué à l'air ambiant composée essentiellement d'azote, un élément responsable de la formation de nitrure d'aluminium et de titane lorsqu'il réagit avec le métal fondu.

En ce qui concerne l'analyse au niveau du cordon de soudure, des pics d'oxyde de titane ont été détectés, leur présence s'explique par la grande affinité du titane pour l'oxygène .

La détection d'une phase titane aluminium de proportion (2,76/1,24) ce qui exprime la formation d'un composé intermétallique après solidification ce qui confirme encore une fois le changement structural causé par le soudage car ce composé n'a pas été détecté dans le métal de base.

Des carbures de titane ont été observés à travers différents pics et qui s'expliquent par une contamination par le carbone lors du processus de soudage.

Le carbone a une grande affinité pour le titane et peut facilement réagir pour former des carbures de titane à des températures de soudage élevées.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'opération de soudage est un procédé très complexe qui met en jeu différents paramètres technologiques. Elle est d'autant plus complexe quand il s'agit d'assembler des alliages légers qui présentent des caractéristiques physico-chimiques particulières : grande conduction thermique et formation naturelle d'une couche d'oxyde en surface. Ce travail a eu pour objectif de comprendre et de maîtriser les outils de soudage de l'alliage TA6V par procédé TIG, il est à noter que nous avons utilisé lors de notre étude deux modes de soudage TIG : l'un avec courant continu et l'autre avec courant pulsé.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la Soudabilité et au Comportement mécanique d'un alliage de Titane « TA6V ». A cet effet, des techniques de caractérisation telles que : l'analyse métallurgique par DRX et microscopie optique ainsi que l'analyse mécanique par essais de traction et mesure de microdureté ont été utilisées pour suivre l'évolution de la microstructure et le changement des caractéristiques mécaniques.

Les conclusions générales que nous pouvons tirer de ce travail de recherche peuvent se résumer comme suit :

- Une bonne préparation des tôles à souder joue un rôle primordial pour l'obtention de soudures de bonne qualité.
- Nous avons constaté que la zone affectée thermiquement (ZAT) qui se caractérise par sa structure grossière peut être divisée en deux parties :
 - Une 1ère zone affectée thermiquement (Z.A.T 1) correspondant au matériau qui a vu une température maximale conduisant à une structure monophasée β (température variant de la température de transus $T\beta$ jusqu'à la température de fusion).
 - Une 2ème zone affectée thermiquement (Z.A.T 2) correspondant au matériau dont la température n'a pas dépassé la température de transus $T\beta$ dynamique ; qui est donc restée biphasée au cours du chauffage.
- L'utilisation du logiciel GOM nous a permis d'apprécier les champs de déformation et leur évolution lors de l'essai de traction dans les différentes zones de l'éprouvette soudée.

- La rupture durant les essais de traction s'est produite dans la majorité des cas dans la ZAT, ceci s'explique par le fait que les cycles thermiques élevés et les gradients de température pendant le soudage peuvent rendre la ZAT plus fragile que les autres zones du matériau. Nous avons noté tout de même que la rupture pouvait quelque fois se produire dans le métal de base ou dans d'autres zones de l'éprouvette, et ce par cause de présence de défauts comme des microporosités, des microfissurations.
- Les profils de microdureté que nous avons obtenus ont donné des résultats différents de ceux escomptés, il n'empêche qu'ils restent des résultats expérimentaux fiables qui pourront donner lieu à des recherches par la suite pour essayer de leur donner une explication plausible.

Références bibliographiques

[1] F.H. Froes, Titanium physical metallurgy, processing, and applications, ASM International (2015) 1-2.

[2] C.Leyens and M.Peters, Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications (2003) 1-35.

[3] G. Lütjering, J.C. Williams, Titanium : engineering materials and processes, Springer, Verlag Berlin, 2007. 15-52.

[4] W. G. Burgers, « On the process of transition of the cubic-body-centered modification into the hexagonal-close-packed modification of zirconium », Physica, vol. 1, no 7, p. 561-586, mai 1934, doi : 10.1016/S0031-8914(34)80244-3.

[5] A.I. Kahveci, G.E. Welsch, Scripta Metallurgica 20 (1986) 1287–1290.

[6] S. Naka, Thèse de Doctorat, Étude Des Mécanismes de Déformation Plastique à Basse Température de Monocristaux de Titane Alpha, Université de Paris Sud, 1983.

[7] R. Venugopalan, J.J. Weimer, M.A. George, L.C. Lucas, Biomaterials 21 (2000) 1669– 1677.

[8] Z. Liu, G. Welsch, Metallurgical Transactions A 19 (1988) 527–542.

[9] J.-P. Bars, E. Etchessahar, J. Debuigne, Journal of the Less Common Metals 52 (1977) 51–76.

[10] E. Aeby-Gautier, Les alliages de titane, Cours de l'Ecole des Mines de Nancy, 2006.

[11] T. Sakai, M.E. Fine, Scripta Metallurgica 8 (1974) 541–544.

