

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblage soudés et matériaux

Par : LOUNADI YASSINE

Sujet

Étude expérimentale de l'effet des variations géométrique sur la soudabilité par le procédé TIG, méthodes semi-automatique et automatique : cas d'un métal galvanisé

Soutenu publiquement, le 30/06/2022, devant le jury composé de :

Mr/HADJOUI FETHI.	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mr/BENSIAD ISMAEL.	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr/SEBAA FETHI.	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr/ M/ RAHOU MOHAMED.	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur
Mr/ BELABED YOUSOUF.	Doctorat	Université de Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2021/2022.

Remerciements

*Je remercie **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Le présent mémoire a été dirigé par **Mr. RAHOU MOHAMED** Et **Mr. SEBAA FETHI** Et **Mr. BELABED YOUSOUF** c'est grâce à eux, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu finaliser.*

Je exprimé mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements.

*Je remercie les membres de jurys **MR. BENSIAD ISMAEL** et **Mr. CHORFI SIDI MED** qui ont accepté d'évaluer et juger le présent travail.*

Enfin, un vif remerciement à toute ma famille qui n'a jamais arrêté de me soutenir et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire À :

Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un Magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce Travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A qui m'a été le soutien moral pendant ce projet A Mon Amies CHAMSE et TAHA.

A mon frère IBERAHIME.

A mes sœurs.....YASSMINE ET HAFSA.

A ma tante FATIMA et mon frère HICHAME

A mes meilleurs amis YASSER, ILYASE, WALDLEAME, ABDERAHIM, YASSINE.

A Madame SERIARI FAATIMAZOHRA

A BELABED YOUCEF

A Tous La Famille LOUNADI

À tous mes collègues d'assemblage soudé et Matériaux

Résumé

Différents procédés de soudage sont présents, parmi les différents procédés de soudage, le soudage au gaz inerte au tungstène (TIG) joue un rôle majeur dans le soudage de l'acier doux ou des sections minces de métaux non ferreux tels que les alliages de cuivre, les alliages d'aluminium, le magnésium et l'acier inoxydable. De nombreux avantages sont obtenus dans le soudage TIG pour assembler des métaux dissemblables, comme éviter les scories, minimiser la zone affectée par la chaleur, etc. Étant donné que les paramètres d'entrée jouent un rôle majeur dans la détermination de la qualité d'une plaque soudée. Tels que la vitesse de soudage, le courant, l'électrode et le gaz inerte. Dans ce travail, une enquête est menée pour étudier l'effet de la variation de courant sur la soudure des plaques galvanisé et pour établir une relation entre la qualité de la soudure et le courant d'entrée. Nous avons simulé numériquement le soudage de deux plaques galvanisées sur logicielle Abaqus et la validation de travail qui fait une expérience dans la société ALZINC GHAZAOUET. Et pour crée une application numérique qui nous aide d'observer les paramètres appropriés d'intensité de poste soudure TIG, MATRIX 3000 AC/DC.

Mot clés : soudage, TIG, transfert de chaleur, simulation de soudage, réglage paramètres de soudage.

Abstract

Different welding processes are present, among the different welding processes, tungsten inert gas welding (TIG) plays a major role in welding mild steel or thin sections of non-ferrous metals such as copper alloys, aluminum alloys, magnesium and stainless steel. Many advantages are obtained in TIG welding to join dissimilar metals, such as avoiding slag, minimizing the heat affected zone, etc. Since the input parameters Take a major role in determining the quality of a welded plate. Such as welding speed, current, electrode and inert gas. In this work, an investigation is conducted to study the effect of current variation on the welding of galvanized plates and to establish a relationship between the weld quality and the input current. We numerically simulated the welding of two galvanized plates on software Abaqus and validation of work that makes an experiment in the company ALZINC GHAZAOUET. And to create a digital application that helps us to observe the appropriate parameters of intensity of TIG welding station, MATRIX 3000 AC/DC.

Keywords: welding, TIG, heat transfer, welding simulation, adjustment of welding parameters.

ملخص

توجد عمليات لحام مختلفة من بينها اللحام بالغاز الخامل TIG الذي يلعب دورًا رئيسيًا في لحام بعض المعادن غير الحديدية مثل سبائك النحاس وسبائك الألومنيوم والمغنيسيوم والفولاذ المقاوم للصدأ خصوصاً أو لحام القطع ذات السماكة الرقيقة. يتم تحقيق العديد من المزايا في لحام TIG للانضمام إلى معادن غير متشابهة، مثل تجنب رواسب وتقليل المنطقة المتأثرة بالحرارة، إلخ. نظرًا لأن معلمات الإدخال تلعب دورًا رئيسيًا في تحديد جودة اللوحة الملحومة. مثل سرعة اللحام والتيار والكهرباء والغاز الخامل. في هذا العمل، يتم إجراء تحقيق لدراسة تأثير التباين الحالي على لحام الصفائح المجلفنة وإقامة علاقة بين جودة اللحام وتيار الإدخال. قمنا بمحاكاة لحام لوحين من الفولاذ المقاوم للصدأ رقميًا في برنامج Abaqus لإنشاء تطبيق رقمي يساعدنا في اختيار معلمات كثافة اللحام TIG المناسبة للعلامة التجارية MATRIX 3000 AC / DC.

الكلمات المفتاحية: اللحام، TIG، نقل الحرارة، محاكاة اللحام، تعديل معايير اللحام.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : orgramme montrant la plupart des procédés de soudage.....	4
Figure I-2 : le soudage oxyacetylenique.....	5
Figure I-3 : le post le soudage oxyhydrogene	6
Figure I-4 : le Soudage A L'electrode Enrobee	7
Figure I-5 : le soudage MIGMAG	7
Figure I-6 : le Soudage TIG	8
Figure I-7 : soudage SAW.....	8
Figure I-8 : le soudage plasma	9
Figure I-9 : soudage par faisceau d'électrons.....	10
Figure I-10 : le soudage laser	11
Figure I-11 : la brasure tendre	11
Figure I-12 : brasure forte	12
Figure I-13 : le soudo-brasage	12
Figure I-14 : soudage par point	13
Figure I-15 : le soudage à la molette	14
Figure I-16 : le soudage par bossages.....	14
Figure I-17 : le soudage par friction.....	15
Figure I-18 : la soudure explosive	16
Figure I-19 : les zone du cordon de soudure en soudage	16
Figure I-20 : les Contrainte de rétraction dans une soudure	18
Figure I-21 : machine de tractio	20
Figure I-22 : schéma de principe d'Essai de choc	20
Figure I-23 : machine d'essai duresité.....	21
Figure I-24: machine d'essai de pliage.....	21
Figure II-1 : schéma explicatif de le procède TIG	23
Figure II-2 : l'équipement de soudage TIG	25
Figure II-3 : generateurs TIG MATRIX 22-3028AC/DC	26
Figure II-4 : schéma de composants de la torche de soudage	27
Figure II-5 : differents types de buses de torche pour le soudage	28
Figure II-6 : alimentions de gaz.....	29
Figure II-7 : métal d'apport.....	29
Figure II-8 : les Équipement de sécurité TIG	30
Figure II-9 : les polarités en curent directe	31
Figure II-10 : la forme de courant pulsé.....	32
Figure II-11 : la forme de courant AC.....	32
Figure II-12 : Amorçage HF	35
Figure II-13 : Amorçage lift	35
Figure II-14 : le cycle de soudage TIG	36
Figure II-15 : 2T en soudage TIG.	38
Figure II-16 : 4Ten soudage TIG.	38
Figure II-17 : preparation de Tungsten.....	39
Figure II-18 : les risque de soudage	40
Figure III-1 : les phénomènes physiques impliqués.....	44
Figure III-2 : schéma de démontions des plaque	46
Figure III-3 : model source de Type disque.....	48
Figure III-4 : les conditions aux limites.	49
Figure III-6 : les éléments briques «C3D8T »	49
Figure III-5 : le Modèle de maillage 3D de l'Assemblage.	49

Figure III-7 : interface du programme abaqus.....	50
Figure III-8 : calculateur de laboratoire de recherche.....	50
Figure III-9 : courbe montrant le changement de courant en en fonction de l'épaisseur des plaques sans métal d'apport.....	51
Figure III-10 : courbe montrant le changement de courant en en fonction de l'épaisseur des plaques avec métal d'apport.....	53
Figure III-11 : resultats de simulation pour des plaques de 2 mm avec un courant de 60A.....	54
Figure III-12 : resultats de simulation pour plaque de 2 mm avec un courant de 55A Sans revêtement.....	54
Figure III-13 : courbe montrant le changement de température sur la longueur de la plaque.....	55
Figure III-14 : courbe montrant le changement de température sur la largeur de la plaque.....	56
Figure III-15 : courbe montrant le changement de contrainte sur la largeur de la plaque.....	57
Figure III-16 : soudage de plaque pour 2mm d'épaisseur avec 60A.....	58
Figure III-17 : soudage de plaque pour 2mm d'épaisseur avec 55A.....	58
Figure III-18 : MATRIX 3000 AC/DC.....	59
Figure III-19 : tableau de contrôle de de post de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000.....	61
Figure III-20 : les procédé soudage en MATRIX300.....	62
Figure III-21 : contrôle le diamètre de l'électrode pour HF.....	62
Figure III-22 : l'option pour sélectionne le mode de soudage.....	63
Figure III-23 : paramètres de soudage TIG.....	64
Figure III-24 : présentation de l'interface l'application.....	65
Figure III-25 : l'interface de saisie les paramètre.....	66
Figure III-26 : interface de réglage de post pour soudage bout à bout uniforme.....	67
Figure III-27 : interface de réglage de post pour soudage bout à bout irrealare.....	68
Figure III-28 : interface de choix de l'électrode.....	69
Figure III-29 : interface de choix de buse et le débit de gaz.....	70

LIST DES TABLEAUX

Tableau II-1 : différent types d'électrode	28
Tableau III-1 : épaisseurs de revêtement dans les plaque	44
Tableau III-2 : les propriétés physiques thermiques de métal (DIN EN 10346).	45
Tableau III-3 : les propriétés physiques thermiques de zinc (DIN EN 10346).	46
Tableau III-4 : les variation de l'épissure sur le plaque.	46
Tableau III-5 : les données techniques générales de l'installation sont résumées.....	60

LIST DES SYMBOLES

- TWI: the welding Institut
- TIG: Tungstène Inerte Gaz
- SMAW: Shielded metal arc welding
- MIG MAG: Metal Inert Gas and Metal Active Gas
- GMAW: Gas metal arc welding
- TIG: Tungsten Inert Gas
- SAW: Submerged Arc Welding
- ZF : Zone fondu
- ZAT : Zone affectée thermiquement
- ZFP : Zone fondue partiellement
- FE : soudage faisceau d'électrons
- T : température
- σ_x : contraintes longitudinales
- σ_y : contraintes transversale
- C.N.D : Le Contrôle Non Destructif
- UV : Ultraviolet radiation
- AC : alternating current
- DC : direct current
- 2T: two-touch
- 4T: four-touch
- AWS: de l'American Welding Societys
- PMI: Project Management Institute
- C.A.O : Conception assistée par Ordinateur
- MDF : méthode des éléments finis
- q_r = flux de chaleur (W/m^2).
- q_0 = flux de chaleur maximum au centre de la source (W/m^2).
- r = distance radiale du center de la source de chaleur (m) .
- C =coefficient de concentration (m^{-2}).
- Q : énergie thermique (J)
- η : Rendement.
- U : la tension (v).
- I : courant (A).
- C3D8T : 8-node linear brick.
- d : distance (mm).
- IGBT : Insulated gate bipolar transistor.
- HF: high frequency (Hz).

Summer

Résumé	I
LISTE DES FIGURES	II
LIST DE TABLEUR	IV
LIST DES SYMBOLES	V
Summer	VI
INTRODUCTION GENERAL	1
I. CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE	1
I.1. INTRODUCTION	2
I.2. HISTORIQUE	2
I.3. QU'EST-CE QUE LA SOUDURE ?	3
I.4. AVANTAGES DU SOUDAGE	3
I.5. LES PROCEDES DE SOUDAGE	3
I.6. LE SOUDAGE PAR FUSION	4
I.6.1. Soudage homogène	5
I.6.1.1. Soudage au gaz	5
I.6.1.1.1. Soudage oxyacétylénique	5
I.6.1.1.2. Soudage Oxyhydrogène	6
I.6.1.2. Soudage à l'arc	6
I.6.1.2.1. Soudage à arc à l'électrode enrobée	7
I.6.1.2.2. Soudage MIG MAG (GMAW)	7
I.6.1.2.3. Soudage TIG (GTAW)	8
I.6.1.2.4. Soudage SAW	8
I.6.1.2.5. Soudage plasma	9
I.6.1.3. Soudage par faisceaux à haute énergie	9
I.6.1.3.1. Le soudage par faisceau d'électrons	10
I.6.1.3.2. Soudage laser	10
I.6.2. Soudure Hétérogène	11
I.6.2.1. La brasure tendre $T^{\circ} < 350^{\circ}\text{C}$	11
I.6.2.2. Brasure forte $T^{\circ} > 450^{\circ}$	12
I.6.2.3. Le soudo-brasage $T^{\circ} \pm 900^{\circ}$	12
I.7. SOUDAGE PAR RESISTANCE	13
I.7.1. Soudage par point	13
I.7.2. Le soudage à la molette	13
I.7.3. Le soudage par bossages	14
I.8. SOUDAGE PAR PRESSIONS	15
I.8.1. Soudage par friction	15
I.8.2. Soudage par explosion	15
I.9. LA CARACTERISATION DU CORDON DE SOUDURE	16

I.9.1.	La zone fondue (ZF)	16
I.9.2.	La zone affectée thermiquement (ZAT)	16
I.9.3.	La zone de liaison	17
I.9.4.	Le métal de base	17
I.10.	CONTRAINTES ET DEFORMATIONS RESIDUELLES	17
I.11.	CONTROLE DE SOUDAGE	19
I.11.1.	Contrôle destructif	19
I.11.1.1.	Essai de traction	19
I.11.1.2.	Essai de choc	20
I.11.1.3.	Essai de dureté	21
I.11.1.4.	L'essai De pliage	21
I.11.2.	Contrôle non destructif	22
II.	CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG	23
II.1.	INTRODUCTION	23
II.2.	DEFINITION DU PROCEDE TIG / 141 / GTAW	23
II.3.	PRINCIPE DU PROCEDE DE SOUDAGE TIG	24
II.4.	AVANTAGES DU PROCEDE DE SOUDAGE TIG	24
II.5.	INCONVENIENTS DU SOUDAGE GTAW	24
II.6.	DOMAINES D'APPLICATIONS CONCERNES	24
II.7.	ÉQUIPEMENT DE SOUDAGE TIG	25
II.7.1.	Générateurs TIG	25
II.7.1.1.	Source d'alimentation DC	26
II.7.1.2.	Générateur de courant alternatif DC/AC	26
II.7.2.	Torches de soudage TIG	27
II.7.2.1.	Différents types de buses de torche TIG	27
II.7.2.2.	Différent types d'électrode	28
II.7.3.	Alimentation de gaz de protection	29
II.7.4.	Baguette (métaux d'apport)	29
II.7.5.	Les Équipement de sécurité TIG	30
II.8.	PARAMETRES DE PROCESSUS DE GTAW	30
II.8.1.	Courant de soudage	30
II.8.1.1.	Courent DC normal	30
II.8.1.1.1.	Courant continu avec connexion en polarité directe	31
II.8.1.1.2.	Courant continu avec connexion en polarité inverse	31
II.8.1.2.	Courant pulsé	32
II.8.1.3.	Courent AC	32
II.8.2.	Tension de soudage	33
II.8.3.	La vitesse de soudage	33
II.8.4.	Les gaz de protection	33
II.8.5.	Taille d'électrode	34
II.8.6.	Métal d'apport	34
II.9.	SYSTEMES D'AMORÇAGE E DE L'ARC	35

II.9.1.	Amorçage HF	35
II.9.2.	Amorçage LIFT	35
II.10.	Comprendre le schéma du cycle de soudage sur un générateur TIG	36
II.10.1.	Le pré-gaz	36
II.10.2.	L'amorçage de soudage et la montée en intensité de l'arc	36
II.10.3.	Intensité de soudage	36
II.10.4.	Evanouissement de l'arc électrique de soudage	36
II.10.5.	Le poste gaz	36
II.11.	2T et 4T en soudage TIG	37
II.11.1.	Quand utilisez-vous les modes 2T et 4T ?	37
II.11.2.	Comment cela fonctionne ?	37
II.11.2.1.	2T en soudage TIG	37
II.11.2.2.	4T en soudage TIG	38
II.12.	PREPARATION DE TUNGSTEN	39
II.13.	LE SOUDAGE TIG EST-IL DANGEREUX ?	39
II.14.	SOUDAGE DE L'ACIER GALVANISE	40
II.14.1.	Protection individuelle pour le soudage de l'acier galvanisé.	40
II.14.2.	Des soudures de qualité pour le soudage de l'acier galvanisé	41
II.14.3.	Prévention de la corrosion lors du soudage de l'acier galvanisé	41
II.15.	CONCLUSION	42
III.	CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE	43
III.1.	INTRODUCTION	43
III.2.	Simulation A L'AIDE DE LOGICIEL ABAQUS	43
III.3.	ETUDE THERMOMECHANIQUE DE SOUDAGE TIG	43
III.4.	PROPRIÉTÉ DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA SIMULATION	44
III.4.1.	Les propriétés physiques thermiques de métal et revêtement de zinc en fonction de la température	45
III.4.2.	Démontions de model	46
III.5.	MODELISATION NUMERIQUE	47
III.5.1.	Modèle du disque de la source de chaleur	47
III.5.2.	Condition aux limite et Condition initiale	49
III.5.3.	Maillage	49
III.6.	METHODE DE MODALISATION	50
III.7.	RESULTAT ET DISCUSSION	51
III.7.1.	L'effet de variations géométrique sur courant	51
III.7.2.	L'effet de débit de gaz sur le temps de refroidissement	55
III.7.3.	L'effet de débit de gaz sur la température à la largeur de plaque	56
III.7.4.	L'effet de débit de gaz sur les contraintes résiduelles	57
III.8.	Validation du modèle	58
III.9.	L'APPLICATION DE REGLAGE DE POSTE	59

III.9.1.	Données techniques de post de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000	59
III.9.2.	Explication de l'interface de de post de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000	60
III.9.2.1.	PROCÉDÉ DE SOUDAGE	61
III.9.2.2.	Diamètre Electrode	62
III.9.2.3.	Mode De Soudage	62
III.9.2.4.	Paramètres De Soudage	63
III.9.3.	Présentation de l'application pour de soudage TIG MATRIX 3000	65
III.9.3.1.	Ecran 1 De L'application(Interface)	65
III.9.3.2.	ÉCRAN 2 DE L'APPLICATION (ENTRER LES PARAM2TRES)	66
III.9.3.3.	ECRAN DE L'APPLICATION (AFFICHAGEE DE REGELAGE)	66
III.10.	CONCLUSION	70
IV.	CONCLUSION GENERAL	71
	BIBLIOGRAPHIES	

INTRODUCTION GENERAL

Le soudage est un processus courant pour assembler des métaux en utilisant une grande variété d'applications. Le soudage se produit à plusieurs endroits. Les processus de soudage sont assez simples à comprendre et les techniques de base peuvent être apprises rapidement. Le soudage est l'assemblage de métaux au niveau moléculaire. Une soudure est une liaison homogène entre deux pièces métalliques ou plus, où la résistance du joint soudé dépasse la résistance des pièces métalliques de base. Au niveau le plus simple, le soudage implique l'utilisation de quatre composants : les métaux, une source de chaleur, un métal d'apport et une sorte de bouclier contre l'air. Les métaux sont chauffés à leur point de fusion tout en étant à l'abri de l'air, puis un métal d'apport est ajouté à la zone chauffée pour produire une seule pièce de métal. Elle peut être réalisée avec ou sans métal d'apport et avec ou sans pression. Il existe plusieurs types de soudage qui sont utilisés aujourd'hui. Le soudage à l'arc au gaz métal (GMAW) ou MIG, le soudage à l'arc au tungstène au gaz (GTAW) ou TIG, le soudage à l'arc avec noyau de flux et le soudage à la baguette sont les types les plus courants dans les environnements industriels. Le soudage s'accompagne d'une courbe d'apprentissage assez longue. De nombreux défauts surviennent lors du processus de soudage. Certains matériaux nécessitent l'utilisation de procédés et de techniques spécifiques. Heureusement, tous ces défauts sont simples à éviter si certaines instructions sont respectées. Une clé majeure pour éviter les défauts de soudage est de sélectionner le bon équipement à certaines configurations. Dans ce travail, notre objectif est de mettre en évidence les paramètres les plus importants qui influencent le processus de soudage et comment connaître la valeur exacte à utiliser.

Nous commençons par le premier chapitre, Donne un aperçu du soudage (définition et l'importons) et comprend également un diagramme montera la classification des procédés de soudage appuyé par des exemples de Chaque classe, en plus un résumé sur les contraintes résiduelles et sur le contrôle de soudage. Dans le deuxième chapitre, nous concentrons sur le soudage TIG et tous ses aspects du principe au choix de l'électrode et aux mesures de protection nécessaires à certains usages, tout en donnant un aperçu sur le soudage des Plaques Galvanise. Dans le dernier chapitre, nous analysons les paramètres les plus importants qui influencent le processus de soudage et comment obtenir la configuration optimale dans notre cas la tôle galvanisée et la technique de soudage bout à bout et nous avons conclu avec la création d'une application qui donne la configuration optimale après avoir entré les informations d'entrée de la pièce à souder.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.1. INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage adaptés aux propriétés des différents composants à fabriquer et aux métaux utilisés. Le soudage est actuellement l'une des méthodes d'assemblage les plus courantes dans l'industrie, car il permet la fabrication efficace et fiable de composants indémontables, en particulier dans le domaine de la construction mécanique pour la fabrication de bateaux, trains, avions, fusées, voitures, ponts., tuyaux, réservoirs et bien d'autres choses qui ne peuvent être construites sans soudure.

I.2. HISTORIQUE

Les premiers exemples de soudage trouvés par les archéologues remontent à 3000 B.C. L'ancien processus de soudage consistait généralement simplement à marteler deux morceaux de métal ensemble sous la chaleur jusqu'à ce qu'ils se rejoignent. En 1540, le métallurgiste italien Vannoccio Biringuccio a publié *De LA PIRO TECHNIA*, le premier livre imprimé sur la métallurgie, qui comprend des descriptions de la fusion et de la forge du fer. La forge et le soudage de forges ont continué à se développer pendant la Renaissance. Les forgerons étaient au centre du Moyen Âge, installant souvent leur forge, également connue sous le nom de forge, au centre de leur village. Les forgerons ont forgé des armes soudées et ont également fabriqué des clous, des meubles, des serrures, des fers à cheval et des armures. Avec cette compétence pratique, les forgerons sont devenus essentiels à tout village, fournissant des outils pour la protection, le transport, les articles ménagers, et plus encore. Au cours de la révolution industrielle, des techniques de soudage plus modernes ont été développées. La découverte de la production d'un arc entre deux électrodes de carbone à l'aide d'une batterie est attribuée au chimiste Sir Humphry Davy en 1800. En 1802, le scientifique russe Vasily Petrov a créé l'arc électrique stable, qui a permis aux métallurgistes de faire fondre les métaux. Edmund Davy, qui est le cousin de Humphry Davy, a été crédité de la découverte de l'acétylène en 1836. Ces découvertes ont conduit à l'invention du générateur électrique, du soudage et de la découpe au gaz, et du soudage à l'arc plus stable au milieu du 19^{ème} siècle. La Première Guerre mondiale a provoqué une augmentation majeure de l'utilisation du soudage, avec des développements dans la production d'armes et le transport à travers le monde. Le soudage à l'arc était populaire dans la construction de navires et d'avions par l'Angleterre et l'Allemagne. Le soudage automatique a été introduit en 1920, qui alimente en continu un fil d'électrode à travers la machine à souder. De nouveaux gaz de soudage ont également été utilisés dans les années 1900, dans le but de protéger les soudures des effets de l'oxygène et de l'azote dans les atmosphères, empêchant ainsi les soudures rouillées et cassantes. Au cours de milliers d'années de développements techniques et pratiques, le soudage a considérablement progressé pour devenir plus précis, rapide et efficace. Il existe plus de 90 procédés de soudage, et ces méthodes sont constamment développées avec de nouvelles recherches dans les industries nucléaire, spatiale, des transports et de la construction navale. Les techniques de soudage modernes ont évolué pour offrir de meilleures performances, enracinées dans la sécurité et des produits construits de manière durable. Les techniques d'inspection contemporaines ont amélioré les défauts ou les imperfections, établissant une norme en matière de sécurité et de savoir-faire [1].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.3. QU'EST-CE QUE LA SOUDURE ?

Dans son contexte le plus large, le soudage est un procédé dans lequel des matériaux du même type ou de même classe fondamentale sont réunis et amenés à se joindre (et à ne faire qu'un) par la formation de liaisons chimiques primaires (et, parfois, secondaires) sous l'action combinée de la chaleur et de la pression (Joining of Advanced Materials 1993). Les dictionnaires courants ont tendance à restreindre quelque peu la définition, comme le montre la définition donnée dans 'American Heritage Dictionnaire' : « Joindre (métaux) en appliquant de la chaleur, parfois avec pression et parfois avec un métal intermédiaire ou de remplissage ayant un point de fusion élevé. » La définition trouvée dans la norme ISO R 857 (1958) stipule « Le soudage est une opération dans laquelle la continuité est obtenue entre les pièces pour l'assemblage, par divers moyens », tandis que la devise sur les armoiries de l'Institut de soudage (communément appelé TWI) indique simplement « E DUOBUS UNUM », ce qui signifie « de deux ils deviennent un ». Tout d'abord, il y a le point important que Le soudage est un procédé d'assemblage permanent. Plusieurs pièces ne font qu'une en établissant une continuité. Ici, la continuité implique l'absence de toute perturbation physique à l'échelle atomique, c'est-à-dire pas d'écarts, contrairement à fixation mécanique où un espace physique, qu'elle soit la précision de l'assemblage. De ce fait, les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage), ainsi que les techniques de brasage ne répondent pas à la définition du soudage [2].

I.4. AVANTAGES DU SOUDAGE

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...);
- Il répond à des sollicitations élevées;
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques ...);
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée.

I.5. LES PROCÉDES DE SOUDAGE

Le domaine du soudage est vaste. Afin de répondre au besoin d'assembler une grande variété de matériaux de différentes manières, un grand nombre de techniques de soudage sont disponibles; chacun d'eux a ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients par rapport aux autres. Aujourd'hui, plus de 100 procédés de soudage différents sont utilisés de manière conventionnelle. Les regrouper tous ensemble est un peu difficile. Toute classification concise comportera des lacunes susceptibles d'exclure quelques processus d'un groupe particulier. Cela ouvre la voie à la classification des procédés de soudage de différentes manières. La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur);
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide);
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

D'une manière très globale on classe les procédés de soudage des aciers sous trois importantes catégories figure I-1 :

- Soudage par fusion ;
- Soudage par résistance ;
- Soudage par pression.

