

République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche
Scientifique.



Université SAAD DAHLAB De Blida.
Institut d'Aéronautique Et des Etudes spatiales

PROJET DE FIN D'ETUDE

EN VUE L'OBTENTION DE DIPLOME MASTER EN

AERONAUTIQUE .

Option : Construction Aéronautique.

Spécialité :Structure Avions.

THEME

**DIAGNOSTIQUE ELECTRIQUE D'UN
PLASMA D'ARC DE SOUDAGE TIG .**

Réalisé par :

BOUSETSA Fatiha

BOUDAUD Ilham Halima

Encadré par :

Promoteur :Mr.Amar BOUTAGHANE

Copromotrice :Mme.Hayet BOUDJELLAL

Année Universitaire 2015/2016

Résumé :

Les programmes récents de conception d'aéronefs sont caractérisés, sur le plan des matériaux, par l'introduction d'alliages soudables, qui, en se substituant à la technique traditionnelle de rivetage, ouvrent la voie à un gain de masse, à des réductions de coût en production et en maintenance, essentiellement grâce à une amélioration de la résistance à la corrosion et à la fatigue.

La compréhension de l'influence des différents paramètres du procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) appliqué à l'alliage d'Acier inoxydable austénitique (AISI 316L) doivent nous aider pour la prise en compte, dès la conception des structures, de comportement en service des assemblages. Le travail présenté porte sur la définition d'un domaine opératoire de soudabilité de l'alliage étudié et les conséquences métallurgique et mécanique de cet assemblage sur les propriétés du matériau.

Concernant l'aspect opératoire, un programme d'essais, nous a permis de comprendre l'influence des différents paramètres intervenant lors de l'opération de soudage (tension, intensité, vitesse de soudage, protection gazeuse).

D'un point de vue caractérisation, l'observation microscopique et macroscopique, nous a permis d'accéder à des informations sur la microstructure de la zone d'assemblage, nous permettant une meilleure compréhension du comportement mécanique du joint de soudure, caractérisé par des essais de microdureté et de traction.

Abstract :

Recent programs of aircraft design are characterized by the introduction of weldable alloys, which seems to have a promising future. By replacing the traditional assembly by riveting, welding can allow mass gain, cost savings in production and maintenance, mainly due to an improvement in corrosion resistance and fatigue.

The comprehension of the influence of the various parameters of the process of welding TIG (Tungsten Inert Gas) applied to alloy of Stainless steel austenitic (AISI 316L) must help us for the taking into account, as of the structural design, of behavior in service of the assemblies. The work presented concerns the definition of an operational field of weldability of alloy studied and the consequences metallurgical and mechanical of this assembly on the properties of material.

Concerning the operational aspect, a test routine, enabled us to understand the influence of the various parameters intervening at the time of the operation of welding (tension, intensity, speed of welding, gas protection).

From a characterization point of view, the microscopic and macroscopic observation, gave access to us information on the microstructure of the assembly area, allowing us a better comprehension of the mechanical behavior of the joint of welding, characterized by tests of microdurty.

ملخص :

يعتبر اللحام الاوتوماتيكي من اهم العمليات المستخدمة في برمجة تصميم الطائرات من اجل تثبيت العناصر المعدنية , وذلك باستبدال تكنولوجيا التثبيت التقليدية, مما يمهد الطريق لتحقيق مكاسب شاملة من تخفيضات في تكاليف الانتاج و الصيانة, و يرجع سبب ذلك اساسا الى تحسين مقاومة التاكل و تعب المعدن.

يتعلق هذا العمل اساسا على التعريف باللحام من النوع تينغستن و فهم تاثيرات المتغيرات المختلفة لهذه العملية على سبائك الفولاذ المقاوم للصدء, مما تساعدنا على أن تأخذ في الاعتبار في تصميم الهياكل والسلوك الموافق و الدور.

فيما يتعلق بالجانب العملي, يطبق برنامج اختبار, يسمح لنا أن نفهم تأثير مختلف المعلمات أثناء عملية اللحام (الجهد, والحالية, سرعة اللحام, التدريع الغاز) مما يتيح لنا فهما أفضل من السلوك الميكانيكي للحام من حيث الصلابة الدقيقة والشد الاختبارات.



REMERCIEMENT

Nos remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons tout d'abord à adresser nos remerciements à tous les membres du jury pour leurs remarques pertinentes et constructives. Aussi, nos remerciements les plus sincères à tous les professeurs de notre institut d'aéronautique de l'université de SAAD DAHLEB de Blida.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au « Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) » de Chéraga, au sein de la Division Soudage et Techniques Connexes, DSTC.

Nous souhaitons remercier Monsieur « Amar Boutaghane », le Directeur de la Division Soudage et Techniques Connexes, de nous avoir proposé ce sujet et de le mener à bien jusqu'à sa conclusion et pour la confiance qu'il nous a accordé en nous permettant de réaliser notre mémoire avec l'ensemble chercheurs et ingénieurs de la DSTC.

Nous espérons que notre travail lui a donné satisfaction et qu'il débouchera sur quelques avancées par rapport aux problèmes étudiés.

Tout spécialement, nos remerciements vont à Madame « Hayat Boudjellal », notre aimable professeur ainsi que Monsieur « Hammouda Amirouche », pour avoir assuré l'encadrement de notre mémoire, pour son aide, sa gentillesse et sa patience. Sans le soutien à tous les deux, nous n'aurions pas pu mener ce travail à son terme.

Nous souhaitons également remercier toutes l'équipe de la DSTC, avec qui nous avons travaillé durant la période de notre stage pratique, en particulier les ingénieurs « Aberdache Chahra » et « Aissaoui Hanane », pour l'aide, la disponibilité, l'amitié, la bonne humeur et les conseils. Nos remerciements vont aussi à Monsieur Bensaid Nabil et Monsieur Benlemnouar Mohamed Farid.

On remercie nos très chers parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour la réussite de leurs enfants. Merci à nos très chers frères, nos collègues, nos proches, pour leurs aide et leur soutien.

Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

F.Bousetsa et I.Boudaoud

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERAL	1
----------------------------	---

CHAPITRE I :

PROCEDES DE SOUDAGE

1. Généralités.....	2
2. Classification générale des procédés de soudage	4
2.1. Classification selon l'énergie	4
2.2. Selon l'état du métal à l'endroit du soudage	5
2.2.1. Soudage par fusion	5
2.2.2. Soudage par pression.....	5
3. Soudage à l'arc avec électrodes réfractaires sous gaz inerte (procédé TIG)	5
4. Soudage TIG (Tungstène Inert Gas).	8
4.1. Paramètres TIG	8
4.2. Alimentation électrique dans le procédé de soudage TIG	8
4.3. Gaz utilisés en procédé TIG	9
4.4. Les électrodes non fusibles	9
5. Le procédé de soudage MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Actif Gas)	9
5.1. Technologie du procédé MIG/MAG	10
6. La physique de soudage	10
6.1. Les paramètres modifiables par le soudeur	10
6.2. Les modelés physiques de la littérature	11
6.2.1. Les différentes zones caractéristiques de l'arc de soudage TIG.....	12
6.2.1.1. La colonne d'arc.....	12

6.2.2.1. Les zones cathodique et anodique	13
8. Aspect chimique	14
8.1. Constitution du Métal fondu.....	14
9. Influence de la vitesse de refroidissement.....	15
10. Principaux défauts de soudage	16
10.1. La fissuration à chaud.....	16
10.1.1. Les fissures de solidification	16
10.1.2. Les fissure	17
10.1.2.1. La fissuration à froid	18
10.1.3. La fissuration au réchauffage	20
11. Eléments constitutifs d'un poste de soudage	20
11.1. Le générateur	20
11.2. Le fil	21
11.3. Le dévidage	21
11.4. La torche.....	22
11.5. Le gaz	23

CHAPITRE II :

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1. Introduction	25
2. Schéma général.....	25
3. Le dispositif de soudage.....	26
3.1. Le poste	26
3.1.1. Le poste multi procédé	26

3.1.2. Le poste TIG.....	28
3.2. Protection gazeuse.....	29
3.3. Pince de courant.....	31
3.4. Sonde de tension.....	31
3.5. L'Oscilloscope.....	32
3.6. Les torche.....	33
3.6.1. La torche TIG.....	33
3.7. Les métaux utilisés.....	35
3.7.1. L'Acier.....	35
3.7.2. L'Aluminium.....	35
4. Préparation des échantillons au contrôle.....	36
4.1. Le découpage et mise en forme des échantillons.....	36
4.2. L'Enrobage.....	36
4.3. Le Polissage.....	37
5. L'attaque chimique.....	38
6. L'analyse macrographique.....	38
7. L'analyse micrographique.....	39
8. Microdureté.....	40
9. Essais de traction.....	40

CHAPITRE III :

INTERPRETATION DES RESULTATS

1. Introduction.....	41
2. Optimisation des paramètres de soudage.....	41

2.1. Le choix de la vitesse de soudage.....	41
2.2. Tension de soudage en fonction du courant de soudage	42
3. Les macrographies des coupes transversales des joints de soudure	46
4. Les paramètres de soudages optimisés.....	50
4.1. Les paramètres de soudage optimisés.....	51
4.2. Examen macrographique par les paramètres optimisés.....	51
5. EXAMEN MICROGRAPHIQUE.....	52
6. Les essais de la microdureté.....	55
7. Essais de traction.....	57
CONCLUSION GENERALE	61

Table des matières

CHAPITRE I :

Figure 01: Différentes régions de l'arc et différentes zones de la soudure [1].....	3
Figure 02 : Classification des procédés du soudage [2]	4
Figure 03 : La soudure électrique à l'arc.....	6
Figure 04: Procédé de soudage TIG (GTAW) et plasma (PTAW). [1].....	6
Figure 05 : La soudure à l'arc en atmosphère inerte [1].....	7
Figure 06: description de la torche TIG [8].....	8
Figure 07 : Phénomènes physiques pris en compte pour la description de l'arc et du bain de soudage [1].....	11
Figure 08 : Répartition du potentiel électrique ϕ dans l'arc et du courant I avec le courant électronique et I_i le courant ionique [1].....	12
Figure 09: Influence du métal de base sur la composition du métal fondu.....	15
Figure 10 : Localisations des fissures de solidification.....	16
Figure10 : Influence de la forme des cordons sur la fissuration à la solidification [11].....	17
Figure 12: Exemple de fissuration à froid [11].....	19
Figure 13: Le système de dévidage [1].....	22
Figure 14: Torche de soudage.	23

CHAPITRE II :

Figure 01: Dispositif expérimental.....	26
Figure 02: photo du poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).....	27
Figure 03: schéma du poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).....	27
Figure 04: photo du poste de soudage Miller Dynasty 350,700 Maxstar 350,700.....	28

Figure 05: schéma du poste de soudage Miller Dynasty 350,700 Maxstar 350,700.....	29
Figure 06 : Protection gazeuse	30
Figure 07: FLUKE i410/i1010.....	31
Figure 08: Keysight N2790A.....	32
Figure 09: oscilloscope Agilent InfiniiVision 6000 Series.....	33
Figure 10 : La torche TIG.....	34.
Figure 11: une vue éclatée d'une torche TIG.....	34
Figure 12 : Tronçonneuse (csc).....	36
Figure 13: Enrobage (csc).....	37
Figure 14 : Polisseuse (csc).....	37
Figure 15 : L'attaque chimique.....	38
Figure 16: un poste équipé d'un microscope binoculaire Nikon (csc).....	39
Figure 17: Représentation schématique d'un microscope optique	39

CHAPITRE III

Figure1: Corrélation et étalonnage de la vitesse en fonction de la fréquence.....	42
Figure 2 : type et mode de soudage : courant continu, courant pulsé et courant alternatif.....	43
Figure 3 : tension d'arc en fonction du courant.....	44
Figure 5 : tension d'arc en fonction du courant.....	45
Figure 4 : tension d'arc en fonction du courant.....	44
Figure 6 : tension d'arc en fonction du courant.....	45
Figure7: Macrographie pour différents couples (courant, vitesse d'avance)	

(Acier Inox 316L, épaisseur= 3mm, $\varnothing_{\text{Electrode}}=2.4\text{mm}$, $Dt=8\text{l/mn}$, $DBTW=6\text{mm}$.).....	46
Figure 8: les relations (P, H, L, A) pour 1.5m	
(Acier Inox 316L, épaisseur= 1.5mm, $\varnothing_{\text{Electrode}}=2.4\text{mm}$, $Dt=8\text{l/mn}$, $DBTW=6\text{mm}$.).....	47
Figure 9: L'évolution de la largeur de la soudure en fonction du courant (Acier 3mm).....	49
Figure 10 : L'évolution de la largeur de la soudure en fonction de la vitesse d'avance	50
Figure 11 : Macroscopie des soudures: Acier inoxydable, épaisseur 3 mm et 1.5 m	
courant (Acier 1,5mm).....	51
Figure 12 : la micrographie du métal de base.....	53
Figure 13: La micrographie de ZAT et ZF de différent courant.....	53
Figure 14: Image traitée montrant la microstructure de la zone fondue.....	54
Figure 16 : Les profils de microdureté.....	56
Figure 15 : Image montrant le grossissement de grain austénitique d'ordre de 73 μm	
(pour 120A).....	55
Figure 17: Courbe de traction d'une éprouvette pour 100A.....	58
Figure 18 : Courbe de traction d'une éprouvette pour 120A.....	58
Figure 19 : Courbe de traction d'une éprouvette pour 140A.....	59
Figure 20 : Eprouvtes avant traction.....	60
Figure 21 : Eprouvtes après traction.....	60

Liste des tableaux

Chapitre II.

Dispositif experimental

Tableau 01 : Le poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).....	28
Tableau 02 : Le poste de soudage Miller dynasty 350 ,700Maxstar 350 ,700.....	29
Tableau 03 : Les propriétés physiques de chaque type du gaz.....	30
Tableau 04 : Le pince de courant FLUKE i410/i1010.....	31
Tableau 05 : oscilloscope Agilent InfiniiVision 6000 Series.....	33
Tableau 06 : La torche TIG.....	35

Chapitre III.

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Tableau1 : Les différentes largeurs du cordon de la soudure en fonction de la vitesse d'avance pour différents courants pour une épaisseur de 3mm.....	48
Tableau2 : Les différentes largeurs du cordon de la soudure en fonction du courant pour l'Acier de 1,5mm d'épaisseur.....	49
Tableau3 :Les bons paramètres courant-vitesse.....	51
Tableau 4 : La composition chimique des matériaux de base.....	52
Tableau 5 : Résultats de la traction pour différentes éprouvettes.....	59

LISTE DES SYMBOLES

RMF	Résistance à la rupture [MPa]
σ_e	La limit d'élasticité [GPa]
Re	La limite d'élasticité [MPa]
d	Taille du grain
ZAT	Zones affectées thermiquement
Al₂O₃	L'alumine
TIG	Electrode réfractaire de tungstène
Mig/mag	Electrode fusible
SMAW	Shielded metal arc welding)
E	Entrée d'énergie [KJ / mm]
U	Tensions [V]
I	Courant [A]
V	Vitesse [Cm / min]
AC1	La fin de la transformation austénitique
AC3	Le début de la transformation austénitique
T	Temperature [°C]
t	Temps [min]
Nital	D'acide nitrique
H_v	Micodureté VICKERS
Hwdm-1	Une machine d'essai
α°	Angle de frappe
β	Angle
L	Langueur du bras [mm]
W	Travail [j]
M	Masse [kg]
g	Gravity [m/s ²]
p	Perlite
γ	Austenite
EqCr	équivalent Chrome
EqNi	équivalent Nickel
M	La martensite
F	La ferrite
A	L'austénite

INTRODUCTION GENERALE

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs tels que l'aéronautique, la construction navale, l'automobile,...etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permettent de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adoptées à son utilisation.

La technologie de soudage est un domaine multidisciplinaire où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer le procédé de soudage autant que technologie intégré.

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux, à l'âge de bronze, on soudait à la poche et à l'âge de fer on soudait à la forge. Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850, on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder. Fin 19^{ème}, la mise en œuvre de nouveaux procédés de soudage : le soudage oxyacétylénique, le soudage aluminothermique, le soudage à l'arc électrique et le soudage par résistance. Ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920. Début du 20^{ème} siècle, le soudage se répand dans tous les secteurs industriels Une nouvelle technologie est apparue, celle du soudage et techniques connexes.

Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique, industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultrasons le soudage par explosion et par diffusion, introduction croissante de la micro-électronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.

Depuis ces dernières années, les innovations portent moins sur les procédés mêmes, que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport. Ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité.

A l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100kW/cm^2 .

1. Généralités :

Le soudage est l'opération consistant à assembler par fusion locale deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre. L'opération de soudage peut s'effectuer avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. La " **soudure** ", ainsi réalisée, désigne l'alliage reliant les pièces à assembler par fusion de leurs bords avec ou sans métal d'apport . Toutes opération de soudage est procédé par une étude préalable pour réaliser un mode opératoire.

Trois types de soudures sont à distinguer :

- **La soudure homogène** : dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport (éventuel) sont de même nature.
- **La soudure hétérogène de type A** : qui associe des métaux de base avec un métal d'apport d'une autre nature.
- **La soudure hétérogène de type B** : qui associe des métaux de base et un métal d'apport de natures différentes. [1]

Le soudage peut être assimilé à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition Chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones (voir figure 1) : [1]

- **La zone fondue:** (nommée ZF) Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de déconcentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue.
- **La zone affectée thermiquement** : (nommée ZAT) Région se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

- **La zone de liaison :** (nommée ZL) cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.
- **Le métal de base :** (nommée MB) au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite zone non affectée.