[12] B. De Gélas, M. Armand, L. Séraphin, R. Tricot, Editions Techniques de l'Ingénieur, M557 (1976).

[13] G.T. Gray, G. Luetjering, J.C. Williams, Metallurgical Transactions A 21 (1990) 95– 105.

- [14] Y. Combres, Editions Techniques de l'Ingénieur, M4780 (2010).
- [15] I. Weiss, S.L. Semiatin, *Materials Science and Engineering : A* 263 (1999) 243–256.
- [16] KHERROUBA, Nabil. Etude expérimentale et modélisation des cinétiques de transformation de phase dans un alliage de titane. 2017. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud ; École nationale polytechnique (Alger).
- [17] G. Lütjering, J.C. Williams, A. Gysler, *Microstructure and Properties of Materials 2* (2000) 1–74.
- [18] N.E. Paton, M.W. Mahoney, *Metallurgical Transactions A* 7 (1976) 1685–1694.
- [19] M. Colombié, *Matériaux métalliques-2ème édition*, Dunod, 2008.
- [20] ASM Handbook Volume 02, *Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials* (1992), p 1771.
- [21] HADJI, Idir. Étude de la soudabilité et du comportement mécanique des alliages de titane. 2012. Mémoire de Magister. Université M'hamed Bougara (Boumerdes).
- [22] Donachie, M.J. *Titanium : A Technical Guide*. ASM International(2000).
- [23] Yannick ROBERT. Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsif : caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécanique associés à ce procédé. 2007. Thèse de doctorat. École des Mines de Paris.
- [24] ASM Handbook Volume 3, *Alloy Phase Diagrams*, (1992).
- [25] Sabrina SELVA. Corrosion du titane et de ses alliages en milieu primaire de réacteur à eau pressurisée : effet des paramètres environnementaux. 2021. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [26] Seddik OUALLAM. Étude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024 T3.2009. Mémoire de magister. École nationale polytechnique. (Alger).
- [27] S. Kou. *Welding Metallurgy*. John Wiley Sons, Hoboken, New Jersey, 2003. ISBN 1-85233-953-5.
- [28] Klas Weman, *Welding processes handbook*, Woodhead(2003).
- [29] Annette O'Brien, *Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 2 :*

Welding processes, Part 1. 2004. pp 103-144.

[30] Robert W Messler Jr. Principles of welding : processes, physics, chemistry, and metallurgy. Wiley-VCH, 2004.

[31] Roland CAZES, “ Soudage à l’arc “, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique. B 7 730.

[32] Md. Ibrahim Khan, Welding Science and Technology, new age international publishers. [33] Belbachir, Nacer. Tadjer, Nosseiba. Essais de traction par corrélation d’images numériques sur les alliages de magnésium soudés et non soudés. Mémoire de fin d’études. Ecole nationale polytechnique Alger, 2018.

[34] A A Shirali and K C Mills. The effect of welding parameters on penetration in gta welds. Welding Journal, 72:347s–353s, 1993.

[35] Pires J Norberto, Loureiro Altino, and Bolmsjo Gunnar. Welding robots technology, system issues and applications. Springer, 2006.

[36] R R Ambriz and V Mayagoitia. Welding of aluminum alloys. In Ahmad Zaki, editor, Recent trends in processing and degradation of aluminium alloys. InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, November 2011.

[37] Gokhan Goktug. On the effect of environmental pressure on gas tungsten arc welding process. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

[38] Monsieur PERRY Nicolas. Étude et développement des flux solides en vue d’application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu’aux aciers inoxydables. 2000. Thèse de doctorat. École Centrale de Nantes.

[39] ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. ASM International(2000).

[40] Collings, E.W. (1984). The Physical Metallurgy of Titanium Alloys. ASM International.

[41] W. F. SAVAGE, E. F NIPPES, A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloy Steel, Welding Journal Research Supplement (1976), p. 260s-268s

[42] Jefferson’s Welding Encyclopaedia, CD Rom, American Welding Society Publisher, 18ème Edition (1997) PP 217-235

[43] Ouallam, Seddik. Assemblage des Alliages Légers (Aluminium, Magnésium) par Faisceau de Haute Énergie (TIG Laser). Thèse de doctorat en science. Ecole nationale polytechnique Alger, 2021. p 78-80.

[44] Zoumali, Kamel. Babanna, Choayb. Caractérisation microstructurale et mécanique avec l'étude de la cinétique de transformation de phase $\beta \rightarrow \alpha$ dans des soudures d'alliage de titane TA6V. Ecole nationale polytechnique Alger, 2012. p 40.