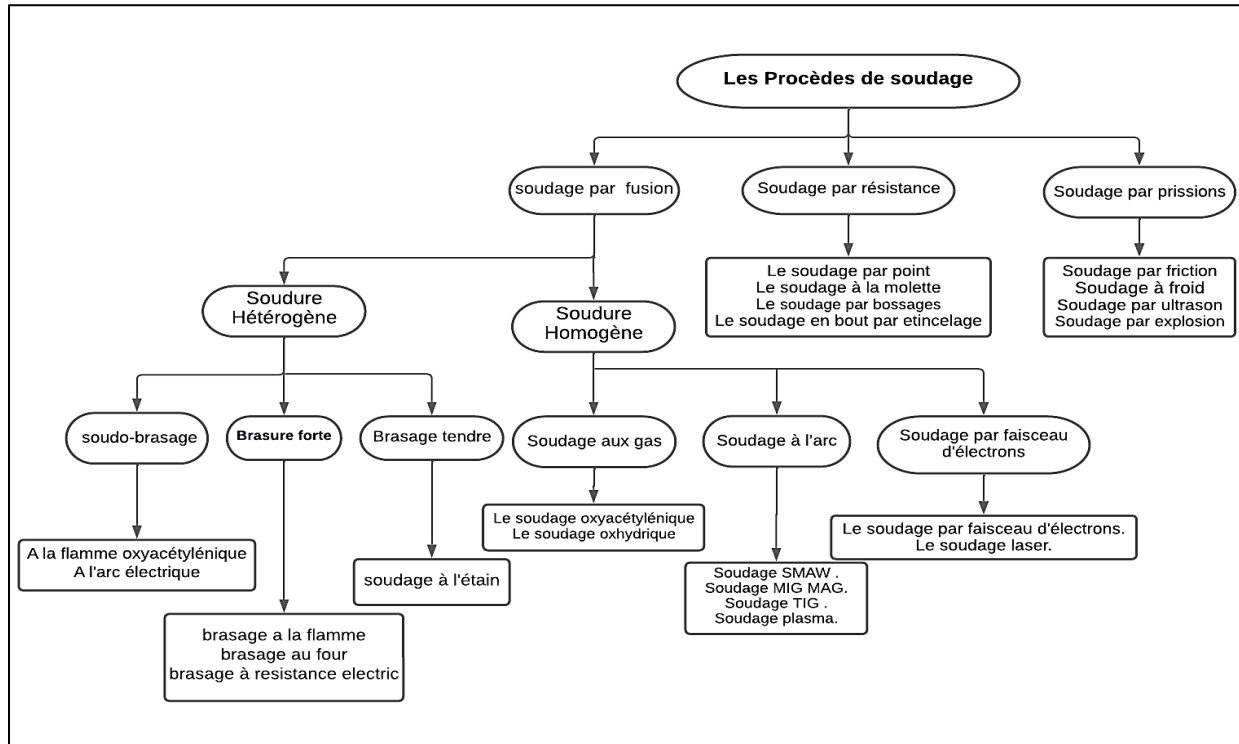


Figure I-1 : organigramme montrant la plupart des procédés de soudage [2].

I.6. LE SOUDAGE PAR FUSION

Qui consiste à porter à fusion les bouts des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels qu'arc électrique, flamme de gaz, réaction chimique, énergie de rayons laser, jet de plasma etc. Sous l'action de la chaleur les bouts du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, lequel après solidification constitue la soudure. La plupart des procédés de soudage en phase liquide ont été développés depuis la fin du XIXe siècle puisqu'avant on ne disposait pas de moyens pour focaliser l'énergie de manière à faire fondre les métaux localement. Dans l'industrie le procédé plus utilisé pour construire des assemblages de matériaux de mémé pépérite est le soudage en phase liquide. Il existe deux types :

- Soudage homogène ;
- Soudage hétérogène.

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.Soudage homogène

Comme son nom l'indique, les matériaux soudés et l'apport métal sont de même composition, et réalisent une meilleure jointure à froid. Dans le cas où un métal d'apport n'existe pas, le soudage homogène est appelé soudage autogène [3].

- Soudage aux gaz ;
- Soudage à l'arc ;
- Soudage par faisceau d'électrons.

I.6.1.1.Soudage au gaz

Le soudage consiste à assembler des pièces métalliques, avec ou sans métal d'apport, par fusion des deux bouts de pièces métalliques de même matière. Dans le cas du soudage avec métal d'apport, celui-ci a une température de fusion et des caractéristiques mécaniques équivalentes aux pièces à assembler. Ce procédé est employé pour des applications d'entretien, de réparation, etc. L'emploi d'une flamme oxy-combustible est nécessaire. L'acétylène, le crylène ou le propane permettent d'obtenir des soudures de bonne qualité [4].

I.6.1.1.1. Soudage oxyacétylénique

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène -C₂H₂ avec un gaz comburant d'oxygène -O₂. La température de la flamme peut atteindre les 3200 ° Celsius, lorsque le mélange C₂H₂ et O₂ est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bout à bout ». L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux (boyaux) de gaz à la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar) Un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule la pression et l'arrivée des gaz.

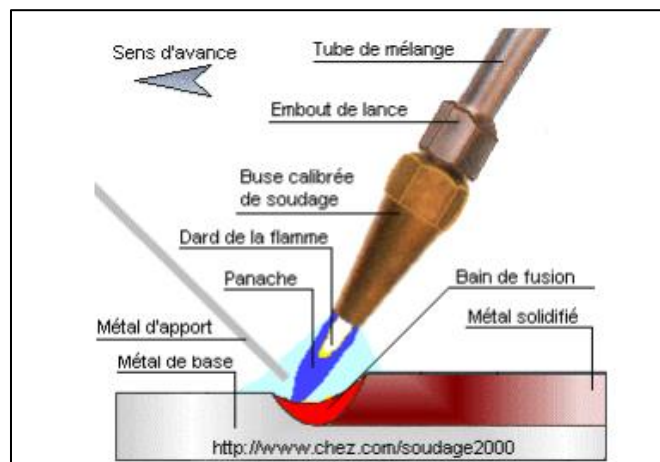


Figure I-2 : le soudage Oxyacétylénique [5].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.1.2. Soudage Oxyhydrogène

Dans le soudage Oxyhydrogène, l'hydrogène se combine à l'oxygène pour générer de la vapeur et atteindre une température de flamme d'environ 28000C. Mais le bain de soudure n'est pas protégé de l'atmosphère lorsque l'oxygène nécessaire à la combustion est entièrement fourni par le chalumeau lui-même. Ainsi, le chalumeau fournit de l'oxygène en quantité légèrement inférieure à celle requise pour une combustion complète, tandis que l'oxygène atmosphérique assure la combustion de l'hydrogène restant. Cela donne lieu à une flamme de préchauffage protectrice qui entoure la flamme principale. Mais cela réduit dans une certaine mesure la température de la flamme. En raison de la température plus basse de la flamme, le soudage Oxyhydrogène est un procédé généralement lent. Il est normalement utilisé pour souder des feuilles minces d'aciers et d'alliages à faible température de fusion.



Figure I-3 : le post le soudage Oxyhydrogène [6].

I.6.1.2. Soudage à l'arc

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. La fusion du métal d'apport et des pièces à assembler est obtenue par un arc électrique jaillissant entre une électrode et les pièces à assembler. La fusion très localisée amène moins de déformation que la fusion au chalumeau. Cependant le refroidissement rapide entraîne l'apparition de contraintes internes et de déformations qu'il est parfois difficile de corriger. C'est ce procédé qui est le plus utilisé industriellement en soudage Homogène. Il existe boucaux de type comme :

- Soudage à arc à l'électrode enrobée SMAW ;
- Soudage MIG MAG ;
- Soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ;
- Soudage SAW ;
- Soudage plasma.

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.2.1. Soudage à arc à l'électrode enrobée

Le soudage à l'électrode est aujourd'hui encore le procédé de soudage le plus employé est relativement simple. Un poste à souder, généralement à courant constant, est connecté à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

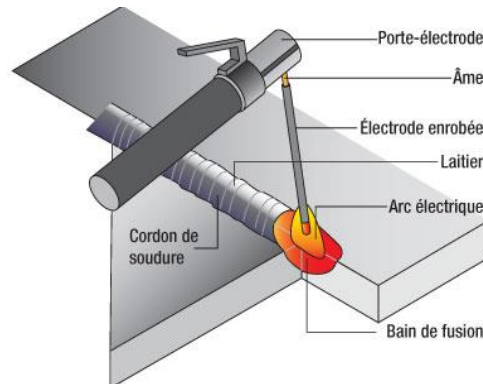


Figure I-4 : le soudage à l'électrode enrobée [7].

I.6.1.2.2. Soudage MIG MAG (GMAW)

Avec le procédé GMAW, la fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base. Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion et l'arc contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage. Où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée. Les procédés de soudage semi-automatiques ont en commun l'usage d'un fil-électrode comme métal d'apport, fil qui est dévidé automatiquement par un dévidoir intégré à la soudeuse ou indépendant. La distinction entre ces procédés provient du type de fil-électrode.

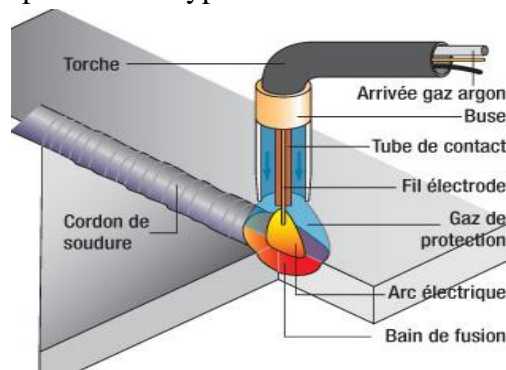


Figure I-5:le soudage MIGMAG [7].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.2.3. Soudage TIG (GTAW)

Le procédé GTAW porte le métal à la fusion grâce à un arc électrique, formé dans une atmosphère gazeuse inerte, entre une électrode réfractaire et la pièce à souder. Au lieu de l'enrobage, le procédé utilise un gaz pour protéger le bain de fusion et l'arc de la contamination par l'air ambiant. Le soudage avec ce type de procédé peut être exécuté avec ou sans métal d'apport. Les baguettes d'apport permettent d'alimenter le bain de fusion et de remplir ainsi le joint à souder. Le procédé GTAW est particulièrement utilisé pour souder des plaques minces et des métaux ayant une faible soudabilité.

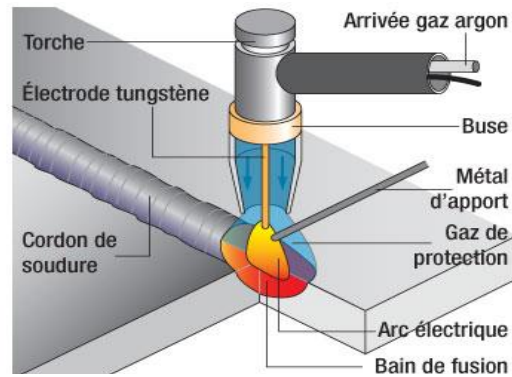


Figure I-6 : le Soudage TIG [7].

I.6.1.2.4. Soudage SAW

Le soudage électrique à l'arc sous flux solide électro conducteur est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de $\varnothing 1,2$ à $\varnothing 6$ mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.

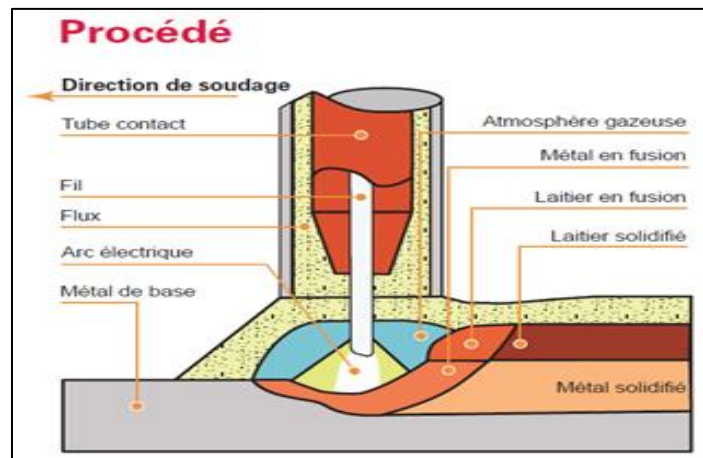


Figure I-7 : soudage SAW [8].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.2.5. Soudage plasma

Le soudage plasma peut être considéré comme une évolution des procédés TIG, tant en termes de densité énergétique du faisceau que des performances réalisées. La soudure plasma nécessite un gaz supplémentaire qui mélangé au gaz principal élève notablement la température de soudage jusqu'à l'effet plasmatique. En conséquence, si le soudage plasma utilise une électrode en tungstène non fusible comme pour le soudage TIG, ou un fil fusible continu comme pour la soudure MIG, celle-ci est protégée par une buse en cuivre qui est en permanence refroidie à l'eau pour éviter sa fusion. Cette buse canalise d'une part le gaz initial en position centrale et d'autre part le second gaz en position annulaire.

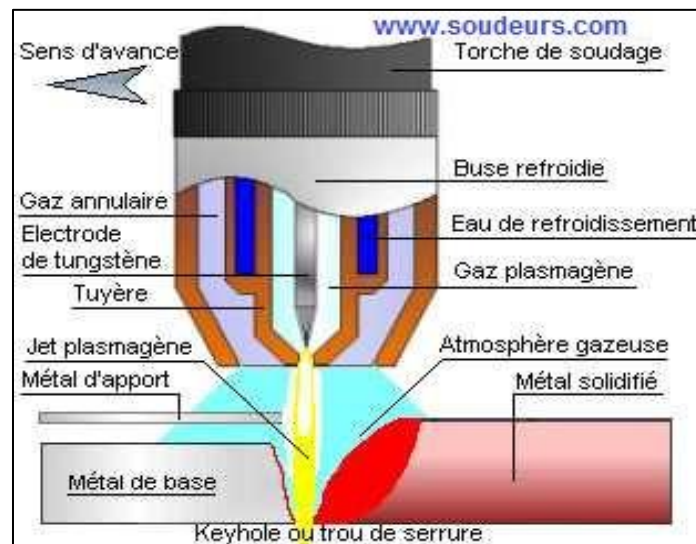


Figure I-8 : le soudage plasma [9].

I.6.1.3. Soudage par faisceaux à haute énergie

Les faisceaux à haute énergie se caractérisent par la propriété de concentrer des puissances de plusieurs dizaines de kilowatts sur des surfaces de quelques dixièmes à quelques millimètres carrés, développant ainsi des puissances spécifiques de 10^6 W/cm² voire plus, bien supérieures à celles mises en œuvre dans les autres procédés de soudage. On classe dans cette catégorie les faisceaux d'électrons et les rayons laser que l'on utilise en soudage sous les noms de soudage par faisceau d'électrons (en abrégé : par FE) ou (BE) et de soudage (par ou au) laser.

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.1.3.1. Le soudage par faisceau d'électrons

Le soudage par faisceau d'électrons, comme le soudage laser, fait partie des procédés de soudage dits « à haute énergie ». Est un procédé caractérisé par une concentration très importante d'énergie en un point donné. Le principe de base du procédé par faisceau d'électrons (F.E.) est la transformation de l'énergie cinétique d'un faisceau d'électrons en énergie calorifique. Le processus de soudage est réalisé dans une chambre à vide de l'ordre de 10^{-6} mbar à 10^{-7} mbar (10^{-4} Pa à 10^{-5} Pa). Le faisceau d'électrons est généré par un canon lui-même placé sous vide.

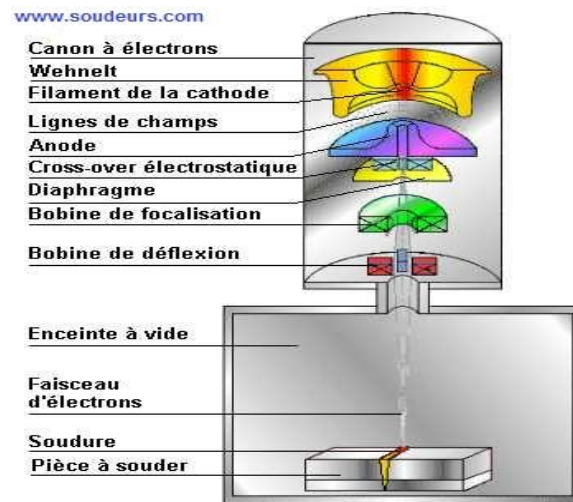


Figure I-9 : soudage par faisceau d'électrons [10].

I.6.1.3.2. Soudage laser

Le soudage laser assure la fusion des lèvres des matériaux à souder grâce à un flot de lumière cohérente qui élève très rapidement la température des matériaux jusqu'à leur point de fusion avec une précision et une finesse que la flamme ou l'arc électrique sont incapables d'atteindre. Un système génère et concentre l'énergie d'un faisceau laser, de 10^5 W/cm² à 10^6 W/cm² environ : Le faisceau laser est de l'épaisseur d'un cheveu (capillaire) dans lequel le métal est porté jusqu'à son point de vaporisation au centre et au niveau liquide sur ses parois. Le bain de fusion est déplacé mécaniquement pour la précision du soudage. Une fois solidifié à nouveau après le passage du faisceau, le métal assure la continuité métallurgique entre les pièces soudées rendant la soudure invisible à l'œil nu. Selon les matériaux à souder et l'aspect attendu de la soudure, un gaz inerte ou une poudre fusible peut être apporté sur le bain de fusion afin d'augmenter ses performances et protéger la zone de soudure de l'oxydation par l'air ambiant.

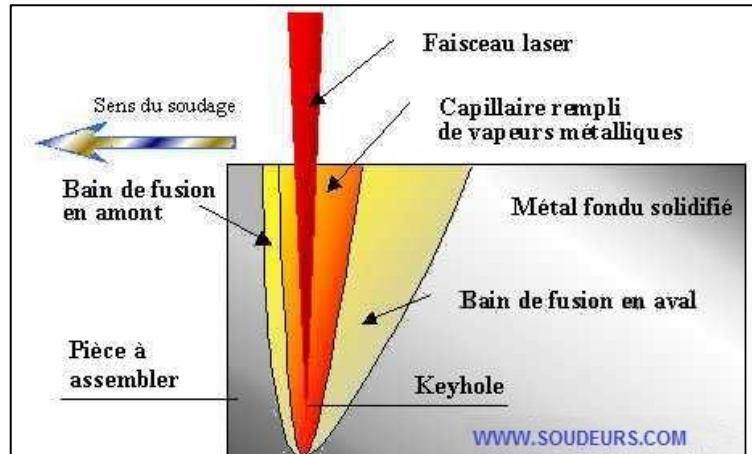


Figure I-10 : le soudage laser [10].

I.6.2. Soudure Hétérogène

Les soudures sont hétérogènes lorsque le métal de base et le métal d'apport ont des propriétés différentes. Au cours de ce processus, les pièces à assembler n'atteignent pas la température de fusion et ne participent pas à la formation du joint. Cet effet ne peut être obtenu qu'avec un métal d'apport, qui a un point de fusion inférieur et, une fois solidifié, assure une liaison métallique entre les surfaces à assembler. Il est à noter que le soudage hétérogène n'est pas un type particulier de procédé de soudage comme SMAW, TIG, GMAW, etc. ; au lieu de cela, il s'agit de l'un des trois modes ou manières différents de réaliser le soudage par fusion :

I.6.2.1. La brasure tendre $T^{\circ} < 350^{\circ}\text{C}$

La brasure tendre est une opération utilisée en plomberie qui consiste à assembler deux pièces de métal (cuivre dans le cas de la plomberie) au moyen d'un métal d'apport, dont la température de fusion est inférieure à celle des pièces.



Figure I-11 : la brasure tendre [11].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.6.2.2. Brasure forte $T^{\circ} > 450^{\circ}$

A la différence de la brasure tendre, la brasure forte s'effectue avec le métal d'apport requérant une température de chauffe beaucoup plus élevée (plus de 450°C). La brasure forte est recommandée dans le cas d'installation de chauffage et impérative pour toutes installations de gaz.

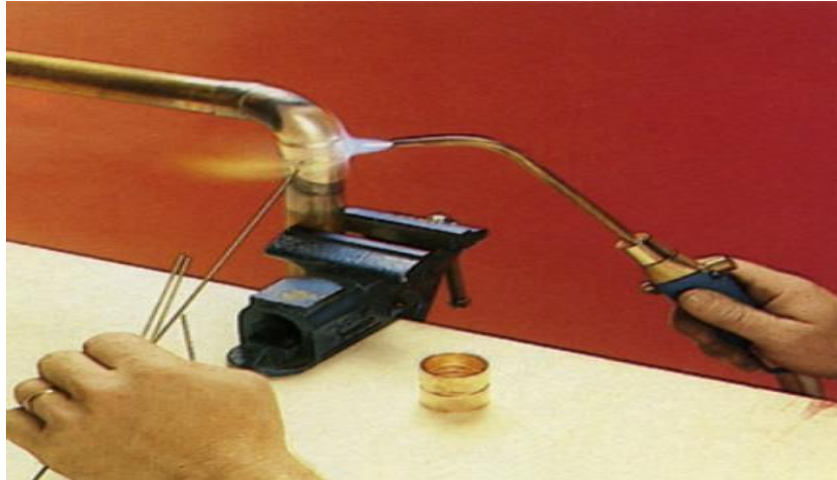


Figure I-12 : brasure forte [12].

I.6.2.3. Le soudo-brasage $T^{\circ} \pm 900^{\circ}$

Le soudo-brasage est un soudage hétérogène, c'est un assemblage de 2 pièces métalliques de nature identiques ou différentes par l'utilisation d'un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui des 2 pièces à assembler. Cela s'assimile plus à du collage qu'à du soudage. L'alliage constituant le point est déposé à l'état liquide sur les pièces à assembler [13]. Il est nécessaire que les atomes du métal d'apport diffusent dans le métal de base pour avoir une bonne liaison ou assemblage d'où la nécessité de compatibilité entre les deux réseaux.



Figure I-13 : le soudo-brasage [13].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.7. SOUDAGE PAR RESISTANCE

Le soudage par résistance permet d'assembler 2 pièces de façon permanente, en les fusionnant. Cette méthode de soudage requiert tout d'abord une pression mécanique qui permettra ensuite à un courant électrique important (des milliers d'Ampères au minimum) de traverser les 2 éléments et de les faire fusionner au point de contact. Il n'y a donc pas d'ajout de métal (c'est ce qu'on appelle un soudage autogène). Assurément, le métal des éléments doit être conducteur d'électricité, Les procédés de soudage par résistance sont les suivants :

I.7.1.Soudage par point

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. D'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm. La figure (1.6) représente la configuration la plus conventionnelle du soudage par points de deux pièces au moyen d'une série de points de soudures exécutée par un opérateur sur une machine à souder. Les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L'action d'une pédale déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes.

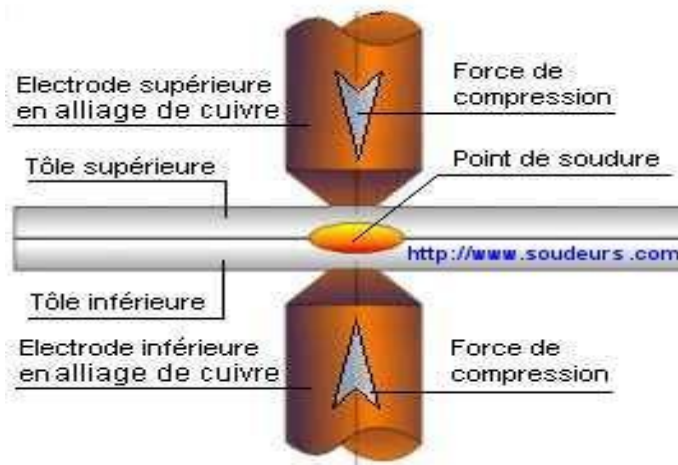


Figure I-14 : soudage par point [14].

I.7.2.Le soudage à la molette

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou molettes, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux molettes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / molettes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule à l'interface des deux pièces et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux molettes. Le soudage à la molette permet d'obtenir une soudure continue et étanche lorsque le passage de courant est continu.

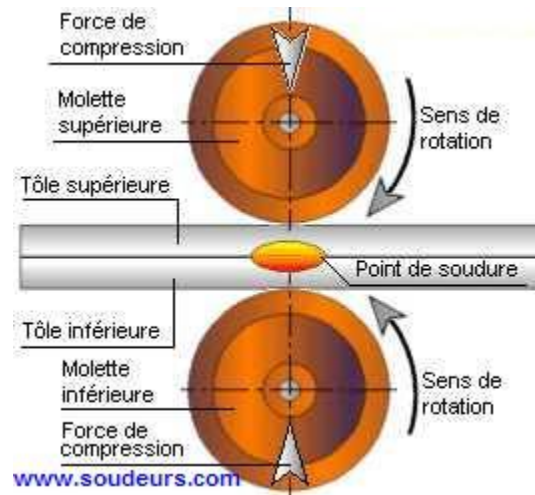


Figure I-15 : le soudage à la molette [15].

I.7.3. Le soudage par bossages

Ce procédé est également appelé soudage par protubérances ou soudage par projections (de l'anglais projection-welding). Il permet de réaliser des assemblages continus ou discontinus par superposition ; mais il se distingue du soudage par points ou à la molette en ce que la localisation du courant et de l'effort sur la zone de soudage n'est pas obtenue par les électrodes, mais par la géométrie des pièces à souder elles-mêmes. Il est, de plus, un procédé de soudage global.

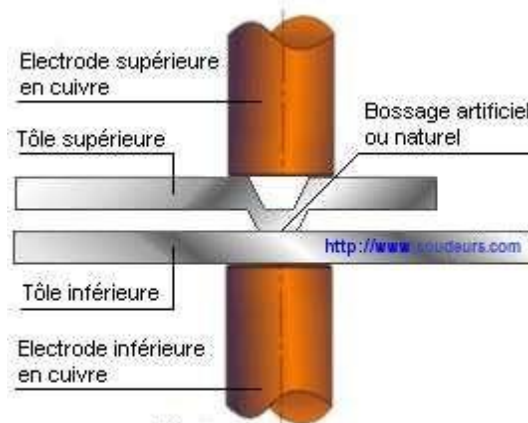


Figure I-16 : le soudage par bossages [16].

I.8. SOUDAGE PAR PRESSIONS

Le soudage par pression regroupe tous les procédés de soudages dans lesquels on obtient en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage.

I.8.1.Soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. Aussi pour ce procédé, nous avons une machine disponible. Soudage par friction en rotatif et Soudage par friction par point et Soudage par friction malaxage.

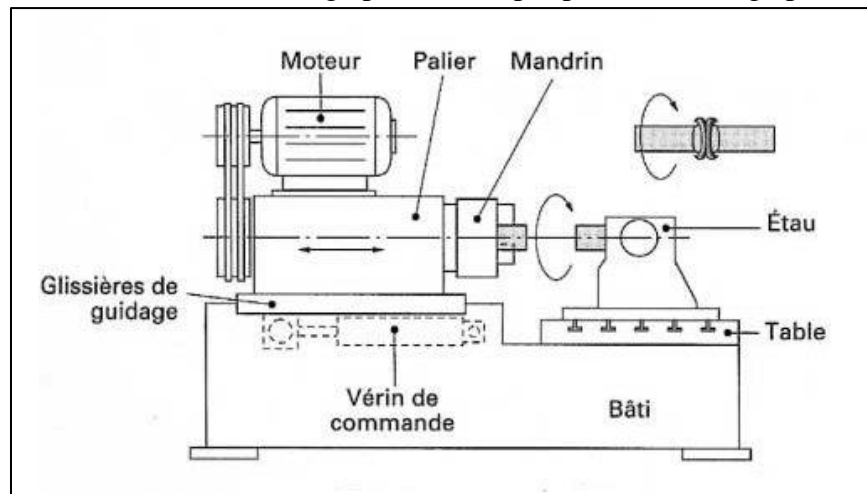


Figure I-17 : le soudage par friction rotatif [17].

I.8.2.Soudage par explosion

La soudure explosive est l'utilisation d'une explosion pour assembler 2 pièces, un procédé qui remonte à l'observation d'obus collés sur des coques de chars pendant la Première Guerre mondiale. Le premier brevet date de 1959. La force de l'explosion crée une pression qui, au niveau atomique, lie les deux matériaux ensemble. La structure obtenue présente une structure métallurgique très satisfaisante. Nous faisons le plus souvent du soudage par explosion lorsque nous voulons assembler des matériaux de propriétés différentes. Par exemple, connecter de l'acier avec une bonne résistance à la pression avec de l'acier avec une bonne résistance à la corrosion. Sur le plan économique, nous pouvons dire que grâce à ce procédé, nous pouvons réduire l'épaisseur de l'acier résistant à la corrosion (qui est généralement plus cher) et nous pouvons également réduire les problèmes de soudage de matériaux différents.