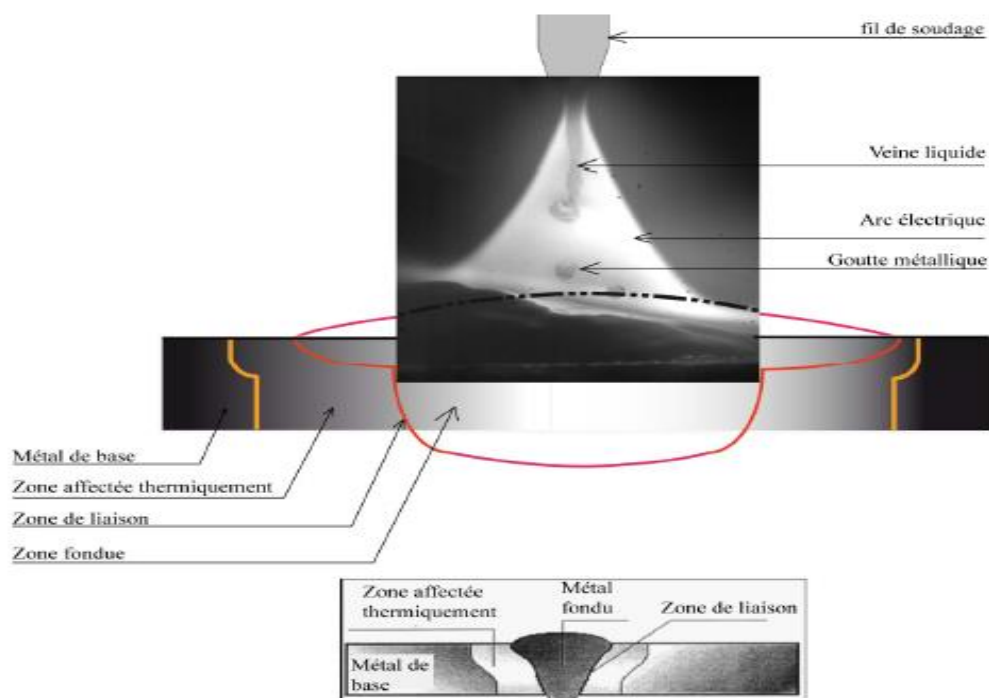


Figure 01: Différentes régions de l'arc et différentes zones de la soudure. [1]

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base et du métal d'apport additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion du métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de protection. [1]

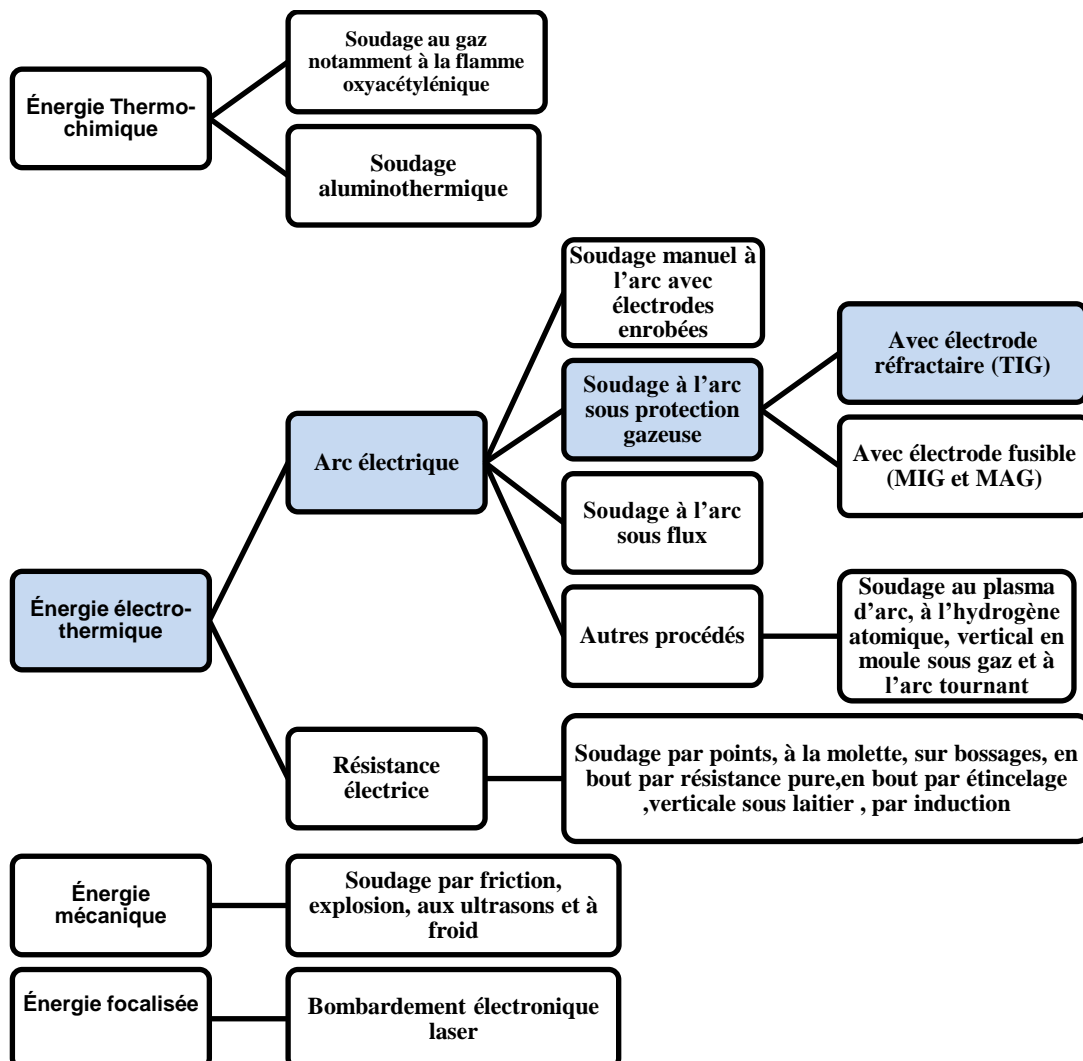
2. Classification générale des procédés de soudage :

Dans les procédés de soudage, nous trouvons deux classifications [2] :

- En fonction du type d'énergie mise en œuvre :
 - En fonction de l'état du métal à l'endroit du soudage :

2.1. Classification selon l'énergie :

Figure 02 : Classification des procédés du soudage [2].



2.2. Selon l'état du métal à l'endroit du soudage :

Deux classes sont à distinguer :

2.2.1. Soudage par fusion :

Le soudage par fusion regroupe l'ensemble des procédés de soudage où les bords des pièces à souder sont fusionnés (Pour tout type de source d'énergie utilisée).

2.2.2. Soudage par pression :

Le soudage par pression regroupe l'ensemble des procédés de soudage où on utilise une pression et un chauffage localisé sans métal d'apport. La soudure est réalisée par déformation plastique [6].

3. Soudage à l'arc avec électrodes réfractaires sous gaz inerte (procédé TIG) :

L'arc électrique est un "Plasma" de température très élevée (3500°C jusqu'à environ 15000°C). Il est produit par le passage d'un courant électrique dans un gaz qu'il ionise partiellement ou totalement [3].

La soudure électrique est une soudure autogène qui utilise, comme son nom l'indique, l'énergie électrique, qui amènera les pièces et le métal d'apport au point de fusion pour obtenir la soudure [1], on distingue dans la soudure électrique:

- La soudure à l'arc
- la soudure par points
- la soudure par molettes
- la soudure à l'argon, etc...

Le procédé de soudage à arc consiste à faire fondre les pièces à assembler au moyen d'un arc électrique constitué par une électrode fusible « baguette métallique » de même composition (électrode) [1].

L'électrode enrobée fusible ou baguette sert de métal d'apport et fond au fur et à mesure avec les bords de la pièce à souder sous l'effet de l'arc. Il s'en suit une forte liaison entre les pièces à souder [4]. On distingue:

a) La soudure électrique à l'arc, où l'arc jaillit dans les gaz et les vapeurs métalliques dégagés par l'enrobage de l'électrode.

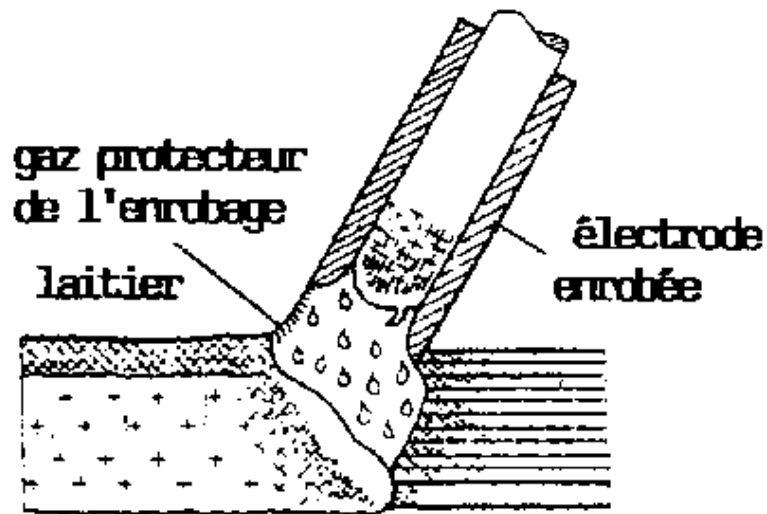


Figure 03 : La soudure électrique à l'arc.

- La soudure électrique à l'arc protégé où l'arc est recouvert par la poudre ou le flux.

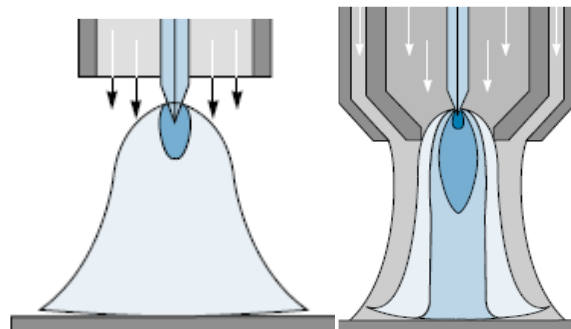


Figure 04: Procédé de soudage TIG (GTAW) et plasma (PTAW) [1].

- La soudure à l'arc en atmosphère inerte, où les électrodes, l'arc et l'extrémité à souder sont enveloppés par une protection gazeuse amenée en supplément.

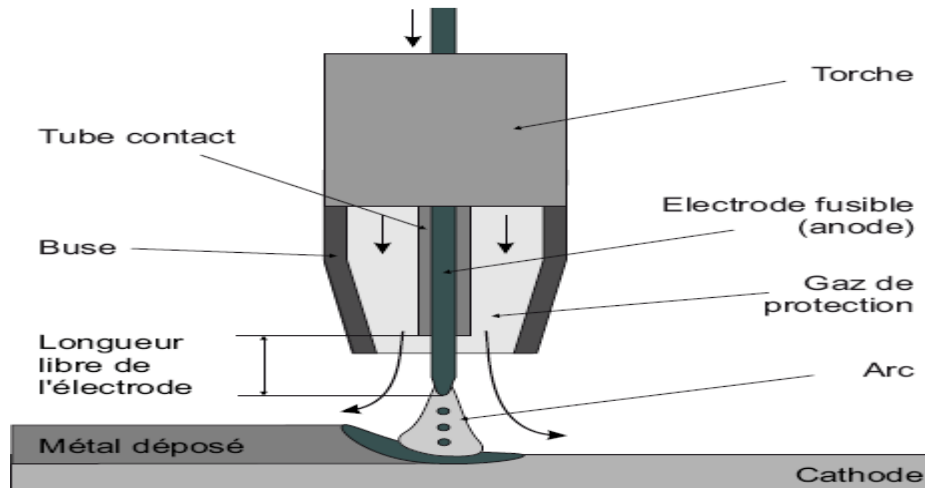


Figure 05 : La soudure à l'arc en atmosphère inerte [1].

Pour la soudure électrique à l'arc en atmosphère inerte, on se sert d'une électrode réfractaire de tungstène (soudage à l'arc sous protection gazeuse), du courant continu ou de courant alternatif. Le mode opératoire et la pièce à souder déterminent le choix du courant qui est fonction même du type d'électrode et de son diamètre.

La soudure à l'arc nécessite des courants de forte intensité à basses tensions qui diffèrent selon le mode opératoire. De crainte d'accidents, les tensions à vide ne doivent pas dépasser en courant continu 100 V et en courant alternatif 70 V [1].

Dans la soudure à main, il est fréquent que les courants atteignent jusqu'à 500 A. L'intensité du courant doit être réglable. Les caractéristiques de l'arc et de son amorçage par court-circuit exigeant une limitation du courant de soudure, la soudure à l'arc demande des sources d'alimentation particulières.

Il faut aussi observer pendant l'opération du soudage :

- l'effet de soufflage pour se protéger contre les accidents.
- le rayonnement intensif de la chaleur (infrarouge).
- la radiation lumineuse intensive.
- le haut pourcentage en rayonnement ionisant.

On entend par effet de soufflage, la dérivation de l'arc par l'effet électromagnétique du courant. Celui-ci exerce en effet une influence sur l'exécution et la qualité de la soudure .

4. Soudage TIG (Tungstène Inert Gas) :

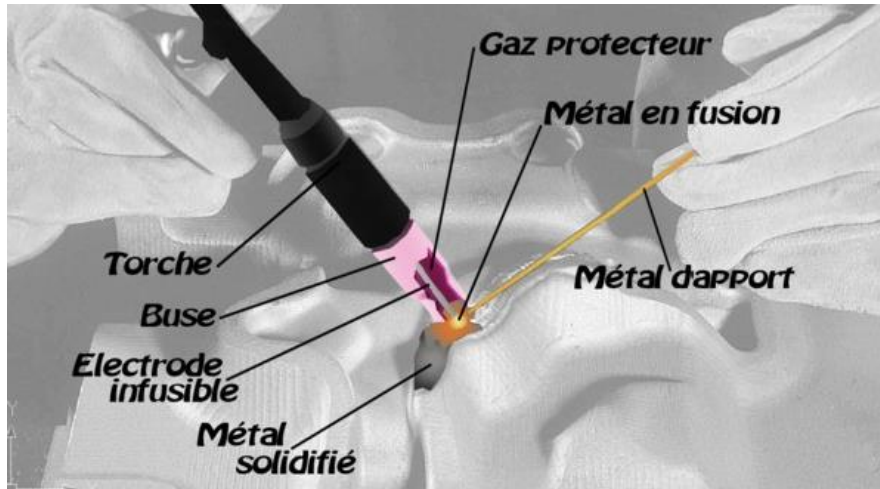


Figure 6: description de la torche TIG [8].

4.1. PARAMETRES TIG [9]:

- la vitesse de soudage.
- le choix et le débit du gaz.
- le choix du métal d'apport.
- le choix, l'affutage et le diamètre de l'électrode réfractaire.

4.2. ALIMENTATION ELECTRIQUE DANS LE PROCEDE DE SOUDAGE TIG:

En fonction des matériaux, des dimensions et des épaisseurs à souder, l'opération de soudage s'effectue en courant continu à polarité directe, en courant pulsé, ou en courant alternatif [8] :

- le courant continu à polarité directe (pôle négatif à l'électrode) s'exécute pour le soudage de tous les métaux.
- le courant pulsé, qui consiste à développer des périodes de hautes et de basses intensités.
- le courant alternatif est principalement utilisé pour le soudage des alliages d'aluminium. L'alternance de polarité craque ainsi la couche d'alumine réfractaire pour permettre ensuite la pénétration [9].

4.3. GAZ UTILISES EN PROCEDE TIG [3]:

- L'argon pur est le plus couramment utilisé en soudage TIG.
- L'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait d'une vitesse de soudage plus grande. Cependant, le coût du soudage est plus important.
- L'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc une vitesse de soudage améliorée. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect plus esthétique du cordon de soudure.
- L'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon en très petite quantité pour souder des aciers duplex [3].

4.4. LES ELECTRODES NON FUSIBLES:

On peut considérer qu'il existe **4 types d'électrodes** non fusibles qui peuvent être utilisées en soudage TIG [10]:

- **Tungstène pur** (extrémité verte) utilisée pour les courants alternatifs (alliages d'aluminium).
- **Tungstène avec oxyde de zirconium** utilisé aussi en courant alternatifs (alliages d'aluminium).
- **Tungstène thorié** (couleur d'extrémité rouge) utilisée pour les aciers de construction et aciers inoxydables.
- **Tungstène cérié** qui est moins utilisé.

5. Le procédé de soudage MIG/MAG (Metal Inert Gas – Metal Actif Gas):

La soudure à l'arc est le type générique de plusieurs méthodes et principes de soudage utilisant l'arc électrique pour élever la température des métaux à souder jusqu'au point de fusion [14].

Le principe de la soudure à l'arc tient dans le principe de l'élévation de température au point de fusion par l'utilisation d'un arc électrique. C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par l'électricité qui élève la température au point de soudure jusqu'à celle requise pour la fusion du métal [14].

Le procédé de soudage avec sous protection gazeuse avec fil fusible MIG/MAG est aussi qualifié de procédé semi-automatique. Selon si le gaz protecteur est inerte ou actif durant la fusion on parlera de procédé MIG ou de procédé MAG respectivement [1].

- Le procédé MIG : (Metal Inert Gaz) : Utilisation de gaz inerte (Argon ou Hélium) ;
- Le procédé MAG (Metal Active Gaz) : Utilisation de gaz actif (mélange Argon/CO₂ ou Argon/oxygène).

Dans le procédé de soudage MIG/MAG, plutôt que de produire un laitier protecteur par fusion de l'enrobage, c'est un gaz de protection (inerte ou actif) qui protège le bain de fusion de l'oxydation produite par le milieu ambiant [14].

5.1. Technologie du procédé MIG-MAG :

Le procédé de soudage MIG/MAG utilise généralement un fil continu de soudage plutôt qu'une électrode soudure en raison de la forme de la torche qui oriente du gaz en plus de porter l'électrode. C'est pourquoi un poste à souder MIG/MAG comporte un dévidoir continu de fil de soudure.

Le gaz est stocké dans une bouteille raccordée à la torche via une électrovanne pour contrôler le débit et un détendeur pour réguler la pression. Le poste à souder à l'arc est un générateur électrique relié par un câble à la pièce à souder et par un autre à la torche de soudage (le fil). Une unité de contrôle semi-automatique ou automatique permet de faire varier l'intensité du courant de soudage en fonction de l'arc désiré ainsi que la vitesse d'avance du fil à souder [14].

6. La physique de soudage :

6.1. Les paramètres modifiables par le soudeur :

Les conditions de soudage s'établissent en fonction de l'assemblage à réaliser (matière, épaisseur, position de soudage,...). Le premier travail du soudeur avant la réalisation de la soudure est de déterminer le matériel à utiliser : poste de soudage (automatique, manuel) [9].

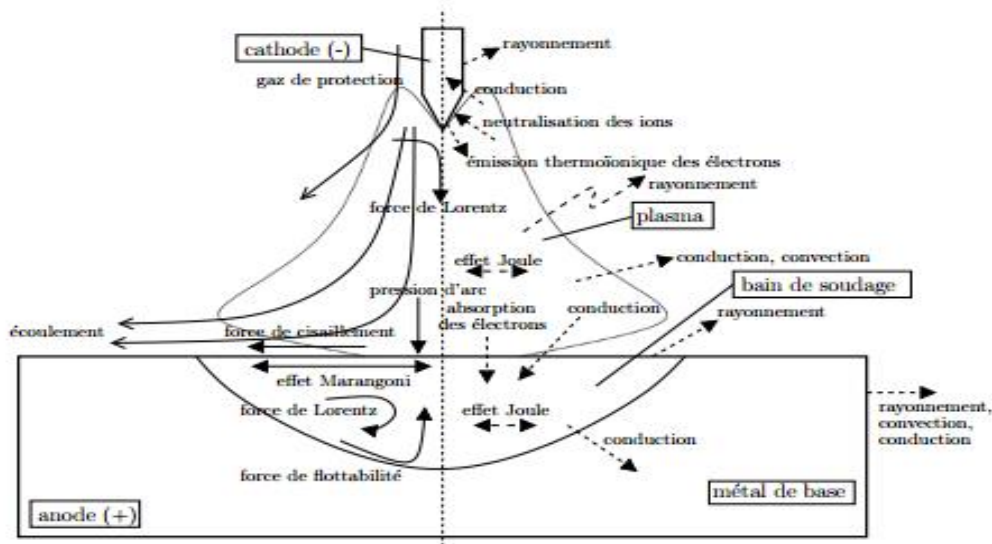


Figure 07 : Phénomènes physiques pris en compte pour la description de l'arc et du bain de soudage [1].