Annexes

Annexe A

Matériaux et dispositifs expérimentales

Étape 1 : ouverture du logiciel GOM

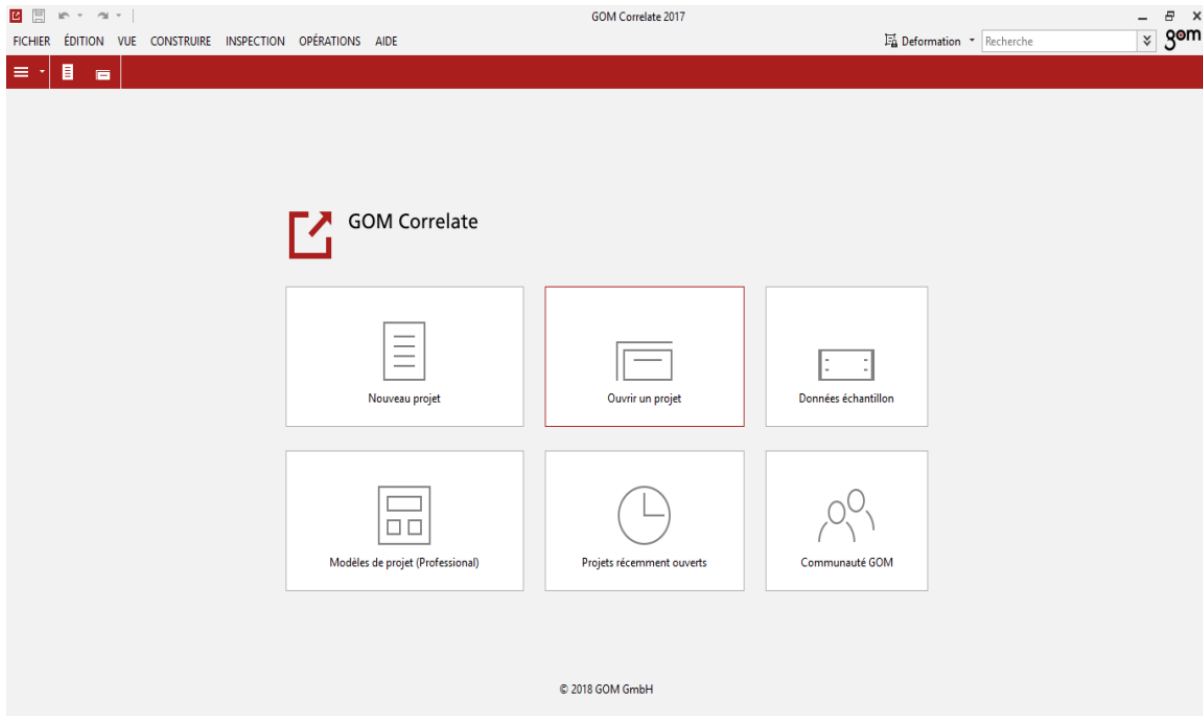


FIG. A.1 : Interface du logiciel GOM Correlate

Étape 2 : ouvrir un nouveau projet

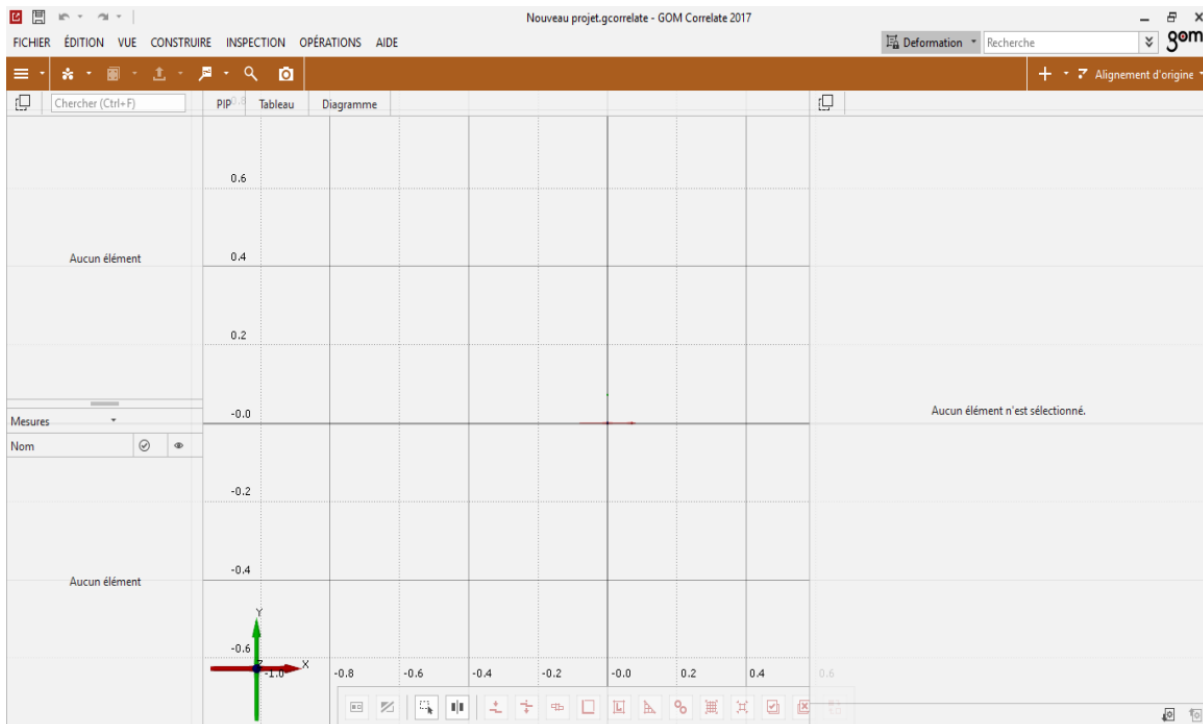