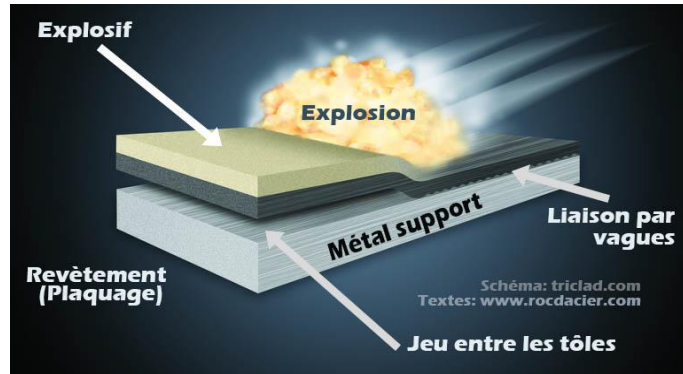


Figure I-18 : La soudure explosive [18].

I.9. LA CARACTERISATION DU CORDON DE SOUDURE

Le joint soude se décompose en plusieurs zones (Figure 1-19) :

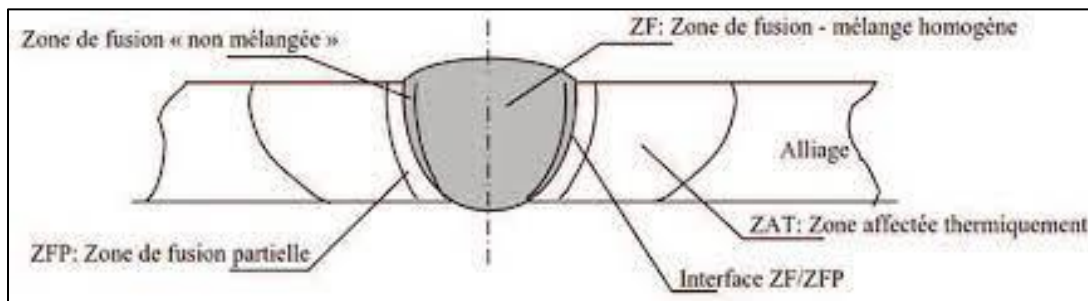


Figure I-19 : les zone du cordon de soudure en soudage [19].

I.9.1. La zone fondue (ZF)

C'est la région dans laquelle le métal solide a atteint son point de fusion pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base avec ou sans participation d'un métal d'apport. La structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle thermique. On peut distinguer au sein de cette zone, des gradients de concentration en soluté (ségrégation),

I.9.2. La zone affectée thermiquement (ZAT)

C'est la zone au sein de laquelle le cycle thermique de soudage peut provoquer à partir de l'état initial une ou plusieurs transformations métallurgiques (ou un grossissement des grains) intervenant à l'état solide. Le cycle thermique et la composition chimique de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique,

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.9.3. La zone de liaison

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

I.9.4. Le métal de base

Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est non affectée.

I.10. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS RESIDUELLES

Une pièce soudée subit un chauffage localisé pendant la plupart des procédés de soudage ; par conséquent, la distribution de la température dans la pièce soudée n'est pas uniforme, et des changements structurels et métallurgiques se produisent au fur et à mesure que le soudage au fur et à mesure que le soudage progresse le long d'un joint. Généralement, le métal soudé et la zone affectée par la chaleur immédiatement adjacente à la soudure sont à des températures nettement supérieures à celles du métal de base non affecté. Au fur et à mesure que le bain de soudure se solidifie et se rétracte, il commence à exercer des contraintes sur le métal de soudure et les zones affectées thermiquement. Lorsque le métal de la soudure se solidifie, il est chaud et relativement faible, il exerce peu de contraintes. Cependant, lorsque la soudure refroidit jusqu'à la température ambiante, la contrainte dans la zone de soudure augmente. Et finit par atteindre la limite d'élasticité du métal de base et de la zone affectée par la chaleur. Les principaux paramètres affectant les contraintes résiduelles sont les suivantes :

- La géométrie de l'articulation (T, en forme de L ou étage)
- Épaisseur des deux pièces à souder
- La chaleur spécifique de la procédure
- Nombre de passes
- Géométrie jalonnement
- Nature de tout matériau de remplissage.

Lorsqu'une soudure est réalisée progressivement, les parties de la soudure qui se sont déjà solidifiées résistent au retrait des parties ultérieures du cordon de soudure. Par conséquent, les parties soudées en premier sont soumises à une tension dans une direction longitudinale à la soudure, c'est-à-dire sur la longueur du cordon de soudure, comme le montre la figure I-20. Dans le cas des joints bout à bout, peu de mouvement de la soudure est permis dans la direction transversale en raison de la préparation du joint de soudure et de l'effet de raidissement des passes sous-jacentes. En raison du retrait dans la soudure, une contrainte résiduelle transversale est également présente, comme le montre la figure I-20. Pour les soudures d'angle, la contrainte de retrait est une contrainte de traction sur la longueur et sur la face de la soudure[20], comme le montre la figure I-20. La contrainte résiduelle dans les soudures peut avoir deux effets majeurs. Elle peut produire une distorsion ou provoquer une défaillance prématurée, ou les deux. La

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

distorsion est provoquée lorsque la zone de soudure chauffée se contracte de manière non uniforme, le retrait dans une partie de la soudure exerçant des forces excentriques sur la section transversale de la soudure. La soudure se déforme de manière élastique en en réponse à cette contrainte. Une distorsion détectable se produit en raison de cette déformation non uniforme.

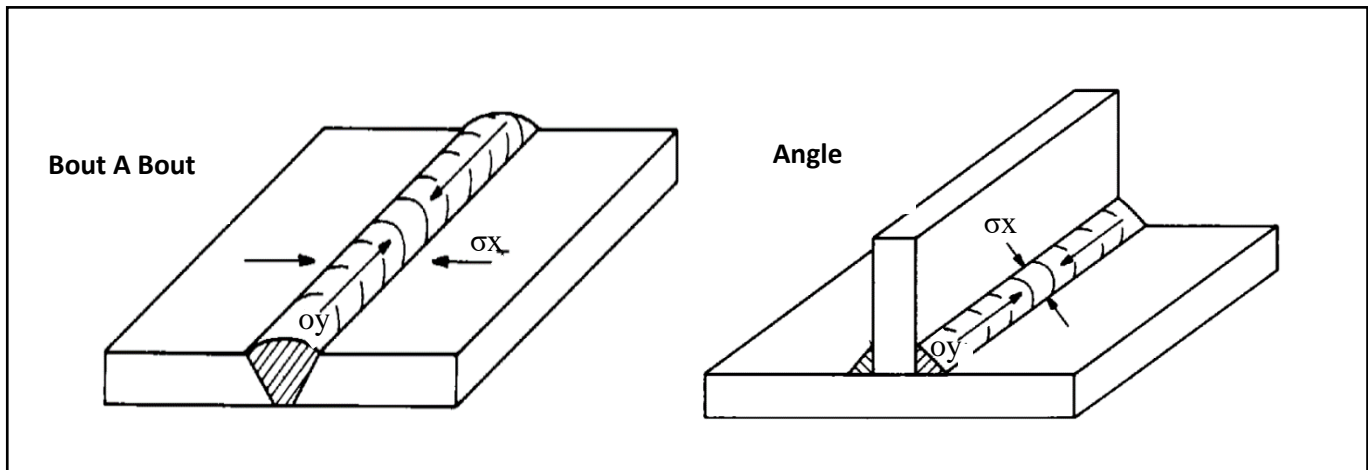


Figure I-20 : les Contrainte de rétraction dans une soudure Longitudinale (σ_x) et transversale (σ_y) [20].

Les contraintes résiduelles n'ont aucun effet sur les charges de cisaillement imposées, tant que le matériau est suffisamment flexible, car une augmentation locale de la contrainte à la limite d'élasticité provoque une déformation locale qui redistribue la charge elle-même. En revanche, dans d'autres situations, les contraintes résiduelles, ajoutées aux contraintes provoquées par les charges sur la structure, peuvent augmenter le risque d'effondrement de la structure elle-même.

En règle générale les contraintes résiduelles ont des effets négatifs sur les phénomènes suivants :

- Matériaux en mesure d'être brisés par rupture fragile
- Installations soumises à l'instabilité Euler
- Installations soumises à des charges fatigantes
- Matériaux soumis à la fissuration sous contrainte

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.11. CONTROLE DE SOUDAGE

Le contrôle est une opération à caractère technique qui se fait avant, pendant, et après le soudage, afin d'assurer une bonne production qualitative. Il existe deux méthodes de contrôle :

- Contrôle non destructif ;
- Contrôle destructif.

I.11.1. Contrôle destructif

Le contrôle destructif (ou mécanique), se fait généralement dans des laboratoires pour connaître la résistance mécanique, physique et métallurgique des joints, dans le cas de fabrication en série. On prélève une ou plusieurs pièces du lot déterminé sur lesquelles sont réalisées des éprouvettes, pour les essais suivants :

I.11.1.1. Essai de traction

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié, il consiste à exercer sur une éprouvette, une force croissante ou une déformation constante qui va la déformer progressivement et la rompre. Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. Une variante moderne des essais de traction consiste à utiliser la force centrifuge sur un assemblage pour générer une contrainte de traction. Lorsque la valeur limite de résistance à la traction (exprimée en MPa ou N/mm²) d'un assemblage ou d'un collage est égale à la force centrifuge appliquée, on génère la rupture de ceux-ci et enregistre la limite de rupture. L'avantage consiste à réaliser des tests en batterie sur plusieurs éprouvettes soumises à une contrainte strictement identique lors de l'essai.

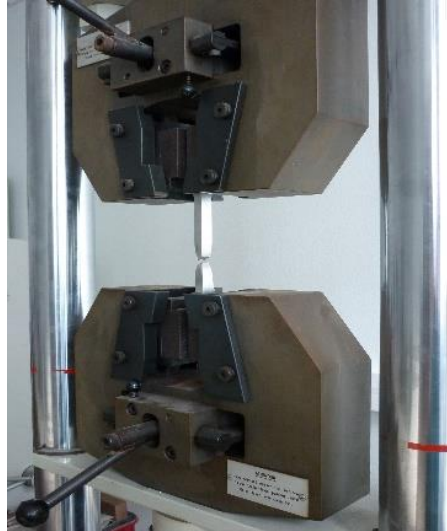


Figure I-21 : machine de traction [21].

I.11.1.2. Essai de choc

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par propagations de fissures existant dans le matériau. La rupture est donc fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception. L'essai de résilience a été élaboré pour prendre en compte ces phénomènes de rupture. Le moyen le plus classique pour caractériser la fragilisation du matériau sous l'action d'un choc est cet essai de résilience qui est un essai de flexion par choc sur une éprouvette entaillée qui mesure la résistance d'un matériau à la rupture brutale.

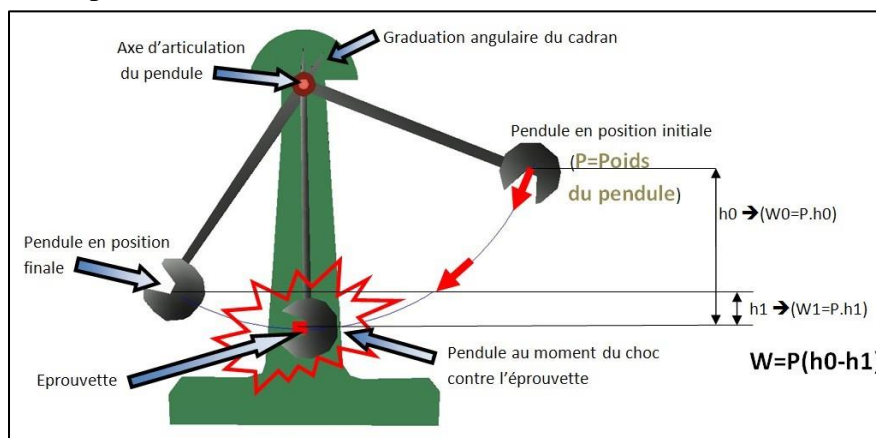


Figure I-22 : schéma de principe d'Essai de choc [22].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.11.1.3. Essai de dureté

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.



Figure I-23 : machine d'essai dureté [23].

I.11.1.4. L'essai De pliage

L'essai de pliage consiste à soumettre une éprouvette rectiligne de section pleine, polygonale à une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est pliée jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique. L'essai de pliage est régi par la norme NF EN 910 :1996.

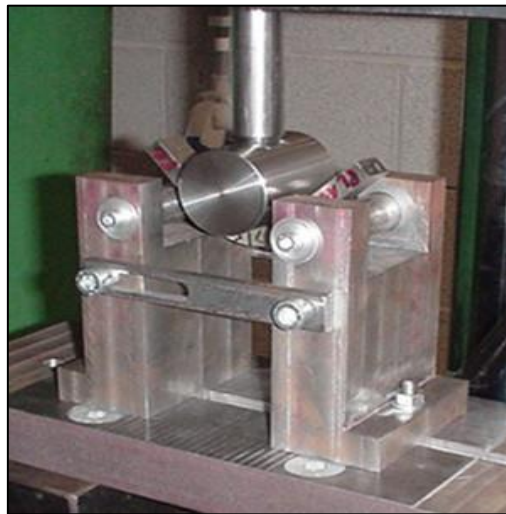


Figure I-24 : machine d'essai de pliage [24].

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

I.11.2. Contrôle non destructif

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation. Il faut donc déterminer quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce. Il existe beaucoup méthodes de contrôle non destructif comme :

- Le contrôle visuel (se fait avant soudage et après soudage, pour conformité).
- Par ressuage (liquides pénétrants).
- Par radiographie.
- Par ultrasons.
- Par magnétoscopie.

Ce processus est fait afin découvrir des défauts de soudage. Les différents types de défauts sont classifiés par la norme en 6 groupes :

- Fissures.
- Cavités.
- Inclusions solides.
- Manque de fusion et de pénétration.
- Défauts de forme et défauts dimensionnels.
- Défauts divers.

CHAPITRE II
GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.1. INTRODUCTION

Les pièces mécaniques sont assemblées par de nombreuses méthodes, y compris le soudage par fusion. Le soudage est un procédé qui assure la continuité des matériaux à assembler. Types de soudage, y compris le soudage TIG, et dans ce chapitre nous étudions les réglages de soudage TIG, les méthodes de contrôle du TIG procédé de soudage et les facteurs qui l'affectent.

II.2. DEFINITION DU PROCEDE TIG / 141 / GTAW

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) est un procédé à l'arc sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène). Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène (de \varnothing 1,0 mm à \varnothing 8,0 mm) et la pièce à souder. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 4,0 mm) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 2,0 mm) dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertage de gaz (de 5 à 25 litres/minute) de protection (Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H₂ pour les procédés automatiques). Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 5 à 300 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. Les sources de courant utilisées sont à caractéristiques plongeantes ou verticales. La polarité de l'électrode est toujours négative en courant continu (polarité directe) [25].

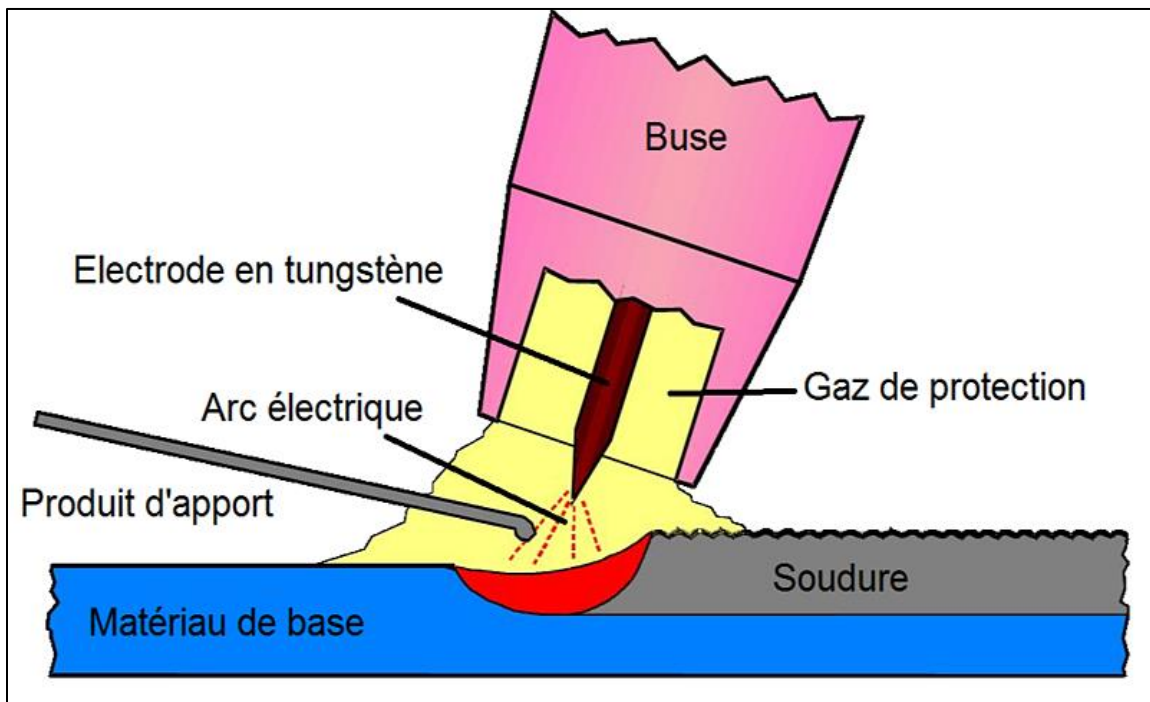


Figure II-1 : schéma explicatif de le procédé TIG [26].

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.3. PRINCIPE DU PROCEDE DE SOUDAGE TIG

La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie négative du générateur de soudage à courant continu ou alternatif. La masse est reliée au générateur sur la borne positive et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Lorsque le poste n'est pas équipé d'un amorçage haute-fréquence, l'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe de l'électrode infusible touche superficiellement la pièce à souder en créant un court-circuit (avec le risque de créer des inclusions métalliques de tungstène). Avec un équipement d'amorçage par haute fréquence, l'arc de soudage est allumé par l'intermédiaire d'un étincelage d'arc électrique de plusieurs milliers de volts avec une fréquence de 1 à 2 MHz délivré entre l'électrode de tungstène et la pièce pendant un très court instant. [27].

II.4. AVANTAGES DU PROCEDE DE SOUDAGE TIG

- Simple d'emploi.
- Travail fin et précis.
- Large gamme d'épaisseur.
- Très bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.
- Soudage dans toutes les positions
- Aspect de cordon très correct.
- Procédé automatisable.

II.5. INCONVENIENTS DU SOUDAGE GTAW

- Vitesses de travail plus lentes que les autres processus.
- Rayons UV plus brillants que les autres processus.
- Les coûts d'équipement peuvent être plus élevés qu'avec d'autres processus.
- Les concentrations de gaz de blindage peuvent s'accumuler et déplacer l'oxygène lors du soudage dans des zones confinées.
- Moins effacés dans les zones ouvertes (affecté par le vent).
- Le procédé TIG est déconseillé avec les environnements poussiéreux et enfumés.

II.6. DOMAINES D'APPLICATIONS CONCERNES

La soudure TIG est une soudure de qualité qui se rapproche de l'art, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique. L'automobile. La tuyauterie industrielle. L'agro-alimentaire. La pétrochimie. Le pharmaceutique. Le naval. Le procédé de soudage TIG ou GTAW peut être utilisé pour souder presque tous les métaux et alliages métalliques actuellement utilisés. C'est un moyen particulièrement efficace et économique de souder des métaux légers ainsi que de souder des métaux difficiles à souder avec le procédé de soudage conventionnel. Ces métaux comprennent les suivants : Aluminium et alliages d'aluminium. Cuivre et alliages de cuivre. Nickel et alliages de nickel. Magnésium et alliages de magnésium. Acier faiblement allié et aciers au carbone. Matériaux réactifs (titane par exemple) [28].

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.7. ÉQUIPEMENT DE SOUDAGE TIG

Le soudage TIG (GTAW) est un procédé qui utilise une électrode de tungstène non consommable pour produire une soudure avec ou sans matériau d'apport. Les composants de base de l'équipement TIG comprennent :

Un générateur de courant continu ou alternatif (principalement pour l'aluminium).

- Alimentation en gaz de protection.
- Torche ou porte-électrode de tungstène.
- Baguette (métallique d'apport).
- Un groupe réfrigérant à circuit fermé (lors d'utilisation à forte intensité).
- Équipement de sécurité personnelle.



Figure II-2 : l'équipement de soudage TIG [29].

II.7.1. Générateurs TIG

Les sources de courant récentes pour le soudage à l'arc sont de technologie onduleur. Elles ont pour avantages d'être moins encombrantes, plus légères et surtout multi-procédés. Afin de répondre à la demande de la production pour de nombreux matériaux, les fabricants de postes à souder, ont dû imaginer différents types de courants. C'est d'ailleurs, entre autres, pour cet objectif de soudabilité de matériaux de plus en plus complexes métallurgiquement, que la course aux développements de nouvelles sources de courant, toujours plus performantes, reste un défi majeur. Il existe plusieurs capacités différentes de sources d'alimentation de soudage TIG, et la sélection de produits va d'une simple source d'alimentation CC uniquement à des appareils multifonctions très avancés, avec une augmentation proportionnelle du coût. Afin de choisir la bonne source d'alimentation, il faut tenir compte des fonctions d'une source d'alimentation. La source d'alimentation pour le soudage TIG peut être DC ou AC :

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.7.1.1. Source d'alimentation DC

Le courant en sortie du générateur présente une forme d'onde continue obtenue au moyen des dispositifs permettant la conversion du courant/tension de type alternatif à continu. Dans l'hypothèse où le circuit de soudage est composé d'un générateur de courant continu, une classification supplémentaire peut être introduite en fonction du mode de connexion des pôles du courant de soudage au matériel à souder ou de la forme d'onde du courant de soudage.

II.7.1.2. Générateur de courant alternatif DC/AC

Le courant/tension en sortie du générateur assume la forme type d'une onde carrée dont la polarité change à intervalles réguliers, avec une fréquence allant de 20 à 200 cycles par seconde (Hertz) ou d'avantage en fonction du type de générateur utilisé. Cette dernière est obtenue au moyen d'un ou plusieurs dispositifs ayant pour fonction de transformer le courant/tension secteur de type sinusoïdal en un courant/tension de type alternatif de soudage adéquat.



Figure II-3 : générateurs TIG MATRIX 22-3028AC/DC [30].

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.7.2. Torches de soudage TIG

Pour le soudage à l'arc électrique avec électrode de tungstène sous gaz inerte TIG, la torche de soudage est l'outil essentiel pour assurer le fonctionnement correct de l'outil de soudage.

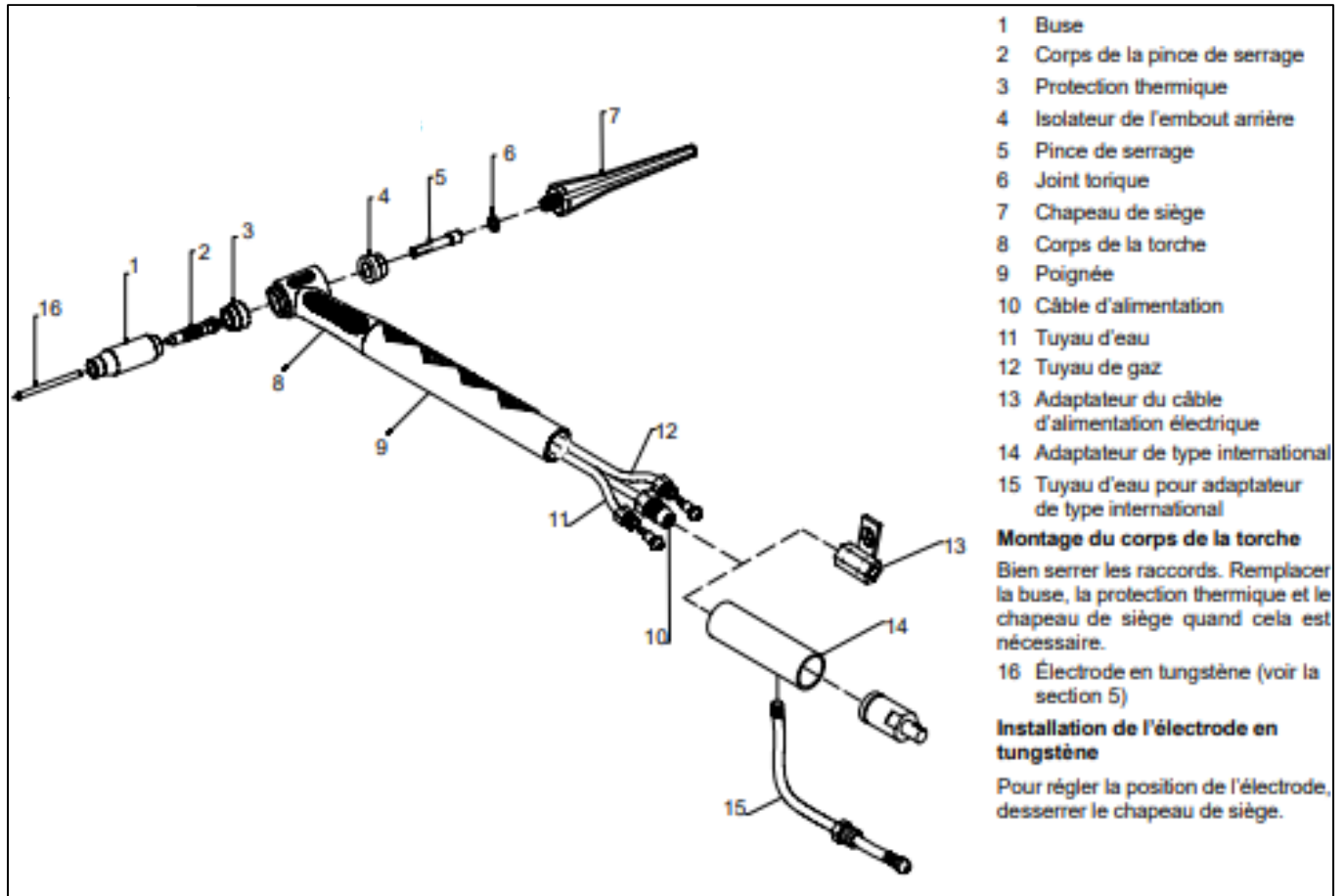


Figure II-4 : schéma de composants de la torche de soudage [31].

II.7.2.1. Différents types de buses de torche TIG

Le soudeur ne change pas sa buse de soudage, son électrode de tungstène à chaque fois qu'il rencontre une nouvelle configuration. Il équipe sa torche de soudage TIG d'une manière assez universelle. Il adapte sa torche uniquement lorsqu'il rencontre des configurations très particulières. Les buses utilisées seront soit en céramique (beige), en oxydes d'aluminium (rose clair), en nitrure de silicium (gris), Pyrex (transparent) et auront un diamètre qui pourra varier de 6 mm à 20 mm suivant l'intensité de soudage. Le tableau ci-après donne les valeurs d'intensités et de débit de gaz, correspondant aux différents diamètres de buses.

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG



Figure II-5 : différents types de buses de torche pour le soudage [32].

