

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 : Assemblages Soudés & Matériaux

**Par : BENGRINE Anesse
DJELDJLI Youssouf Kamal**

Sujet

Etude paramétrique sur le soudage d'aluminium par procédé TIG
cas de poste MATRIX 3000

Soutenu publiquement, le / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

M/MANGOUCI Ahmed	MAA	Université de Tlemcen	Président
M/ACHOUI MED	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
M/SEBAA FETHI	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur
M/BELABED YOUSOUF	Dr	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Nous remercions « Allah » de nous avoir aidés à terminer ce modeste travail.

Au terme de cinq années d'études au sein du département de génie mécanique, achevées par la rédaction et la soutenance de ce mémoire de master en Génie Mécanique option « ASM », nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à son bon déroulement.

*Nous avons tant de reconnaissance à exprimer à l'égard de Monsieur **SEBAA Fethi** qui nous a proposé ce sujet et a suivi son élaboration avec grand soin. Grâce à ses vastes connaissances, ses précieux conseils et ses encouragements, ce travail a été mené à terme. Ce fut un honneur de travailler avec lui.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers notre Co-encadreur, Monsieur **BELABED Youssouf**, qui nous a apporté un soutien inestimable. Ses conseils ont été extrêmement bénéfiques pour mener à bien ce travail, et nous lui témoignons notre profond respect.*

*Nous souhaitons également remercier les membres du jury, particulièrement Monsieur **MANGOUCI Ahmed** et Monsieur **ACHOUI Mohamed**, qui nous ont fait l'honneur de présider le jury ainsi que l'examen du mémoire.*

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à l'ensemble des enseignants de notre département.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à notre famille, qui a été notre soutien constant tout au long de notre parcours universitaire. Votre amour inconditionnel, vos encouragements et votre soutien financier ont été essentiels pour que nous puissions mener à bien cette recherche.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à nos amis proches, qui nous ont soutenus et motivés tout au long de cette aventure académique. Vos encouragements, vos discussions stimulantes et votre présence ont rendu ce parcours encore plus enrichissant.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé à cette étude en tant que participants ou qui ont fourni leur expertise et leurs conseils. Votre contribution a été essentielle pour la réussite de cette recherche.

Ce mémoire est dédié à vous tous, pour votre soutien indéfectible et votre croyance en nos capacités. Vous avez été une source de motivation constante et nous vous sommes profondément reconnaissants.

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
List des abréviations et symboles	
Résumé	
Abstract	
ملخص	

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE.

I.1	Introduction	2
I.2	Généralités sur le soudage.....	2
I.2.1	Historique.....	2
I.2.2	Définition de soudage	2
I.3	Types de soudures	3
I.4	Zones métallurgiques d'une soudure.....	3
I.5	Avantages de soudage	4
I.6	Déférent type de procédé de soudage.....	5
I.7	Soudage par pression.....	6
I.7.1	Soudage par friction	6
I.7.2	Soudage par ultrason.....	7
I.8	Soudage par résistance	7
I.8.1	Soudage par point	7
I.8.2	Soudage par bossage	8
I.8.3	Soudage à la molette	8
I.9	Soudage par fusion	9
I.9.1	Soudage au gaz chalumeaux	9
I.9.2	Soudage par fiscaux à haut densité d'énergie	10
I.9.2.1	Soudage au laser	10
I.9.2.2	Soudage par faisceau d'électrons	10
I.9.3	Soudage à l'arc.....	11

I.9.3.1	Soudage à l'arc submergé.....	11
I.9.3.2	Soudage par électrode enrobée	12
I.9.3.3	Soudage par plasma	13
I.9.3.4	Soudage MIG-MAG	14
I.9.3.5	Soudage TIG.....	15
I.10	Préparation des bords du joint soudée.....	30
I.11	Conclusion.....	31

Chapitre II : ETUDE EXPERIMENTALE.

II.1	Introduction.....	32
II.2	Préparation de l'étude.....	32
II.2.1	Les alliages d'aluminium.....	32
II.2.2	Géométrie et préparation des éprouvettes.....	32
II.3	Choix de paramètre de soudage TIG et préparation de poste.....	37
II.3.1	La configuration de poste.....	38
II.4	Contrôle de soudage.....	44
II.4.1	Dimension de l'éprouvette.....	45
II.5	Conclusion.....	63

CHAPITRE III : ANALYSE DES EFFETS DE L'INTENSITE DE SOUDAGE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR

III.1	Introduction	64
III.2	Présentation de logiciel de simulation simufact-welding	64
III.3	Les avantages.....	65
III.4	Aspects de la simulation de soudage.....	65
III.5	Model analytique.....	66
III.6	Propriétés chimiques et mécanique et thermique et électrique de métal de base...	67
III.7	Les caractéristiques de métal d'apport.....	69
III.8	Condition au limite et initial.....	69
III.9	Maillage.....	70
III.10	Préparation de la simulation numérique.....	71
III.11	Résultats et interprétations.....	71
III.11.1	Interprétations.....	78

III.11.2	Validation des résultats de l'étude expérimentale.....	79
III.11.3	Optimisation	80
III.12	Configuration de générateur (MATRIX 3000 AC/DC).....	81
III.13	L'application numérique	89
III.13.1	Les interfaces de l'application.....	89
III.13.2	L'Interface des entres (inputs).....	90
III.13.3	L'interface de réglage de poste (MATRIX 3000 AC/DC).....	91
III.13.4	Interface d'électrodes utilisée.....	92
III.13.5	Interface de réglage de Gaz.....	93
III.14	Conclusion.....	94
	Conclusion générale.....	95
	Référence bibliographique	96

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Soudure homogène	2
Figure I-2 : Soudure hétérogène	2
Figure I-3 : Cordon de soudure	3
Figure I-4 : Classification des procédés de soudage	4
Figure I-5 : Soudage par friction	5
Figure I-6 : Soudage par ultrason	6
Figure I-7 : Soudage par résistance par point	6
Figure I-8 : Soudage par bossage	7
Figure I-9 : Soudage à la molette	7
Figure I-10 : Soudage par fusion	8
Figure I-11 : Soudage au gaz chalumeaux	8
Figure I-12 : Soudage laser	9
Figure I-13 : Soudage par faisceau d'électrons	10
Figure I-14 : Schéma de soudage à l'arc électrique	10
Figure I-15 : Soudage à l'arc submergé	11
Figure I-16 : Soudage par électrode enrobée	12
Figure I-17 : Soudage plasma	12
Figure I-18 : Soudage MIG MAG	13
Figure I-19 : Schéma de transfert du métal	13
Figure I-20 : Schéma de procédé TIG	14
Figure I-21 : Poste à souder TIG (Matrix 3000)	16
Figure I-22 : Torche de soudage TIG	16
Figure I-23 : Tungstène électrodes	17
Figure I-24 : La forme de tungstène électrodes	17
Figure I-25 : Alimentation de gaz	18
Figure I-26 : Buse céramique de torche TIG	19
Figure I-27 : Métal d'apport	19
Figure I-28 : Les Équipement de sécurité TIG	20
Figure I-29 : Polarité négative (- à l'électrode)	22
Figure I-30 : Polarité positive (+ à l'électrode)	22
Figure I-31 : Courant continu pulsé	23
Figure I-32 : Courant alternatif	24
Figure I-33 : Amorçage LIFT et HF	25
Figure I-34 : Cycle de soudage (courant lisse)	26
Figure I-35 : Le cycle de soudage TIG courant pulsé	27
Figure I-36 : 2T en soudage TIG	28
Figure I-37 : 4T en soudage	29

Chapitre II

Figure II-1 Pièce prismatique en aluminium	33
Figure II-2 Métal de base	37
Figure II-3 Electrode et la buse	37
Figure II-4 Bouteille de gaz l'argon	38
Figure II-5 Poste de soudage TIG (MATRIX 3000)	38
Figure II-6 L'effet de paquet de gaz à l'intérieure de cordon	39
Figure II-7 L'effet de manque de gaz	40
Figure II-8 L'effet du la L'alumine	40
Figure II-9 Eprouvettes soudées	44
Figure II-10 Microscope optique	44
Figure II-11 Machine de traction 600KN	45
Figure II-12 Dimension de l'éprouvette	45

Chapitre III

Figure III-1 Gamme de produits Simufact Welding	64
Figure III-2 Aspects de la simulation de soudage	65
Figure III-3 Distribution en puissance de la source de chaleur en fonction Goldak	67
Figure III-4 Condition au limite et initial	69
Figure III-5 Les modèles des maillages 3D de l'assemblage	70
Figure III-6 L'intensité optimale en fonction d'épaisseur pour validation	79
Figure III-7 L'intensité optimale en fonction d'épaisseur pour optimisation des résultats	80
Figure III-8 Tableau de commande	81
Figure III-9 Présentation de l'interface l'application	89
Figure III-10 L'Interface des entres (inputs)	90
Figure III-11 L'interface de réglage de poste pour soudage bout à bout	92
Figure III-12 Interface d'électrodes utilisée	93
Figure III-13 Interface de réglage de Gaz	94

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II-1 Gamme d'usinage 1 _____	33
Tableau II-2 DMOS (WPS) _____	41
Tableau II-3 Gamme d'usinage 2 _____	42
Tableau II-4 Les différents essais de soudage TIG pour les éprouvettes en Al _____	47

Chapitre III

Tableau III-1 Fiche technique de Aluminium AlMgSi 0,5 _____	68
Tableau III-2 Analyse chimique type de métal d'apport _____	69
Tableau III-3 Propriétés mécaniques type de métal d'apport _____	69
Tableau III-4 Validation des résultats et optimisation _____	71

List des abréviations et symboles

GTAW : Gas - tungsten arc welding

TIG : Tungstène Inerte Gaz

M.I.G : Métal Inert gaz

M.A.G : Métal active gaz

ZAT : Zone Affectée Thermiquement

ZF : Zone fondu

ISO : International organization standardization

C.N.D : Le Contrôle Non Destructif

CC : Courant continu

AC : Courant alternative

DC : direct current

2T : two-touch

4T : four-touch

HF : haut fréquence (Hz).

Ø : Diamètre (mm)

U₀ : La tension à vide de générateur (V)

I : Intensité de soudage en Ampères (A)

e : Diamètre de l'électrode (mm)

U : Tension de soudage en Voltes (V)

E : L'énergie de soudage (J / mm)

V : Vitesse d'avance de l'arc électrique (mm / s)

Résumé

Le soudage TIG est une technique de soudage utilisant une électrode de tungstène non consommable et un gaz inerte pour protéger l'arc de soudage.

Ce travail a pour but l'étude paramétrique de soudage sur l'aluminium par procédé TIG et le rendement du poste MATRIX 3000.

Pour atteindre cet objectif, deux parties ont été nécessaires. La première partie présente les procédés de soudage, et plus particulièrement le procédé TIG.

La seconde partie traite une étude expérimentale, elle consiste à faire varier l'intensité de soudage en fonction des épaisseurs des éprouvettes de (3 à 15) mm.

La validation de ces résultats est assurée par l'utilisation du module d'analyse de soudage simufact welding 6.0.

Mots-clés : procédés de soudage, TIG, aluminium, simulation de soudage

Abstract

GTAW is a welding technique that uses a non-consumable tungsten electrode and an inert gas to protect the welding arc.

This work aims to study the welding parameters for aluminum using the GTAW process and the efficiency of the MATRIX 3000 welding station.

To achieve this objective, two parts were necessary. The first part presents the welding processes, particularly the GTAW process.

The second part discusses an experimental study, which involves varying the welding current according to the thickness of the test specimens (from 3 to 15mm).

The validation of these results is ensured by the use of the simufact welding 6.0 welding analysis module.

Keywords : welding processes, GTAW, aluminum, welding simulation.

ملخص

اللحام بواسطة القوس الكهربائي المغمور بالغاز الخامل (TIG) هو تقنية لحام تستخدم قطبًا غير قابل للاستهلاك مصنوع من التنجستن.

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة اعدادية المعلمات المتغيرة للحام الألومنيوم باستخدام تقنية TIG ومردودية اللحام بجهاز التلحيم MATRIX 3000 .

لتحقيق هذا الهدف، تم تقسيم العمل إلى جزئين. يقدم الجزء الأول تعاريف لعمليات اللحام، وبخاصة عملية TIG.

يتناول الجزء الثاني دراسة تجريبية، حيث يتم تغيير تيار اللحام وفقًا لسماكة القطع الاختبارية (من 3 إلى 15 مم)

تتم ضمان صحة هذه النتائج عن طريق استخدام وحدة تحليل اللحام simufact welding 6.0.

الكلمات الرئيسية: عمليات اللحام، TIG، الألومنيوم، محاكاة اللحام.

Introduction générale

Le soudage d'aluminium par procédé TIG est particulièrement important, car l'aluminium est un matériau très couramment utilisé dans l'industrie, notamment dans l'aérospatiale et l'automobile. En effet, l'aluminium est un métal léger et résistant. Cependant, il est également sensible à l'oxydation, rendant son soudage plus difficile.

Ce travail consiste à élaborer une étude paramétrique sur le soudage d'aluminium par procédé TIG avec le poste soudage MATRIX 3000.

Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre résume les généralités sur les procédés de soudage et plus particulièrement le procédé TIG.

Le deuxième chapitre traite l'étude expérimentale de soudage d'aluminium par procédé TIG.

Le troisième chapitre aborde la simulation de soudage par procédé TIG par la variation de l'intensité de soudage en fonction des épaisseurs par l'utilisation du module d'analyse de soudage *simufact welding 6.0*.

Ce travail se termine par une conclusion générale suivie d'une perspective.

II.5 Conclusion

L'étude expérimentale est axée sur la réalisation des joints de soudage par le procédé TIG sur des éprouvettes en aluminium. Le contrôle destructif est assuré par un microscope optique pour examiner les soudures. Des essais de traction permettent la mise en relief du comportement de la ZAT des joints soudés. L'étude paramétrique explore l'influence des différents paramètres de soudage sur les résultats en variant l'intensité $I(A)$ en fonction des épaisseurs de (3 à 15 mm) des éprouvettes.

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la description des différents procédés de soudage, avec présentation détaillée du procédé de soudage TIG.

I.2 Généralités sur le soudage

I.2.1 Historique

Le soudage est l'une des étapes les plus critiques de la fabrication moderne des métaux. C'est un fait connu. Cependant, la plupart des gens ne savent pas d'où vient le soudage, quelle était sa forme initiale et comment il a évolué au fil des ans.

Bien que la forme moderne de soudage qui implique les outils de soudage que nous voyons aujourd'hui a été inventé dans les années 1800 pendant la révolution industrielle, le premier type de soudage remonte à des milliers d'années. La soudure existait sous une forme quelconque à l'âge du bronze et à l'âge du fer. Les archéologues ont trouvé de petites boîtes d'or avec des joints soudés sous pression il y a plus de deux millénaires. De plus, il y a des preuves que les anciens Egyptiens savaient souder le fer ensemble.

À partir de ces résultats, il devrait être clair que la soudure n'est pas une pratique nouvelle ; elle existe plutôt depuis l'âge du fer et peut-être même avant. Cependant, le soudage effectué à cette époque était extrêmement élémentaire, c'est le moins qu'on puisse dire ; il ne s'agissait que de marteler deux morceaux de métal sous chaleur.

La forme de soudage qui est largement pratiquée aujourd'hui, mais avec des équipements et des techniques plus modernes, a été découvert au 19^{ème} siècle. Cependant, les autres périodes de soudure ont joué un rôle important dans cette découverte. Par conséquent, nous les avons inclus dans ce guide sur l'histoire du soudage [1].

I.2.2 Définition de soudage

Le soudage est un procédé de fabrication par lequel deux ou plusieurs pièces sont fusionnées au moyen de la chaleur, de la pression ou les deux formant une jointure lorsque les pièces refroidissent. Le soudage est habituellement utilisé sur les métaux et les thermoplastiques, mais peut aussi être utilisé sur le bois. Le joint soudé terminé peut être appelé soudage.

Certains matériaux nécessitent l'utilisation de procédés et de techniques spécifiques. Un certain nombre d'entre eux sont considérés comme « indéfendables », un terme qui n'est généralement pas trouvé dans les dictionnaires, mais qui est utile et descriptif en ingénierie.

Les pièces qui sont jointes sont connues comme matériel parent. Le matériel ajouté pour aider à former la jointure est appelé filler ou consommable. La forme de ces matériaux peut les voir comme plaque de base ou tuyau, fil de remplissage, électrode consommable (pour le soudage à l'arc), etc.

Les consommables sont généralement choisis pour être de composition similaire au matériau d'origine, formant ainsi une soudure homogène, mais il y a des occasions, par exemple lors de la soudure de fontes cassantes, où un remplisseur d'une composition très différente et, par conséquent, propriétés est utilisé. Ces soudures sont dites hétérogènes.

Le joint soudé terminé peut être appelé soudure [2].

I.3 Types de soudures

Les figures 1 et 2 illustrent pour les métaux deux types de soudures :

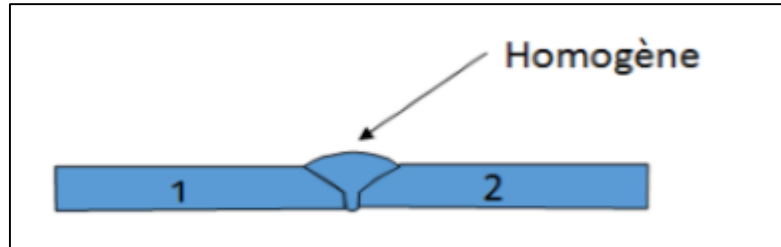


Figure I-1 : Soudure homogène [27]

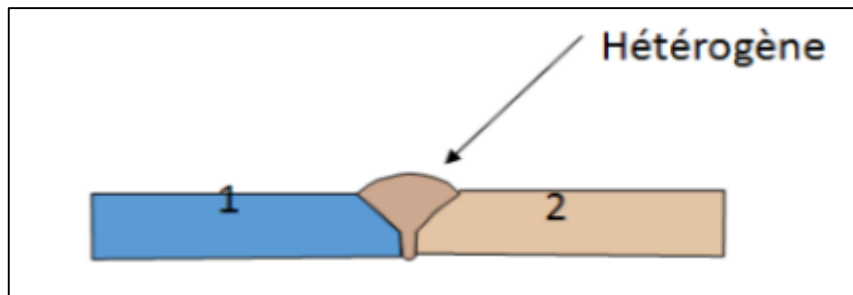


Figure I-2 : Soudure hétérogène [27]

- **La soudure homogène** : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- **La soudure hétérogène de type A** : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- **La soudure hétérogène de type B** : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes.