FIG. A.2 : Interface de travail

Étape 3 : Import des images à corrélér

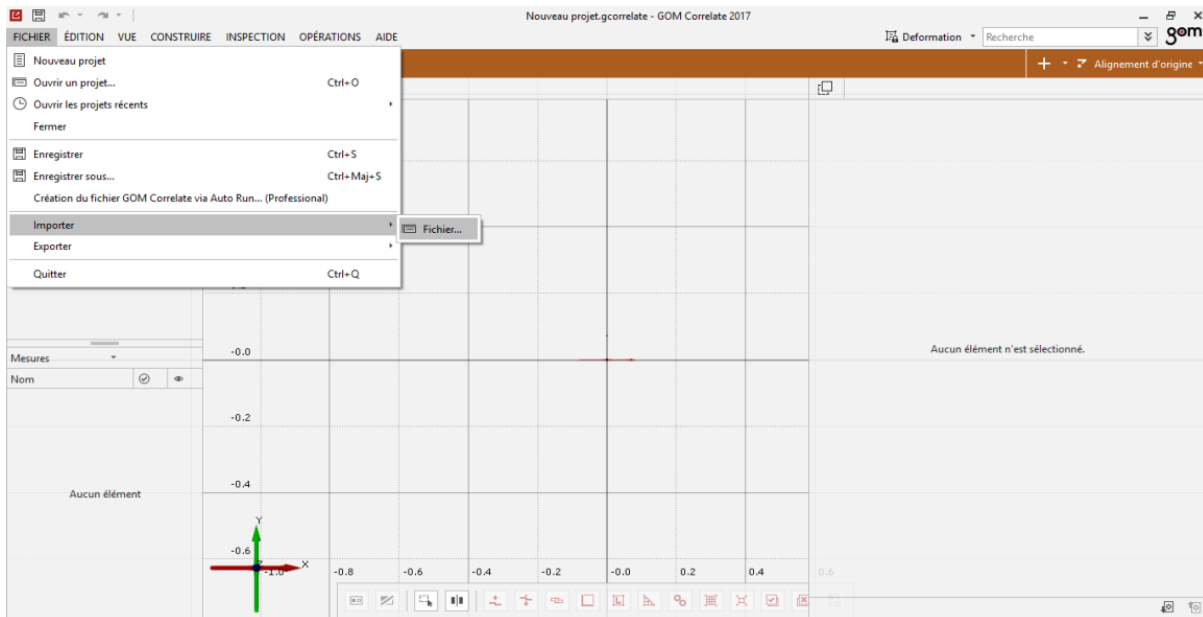


FIG. A.3 : Illustre comment importer des images

Étape 4 : Sélection des images à corrélér

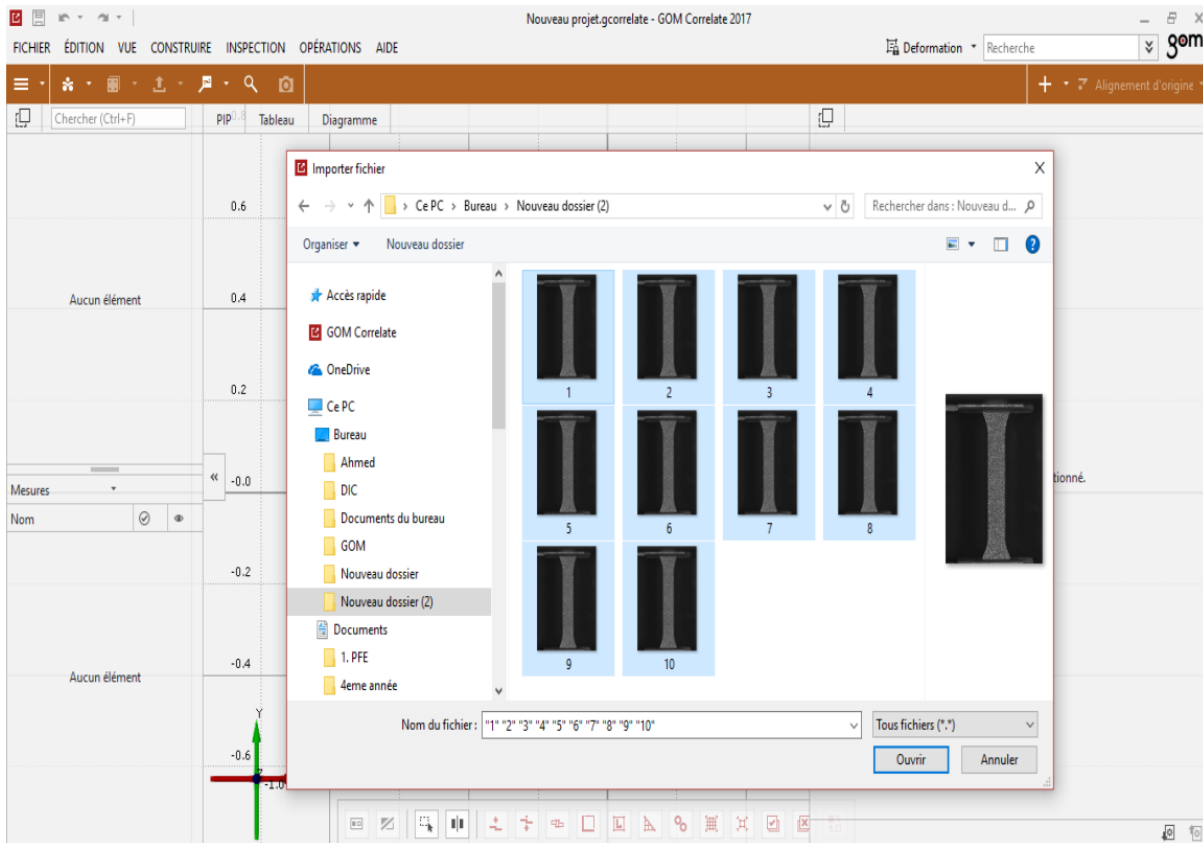