II.7.2.2. Différent type d'électrode

Il existe plusieurs types d'électrodes non fusibles qui peuvent être utilisées en soudage T.I.G, La Température de fusion du tungstène est d'environ $\sim 3450^{\circ}\text{C}$. Les électrodes en tungstène sont classées en fonction de leur composition chimique, à savoir le principal oxyde utilisé et son pourcentage dans la masse totale de l'électrode. Pour simplifier les choses, toutes les électrodes en tungstène se voient attribuer un code et une couleur différents. Les oxydes sont principalement le thorium, le lanthane, le zirconium et le cérium. Leur addition peut varier entre 0,7 et 4%. Le tableau II-1 des couleurs ci-dessous résume les différentes électrodes de tungstène TIG que vous pouvez rencontrer :

Tableau II-1 : différent type d'électrode [33].

Couleurs et désignation des électrodes tungstène pour soudage TIG		
Vert Wp	Tungstène pur (extrémité verte) utilisée pour les Courants alternatifs	Electrode pour l'aluminium et ces alliages.
Rouge WTh20	Tungstène <u>Thorié</u> (couleur d'extrémité rouge). Utilisée courant continue Attention radioactive.	Utilisée pour les aciers de construction et aciers inoxydables
Or WLa15	Tungstène lanthane (Couleur Or) Electrode polyvalente, Courant Alternatif ou Continu.	Utilisée pour les aciers et aciers inoxydables, aluminium ...
Gris WCe20	Tungstène <u>Cérié</u> (Couleur gris) à Utiliser en Courant continue	(Aciers/Inox). Faibles intensités.
Bleu WLa20	Tungstène Lanthane (Couleur bleu) Courant Alternatif ou Continu	Electrode polyvalente de meilleure qualité usure moins rapide.
Blanc WZr8	Tungstène Zirconium. alternatif, arc très stable Courants alternatifs	Utilisation sur l'aluminium, magnésium à forte intensité

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.7.3. Alimentation de gaz de protection

La fonction principale du gaz de protection est de le substituer à l'air à proximité du bain de fusion, de l'électrode et de l'extrémité de l'éventuelle baguette d'apport, pour éviter tout risque de contamination des agents nocifs présents dans l'atmosphère ce gaz rempli dans des bouteilles, Alimentation en gaz de protection se compose de :

- La bouteille de gaz alimente la torche en gaz.
- Le débitmètre permet le réglage du débit de gaz.

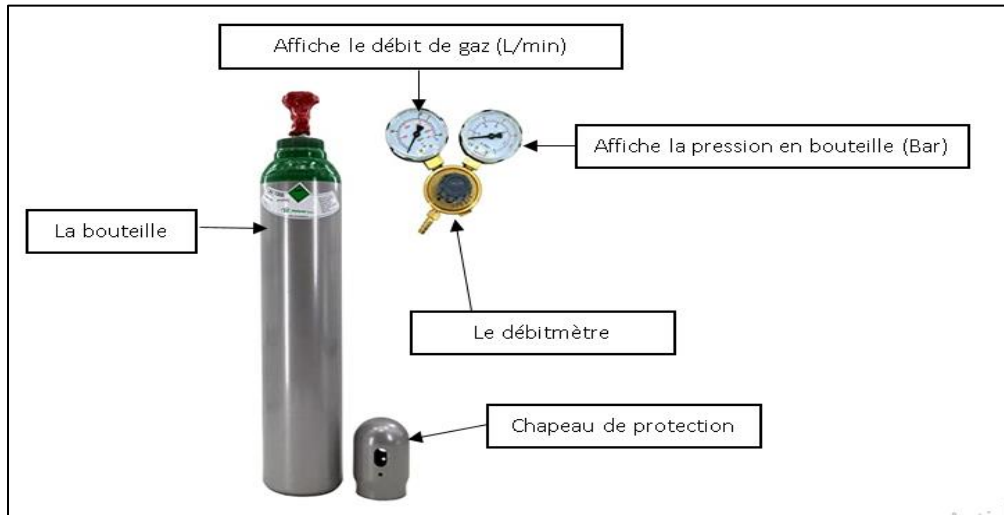


Figure II-6 : alimentations de gaz [34].

II.7.4. Baguette (métaux d'apport)

D'une façon générale, les conditions à remplir pour qu'un alliage soit considéré comme un métal d'apport "satisfaisant" vis-à-vis d'un métal de base donné sont les suivantes :

- Pouvoir s'allier avec le métal ou les métaux de base et diffuser dans ces métaux,
- Ne pas avoir d'action corrosive nuisible sur les métaux de base.
- Avoir une température de fusion compatible avec les propriétés métallurgiques du métal de base.
- Posséder des caractéristiques mécaniques et physiques appropriées à la destination du joint soudé.



Figure II-7 : metal apport [35].

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.7.5. Les Équipements de sécurité TIG

Les équipements de protection individuelle (EPI) sont destinés à protéger le soudeur ou le bricoleur contre les risques liés à l'exercice de sa profession et de sa passion. Nous pouvons citer comme exemple d'EPI de soudeur, le masque électronique de soudeur, les chaussures de sécurité, les gants en cuir, les bouchons d'oreille, les lunettes de protection et la veste de protection en cuir figure II-8.



Figure II-8 : les Équipements de sécurité TIG [36].

II.8. PARAMETRES DE PROCESSUS DE GTAW

Le contrôle des variables de fonctionnement ou des paramètres de processus dans le soudage à l'arc au gaz tungstène est essentiel si l'on veut obtenir des taux de production élevés et des soudures de bonne qualité. Voici les variables importantes : Courant de soudage, Tension de soudage, Vitesse de soudage, Taille d'électrode Les gaz de protection

L'explication de ces paramètres de processus est la suivante :

II.8.1. Courant de soudage

Le courant de soudage est la variable la plus influente dans le processus de soudage à l'arc qui contrôle le taux de combustion des électrodes, la profondeur de fusion et la géométrie des soudures. Le courant a une influence directe sur la forme du cordon de soudure, sur la vitesse de soudage et la qualité de la soudure.

II.8.1.1. Courant DC normal

On parle de soudage TIG à courant continu (CC) lorsque le courant circule dans un seul sens. Par rapport au soudage TIG en courant alternatif (CA), le courant, une fois qu'il circule, ne s'arrête pas avant la fin du soudage. En général, les onduleurs TIG sont capables de souder soit en courant continu, soit en courant alternatif/continu, très peu de machines étant uniquement en courant alternatif. DC vous offre plus de flexibilité en matière de soudage et sera également utile pour un plus large éventail d'applications par rapport aux soudeurs AC, comme il ne fournit pas des températures assez importantes, il est idéal pour le soudage de substances d'alliage plus minces. D'autres applications de soudage où le courant continu peut s'avérer utile comprennent le soudage acier et les acier inoxydable. Le procédé de soudage TIG DC offre deux options de courant de soudage en fonction du type de connexion. Chaque méthode de connexion présente des avantages et des inconvénients.

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.8.1.1.1. Courant continu avec connexion en polarité directe

Avec la polarité directe, la torche et son câble sont connectés au pôle négatif, et le matériel à souder au pôle positif de la source d'alimentation, dans ce cas, les électrons fluent de l'électrode vers la pièce et provoquent la fusion de cette dernière. Il s'agit du type de courant le plus utilisé avec le système TIG et garantissant une bonne qualité de soudage avec la quasi-totalité de métaux et alliages courant, à l'exception de l'aluminium. Le courant continu à polarité directe produit un bain de fusion étroit et profond.

II.8.1.1.2. Courant continu avec connexion en polarité inverse

Avec cette polarité, la torche et son câble sont connectés au pôle positif, et la pièce au pôle négatif de la machine d'alimentation. Ce type d'alimentation n'est que rarement utilisée car elle produit un bain plat avec une pénétration réduite. La polarité inverse entraîne un chauffage excessif de l'électrode et, pour éviter que cette dernière ne grille, il est nécessaire d'utiliser des intensités de courant plutôt réduites, ce qui justifie son utilisation limitée.

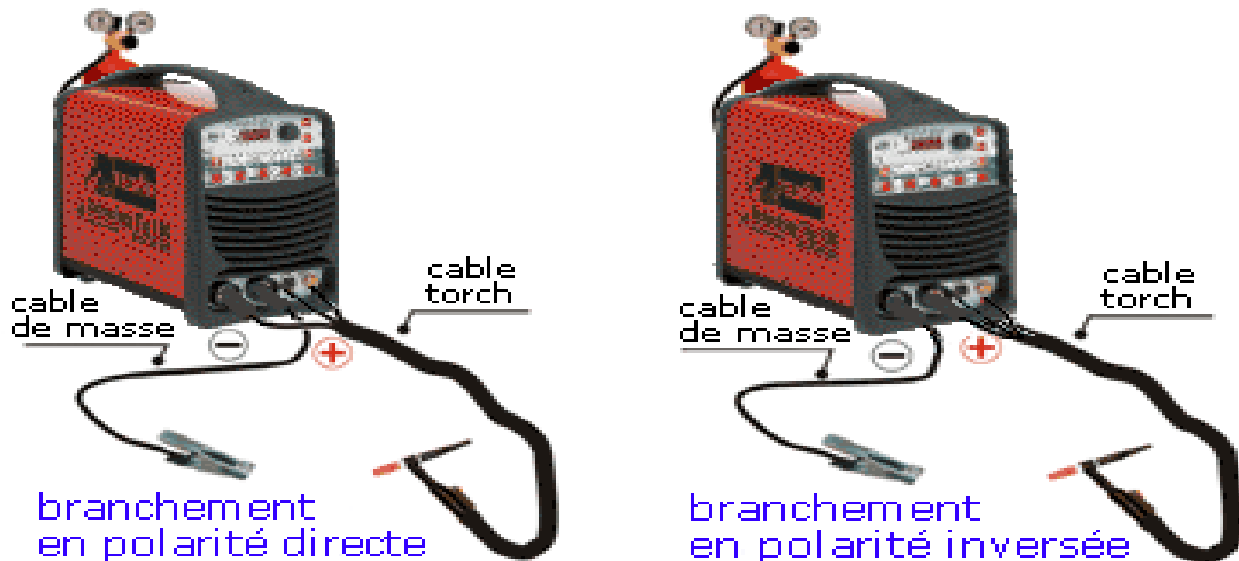


Figure II-9 : polarités en curent directe [37].

II.8.1.2. Courant pulsé

Courant pulsé qui est similaire au courant continu mais constitué de deux temps de niveaux d'intensité différents : l'un dit "froid" et l'autre dit "chaud" (figure I-10). Cette forme particulière du courant permet de gérer l'apport d'énergie dans le métal de base et d'obtenir un transfert de métal sans court-circuit et extinction de l'arc Principe du courant pulsé sur le TIG.

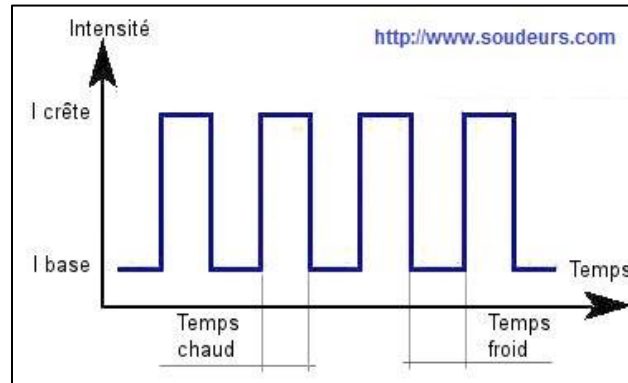


Figure II-10 : la forme de courant pulsé [38].

II.8.1.3. Courant AC

Le courant alternatif vous permet de souder des températures relativement plus élevées que le courant continu, ce qui le rend idéal pour le soudage TIG de l'aluminium qui fait partie de ses utilisations les plus fréquentes. De plus, comme l'aluminium a un film d'oxyde sur sa surface si le courant alternatif passe dans une certaine polarité positive, il aide à éliminer le revêtement et à laver la surface de l'aluminium [42]. Outre les températures de soudage élevées, le courant alternatif donne également une pénétration de soudure plus forte, ce qui le rend parfait pour le soudage des alliages de plaques dans la construction navale. Et contrairement au courant continu, il sera également très utile pour les applications qui nécessitent le soudage de métaux magnétisés, comme la réparation de machines et d'autres applications industrielles et de construction.

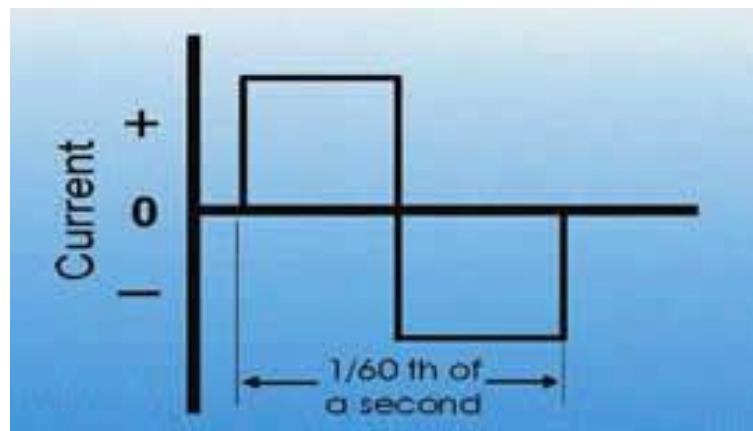


Figure II-11 : la forme de courant AC [39]

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.8.2. Tension de soudage

Il s'agit de la différence de potentiel électrique entre la pointe du fil de soudure et la surface du bain de soudure fondu. La tension de soudage peut être fixe ou réglable en fonction de l'équipement de soudage GTAW. Elle détermine la forme de la zone de fusion et le renforcement de la soudure. Une tension initiale élevée permet un amorçage facile de l'arc et une plus grande plage de distance de la pointe de travail. Cependant, elle produit des soudures plus larges, plus plates et moins profondes que les basses tensions de soudage. La profondeur de pénétration est maximale à la tension d'arc optimale, une tension trop élevée, en revanche, entraînera une grande variation de la qualité de soudage [40].

II.8.3. La vitesse de soudage

La vitesse de soudage est la vitesse linéaire à laquelle un arc est déplacé le long du joint de soudure. Quelle que soit la combinaison de la tension et du courant de soudage, l'effet de la modification de la vitesse de soudage se confirme selon un schéma général. Si la vitesse de soudage est augmentée, la puissance ou la chaleur absorbée par unité de longueur de la soudure est réduite et moins de métal d'apport est appliqué par unité de longueur de la soudure, ce qui entraîne un renforcement moindre de la soudure. Ainsi, le cordon de soudure devient plus petit. La pénétration de la soudure est plus affectée par la vitesse de soudage que par toute autre variable autre que le courant. Si la vitesse de soudage est supérieure à la vitesse requise, l'apport de chaleur au joint diminue, la quantité de métal d'apport déposée est inférieure à la quantité requise, la hauteur du renfort diminue. Si la vitesse de soudage est lente, l'apport de chaleur augmente. La largeur de la soudure augmente et la hauteur du renfort augmente également plus de convexité [41].

II.8.4. Les gaz de protection

Les gaz de protection sont utilisés dans le GTAW afin d'éviter la contamination atmosphérique du métal soudé. Cette contamination peut produire des porosités, des fissures de soudure, un écaillage et même une modification de la composition chimique du matériau fondu. En outre, le gaz de protection a également une grande influence sur la stabilité de l'arc électrique. Les gaz à faible potentiel d'ionisation facilitent l'allumage de l'arc électrique et ceux qui ont une faible conductivité thermique tendent à augmenter la stabilité de l'arc. L'argon est le gaz de protection le plus utilisé pour le GTAW. Il a un faible potentiel d'ionisation et est plus lourd que l'air, ce qui assure un excellent blindage du bain de soudure fondu. De plus, il est moins cher que l'hélium, l'autre gaz de protection inerte utilisé dans ce procédé. L'argon est utilisé pour le soudage des aciers au carbone et inoxydables et des pièces en alliage d'aluminium de faible épaisseur. Pour le soudage de pièces épaisses en aluminium et d'autres matériaux hautement conducteurs, tels que les alliages de cuivre, l'hélium est recommandé car son potentiel d'ionisation est plus élevé que celui de l'argon. Le gaz de protection sort de la torche de soudage, entoure le tungstène chaud et le métal fondu et déplace l'air (oxygène et azote), empêchant ainsi l'air d'entrer en contact avec le métal fondu ou l'électrode de tungstène chaude. Les mélanges d'hélium ou d'hélium/argon (30 à 80 % d'He) permettent d'augmenter la vitesse de soudage et d'améliorer la tolérance du procédé. Les mélanges d'argon avec jusqu'à 5 % d'hydrogène sont fréquemment utilisés pour le soudage des aciers inoxydables austénitiques. L'hydrogène augmente la tension de l'arc et, par conséquent, l'apport de chaleur, ce qui accroît la pénétration et la vitesse de déplacement de la soudure, tout en améliorant son aspect [43]. Les mélanges argon/hydrogène sont également utilisés pour le soudage des alliages cuivre-nickel. L'argon est également utilisé comme gaz de protection dorsal, principalement pour le soudage des aciers inoxydables, des alliages d'aluminium et des métaux réactifs. Les débits des gaz de protection dépendent de l'épaisseur de la soudure. Ils sont de 4 à 10

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

l/min pour l'argon et de 10 à 15 l/min pour l'hélium, car ce dernier est plus léger que l'argon et donc moins efficace pour la protection. Les gaz d'une pureté de 99,995% sont utilisés pour le soudage de la plupart des métaux, bien que les matériaux réactifs comme le titane nécessitent un niveau de contamination inférieur à 50 ppm. Le choix du gaz de protection est très important car il affecte la profondeur de pénétration de la soudure et le profil de la surface, la porosité, la résistance à la corrosion, la dureté et la fragilité du matériau soudé [43].

II.8.5.Taille d'électrode

La taille de l'électrode affecte la forme du cordon de soudure et la profondeur de pénétration à courant fixe. La taille de l'électrode influence également la vitesse de dépôt. Pour un courant donné, une électrode de petit diamètre aura une densité de courant et une vitesse de dépôt plus élevées qu'une électrode plus grande. Cependant, une électrode de plus grand diamètre peut transporter plus de courant qu'une électrode plus petite, et produire un taux de dépôt plus élevé à un ampérage plus élevé. Les électrodes de plus grand diamètre ont une durée de vie plus longue, mais il peut être plus difficile d'amorcer l'arc à des ampérages faibles. Augmentation du diamètre de l'électrode entraîne une légère augmentation de la l'étalement du cordon. [44].

II.8.6.Métal d'apport

Les métaux d'apport sont généralement utilisés pour les tôles d'une épaisseur supérieure à 2 mm, dont la composition chimique est similaire à celle du matériau de base. Le diamètre du métal d'apport est compris entre 1,6 et 3,2 mm et, dans les systèmes automatiques, il est normalement ajouté d'une bobine. De nombreux aciers inoxydables austénitiques mais pas tous peuvent être soudés sans métal d'apport et sans traitement thermique supplémentaire. La plupart des alliages super austénitiques nécessitent l'utilisation d'un métal d'apport pour obtenir une bonne résistance à la corrosion de la soudure. Normalement, le métal soudé est capable de répondre aux exigences minimales de résistance à l'élasticité et à la traction du matériau de base recuit. La ductilité des soudures est généralement inférieure à celle du métal de base, mais elles restent très ductiles. Les métaux d'apport à teneur plus élevée en carbone peuvent offrir une meilleure résistance à haute température. La composition de nombreux métaux d'apport de la série 300 est ajustée de manière à ce qu'ils se solidifient avec une certaine quantité de ferrite pour empêcher la fissuration à chaud pendant la solidification. Cela permet des apports de chaleur plus élevés et donc des vitesses de soudage plus élevées. La présence d'une certaine quantité de ferrite signifie que les soudures sont légèrement ferromagnétiques. Les alliages qui se solidifient totalement ou presque totalement austénitiques doivent être soudés. Entièrement austénitique doivent être soudés avec des apports thermiques plus faibles. Pour certaines applications, un métal de soudure à faible ferrite est souhaitable, et certains métaux d'apport sont produits à cet effet. À cet effet. Pour la plupart des aciers inoxydables de la série 300, un métal d'apport nominale est équivalent est le métal d'apport le plus courant. Est le métal d'apport le plus couramment utilisé [45].

II.9. SYSTEMES D'AMORÇAGE E DE L'ARC

L'allumage de l'arc électrique s'effectue par contact rapide entre l'électrode au tungstène et la pièce, ou bien au moyen d'un dispositif d'allumage spécifique sans contact. Pour éviter toute contamination de l'électrode et tout coup d'arc sur le matériel de base, l'arc est souvent amorcé sur une plaque extrêmement propre (en cuivre, ou du matériel identique au matériel de base) placée à proximité du chanfrein. Les types d'allumage de l'arc les plus fréquemment utilisés sont les suivants :

II.9.1.Amorçage HF

L'étincelle pilote est fournie par un générateur haute fréquence superposant à la tension de soudage une impulsion haute tension. La puissance de ce dispositif est minime mais permet néanmoins l'amorçage à distance de l'arc électrique. L'amorçage HF exige l'utilisation d'une torche de soudage spécifique comportant une gâchette permettant la commande de l'amorçage.



Figure II-12 : amorçage HF [46].

II.9.2.Amorçage LIFT

Modalité d'allumage de l'arc électrique. Il est obtenu grâce à un dispositif prévu à cet effet qui fournit un courant de basse valeur pour ne pas endommager la pointe de l'électrode de tungstène quand cette dernière est en contact avec le matériau à souder. Au moment où l'électrode s'éloigne du morceau, une étincelle se crée causant l'allumage de l'arc. Le générateur augmente alors le courant de soudage jusqu'à la valeur programmée initialement. Le départ LIFT, à cause du manque de haute fréquence, à la propriété de ne pas créer de perturbations électromagnétiques.

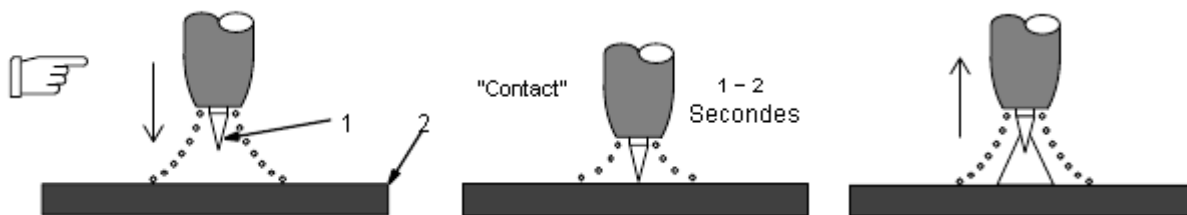


Figure II-13 : amorçage lift [47].

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

II.10. Comprendre le schéma du cycle de soudage sur un générateur TIG

Le schéma du cycle de soudage imprimé sur la façade des postes à souder TIG permet de renseigner le soudeur sur les différents réglages des temporisations de gaz, des courbes de montée et de descente du courant de soudage [48].

II.10.1.Le pré-gaz

Quand le soudeur actionne la gâchette de la torche de soudage T.I.G, il déclenche la temporisation du cycle de pré-gaz qui permet de chasser l'air ambiant présent à l'intérieur de la buse, pendant un temps de 1 à 10 secondes. Le temps moyen est de 2 secondes. Sur chantier 5 secondes selon la longueur des raccords.

II.10.2.L'amorçage de soudage et la montée en intensité de l'arc

Après la fin du temps de pré-gaz, l'arc s'amorce (début de l'arc) sur la pièce soit par l'intermédiaire d'un courant à haute fréquence, soit par contact avec l'électrode et la pièce. La montée progressive de l'intensité de soudage est programmée sur le poste par l'utilisateur. Elle permet le préchauffage de la zone avant formation du bain de fusion de la soudure.

II.10.3.Intensité de soudage

La valeur programmée de l'intensité de soudage est à son maximum suivent les réglages de l'opérateur. Cette valeur est sélectionnée en fonction du matériau et de son épaisseur et de la position de soudage.

II.10.4.Evanouissement de l'arc électrique de soudage

Quand le soudeur relâche la gâchette de la torche ou actionne cette gâchette si soudure en 4 temps. Le cycle d'évanouissement de l'arc de soudage de déclenche. La descente progressive est programmée par le soudeur par une temporisation. Cette fonction permet de limiter ou d'éliminer le cratère, retassure de fin de soudure. Le temps moyen d'évanouissement de l'arc et de 5 secondes elle est fonction de l'intensité de soudage et des matériaux.

II.10.5.Le poste gaz

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

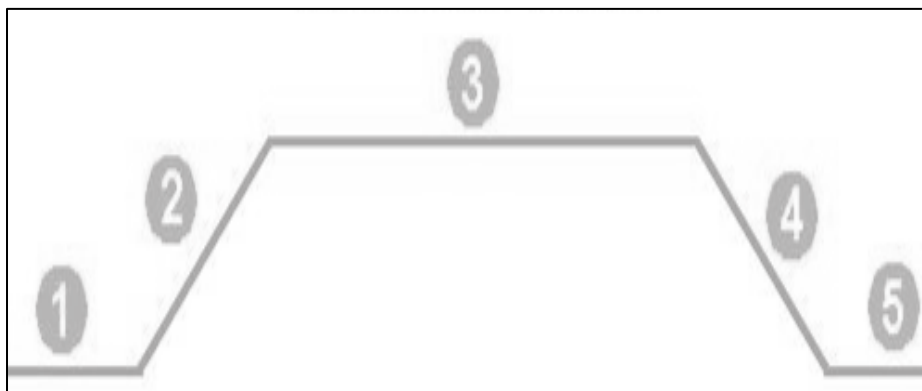


Figure II-14 : le cycle de soudage TIG [48].

II.11. 2T et 4T en soudage TIG

Le "t" dans ces modes signifie "toucher". Cela signifie le nombre de fois que la gâchette de la torche doit être touchée pour démarrer et arrêter le soudage.

- **2T** : signifie "2 touche". Il s'agit d'un réglage à deux touches qui nécessite que le soudeur appuie sur la gâchette de la torche pour démarrer et la relâche pour arrêter. Ce réglage est idéal pour les soudures courtes.
- **4T** : signifie "4 touches". Il s'agit d'un réglage à quatre touches. Pour cela, vous devez appuyer et relâcher la gâchette pour activer le poste à souder et commencer à souder sans avoir à maintenir la gâchette. Pour désactiver le réglage 4T, il faut appuyer et relâcher la gâchette pour arrêter le processus de soudage. Cette fonction est idéale pour les soudures de longue durée.

Bien que vous puissiez trouver les réglages 2T et 4T sur plusieurs modèles de soudeuses, leur fonctionnement varie selon que vous utilisez une soudeuse TIG ou une soudeuse MIG.

II.11.1. Quand utilisez-vous les modes 2T et 4T ?

Comme les modes d'autres outils, les modes 2T et 4T d'une soudeuse présentent plusieurs avantages, selon le type de travail que vous souhaitez effectuer. En bref, le mode 2T est utilisé pour les travaux de soudage de courte durée. Il s'agit par exemple du soudage par points, du soudage par points ou du soudage de petits joints. 2T vous permet d'effectuer des soudures courtes rapidement, ce qui facilite le démarrage et l'arrêt. 4T est utilisé lorsque vous devez effectuer des soudures plus longues ou lorsque vous devez souder dans des endroits difficiles d'accès où vous ne pouvez pas appuyer facilement sur la gâchette. Les longues passes de soudure exigent de la concentration et parfois de l'endurance. Le mode 4T vous facilite la tâche et vous permet de vous concentrer sur la perfection de votre soudure.

II.11.2. Comment cela fonctionne ?

La fonction 2T et 4T d'une soudeuse TIG est conçue comme une alternative à la pédale de commande. Alors que la pédale vous permet de contrôler directement l'ampérage, la fonction 2T et 4T est un interrupteur marche/arrêt sur la torche avec l'ampérage pré-réglé sur la machine.