Selon les caractéristiques des matériaux à souder, l'énergie du soudage sera différente. Ce guide pratique se propose de passer en revue les principaux procédés de soudage ainsi que le matériel requis et les équipements individuels de protections propres aux soudeurs [3].

I.4 Zones métallurgiques d'une soudure

Un procédé de soudage peut être assimilé à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique engendré par le soudage. Une fois réalisée, la soudure par fusion se décompose en plusieurs zones [4].

- Zone Fondue (ZF)

Zone où l'état liquide est prépondérant où la structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On distingue des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner les variations de dureté.

- **Zone Affectée Thermiquement (ZAT)**

Zone adjacente à la zone fondue sur une largeur plus ou moins étendue et qui a été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

- **Zone de Liaison (ZL)**

Zone située entre la ZF et la ZAT, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

- **Métal de Base (MB)**

Au-delà de la ZAT, l'élévation de la température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale.

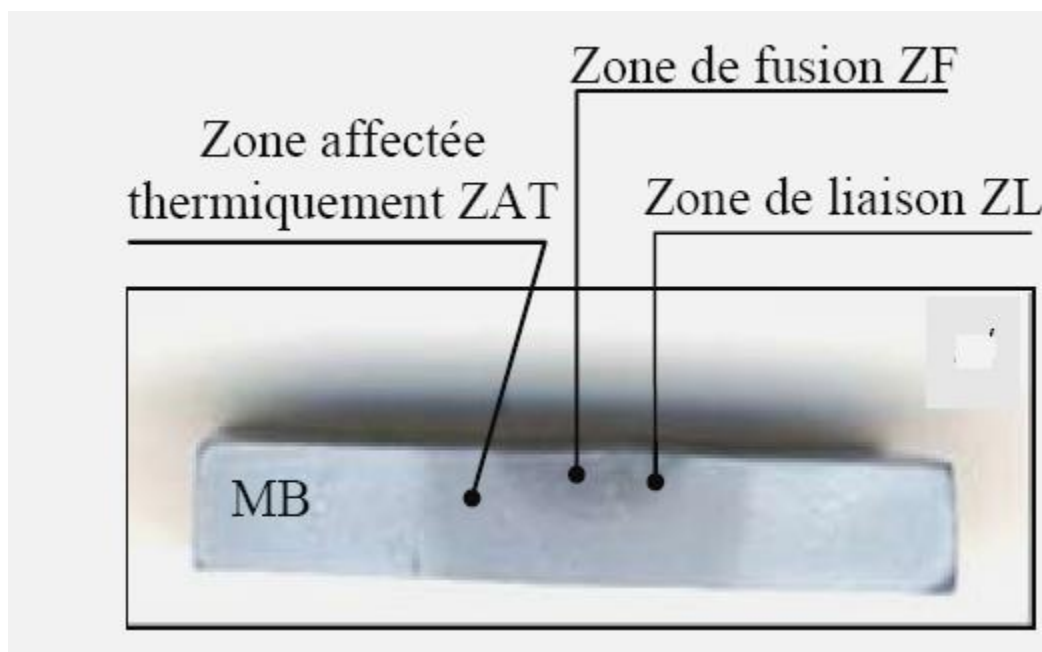


Figure I-3 : Cordon de soudure [4]

I.5 Avantages de soudage

- Le soudage établit des liaisons de joint solides, durables et permanentes.
- C'est un processus simple qui se traduit par une grande finition.
- La technique, lorsqu'elle est utilisée avec le matériau de remplissage, produit une soudure plus forte que le matériau de base.
- Il peut être effectué en tout lieu C'est un processus économique et abordable
- Il est utilisé dans divers secteurs comme la construction, l'automobile et bien d'autres industries [5].

I.6 Différent type de procédé de soudage

Le domaine du soudage est vaste. Pour répondre au besoin d'assembler plusieurs matériaux de différentes manières, un grand nombre de techniques de soudage sont disponibles, chacune d'entre elles ayant ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients par rapport aux autres. Aujourd'hui, plus de 100 procédés de soudage différents sont traditionnellement utilisés. C'est un peu difficile de les assembler. Toute classification concise comportera des lacunes susceptibles d'exclure certains processus d'un groupe particulier. Cela a ouvert 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 :

La nature de l'énergie nécessaire pour réaliser les joints soudée [38].

- Les paramètres physiques
- L'origine de la formation de la continuité métallique (phase liquide ou phase solide)
- La performance de procédé
- Le type de protection du bain de fusion

D'une façon général on classe les procédés de soudage sous trois catégories **figure (1-4)** :

- Soudage par pression
- Soudage par résistance
- Soudage par fusion

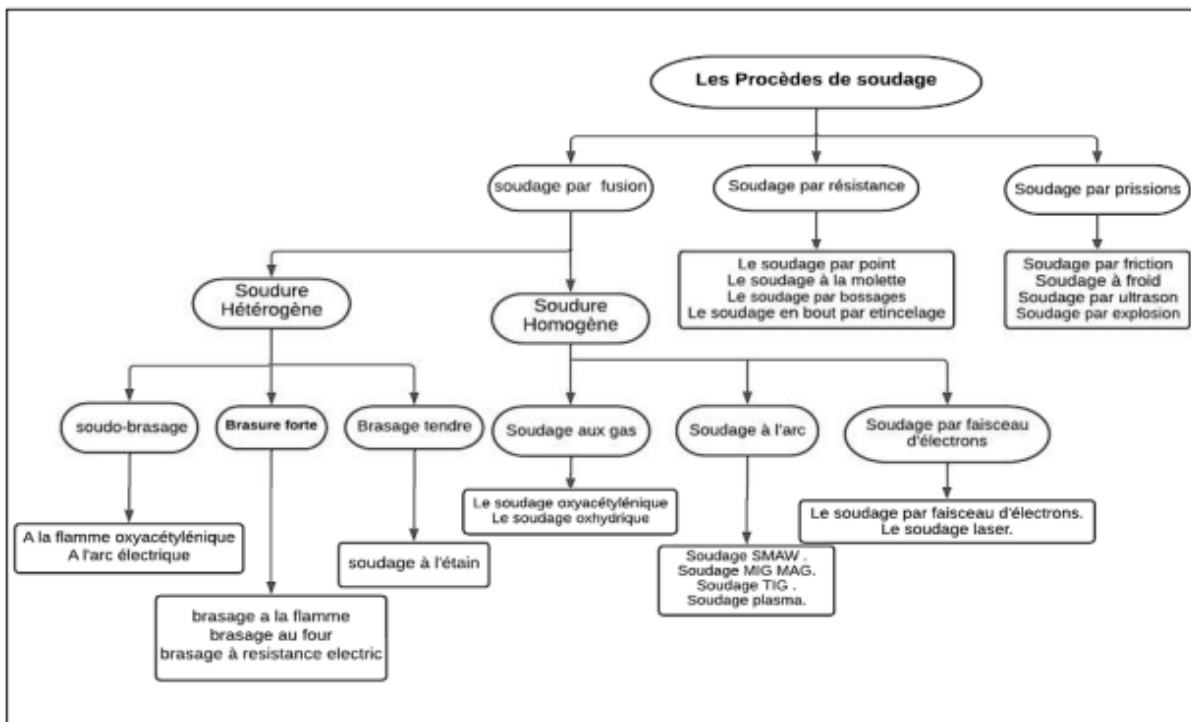


Figure I-4 : Classification des procédés de soudage [38]

I.7 Soudage par pression

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure [6].

- Soudage par friction
- Soudage par ultrason
- Soudage à froid
- Soudage par explosion
- Soudage par friction malaxage (FSW)

I.7.1 Soudage par friction

Soudage par friction est une forme de soudage à l'état solide où la chaleur est obtenue à partir du mouvement de glissement induit mécaniquement entre les pièces à souder. Dans le soudage à l'état solide, le joint est produit par l'application d'une pression sans faire fondre de manière significative aucune des pièces de travail. Parce qu'aucune fusion ne se produit, le soudage par friction n'est pas un procédé de soudage par fusion au sens traditionnel. Les pièces soudées sont maintenues ensemble sous pression. Généralement, la chaleur de friction est générée en faisant tourner une pièce contre l'autre. Lorsqu'une certaine température est atteinte, le mouvement de rotation est saisi et la pression appliquée soude les pièces ensemble. Le processus de liaison est basé soit sur la déformation, soit sur la diffusion et la déformation limitée, de sorte que le mouvement atomique (diffusion) crée de nouvelles liaisons entre les atomes de deux surfaces [7].

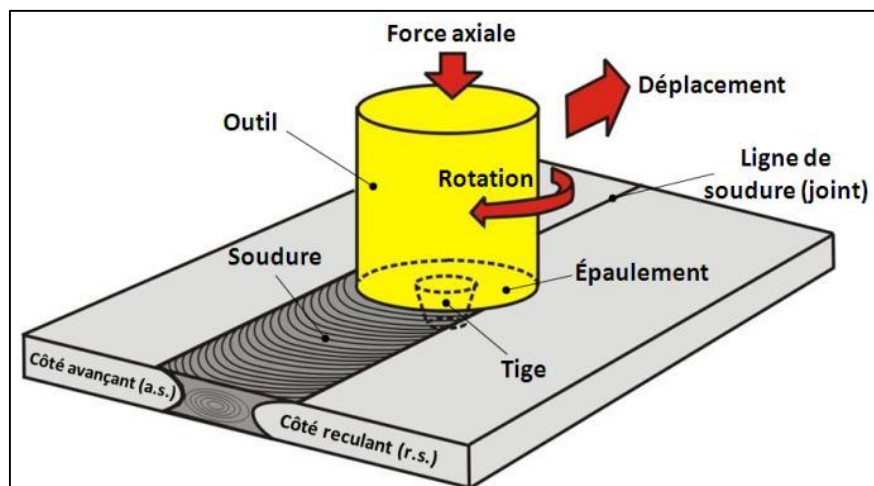


Figure I-5 : Soudage par friction [7]

I.7.2 Soudage par ultrason

Le soudage par ultrasons est un procédé de soudage utilisant une énergie vibratoire à haute fréquence. Il s'agit d'un procédé de soudage solide-state, ce qui signifie donc que les matériaux à souder ne subissent pas de fusion, mais sont amenés à un état plastique pour les assembler. Le procédé a été mis au point dans les années 60 et est surtout utilisé pour les plastiques. Mais il y a aussi des applications très intéressantes pour les métaux [8].

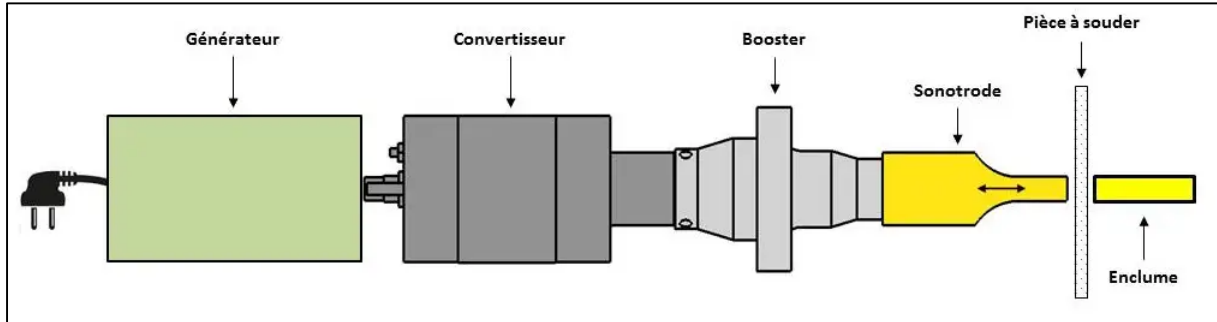


Figure I-6 : Soudage par ultrason [8]

I.8 Soudage par résistance

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 [9].

I.8.1 Soudage par point

La soudure par résistance est un moyen d'assemblage permanent destiné à créer une continuité de la nature des métaux assemblés.

Le soudage par résistance autorise l'assemblage permanent par fusion des bords des pièces à réunir et évite le recours au métal d'apport et aux pièces et produits d'union comme les rivets, les agrafes, la boulonnerie [10].

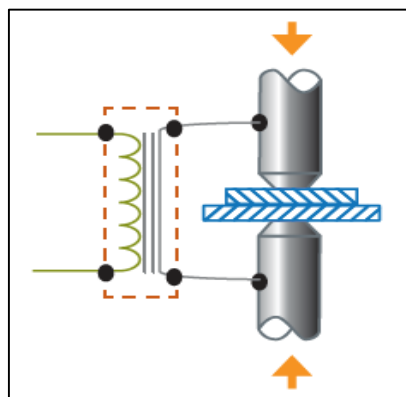


Figure I-7 : Soudage par résistance par point [10]

I.8.2 Soudage par bossage

Des bossages sont d'abord déterminés sur une des pièces à souder. Ils permettront de « canaliser » le courant électrique, qui passera uniquement à l'endroit où se situent les bossages. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser [11].

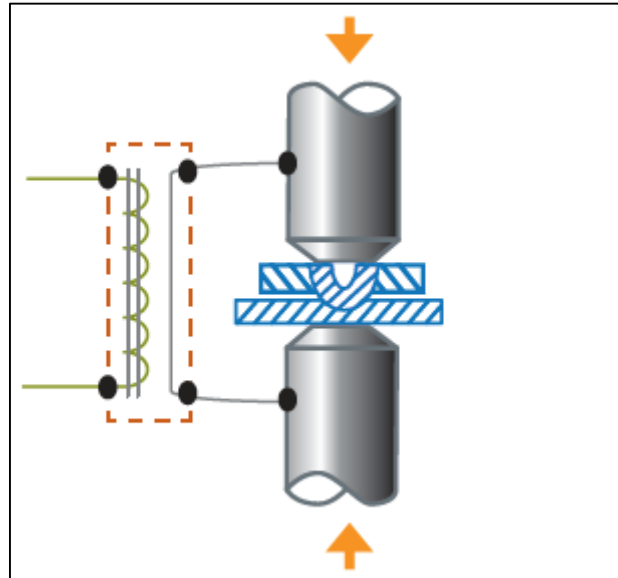


Figure I-8 : Soudage par bossage [11]

I.8.3 Soudage à la molette

Les électrodes sont remplacées par 2 galets mobiles qui font déplacer les pièces pendant le soudage (généralement de 2 à 4 m/minutes mais parfois jusque 50m/min), tout en dégageant une impulsion de courant. La pression de serrage n'est jamais relâchée pendant le processus de soudage [11].

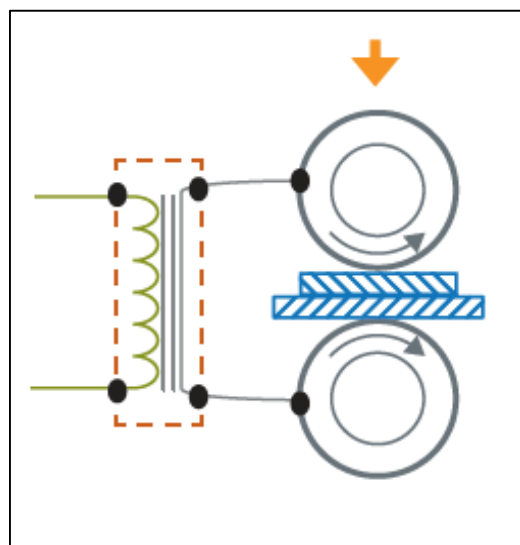


Figure I-9 : Soudage à la molette [11]

I.9 Soudage par fusion

C'est une opération consistant à assembler des pièces métalliques au moyen d'un métal d'apport liquide ou ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces à assembler, en mouillant le métal de base (pas de fusion des métaux de base) [12].

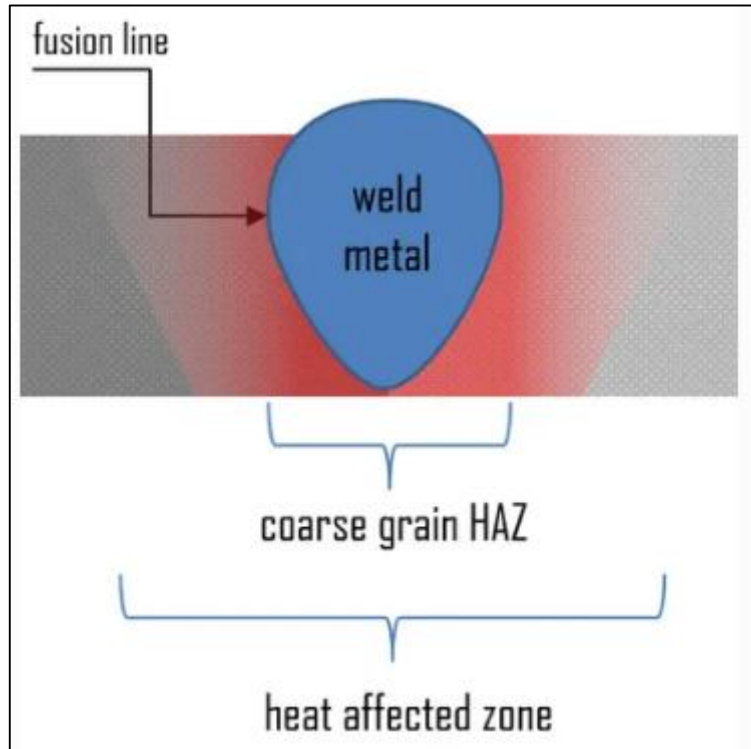


Figure I-10 : Soudage par fusion [12]

I.9.1 Soudage au gaz chalumeaux

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudage à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née du mélange et de la combustion d'un gaz combustible d'acétylène avec un gaz comburant d'oxygène. La température de la flamme peut atteindre les 3200° Celsius lorsque le mélange d'acétylène et d'oxygène est correctement équilibré dans le chalumeau.

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. 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 [13].

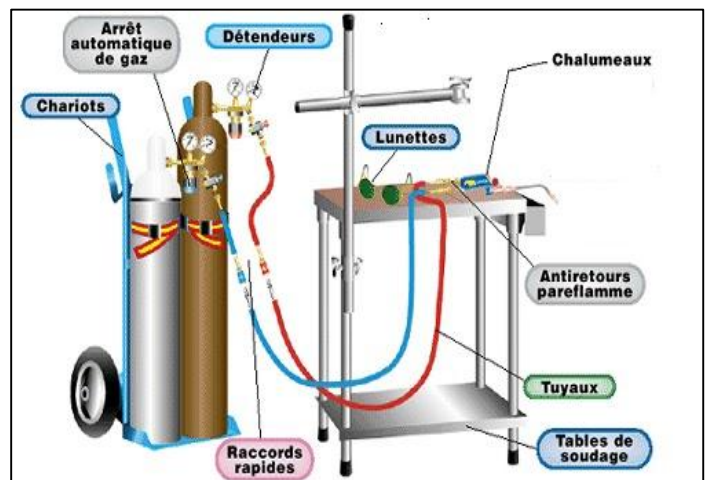


Figure I-11 : Soudage au gaz chalumeaux [13]

I.9.2 Soudage par faisceaux à haut densité d'énergie

I.9.2.1 Soudage au laser

Le soudage laser est une technique de soudage qui permet d'assembler plusieurs pièces de métal à l'aide d'un laser. Le faisceau est une source de chaleur extrêmement concentrée qui permet des soudages étroits, profonds, à une cadence rapide. Cette technique est souvent utilisée dans le cas de gros volumes de production comme l'industrie automobile [14].