FIG. A.4 : Sélection des images

Étape 5 : Choisir image de déformation car on cherche à corréler des images

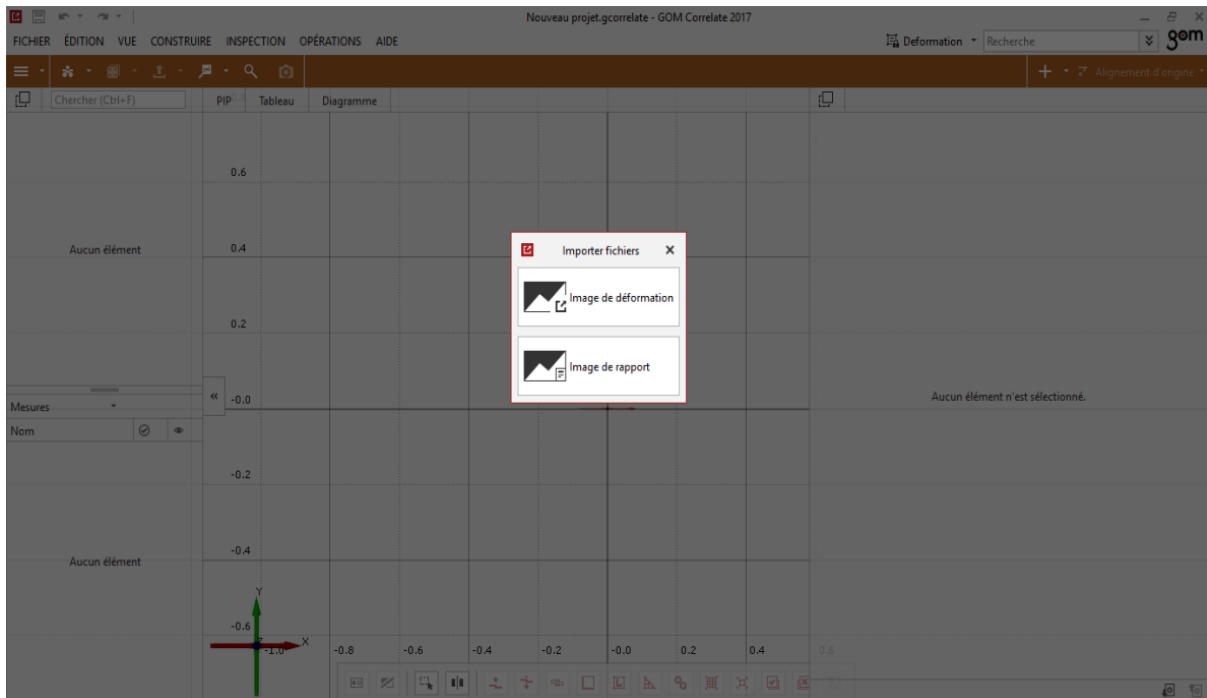


FIG. A.5 : capture d'écran de l'étape 5

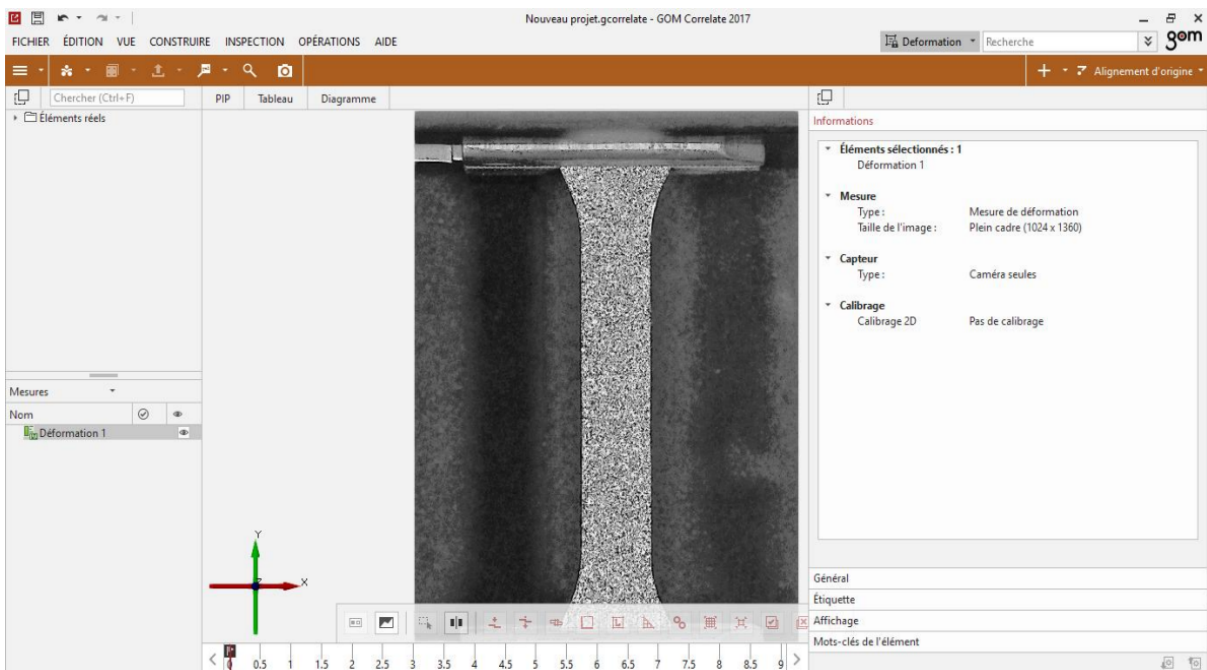