Le type de courant, mais aussi de déterminer les paramètres opératoires pour obtenir la meilleure soudure possible. En particulier, il doit choisir [11]:

- le type de courant (pulsé, continu,...), l'intensité (d'une dizaine d'Ampère à 400 A, 100 A est une valeur courante).
- la hauteur d'arc (quelques millimètres), 2 – 3 mm sont des valeurs usuelles.
- la tension (une dizaine de volts) si la hauteur d'arc n'est pas fixée.
- l'électrode de soudage (diamètre, angle d'affûtage, matériau) et le diamètre de la buse.
- le choix et le débit du gaz de couverture (entre 5 et 20 l·min⁻¹).
- la vitesse de soudage (quelques dizaines de cm·min⁻¹).

6.2. Les modèles physiques de la littérature :

Les différents phénomènes physiques mis en jeu déterminent l'écoulement et la répartition thermique dans l'arc électrique, la cathode, et la pièce dont le bain de soudage. Une grande partie de ceux-ci sont représentés sur la figure (8). Ce modèle physique, que l'on appellera modèle de référence, constitue l'état de l'art en ce qui concerne la modélisation du soudage à l'arc TIG où les phénomènes physiques interagissant dans la cathode, l'arc et la pièce sont traités de manière couplée. De nombreux phénomènes physiques y sont négligés du

fait de la difficulté liée à leur implémentation dans un modèle numérique et/ou tout simplement parce qu'ils sont mal connus. Afin d'exposer les possibilités d'amélioration des modèles arc/bain couplant les physiques du plasma et du bain, des modèles plus complets traitant soit le plasma d'arc (Modèles arc) soit le bain de soudage (modèles bain) seront aussi présentés. Tout d'abord, afin d'introduire les modèles arc/bain, les différentes zones caractéristiques de l'arc de soudage sont présentées [1].

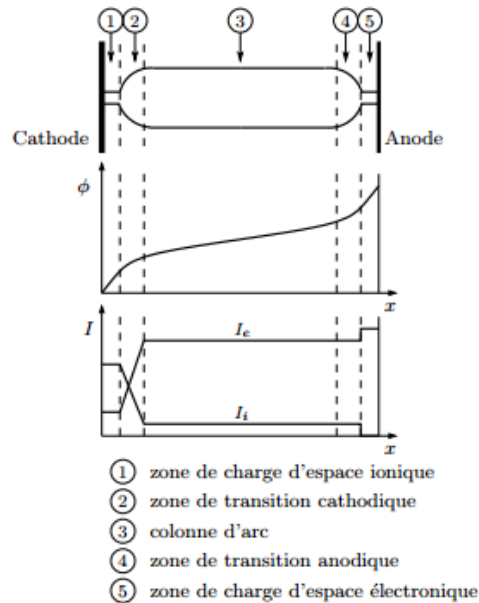


Figure 08 : Répartition du potentiel électrique ϕ dans l'arc et du courant I avec le courant électronique et I_i le courant ionique [1].

6.2.1. Les différentes zones caractéristiques de l'arc de soudage TIG :

L'arc peut se diviser en cinq zones caractéristiques qui se distinguent par des variations de pente du courant et du potentiel électrique. La figure schématise cette répartition. Les courants d'ions et d'électrons sont notés respectivement I_i et I_e [8].

6.2.1.1. La colonne d'arc :

La zone centrale (la colonne d'arc) qui représente la majorité de l'espace est un plasma souvent considéré comme électriquement neutre et présente une faible chute de tension. Ce plasma se compose d'atomes neutres et éventuellement de molécules, d'ions positifs (une ou plusieurs fois chargés selon la valeur de la température), d'électrons et d'ions négatifs si le gaz

est plasmagène. Dans cette colonne d'arc, le gaz est à une température suffisamment élevée pour être conducteur électrique. Par exemple, pour l'argon avec un courant de soudage de 200 A, la température de la colonne à la pointe de la cathode est d'environ 20000 °K . A telles températures, les molécules de gaz sont dissociées complètement ou partiellement en atomes ionisés. Dans cette colonne d'arc, les électrons sont chauffés par effet Joule. Ensuite, le surplus d'énergie est transmis aux particules lourdes (neutres et ions) surtout au travers de collisions élastiques. L'efficacité du transfert d'énergie par ces collisions élastiques est faible, car il est proportionnel au rapport des masses des particules en présence [1].

6.1.2.1. Les zones cathodique et anodique :

Ces zones, où le potentiel électrique baisse considérablement sur une courte distance, sont les interfaces entre le plasma et les électrodes. On a, d'une part, la zone cathodique composée d'une zone de charge d'espace ionique et d'une zone de transition, et d'autre part, la zone anodique partagée entre une zone de transition et une zone de charge d'espace électronique. Ces deux zones proches des électrodes, ont une épaisseur de l'ordre de 1 à 10 mm. Parce que l'équilibre thermodynamique local et la neutralité électrique ne sont pas respectés sur l'ensemble de leur domaine, les modélisations de ces zones sont différentes de celles de la colonne d'arc. Dans ce qui suit, leur structure est présentée brièvement. Les phénomènes physiques impliqués sont décrits plus en détail dans le livre de Vacquié.

La zone cathodique : La cathode émet des électrons et recueille des ions. La zone cathodique peut être considérée comme un espace limite par deux plans parallèles, l'un émettant des électrons représentant la cathode et l'autre émettant des ions représentant la colonne d'arc. Elle est composée :

- d'une zone de charge d'espace ionique (d'environ 1 μm pour de l'argon à 1 atm) où, globalement, la neutralité électrique n'est pas respectée. Cette charge d'espace produit une chute de potentiel électrique appelée chute cathodique.

- d'une zone d'ionisation. Les électrons issus de la cathode transfèrent par collisions leur énergie cinétique acquise par effet Joule aux molécules de gaz qui vont alors s'ioniser. Cette zone est globalement neutre mais les températures des différentes espèces présentées sont différentes.

La zone anodique : C'est l'espace réalisant la transition entre la colonne de plasma électriquement neutre et la pièce. Elle joue essentiellement le rôle de collecteur d'électrons. Elle se

divise entre une zone de charge d'espace négative caractérisée par une chute de tension anodique, et, comme dans la zone cathodique, d'une zone d'ionisation/recombinaison en déséquilibre thermodynamique local [10].

7. Aspect thermique du soudage :

Les caractéristiques mécaniques d'un acier pouvant être profondément modifiées en jouant sur le traitement thermique de la même façon, les cycles thermiques engendrés par l'opération de soudage vont modifier les propriétés de l'acier dans la zone affectée thermiquement et vont conditionner celles de la zone fondue. Généralement, on caractérise le cycle thermique de soudage par le temps qui s'écoule pour passer de 800 à 500 ° C ou de 700 à 300°C [15].

Ces critères ont été retenus parce qu'il caractérise les conditions de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite et doivent donc régir les transformations structurales. Les principaux facteurs qui ont une influence sur le cycle thermique sont:

- l'énergie de soudage.
- la forme du joint.
- le procédé de soudage.
- l'épaisseur du métal de base.
- la température de préchauffage et la température entre passes.

8. Aspect chimique :

8.1. Constitution du métal fondu :

La composition chimique du métal fondu résulte du mélange du métal déposé par le produit de soudage avec le métal de base. La proportion de métal de base dans un cordon de soudure est caractérisée par le taux de dilution.

$$\text{Taux de dilution} = \frac{\text{Surface (B)}}{\text{Surface (A + B)}}$$

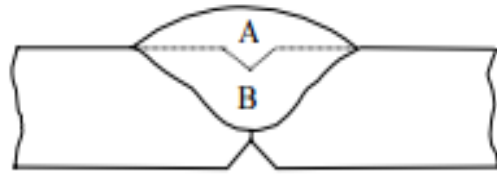


Figure 09: Influence du métal de base sur la composition du métal fondu

9. Influence de la vitesse de refroidissement :

En métallurgie, les diagrammes de transformations en refroidissement continu permettent d'avoir une idée précise de la structure et de la dureté d'un acier en fonction de la vitesse de refroidissement après austénitisation.

Ces diagrammes sont spécifiques à chaque acier et à chaque condition d'austénitisation (grosseur du grain austénitique). En soudage, de tels diagrammes n'existent pas et n'existeront sans doute jamais car les variations de vitesse de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite s'accompagnent toujours d'une variation des conditions d'austénitisation mais il n'y a toutefois pas de relation biunivoque entre ces 2 facteurs : l'augmentation de l'énergie de soudage, de la température de préchauffage, de l'épaisseur des pièces à assembler ou la mise en œuvre de procédés de soudage différents n'ont pas des conséquences similaires sur les parties supérieures (domaine austénitique) et inférieures (domaine de transformation) du cycle thermique de soudage.

Quoi qu'il en soit, si les inclusions nécessaires sont présentes, il a été clairement montré qu'une augmentation de la vitesse de refroidissement se traduit, dans un premier temps au moins, par un accroissement de la proportion de ferrite aciculaire et s'accompagne d'une amélioration de la ténacité. Dans un second temps, on peut faire apparaître des structures plus trempées si la trempabilité du métal fondu est grande [12].

10. Les principaux défauts de soudage :

Nous n'aborderons pas ici les défauts ayant une origine purement opératoire tels que caniveaux, manque de pénétration, collage ... ; nous envisagerons uniquement les défauts internes que sont les fissures à chaud, les fissures à froid, les fissures au réchauffage et les porosités. Nous nous attacherons à expliciter les critères qui permettent de les identifier et à montrer les mécanismes de formation afin d'en déduire les précautions à prendre pour les éviter ou les remèdes à apporter lorsque les problèmes apparaissent [11].

10.1. La fissuration à chaud :

Sous ce vocable nous regroupons les fissures de solidification, les fissures de liquation et les fissures résultant d'un manque de ductilité à haute température [11].

10.1.1. Les fissures de solidification :

Elles apparaissent en fin de solidification. Elles peuvent être internes ou déboucher en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces inter dendritiques et suivent donc les directions de solidification. De ce fait, elles sont en tous points perpendiculaires aux isothermes. Comme elles se forment à haute température, elles sont oxydées au contact de l'air lorsqu'elles débouchent en surface. Enfin elles sont toujours larges du fait de la contraction du métal environnant durant le refroidissement [1].

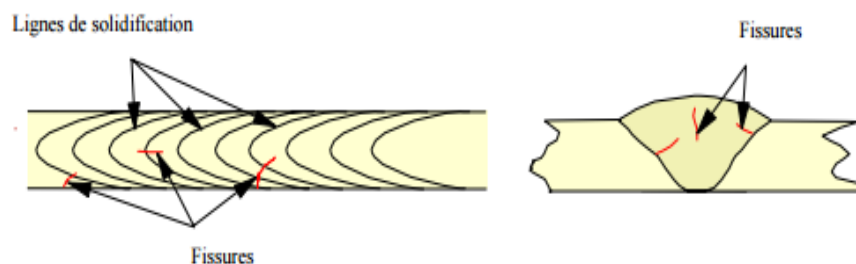


Figure 10 : Localisations des fissures de solidification

Les facteurs ayant une influence sur la fissuration à chaud sont pour une part tributaire de l'analyse du métal fondu et pour une autre part, de la procédure de soudage.

Un grand intervalle de solidification, la présence de composés à bas point de fusion, font que les phases solide et liquide vont coexister dans un grand domaine de température. Durant le refroidissement dans ce domaine, le liquide se transforme en solide en se contractant (variation de volume à la solidification) tandis que le solide déjà formé se contracte selon son propre coefficient de dilatation.

On comprend alors que plus l'intervalle de solidification est grand, plus on a de risque d'avoir un manque de matière en fin de solidification et qu'une fissure apparaisse dans les zones qui se solidifient en dernier c'est à dire dans les espaces inter dendritiques. L'influence de la limite d'élasticité du métal de base et du bridage des pièces à assembler est d'une autre nature.

Lorsque la zone fondue refroidit, elle se contracte si bien que des contraintes vont se développer si le retrait ne peut pas se faire librement. Ces contraintes de retrait vont s'appliquer sur le métal fondu en cours de refroidissement, l'obligeant à se déformer ce qu'il pourra ou non supporter

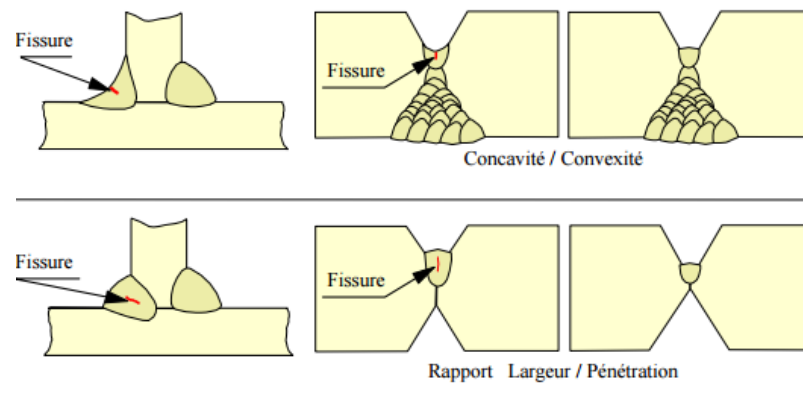


Figure10 : Influence de la forme des cordons sur la fissuration à la solidification [11].

10.1.2. Les fissures:

Les fissures de liquation se rencontrent principalement dans la zone affectée thermiquement du métal de base au voisinage de la zone de liaison. Elles peuvent aussi survenir dans le métal fondu lors de la réaffectation thermique par une passe ultérieure mais alors, elle se prolonge généralement sous forme de fissure de solidification dans la passe en cours d'exécution. Elles sont localisées dans la partie de la ZAT portée à des températures comprises dans l'intervalle de solidification du matériau, intervalle qui sera d'autant plus

grand que le matériau comporte à l'origine des micro ségrégations d'éléments qui favorisent la formation de constituants à bas point de fusion. Sous l'effet du retrait associé au refroidissement, ces zones de fusions partielles auront d'autant plus de chance de donner naissance à des fissures qu'elles s'étendent profondément à l'intérieur de la ZAT. C'est ce type de mécanisme que l'on rencontre fréquemment lors du soudage des produits moulés ; il est très voisin du mécanisme de formation des fissures de solidification dans le métal fondu [12].

Une autre cause d'apparition de fissures de liquation peut être la formation d'un eutectique autour d'une phase en cours de dissolution dans la matrice. Cela peut se produire lorsqu'une phase thermodynamiquement stable à la température ambiante ne l'est pas à haute température et que la remise en solution n'a pas pu être complète ou l'homogénéité chimique atteinte du fait de la rapidité des cycles thermiques de soudage en regard des cinétiques de dissolution et de diffusion. Dans ce cas, une phase liquide va apparaître à l'intérieur de la ZAT et pénétrer les joints de grain environnants entraînant leur liquation et leur fissuration au refroidissement sous l'effet du retrait.

La sensibilité à la fissuration par liquation d'un matériau peut être évaluée au moyen d'essais de traction à chaud pratiqués au cours d'une simulation de cycle thermique de soudage durant la phase de chauffage et la phase de refroidissement. Cet essai permet de déterminer l'écart entre la température à laquelle la striction à rupture devient nulle au chauffage et la température de rétablissement d'une certaine capacité de déformation au refroidissement. Plus cet écart est grand, plus sensible est le matériau [3].

10.1.2.1. La fissuration à froid :

Ces fissures apparaissent à basse température (< 200 °C). De ce fait, elles sont fines et présentent une surface non oxydée. Elles n'ont pas d'orientation privilégiée par rapport à la microstructure. Elles se développent le plus souvent dans la zone affectée par la chaleur mais peuvent parfois se rencontrer dans le métal fondu lorsque celui-ci possède une très haute limite d'élasticité. Elles sont tributaires du champ de contraintes ce qui explique qu'elles prennent naissance dans les zones de concentration que constituent les défauts de surface (mauvais mouillage, caniveaux) ou les discontinuités liées à la conception de l'assemblage (pénétration partielle par exemple) [11].

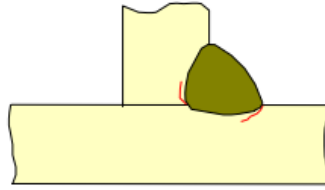


Figure 12: Exemple de fissuration à froid [11].

Pour apparaître, ces fissures nécessitent la conjugaison de trois facteurs:

- une structure peu ductile (martensite).
- des contraintes.
- de l'hydrogène.

L'influence respective de ces 3 facteurs est parfaitement mise en évidence au travers des essais d'implants. Pour effectuer ces essais, on prélève tout d'abord des cylindres du matériau que l'on veut caractériser. Une entaille de géométrie bien définie est usinée au voisinage d'une des extrémités.

Le barreau est implanté dans une plaque support puis un cordon de soudure est effectué de telle sorte que l'entaille du barreau soit située dans la zone affectée par la chaleur du cordon de soudure. Durant le refroidissement, une charge est appliquée à l'autre extrémité du barreau et est maintenue pendant plusieurs jours. L'ensemble est ensuite découpé afin d'examiner si des fissures se sont développées à l'extrémité de l'entaille. L'essai est répété en appliquant différentes charges afin d'évaluer la contrainte minimale de fissuration de la structure en fond d'entaille. Il est aussi répété en modifiant les conditions de soudage ce qui permet de mettre en évidence l'influence du $\Delta t_{800/500}$ et de tracer la courbe de fissuration. En parallèle on trace la courbe de dureté sous cordon en fonction de ce même $\Delta t_{800/500}$, l'évolution de dureté traduisant en fait l'évolution de la structure [8].

10.1.3. La fissuration au réchauffage :

La fissuration au réchauffage, de caractère inter granulaire, se rencontre essentiellement dans la zone affectée thermiquement à gros grains et occasionnellement dans le métal fondu. Elle s'initie lors du traitement thermique post-soudage ou en service à température élevée .

En pratique, pour minimiser les risques lorsqu'un matériau sensible doit être utilisé, on aura intérêt à [1]:

- Concevoir autant que possible les joints de manière à réduire le niveau de bridage.
- choisir un produit de soudage ayant les plus faibles caractéristiques de traction à chaud compatibles avec l'application.
- Utiliser un procédé de soudage à faible énergie afin de limiter le volume des passes et réduire ainsi la dimension de la ZAT à gros grains.
- Répartir les passes pour réausténitiser les zones à gros grains créées par les passes précédentes et diminuer ainsi la taille des grains.
- Prévoir des séquences de soudage permettant de minimiser les contraintes résiduelles.
- S'assurer du bon mouillage des passes de finition et de l'absence de caniveau de manière à éviter les concentrations de contraintes.