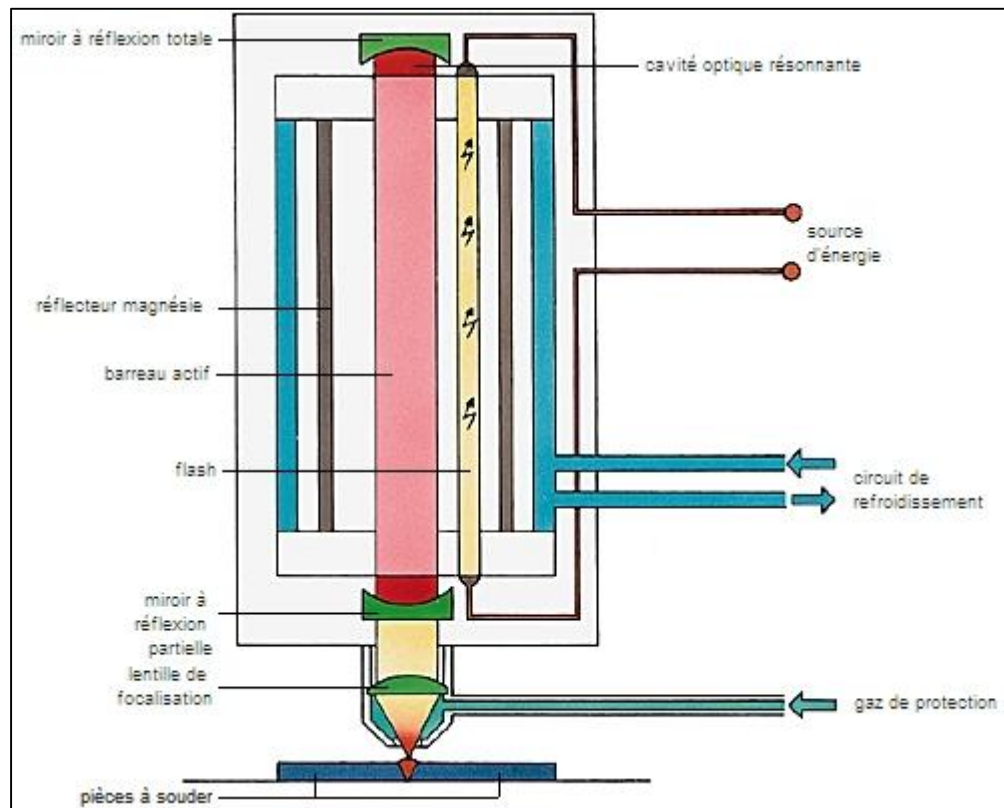


Figure I-12 : Soudage laser [14]

I.9.2.2 Soudage par faisceau d'électrons

Le soudage par faisceau d'électrons (Electron beam welding) est un procédé de soudage au cours duquel la chaleur est produite par l'impact d'électrons, transmis et accélérés par un canon à électrons. Les applications vont de la soudure des feuilles fines, jusqu'à l'assemblage des pièces avec une épaisseur de plus de 100 mm en un seul cycle. Ainsi, il est possible de souder la quasi-totalité du spectre des métaux et diverses combinaisons de matériaux [15].

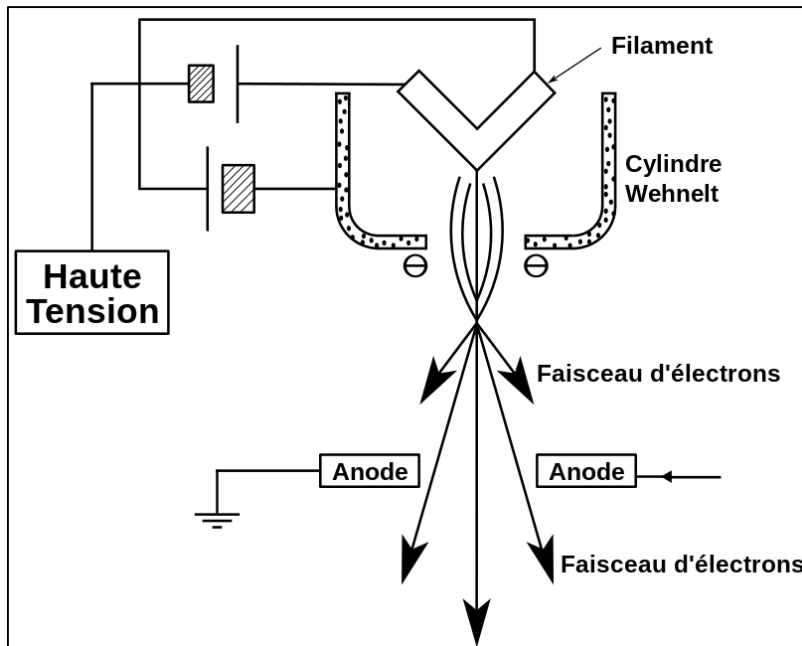


Figure I-13 : Soudage par faisceau d'électrons [15]

I.9.3 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.

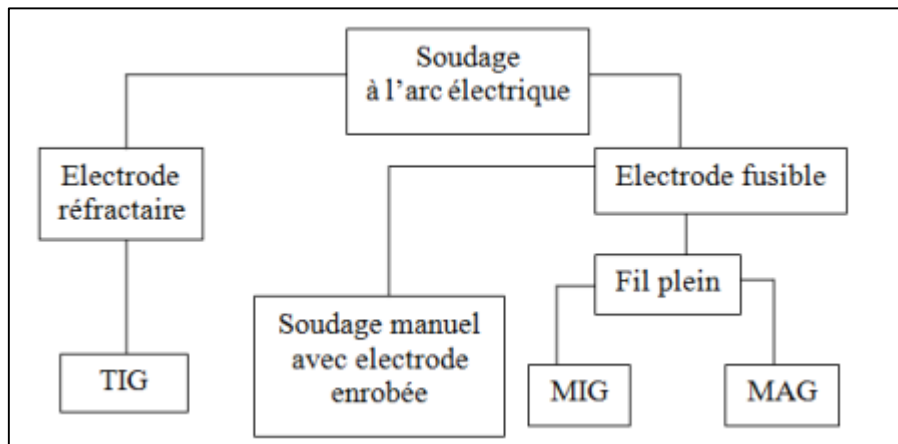


Figure I-14 : Schéma de soudage à l'arc électrique

I.9.3.1 Soudage à l'arc submergé

Le soudage à l'arc submergé (SAW) est un procédé de soudage utilisé pour fusionner des pièces métalliques en produisant un arc électrique entre un fil électrode à dévidage continu et un métal de base.

L'arc électrique se produit sous une couche de flux granulaire qui est déposée sur le joint à souder. Le flux a pour fonction de protéger le bain de fusion contre l'atmosphère ambiante oxydante. Il élimine également les projections de soudage et l'émission de rayonnement ultraviolet. L'arc submergé est généralement utilisé pour la fabrication de pièces massives.

Il s'agit d'un procédé de soudage fiable et robuste, qui permet de réaliser des soudures de très bonne qualité avec un niveau de productivité élevé [16].

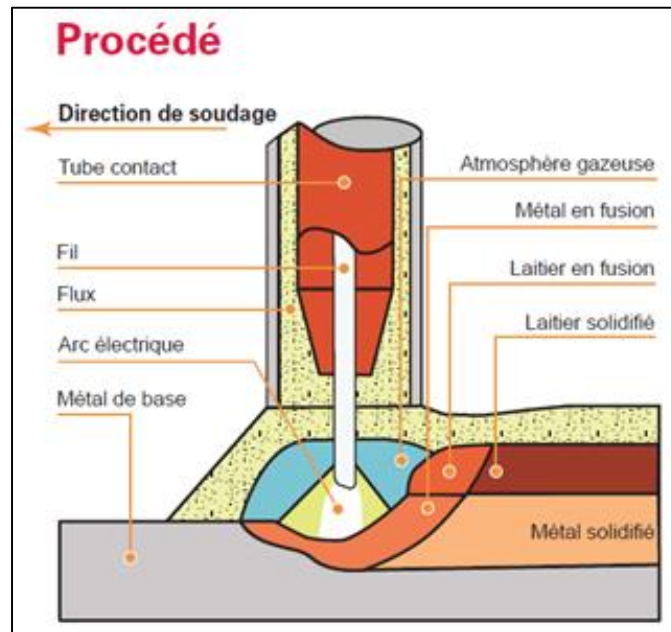


Figure I-15 : Soudage à l'arc submergé [16]

I.9.3.2 Soudage par électrode enrobée

Le soudage à l'électrode enrobée (ou MMA) consiste à créer un arc électrique qui passe entre l'élément à souder et l'électrode afin de chauffer intensément puis faire fondre les bords des pièces à souder.

En fondant, l'âme métallique de l'électrode fait office de métal d'apport, alors que l'enrobage formera le laitier, qui protégera le bain de fusion contre l'oxygène de l'air ambiant. Il suffit de l'enlever par piquage quand la soudure s'est refroidie.

L'enrobage de l'électrode peut être :

Rutile : composé principalement d'oxyde de titane,

Basique : carbonates de calcium, alliages et spath fluor,

Acides : oxydes de fer, manganèse et désoxydants,

Oxydant : Oxydes de fer, silices et silicates,

Cellulosique : matières organiques et cellulose.

Selon le type d'électrode choisie, le courant sera soit alternatif soit continu. Par exemple, les électrodes basiques nécessitent une source de courant continue.

Le poste de soudage à l'arc est relié à la pièce à souder par un câble, et un autre câble le relie au porte-électrode sur lequel se fixe l'électrode qui créera l'arc électrique. Les postes à souder à l'électrode sont souvent appelés poste à souder à l'arc. Pourtant les postes à souder TIG, MIG ou MAG, sont aussi des postes à souder à l'arc, même si le procédé est différent [17].

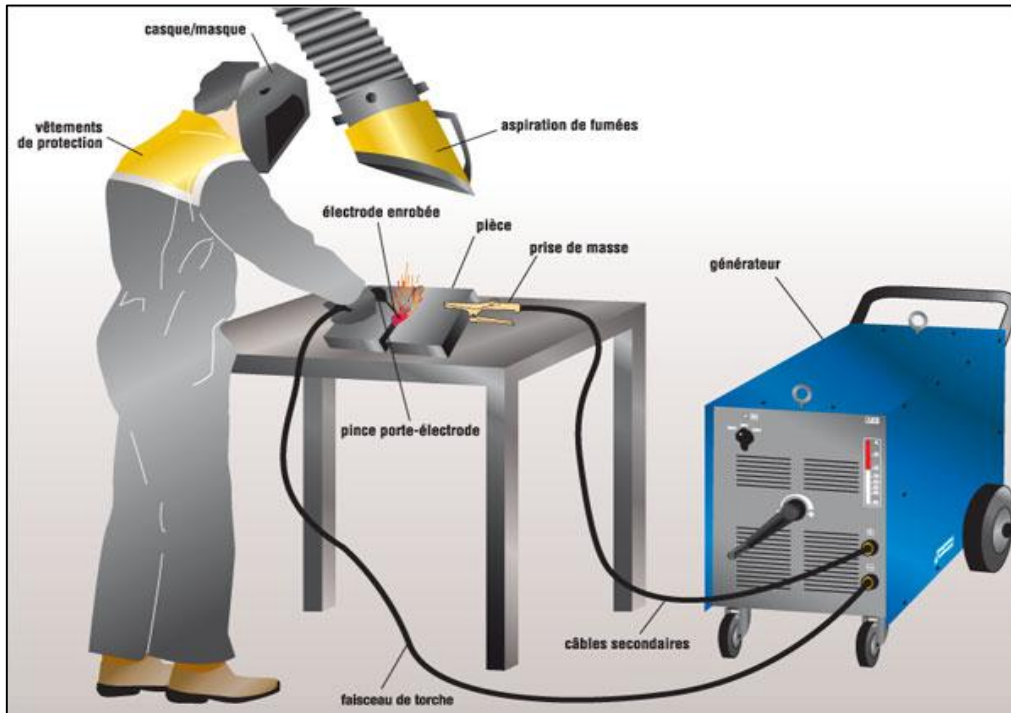


Figure I-16 : Soudage par électrode enrobée [17]

I.9.3.3 Soudage par plasma

Le soudage plasma est un procédé de soudage à l'arc. La source de chaleur nécessaire à la fusion est générée par l'arc plasma.

Le jet de plasma est obtenu par l'étranglement d'un arc électrique dans une tuyère de faible diamètre dans laquelle s'écoule un gaz plasmagène (généralement de l'argon ou un mélange d'argon/hydrogène). Le jet de plasma s'établit à l'amorçage sous haute tension à haute fréquence puis est transféré de l'électrode en tungstène vers la pièce, à une plus faible tension.

Dans le cadre du soudage plasma, un second gaz de protection inerte dit gaz annulaire est nécessaire. Il peut être un mélange de gaz (argon/hydrogène ou argon/hélium) ou argon pur, et protège ainsi le bain de fusion. Il a des effets sur certains critères : le mouillage, l'aspect du cordon, et la vitesse du travail de soudage.

De par les propriétés de ce procédé, on obtient de forte densité de puissance (haute énergie sur faible surface) permettant d'obtenir des géométries de cordons fins et pénétrants, de performances supérieures au procédé TIG.

Le soudage plasma nécessite donc l'utilisation de gaz (souvent approvisionné en bouteilles pour ces types de consommation). Le soudeur contrôle le procédé via un boîtier de commande qui pilote les cycles du poste de soudage plasma.

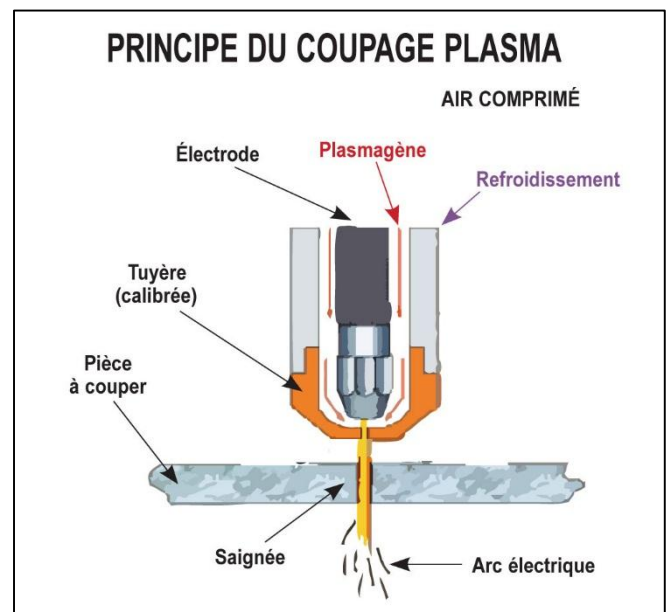


Figure I-17 : Soudage plasma [18]

Le soudage plasma nécessite donc l'utilisation de gaz (souvent approvisionné en bouteilles pour ces types de consommation). Le soudeur contrôle le procédé via un boîtier de commande qui pilote les cycles du poste de soudage plasma [18].

I.9.3.4 Soudage MIG-MAG

Le soudage MIG/MAG est également appelé soudage à l'arc avec fil-électrode sous atmosphère gazeuse. On distingue le soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère gazeuse inerte (MIG) et le soudage à l'arc avec fil-électrode sous atmosphère gazeuse active (MAG). À l'heure actuelle, le procès MIG/MAG est le mode opératoire de soudage le plus utilisé et permet d'atteindre des vitesses de soudage particulièrement élevées. Il peut être utilisé de manière manuelle, mécanisée ou robotisée [19].



Figure I-18 : Soudage MIG MAG [19]

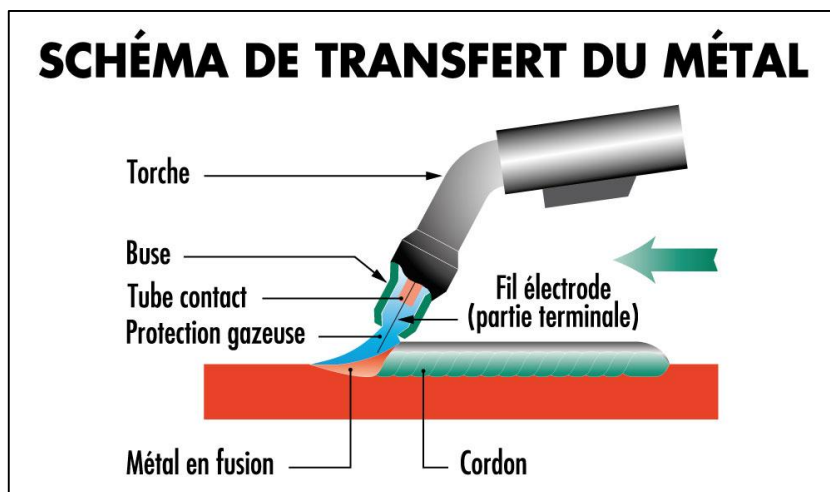


Figure I-19 : Schéma de transfert du métal [19]

I.9.3.5 Soudage TIG

- Définition

Le soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG) est un procédé de soudage sous gaz de protection et fait partie des modes opératoires de soudage par fusion. Il est utilisé pour toutes les applications qui nécessitent une qualité optimale et des soudures sans projections. Le soudage TIG convient notamment aux aciers inoxydables, aux alliages d'aluminium et de nickel, ainsi qu'aux tôles fines en aluminium et en acier inoxydable. Il est utilisé dans la construction de canalisations et de conteneurs, dans la construction de portiques ou dans la construction aéronautique et spatiale [20].

- Principes du procédé TIG

Il s'agit d'un procédé de soudage par fusion dont la source de chaleur est un arc électrique qui est établi entre une électrode de tungstène non fusible et les pièces à souder.

Un gaz inerte (argon, hélium ou un mélange Ar-He) protège de l'oxydation l'électrode, le bain de fusion et ses abords. Le gaz de protection est délivré par la buse équipant la torche. Il doit être présent en amont de l'amorçage de l'arc électrique (pré gaz) et au-delà de la solidification complète du bain de fusion (post gaz).