FIG. A.6 : La première image pour notre test

Étape 6 : Sélection de la zone d'intérêt

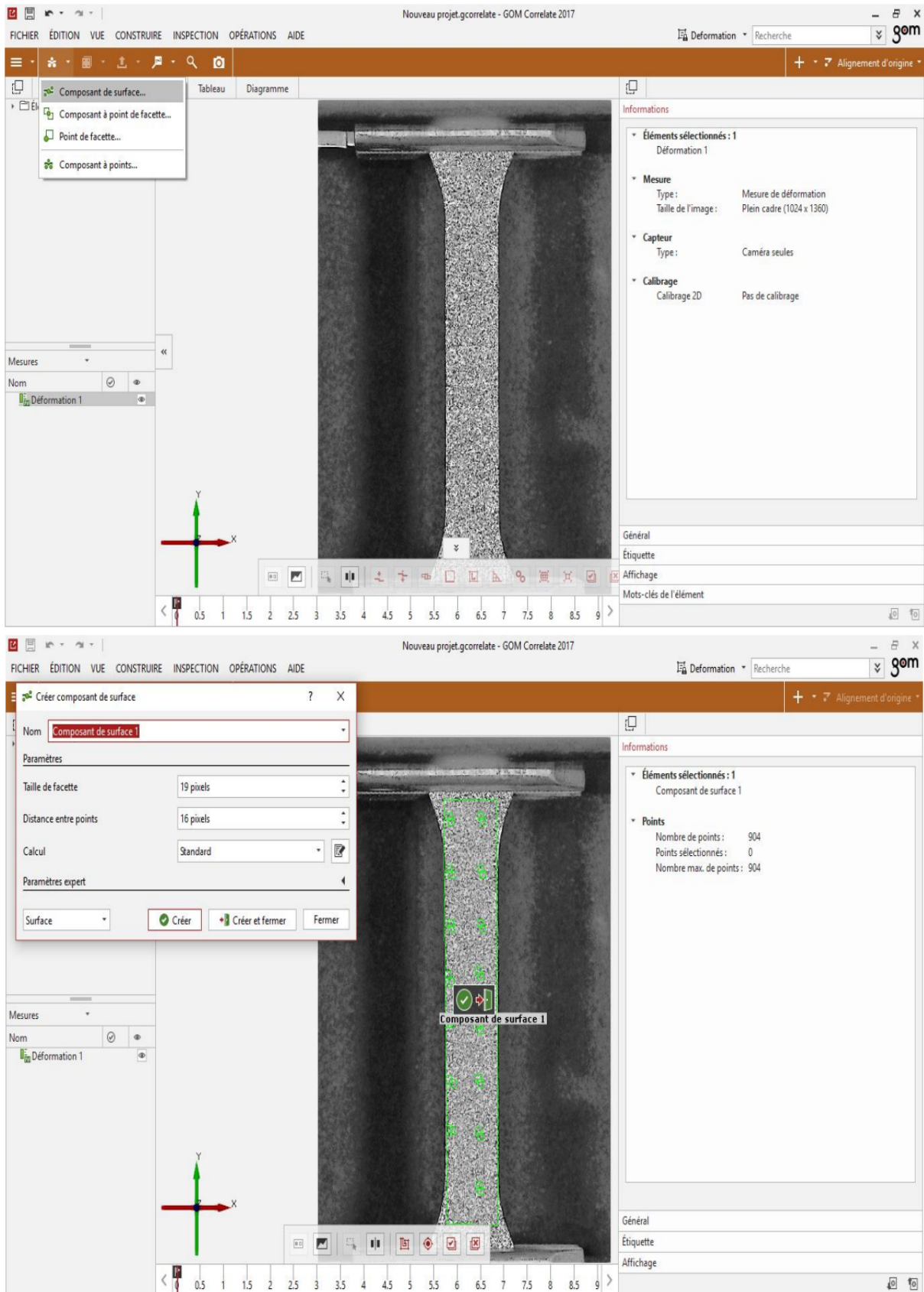


FIG. A.7 : Zone d'intérêt et taille du maillage

Étape 7 : Choisir que l'on veut corréler nos images selon l'axe des y alors Epsilon Y