11. Eléments constitutifs d'un poste de soudage :

L'appareillage nécessaire pour l'application des procédés semi-automatiques de type GMAW consiste en une source de courant, un dévidoir, un pistolet ou une torche à souder, un câble de retour et une bouteille de gaz, un manodétendeur-débitmètre et sa canalisation [1].

11.1. Le générateur :

Le générateur de courant continu, généralement associé à un boîtier de commande permettant l'ensemble des réglages (U et I), doit avoir une gamme de courant et d'intensité

correspondant au mode de transfert souhaité. Ce mode de transfert, comme nous l'avons précisé précédemment est choisi, à partir du boîtier de commande en fonction de l'assemblage à réaliser, c'est à dire des épaisseurs à souder, de la préparation, de la position de soudage [1].

11.2. Le fil :

Le fil tien un rôle prépondérant dans la formation de l'arc électrique et donc dans l'opération d'assemblage, que ce soit par son diamètre ou par sa composition. En effet, plus le diamètre du fil sera grand, plus le taux de dépôt et la profondeur de pénétration décroîtront, plus la largeur du cordon augmentera et plus l'énergie nécessaire à la fusion sera élevée.

Le fil, de part sa composition, apporte des éléments susceptibles de modifier les caractéristiques de la soudure. Les éléments d'alliages doivent donc être ajustés afin d'obtenir une soudure dont les propriétés sont au moins égales à celle du métal de base.

Le choix de la composition peut aussi conduire à une meilleure stabilisation de l'arc, une réduction des projections et des fumées, et une diminution du taux d'oxygène dans la soudure. Le choix du fil pour l'opération de soudage s'effectue en tenant compte de quatre points de l'état de surface de la pièce, de la nature de la pièce à souder, du gaz de protection utilisé ainsi que du degré de résilience requis [1].

11.3. Le dévidage

Le dévidage est la fonction qui assure l'entraînement du fil électrode de la bobine jusqu'au tube contact. Son rôle est primordial car la vitesse du fil détermine la qualité du soudage et la stabilité de l'arc. Le fil devant s'arrêter instantanément, les supports de bobine sont équipés d'un frein. Dans ce but, les dévidoirs sont munis d'un système d'entraînement du fil utilisant des roues, appelées galets d'entraînement, qui s'appuient de chaque côté du fil. En tournant, les galets entraînent le fil dans la gaine de la torche de soudage [1].

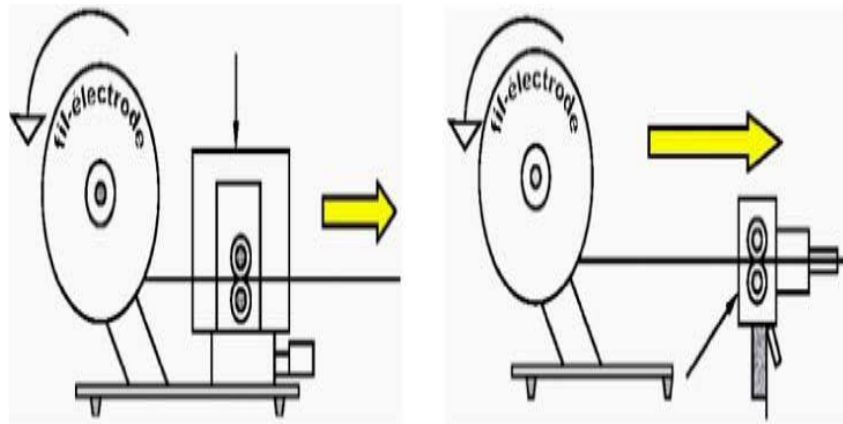


Figure 13: Le système de dévidage [1].

On distingue trois types de dévidoirs selon que le fil est poussé, tiré ou les deux. Ainsi, les dévidoirs séparés de la torche sont à mode de dévidage «*poussé*», tandis que ceux intégrés aux pistolets sont à mode «*tiré*» depuis la torche [1].

11.4. La torche :

Une torche ou un pistolet, qui assure l'arrivée et le guidage final du fil, dirige l'arc, assure le contact électrique et amène le gaz de protection au travers d'une buse. La torche, représentée sur la figure, est reliée au générateur par l'intermédiaire d'un faisceau regroupant le fil électrode, le câble de puissance, le conduit de gaz et dans certain cas une arrivée et un retour d'eau en vue du refroidissement [1].



Figure 14: Torche de soudage.

Il existe également des pistolets à dévidoir intégré possédant, en plus un petit boîtier qui peut contenir une bobine de 100 mm de diamètre, soit la grosseur nécessaire pour porter un kilogramme de fil d'acier ou un demi-kilogramme de fil d'aluminium. Le fil n'a alors à être tiré que sur une très courte distance, ce qui est moins exigeant pour le petit moteur intégré à la poignée.

La torche permet de régler la longueur de la partie terminale P_t , c'est à dire la longueur de fil sortie du tube de contact. Cette dernière a une grande influence sur la fusion du fil car elle se trouve soumise à un échauffement par effet Joules.

$$R = \rho P_t$$

Avec :

ρ : résistivité. R : résistance du fil.

Ainsi, pour une énergie donnée, et lorsque la longueur terminale croît, la résistance croît et l'énergie dissipée par effet Joules ($W=R.I^2.t$) est plus importante. Le fil fond plus vite, déplaçant le point d'équilibre vers une vitesse supérieure. Inversement, pour une diminution de P_t , il faudra diminuer la vitesse de dévidage [1].

11.5. Le gaz :

Lors des travaux de soudage, les métaux ont tendance à réagir avec l'oxygène et l'azote contenus dans l'air pour former des oxydes et des nitrures. L'oxygène, très réactif avec le carbone, tend également à former du monoxyde de carbone. Ces différentes réactions contribuant à faire apparaître de nombreux défauts de soudage.

Dans les procédés de soudage à l'arc avec électrode fusible, nous distinguons les méthodes MIG et MAG par la nature du gaz utilisé. Dans le cas du MIG, le gaz est inerte, c'est à dire

qu'il ne réagit pas avec le métal. Inversement, pour le MAG, le gaz doit réagir et donc être actif [1].

Parmi les gaz inertes, nous noterons particulièrement la présence de [1]:

- **L'argon** (Ar) qui est un gaz inerte monoatomique, c'est-à-dire dont la molécule se compose d'un seul atome. Plus lourd que l'air, il a tendance à descendre en sortie de la buse ce qui assure une bonne couverture du bain de fusion.
- **L'hélium** (He) : Beaucoup plus léger que l'air, ce gaz monoatomique a tendance à s'élever à la sortie de la buse de soudage. Le débit d'hélium requis pour assurer une bonne couverture du bain de fusion représente pratiquement le double de celui nécessaire avec l'argon (sauf lorsqu'on soude au plafond).

Dans le cas des gaz actifs :

- **Le gaz carbonique** (CO₂) : Un atome d'oxygène peut être libéré pendant le soudage et réagir avec le métal en fusion pour l'oxyder. On dit que c'est un gaz carburant; le carbone qu'il contient a tendance à s'incorporer au métal en fusion. Ce gaz possède les mêmes caractéristiques que l'argon en ce qui concerne la couverture du bain de fusion. Entraînant beaucoup de projections lorsqu'il est employé seul, on l'utilise fréquemment en mélange avec l'argon pour les aciers à faible teneur en carbone.

1. Introduction :

Avant de commencer tout travail expérimental, de façon générale et observation micrographique de façon particulière, il est conseillé de bien préparer ses échantillons afin de parvenir à des résultats corrects et adéquats, pour cela on doit suivre un enchainement de procédures.

Les différentes techniques et étapes de préparation, de caractérisation ainsi que les techniques de mesure sont bien expliquées dans ce chapitre. Le présent travail est réalisé en vue d'étudier les possibilités d'appliquer les nouvelles variantes des procédés de soudage GTAW (Gaz Tungsten Arc Welding) et GMAW (Gaz Metal Arc Welding) .L'étude est consacrée à la compréhension du principe de fonctionnement de ces procédés, en utilisant une plateforme équipée d'un système d'acquisition de données permettant les mesures synchronisées de tension, intensité, fréquence, vitesse d'avance et la vitesse du fil.

2. Schéma général :

Le dispositif expérimental présenté sur la « Figure 01 » comprend un générateur, un système de soudage automatique et un ensemble de moyens de diagnostics.

Dans la pratique, l'opération de soudage s'effectue en déplaçant la torche de soudage alors que la pièce à souder reste immobile. De ce fait, pour enregistrer une image nette de l'arc, une mise au point automatique serait alors nécessaire. En plus, un arc en mouvement serait le siège de perturbations qui pourraient être indépendantes des paramètres directes ou indirectes du soudage. Par conséquent, dans les expériences que nous avons menées c'est la pièce à souder qui se déplace et non la torche. Le déplacement horizontal de la pièce, perpendiculaire à la direction de soudage, est assuré par une table micrométrique. L'ensemble, table micrométrique et pièce à souder, est monté sur un chariot à vis sans fin entraîné par un moteur pas à pas, assurant le déplacement dans la direction de soudage au cours des essais.

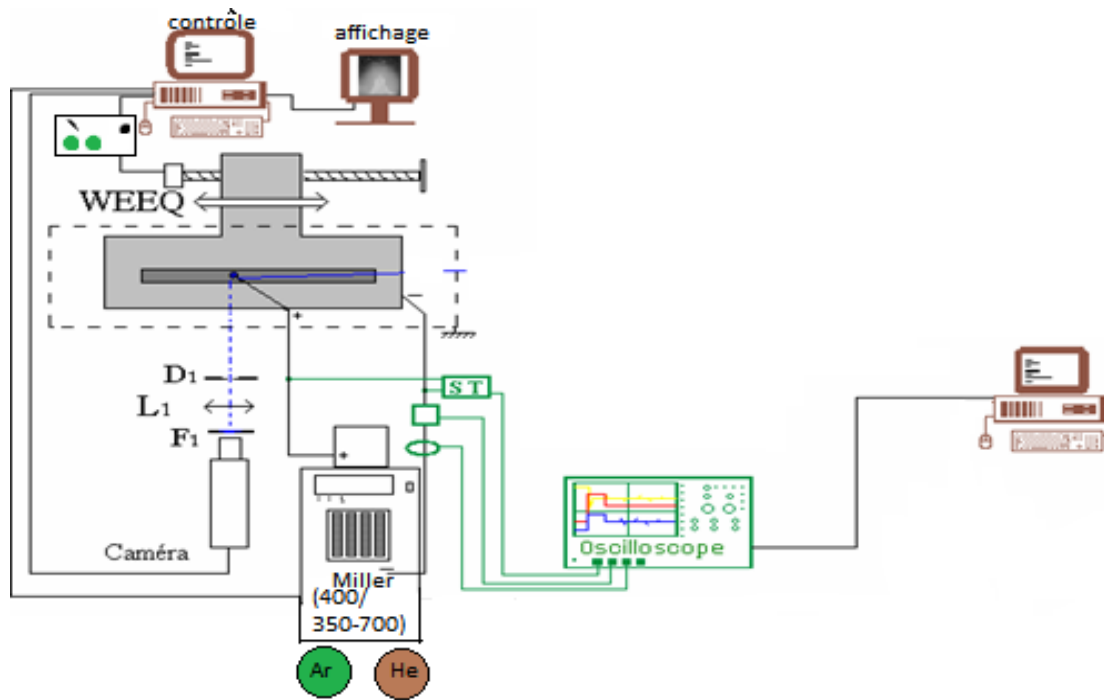


Figure 01: Dispositif expérimental.

3. Le dispositif de soudage :

3.1. Le poste :

3.1.1. Le poste multiprocédé :

Le poste de soudage multiprocédé utilisé est Miller de type PipeWorx 400 d'une source de puissance 380-400Volt CE équipé de plusieurs procédés, on s'intéresse par le TIG et le MIG/MAG qui est représenté sur la figure.

L'installation de soudage MIG-MAG utilisant une source de puissance transistorisée pilotée par microprocesseur 16 bits. Le microcontrôleur assure également la gestion du cycle de soudage, la mémorisation des paramètres, les sécurités et les gestions de la face avant (sélection du programme de soudage, pré-affichage, affichage et maintien des paramètres de soudage après soudage). Les caractéristiques du poste sont représentées sur les tableaux. La gamme de courant utilisable s'étend de 20 à 350 A. Pour la vitesse d'avance du fil, il est possible de choisir une valeur comprise entre 1 et 20 m/mn. Le pas du réglage est de 2 A pour le courant et de 0,1 m/mn pour la vitesse d'avance du fil. La tension à vide est d'environ 65

V, en fonctionnement, elle varie de 14 à 45 V, selon les paramètres de soudage utilisés. Le diamètre du fil-électrode utilisable est compris entre 0,8 et 1,6 mm.



Figure 02: photo du poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).

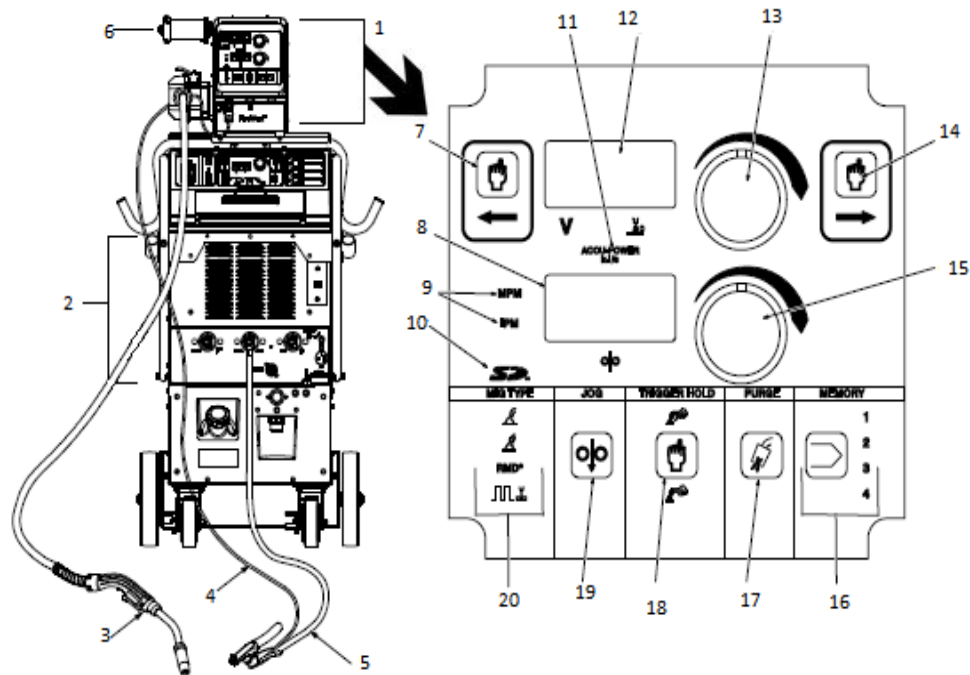


Figure 03: schéma du poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).

Tableau 01 : Le poste de soudage Miller PipeWorx 400 (380/400Volt).

1	Procédé MIG/MAG	11	Indicateur puissance
2	Procédé TIG	12	Tension
3	La torche	13	Bouton de réglage de tension
4	Le sens de câble de vol	14	Le bouton de contrôle droit pour le sectionnement
5	Câble de soudure (-)	15	Bouton de réglage de la vitesse
6	Porte fils	16	Bouton de mémoire
7	Le bouton de contrôle gauche pour le sectionnement	17	bouton de purge
8	Affichage de vitesse de fil	18	Prise de déclencheur
9	Unités de vitesse de fi	19	Bouton d'essai
10	Indicateur carte mémoire	20	Type indicateur de MIG

3.1.2. Le poste TIG :

Le poste de soudage multiprocédé utilisé est Miller de type Dynasty 350, 700 (Maxstar) d'une source de courant 700 Ampère. Il est représenté sur la figure.



Figure 04: photo du poste de soudage Miller Dynasty 350,700 Maxstar 350,700.

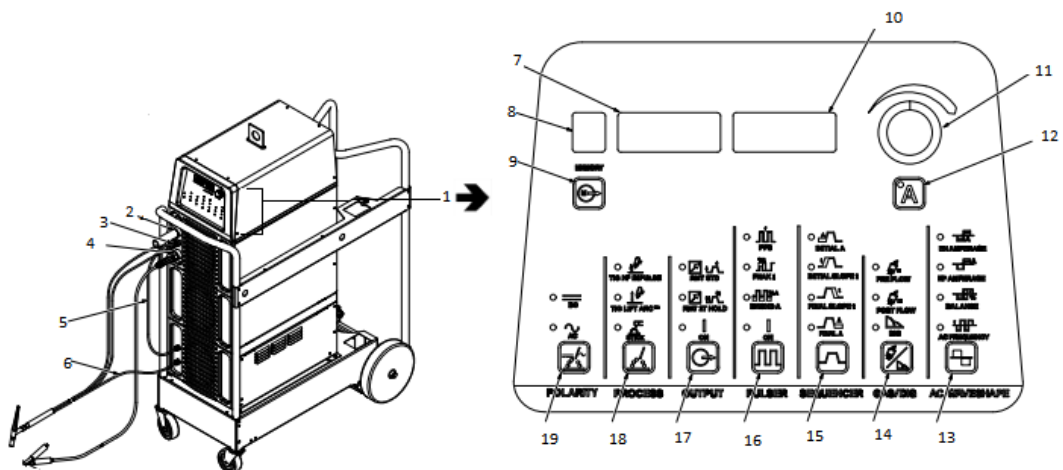


Figure 05: schéma du poste de soudage Miller Dynasty 350,700 Maxstar 350,700.

Tableau 02 : Le poste de soudage Miller Dynasty 350,700 Maxstar 350,700.

1	Commande TIG	11	Bouton de contrôle
2	Production de soudure d'électrode	12	ampérage et minuteur de tache
3	Connexion avec gaz	13	La forme d'onde
4	Connexion de l'eau (pour incendier)	14	Contrôle gaz
5	Connexion de l'entrée de l'eau	15	contrôles de compteur séquentiel
6	Connexion de la sortie de l'eau	16	contrôles Pulser
7	L'ampèremètre et paramètres de l'affichage sélectionné	17	contrôles produits
8	Montre la mémoire active	18	Contrôles du processus de cycle
9	Mémoire	19	Le contrôle de polarité
10	Voltmètre et paramètres de l'affichage sélectionné		

3.2. Protection gazeuse :

On assure l'alimentation du gaz protecteur de la torche à l'aide d'un débitmètre placé sur la bouteille. Il permet la mesure et le contrôle du débit de gaz de 0 à 20 l/mn, sous une pression de 0 à 300 bars. Nos essais ont été réalisés avec un gaz inerte pour qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le métal fondu, ce qui donne des soudures saines et exemptes des porosités. Deux gaz sont utilisés, l'argon et l'hélium ou bien avec des mélanges argon-hélium.