S'il n'est généralement pas nécessaire d'utiliser un produit d'apport pour souder des pièces de faible épaisseur (quelques millimètres), on met en œuvre soit une baguette, soit du fil, pour réaliser des soudures sur des pièces chanfreinées.

Cependant, le procédé TIG est aussi utilisé pour réaliser des passes de pénétration sur des pièces épaisses (avec ou sans produit d'apport), le remplissage du chanfrein étant ensuite réalisé avec un autre procédé de soudage [21].

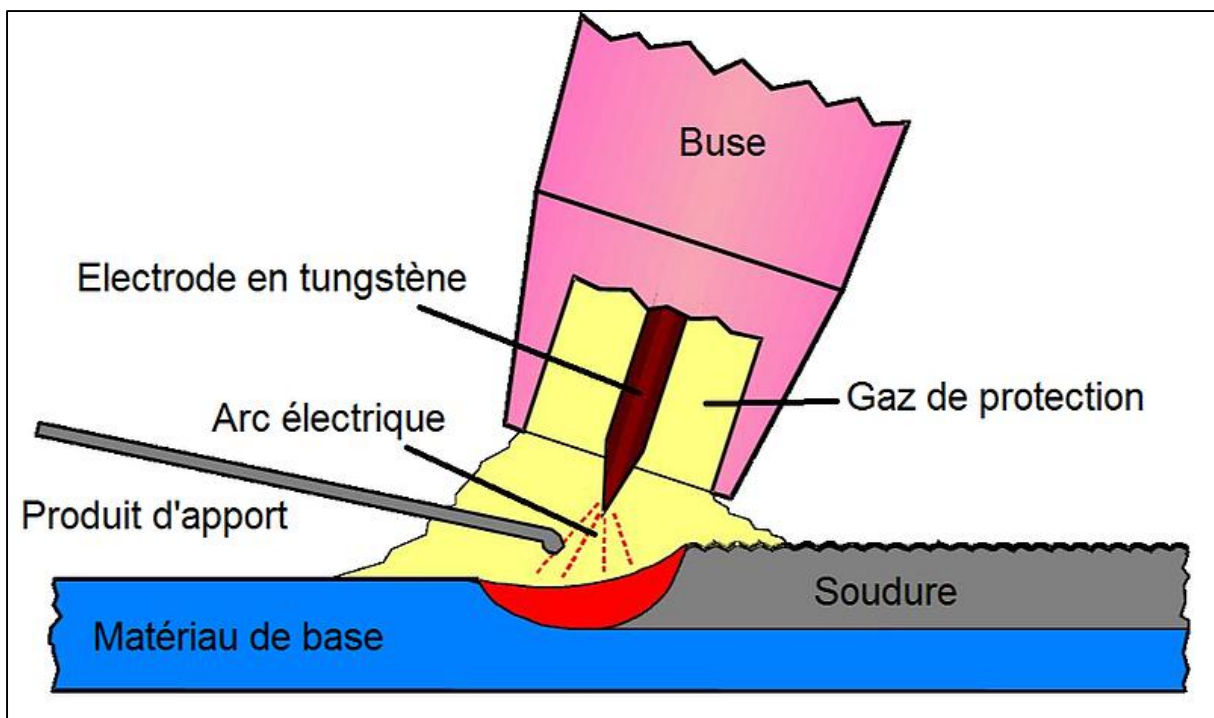


Figure I-20 : Schéma de procédé TIG [21]

- Les avantages

- Soudage de tous les métaux
- Manipulation facile et bonne maîtrise
- Cordons précis, de grande qualité et sans projections
- Aucune retouche
- Convient au soudage dans toutes les positions
- Bonnes possibilités de mécanisation pendant le soudage orbital
- Excellentes caractéristiques sur tôles fines [22]

- Les Inconvénients

- Faibles vitesses de soudage
- L'exécution nécessite de grandes compétences et une longue expérience
- Nécessité de préparation de la pièce à souder
- Ne convient pas aux pièces à souder avec épaisseur supérieure [22]

- Domaine d'application

- L'aéronautique
- L'automobile
- La tuyauterie industrielle
- L'agroalimentaire
- La pétrochimie
- La pharmaceutique
- Le naval

- Installations de soudage TIG

- Un générateur capable de délivrer du courant continu lisse et, dans la plupart des cas, également du courant continu pulsé et alternatif, souvent avec un refroidisseur à eau.
- Une torche de soudage avec une électrode de tungstène et buse de protection gazeuse et sa gaine comportant les différents circuits d'alimentation.
- Une bouteille de gaz ou une centrale de distribution, avec détendeur et débitmètre.
- Un dispositif d'amorçage (haute fréquence) de l'arc à distance, souvent être intégré au générateur [23]

- Le poste de soudage TIG :

Il existe deux sortes de postes TIG :

- DC (courant continu) pour l'acier, l'inox, éventuellement le cuivre,

- AC/DC (courant continu ou alternatif) permettant de souder également des alliages d'aluminium.

Les postes MMA et TIG DC étant basés sur le même générateur de courant, n'importe quel poste TIG permet la soudure MMA. Inversement, il est possible de souder au TIG DC avec un poste MMA sous réserve d'utiliser une torche à valve pour contrôler manuellement le débit d'argon. Toutefois, l'absence de réglage autre que l'intensité, l'amorçage au contact, le gaspillage de gaz et l'inconfort d'utilisation limitent cette possibilité à un usage exceptionnel [24].



Figure I-21 : Poste à souder TIG (Matrix 3000) [24]

- **La torche de soudage TIG**

La torche à souder TIG emporte une électrode non fusible au tungstène. Reliée au poste à souder par le mono-cordon, la torche dispense au fur et à mesure du soudage : le courant d'un pôle électrique et le gaz de protection.

Une buse en céramique permet de canaliser le flux de gaz précisément sur la zone de soudage.

L'électrode en tungstène ne va pas fondre au fur et à mesure que l'arc électrique fait monter sa température ; il y a donc besoin d'utiliser un métal d'apport fourni par les baguettes à souder [25].



Figure I-22 : Torche de soudage TIG [25]

- L'électrode en tungstène

L'électrode en tungstène est la pièce maîtresse du soudage TIG : avec 3 380 degrés Celsius, le tungstène a le point de fusion le plus élevé de tous les métaux purs du tableau périodique. Ainsi, l'électrode ne fait pas et produit un arc électrique qui chauffe et liquéfie le matériau. Les électrodes sont fabriquées à l'aide d'un procédé de frittage. Pour améliorer leurs propriétés, elles peuvent être alliées avec des oxydes supplémentaires. En fonction de l'alliage, les électrodes portent différents marquages colorés [26].

Désignation	Couleur	Type	Courant	Application
WP	Vert	Pure	AC	Arc stable avec courant alternatif, utilisé pour souder les alliages légers. Attention au risque de contamination du bain.
WT	Jaune 1%	Thorium	DC	Amorçage facile, grande capacité de courant et peu de contamination du bain. AC difficile. Risques radioactifs.
	Rouge 2%			
	Violet 3%			
WZ	Blanc de 0,7 à 0,9%	Zirconium	AC	Identique WP, avec une capacité de courant plus élevée et moins de risques de contaminations du bain.
	Marron de 0,15 à 0,50%			
WL	Noire de 0,8% à 1,2%	Lanthanum	AC/DC	Similaire WT, pas de risque radioactif. Mais moins performant.
	Or de 1,3% à 1,7%			
	Bleue de 1,8% à 2,2%			
WC	Grise de 1,8% à 2,2%	Cérium	AC/DC	Similaire WT et WL. Moins de capacité de courant.
WCL 1/1%	Rose	Cérium/Lanthane	DC	Amorçage simplifié, durée de vie importante. Elle offre un excellent compromis !

Figure I-23 : Tungstène électrodes [26]



Figure I-24 : La forme de tungstène électrodes [26]

- Gaz utilisés en procédé TIG

Des gaz de protection sont nécessaires lors du soudage à l'arc sous gaz tungstène (GTAW) pour protéger la zone de soudage des gaz atmosphériques, tels que l'azote et l'oxygène, qui provoquent des défauts. Le gaz transfère également la chaleur de l'électrode de tungstène au métal et contribue à démarrer et à maintenir un arc stable.

Le choix d'un gaz de protection dépend de :

- Type de matériau à souder.
- Conception commune.
- Aspect final souhaité de la soudure.

L'argon pur est le plus couramment utilisé en soudage TIG.

L'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait de la vitesse plus grande. Le coût du soudage est plus important cependant.

L'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc une vitesse de soudage améliorée. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect plus esthétique du cordon de soudure.

L'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex [27].

- 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 [28].

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 I-25 : Alimentation de gaz [28]

- Buses utilisées

Les buses utilisées seront soit en céramique (rose foncé) (figure 48), en aluminium (rose clair) ou en corindon (blanc) et auront un diamètre qui pourra varier de 6 mm à 20 mm suivant l'intensité de soudage [27].



Figure I-26 : Buse céramique de torche TIG [27]

- Diamètre de buse

Une épaisseur à souder nécessite une intensité donnée. Plus cette intensité est élevée, plus le diamètre de la buse doit être important.

A un diamètre de buse correspond un débit optimal pour la protection efficace du bain de fusion. Un dépassement trop important de ce débit provoque des turbulences dans l'écoulement gazeux favorisant l'entraînement d'air et conduit à une dégradation de la qualité de la protection.

Une règle simple définit que le débit d'argon ne doit pas excéder 1 l/min par mm de diamètre de la buse. La faible densité des mélanges à forte teneur en hélium peut toutefois obliger à dépasser cette limite.

Selon la forme de l'assemblage, le diamètre de buse et/ou le débit sont amenés à être modifiés.

Les diamètres couramment utilisés sont : 6 – 8 – 10- 12-15 mm de diamètre, d'autres diamètres pourront être trouvés pour des applications particulières [27].

- 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 [29].



Figure I-27 : Métal d'apport [29]

- 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 [30].



Figure I-28 : Les Équipements de sécurité TIG [30]

- Les paramètres clés de soudure TIG

- **Type et intensité du courant :** Le courant continu et le courant alternatif peuvent être utilisés pour cette méthode. Si vous choisissez le courant continu, le processus peut se faire avec une polarité inversée ou normale. L'électrode connectée au pôle inverse fait chauffer fortement la pointe, ce qui exige la réduction de l'intensité du courant admissible. Dans la situation où vous souhaitez obtenir une intensité élevée, vous devez utiliser une électrode de plus grand diamètre. Par contre, le soudage au courant alternatif ne nécessite pas de telles restrictions, mais peut altérer la qualité de la soudure. L'intensité du courant est le facteur qui détermine la profondeur de la pénétration et la largeur de la soudure. Sa valeur est comprise entre 5 et 600 A.
- **Tension d'arc :** Elle est responsable de sa longueur et de la forme de la soudure, en fonction du gaz utilisé. Sa valeur dépend du matériau de l'électrode et de l'intensité du courant réglée.
- **Vitesse de soudage :** Elle désigne la vitesse de l'électrode par rapport à l'arc incandescent. Ses valeurs se placent entre 0,05 et 0,4 m / min. De la même manière que l'intensité du courant, elle affecte la profondeur de pénétration et la largeur de la soudure. Cela

dépend non seulement de l'habileté du soudeur et de la position de soudage, mais également de l'épaisseur et de la spécificité du matériau et de l'intensité du courant.

- **Type et l'intensité du débit du gaz de protection :** Tout au début de l'article nous avons mentionné l'importance du gaz de protection. Dans de nombreux guides, vous trouverez le conseil d'utiliser l'argon 4.0 ou ses types avec une pureté encore plus élevée de 4.5 et 5.0. Ce sont des gaz de très bonne qualité. On suppose généralement que dans des conditions neutres, le débit est de 6 à 15 ou 5 à 20 l/min. Afin de travailler avec du gaz avec succès et en sécurité, vous devez disposer d'une buse de forme appropriée. Si vous souhaitez régler le débit de gaz de manière très précise, vous devez utiliser un réducteur muni d'un débitmètre.
- **Diamètre et type d'électrode non consommable :** Les types d'électrodes mentionnés au début de l'article sont sélectionnés en fonction du matériau. Par conséquent, le type de courant, sa polarité et son intensité doivent être pris en compte. La liste des paramètres est bien présentée dans les tableaux disponibles dans les publications telles que le guide de soudage TIG, le guide du soudeur, etc.
- **Equilibre et fréquence du courant alternatif :** Ces paramètres sont typiques au soudage TIG AC. La fréquence est de 60 à 200 Hz (souvent 80 à 120 Hz est recommandé comme plage optimale). L'équilibre du courant alternatif est particulièrement important lors de l'usinage de l'aluminium, c'est-à-dire un métal difficile à souder. Il s'agit de la répartition de la chaleur entre la pièce et l'électrode [31].

- Les Différents Courants

Le soudage des métaux dits « lourds » de type métaux ferreux, cuivre et alliage nickel S'effectue en courant continu.

Le soudage des métaux dits « légers » de type aluminium et alliages s'effectue en courant alternatif.

1- Courant continu

- L'arc électrique est alimenté par une source à tension continue.
- L'atmosphère inerte est assurée par de l'argon
- L'électrode réfractaire est en tungstène thorié
- Les électrodes de tungstène peuvent contenir des substances additionnelles. Dans ce cas, la substance utilisée est l'oxyde de thorium.

- Choix des polarités

Polarité négative (- à l'électrode) : le sens électronique n'ayant pas changé c'est maintenant l'anode (+) qui est bombardée par les électrons émis par la cathode (-). On constate alors un échauffement anormal de l'électrode et la zone de fusion est dans ce cas très large et peu profonde.

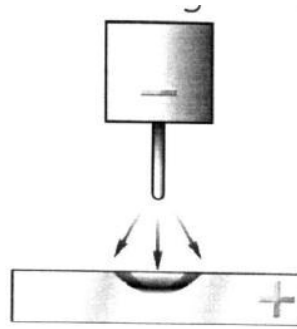


Figure I-29 : Polarité négative (- à l'électrode) [32]

Polarité positive (+ à l'électrode) : le sens électronique du courant allant du pôle - au pôle + à l'extérieur d'un générateur (à l'inverse du sens conventionnel du courant électrique), les électrons vont donc se déplacer de l'électrode (cathode) vers la pièce (anode) et bombarder celle-ci. Dans ce cas, la zone de fusion est profonde et étroite.

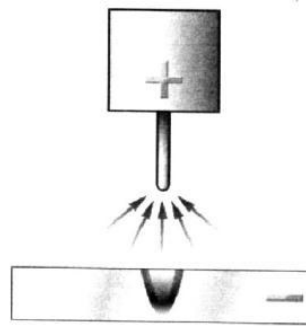


Figure I-30 : Polarité positive (+ à l'électrode) [32]

-Remarque : pour le soudage des métaux lourds la polarité négative à l'électrode permettent d'obtenir des cordons de soudure étroits et bien pénétrés.

2 - Courant continu pulsé

Le courant pulsé est une variante du courant continu dont l'objet est de maîtriser l'énergie apportée à la pièce. Le courant pulsé engendre une succession de temps froids avec maintien de l'arc et de temps chauds (pics d'intensité) qui assurent la pénétration.

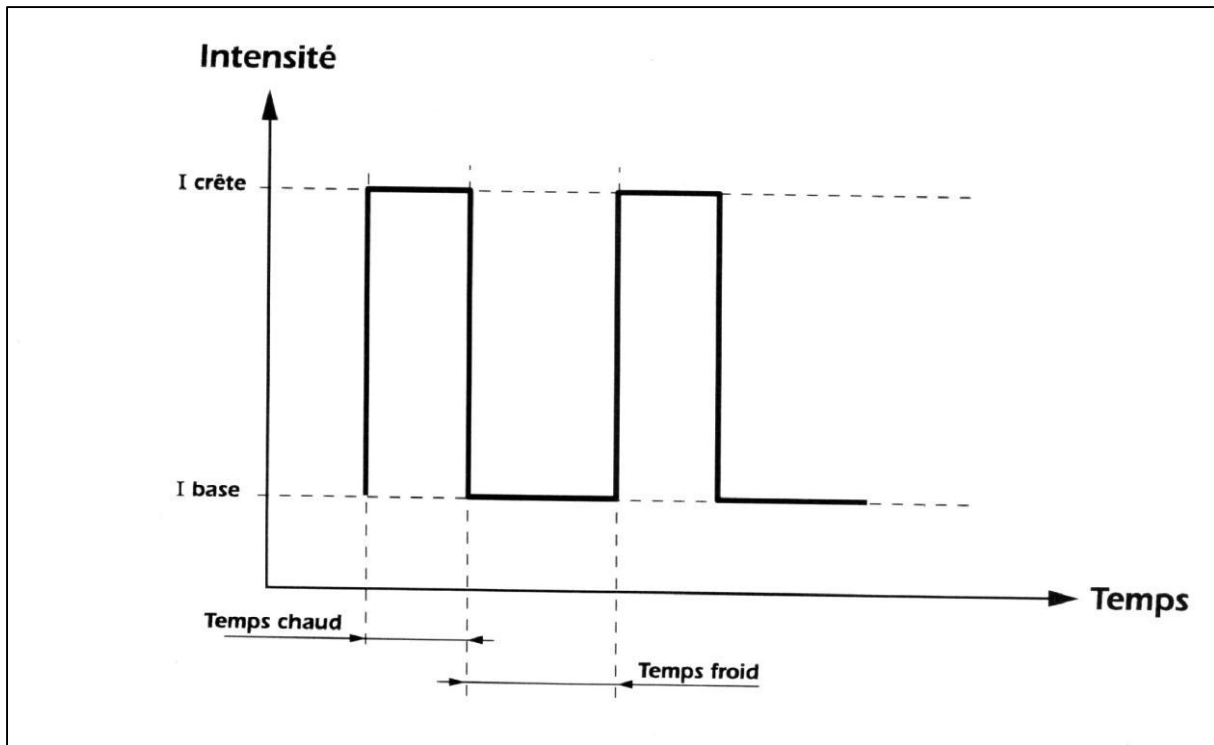


Figure I-31 : Courant continu pulsé [32]

- Courant Alternatif

L'arc électrique est alimenté par une source à tension alternative ; l'atmosphère inerte est assurée par de l'argon.

Lors de l'alternance de polarité, le jaillissement des électrons de la tôle vers l'électrode détruisent la couche d'alumine protectrice.

A l'alternance suivante, la polarité inverse assure la pénétration [32].