II.11.2.1. 2T en soudage TIG

2T en soudage TIG est très simple. Vous réglez le taux d'ampérage pour que l'appareil atteigne progressivement l'ampérage de soudage. Vous pouvez choisir de régler le temps de montée et de descente de la rampe afin que n'atteigne pas instantanément l'ampérage de soudage défini. Cela permet d'éviter les soufflures sur les métaux fins. Pour activer le 2T, il faut appuyer et maintenir la gâchette de la torche TIG pour commencer à souder et relâcher la gâchette pour arrêter[49].

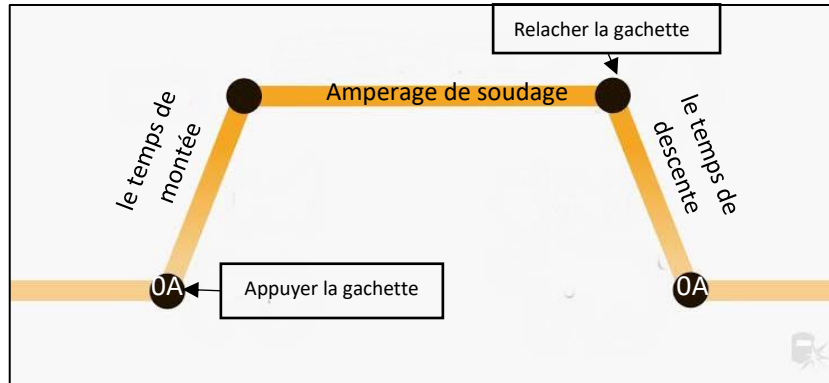


Figure II-15 : 2T en soudage TIG.

II.11.2.2. 4T en soudage TIG

L'utilisation du réglage 4T en soudage TIG demande un peu plus de travail car vous avez le contrôle du cycle de soudage et de chacune de ses étapes. Avant de commencer, vous réglez ce que l'on appelle l'ampérage de démarrage. Il s'agit de l'ampérage auquel vous voulez que votre soudeur TIG fonctionne avant d'atteindre l'ampérage de travail complet. L'avantage du 4T est que l'ampérage de démarrage vous permet de préchauffer le métal avant de passer à l'ampérage de travail complet. Sur la torche, vous appuyez et maintenez la gâchette pour activer l'ampérage de démarrage et vous la relâchez pour amorcer la pente ascendante vers l'ampérage de travail. Vous êtes alors libre de souder au TIG sans toucher la gâchette. Pour terminer, vous appuyez à nouveau sur la gâchette pour descendre jusqu'à l'intensité finale que vous avez réglée et vous relâchez la gâchette pour terminer l'arc[49].

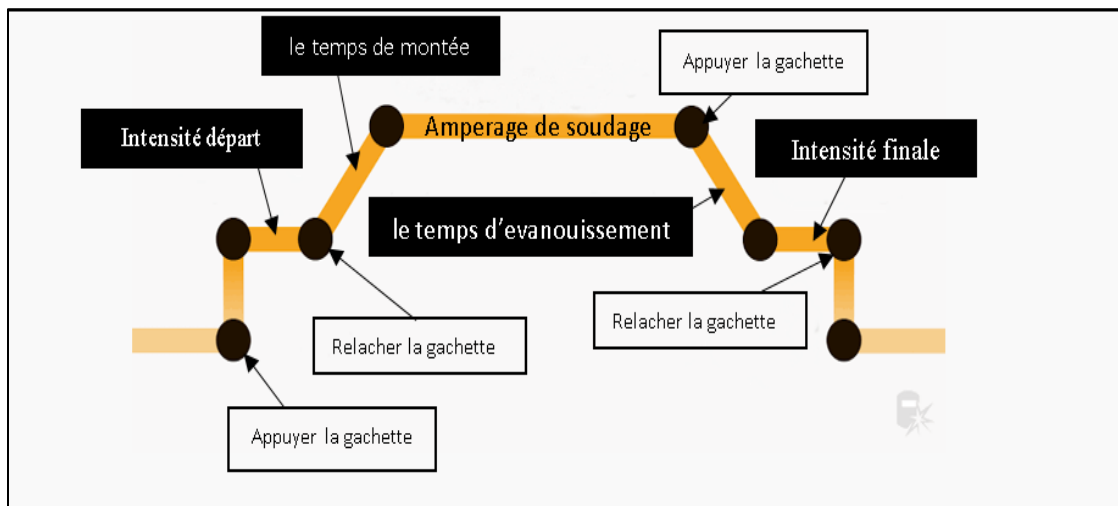


Figure II-16 : 4Ten soudage TIG.

II.12. PREPARATION DE TUNGSTEN

L'électrode en tungstène est le support crucial du processus de soudage et doit être meulée et coupée correctement. Une électrode mal préparée entraîne une dérive de l'arc, des fissures, des pertes, des incohérences ou des erreurs coûteuses. Des électrodes correctement rodées et coupées améliorent l'amorçage et la stabilité de l'arc.

- En courant continu l'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30° et 60°. Les stries de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode.
- En courant alternatif, une boule se forme au bout de l'électrode. Elle sera créée sur une éprouvette. C'est le seul cas où elle ne devra pas être pointue.

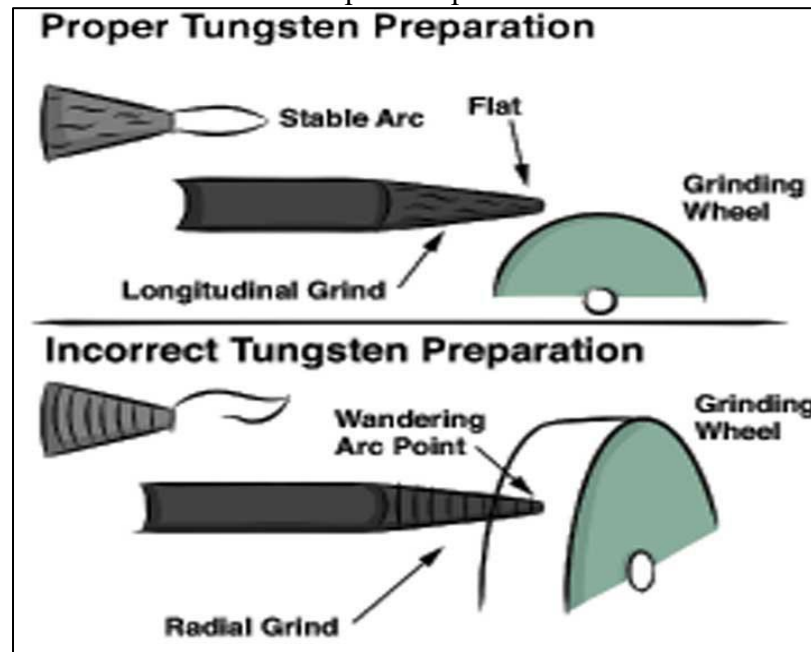


Figure II-17 : Préparation de Tungsten [50].

II.13. LE SOUDAGE TIG EST-IL DANGEREUX ?

Si vous souhaitez vous lancer dans le soudage, sachez que vous allez découvrir l'un des passe-temps les plus créatifs et les plus artistiques du travail des métaux. Le soudage est intrinsèquement gratifiant et vous offre la possibilité de réaliser de nombreuses créations artistiques. Cependant, lorsque vous soudez, vous devez connaître certaines pratiques de sécurité standard afin d'éviter tout danger potentiel tout en pratiquant votre travail. Le soudage TIG peut être sûr si l'on prend les précautions nécessaires. Les quatre dangers les plus courants du soudage de l'acier inoxydable sont les suivants [51] :

- La lumière UV de l'arc de soudage peut endommager les yeux et la peau.
- Les gaz de protection peuvent déplacer l'oxygène.
- Shales fumées toxiques des métaux fondus peuvent déplacer l'oxygène.
- Chocs électriques dus à des outils ou à des conditions de travail dangereuses.

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

Connaître les dangers les plus courants du soudage et savoir comment les éviter vous aidera à rester en sécurité et productif lors de la réalisation de votre prochain projet de soudage. Nous aboutons ci-dessous certains des risques potentiels du soudage de manière plus détaillée [56].

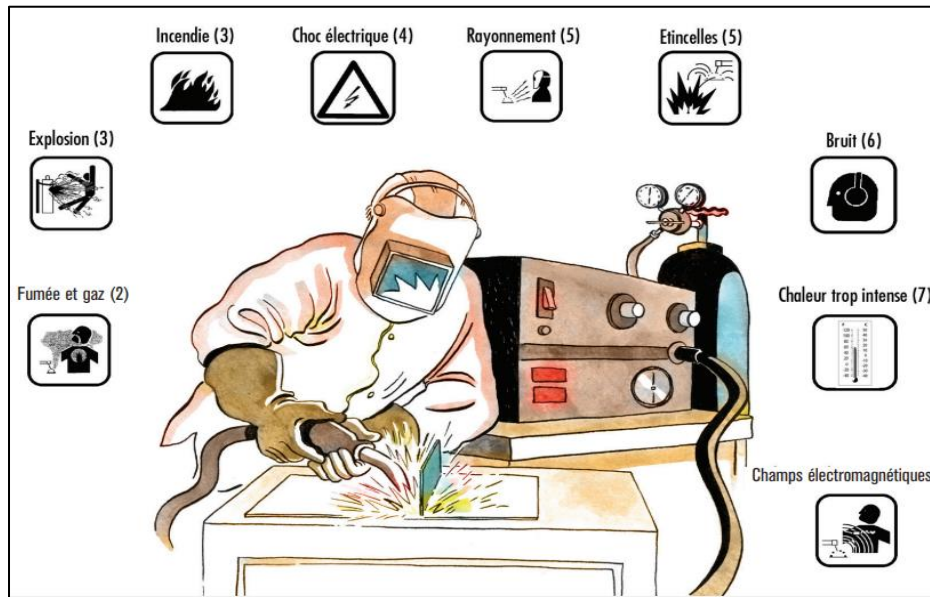


Figure II-18 : les risque de soudage [52].

II.14. SOUDAGE DE L'ACIER GALVANISE

Le soudage des fabrications avant et après la galvanisation est courant. Les exigences à cet égard sont relativement simples à mettre en œuvre. Le soudage avant et après la galvanisation est compatible avec l'objectif de fournir une protection supérieure contre la corrosion. De nombreuses techniques de soudage et de coupe courantes peuvent être utilisées sur l'acier galvanisé (voir la spécification D-19.0 de l'American Welding Societys (AWS), Welding Zinc Coated Steel). Le soudage sur l'acier galvanisé peut être nécessaire si la structure finale est trop grande pour être plongée dans un bain de galvanisation ou pour les structures qui doivent être soudées sur le terrain. Parmi les problèmes de sécurité mentionnés ci-dessus, tout se résume à l'absence de formation à la sécurité des soudeurs. Il est essentiel que le soudeur soit bien formé. Il doit maintenir le masque de soudage et le visage du soudeur à l'écart des fumées. Le soudeur doit également être placé dans une position adéquate afin de maximiser le flux d'air pur. En outre, cela permet d'éviter que la poussière oxydée ne s'accumule à l'intérieur de l'écran du soudeur. Pour des raisons de sécurité, le soudeur doit être équipé d'un masque de haute qualité. Il doit également recevoir une formation complète sur les mesures de sécurité à prendre en matière de soudage [53].

II.14.1. Protection individuelle pour le soudage de l'acier galvanisé.

Avant tout, il faut utiliser un équipement de protection individuelle approprié pour le soudage de l'acier galvanisé. Il peut s'agir de casques de soudage, de gants, de vestes en cuir et de bottes à embout d'acier, selon le procédé de soudage utilisé. Cependant, contrairement à d'autres applications de soudage, le soudage de l'acier galvanisé nécessite généralement une pièce supplémentaire d'équipement de protection individuelle : un respirateur. Lors du soudage de l'acier galvanisé, un respirateur est nécessaire pour ne pas inhaler les fumées d'oxyde de zinc provenant de la galvanisation. L'inhalation de fumées d'oxyde de zinc peut provoquer la fièvre des fumées

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE SOUDAGE TIG

métalliques. Cette surexposition aiguë à l'oxyde de zinc par le système respiratoire provoque des symptômes semblables à ceux de la grippe, qui peuvent être graves. Une surexposition chronique à l'oxyde de zinc peut entraîner la mort. Il est également sage de souder dans une zone bien ventilée, même en utilisant un masque respiratoire [54].

II.14.2.Des soudures de qualité pour le soudage de l'acier galvanisé

Le soudage de l'acier galvanisé peut poser des problèmes autres que des risques pour la santé. Le revêtement de zinc présent sur les aciers galvanisés peut compromettre la soudure. Le revêtement rend la pénétration plus difficile et peut provoquer des inclusions et des porosités dans la soudure. Le manque de fusion aux extrémités de la soudure est également fréquent. Une technique et des procédés de soudage appropriés doivent être utilisés pour atténuer ces risques. Dans la mesure du possible, retirez le revêtement de zinc autour de la zone de soudure avant de souder. Sinon, choisissez un matériau d'apport conçu pour être utilisé sur des matériaux zingués. Un autre facteur qui contribue à la qualité des soudures est le type de procédé de galvanisation utilisé pour recouvrir l'acier. Les différents types de méthodes de galvanisation laissent des épaisseurs de zinc différentes sur la surface de l'acier. L'acier galvanisé par immersion à chaud et l'acier galvanisé par projection thermique ont généralement un revêtement plus épais que l'acier galvanisé par électrolyse. Le choix d'un acier galvanisé par électrolyse peut permettre d'obtenir une meilleure soudure que l'acier galvanisé à chaud ou l'acier galvanisé par projection thermique dont le revêtement est plus épais. L'acier galvanisé aura également un revêtement beaucoup plus uniforme, ce qui est important lorsque l'on envisage l'automatisation du soudage [55].

II.14.3.Prévention de la corrosion lors du soudage de l'acier galvanisé

Un autre obstacle au soudage de l'acier galvanisé est le maintien de la résistance à la corrosion après le soudage. Lorsque l'acier galvanisé est soudé, le revêtement de zinc sur et autour de la soudure brûle, laissant la zone non revêtue et non protégée. Par conséquent, la soudure nue non protégée peut subir une défaillance rapide de la soudure. Si la résistance à la corrosion est toujours nécessaire après la soudure, il faut utiliser un procédé post-soudure, comme la peinture du matériau ou la re-galvanisation. [56].

II.15. CONCLUSION

Le procédé de soudage TIG est le plus élémentaire des procédés de soudage à l'arc électrique. La source thermique résulte de l'établissement d'un arc électrique entre une électrode réfractaire et les pièces à souder dans un confinement gazeux qui assure une protection du bain de fusion.

Ce procédé permet d'obtenir des cordons d'excellente qualité pour la plupart des matériaux métalliques et dans toutes les positions. La source thermique est totalement indépendante du métal d'apport. Il n'y a donc pas de projection et les cordons obtenus sont très réguliers, ce d'autant plus que le procédé est complètement automatisable. Ces nombreux avantages lui confèrent des applications dans des secteurs aussi exigeants que l'aéronautique, le nucléaire, la cryogénie ou l'alimentaire. La simplicité et la flexibilité de l'équipement en font un procédé facilement transportable. Cette propriété est particulièrement appréciée pour des applications dans les chantiers navals par exemple. Son coût réduit et une maintenance limitée en font un procédé de faible investissement accessible aux PMI pour des applications diverses et variées.

Cependant, le faible rendement de l'arc électrique associé à des courants majoritairement mouillants dans le bain de fusion sont à l'origine de cordons larges et peu pénétrés. Les épaisseurs soudables en une seule passe sont limitées à 3mm. Au-delà, les pièces à souder doivent être chanfreinées et le chanfrein doit être comblé par un métal d'apport en de multiples passes, en soudage MIG par exemple.

Par conséquent, cette limitation diminue fortement la productivité et occasionne un coût de production élevé. Par ailleurs, le soudage multi passe et l'emploi d'un métal d'apport augmentent le risque de défaut. Malgré sa lenteur, le procédé TIG est largement utilisé grâce à la grande qualité des joints soudés. Les développements s'orientent donc naturellement vers une optimisation de ce procédé.

En particulier, une solution immédiate est d'augmenter la densité d'énergie en concentrant l'arc électrique. Les développements de la buse ont donné lieu à de nouvelles techniques connexes au procédé TIG.

CHAPITRE III
ANALYSE DE L'EFFET DE
GEOMETRIQUE

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les simulations numériques sont largement utilisées pour déterminer les niveaux de contraintes et de déformations résiduelles produites par le procédé de soudage. En effet, la réalisation de structures mécano-soudées complexes nécessite une prise en compte attentive des contraintes résiduelles et des déformations lors de la phase de conception. De plus, de plus en plus de recherches sont consacrées à l'établissement de normes métallurgiques thermomécaniques pour améliorer la soudabilité des matériaux afin de minimiser la fissuration lors de la fabrication. L'objectif principal de cette simulation numérique est d'expérimenter de l'effet des variations géométrique sur la soudabilité par le procédé TIG.

III.2. SIMULATION A L'AIDE DE LOGICIEL ABAQUS

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...). Et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. Se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test). D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle [57].

III.3. ETUDE THERMOMECHANIQUE DE SOUDAGE TIG

Ce travail est la modélisation des phénomènes thermomécaniques liés à l'opération de soudage du TIG. Les températures générées lors de l'opération de soudage sont à l'origine de changements de phases solide/solide et solide/liquide dans l'alliage et donc de modification des propriétés mécaniques locales au sein des assemblages. Pour atteindre les contraintes internes générées au cours du soudage, il est nécessaire de prendre en compte les différents phénomènes physiques et leur couplage. Ceux-ci sont rappelés sur le schéma de la figure (III-1). Les contraintes internes sont tout d'abord associées aux gradients de températures dans la pièce. Par ailleurs, les évolutions de température peuvent conduire à des transformations de phase, qui en raison des déformations associées (changement de volume, cisaillement, plasticité de transformation) et des variations de propriétés mécaniques qu'elles engendrent, sont aussi à l'origine de contraintes. L'analyse thermomécanique de l'opération de soudage est généralement découplée, avec un calcul thermique réalisé dans un premier temps et un calcul mécanique dans un second. Les résultats thermiques sont enregistrés pour chaque pas de temps et ensuite utilisés comme données d'entrée du calcul mécanique (couplage faible). Cette méthode présente l'avantage de réduire les temps de calcul par rapport à un calcul couplé où les calculs thermique mécanique sont simultanés. Les questionnements les plus importants concernant un modèle thermique associé à une opération de soudure sont de trouver la meilleure manière de paramétrer la source de chaleur mobile due à l'avancement du cordon de soudure. La principale problématique concernant le modèle mécanique est de pouvoir prendre en compte la relaxation des contraintes induites par la fusion locale des

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

matériaux lors de l'opération de soudure et l'apparition des contraintes résiduelles induites par le comportement plastique du matériau. Généralement validé en réalisant des comparaisons entre les résultats du calcul et des mesures expérimentales qui peuvent provenir de la géométrie du cordon de soudure ou alors de l'utilisation de thermocouples.

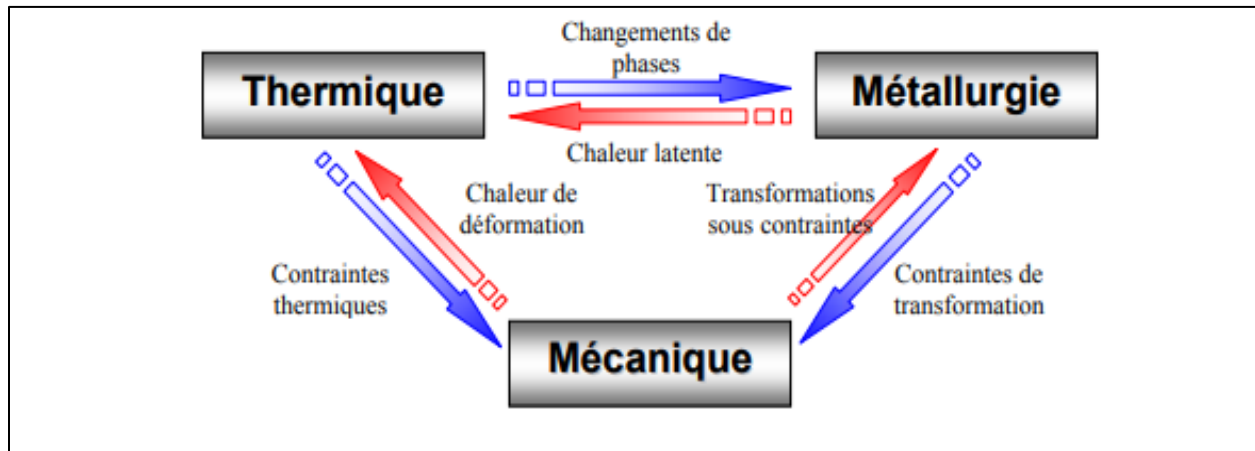


Figure III-1 : les phénomènes physiques impliqués [58].

III.4. PROPRIÉTÉ DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA SIMULATION

Nous avons fait la modélisation numérique de soudage de deux plaques d'un métal galvanisé. La galvanisation à chaud consiste à immerger des pièces en acier dans un bain de zinc à 450° environ pendant un laps de temps suffisamment long pour que l'ensemble de la structure à galvaniser soit amenée à cette température et ce après un décapage dans des bains d'acide, afin de créer sur l'ensemble de la pièce une liaison fer zinc protectrice. Nous avons pris la Epaisseurs de revêtement minimal sur la plaque dans le tableau (III-1) Suivant la norme NF EN ISO 14713-2 fourni les lignes directrices pour la conception des pièces destinées à être galvanisée à chaud.

Tableau III-1 les épaisseurs de revêtement dans les plaques [59].

Epaisseur de la pièce (mm)	Epaisseur local de revêtement (valeur minimale) (μm)
Acier > 6mm	70 μm
Acier > 3mm \leq 6mm	55 μm
Acier > 1.5mm et \leq 3mm	45 μm
Acier < 1.5mm	35 μm

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.4.1. Les propriétés physiques thermiques de métal et revêtement de zinc en fonction de la température

Afin de simuler, doit entrer certaines caractéristiques et propriétés du matériau utilisé. Dans notre étude, nous avons besoin de propriétés physiques et thermiques en fonction le changement de température comme indiqué dans tableau (III-2) pour le métal de base, voir tableau (III-3) pour zinc.

Tableau III-2 : les propriétés physiques thermiques de métal (tôle noire) (DIN EN 10346).

T(c°)	Conductivité(W*m)	Module De Young (N/m ²)	coeff de Expansion(c ^{-1°})	Chaleur spécifique (J/kgC°)	Coeff de poisson	La masse volumique (kg/m ³)
20	25.956	2.16E+11	1.04E-05		0.29956	7770
50	25.956	2.15E+11	1.07E-05			
100	27.022	2.12E+11	1.09E-05	496		
150	27.022	2.09E+11	1.12E-05			
200	27.911	2.07E+11	1.14E-05	512		
250	28	2.02E+11	1.15E-05			
300	29.067	1.99E+11	1.16E-05	525		
350	29.067	1.95E+11	1.18E-05			
400	29.067	1.9E+11	1.20E-05	540		
450	29.956	1.86E+11	1.23E-05			
500	29.956	1.81E+11	1.23E-05			
550	29.956	1.74E+11	1.24E-05			
600	29.956	1.67E+11	1.26E-05	577		
650	30.489	1.62E+11	1.28E-05			
700	30.667	1.52E+11	1.30E-05			
750	30.933	1.43E+11	1.31E-05			
800	29.511	1.32E+11	1.32E-05	604		
850	27.822	1.24E+11	1.32E-05			
900	27.911	1.15E+11	1.33E-05			
1000	28	95300000000	1.34E-05			
1100	28.089	70300000000	1.40E-05			
1200	28.267	49000000000	1.45E-05	676		
1300	29.156	29400000000	1.50E-05	692		
1400	29.333	8900000000	1.54E-05			
1500	58.5	8900000000	1.58E-05	700		
2000	58.5	8900000000				

- La chaleur latent 260000 W, température de solidus : 1420°, température de liquidus 1500°.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

Tableau III-3 : les propriétés physiques thermiques de zinc (DIN EN 10346).

T(c°)	Conductivité (W*m)	La masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kgC°)	Module De Young (N/m ²)	Coeff de Expansion (k ⁻¹)
0		7180	382	99300000000	2.98E-05
18	113				
200		7000			
400		6810			
410	96				
420	164				
600		6450			
750	57				
800		6250			

- La chaleur latent 115000, température de solidus : 410.5°, température de liquidus 419.5°.

III.4.2. Démontions de model

Nous avons fait plusieurs modélisations numériques de soudage sur les plaques d'un métal galvanise avec le même larguer et longueur figure (III-2) avec changement des épissures dans chaque cas.

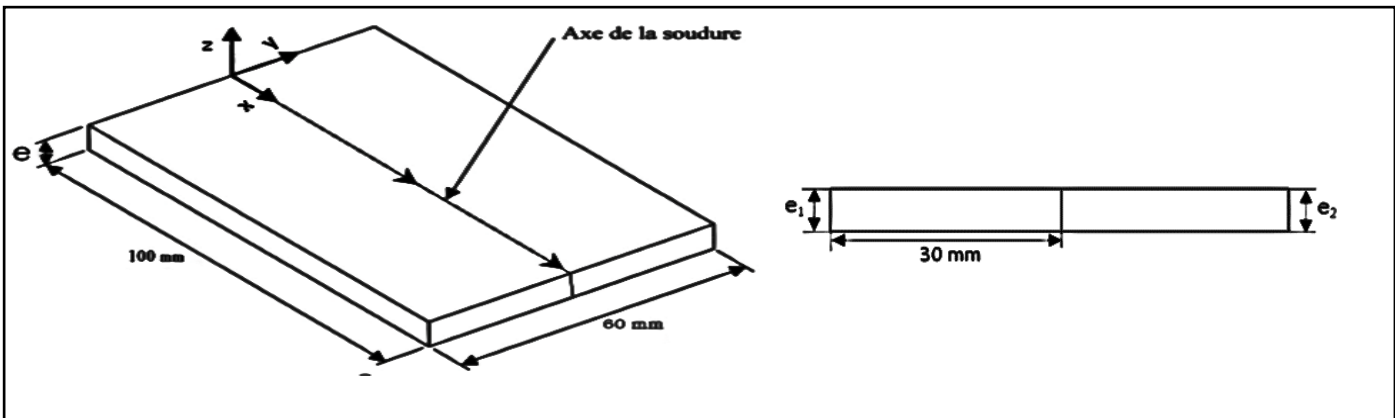


Figure III-2 : schéma de démontions des plaques.

Tableau III-4 : les variation de l'épaisseur sur la plaque.

cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e ₁	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5
e ₂	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	4	5	4	5	5

III.5. MODELISATION NUMERIQUE

Le comportement d'un matériau lors du soudage est un phénomène très complexe à prévoir ; les méthodes numériques facilitent l'analyse. La méthode des éléments finis, qui est l'une des méthodes numériques les plus utilisées, a été choisie pour calculer les contraintes résiduelles générées par le procédé de soudage. Cette méthode consiste à découper une partie complexe en plusieurs petits éléments pour générer un grand nombre d'équations simples à résoudre par calcul matriciel. L'analyse thermique complète du procédé (soudage et refroidissement) est réalisée, puis les résultats sont utilisés pour effectuer l'analyse structurale. La procédure à suivre pour la simulation de la soudure comporte plusieurs étapes. Premièrement, les paramètres du modèle sont définis : propriétés du ou des matériaux, types d'éléments utilisés. Ensuite, la géométrie de la pièce est créée, et un maillage est généré à partir de cette géométrie. L'analyse thermique est réalisée en utilisant un modèle numérique représentant la source de chaleur. Ce modèle permet d'appliquer la chaleur produite par la source à la pièce, sous forme de flux de chaleur ou de chaleur volumique, en fonction de la position de la torche. L'analyse des contraintes résiduelles est réalisée en utilisant les résultats des températures pour calculer la dilatation thermique de la pièce.