Dans la gamme des gaz et mélanges gazeux utilisés, on prend en compte les propriétés physiques suivantes, de chaque type de gaz utilisé :

Tableau 03 : Les propriétés physiques de chaque type de gaz

Gaz	Symb	Origines	Point ébulli t °	Mass e vol 15°C atm	Densit é	l/m 3 *	Caractéristique s	Pureté
Argon	Ar	Extrait de l'air par liquéfactio n	- 185°C	1.69 kg/m 3	1.38	0,83	Faible potentiel ionisation	99.99 %
Héliu m	He	Source naturelle du gaz naturel	- 269°C	0,169 kg/m 3	0.14	0,74	Fort potentiel ionisation	99.99 %



Figure 06 : Protection gazeuse.

3.3. Pince de courant :

Pour mesurer l'intensité, on place une pince de courant alternatif et continu dans notre montage. Il est constitué d'une pince entre les mâchoires desquelles on fait passer le conducteur traversé par le courant dont on souhaite mesurer cette dernière.

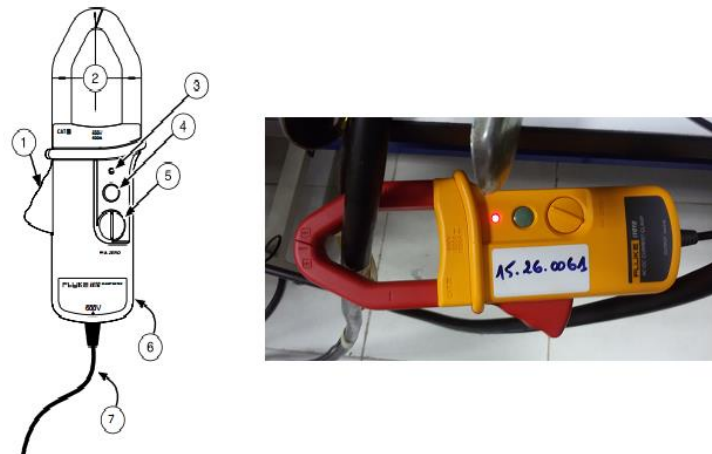


Figure 07: FLUKE i410/i1010.

Tableau 04 : Le pince de courant FLUKE i410/i1010.

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 | Levier de mâchoire |
| 2 | Marques de centrage de la mâchoire |
| 3 | Indicateur de marche |
| 4 | Interrupteur marche/arrêt |
| 5 | Ajustement Zéro |
| 6 | Accès de la pile |
| 7 | Câble de sortie |

3.4. Sonde de tension :

Avec un amplificateur différentiel dans la tête de sonde, le N2790A est évalué pour mesurer la tension différentielle jusqu'à 1400 volts continu + C.A. de crête avec haut CMRR (rapport de rejet de mode commun) du DB >50à 1 mégahertz. Le N2791A et le N2891A peuvent mesurer la tension différentielle jusqu'au différentiel de 700 V et de 7 kilovolts ou au mode commun respectivement. Offres différentielles de la sonde de N2790A, deN2791A et de N2891A dynamique et largeur de bande suffisantes pour votre application pour faire les mesures de flottement trouvées dans des circuits de l'électronique de puissance sans risque et exactement. La sonde différentielle deN2790A, de N2791A et de N2891A offre les arrangements choisis par l'utilisateur d'atténuation qui la rendent fortement souple, lui permettant d'être employée pour une large gamme d'applications. La sonde vient avec des accessoires d'astuce de sonde pour l'usage avec de petits ou grands composants dans les endroits serrés. Les N2790A et les N2891A ont également un indicateur d'over range qui alerte l'utilisateur quand l'entrée de sonde dépasse la dynamique de la sonde. La puissance de la sonde de N2791A et deN2891A est assurée par le port inclus de batteries de 4x aa ou de centre serveur d'USB de la portée ou du PC par l'intermédiaire d'un câble électrique fourni d'USB. Le N2790A est compatible avec l'interface de Keysight Technologies, Inc. AutoProbe où la puissance de la sonde est assurée par l'interface de la sonde de l'oscilloscope de Keysight.



Figure 08: Keysight N2790A

3.5. L'oscilloscope :

Un oscilloscope permet de visualiser l'allure d'une ou plusieurs tensions simultanément, en fonction du temps. L'écran fait apparaître des carrés de ~1 cm de côté, que l'on appelle divisions.



Figure 09: oscilloscope Agilent InfiniiVision 6000 Series.

Tableau 05 : oscilloscope Agilent InfiniiVision 6000 Series.

- | | |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Le compartiment intégré de stockage te permet de stocker les sondes et le cordon de secteur pour facile d'accès et le transport. |
| 2 | Rapidement filtrez et bourdonnez pour l'analyse avec la résolution instantanée de réponse et d'optimum de MegaZoom III. |
| 3 | QuickMeas montre jusqu'à quatre mesures automatisées avec la poussée d'un bouton. |
| 4 | QuickPrint imprime automatiquement votre écran ou enregistre des images d'écran à un dispositif de stockage relié d'USB avec des noms automatisés de dossier. |
| 5 | Le déclenchement standard de publication périodique inclut I2 C, SPI, et USB (CAN/LIN facultatifs et le déclenchement avancé par FlexRay et décodent). |
| 6 | Analogue standard HDTV/EDTV déclenchant des appuis me déclenchant le 1080, 1080p, 720p, 480p HDTV/EDTV standards.n. |

- 8 L'interface d'AutoProbe configure automatiquement le rapport d'atténuation de la sonde et fournit la puissance de sonde pour les sondes actives de Keysight (disponibles sur des modèles de 300 mégahertz à de 1 gigahertz seulement).
- 11 Autoscale vous laisse rapidement montrer tous les signaux actifs, plaçant automatiquement les contrôles verticaux, horizontaux et de déclenchement pour le meilleur affichage, tout en optimisant la mémoire.
- 12 Les contrôles consacrés de panneau avant le rendent facile d'accéder aux contrôles de portée les plus communs, y compris la graduation verticale et horizontale.

3.6. Les torches :

3.6.1. La torche TIG :



Figure 10 : La torche TIG.

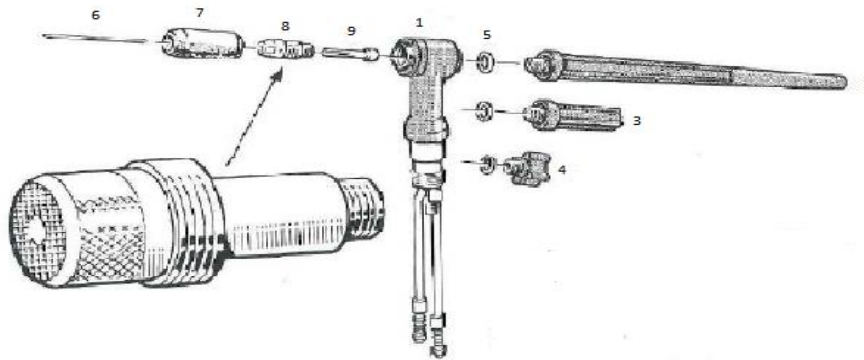


Figure 11: une vue éclatée d'une torche TIG.

Tableau 06 : La torche TIG.

1	le corps de la torche
2	Le long chapeau de tension
3	Le chapeau moyen de tension
4	Le court chapeau de tension
5	Joint circulaire
6	Electrode tungsten
7	Gaz de chapeau
8	bec d'électrode et lentille de gaz
9	Rassemblez

3.7. Les métaux utilisés :

Les métaux utilisés dans cette étude sont :

3.7.1. L'Acier :

L'acier inoxydable austénitique a pour structure de base l'alliage bien connu 18% chrome et 8% nickel. La teneur en chrome et en nickel peut être augmentée pour améliorer la résistance à la corrosion. Pour ce faire, des éléments supplémentaires comme le molybdène peuvent être également ajoutés.

Les aciers austénitiques : Ce type d'acier inoxydable est de loin le plus important et donc le plus largement utilisé. Il résiste à la corrosion dans de nombreuses circonstances, et est principalement utilisé dans le domaine de l'alimentaire, les laiteries, les brasseries et autres industries de transformation, ainsi que dans quelques types d'industries chimiques.

3.7.2. L'Aluminium :

Série 1000 (aluminium) ne s'agit pas à proprement parler d'alliage puisqu'il s'agit de nuances, en principe sans ajout d'éléments. Cependant, les différentes nuances de la série 1000 se distinguent par la présence plus ou moins importante d'impuretés. Souvent, le troisième chiffre indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 % (exemple : l'alliage 1050 contient 99,5 % d'aluminium). Parmi ces nuances, l'alliage 1050 est le plus représenté. Il est utilisé dans de très nombreuses applications et souvent pour des applications de grande consommation : cuve, échangeur, bardage pour bâtiment, emballage, matériel ménager. Les alliages dits raffinés contiennent plus de 99,99 % d'aluminium. Ils trouvent leurs applications principales dans l'industrie de l'électronique ou de l'optique : condensateur, microprocesseur mais également dans la fabrication de pièces de réflexion. Dans ces deux cas, la présence d'impuretés peut provoquer des erreurs ou des pannes. Un des représentants de cette classe d'alliage est le 1199.

4. Préparation des échantillons au contrôle :

4.1. Le découpage et mise en forme des échantillons :

Lors du prélèvement, des précautions doivent être prises pour ne pas favoriser une modification de la structure du métal ; résultant soit d'un échauffement, soit d'une déformation de ce dernier entraînant un écrouissage .dans notre cas, les échantillons sont découpés avec une tronçonneuse avec lubrification ils sont encore découpés en plusieurs rectangles.



Figure 12 : Tronçonneuse (csc).

4.2. L'enrobage :

L'enrobage à froid est tout particulièrement adéquat pour l'enrobage des échantillons sensibles à la chaleur ou à la pression. De plus, l'enrobage à froid ne nécessite pas de presse d'enrobage et est donc parfait pour les enrobages peu fréquents.

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite pas de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester avec quelque goutte durcisseur dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.



Figure 13: Enrobage (csc).

4.3. Le Polissage :

Le polissage est une étape qui permet d'obtenir une surface et miroir pour faciliter l'observation, il est réalisé sur des machines comportant un disque abrasif qui tourne à une vitesse de quelque centaine de tours par minute sous un jet d'eau ; l'échantillon est maintenu pendant quelque minutes centre le disque avec une pression de quelque kilos pascales.

Le polissage se fait généralement en deux étapes :

1. une abrasion avec des disques de papiers abrasifs dont différentes granulométries :

80,120,180,360,800,1000,1200,1800,2400,4000 ;l'échantillon est rince a l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage a plus faible taille de grain .à chaque fois que la granulométrie est changée, il faut effectuer une rotation de 90°pour éliminer les stries.

2. un polissage de finition s'appliquant sur un papier feutre avec une solution dé alumine de 5 a3 μm et suivi d'une pate diamantée soluble dans l'eau 0.3 μm)



Figure 14 : Polisseuse (csc).

5. L'attaque chimique :

Bien que certaines informations peuvent être obtenues sur les échantillons polis, la structure n'est habituellement visible qu'après attaque chimique. L'attaque chimique révèle la structure du matériau : joint de grains, phases des constituants, défauts, précipitations, inclusions ... Les conditions de l'attaque plus légère. On arrête l'attaque par un rinçage soigné (eau ou alcool) suivi d'un séchage avec un sèche-cheveux.

L'Acier est attaqué avec une solution (comportant ,3 volume HNO₃ 50% ,1 volume glycérol 16.66% ,2volume HCL 33.33%) pendant 20 secondes puis plonge dans de l'eau distillée ensuite dans l'éthanol et enfin sèche a l'air libre, certaines précautions doivent être mises en évidence lors de cette opération, qui doit se faire à l'intérieur d'une hotte.

L'Aluminium est attaqué avec du Keller (comportant , 30% HNO₃ Acide nitrique (rho20 : 1.40 g/mL) ,30% HCl Acide chlorhydrique (rho20 : 1.19 g/mL) ,3% HF Acide fluorhydrique (rho20 : 1.13 g/mL) dilué à 40% et 37% eau).

Les surfaces polies doivent être manipulées avec grand soin, car elles sont très sensibles à la pollution et leur polissage correcte coûte cher. Elles doivent être déjà nettoyées pendant le polissage avec du coton sous l'eau courante ou bien par immersion dans un bain d'alcool agité par ultrasons.

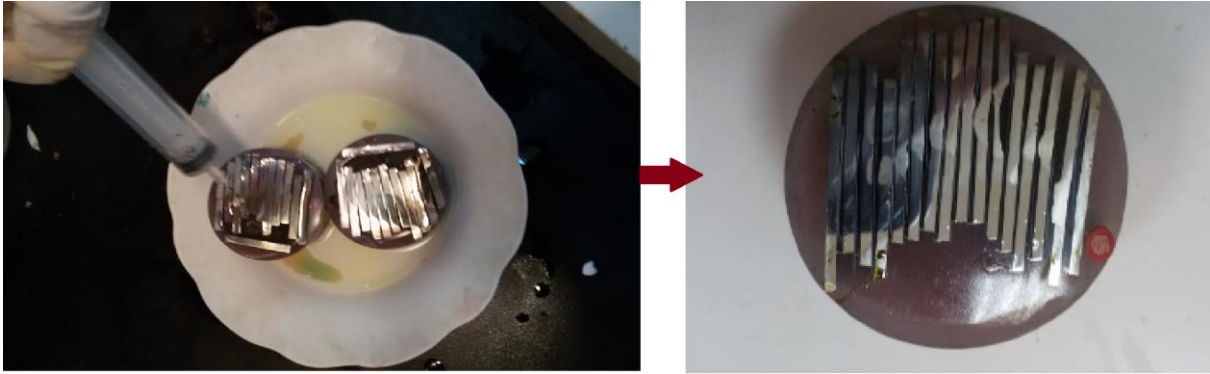


Figure 15 : L'attaque chimique.

6. L'analyse macrographique :

La caractérisation macroscopique d'un assemblage est assurée, grâce à un microscope binoculaire Nikon avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 160 fois.

- Etude du faciès de rupture.
- L'analyse des défauts d'inclusion.
- Mesure d'hauteur, la longueur et la profondeur de dépôt de soudage.
- Calcule de pourcentage des phases et la taille des grains.



Figure 16: un poste équipé d'un microscope binoculaire Nikon (csc).

7. L'analyse micrographique :

Pour observer l'échantillon au microscope optique, celui-ci doit être plat afin que l'image soit nette, son épaisseur doit être faible afin que la lumière puisse le traverser .sa surface doit être polie, les parties à observer doivent être différenciables.



Figure17 : représentation schématique d'un microscope optique.

8. Micro dureté :

La micro dureté exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée, les empreintes ne couvrent alors qu'un ou quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce nécessite de multiplier les mesures.

L'essai est réalisé sur l'échantillon soude sous une charge de 30 g en utilisant un microdurometre digital Vickers, la micro dureté a été mesurée sur un intervalle de 1mm à travers le métal dépose ,1mm à travers la ZAT et 1mm à travers le métal de base suivant un seul profil.

Les résultats obtenus permettent de voir le changement du profil de dureté, et par conséquent suivre l'évolution de la microstructure dans les différentes parties (métal de base ,ZAT et le métal fondu).

9. Essais de traction :

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique de matériaux. Étant purement uniaxial du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uni axiale. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité ...etc., nécessaires dans les calculs de structure.

Nous donnons dans ce qui suit tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les éprouvettes, les mesures de déformation et de charge appliquée.

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalisé par une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de l'effort appliqué à l'éprouvette.

Le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotes à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui est proposé par le système de pilotage.

1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les influences des paramètres de soudage sur la morphologie du cordon en soudage TIG sans métal d'apport. L'influence de chaque paramètre est étudiée en faisant varier celui-ci, les autres étant constants. Des essais sont donc réalisés pour déterminer l'influence des paramètres tels que le courant et la tension de soudage ainsi que la vitesse de déplacement. L'influence de ces paramètres est représentée par la variation de la dilution ainsi que les aspects de la géométrie du cordon, à savoir : La pénétration P et la largeur L.

Il est aussi consacré à l'étude expérimentale de l'acier inoxydable 316L et les différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. En premier lieu, on fait une vision générale et macrographique sur l'état du matériau ainsi que le cordon de soudure, ensuite, on s'intéresse à l'observation micrographique à l'aide d'un microscope optique révélant les différentes phases, la taille et l'orientation des grains. Par la suite, les résultats de la microscopie optique sont comparés aux résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques (micro dreté et traction).

2. Optimisation des paramètres de soudage :

2.1. Le choix de la vitesse de soudage :

Pour la première étape nous avons testé les vitesses de soudage automatique sur une plaque d'austénite pour limiter l'intervalle des vitesses choisi, La figure donne la variation de la tension en fonction de l'intensité du courant.

Le procédé de soudage et un procédé à ensemble de paramètres à la fois particulièrement varié, fortement couplé et interdépendant. Parmi les paramètres de soudage, nous pouvons citer :

- Le courant de soudage.
- La tension de soudage.
- La vitesse d'avance de la table de déplacement.
- Le débit du gaz.
- Le diamètre de l'électrode.

- La distance électrode pièce.
- Le stick-out.
- L'épaisseur du matériau.

Dans nos expériences, nous avons pris comme variable le courant et la tension de soudage ainsi que la vitesse de la table de déplacement. Les autres paramètres étant fixes et systématiquement reproductibles.

Le courant de soudage et un courant de consigne contrôlé et commandé par la source de courant du poste de soudage. La tension d'arc et la tension qui s'établit entre la cathode et l'anode pendant le fonctionnement de l'arc.

La vitesse de la table de déplacement est une consigne assurée par un variateur de fréquence. Il faut donc corrélérer fréquence et vitesse. Les essais que nous avons effectués, en utilisant plusieurs fréquences, ont abouti à une relation linéaire entre la fréquence et la vitesse, voir figure 1.

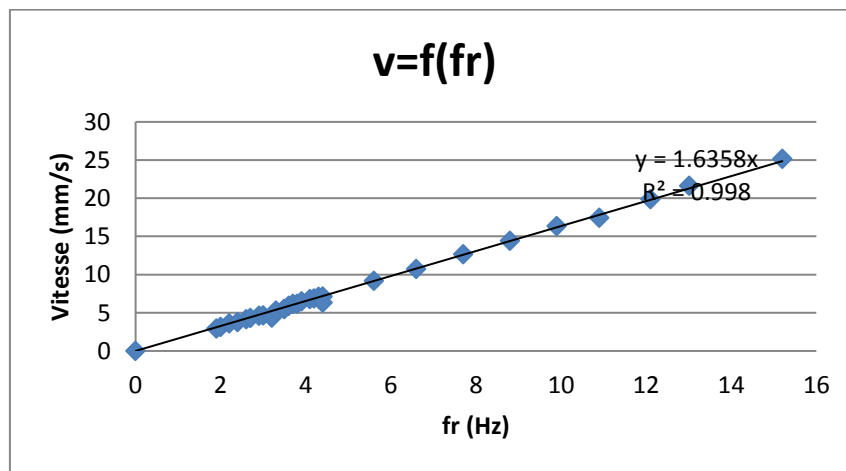


Figure1: Corrélation et étalonnage de la vitesse en fonction de la fréquence.