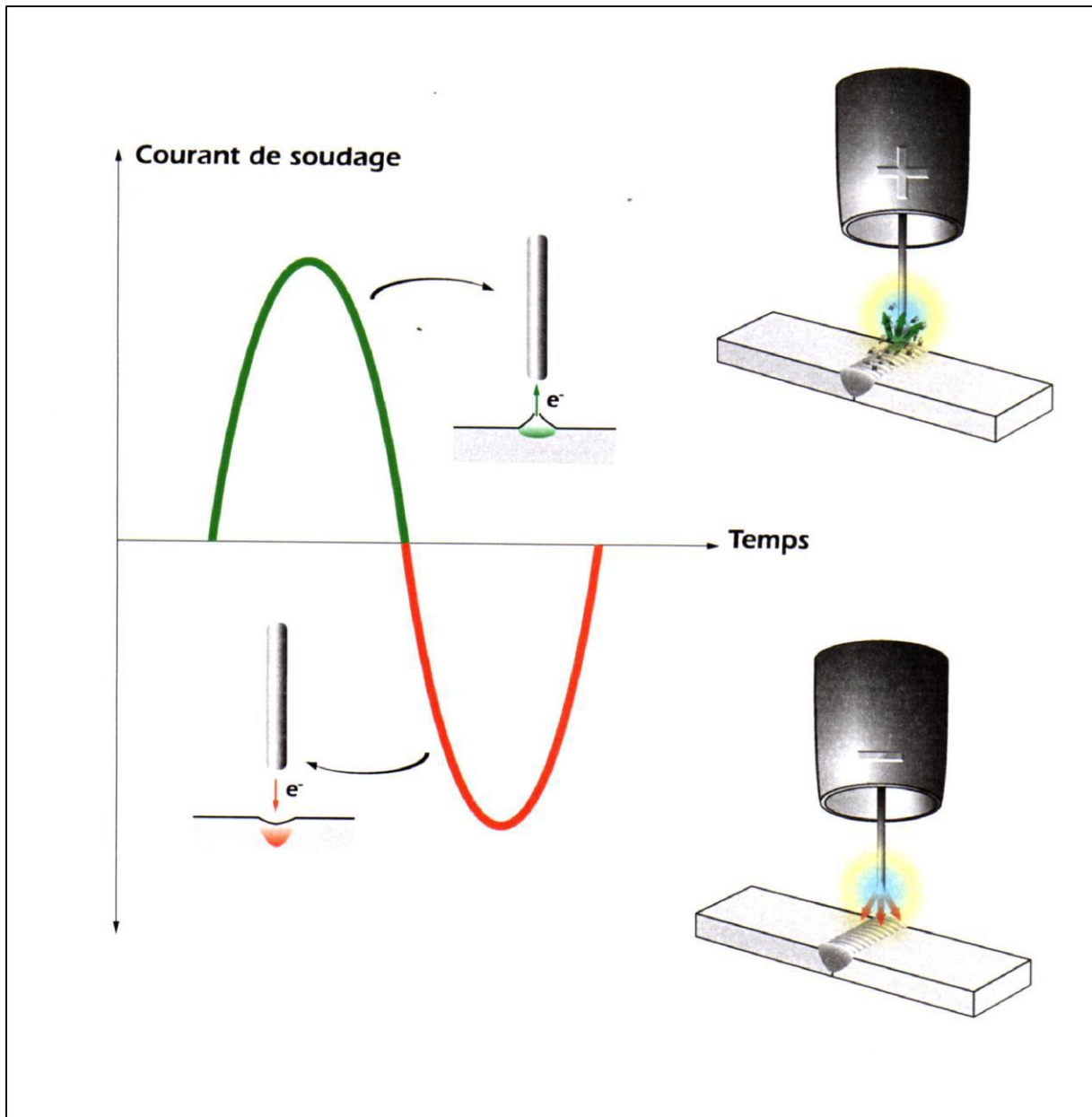


Figure I-32 : Courant alternatif [32]

- **Systèmes d'allumage 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 :

- **Amorçage (haute fréquence).** 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.

- **Amorçage LIFT.** S'obtient au moyen d'un dispositif fournissant un courant à valeur réduite pour ne pas endommager la pointe de l'électrode de tungstène quand cette dernière se trouve en contact avec le matériel à souder. Dès que l'on éloigne l'électrode de la pièce, une étincelle jaillit et entraîne l'allumage de l'arc ; le générateur augmente par conséquent le courant de soudage jusqu'à la valeur définie initialement. Le départ LIFT, du fait de l'absence de haute fréquence, a la propriété de ne créer aucune perturbation électromagnétique ; le contact de la pointe de l'électrode avec le matériau à souder entraîne quoi qu'il en soit une pollution du bain [33].

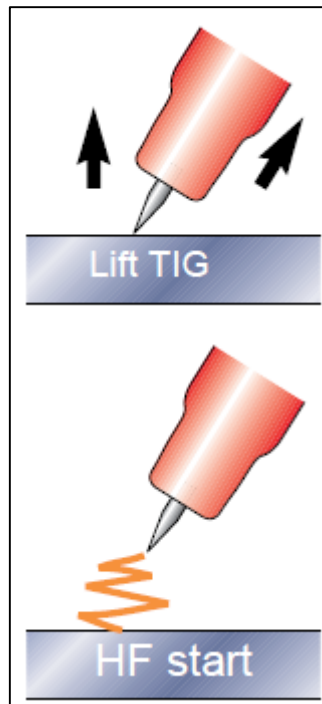


Figure I-33 : Amorçage LIFT et HF [33]

- Le schéma du cycle de soudage TIG
 - Le cycle de soudage TIG courant lisse

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.

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.

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.

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.

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 [34].

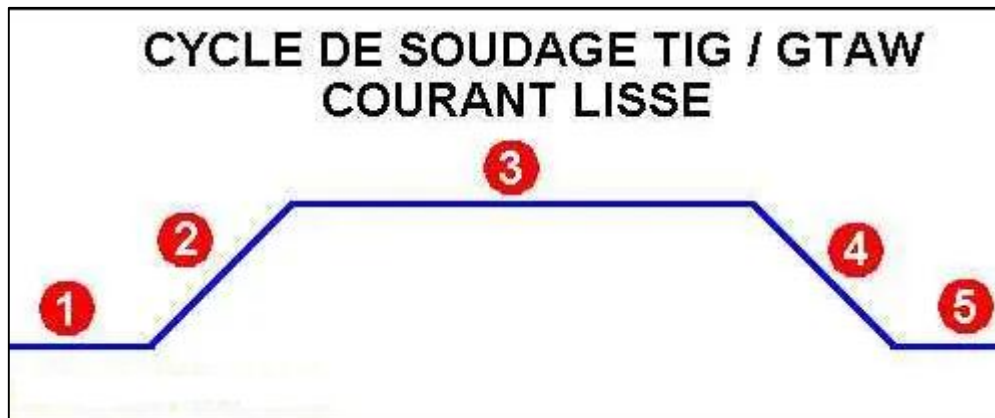


Figure I-34 : Cycle de soudage (courant lisse) [34]

- Le cycle de soudage TIG courant pulsé

- **Tc-Temps chaud programmé**

La valeur programmée du temps chaud T_c est comprise entre 0, 1 à 2,5 secondes. Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité haute (I_h) sélectionnée lors du soudage. Sur certains générateurs, le temps chaud et froid (programmés en seconde) est remplacé par une fréquence de pulsation en Hertz. Quelquefois, une balance permet d'augmenter les durées hautes ou basses.

- **Tf-Temps froid programmé**

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.

- **Ih - Intensité haute programmée**

La valeur programmée de l'intensité haute de soudage I_h . Cette valeur est sélectionnée selon l'épaisseur du matériau, la nuance du matériau, la position de soudage et le type de préparation de joint. Le rapport des valeurs entre I_h , T_c , I_b et T_f doit être judicieusement évalué pour obtenir un bain de fusion correct.

- **Ib- Intensité basse programmée**

La valeur programmée de l'intensité basse de soudage I_b . Cette valeur est sélectionnée selon l'épaisseur de matériaux, la nuance de matériaux, la position de soudage et le type de préparation de joint [34].

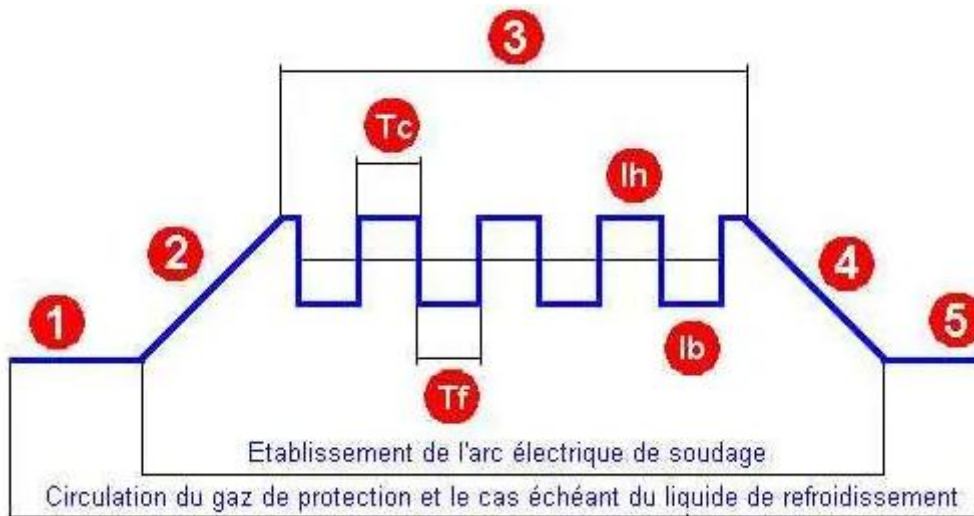


Figure I-35 : Le cycle de soudage TIG courant pulsé [34]

- **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.

- **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.

- **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.

- **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.

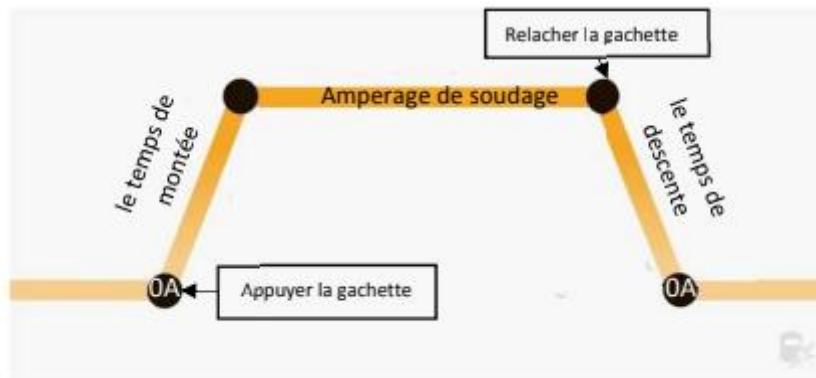


Figure I-36 : 2T en soudage TIG [35]

- **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 [35].

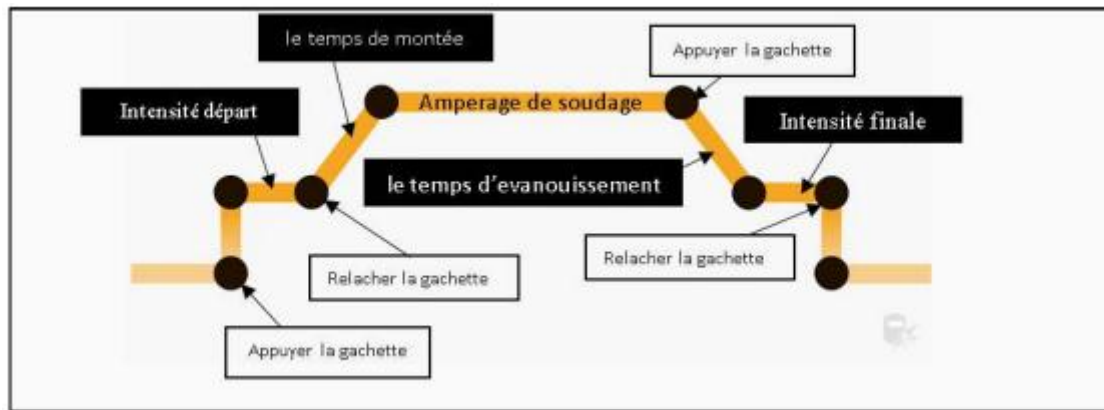


Figure I-37 : 4T en soudage [35]

I.10 Préparation des bords du joint soudée

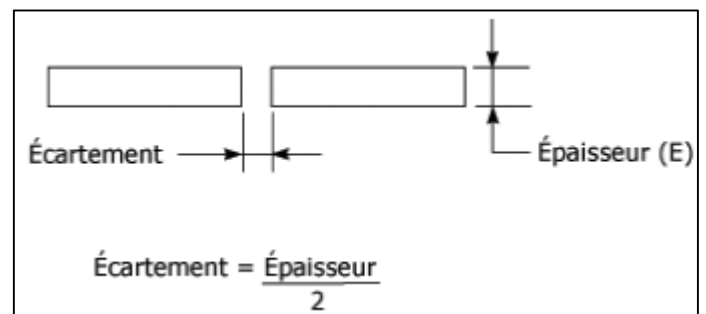
Les plaques dont l'épaisseur est inférieure à 5 mm ne nécessitent pas le chanfreinage de leurs bords [36].

Les plaques dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 5 mm doivent être chanfreinées. Les principaux types de chanfreins utilisés sont :

- Le chanfrein en V
- Le chanfrein en X

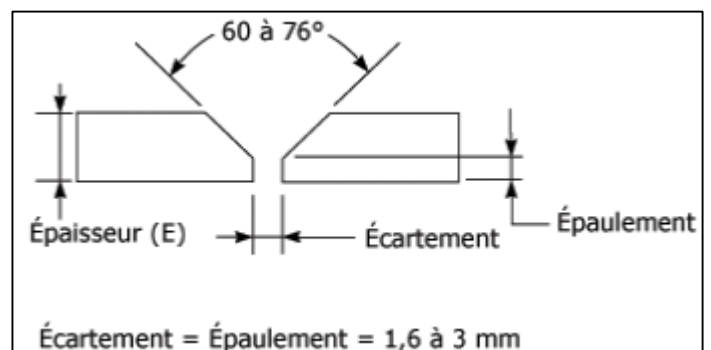
A. Bords droits pour les plaques dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 2 mm mais inférieure à 5 mm

$$2\text{mm} < E < 5\text{mm}$$

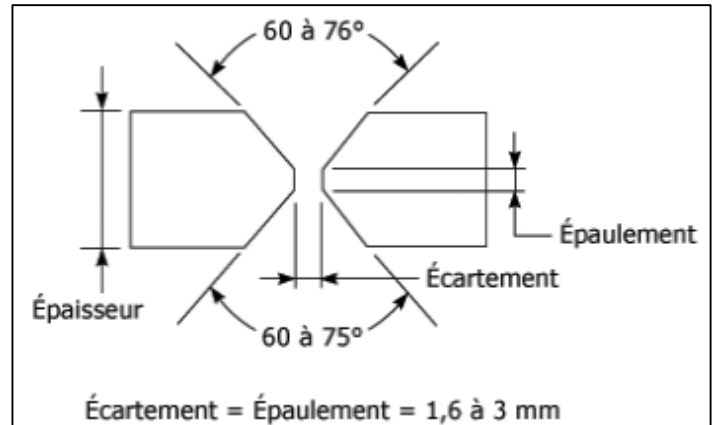


B. Bords chanfreinés en V pour les plaques dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 5 mm mais inférieure ou égale à 12 mm

$$5\text{mm} < E < 12\text{ mm}$$



- C. Bords chanfreinés en X pour les plaques dont l'épaisseur est supérieure à 12 mm



I.11 Conclusion

En conclusion, le soudage est une technologie essentielle dans de nombreuses industries et son choix dépend de nombreux facteurs tels que les matériaux à souder, l'épaisseur des pièces, l'application de la soudure et les exigences en matière de qualité et de sécurité.

Les techniques de soudage les plus courantes sont le soudage à l'arc, le soudage par résistance, le soudage au gaz, le soudage par friction et le soudage TIG. Chaque technique a ses avantages et ses limites et il est important de comprendre les caractéristiques de chaque méthode pour choisir celle qui convient le mieux à la situation.

En fin de compte, Le soudage TIG est une technique précise et efficace pour assembler des pièces. Le soudage TIG utilise une électrode de tungstène non consommable et un gaz inerte pour protéger la zone de soudure, ce qui permet d'obtenir des soudures de haute qualité avec une finition propre et précise.

CHAPITRE II
ETUDE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction

Le soudage de l'aluminium est un processus complexe qui nécessite une grande expérience pour obtenir des résultats de qualité. Les épaisseurs des matériaux à souder ont un impact significatif sur le processus de soudage et sur la qualité des soudures obtenues. Dans cette étude expérimentale, nous avons étudié le soudage de différentes épaisseurs d'éprouvettes prismatiques en aluminium en utilisant le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) par poste MATRIX 3000. Et analysé les paramètres de soudage tels que la vitesse de soudage, le courant de soudage, le diamètre de l'électrode et le gaz de protection utilisé .et après varié l'intensité de soudage en fonction des différentes épaisseurs des éprouvettes prismatiques. Nous avons examiné comment les variations d'intensité affectent la qualité des soudures obtenues. Les résultats de cette étude ont des implications importantes pour l'optimisation des paramètres de soudage et la production de soudures de qualité supérieure. Cette recherche contribue à améliorer la compréhension des facteurs qui influencent la qualité des soudures en aluminium, ce qui est crucial pour l'industrie.

II.2 Préparation de l'étude

Les éprouvettes d'étude seront préparées par plusieurs étapes selon l'épaisseur qu'on a étudiée dans ce chapitre.

II.2.1 Les alliages d'aluminium

L'alliage d'aluminium est une composition chimique dans laquelle d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pour améliorer ses propriétés. La raison principale est d'augmenter sa résistance mécanique. Ces éléments comprennent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'à 15 % de l'alliage en poids. Les alliages sont identifiés par un numéro à quatre chiffres où le premier chiffre identifie une série caractérisée par ses principaux éléments d'alliage. Nous disposons de plusieurs types et séries d'alliages, notamment les séries destinées au forgeage et à la coulée. Pour cette étude, nous avons sélectionné l'un des alliages disponibles sur le marché et avons effectué nos recherches en conséquence [38].

II.2.2 Géométrie et préparation des éprouvettes

Nous avons utilisé différentes machines telles que la fraiseuse et la scie mécanique alternative, ainsi que des équipements pour l'usinage des éprouvettes. Il nous a fallu un mois pour terminer l'usinage des 72 éprouvettes.

II.3 Matériaux brute

La pièce brute utilisée dans cette étude est une pièce prismatique en aluminium, avec les dimensions suivantes : (L = 2000 mm, l = 80 mm, e = 15 mm). Représentés dans la (**figure II-1**).