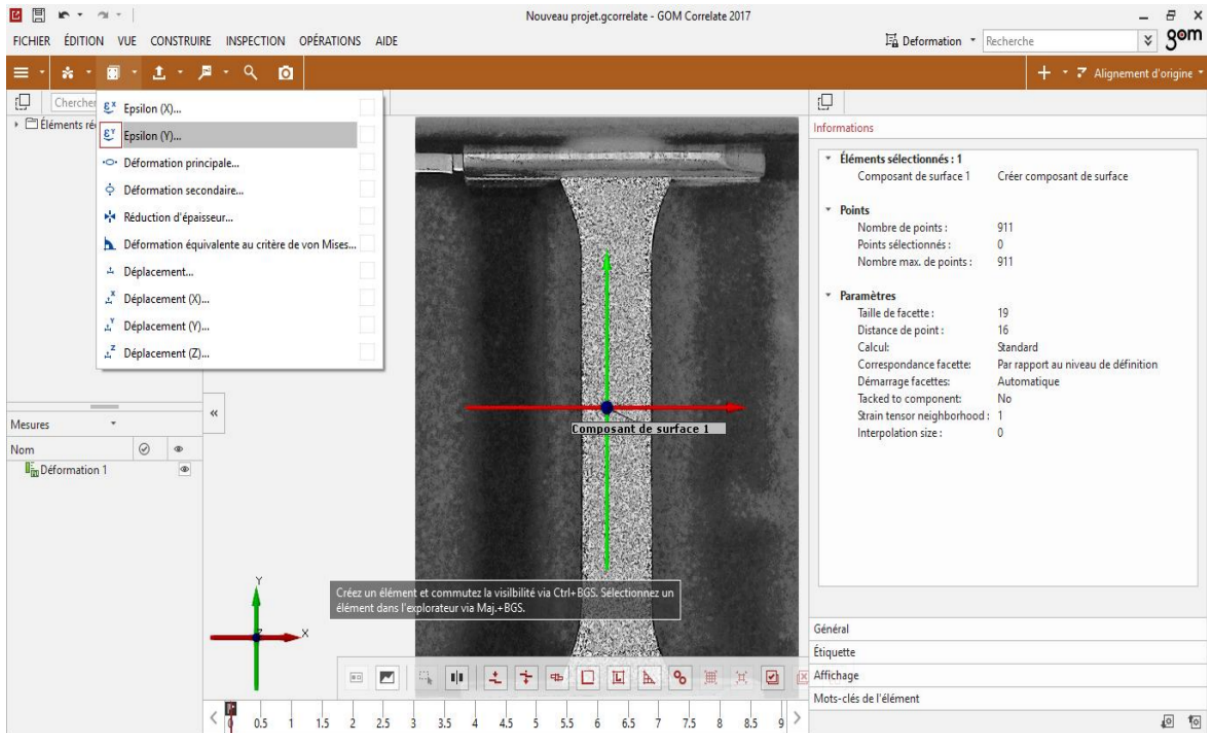


FIG. A.8 : Choix du sens de la corrélation

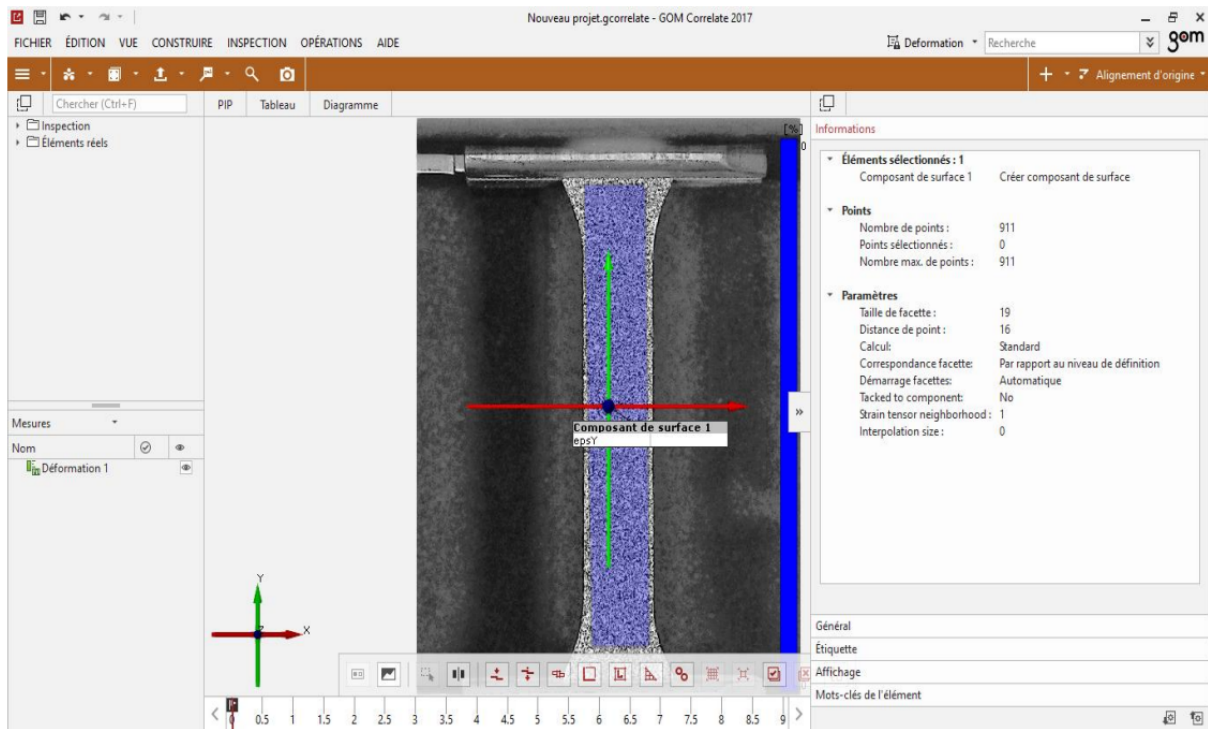


FIG. A.9 : Traitement terminé

Balayage des images :