2.2. Tension de soudage en fonction du courant de soudage

Dans le procédé de soudage TIG, différents types de courant peuvent être utilisés : Courant Continu, Courant Pulsé et Courant Alternatif. La figure 2 illustre quelques exemples de ces types de courants.

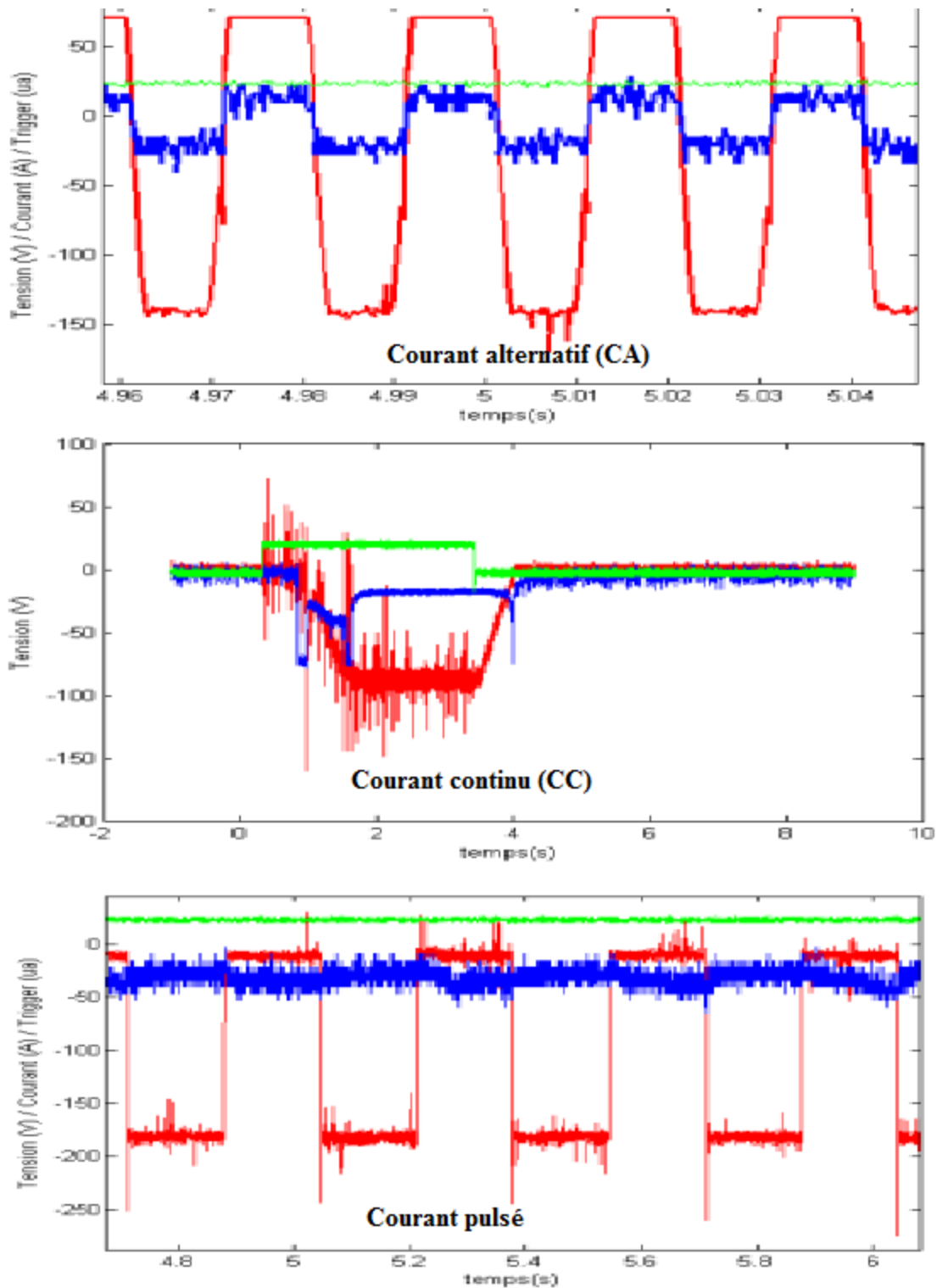


Figure 2 : type et mode de soudage : courant continu, courant pulsé et courant alternatif.

Il est particulièrement intéressant d'observer le comportement du couple (courant, tension) en fonction de la vitesse de soudage pour différents types de courant.

Les figures 3-6 révèlent que la vitesse de déplacement influence peu le couple (courant, tension) pour des courants inférieurs à 24 cm/mn. Alors que pour les vitesses égales ou supérieures à 24 cm/mn, la vitesse de déplacement semble influencée la couple courant/tension.

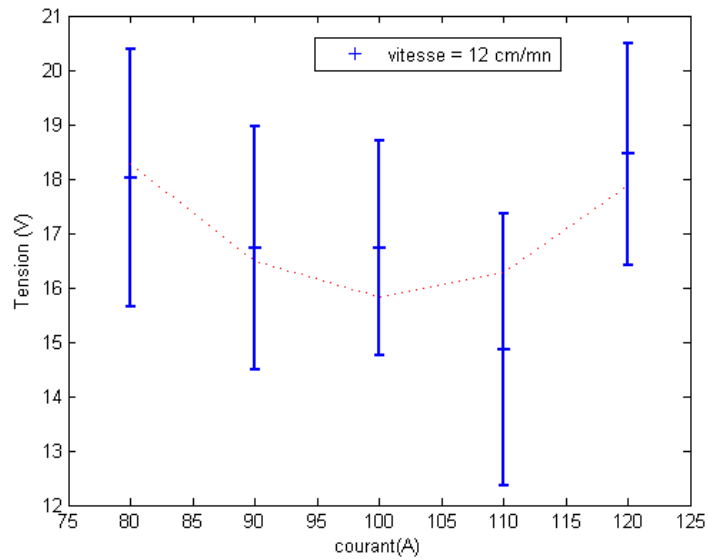


Figure 3 : tension d'arc en fonction du courant.

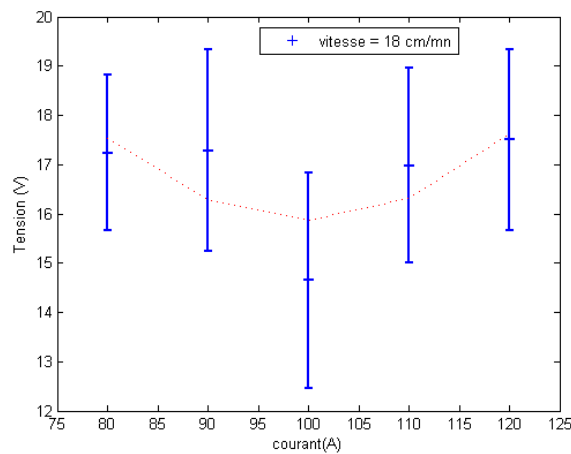


Figure 4 : tension d'arc en fonction du courant.

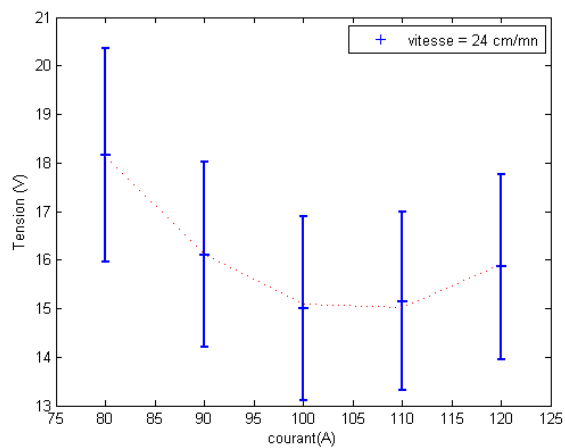


Figure 5 : tension d'arc en fonction du courant.

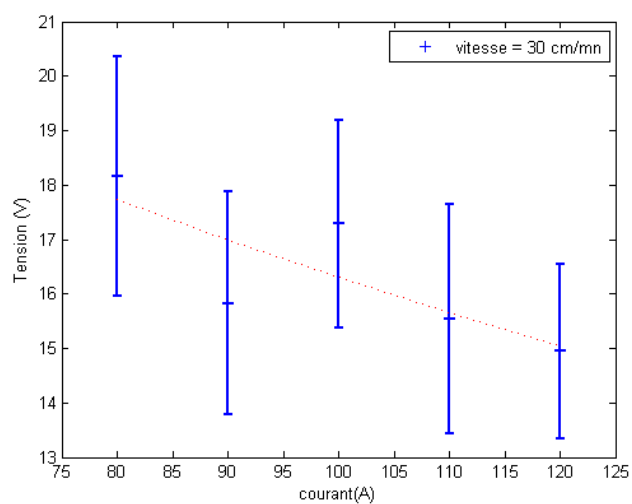


Figure 6 : tension d'arc en fonction du courant.

3. Les macrographies des coupes transversales des joints de soudure :

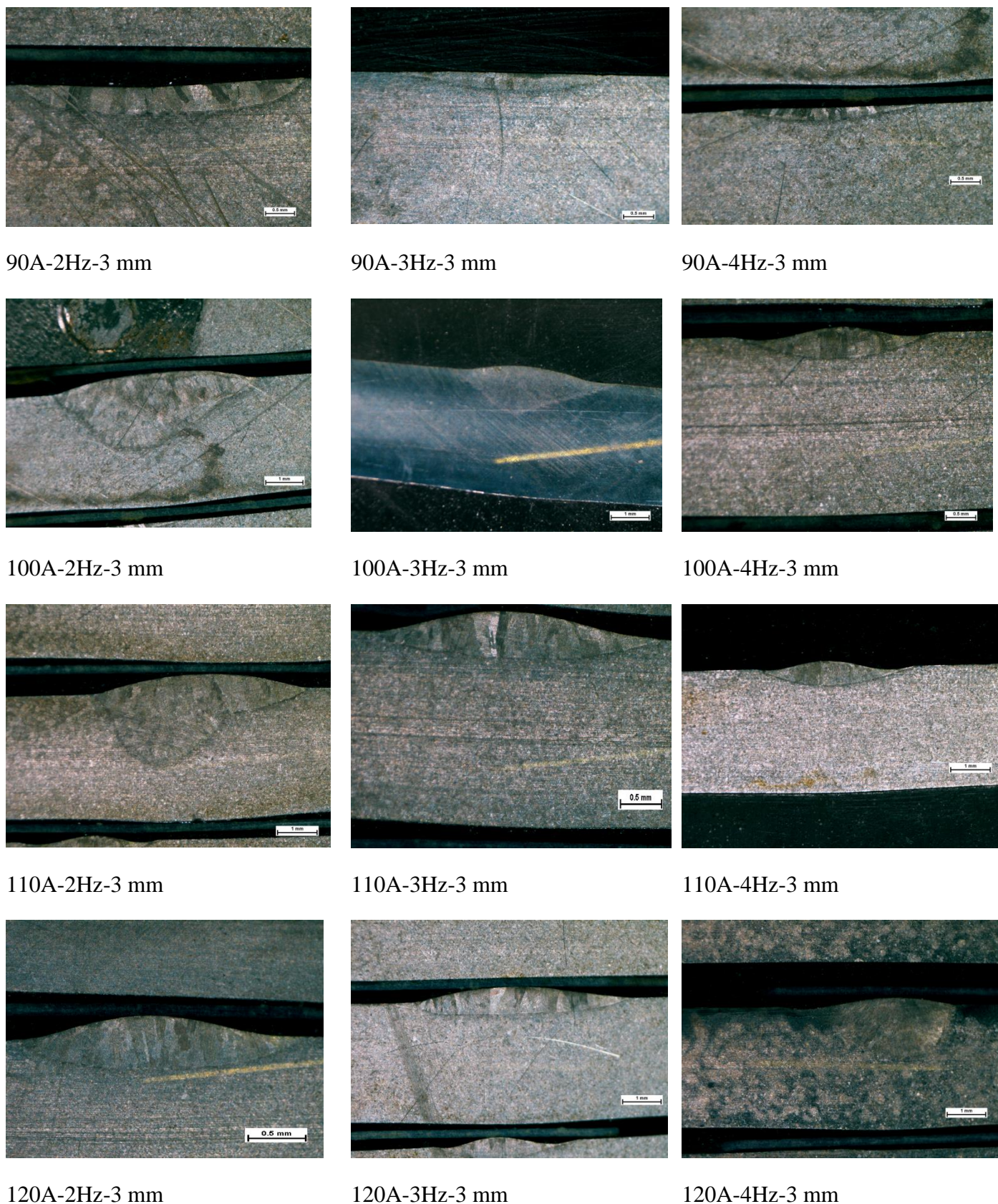


Figure7: Macrographie pour différents couples (courant, vitesse d'avance)

(Acier Inox 316L, épaisseur= 3mm, $\varnothing_{\text{Electrode}}=2.4\text{mm}$, $Dt=8\text{l/mn}$, $DBTW=6\text{mm}$).



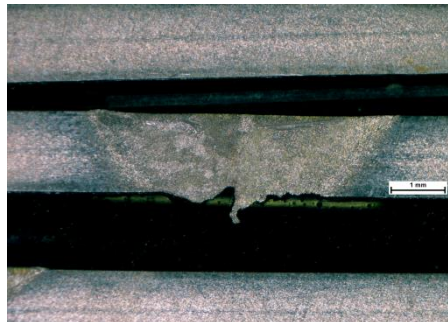
50A-2Hz



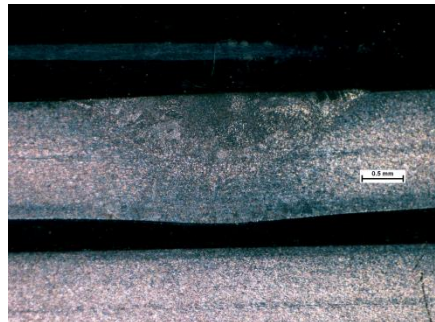
50A-3Hz



50A-4Hz



60A-2Hz



60A-3Hz



60A-4Hz



70A-2Hz



70A-3Hz



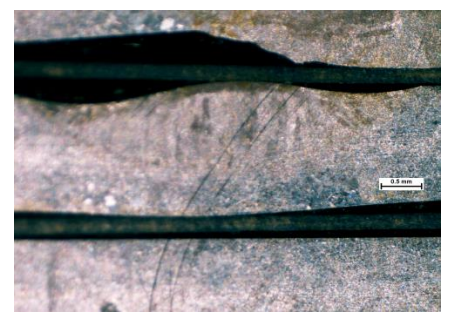
70A-4Hz



100A-2Hz



100A-3Hz



100A-4Hz

Figure 8: les relations (P, H, L, A) pour 1.5mm.

(Acier Inox 316L, épaisseur= 1.5mm, $\varnothing_{\text{Electrode}}=2.4\text{mm}$, $Dt=8\text{l/mn}$, $DBTW=6\text{mm}$).

Dans le but d’observer la dilution c’est à dire le niveau de pénétration des cordons en fonction de la largeur des cordons de chaque opération de soudage, des observations macroscopiques ont été effectuées, voir figures 7-8.

Il est à constater que l'augmentation de la vitesse entraîne une diminution à la fois de la pénétration et de la largeur des cordons de soudage. En effet, la vitesse influence significativement la distribution de la température et par conséquent le gradient thermique dans le bain de fusion, plus la vitesse de soudage est grande, plus la zone dans laquelle se produit l’élévation de la température devant l'arc est restreinte, ce qui entraîne une diminution de la quantité de chaleur transmise au métal.

Nous voyons sur les figures 7-8 que la largeur et la pénétration du cordon de soudage diminuent avec l'augmentation de la vitesse de soudage. Au-delà d'une certaine valeur, une augmentation de la vitesse n'entraîne qu'une légère augmentation de la largeur et de profondeur.

Ainsi, nous pouvons établir des prévisions dimensionnelles de la géométrie du cordon de soudage en fonction du courant de soudage et de la vitesse d’avance :

- La dimension de la ZAT est directement proportionnelle à la vitesse d’avance ;
- La dimension de la ZAT est directement proportionnelle au courant de soudage;

Pour aboutir aux paramètres adéquats du cordon de soudage, il est primordial de corréler courant de soudage et vitesse d’avance.

Tableau1 : Les différentes largeurs du cordon de la soudure en fonction de la vitesse d’avance pour différents courants pour une épaisseur de 3mm.

V(cm/mn)\courant	50A	60A	70A	80A	90A	100A
12	5,94	5,87	6,72	6,73	7,94	10,25
18	3,21	3,85	4,42	5,47	5,76	6,29

24	2,4	3,23	3,39	3,87	4,5	4,98
30	2,48	2,77	2,69	3,01	3,65	3,82

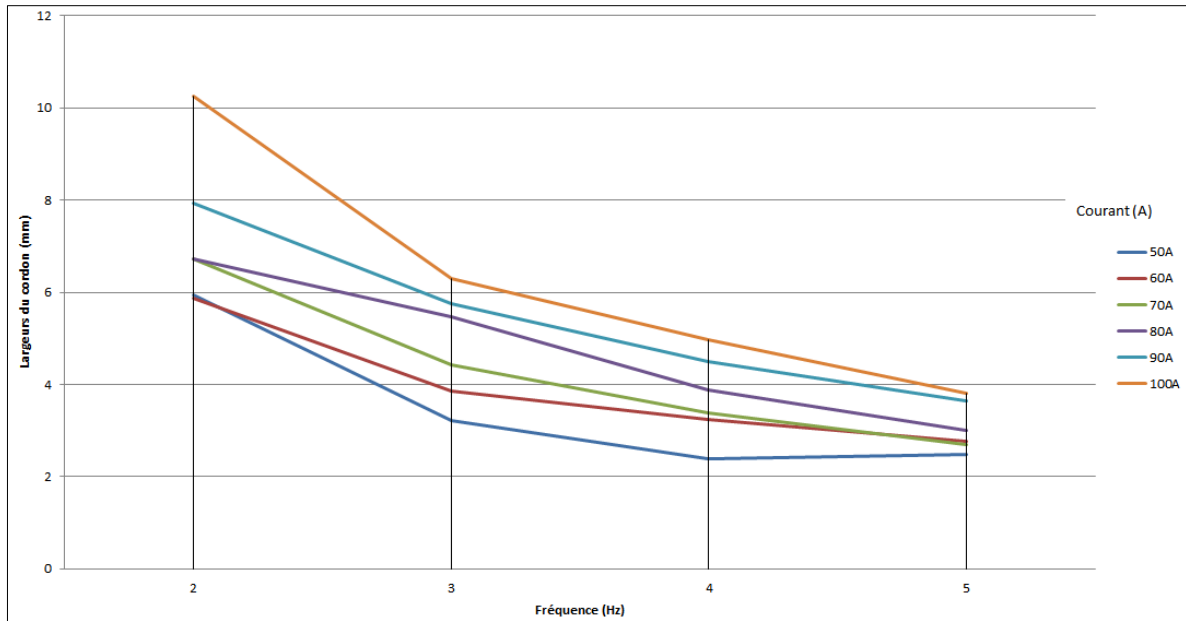


Figure 9: L'évolution de la largeur de la soudure en fonction du courant (Acier 3mm).