Figure II-1 Pièce prismatique en aluminium

Tableau II-1 Gamme d'usinage 1

Ensemble					
Sous ensemble					
Élément					
Matériaux : Al					
Nombre : 72					
phase	Désignation et sous phase opération	Machine	Outillage	Outils de contrôle	Schéma
000	Control brute			Mètre	

<p>100</p>	<p><u>Débitage :</u> 1- Positionner la pièce 2- Découper la brute $l=90, L=80, e=15$</p>	<p>SMA</p>	<p>Lame</p>	<p>PàC</p>	
<p>200</p>	<p><u>Débitage :</u> 1- Tracer la pièce 2- Fixer la pièce sur l'étai 3- Découper la pièce $l=45, L=80, e=15$</p>	<p>SMA</p>	<p>Lame</p>	<p>PàC</p>	

<p>300</p>	<p><u>Surfaçage :</u> 1- Monter la fraise 2- Surfacer les côtés Cf1, Cf2 Cote de fabrication $Cf1=75 \pm 0,1$ $Cf2=30 \pm 0,1$</p>	<p>Fraiseuse</p>	<p>Fraise 2T $\varnothing = 45$</p>	<p>PàC</p>	
<p>400</p>	<p><u>Surfaçage :</u> 1- Fixer la pièce sur l'étau 2- Surfacer la cote Cf3 Cote de fabrication $Cf3=11 \pm 0,1$</p>	<p>Fraiseuse</p>	<p>Fraise 2T $\varnothing = 45$</p>	<p>PàC</p>	

<p>500</p>	<p><u>Chanfreinage :</u> - Mettre la tête universelle à "30°" - Chanfreiner la surface Type chanfrein en V (e=11, 9, 7,6) Type chanfrein en X (e=15,13)</p>	<p>Fraiseuse</p>	<p>Fraise 2T $\varnothing = 45$</p>	<p>Rapporteur d'angle</p>	
------------	---	------------------	---	---------------------------	--

II.3 Choix de paramètre de soudage TIG et préparation de poste

Dans l'atelier de soudage, nous devons réaliser trois assemblages :

Le premier : assemblage bout à bout avec un chanfrein en **X**, de deux éprouvettes d'épaisseur (15, 13) Ce processus utilisera la technique de soudage TIG (141), et avec différents niveaux d'intensité de soudage.

Le deuxième : assemblage bout à bout avec un chanfrein en **V**, de deux éprouvettes d'épaisseur (11, 9, 7,6) Ce processus utilisera la technique de soudage TIG (141), et avec différents niveaux d'intensité de soudage.

Le troisième : assemblage bout à bout avec un bord droit, de deux éprouvettes d'épaisseur (5, 4, 3) Ce processus utilisera la technique de soudage TIG (141), et avec différents niveaux d'intensité de soudage.

Dans le soudage, nous allons utiliser un métal d'apport. (ALUMINIUM WELDING WIRE TIG ER 5356) {DIN EN ISO 18273 : S Al 5356 – Al Mg 5 Cr (A)}.



Figure II-2 Métal de base

- Nous avons utilisé une électrode en tungstène de couleur verte avec un diamètre 2,4 et 1,6 pour les épaisseurs minces.
- La buse en céramique est de diamètre (6mm).



Figure II-3 Electrode et la buse

La bouteille de gaz utiliser est l'argon, le débit de gaz est en fonction de la buse utilisé lors de soudage.



Figure II-4 Bouteille de gaz l'argon

La vitesse lors de soudage de toutes les éprouvettes a été fixée sur 10 mm/s.

II.3.1 La configuration de poste



Figure II-5 Poste de soudage TIG (MATRIX 3000)

- Le procédé de soudage : TIG AC avec amorçage HF
- Le diamètre d'électrode : 2,4 et 1,6 mm
- Le mode de soudage : 2 TEMPS
- Ampérage : Variable
- Voltage : 17 V
- Wave : DYNAMIC TIG
- Fréquence : 100Hz
- Chemin de cycle :
 - Pré du gaz : 0,5s
 - Le courant initial de soudage : 2s
 - L'évanouissement de l'arc : 2s
 - Durée du poste gaz : 2s

Avant de procéder au soudage de notre éprouvette, nous avons commencé par souder des pièces pour s'assurer du bon fonctionnement et de la qualité du poste MATRIX 3000.

La (**Figure II-6**) illustre l'effet de paquet de gaz à l'intérieure de cordon.



Figure II-6 l'effet de paquet de gaz à l'intérieure de cordon

La (Figure II-7) illustre l'effet de manque de gaz.



Figure II-7 l'effet de manque de gaz

La (Figure II-8) illustre l'effet du la L'alumine.



Figure II-8 l'effet du la L'alumine

Tableau II-2 DMOS (WPS)

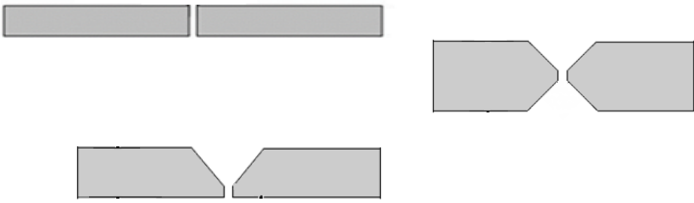
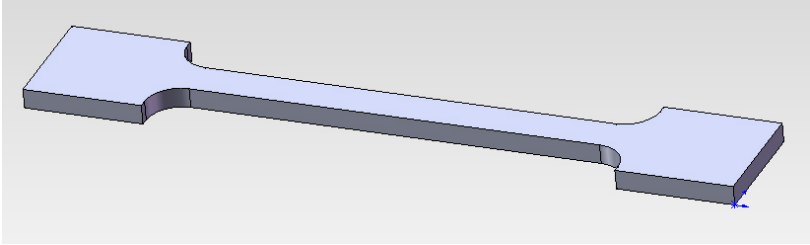
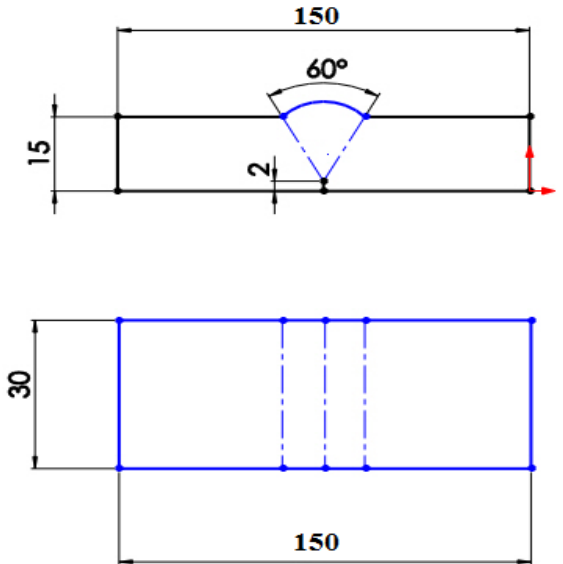
		DESCRIPTIF DE MODE OPERATOIRE DE SOUDAGE (WPS)		N° D’AFFAIRE:	
				DMOS(WPS) N°: 1	
				QMOS(PQR) N°: 1	
Métal de base 1 (Base metal 1) : Nuance (Metal) : Al Norme/Spécification AlMgSi0,5 Groupe / Sous groupe : Epaisseur (Thickness) : (15-3) mm Diamètre (Diameter) : mm		Métal de base 2 (Base metal 2) : Nuance (Metal) : Al Norme / Spécification : Groupe / Sous groupe: Epaisseur (Thickness) : (15-3)mm Diamètre (Diameter) : mm		Support oui Nature:	Procédé(s)
		TIG			
Type d’assemblage (Joint design) : bout à bout			Soudure repère (Weld number) :		
Préparation de l’assemblage			Répartition des passes		
					
Préparation des bords			chanfrein en X et en V et plat		
N° des passes (Pass n°):		1			
Position de soudage (Welding position):		PA 1F			
Procédé et degré mécanisation (process and d° of mechaniz.)					
Mode de transfert (Transfert mode)					
Métal d’apport (Filler metal) groupe :					
Désignation normalisée (Standardized designation):		ISO 18273			
Désignation commerciale (Commercial Designation):		ER 18273			
Marque (Trade name):					
Type d’enrobage ou de fourrage (Flux cored type):					
Ø (mm)		2			
Protection gazeuse ou flux (Gas shielding or flux)		ARGON			
Designation normalisée (Standardized designation):					
Designation commercial (Commercial designation):					
Debit endroit (Face flow): (l/mn) ± 10 %		6L/min			
Nature et débit envers (Root flow): (l/mn) ± 10 %					
Type de courant & polarité (Current type & polarity):		AC			
Electrode réfractaire (Tungsten) : type & Ø		Vert		1.6	
Intensité (Intensity): I (amp.) ± 10 %		Variable			
Tension (Voltage) : U (volts) ± 10 %		17			
Vitesse de fil (Wire speed): (m/min) ± 10 %					
Vitesse d’avance (Travel speed) : V (mm/s) ± 10 %					
FABRICANT			NOM, DATE ET SIGNATURE :		

Tableau II-3 Gamme d'usinage 2

Ensemble					
Sous ensemble					
Elément					
Matériaux : Al					
Nombre : 36					
phase	Désignation et sous phase opération	Machine	Outillage	outil de contrôle	Schéma
000	<p><u>Contrôle :</u> -Contrôler la pièce après le soudage</p>				

<p>100</p>	<p>Fraisage de forme</p>	<p>Fraisage</p>	<p>Fraise à lèvres $\varnothing = 20$</p>	<p>PàC</p>	<p>The drawing shows two views of a mechanical part. The top view is a rectangle with a total length of 150 and a width of 15. It has 20mm wide sections at both ends. Two circular features, labeled 5 and 6, are located in the central section. The side view shows a part with a total height of 30. The ends are chamfered. Tool paths are indicated by blue arrows and numbers: 1, 2, 3, 4, 5, and 6. Path 1 is a vertical line on the left end. Paths 2, 3, and 4 are horizontal lines along the top and bottom edges. Path 5 is a vertical line on the bottom edge. Path 6 is a vertical line on the bottom edge near the right end.</p>
------------	--------------------------	-----------------	---	------------	--

Après l'usinage et le soudage, voici quelques exemples d'éprouvettes soudées obtenues, illustrées dans la figure ci-dessous :



Figure II-9 Epreuves soudées

II.4 Contrôle de soudage

Après l'usinage et le soudage des éprouvettes, nous allons procéder à deux étapes de contrôle de ces dernières.

Etape 1 : Contrôle par microscopie

Le contrôle sera effectué par un **microscope optique** l'agrandissement (0,1* 40).



Figure II-10 Microscope optique

Etape 2 : Contrôle destructif par traction

La réalisation de l'essai de traction ont été conduit sur une **machine de traction 600KN (figure II-11)** l'essai de traction et exécuter sur des éprouvettes plat de diffèrent épaisseurs dans dimension sont données par la **(figure II-12)** 4 éprouvettes à chaque épaisseur ont été réalisé pour ce type d'essai.



Figure II-11 Machine de traction 600KN

II.4.1 Dimension de l'éprouvette :

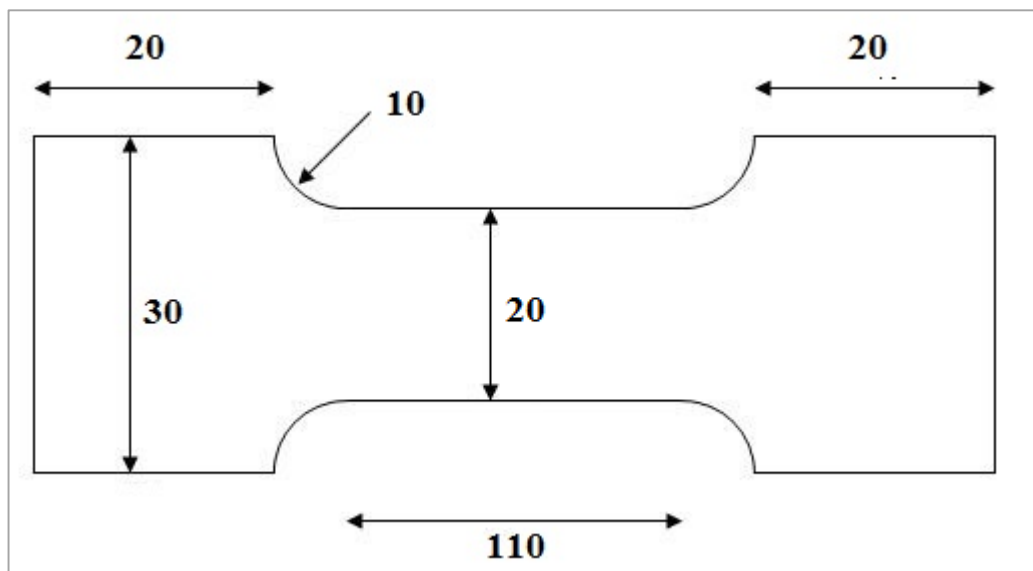















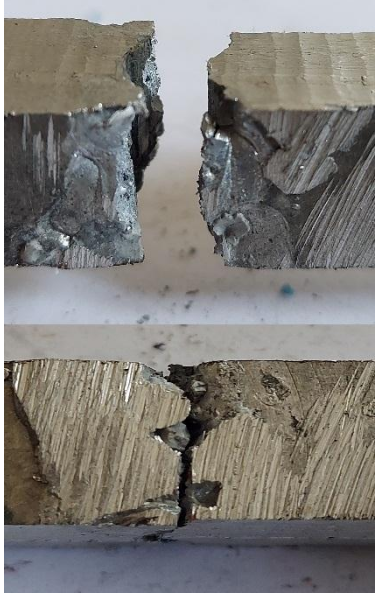


Figure II-12 Dimension de l'éprouvette





Tableau II-4 Les différents essais de soudage TIG pour les éprouvettes en Al



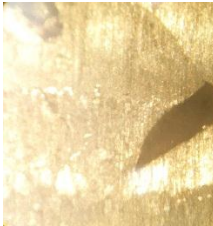

Epaisseur (mm)	Numéro de l'éprouvette	Intensité (A)	Microstructure	Contrôle destructif	Commentaire
15	1	160			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	2	170			Paquet d'air à l'intérieur du cordon





	3	<u>180</u>			<p>Soudage continué avec déboutonnage du cordon</p>
	4	200			<p>Paquet d'air à l'intérieur du cordon et fissure interne</p>





13	1	140			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	2	145			Paquet d'air à l'intérieur du cordon Fissure interne et discontinuité géométrique





	<p>3</p>	<p>150</p>			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>
	<p>4</p>	<p><u>160</u></p>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>





11	1	130			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	2	140			Paquet d'air à l'intérieur du cordon





	3	150			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	4	<u>155</u>			Soudage continué et déboutonnage du cordon

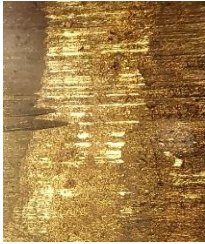



9	1	110			Fissure interne et discontinuité géométrique
	2	120			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	3	/	/	/	/



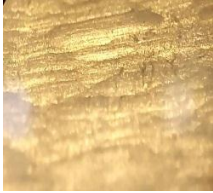

	4	<u>140</u>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>
7	1	100			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>






	2	110			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
	3	125			Fissure interne et discontinuité géométrique




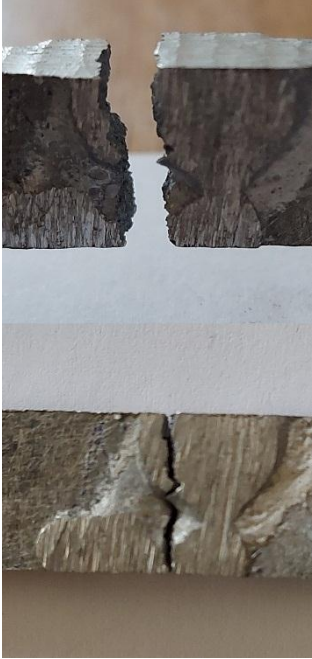
	4	<u>130</u>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>
6	1	100			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>



	2	110			<p>Paquet d'air à l'intérieur du cordon</p> <p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>
	3	120			<p>Paquet d'air à l'intérieur du cordon</p>

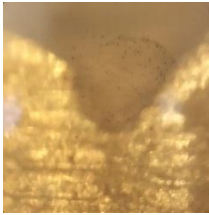



	4	<u>125</u>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>
5	1	100			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>

	2	110			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>
	3	<u>115</u>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>

	4	130	/		Fissure interne et discontinuité géométrique
	1	70			Paquet d'air à l'intérieur du cordon
4	2	80			Fissure interne et discontinuité géométrique

	3	<u>90</u>			<p>Soudage continué et déboutonnage du cordon</p>
	4	110			<p>Fissure interne et discontinuité géométrique</p>

3	1	40	/		Rupture
	2	50	/		Rupture

	3	60			-Manque de fusion
	4	<u>70</u>			Soudage parfait

II.5 Conclusion

L'étude expérimentale est axée sur la réalisation des joints de soudage par le procédé TIG sur des éprouvettes en aluminium. Le contrôle destructif est assuré par un microscope optique pour examiner les soudures. Des essais de traction permettent la mise en relief du comportement de la ZAT des joints soudés. L'étude paramétrique explore l'influence des différents paramètres de soudage sur les résultats en variant l'intensité $I(A)$ en fonction des épaisseurs de (3 à 15 mm) des éprouvettes.

CHAPITRE III

**ANALYSE DES EFFETS DE
L'INTENSITE DE SOUDAGE EN
FONCTION DE L'EPAISSEUR**

III.1 Introduction

Récemment, les simulations numériques sont largement utilisées pour déterminer les niveaux de contraintes résiduelles et de déformations produites par les opérations 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.

Dans ce chapitre on va traiter l'effet de variation du courant de soudage de procédé TIG par rapport les différents épaisseurs des éprouvettes en aluminium. Nous allons ainsi confirmer les résultats de notre expérimentation tels qu'ils ont été présentés dans le chapitre précédent.

Présentation de logiciel de simulation simufact-welding

Simufact Welding est une gamme de produits modulaires, qui offre des fonctionnalités complètes pour la modélisation du comportement élasto-plastique des matériaux et la simulation de soudage structurel. Le logiciel couvre différents procédés de soudage.

Simufact Welding est conçu pour la modélisation et la simulation d'une large gamme de processus d'assemblage thermique au moyen de la simulation de soudage structurel, y compris les processus de soudage à l'arc et au faisceau habituels ainsi que le brasage. De plus, Simufact Welding offre la possibilité de modéliser les processus de traitement thermique, les variations des configurations de refroidissement et de serrage ainsi que le chargement mécanique des structures soudées [38].