III.5.1. Modèle du disque de la source de chaleur

Différents modèles numériques ont été développés pour la simulation thermique du procédé de soudage. Ils suivent tous le même principe : Le modèle du disque, proposé à l'origine par Pavelic et al. [60], utilise un flux de chaleur sur une surface circulaire suivant une distribution gaussienne. Cette distribution est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$q_r = q_0 e^{-Cr} \quad (3.1)$$

Où :

q_r = flux de chaleur (W/m^2).

q_0 = flux de chaleur maximum au centre de la source (W/m^2).

r = distance radiale du center de la source de chaleur (m) .

C = coefficient de concentration (m^{-2}).

Une relation entre q_0 et C peut être établie en supposant qu'un flux constant de valeur q_0 imposé sur un cercle de diamètre $d = 2/\sqrt{C}$ est équivalent à la puissance totale Q .

$$Q = q_0 \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.2)$$

$$q_0 = \frac{QC}{\pi} \quad (3.3)$$

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

L'équation (3.1) devient :

$$q_r = \frac{Qc}{\pi} e^{-cr^2} \quad (3.4)$$

Pour déterminer la valeur de « C », on impose un flux de chaleur à la limite du cercle est égal à 5 % du flux de chaleur au centre du cercle.

$$q(r_d) = q_0 e^{-cr_d^2} = 0.05q_0 \quad 3.5$$

$$C = \frac{\ln(20)}{r_d^2} \approx \frac{3}{r_d^2} \quad 3.6$$

On obtient donc :

$$q_r = \frac{3Q}{\pi r_d^2} e^{-3(r/r_d)^2} \quad 3.7$$

Où r_d est le rayon du cercle délimitant la source de chaleur.

Avec :

$$Q = \eta UI \quad 3.8$$

Q : énergie thermique (J).

η : Rendement.

U : la tension (v).

I : courant (A).

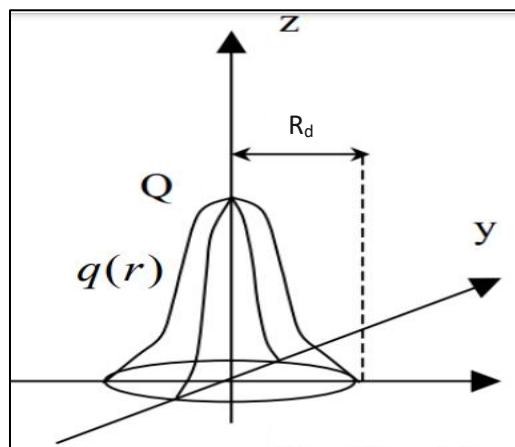


Figure III-3 : model source de Type disque [61].

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.5.2. Condition aux limite et Condition initiale

Les conditions aux limites supposées doivent être appliquées. Dans ce modèle, on suppose qu'il n'a aucun degré de liberté dans les deux côtés (voir Figure III-4). Les conditions initiales est La température ambiante égale 25°C.

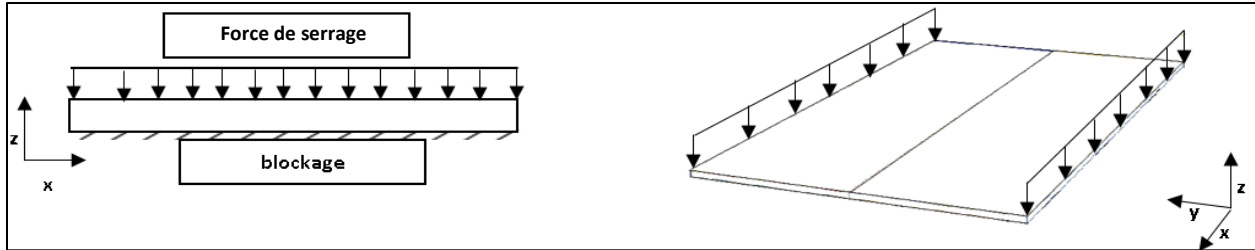


Figure III-4 : les conditions aux limites.

III.5.3. Maillage

Un modèle tridimensionnel (3D) a été construit selon les dimensions indiquées dans la figure III.2. La figure III-6 montre le maillage typique par éléments finis de l'ensemble. Le maillage est dense au niveau de la soudure, puis devient progressivement plus grossier à distance, afin de réduire le temps de calcul. Le modèle géométrique est subdivisé en 17800 éléments avec un nombre total de nœuds égal à 21777. Les éléments briques à huit nœuds ont été choisis afin de représenter un modèle en trois dimensions de déplacement de température couplé par l'élément "C3D8T : Une brique à 8 nœuds couplés thermiquement, déplacement trilineaire et température " Figure III-5 pour l'analyse thermique et de l'élément.

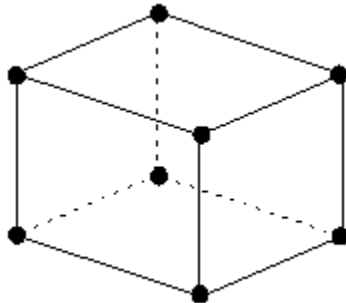


Figure III-6 : les éléments brique "C3D8T » [62].

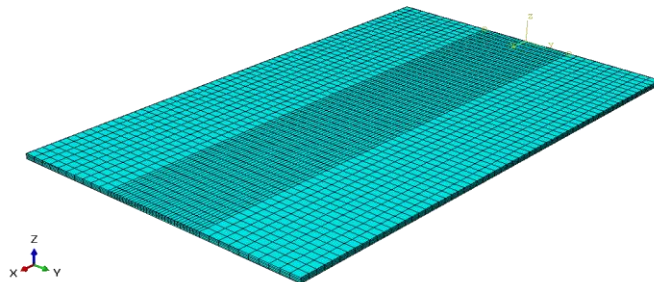


Figure III-5 : le Modèle de maillage 3D de l'Assemblage.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.6. METHODE DE MODALISATION

Les expérimentations ont consisté en la modélisation numérique avec abaqus figure III-7 de plusieurs cas, afin d'extraire l'intensité de courant nécessaire au soudage de tôles minces. Essayer d'extraire la force du courant n'était pas facile. De sorte que nous supposons la force du courant pour une plaque d'une certaine épaisseur. Puis on fait la simulation. Après la fin de la modélisation, on voit l'étendue de la pénétration. Nous répétons le processus avec un flux différent jusqu'à ce que nous obtenions un résultat satisfaisant. La durée moyenne d'une opération était de trois à dix heures. Selon l'appareil utilisé. Tout d'about, j'utilisais mon ordinateur avec quatre cœurs. Ensuite, je suis passé à travailler avec un supercalculateur en laboratoire de recherche avec 24 cœurs figure III-8 ce qui a réduit de plus de moitié la période de simulation. Le nombre de cas qui ont été modélisés a dépassé 50 tentatives. La taille finale de toutes les simulations est de plus grand que 180 Go. Nous avons fait le modalition numirique du fait de l'absence d'équipement de soudage TIG surtout le gaz de protection, qui avait une large importance dans notre étude. Nous avons ensuite effectué une opération de terrain sur deux cas pour vérifier la validité des résultats à l'usine de ALZINC d en Ghazaouet.

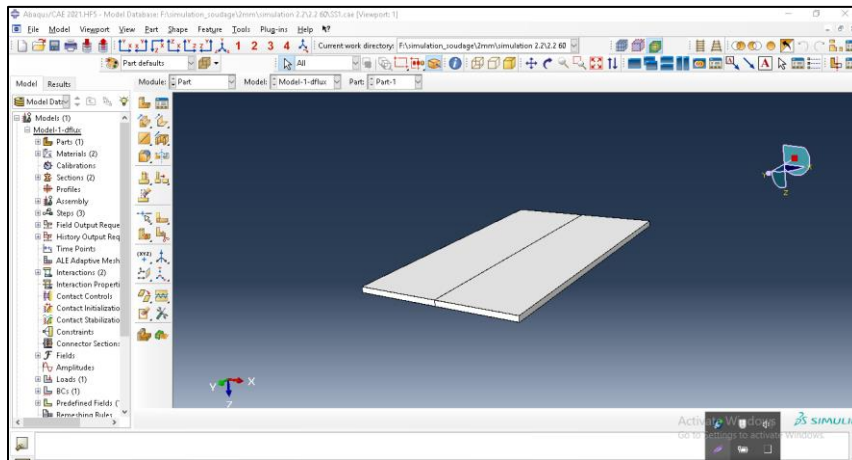


Figure III-8 : interface du programme abaqus.



Figure III-7 : calculateur de laboratoire de recherche.

III.7. RESULTAT ET DISCUSSION

Dans cette partie Nous avons présenté les résultats obtenus à partir de la modélisation numérique. Tout d'abord, nous avons extrait le courant nécessaire de soudage pour différents cas. et Nous avons également présenté l'effet du débit de gaz sur le temps de refroidissement. En plus de cela, nous avons extrait les contraintes résiduelles et leur relation avec la température.

III.7.1.L'effet de variations géométrique sur courant

Dans une première étape de voir les résultats, nous avons extrait l'intensité du courant nécessaire au soudage pour plusieurs cas est :

- Soudage des plaques avec épaisseur uniforme sans métal d'apport et avec métal d'apport.
- Soudage des plaques avec différent épaisseur.
- L'effet du revêtement de zinc sur le courant de soudage.

Après beaucoup d'essais (on change l'intensité du courant à chaque fois jusqu'à obtenir une bonne pénétration). Nous avons extrait le courant nécessaire pour souder des tôles de même épaisseur. Nous l'avons montré dans figure(III-9).

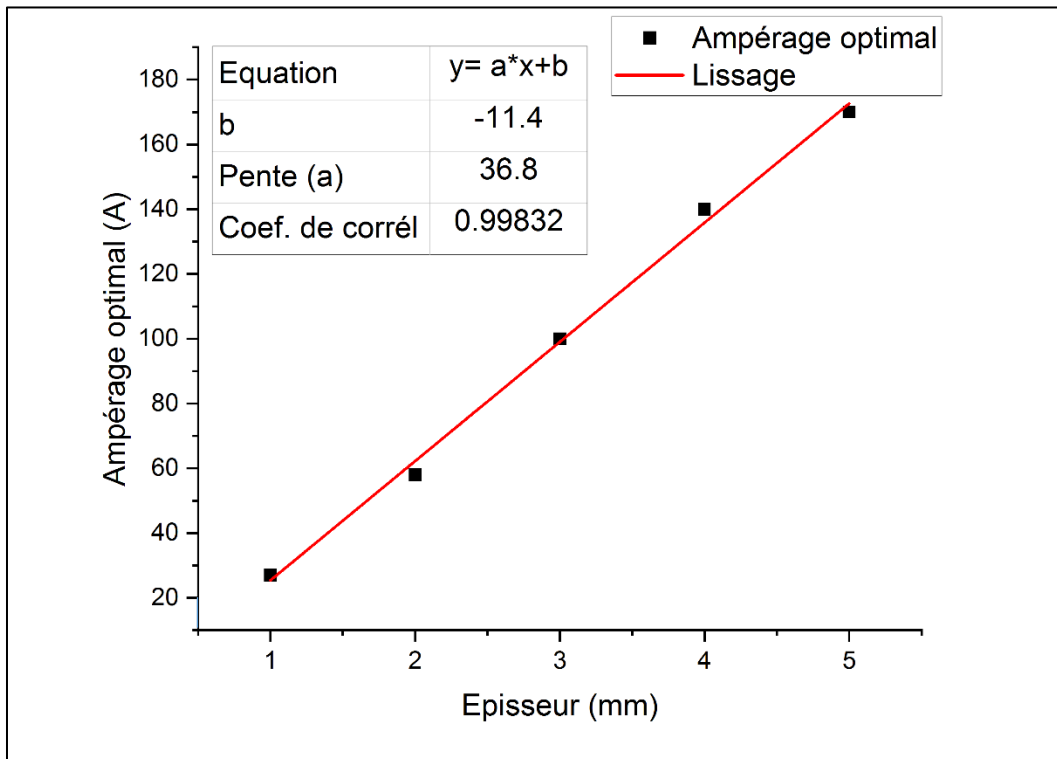


Figure III-9 : courbe montrant le changement de courant en en fonction de l'épaisseur des plaques sans métal d'apport

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

La figure (III-9) montre les résultats de nos expériences les points noirs représentent les résultats des expériences. Et la ligne rouge représente un lissage qui explore la relation possible entre les données, de sorte que l'équation obtenue est très proche (nous avons utilisé le logiciel « ORIGIN 2021 » pour cela. Afin d'extraire l'équation de la courbe, qui est une équation linéaire dont l'expression $y=ax+b$, on calcule par la méthode graphique d'about la pente pour calculer coefficient a. Puis on extrait le point d'intersection de la courbe avec l'axe ordinal, pour trouver La formule pour calculer la pente a d'une droite qui passe par les points P (x_1, y_1) et Q (x_2, y_2) est :

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.9)$$

Où Δy représente la variation des ordonnées et Δx représente la variation des abscisses. Nous fixons deux points en graph P (0 ; -11.4) et Q (4 ;136). $b = -11.8$ Le point d'intersection de la courbe avec l'axe ordinal. Et

$$a = \frac{136 - (-11.4)}{4 - 0} = 36.8 \quad (3.10)$$

$b = -11.8$ Le point d'intersection de la courbe avec l'axe ordinal. Et $a=36.8$ Au final, l'équation était

$$Y = 36.8x - 11.8 \quad (3.11)$$

Avec :

X : l'épaisseur (mm).

Y : courant (A).

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

Ce fonction linéaire (eq 3.9) est utilisé pour le soudage les plaque sans métal d'apport. Dans le cas du soudage avec un métal d'apport les résultats d'expériences avec une intensité de courant plus élevée sont nécessaires par rapport à ce qui précède. Les résultats sont présentés sur la figureIII-10 :

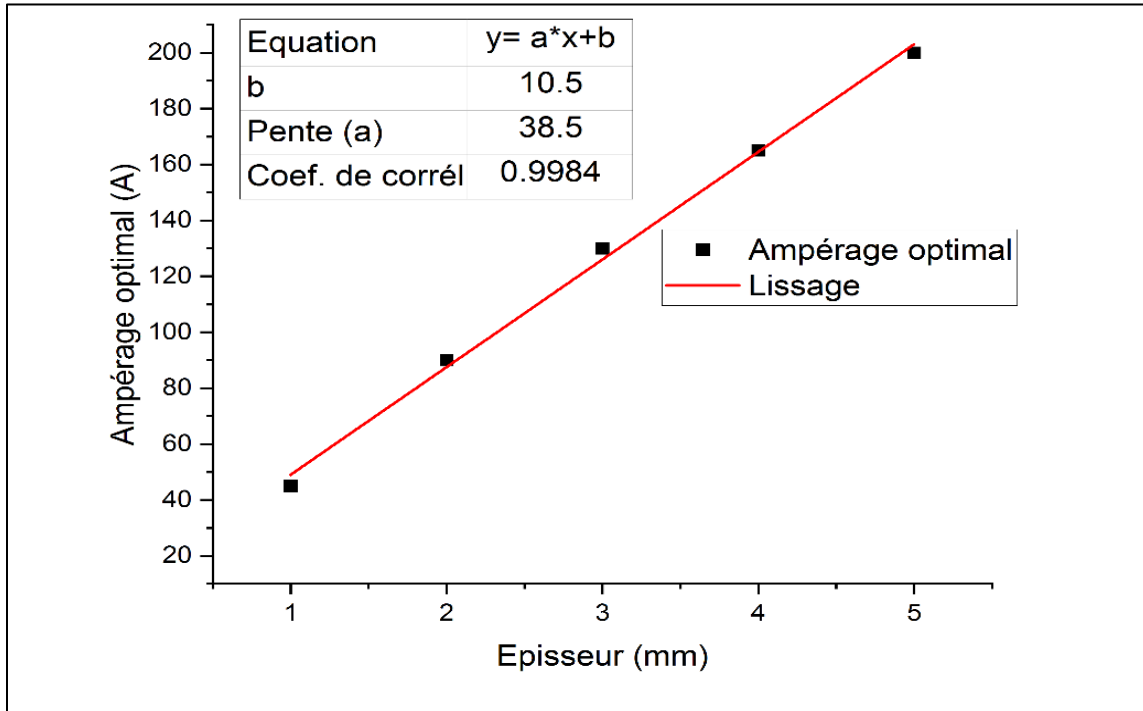


Figure III-10 : courbe montrant le changement de courant en en fonction de l'épaisseur des plaques avec métal d'apport.

De la même manière que précédemment, en utilisant le logiciel ORIGIN on obtient le graph qui représente la variation de courant en fonction à l'épaisseur des plaques pour d'extraire l'équation de la courbe, qui est une équation linéaire dont l'expression $Y=ax+b$ où :

b = 10.5 Et a=36.8 Au final, l'équation était

$$Y = 38.5x + 10.5 \quad (3.12)$$

X : l'épaisseur (mm).

Y : courant (A).

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

Pour le soudage des plaques sans revêtement de zinc nécessitent une intensité de courant plus faible (environ 4 ampères) voir Figure (III-11).

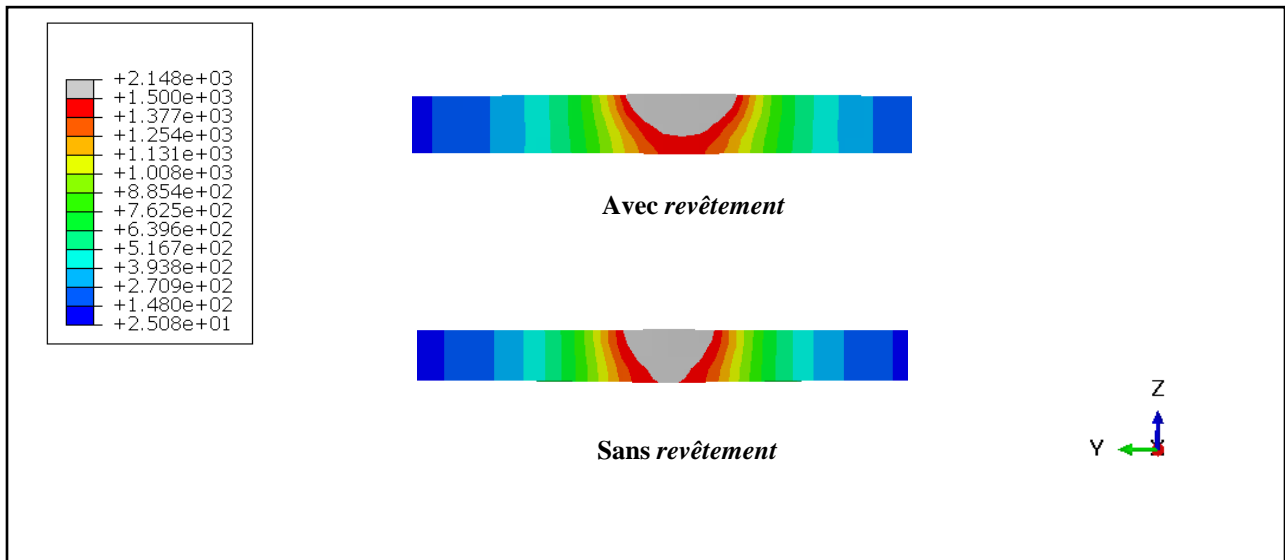


Figure III-11 : résultats de simulation pour des plaques de 2 mm avec un courant de 60A

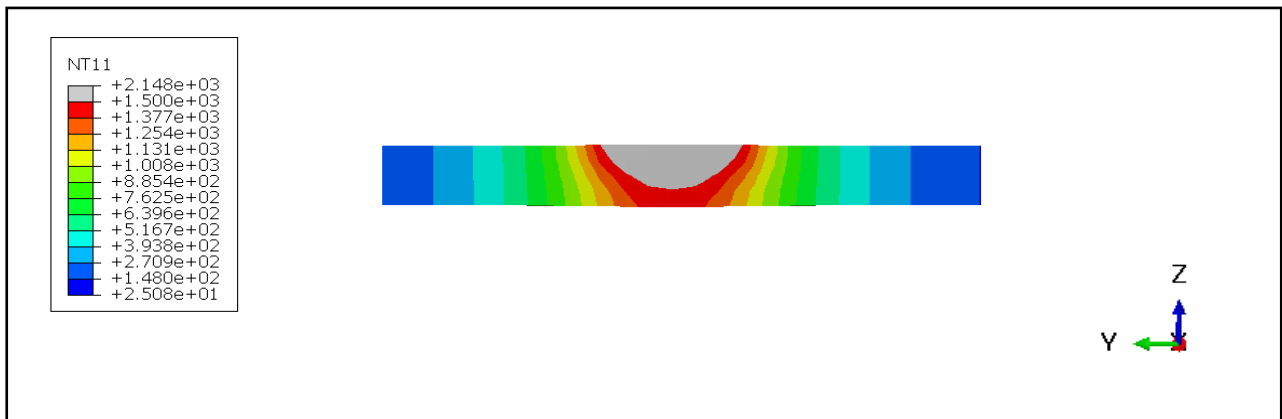


Figure III-12 : résultats de simulation pour plaque de 2 mm avec un courant de 55A Sans revêtement.

Dans le cas de soudure des épaisseurs différentes, une intensité de courant légèrement supérieure à l'intensité de courant est nécessaire pour souder une tôle de moindre épaisseur ; Augmentez d'environ 5 ampères ; Le soudeur peut ralentir un peu la vitesse de soudage pour obtenir une meilleure pénétration ; Tout en conservant les mêmes paramètres.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.7.2.L'effet de débit de gaz sur le temps de refroidissement

Immédiatement après la fin du soudage. Nous avons pris la température vers le long de l'axe de soudage. On obtient la courbe représentée sur la figure III-13.

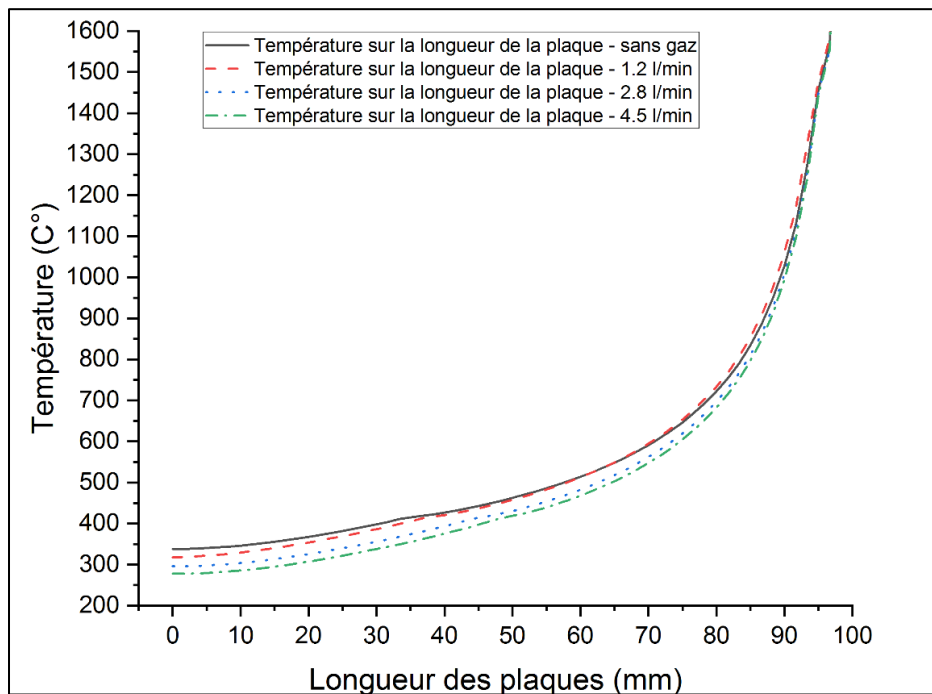


Figure III-13 : courbe montrant le changement de température sur la longueur de la plaque.

Les courbes en figure représentent le changement de température le long de la plaque (en L'axe de soudage). Avec le changement de débit de gaz pour chaque cas. Nous avons observé que la température diminue à l'avant d'une plaque à mesure que le flux augmente. Ceci est la preuve que la vitesse de refroidissement a été affectée par le débit de gaz. Par exemple, la température à l'avant de la plaque soudée $d=0$ sans gaz est de 338 °C et avec le débit de gaz, 4.5 L/min il était égal à 277 °C. Bien que le même laps de temps soit passé. Le temps de refroidissement diminue avec l'augmentation du débit de gaz. Les températures en bout de plaque sont très élevées dans tous les cas. Parce qu'il n'y a pas de temps pour refroidissement.

III.7.3. L'effet de débit de gaz sur la température à la largeur de plaque

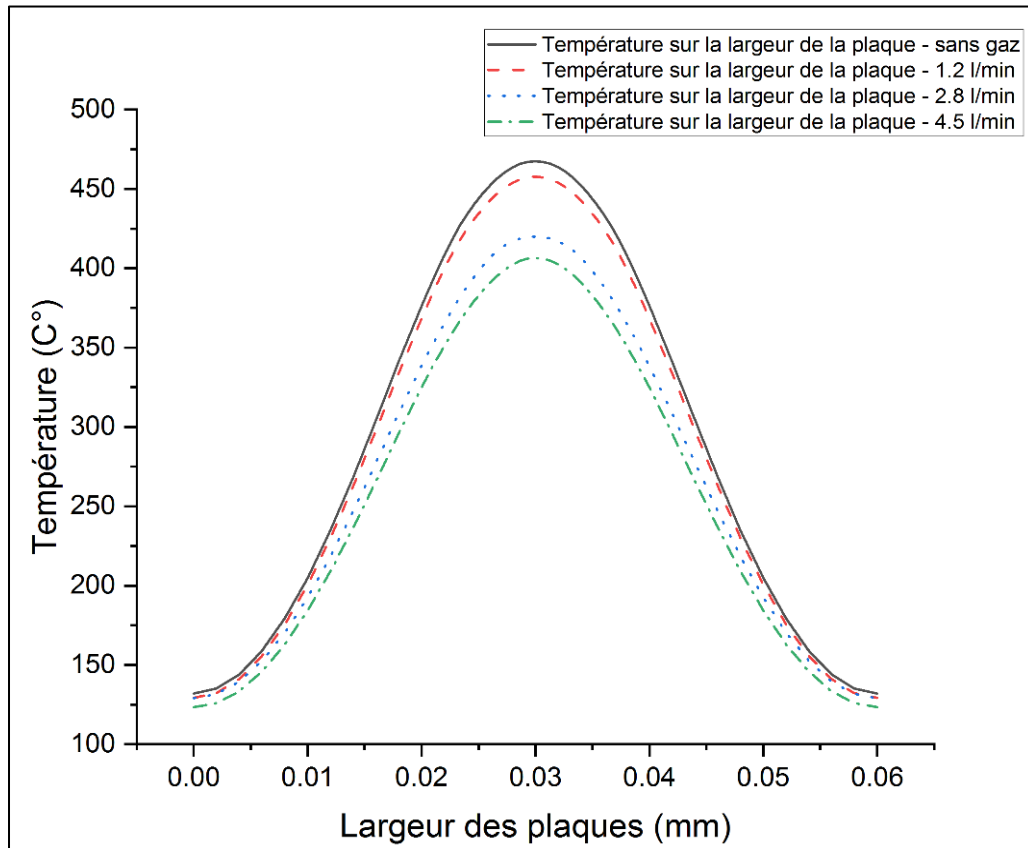


Figure III-14 : courbe montrant le changement de température sur la largeur de la plaque.