Tableau2: Les différentes largeurs du cordon de la soudure en fonction du courant pour l'Acier de 1,5mm d'épaisseur.

V(cm/mn)\courant	80A	100A	110A	120A
12	5,05	0,15	5,48	6,51
18	4,08	5,14	4,67	5,7
24	3,14	3,48	3,9	5,03
30	4,95	3,13	3,5	4,34

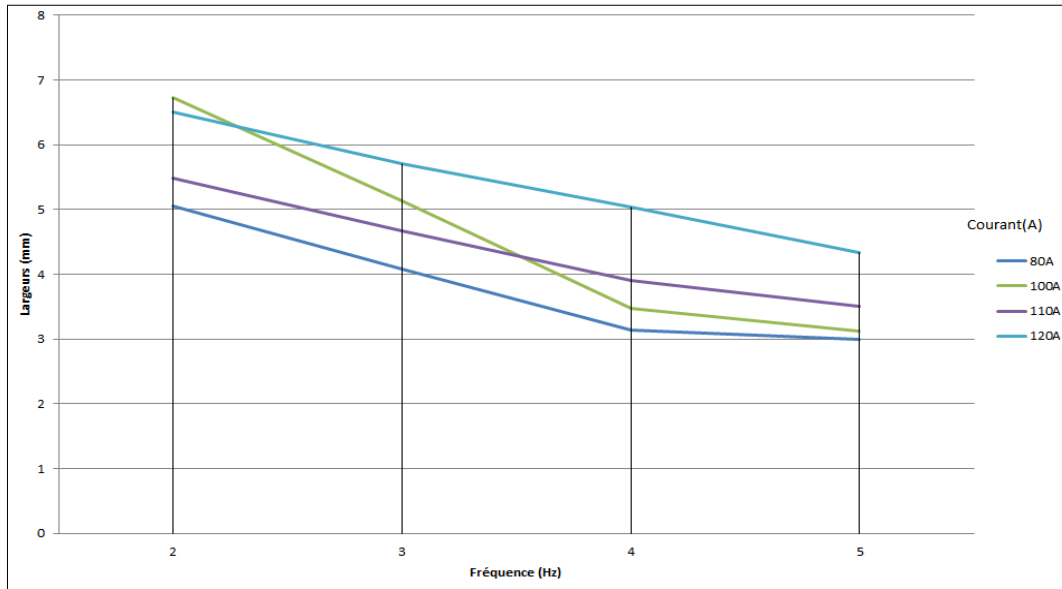


Figure 10 : L'évolution de la largeur de la soudure en fonction de la vitesse d'avance en fonction du courant (Acier 1,5mm).

Les figures 09-10 représentent les résultats obtenus concernant l'influence du courant et de la vitesse d'avance sur la pénétration.

Nous constatons qu'une augmentation du courant favorise à la fois un accroissement de la pénétration et de la largeur de la ZAT. Cela peut être dû à l'effet du courant de soudage sur la force électromagnétique et sur la distribution de la température dans le bain de fusion. La force électromagnétique, proportionnelle au courant, tend à creuser le bain de fusion, tandis que la tension superficielle qui diminue avec l'augmentation de la température va avoir un gradient négatif qui tend à étaler la zone fondue.

4. Les paramètres de soudages optimisés :

Après plusieurs essais de soudage TIG, les paramètres de soudage optimisés en terme de courant et de vitesse d'avance ont été déterminés. Les paramètres de soudage optimisés ont été utilisés pour le soudage des pièces en acier inoxydable de 1.5 mm et 3 mm d'épaisseurs.

4.1. Les paramètres de soudage optimisés :

Tableau3: les bons paramètres courant-vitesse.

	Epaisseur (mm)	Courant (A)	Vitesse (cm/mn)
Ech 1	3	140	18
Ech 2	3	120	18
Ech 3	1.5	100	24

4.2. La macrographie des plaques soudées par les paramètres optimisés :

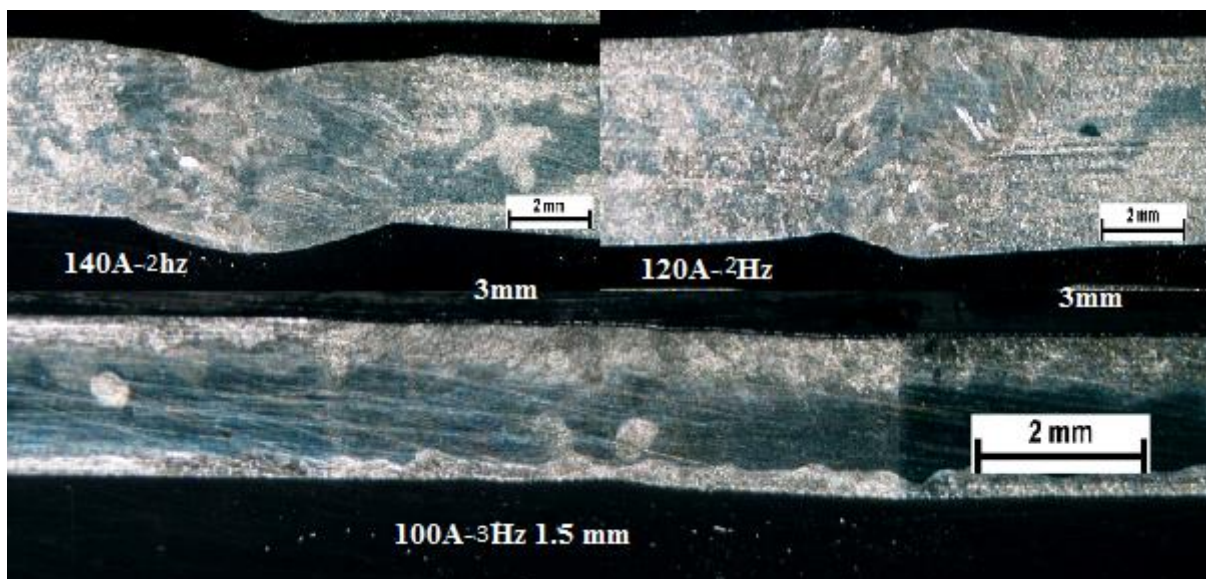


Figure 11 : Macroscopie des soudures: Acier inoxydable, épaisseur 3 mm et 1.5 mm.

Les trois cordons obtenus sont généralement des formes de surface lisse. L'aspect de surface est homogène tout au long des trois cordons. Dans les courants 120 et 140A, la surface du cordon est souvent perturbée. Ici, On a détecté la présence de caniveaux qui sont

provoqués par une viscosité de métal fondu considérable, cette fluidité de métal fondu apparue clairement surtout pour le courant de 140A.

5. EXAMEN MICROGRAPHIQUE :

Dans le processus de soudage, La vitesse de chauffage et de refroidissement thermiques au cours des cycles thermiques de soudage engendre des multitudes de microstructures, au-dessus des conditions d'équilibre, pour chaque mode de chauffage/refroidissement, il existe des domaines de température dans lesquels se développent les transformations ; ce qui ne permet pas de baser à cent pourcent sur les diagrammes d'équilibre, donc l'utilisation des diagramme hors d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage des différentes zones : la zone fondu, la zone de liaison et la zone affectée thermiquement. Il est commode de raisonner à partir de ce type de diagrammes « équilibre et hors d'équilibre » pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. On se placera dans le cadre des aciers fortement alliés, en examinant le diagramme (Fe-Cr-Ni) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé.

Dans notre cas ; toutes les microstructures dans le métal de base (MB) , voir figure 13, sont constituées d'un alliage monophasé constituant essentiellement de l'austénitique, Sa forme moléculaire est une cristallisation cubique à faces centrées CFC et la taille moyenne des grains austénitiques est d'ordre de 42 μ m. la composition chimique des matériaux utilisé est présentée dans tableau 4.

La zone affectée thermiquement (ZAT) a subit au cours de soudage un grossissement dans sa taille qui dépend de l'emplacement du grain étudiée par rapport au bain de fusion (zone fondue MF) et la répétition des cycles thermique au cours de soudage.

Tableau 4 : La composition chimique des matériaux de base.

Elément	C	Cr	Ni	Mo
pourcentage	0.02	18	08	2-3

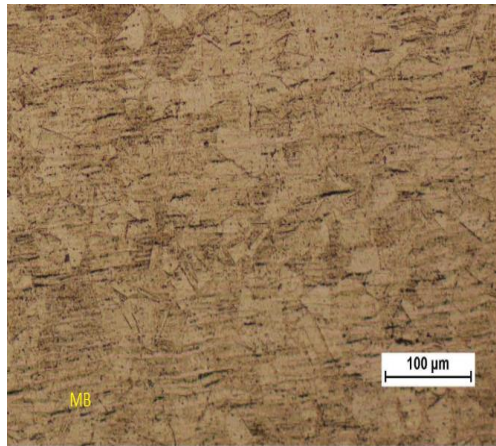
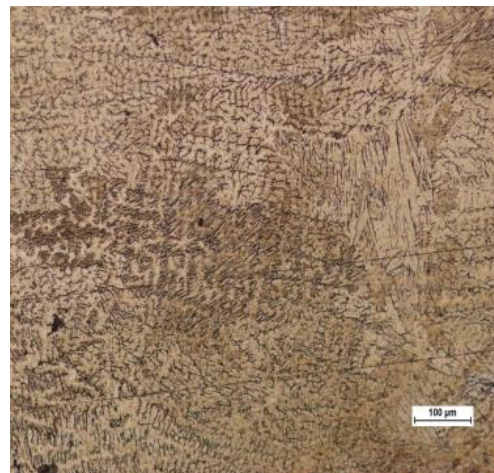
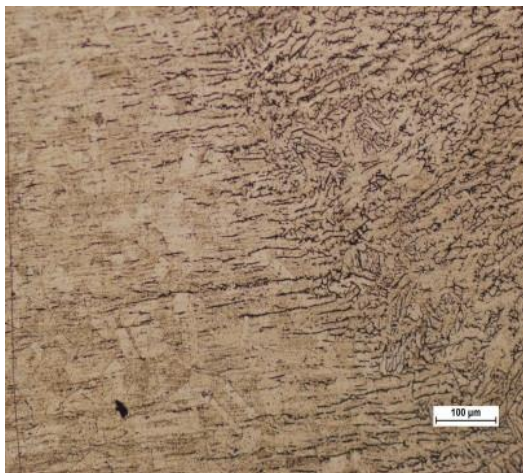


Figure 12 : la micrographie du métal de base

140A

ZAT-ZL

ZF



120A

ZAT-ZL

ZF



Figure 13: La micrographie de ZAT et ZF de différent courant.

Pour les cordons de soudure effectués, différentes observations micrographiques ont été effectuées dans différents zones (ZF, ZL, ZAT) dans le but d'identifier l'état microstructural.

La micrographie de la zone fondue est représentée sur la figure 13. Elle a un aspect dendritique de solidification. L'austénite reste de la matrice (ce qui est en blanc), cette phase occupe toujours les espaces interdendritiques et La ferrite (en noir) est trouvé dans les axes dendritiques. L'orientation de la ferrite traduit une tendance à la croissance épitaxiale entre l'austénite et la ferrite résiduelle qu'il n'a pas transformée. Pour la faible énergie, on a remarqué que le taux surfacique de la phase ferritique est supérieur à celui de la forte énergie.

La proportion de ferrite δ relativement élevée dans l'énergie 120A peut être expliquée par le fait que l'augmentation d'énergie favorise la réaction de décomposition complète de la ferrite δ issue de l'état liquide ($\delta \rightarrow \gamma$). En fait, le refroidissement du métal fondu dans les énergies faibles est tellement rapide que cette ferrite n'a pas eu le temps suffisant pour se transformer entièrement en austénite.

Le taux de ferrite dans la zone fondue peut être estimé d'après les images micrographiques. En utilisant le logiciel Image J après une série de calculs et traitements d'image, il est d'ordre de 13% en faible énergie et 8% pour la forte énergie.

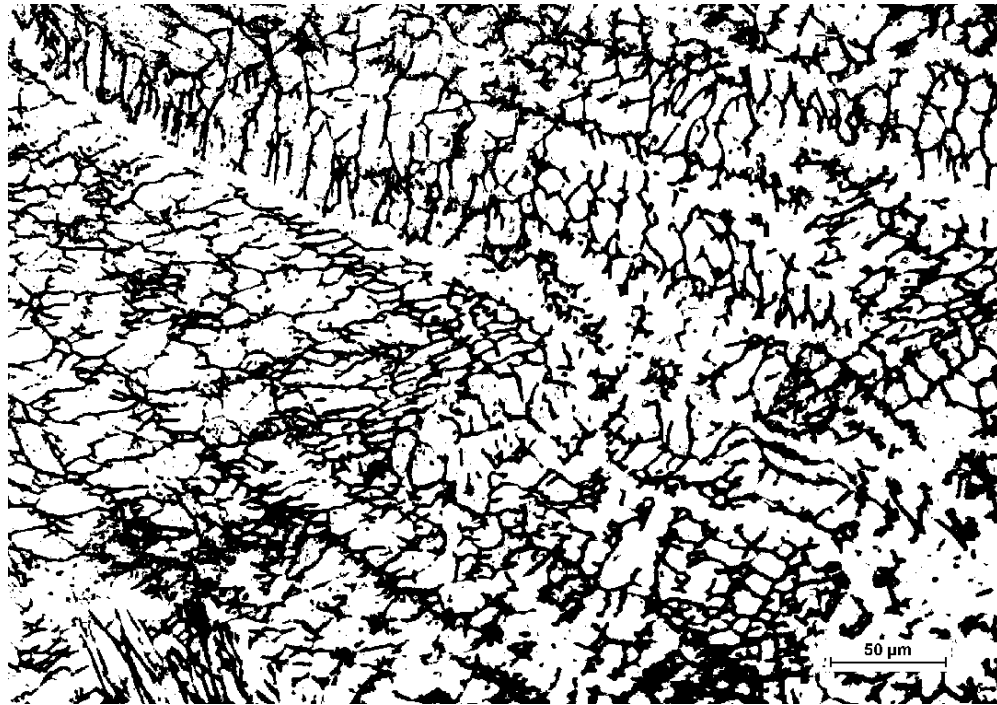


Figure 14: Image traitée montrant la microstructure de la zone fondue.

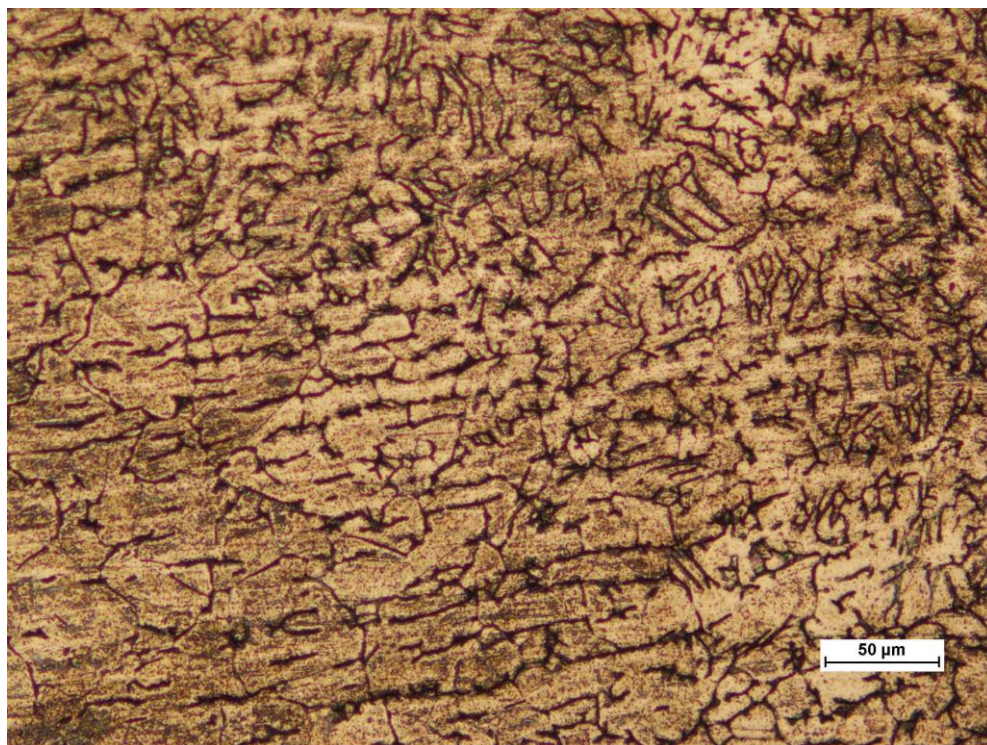


Figure 15 : Image montrant le grossissement de grain austénitique d'ordre de 73μm (pour 120A).

Dans les zones affectées thermiquement, la microstructure est presque comme celle du métal de base, mais la taille des grains austénitiques a connu un grossissement très significatif vers la zone de liaison dans le cas des fortes énergies sous l'influence de l'élévation de la température apportée par la source de chaleur lors de l'opération du soudage TIG automatisé. Ce grossissement est bien présenté dans la figure 15.

Dans la zone de liaison (ZL), On note aussi la présence des carbures ainsi que la phase sigma (σ) sous forme des îles noires. En réalité, le processus de précipitation de ces phases exige un maintien en température (entre 750 et 500°C) suffisamment long tel que les faibles températures (vers 500°C) favorisent l'augmentation des taux de la phase (σ).

6. Les essais de la microdureté :

Les essais de la microdureté sont effectués sur les soudures réalisés, ils ont donné les résultats reportés dans la Figure 16.