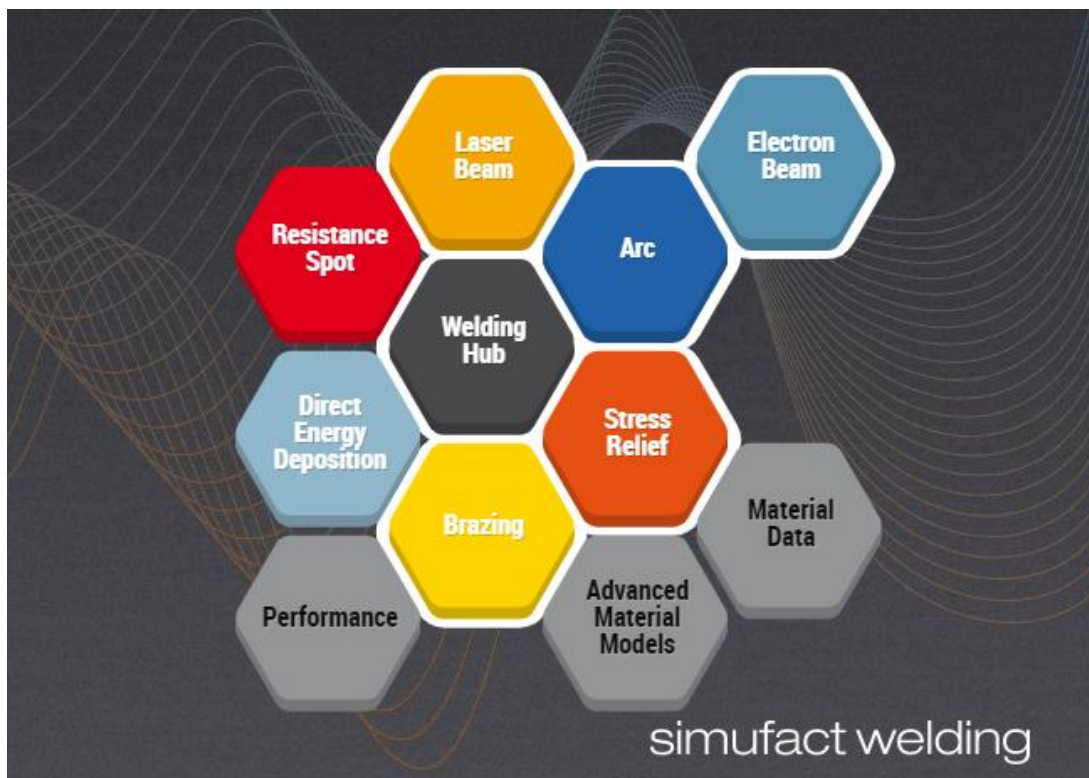


Figure III-1 Gamme de produits Simufact Welding [38]

III.3 Les avantages

- Identifier les distorsions critiques, c'est-à-dire en ce qui concerne l'assemblage, le renflement, les déséquilibres et les jeux
- Étudier et optimiser les outils de serrage avant même d'avoir investi dans des outils
- Identifier les directions de soudage et les séquences de soudage optimales
- Étudier l'influence du serrage sur les déformations de soudage et les contraintes résiduelles
- Acquérir des connaissances sur le développement de la zone affectée thermiquement par la chaleur
- Utilisez un outil qui vous assiste lors de la planification des processus de soudage
- vérifier la qualité des cordons de soudure, c'est-à-dire en calculant la taille des pépites, les phases métallurgiques fragiles, la dureté et les effets du préchauffage.
- Innovez dans la conception de vos processus :
- Testez et évaluez virtuellement différentes variables sans et évitez les essais réels extrêmement coûteux
- Examiner le comportement du matériau pendant le processus de soudage

III.4 Aspects de la simulation de soudage

La simulation de soudage dans Simufact Welding utilise la méthode des éléments finis. Cette approche est particulièrement adaptée au calcul du comportement des matériaux élasto-plastiques avec durcissement, étant ainsi bien adaptée à la simulation de soudage structurel. Les processus complexes lors du soudage - induits par un arc ou par l'évaporation du métal à l'intérieur d'un trou de serrure - ne sont pas pris en compte. Cela signifie que la stabilité du processus et la géométrie du cordon de soudure ne sont pas les résultats d'une simulation mais des paramètres d'entrée. La simulation de soudage structurel calcule les effets de l'apport de chaleur du processus de soudage à partir d'une description mathématique du flux de chaleur pendant le soudage, à savoir une description de la ligne isotherme du bain de fusion par une source de chaleur équivalente [38].

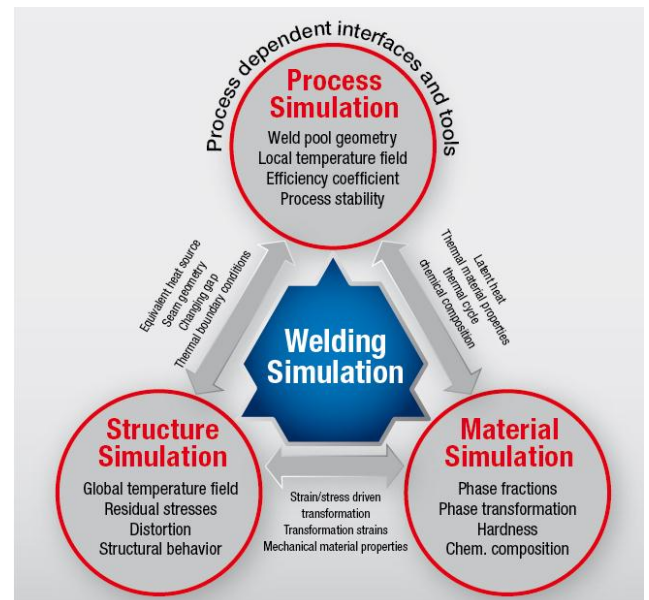


Figure III-2 Aspects de la simulation de soudage [38]

III.5 Model analytique

Le procédé de rechargement TIG consiste à chauffer localement la pièce jusqu'à fusion de métal le flux de chaleur généré au cours du soudage TIG est le résultat d'interaction complexes entre le plasma de l'arc et la matière lors d'une opération de soudage la puissance globale apportée par l'arc à la pièce est exprimé par [41] :

$$Q = U * I * \mu \quad (3,1)$$

Où U représente la tension (V),

I : l'intensité (A)

μ : le rendement.

Pour simuler la source de chaleur du soudage, nous utilisons la fonction dite de « Goldak » qui permet de représenter, en trois dimensions, une source de chaleur avec une répartition supposée gaussienne. Soit la fonction Gaussienne :

$$q(x, y, z) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sqrt{2\pi}^3} \cdot \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (3,2)$$

On effectue le changement de variable suivant :

$$2\sigma_x = a; 2\sigma_y = b; 2\sigma_z = c \quad (3,3)$$

Avec a, b, c les rayons de l'ellipsoïde suivant l'axe Ox, Oy, Oz. La fonction A.1 devient alors :

$$q(x, y, z) = \frac{3\sqrt{3}}{abc\sqrt{\pi}^3} \cdot \exp \left[-\frac{3(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2} \right] \quad (3,4)$$

Si l'on suppose souder une plaque plane, la source de chaleur ne doit être appliquée que sur une moitié de volume de l'ellipsoïde. On normalise donc la fonction sur une moitié de volume uniquement. La source thermique équivalente d'un procédé de soudage d'énergie linéique Q_0 est représenté alors par :

$$q(x, y, z) = \frac{Q_0 6\sqrt{3}}{abc\sqrt{\pi}^3} \cdot \exp \left[-\frac{3(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2} \right] \quad (3,5)$$

Dans ce cas, on suppose le soudage dans la direction x à la vitesse V, alors $x(t) = X - V.t$;

$y = Y$; $z = Z$, De plus la puissance transmise est donné par : $Q_0 = \mu UI$ avec μ son rendement, U la tension, I l'intensité du procédé TIG.

Un cut-off peut être utilisé sur une ellipsoïde de rayon a, b, c. A ces distances, l'amplitude n'est plus que de 5% l'amplitude maximum de la fonction.

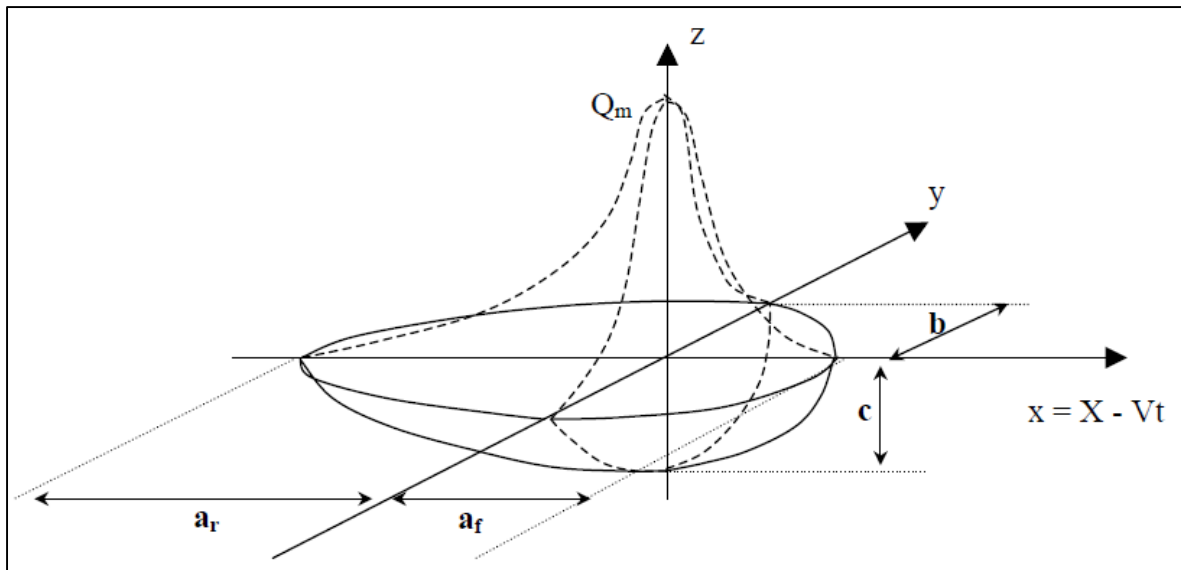


Figure III-3 Distribution en puissance de la source de chaleur en fonction Goldak [41]

Dans le cadre du soudage, l'avancement de la torche provoque une dissymétrie de la répartition. On peut représenter cet effet en posant un rayon pour l' « avant » de la source et un autre pour l' « arrière » de la source de chaleur (Figure III-3)

$$q(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{Q_0 12 \sqrt{3}}{(a_r + a_f) b c \sqrt{\pi^3}} \cdot \exp \left[-\frac{3(x-x_0)^2}{a_f^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2} \right], & x(t) < x_0 \\ \frac{Q_0 12 \sqrt{3}}{(a_r + a_f) b c \sqrt{\pi^3}} \cdot \exp \left[-\frac{3(x-x_0)^2}{a_r^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2} \right], & x(t) > x_0 \end{cases} \quad (3,6)$$

Avec a_f le rayon "avant" de l'ellipsoïde et a_r le rayon "arrière". On peut définir le rapport entre la partie "avant" et la partie "arrière" de la source : $f = a_r/a_f$. Cette valeur est variée de 1 à 4, dépend de la vitesse de la source de chaleur. Dans ce cas, nous choisissons 4 en supposant que : $a_r + a_f = 2a$.

III.6 Propriétés chimiques et mécanique et thermique et électrique de métal de base

Désignation accordant to EN 573 : EN AW-AlMgSi or EN AW-6060 T66

Désignation accordant to ISO : Al-MgSi (6060)

Tableau III-1 Fiche technique de Aluminium AlMgSi 0,5 [39]

Propriétés	Unité	Valeur
Général		
Densité	g/cm ³	2.70
Résistance à l'atmosphère normale		très bien
Résistance à l'atmosphère industrielle et marine		bien
La composition chimique en pourcentages massiques		
Silicium (Si)		0,3 - 0,6
Fer (Fe)		0,1 - 0,3
Cuivre (Cu)		0,1
Manganèse (Mn)		0,1
Magnésium (Mg)		0,35 - 0,6
Chrome (Cr)		0,05
Zinc (Zn)		0,15
Titane+Zirconium (Ti+Zr)		0,1
Ajouts supplémentaires		0,05 - 0,15
Aluminium (Al)		reste
Mécanique		
Module d'élasticité	N/mm ²	70.000
Résistance à la traction	N/mm ²	195 - 215
Allongement à la rupture	MPa	>150
Dureté Brinell	HB	60 - 70
Thermique		
Conductivité thermique	W/mK	210
Coefficient d'allongement longitudinal	10 ⁻⁶ •1/K	23.5
Electrique		
Conductivité électrique	m/Ω•mm ²	>30

III.7 Les caractéristiques de métal d’apport

AWS : A5.10 ER 5356

EN ISO : EN 18273 S Al 5356 (AG5)

Tableau III-2 Analyse chimique type de métal d’apport [40]

Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Cr	Al	Cu	Zn
0.05	0.13	0.13	4.9	0.10	0.12	solde	0.01	0.01

Tableau III-3 Propriétés mécaniques type de métal d’apport [40]

	Charge Rept.	Limite Elast.	Allongement	Résilience	Temp. D’essai	Dureté
	Rm N/mm	Rp (0.2) N/mm	A5d%	J	°C	HB
Brute de soudage	240	110	17		20	

III.8 Condition au limite et initial

Les conditionne aux limites pour la simulation numérique de model utilisé on fixe les deux éprouvettes soudées avec une force de serrage voir (**Figure III-4**).

Température ambiante 25C ° pour les conditions initiales.

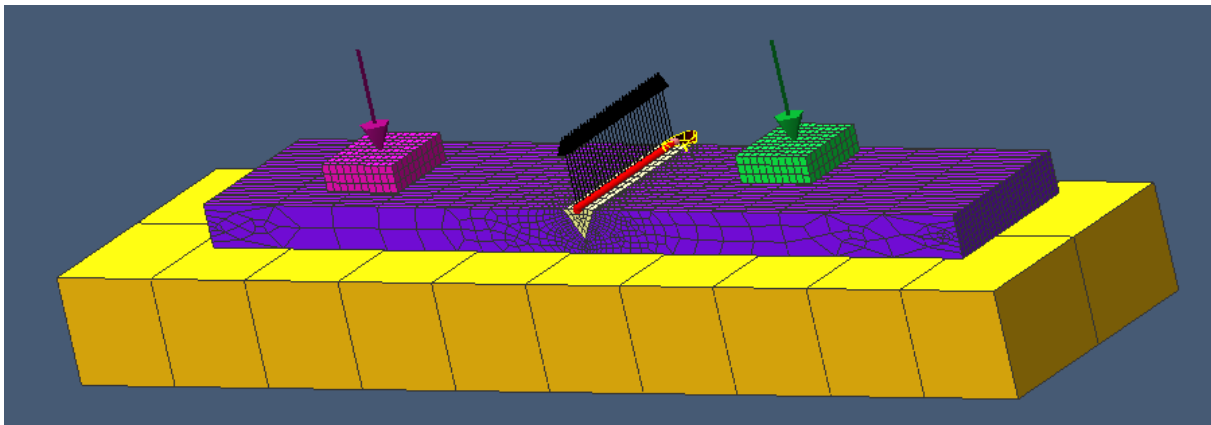


Figure III-4 Condition au limite et initial

III.9 Maillage

Les calculs numériques effectués par la méthode des éléments finis s'appuient sur un maillage associé à la géométrie du domaine dans lequel on désire effectuer la simulation. Leur précision dépend de la taille des éléments (le pas de discrétisation). Plus ces derniers sont petits plus les calculs sont précis et plus la simulation est lente. En pratique, il n'est pas possible de raffiner uniformément la taille des éléments autant que nécessaire, pour des raisons évidentes de temps et de coûts de calculs. Toutefois, il est possible de raffiner le maillage dans les zones critiques aux milieux de l'éprouvette dans la zone de cordon simulée. Dans notre étude, les zones les plus sensibles et qui demandent par conséquent un raffinement sont la zone de contact métal de base/métal d'apport. Le choix de la taille du maillage se fait par une simulation de convergence jusqu'à l'obtention de la meilleure taille compte tenu des conditions précision/temps. Donc la taille de maille est 0.5mm dans la structure en générale, 0.2mm dans la direction de «x» et 0.1mm dans la zone de soudure (**Figure III-5**).