Cette courbe est la variation de température proportionnelle à la distance transversale au milieu de la plaque le soudage 0s, de phase de refroidissement. On remarque que la température augmente au milieu par ce que le passage de la torche de soudage. Et moins sur les côtés. L'effet du flux de gaz est clairement visible. Alors que la température la plus élevée était dans une plaque soudée sans gaz de protection $T = 463^{\circ}\text{C}$. Le degré le plus bas correspondait à une plaque soudée avec un débit de gaz de 4.5 L/min $T = 406^{\circ}\text{C}$. Plus le débit de gaz est faible, plus la température est élevée. Ceci est dû à l'effet du gaz sur le temps de refroidissement.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.7.4.L'effet de débit de gaz sur les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles induites par les soudures continues sont dues à un champ de températures élevé non uniforme. Les contraintes internes d'origine thermique se régénèrent pendant la soudure et elles sont extrêmement sensibles aux variations de températures. La répartition de la température dépend de quantité de chaleur totale et des modèles de sa distribution dans le joint de soudure. Les résultats obtenus numériquement de l'analyse mécanique montrent l'intensité et la distribution des contraintes résiduelles transversales en fonction de la distance d.

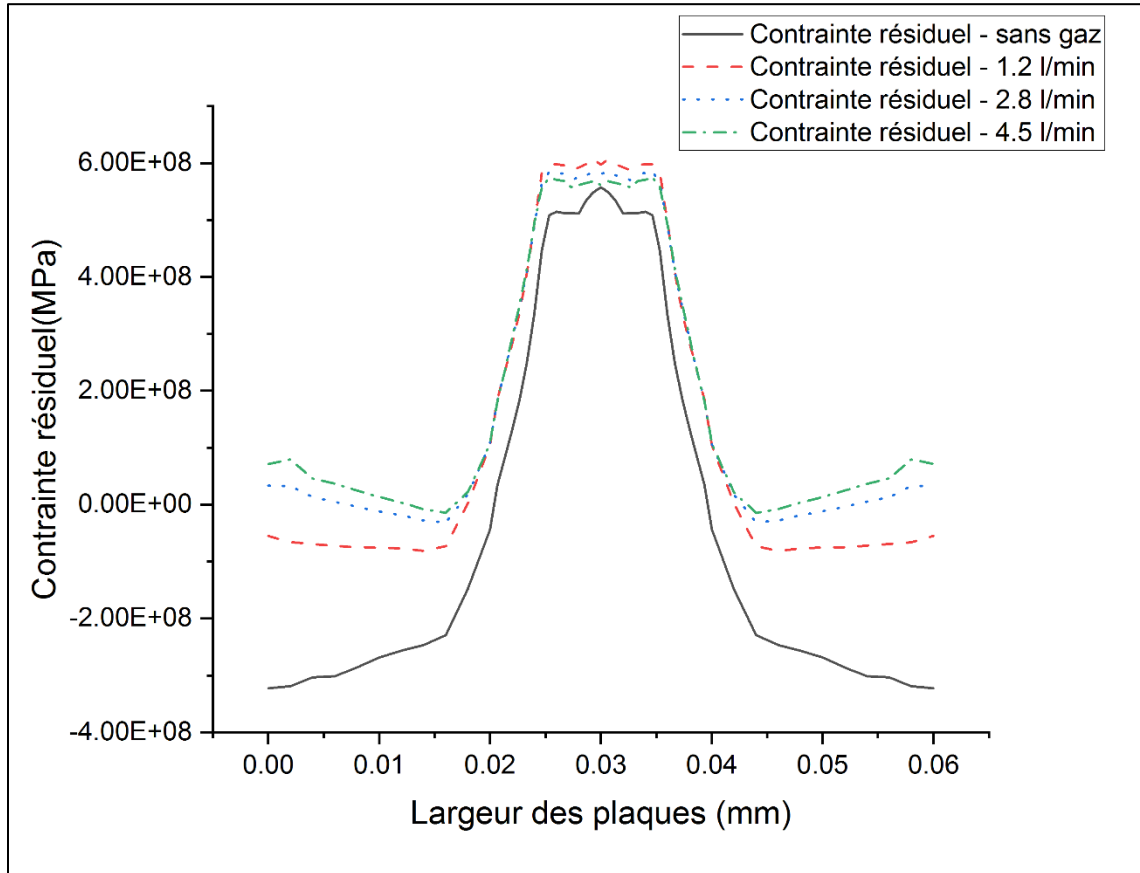


Figure III-15 : courbe montrant le changement de contrainte sur la largeur de la plaque.

La figure III.15 représente les contraintes résiduelles de quatre états, le premier sans flux de gaz et l'autre en changement de flux de gaz. Sans gaz (Après 300s de temps de refroidissement), Le premier cas était en couleur noire, il représente les changements de contraintes sans gaz. Les contraintes totales (pression plus traction) sont égales à $8,79.10^8$ MPa. Le deuxième cas, le débit de gaz elle est 1.8(l/min), les contraintes résiduelles de traction ont été supérieure par rapport à ce qui précède. Cela est dû à la vitesse de refroidissement plus élevée. Quant aux contraintes résiduelles de pression, elles étaient beaucoup plus faibles, et c'est que le débit de gaz ne permettait pas aux bouts de la plaque de monter en température. Les contraintes totales étaient égales $6,87.10^8$ MPa. Pour 2,8(l/min) de débit de gaz la somme de contraintes résiduelles il est 6.16MPa.et pour 4.5 (l/min) les contraintes résiduelles égale 5.88MPa. Étant donné que la différence entre les contraintes résiduelles n'est pas énorme dans les cas de 2.8(l/min) et 4(l/min) de débit de gaz. Nous pouvons utiliser le débit de 4.5(l/min), une fois la valeur converge.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.8. Validation du modèle

Afin de valider les résultats de l'analyse par simulation, un essai de soudure a été réalisé en ALZIC (Ghazaouet). Pour comparer les résultats, la soudure a été réalisée par un technicien Mr ZEMAME ABDLGHAOUF est soudeur avec expérience en soudage TIG. nous avons choisi une plaque de 2mm pour validation la simulation. Et nous avons appliqué les mêmes paramètres que nous avons appliqués dans la modélisation numérique. Et on obtient les résultats suivants :

La première expérience nous avons soudé deux plaques avec un courant égal à 60A. Les résultats n'étaient pas satisfaisants et c'est parce que nous avons enlevé la couche de zinc. La vitesse de soudage était plutôt lente. Cela a entraîné une pénétration de la plaque Figure III-16.



Figure III-16 : soudage de plaque pour 2mm d'épaisseur avec 60A.

Dans la deuxième expérience. Nous avons baissé le courant à 55A. Et nous avons obtenu une bonne pénétration et un bon cordon visible. Figure III 17.

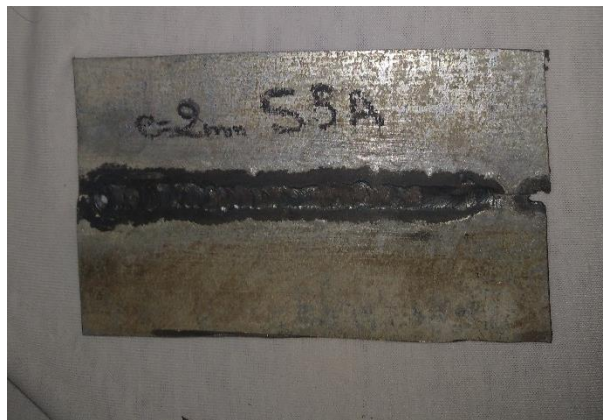


Figure III-17 : soudage de plaque pour 2mm d'épaisseur avec 55A.

Les résultats de l'expérience numérique correspondaient dans le cas sans la couche de zinc. Avec les résultats de l'expérience pratique concernant la pénétration. Nous ne pouvons pas comparer les températures et les contraintes car nous n'avons pas le matériel nécessaire. Mais nous pouvons être certains que les expériences numériques sont en bonne concordance avec l'expérimental.

III.9. L'APPLICATION DE REGLAGE DE POSTE

D'après les résultats que nous avons obtenus de la simulation numérique, nous avons créé une application Android. Pour afficher les paramètres de poste de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000, qui doivent être sélectionnés et ajustés dans le poste Matrix 3000.

III.9.1. Données techniques de poste de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000

MATRIX 3000 : puissants, compacts et légers. Grâce au nouveau contrôle numérique du soudage, ces générateurs pour soudage à électrode sont à la pointe de la technique et les plus performants du marché, les MATRIX 3000 figure III-18. Nous avons mentionné quelques caractéristiques techniques dans le tableau III-5.



Figure III-18 : MATRIX 3000 AC/DC [63].

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

Tableau III-5 : les données techniques générales de l'installation sont résumées.

TECHNICAL DATA		3000 AC/DC	
Three phase input 50/60 Hz	V	400	+ 20% - 20%
Input Power @ I ₂ Max	kVA	9,6	
Delayed Fuse (I _{eff})	A	10	
Power Factor / cos φ		0,95/0,99	
Efficiency Degree		0,76	
Open circuit voltage	V	100	
Current range	A	5 - 300	
Duty cycle at (40°C)	A 100%	210	
	A 60%	250	
	A 35%	300	
Standards		EN 60974-10	
Protection Class	IP	23 S	
Insulation Class		F	
Dimensions	↗ mm	495	
	→ mm	185	
	↑ mm	390	
Weight	kg	19	

III.9.2. Explication de l'interface de de post de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000

Le générateur TIG MATRIX 3000, avec amorçage et haute fréquence, qui exploite la technologie inverter de pointe fondée sur IGBT, est équipé d'un afficheur numérique simplifié permettant de régler et sélectionner facilement les principales fonctions de soudage, clairement indiquées sur le simple tableau de contrôle figure III-19. Les remarquables caractéristiques techniques et le potentiel du révolutionnaire contrôle numérique, permettent de réaliser des soudures TIG de qualité élevée et d'exploiter cette machine dans les utilisations les plus lourdes de l'industrie.

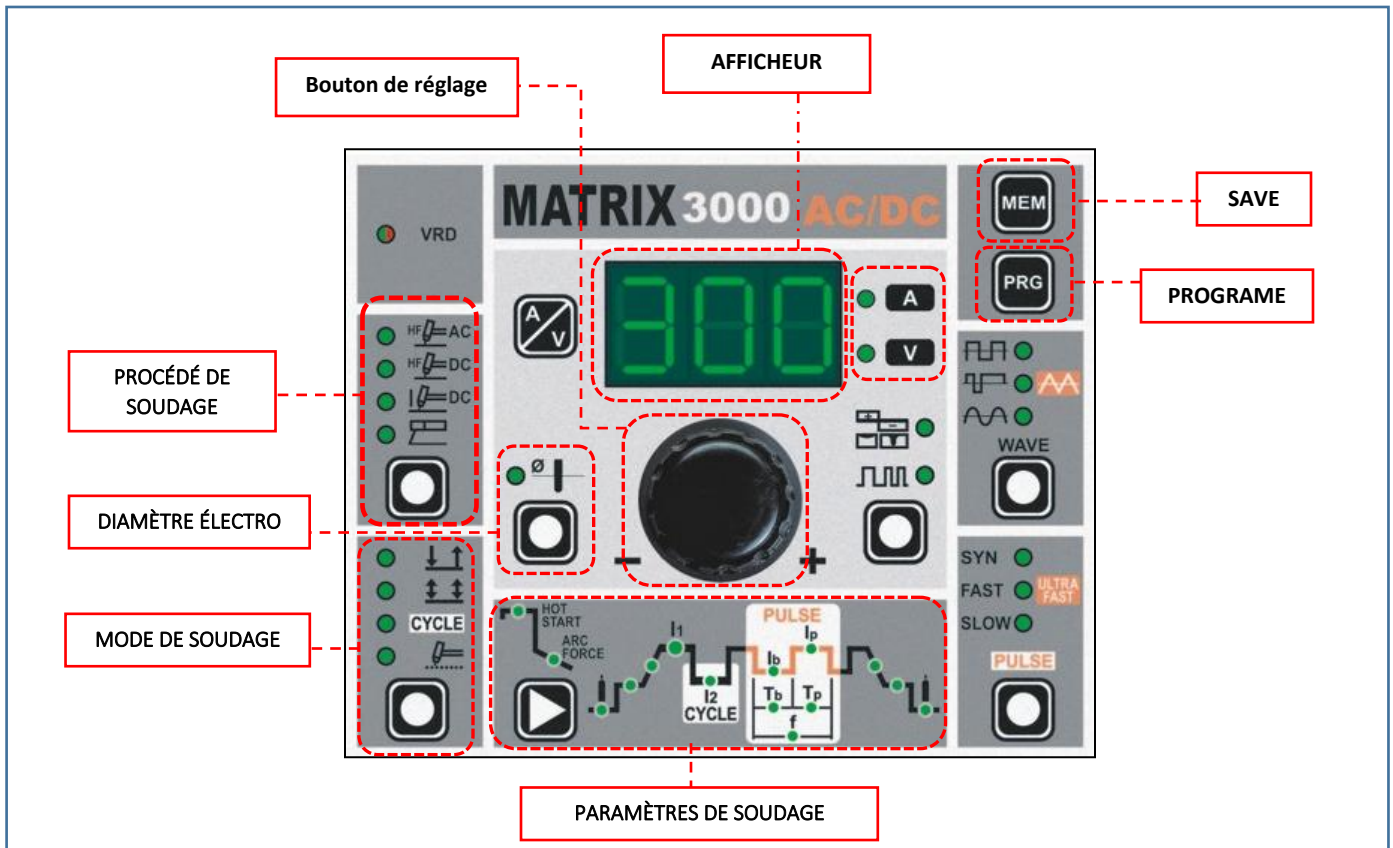


Figure III-19 : tableau de contrôle de de post de soudage TIG MATRIX AC/DC 3000.

La première fois que vous regardez une machine TIG, votre première pensée peut être du genre "il y a beaucoup de lumières et de boutons". Vous auriez raison. Comparée aux machines MIG et aux machines à baguette, une soudeuse TIG peut sembler très compliquée. En utilisant la soudeuse TIG MATRIX AC/DC 3000 :

III.9.2.1. PROCÉDÉ DE SOUDAGE

La machine à souder MATRIX offre 4 procédés de soudage TIG/Electrode. A chaque pression de la touche, la machine à souder sélectionne le procédé de soudage indiqué par la LED correspondante qui s'éclaire fixement, dans l'ordre suivant :

- P1 : TIG AC avec amorçage HF
- P2 : TIG DC avec amorçage HF
- P3 : TIG DC avec amorçage type « Lift ».
- P4 : LECTRODE (MMA).

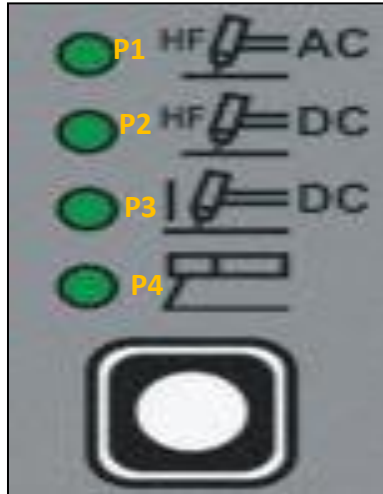


Figure III-20 : les procédés de soudage en MATRIX300.

III.9.2.2. Diamètre Electrode

Saisissez le diamètre de tungstène afin de mieux contrôler de façon l'amorce de l'arc automatiquement.



Figure III-21 : contrôle le diamètre de l'électrode pour HF.

III.9.2.3. Mode De Soudage

La machine à souder MATRIX offre 4 modes de soudage. A chaque pression de la touche, la machine à souder sélectionne le procédé de soudage indiqué par la LED correspondante qui s'éclaire fixement, dans l'ordre suivant :

- M1 : 2 TEMPS : signifie que vous devrez maintenir le bouton de votre torche haute fréquence enfoncé pendant que vous soudez.
- M2 : 4 TEMPS : vous n'aurez qu'à cliquer sur le bouton pour allumer l'arc et la torche continuera à souder jusqu'à ce que vous cliquiez à nouveau pour l'éteindre.
- M3 : CYCLE : La fonction « CYCLE » permet par simple pression sur la gâchette de la torche de commuter entre deux courants pré-réglés. Cette fonction est très utile pour le soudage de profilés de différentes épaisseurs nécessitant le réglage permanent du courant.
- M4 : POINTAGE : C'est exactement ce qu'il dit, des arcs consécutifs et réguliers qui fonctionnent bien si vous voulez des pointes et des petites soudures parfaitement régulières

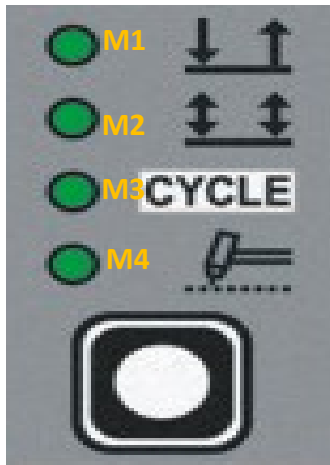


Figure III-22 : l'option pour sélectionner le mode de soudage.

III.9.2.4. Paramètres De Soudage

A chaque pression de la touche la machine à souder sélectionne la fonction successive, selon la configuration de la machine, le procédé de soudage, le mode de soudage, etc.

- 1 : Pré-gaz : il s'agit du gaz qui protège de l'atmosphère le tungstène et la zone que vous allez commencer à souder. Utilisez le bouton pour sélectionner la durée pendant laquelle vous souhaitez que le pré-gaz s'écoule avant l'allumage de l'arc.
- 2 : Ampérage de départ : ces ampérages permettent de démarrer avec un ampérage plus faible ou plus élevé, en fonction du matériau.
- 3 : Pente ascendante : votre pente ascendante dictera le temps (en secondes) qu'il faudra pour atteindre votre ampérage maximal à partir de votre ampérage de départ. Plus vous introduisez de temps, plus il faudra de temps pour que les ampères augmentent. Une pente ascendante plus longue est recommandée pour les métaux plus fins afin d'éviter de brûler directement à travers.
- 4 : L'intensité de travail : il s'agit de l'intensité à laquelle vous allez souder jusqu'à ce que vous ayez terminé le joint. Si vous êtes réglé sur l'impulsion AC/DC, il s'agira de la partie haute de votre cycle d'ampérage.
- 5 : Réglage de mode CYCLE : à cette étape définissez la valeur du deuxième et nécessitant courant.
- 6 : Pente descendante : votre pente descendante dictera le temps (en secondes) entre vos ampères de travail et vos ampères d'arrivée. Cela permet d'affiner l'arc pour éviter les cratères et les fissures dans la soudure.
- 7 : Ampérage de finition : il s'agit du niveau d'ampérage final que la machine atteindra avant que votre arc ne s'éteigne.
- 8 : Post-gaz : c'est le gaz qui circule pendant un certain temps après l'extinction de l'arc, pour protéger et refroidir le tungstène ainsi que la soudure.
- 9 : Courant d'amorçage : Programmable uniquement avec les procédés de soudage TIG AC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage HF.
- 10 : Ib Intensité base programmée : La valeur programmée de l'intensité basse de soudage Ib. Cette valeur est sélectionnée selon l'épaisseur du matériau, la nuance du matériau, la position de soudage et le type de préparation de joint. Pour pulse mode.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

- 11 : I_p Intensité de PIC : La valeur programmée de l'intensité haute de soudage I_p . Cette valeur est sélectionnée selon l'épaisseur du matériau, la nuance du matériau.
- 12 : T_b durée de courant de base : est comprise entre 0,1 à 2,5 secondes.
- 13 : T_p durée de courant de PIC : La valeur programmée du temps froid T_f est comprise entre 0,1 à 2,5 secondes. Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité basse (I_b) sélectionnée lors du soudage.
- 14 : f fréquence de pulsation : on Hz.

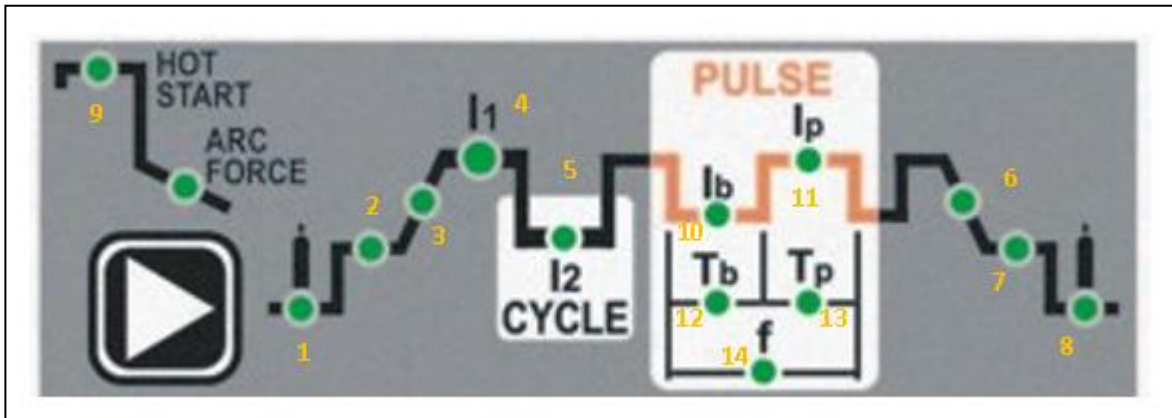


Figure III-23 : paramètres de soudage TIG.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.9.3. Présentation de l'application pour de soudage TIG MATRIX 3000

Nous avons créé une application qui calcule les paramètres de soudure bout à bout des différents cas pour post soudage TIG MATRIX 3000. Il faut, simplement, disposer d'une tablette ou d'un Smartphone(Android). Ensuite, nous indiquons certains avantages d'utiliser l'application :

- Facile à utiliser.
- Vous n'avez pas besoin d'internet.
- Affichage rapide des résultats.

Nous allons poser un exemple. Démarrez l'application dans votre Smartphone ou tablette.

III.9.3.1. Ecran 1 De L'application(Interface)

La première interface de l'application montre une image de post soudage. Avec une option de description, lorsqu'il est cliqué, nous obtenons une fenêtre décrivant sur l'Equipment de soudage inversé TIG figure III-24 :

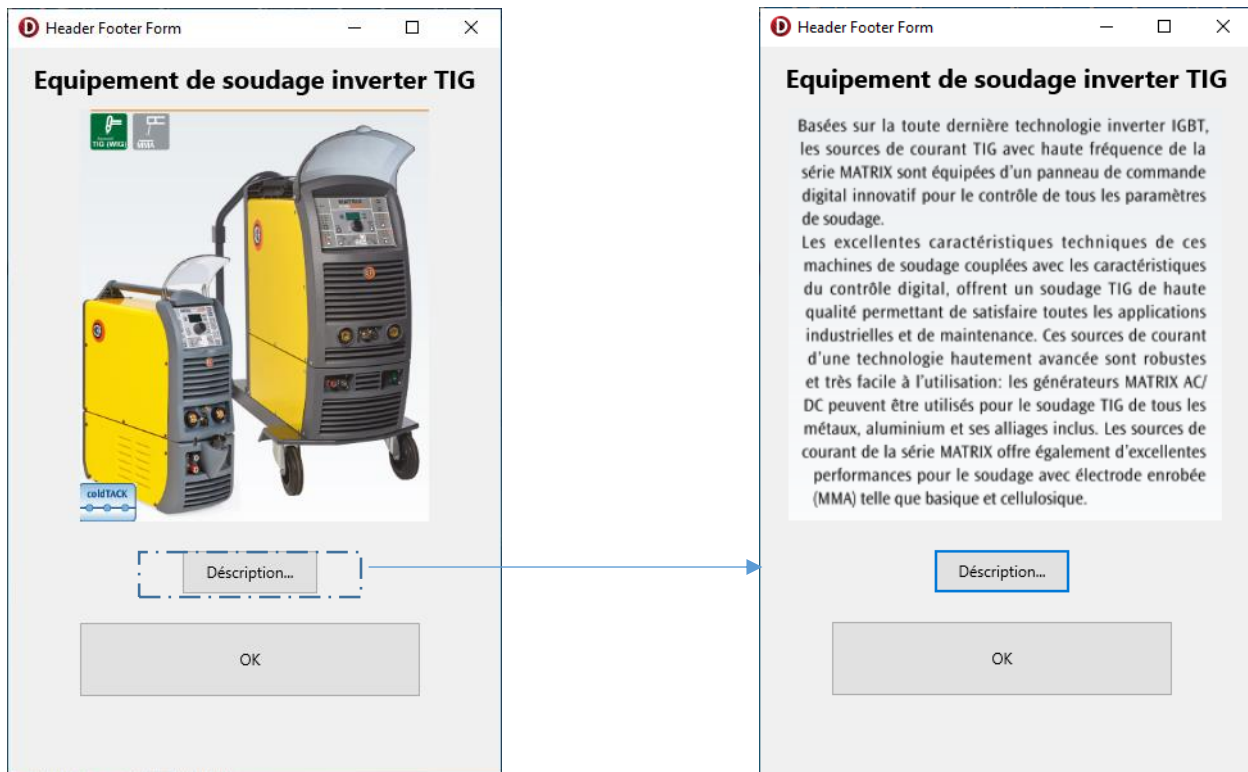


Figure III-24 : présentation de l'interface l'application.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

III.9.3.2. ÉCRAN 2 DE L'APPLICATION

Le deuxième écran pour sélectionner le Choix de la technique de soudage et la matière de la pièce. Avec les configurations géométriques figure III-25 :

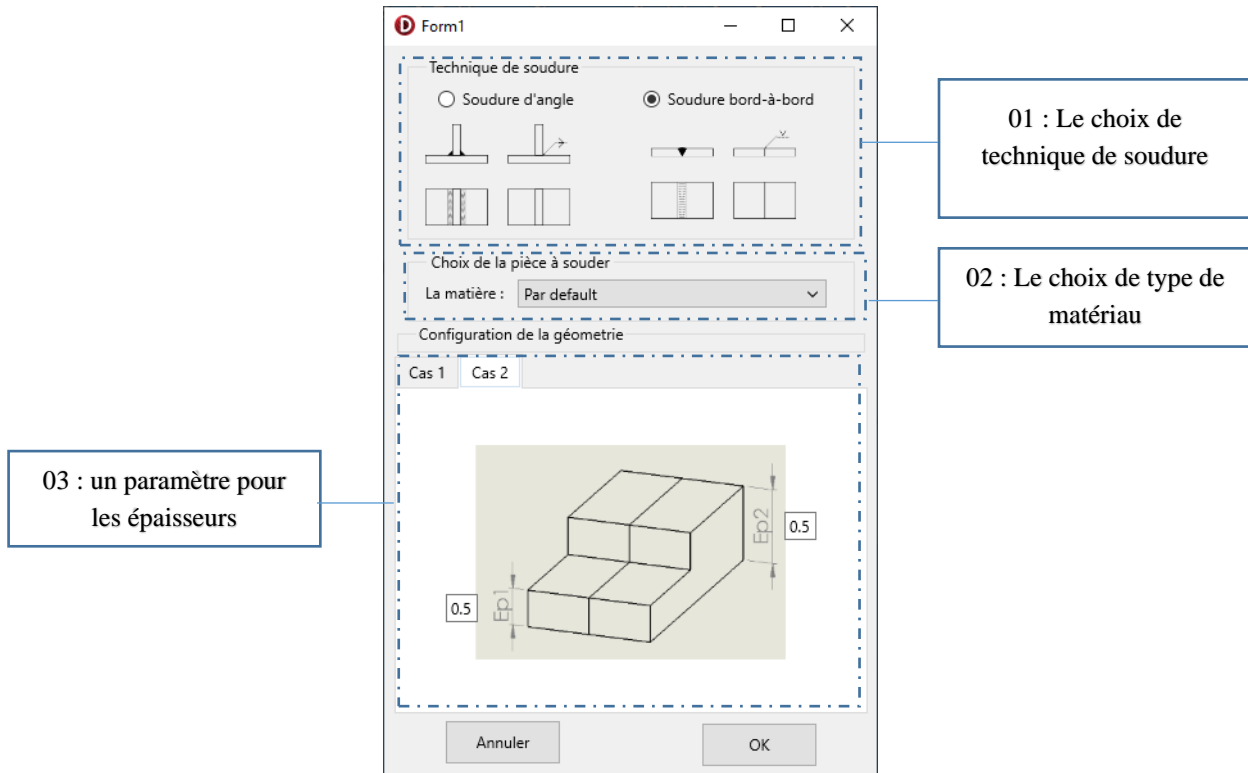


Figure III-25 : interface de saisie les paramètres.