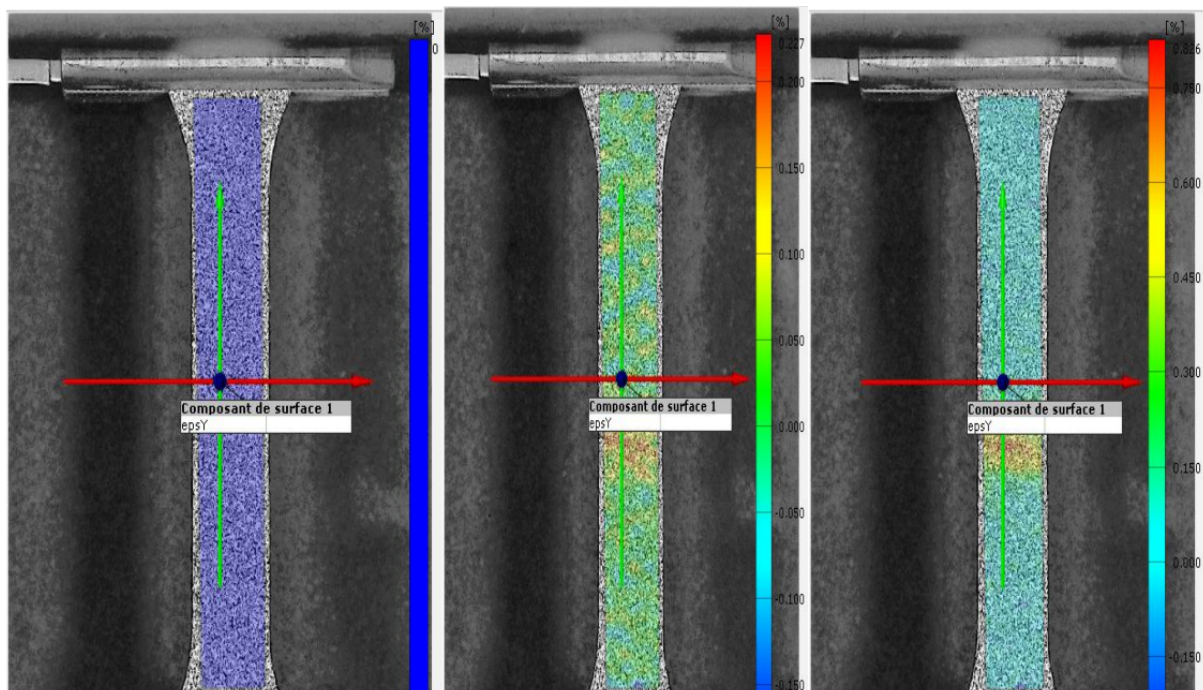


FIG. A.10 : Visualisation des résultats à partir des images de référence montrant le gradient de déformations sur une succession d'images sélectionnées au préalable