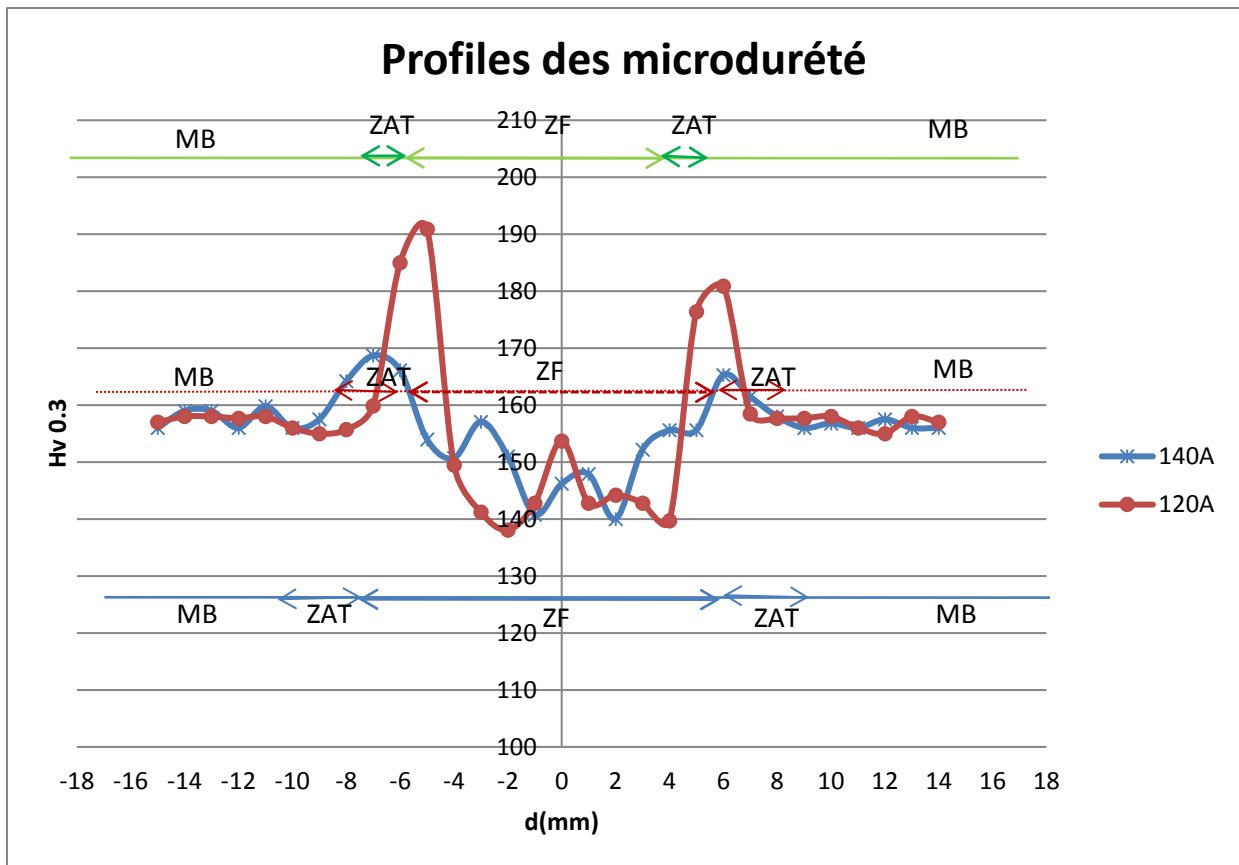


Figure 16 : Les profils de microdureté.

Les changements microstructuraux résultants des soudures a un impact direct sur les valeurs de la microdureté. De ce fait, nous avons procédé à des mesures de microdureté Vickers (Hv) afin de mettre en évidence sa variation par rapport aux différentes zones de soudage par un pas de 1mm.

Les tests de microdureté ont été effectués à l'aide d'une charge F de 300 g avec un temps de maintien de charge entre 10 à 15 secondes. Le pénétrateur est de forme pyramidale droite à base carrée et d'angle au sommet de 136°. On mesure les diagonales "d1 et d2" de l'empreinte et on détermine la microdureté Vickers par des calculs intégrés dans le microduromètre.

Le balayage des empreintes s'effectue pour chaque cordon selon la direction perpendiculaire du sens de la pénétration du cordon allant du métal de base, la zone affectée thermiquement, zone de liaison, métal fondu, En passant une deuxième fois par la zone affectée thermiquement et enfin arrivant au métal de base comme le montre la figure 16.

D'après la figure 16, l'analyse des courbes des profils de dureté des différents échantillons révèle les observations suivantes :

- Une augmentation de la dureté en allant de la zone fondue jusqu'à la zone de liaison. Cela est confirmé par la présence principale des carbures métalliques (principalement les carbures de chrome) et la phase sigma. L'augmentation de la microdureté de la zone de liaison vers le métal de base est due à la diminution de la taille des grains (augmentation du taux des joints de grains donc augmentation des défauts atomiques des réseaux atomiques et de la densité des dislocations).
- La microdureté se stabilise à partir d'une distance de 7 mm (en symétrie avec l'autre côté (-7)) pour l'énergie faible, dans le cas de fortes énergies cette stabilité nécessite 1.5 à 2 mm de plus.

Ces stabilités sont dues à l'état non affecté (structure à grains fins relativement à la ZAT) qui correspond au métal de base.

- L'instabilité de la valeur de microdureté de la zone fondue vers la zone de liaison est due principalement à la variation du taux de ferrite delta dans chaque emplacement de ZF dû à la variation des gradients thermiques lors du soudage.

7. Essais de traction :

Les résultats des essais de traction obtenus pour différentes énergies sont représentés dans les figures 17-19. Il s'agit de vérifier la limite maximale à la rupture R_m et la déformation à la rupture ϵ . Il ya lieu de signaler que la rupture pour les essais a lieu au niveau de la zone fondue.

Une diminution légère dans la contrainte maximale R_m pour les échantillons soudés en fortes énergies par rapport à ceux soudés en faibles énergies, cela est en correspondance avec la diminution des déformations des éprouvettes, on peut expliquer ça par la présence des zones durcis dans le cas des énergies faibles plus que celles qui est présentent dans le cas de fortes énergies, en remarquant aussi que la proportionnalité entre la limite maximale à la rupture R_m et la microdureté reste valable dans notre cas.

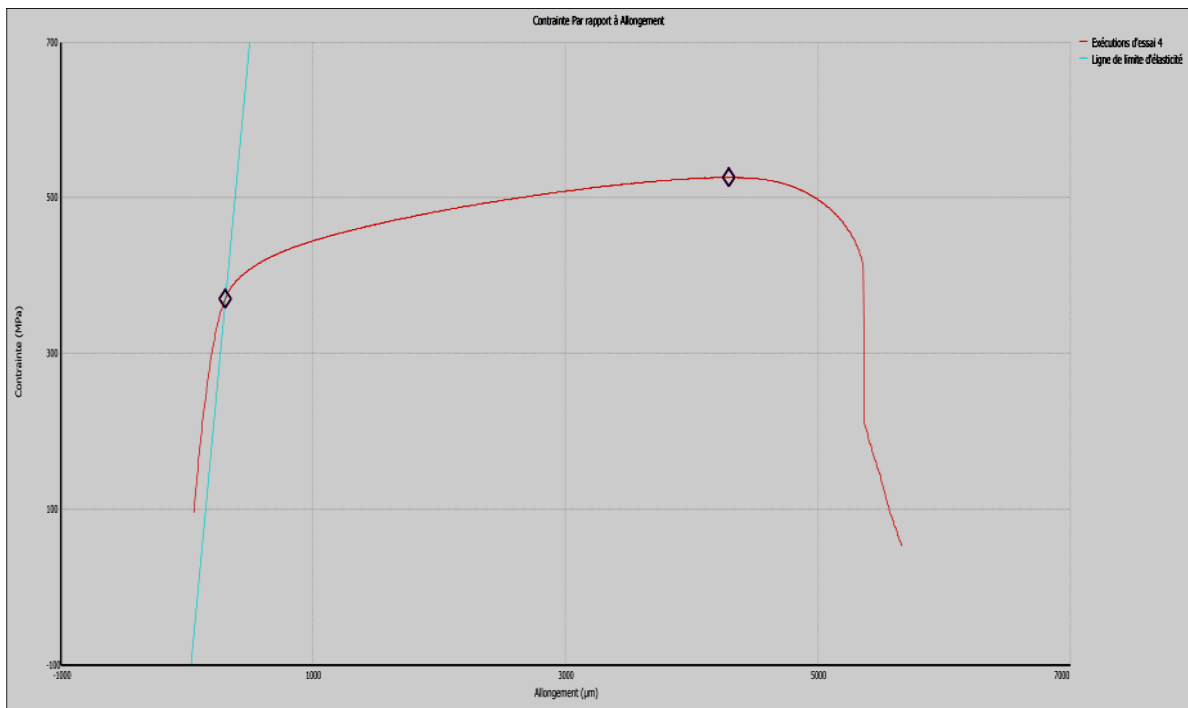


Figure 17: Courbe de traction d'une éprouvette pour 100A.

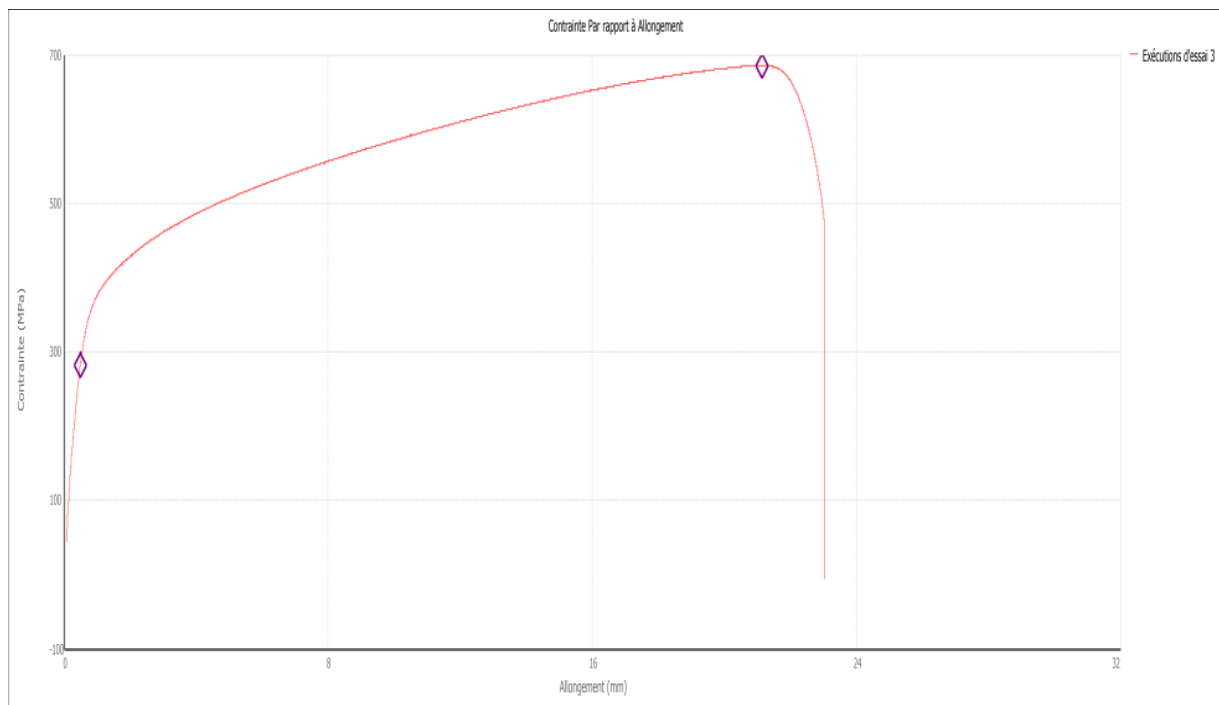


Figure 18 : Courbe de traction d'une éprouvette pour 120A.

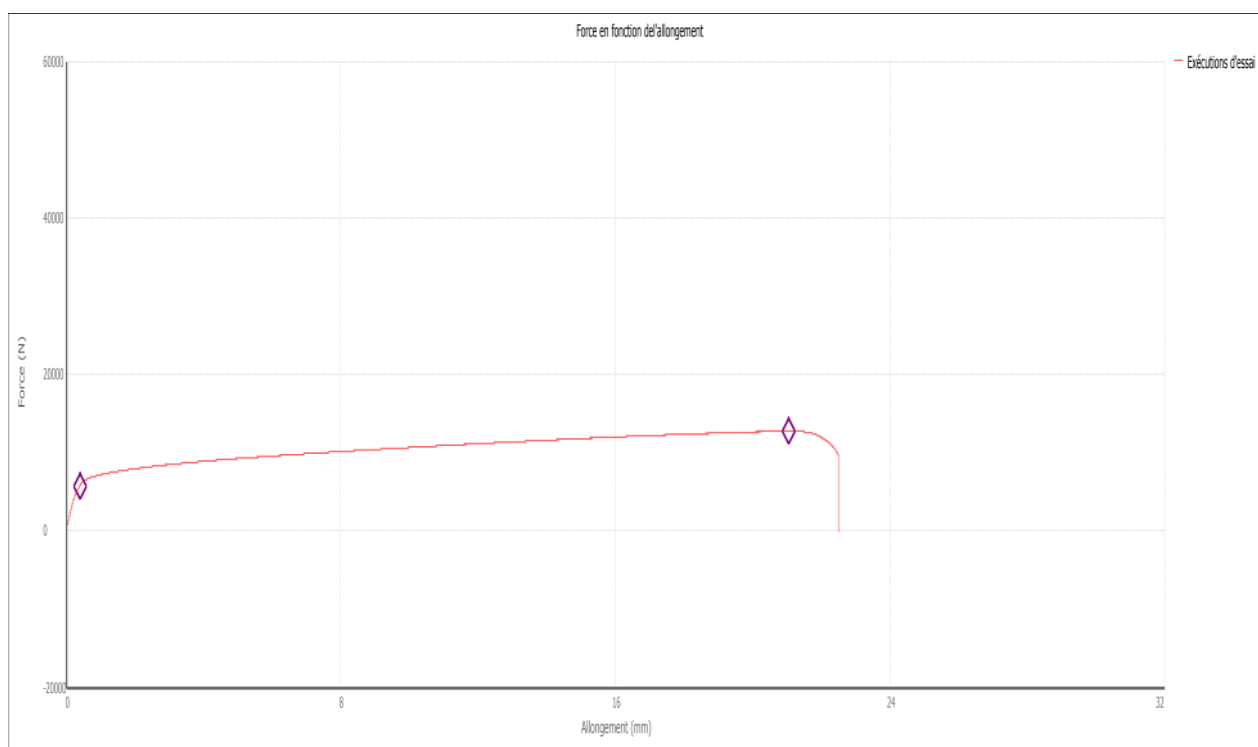


Figure 19 : Courbe de traction d’une éprouvette pour 140A.

Tableau 5: Résultats de la traction pour différentes éprouvettes.

Eprouvette	Courant (A)	Lo (mm)	L (mm)	Rm	Re	Fmax (KN)	ϵ (%)	Mod y
1	140	30	44	662,5	368 ,32	12,733	18%	52086,694
2	120	30	45	685,7	382,17	12,549	20%	29954,646
3	100	30	35	525,9	389,25	4,851	13%	73992,972

Eprouvette 1 :



Eprouvette 2 :



Eprouvette 3 :



Figure 20 : Eprouvettes avant traction.

Eprouvette 1 :



Eprouvette 2 :



Eprouvette 3 :



Figure 21 : Eprouvettes après traction.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études contribue à étudier l'influence des paramètres de soudage automatisé « les énergies de soudage » sur le comportement mécanique et métallurgique des alliages inoxydables austénitiques. Il s'inscrit dans le cadre des travaux de recherches entrepris au sein du Laboratoire de la Division de Soudage et Techniques Connexes (DSTC) du Centre de recherche en technologies industrielles CRTI.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à analyser le comportement des plaques soudées en acier inoxydable d'AISI 316L d'une épaisseur de 1.5 mm et 3 mm en fonction des paramètres de soudage tels que le courant, la tension d'arc, la vitesse d'avance, le stick-out et le diamètre de l'électrode en Tungstène. L'ensemble de ses paramètres de soudage aura une influence considérable sur l'état microstructural ainsi que sur le comportement mécanique (phases, morphologie, répartition, taille, fraction volumique, solidification). Donc différentes caractérisations structurales (macro-microscopique, métallurgique) et différents tests mécaniques (microdureté et essai de traction) ont été effectués.

Les résultats obtenus peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le soudage TIG automatisé a été expérimenté avec succès dans le laboratoire de la Division (DSTC) sur des plaques en différents matériaux ;
- Intégration avec succès des capteurs de tension et de courant ;
- Enregistrement automatique des paramètres électriques à l'aide de capteurs et d'oscilloscope numérique ;
- Corrélation entre les paramètres électrique et la dilution ;
- L'augmentation d'énergie de soudage sans métal d'apport engendre une facilité de dissous de métal fondue extractif du matériau de base et engendre une viscosité considérable du métal fondu lors de soudage ;
- Augmentation de l'énergie de soudage augmentera les dimensions de la ZAT ;
- Augmentation de l'énergie de soudage minimise l'apparition des phases intermétalliques et des phases dégradants les propriétés mécaniques ;
- La zone fondue a révélé une structure de ferrite delta dispersées dans la matrice austénitique ;

- Les faibles énergies de soudage favorisent l'augmentation des teneurs de la phase sigma et les carbures métalliques dans la zone de liaison ;
- Chaque énergie de soudage a des modes différents de refroidissement-chauffage du métal fondu,
- L'augmentation d'énergie de soudage provoque l'augmentation de la taille des grains austénitiques.

Dans cet axe de recherche, nous avons réussi à avancer dans la compréhension des phénomènes générés par les procédés de soudage à l'arc automatisé. Cependant, tout n'est pas résolu et quelques questions sont apparues au fur et à mesure de nos travaux.

Il serait intéressant de réaliser une installation de soudage TIG automatisé avec métal d'apport tout en intégrant différents capteurs de mesure tels que les pyromètres et les jauges de déformation.

Il est aussi intéressant d'étudier le comportement des matériaux à souder dans le cas du procédé de soudage pulsé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Amar.Boutaghane, "Contribution à l'évaluation thermique relatif à l'arc électrique de soudage" thèse de Doctorat de l'université de USTHB, 2012.
- [2] Livre "Mécanosoudage-Fabrication", CETIM, 1989, PP I.7.
- [3] Flavien.Valensi,"Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage", Physique, université d'Orléans, 2007.
- [4] Driss.Kerrich,"Contribution à l'étude du paramétrage du procédé de soudage TIG", Mécanique. Université des sciences et techniques de Lille, 1997.
- [5] M.Beneddeb,"Etude les défauts de soudage des pipelines", Mémoire de fin d'étude de l'université de Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [6] D.Toualbia, cours de "Soudage et rechargement" Génie Mécanique, université de Cherif Massaada Souk ahress.
- [7] MINES.ALBI, Carmaux, 2013.
- [8] WWW.rocdacier.com
- [9] Michel.BROCHARD,"Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédés de soudage TIG", université de Provence, 2009.
- [10] Klas.Weman,"Procédés de soudage", Dunod Paris, 2012.
- [11] Christian.Bonnet,"Le soudage Métallurgie et Produits",CTAS, 2001.
- [12] Mouloud.Aissani,"Etude du comportement thermique et mécanique des matériaux aéronautiques par des méthodes numériques ", thèse doctorat, université de Saad Dahlab Blida, 2013.
- [13] Formation Professionnelle en Afrique : Technologie Générale pour Construction Métallique Tome 2.