III.9.3.3. ÉCRAN DE L'APPLICATION (AFFICHAGE DE RÉGLAGE)

Après avoir sélectionné les paramètres précédents. Une interface composée de trois options apparaît. Le premier nous montre les réglages de la machine à souder. Avec la taille des électrodes. Et l'intensité de travail, le temps de montée /évanouissement avec l'intensité de départ et finale. Temps de pré gaz et post gaz. Figure III-25 indique un exemple pour soudée une plaque galvanisée bout à bout d'épaisseur uniforme égale à 2mm. Et figure III-26, montre la même propriété avec différent épaisseurs des plaques $e_1=2$, $e_2=4$.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

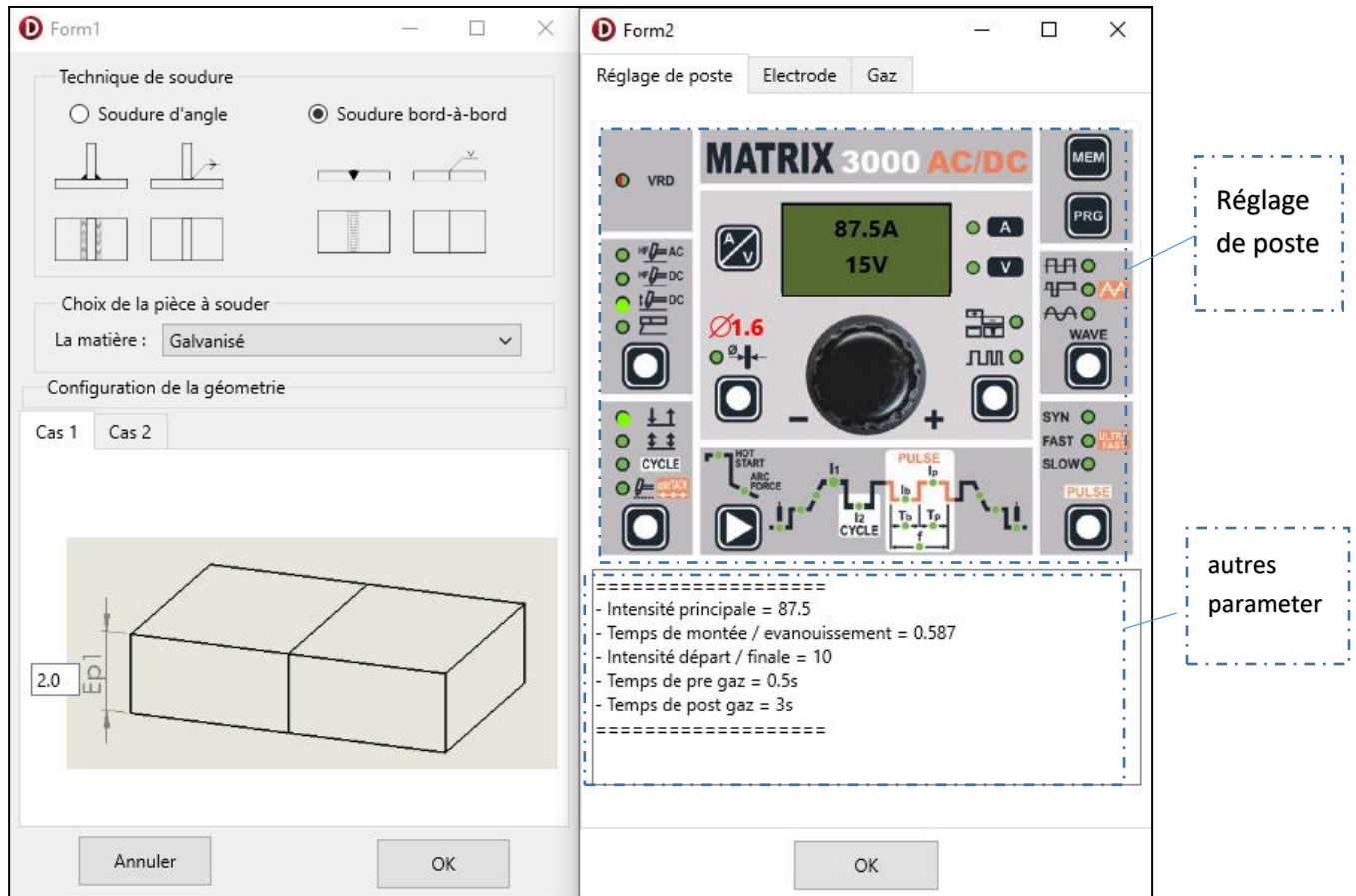


Figure III-26 : interface de réglage de post soudage bord à bord épaisseur Uniforme galvanisé.

Figure III-26 montre les paramètres qui doivent être réglés en cas de soudage bout à bout épaisseur uniforme de 2mm pour un métal galvanisé, premièrement montrez-nous la valeur de courant 87.5A et de la tension 15V en l'afficher. Et le procédé de TIG DC LIFT pour soudée plus l'option de 2T.

Le temps de montée (0.57s) et l'intensité de départ/final (10A) et le temps de pré gaz (0.5s) plus temps post post-gaz(3s). pour réglé les paramètres de soudage.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

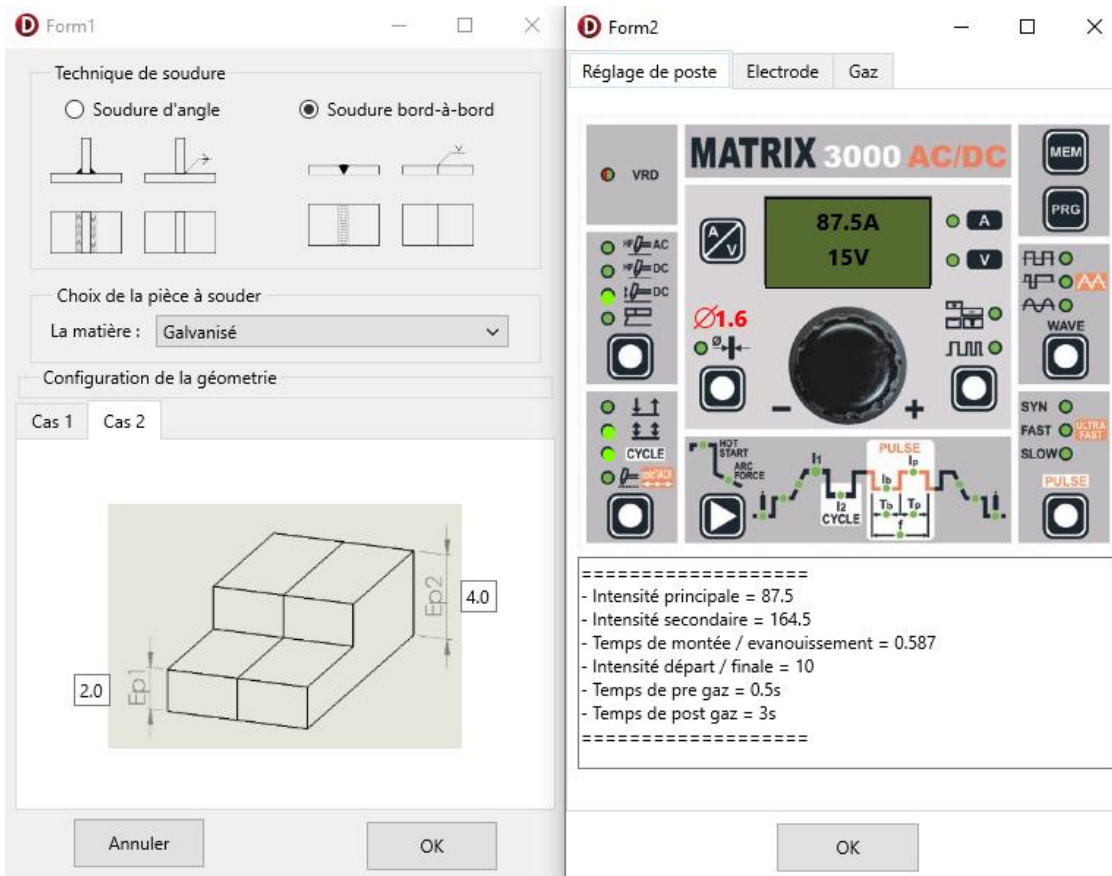


Figure III-27 : interface de réglage de post pour soudage bord à bord des géométries irrégulières galvanisé.

Figure III-27 montre les paramètres qui doivent être réglés en cas de soudage bout à bout géométries irrégulières de 2mm et 4mm pour une metal galvanise, premièrement montrez-nous la valeur de courant 87.5A et de la tension 15V en l'afficher. Et le procédé de TIG DC LIFT pour soudée plus l'option de 4T Cycle.

Le temps de montée (0.58s) et l'intensité de départ/final (10A) et le temps de pré gaz (0.5s) plus temps post post-gaz(3s). L'intensité pour 4mm réglée en option cycle (164.5A). Pour réglage les paramètre de soudage.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

- ✓ La deuxième configuration montre le choix de l'électrode dans les cas dans le dernier exemple. La fenêtre (figure III-28). Indique tous les choix de l'électrode sélectionnées peuvent être utilisées.

Form2

Réglage de poste Electrode Gaz

Nom	Couleur	Type	Actuel
WP	Vert	Pur	AC
WT	Jaune 1% ; Rouge 2% ; Violet 3%	Thorium	DC
WZ	Blanc 0,7 à 0,9% ; Marron 0,15 à 0,50%	Zirconium	AC
WL	Noir 0,8% ; à 1,2% ; Or 1,3% ; à 1,7% ; Bleu 1,8% ; à 2,2%	Lanthanium	AC / DC
WC	Gris 1,8% à 2,2%	Cérium	AC / DC /
WCL 1/1%	Rose	Cérium-Lanthane	DC

Aucun affûtage requis pour l'électrode vert.

Risque d'affûtage les électrodes en Thorium: Formation de poussières dangereuses. ThO2 est classé cancérigène par le CIRC.

OK

Le choix de l'électrode

Figure III-28 : interface de choix de l'électrode.

CHAPITRE III ANALYSE DE L'EFFET DE GEOMETRIQUE

- ✓ La troisième (figure III-29) configuration donne le choix de débit de gaz et le taille de buse.

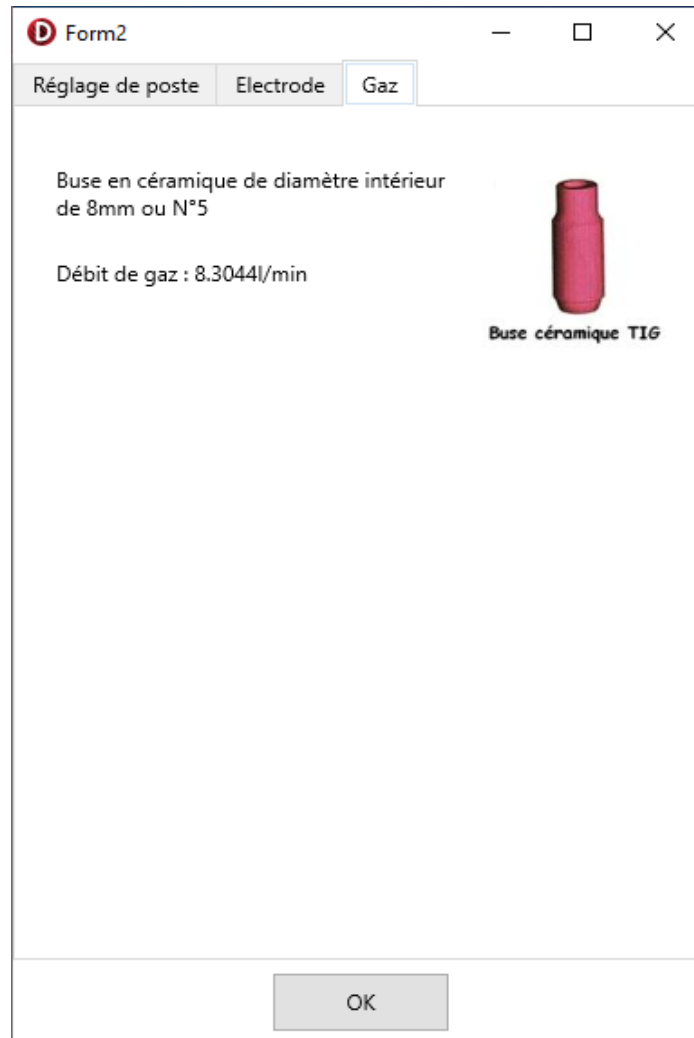


Figure III-29 : interface de choix de buse et le débit de gaz.

III.10. CONCLUSION

La simulation numérique est une représentation de phénomènes physiques complexes rendue possible grâce à une série de calculs et un modèle mathématique comportant des équations aux dérivés partiels. La méthode la plus répandue est la méthode des éléments finis. Moyen de simuler de manière virtuelle et ainsi de répondre à de multiples enjeux industriels tels qu'anticiper les écueils de conception, réduire les prototypes ou encore favoriser l'innovation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modelé de source de chaleur pour fait une modélisation numérique de couplage électrothermique pour détermine les paramètres de soudage surtout courant de soudage et le débit de gaz pour les plaques galvanisé montre l'effet de temps de refroidissement sur les contraintes résiduelles. Pour vérifier les résultats on a fait une expérience pratique en ALZIC Ghazaouet après ça nous avons utilisé les résultats pour créer une application de smartphone pour informatiser les équations obtenues dans ce travail.

IV. CONCLUSION GENERAL

Un soudeur doit maîtriser ces contrôles pour réaliser une soudure propre et précise. L'alimentation en fil d'apport n'est pas nécessaire, ce qui est un autre avantage du soudage TIG. Le soudage TIG peut fonctionner avec des sources AC et DC selon les matériaux. Le gaz de protection est utilisé pour éviter l'exposition de la soudure à l'oxygène ou à d'autres gaz et protéger le tungstène. Il est éjecté de la buse de la torche de soudage. Le gaz de protection est nécessaire pour le soudage TIG, et l'argon est largement utilisé car il fonctionne bien et peut être utilisé pour souder tous les métaux et toutes les épaisseurs. Cependant, il existe d'autres gaz que vous pouvez utiliser à la place de l'argon. Tous les procédés de soudage joignent des pièces métalliques par la chaleur ou la pression, mais chaque procédé de soudage présente des avantages spécifiques, tout comme le soudage TIG. Il est principalement utilisé pour les métaux minces ou les petits projets car il donne des résultats précis. Une fois maîtrisé ses paramètres, il peut être utilisé dans une variété de projets et donne plus de précision. Il peut être utilisé pour souder des métaux sous différents angles, même sur des joints verticaux. Il offre également une apparence élégante, ce qui le rend idéal pour la fabrication de meubles et la réparation de bijoux. De mauvais paramètres de soudure peuvent entraîner une soudure qui a une pénétration minimale, créant un joint faible dans le produit et des projections excessives, ce qui crée un travail de nettoyage supplémentaire et une perte de productivité. A condition que la vitesse de déplacement soit correcte, l'ampérage détermine le niveau de pénétration et la taille du cordon de soudure fini. L'ampérage est déterminé par l'épaisseur des pièces à souder. Régler l'ampérage en dessous du paramètre est susceptible de vous donner un cordon de soudure haut et étroit qui a peu de pénétration, ce qui vous donne un joint faible. La soudure sera difficile à démarrer et l'arc aura tendance à dériver d'un côté du joint au lieu de joindre les deux. Si l'ampérage est réglé trop haut, cela vous donnera un cordon large, plat et irrégulier, et il est très facile de se retrouver avec des éclaboussures excessives. Le contrôle des variables de vos paramètres de soudage peut faire une grande différence dans la qualité de vos soudures terminées et du produit fini. Ainsi, dans ce travail, nous avons résumé ce que nous avons fait dans ce qui suit : Avec les développements actuels, nous devons nous efforcer de développer le soudage comme un processus indispensable étant donné son importance dans notre vie quotidienne. En particulier pour le soudage TIG comme la meilleure qualité surtout dans certains métaux et plaques mince. Le soudage de tôles galvanisées peut être facile, mais il présente un danger pour la santé humaine, il est donc conseillé de prendre toutes les mesures de protection. La simulation numérique est maintenant l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour étudier les divers phénomènes qui se produisent dans le soudage. Le contrôle des variables de vos paramètres de soudage peut faire une grande différence dans la qualité de vos soudures terminées et du produit fini. Ainsi, dans ce travail, nous avons établi un moyen d'utiliser le procédé de soudage TIG dans le cas de tôles galvanisées pour déterminer la configuration optimale exacte pour avoir une bonne expérience de soudage.

REFERENCE DE BIBLIOGRAPHIES

- [4] : Coupard, J. and Michaux, P., 1974. *Le travail de la coiffure pour dames*.
- [17] st-georges Lyne . (January 2011). Étude numérique et expérimentale des mécanismes thermiques lors du soudage par friction malaxage University of Québec in Chicoutimi doi: 10.51257/a-v3-bm7764
- [19] A. Michel. Pièces mécaniques soudées (rappels et définitions). *Technique d'ingénieur*, (BM 5 185), 2006.
- [20] O'Brien, A., 2001. *Welding handbook*. Miami, Fla: American Welding Society
- [25] O'Brien, A., & Guzman, C. (2007). *Welding handbook*. Miami, FL: American Welding Society.
- [26] W Lucas, **Tig and Plasma Welding 1st Edition - October 31, 1990**
- [28] Cary, Howard B.; Helzer, Scott C. (2005). *Modern welding technology*. Upper Saddle River,
- [30] Catalogue MATRIX 3000 AC/DC : GÉNÉRATEUR ONDULEUR TRIPHASÉ TIG.
- [31] Miller - Welding Equipment - MIG/TIG/Stick Welders & Plasma Cutting. (2021).
- [40] Tewari, S.P., Gupta, A. and Prakash, J. (2010) Effect of Welding Parameters on the Weldability of Materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 512-516.
- [41] Abioye, T.E. (2017) The Effect of Heat Input on the Mechanical and Corrosion Properties of AISI 304 Electric Arc Weldments. *British Journal of Applied Science and Technology*, 20, 1-10. <http://www.sciencedomain.org>
- [42] Mr. A. D. Sarolkar, Dr. K. P. Kolhe, (2017) A review of (GTAW) Gas Tungsten Arc Welding and its Parameters for Joining Aluminum Alloy, Department of Mechanical Engineering, JSPM ICOER, Wagholi, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune, Maharashtra
- [43] Kumar, P., Kolhe, K., Morey, S., & Datta, C. (2011). Process Parameters Optimization of an Aluminium Alloy with Pulsed Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) Using Gas Mixtures. *Materials Sciences And Applications*, 02(04), 251-257. doi: 10.4236/msa.2011.24032
- [44] Arun, N., Cijo, M., Vinod, Y.B. and Joby, J. (2013) Influence of Gas Tungsten Arc Welding Parameters on Aluminum 5083 Alloy. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2, 113-118.
- [47] Procédé D'amorçage Par Contact (Lift Arc)™ Et Tig Hf - Miller HF 5000 CE Manuel De L'utilisateur [Page 27]. (2022). Retrieved 18 June 2022, from <https://www.manualslib.fr/manual/22642/Miller-Hf-5000-Ce.html?page=27>
- [57] **Edouard Fulchin, Spécialiste Simulation, 5 bonnes raisons d'utiliser Abaqus pour la simulation numérique**
- [58] Yannick Robert, Jean-François Mariage (2006), Modélisation numérique du procédé de soudage par laser YAG impulsif d'un alliage de titane, Dijon, France,P02.
- [59] FRANCE GALVA (2016) FICHE QUALITE GROUPE, REVETEMENT DE ZINC, NF EN ISO 1461, P02.
- [60] JOHN Goldak; a new finite element model for welding heat sources-1984.
- [61] SERIR KHALED (2014), Analyse et étude numérique des échanges thermiques en cours d'une opération de soudage TIG sous logiciel COMSOL Multiphysics, SYSTEMES ENERGETIQUES ET THERMIQUES AVANCEES, P13.

WEBSITE BIBLIOGRAPHY

- [1] A History of Welding Web Site [1987-2022].
<http://www.weldinghistory.org/>
- [2] Difference Between Homogeneous and Heterogeneous Welding
<http://www.difference.minaprem.com/joining/difference-between-homogeneous-and-heterogeneous-welding/>
- [3] What is Welding? - A Definitive Guide
<https://theweldinginstitute.com/What-is-Welding-A-Definitive-Guide>
- [5] Qu'est-ce que le brasage et le soudage à la flamme oxyacétylénique ? [2019]
<https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-brasage-et-le-soudage-la-flamme-oxyacetylenique-341/>
- [6] Oxyhydrogen Welding | Mario Di Maio SpA |[2022]
https://www.mariodimaio.com/en/prodotti/oxyhydrogen-welding_155.html
- [7] SystèmeD.fr. 2022. *MIG-MAG, MMA, TIG : choisir son système de soudure à l'arc.*
https://www.mariodimaio.com/en/prodotti/oxyhydrogen-welding_155.html
- [8] Connaissez-vous le procédé de soudage à l'arc submergé ? [21 septembre 2018].
<https://www.canambridges.com/fr/connaissez-vous-le-procedede-soudage-a-larc-submerge/>
- [9] Qu'est-ce que le soudage par faisceau d'électrons (procédé 51 selon ISO 2553) ? [2013]
<https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-soudage-par-faisceau-d-electrons-procedede-51-selon-iso-2553-355/>
- [10] Qu'est-ce que le procédé de soudage par faisceau laser (codifié 52) ? [21/04/2012].
<https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-procedede-soudage-par-faisceau-laser-codifie-52-354/>
- [11] Brasage à l'étain à la flamme : comment réussir une brasure Michel, Soudeur professionnel [2019].
<https://www.manomano.fr/conseil/brasage-a-l-etain-a-la-flamme-comment-reussir-une-brasure-7116>
- [12] Comment braser des tubes en cuivre de forte section ? [18 June 2018]
<https://www.systemed.fr/plomberie/brasure-tubes-cuivre-forte-section,9253.html>
- [13] Cours sur le soudo-brasage ! Procédé 971 ! PUBLIÉ LE 13 AOÛT 2017 PAR ROCDACIER
<https://www.rocdacier.com/cours-soudo-brasage-procedede-971/>
- [14] Le soudage par résistance par points - procédé 21[30/12/2018].
<https://www.soudeurs.com/site/le-soudage-par-resistance-par-points-procedede-21-273/>
- [15] Le soudage par résistance à la molette - procédé 22[27/01/2014].
<https://www.soudeurs.com/site/le-soudage-par-resistance-la-molette-procedede-22-275/>
- [16] Formation IWT (part 4b)
<https://www.soudeurs.com/telechargements/613-Formation%20IWT%20%28part%204b%29.pdf>
- [17] Soudage par explosion [22 SEPTEMBRE 2020]
<https://www.rocdacier.com/soudage-par-explosion/>

-
- [21] _____ Essai de traction — Wikipédia. (2017).
https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction
- [22] _____ Essai de résilience – Essai de résistance au choc [18 JUIN 2020].
<https://www.rocdacier.com/essai-resilience/>
- [23] _____ Essai de dureté – Brinell – Vickers -Rockwell ! [14 AOÛT 2017].
<https://www.rocdacier.com/de-durete-brinell-vickers-rockwell/>
- [24] _____ Cours sur l'essai de pliage selon EN 910 [14 AOÛT 2017].
<https://www.rocdacier.com/essai-de-plier-selon-910/>
- [27] _____ Le procédé de soudage TIG / GTAW / 141
<https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-tig-gtaw-141-210/>
- [29] _____ LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOUDAGE
<https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>
- [30] _____ MATRIX 3000 AC/DC : GÉNÉRATEUR ONDULEUR TRIPHASÉ TIG [méso jour au June 2021].
<https://www.ceaweld.com/fr/shop/produits/soudage-a-larc/tig-fr/tig-ac-dc-fr/matrix-3000-ac-dc-fr/>
- [32] _____ Comment choisir sa buse TIG [PUBLIÉ LE 28 AOÛT 2018].
<https://www.rocdacier.com/choisir-buse-tig/>
- [33] _____ TIG Tungsten Electrodes Explained (with Color Chart)[May 17, 2022].
<https://weldguru.com/tig-tungsten-electrode-guide/>
- [34] _____ Chaudronnerie industrielle. (2017). *Réglage du débit de gaz* [vidéo].
<https://www.youtube.com/watch?v=t-9vjAmJPY>
- [35] _____ Arc Welding, Battery Chargers & Body Repair | GYS. (2022).
https://www.gys.fr/cat-PB/Accessoires_soudage_et_coupage/fr
- [36] _____ Les EPI du soudeur (port obligatoire des équipements de protection individuelle)
<https://www.soudeurs.com/site/les-epi-du-soudeur-port-obligatoire-des-equipements-de-protection-individuelle-438/>
- [37] _____ SOUDAGE TIG TELWIN [2018].
<https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/tig-welding/>
- [38] _____ Définition d'un arc électrique et des différents types de courants de soudage utilisés [07/05/2019].
<https://www.soudeurs.com/site/definition-d-un-arc-electrique-et-des-differents-types-de-courants-de-soudage-utilises-528/>
- [39] _____ Soudure TIG, régler son poste à souder [6 SEPTEMBRE 2017].
<https://www.rocdacier.com/soudure-tig-regler-poste-a-souder/>
- [46] _____ Soudeurs 2.0. (2018). *[TIG] Amorcage HF vs Lift*
<https://www.youtube.com/watch?v=fYSojxuOef0>
- [48] _____ Comprendre le schéma du cycle de soudage sur un générateur TIG / GTAW [17/08/2013].
<https://www.soudeurs.com/site/comprendre-le-schema-du-cycle-de-soudage-sur-un-generateur-tig-gtaw-371/>

-
- [49] 2T vs. 4T in Welding - What Is It? Difference Explained [May 17, 2022].
<https://weldguru.com/2t-vs-4t/>
- [50] Jon Bowers, Selecting, prepping your tungsten electrode for DC welding [September 25, 2017].
<https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/tungsten-101>
- [51] Is TIG Welding Stainless Steel Dangerous? [March 13, 2022].
<https://gaslab.com/blogs/articles/is-tig-welding-dangerous>
- [52] 6 Common Dangers of TIG Welding - A Safety Guide - Welding Mastermind [24/10/2019].
<https://weldingmastermind.com/6-common-dangers-of-tig-welding-a-safety-guide/>
- [53] American galvanizers association. Welding Galvanized Steel. [04/08/2012].
<https://galvanizeit.org/design-and-fabrication/fabrication-considerations/welding/welding-galvanized-steel>
- [54] Welding Troop, Why Is Welding Galvanized Steel Dangerous?
<https://weldingtroop.com/why-is-welding-galvanized-steel-dangerous/>
- [55] AHMED M. ALY, Everything You Need Know About Welding Galvanized Steel [DECEMBER 31, 2021].
<https://workshopinsider.com/welding-galvanized-steel/>
- [56] Welding Galvanized Steel [September 21, 2017].
<https://www.metalsupermarkets.com/welding-galvanized-steel/>
- [62] Getting Started with Abaqus
<http://130.149.89.49:2080/v6.13/books/gsk/default.htm?startat=ch03s01.html>
- [63] catalogue MATRIX 3000 AC/DC: GÉNÉRATEUR ONDULEUR TRIPHASÉ TIG
<https://www.ceaweld.com/fr/shop/produits/soudage-a-larc/tig-fr/tig-ac-dc-fr/matrix-3000-ac-dc-fr/>