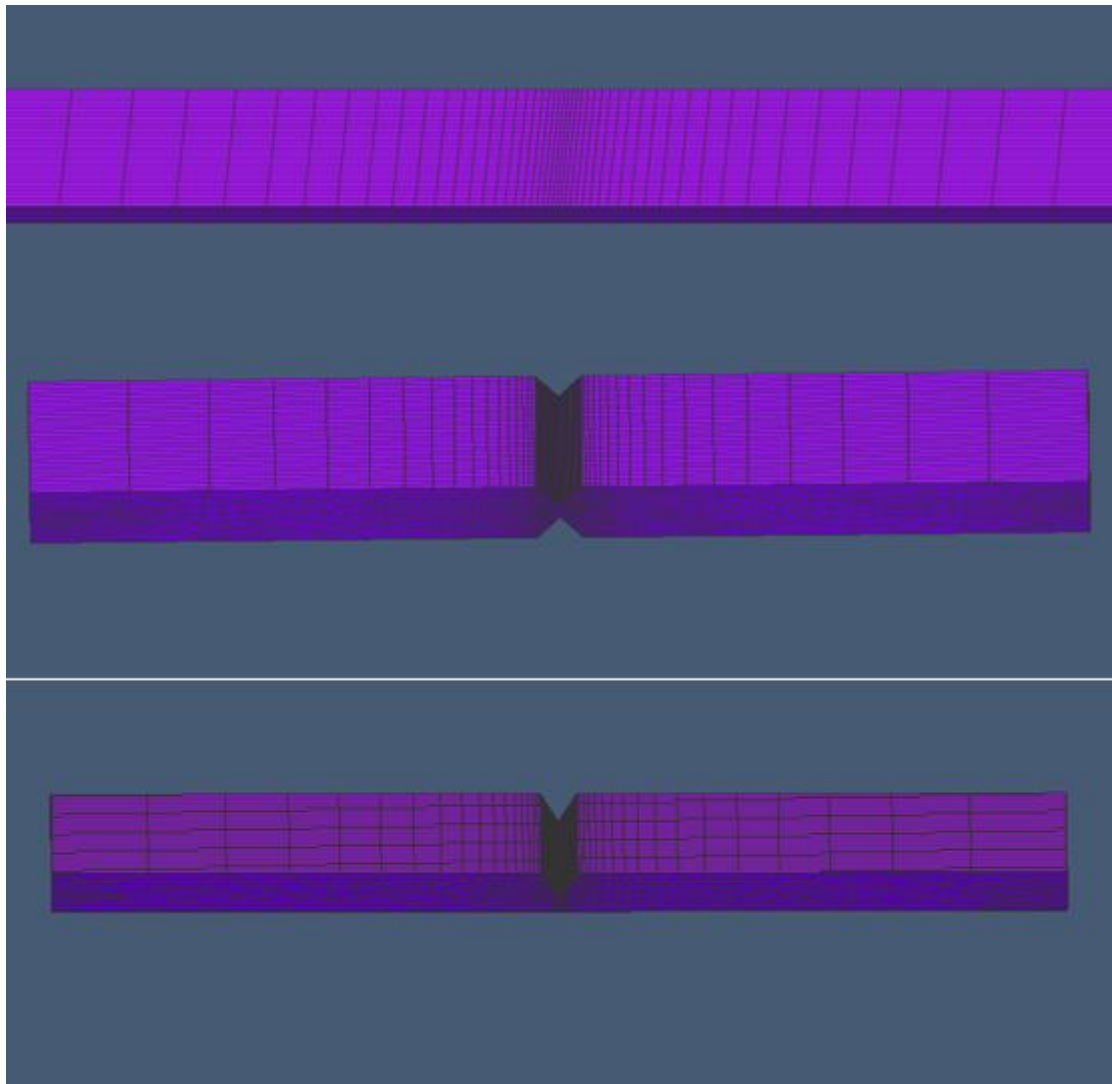


Figure III-5 Les modèles des maillages 3D de l'assemblage

III.10 Préparation de la simulation numérique

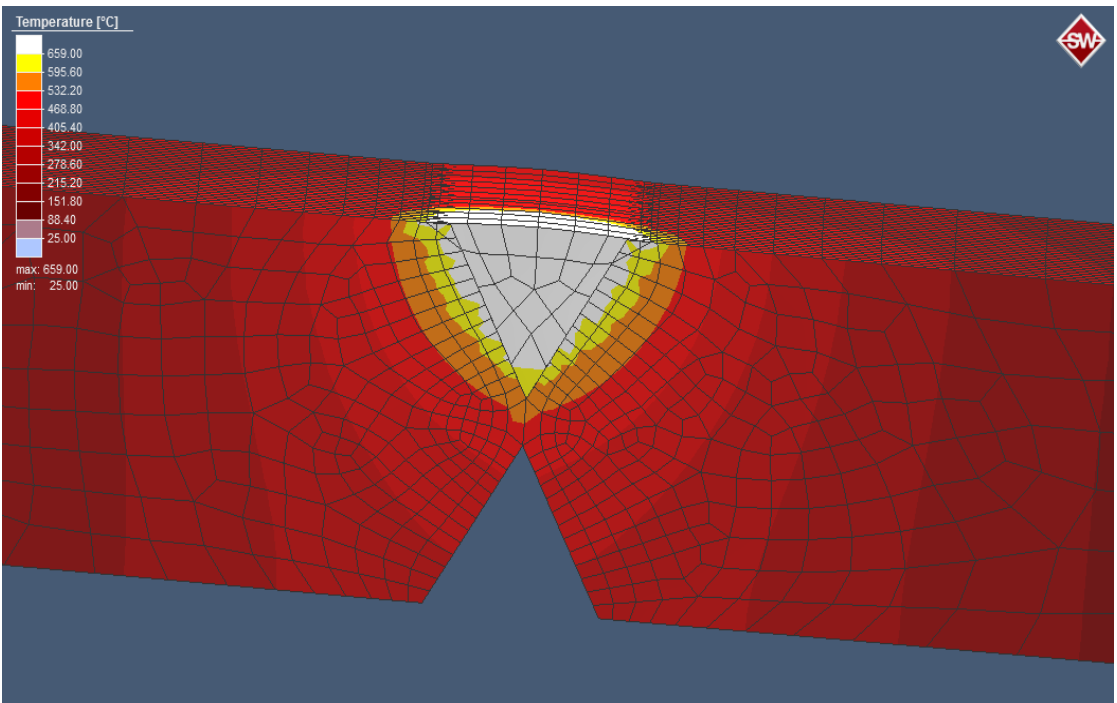
Les expériences consistaient en la modélisation numérique de plusieurs cas. Par logiciel SIMUFACT WELDING pour déterminer les paramètres de soudage des éprouvettes cas soudage en «plat, V, X».

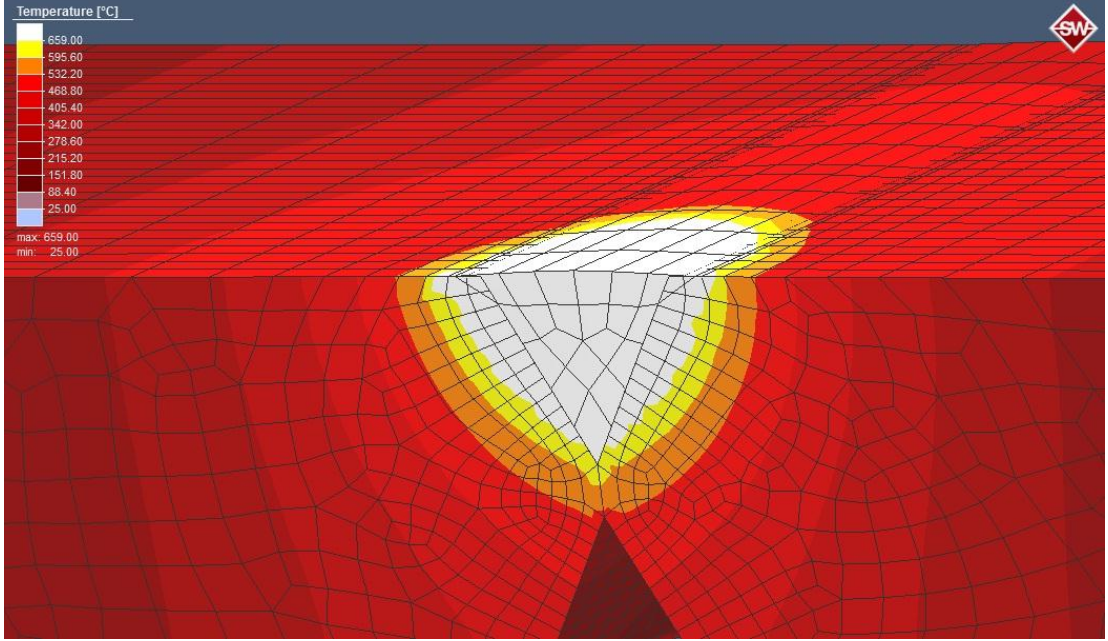
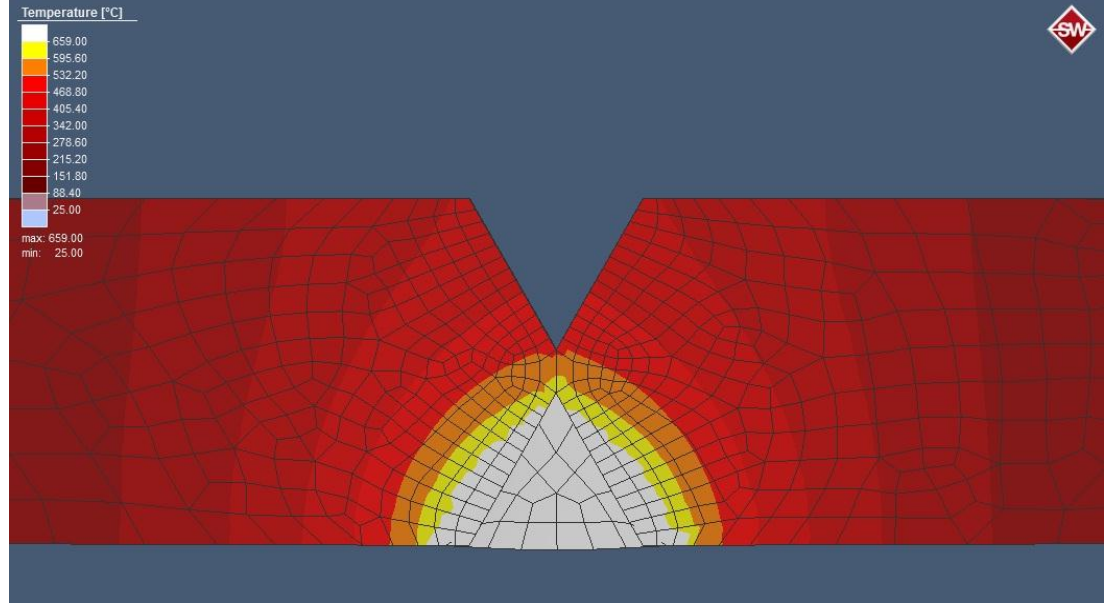
(Le courant la température le rendement déplacement de chaleur l'effet d'environnement l'effet de gaz le paramètre géométrique et physique ...)

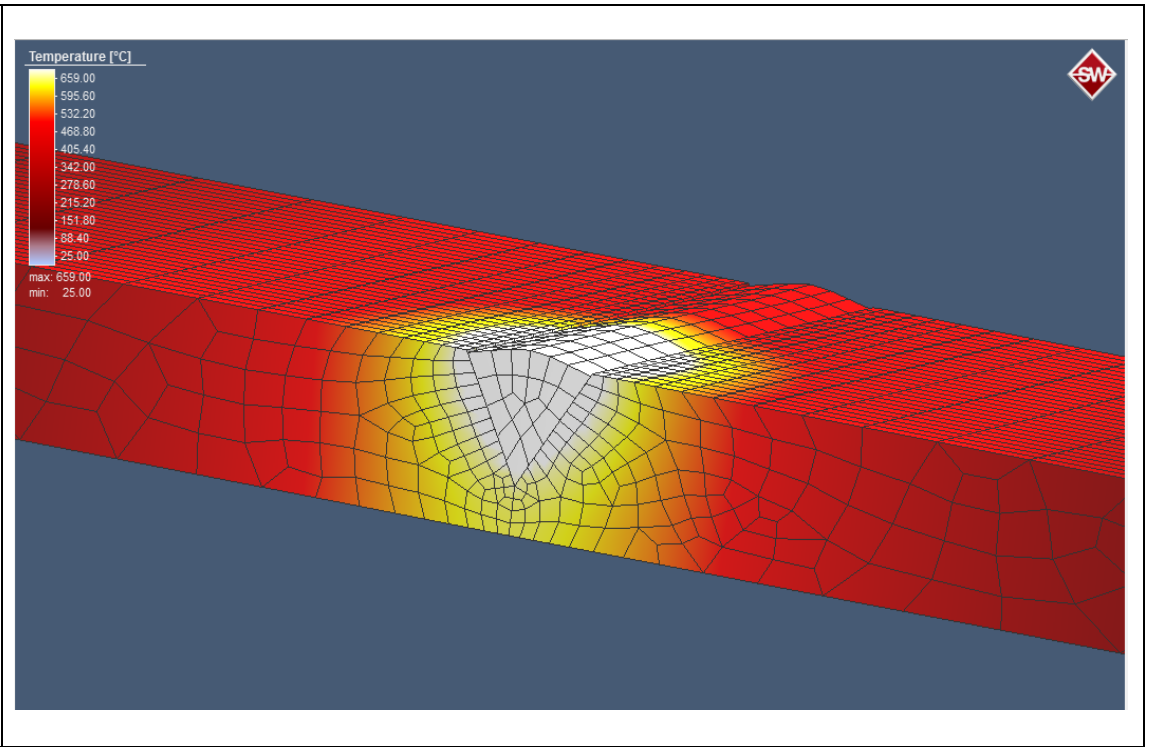
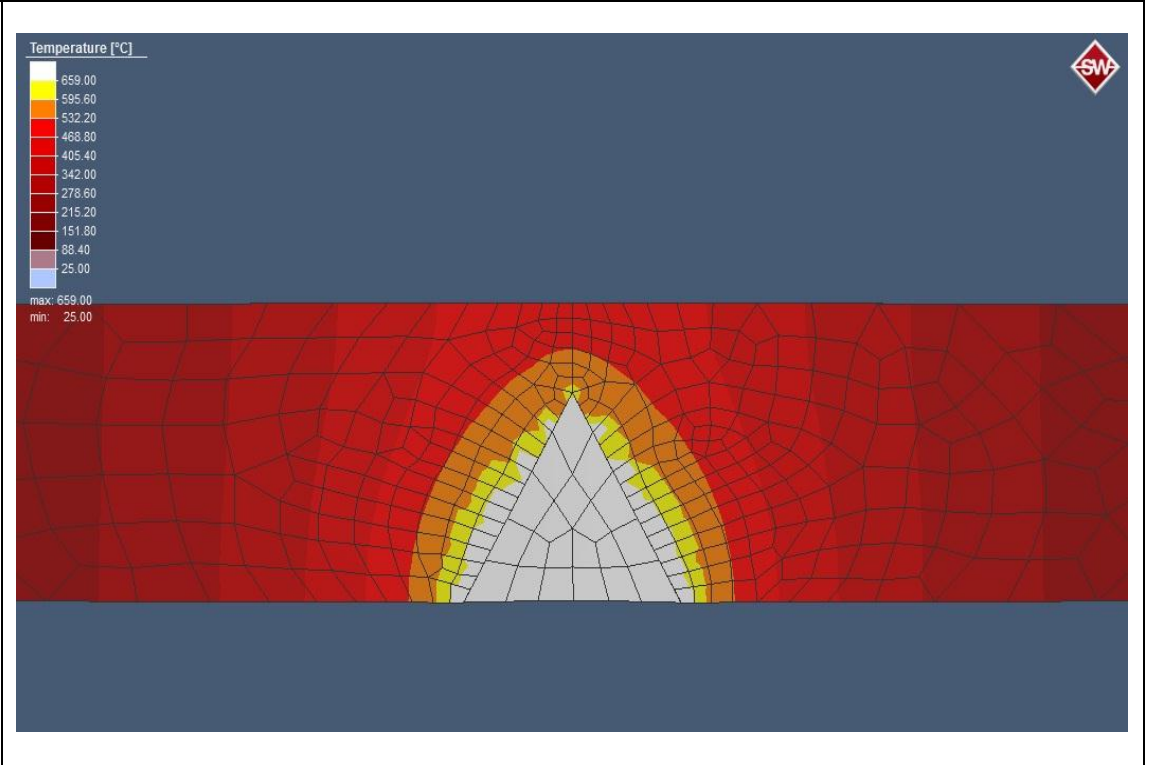
III.11 Résultats et interprétations

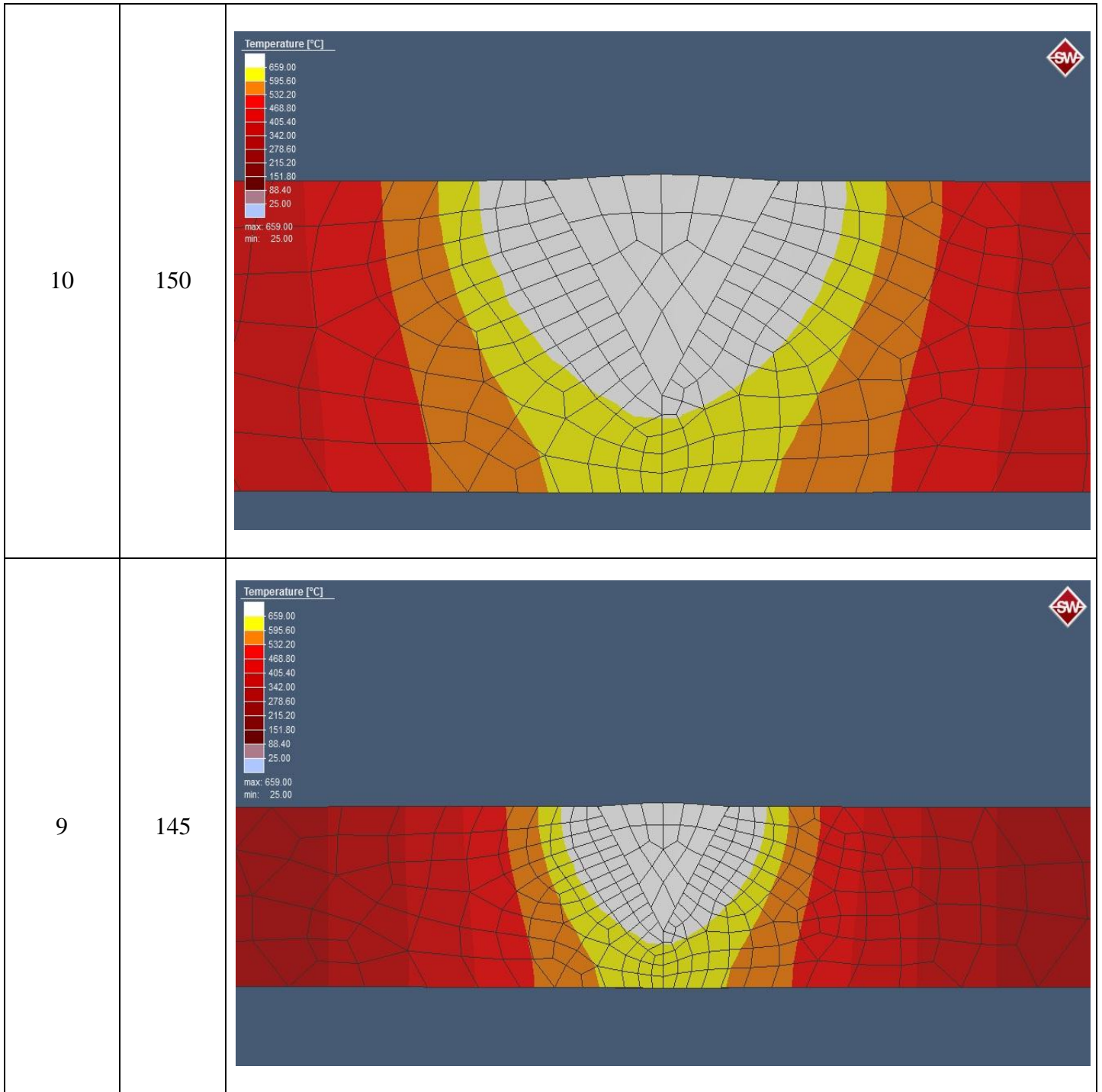
Après la simulation, nous avons analysé les résultats comme suit :

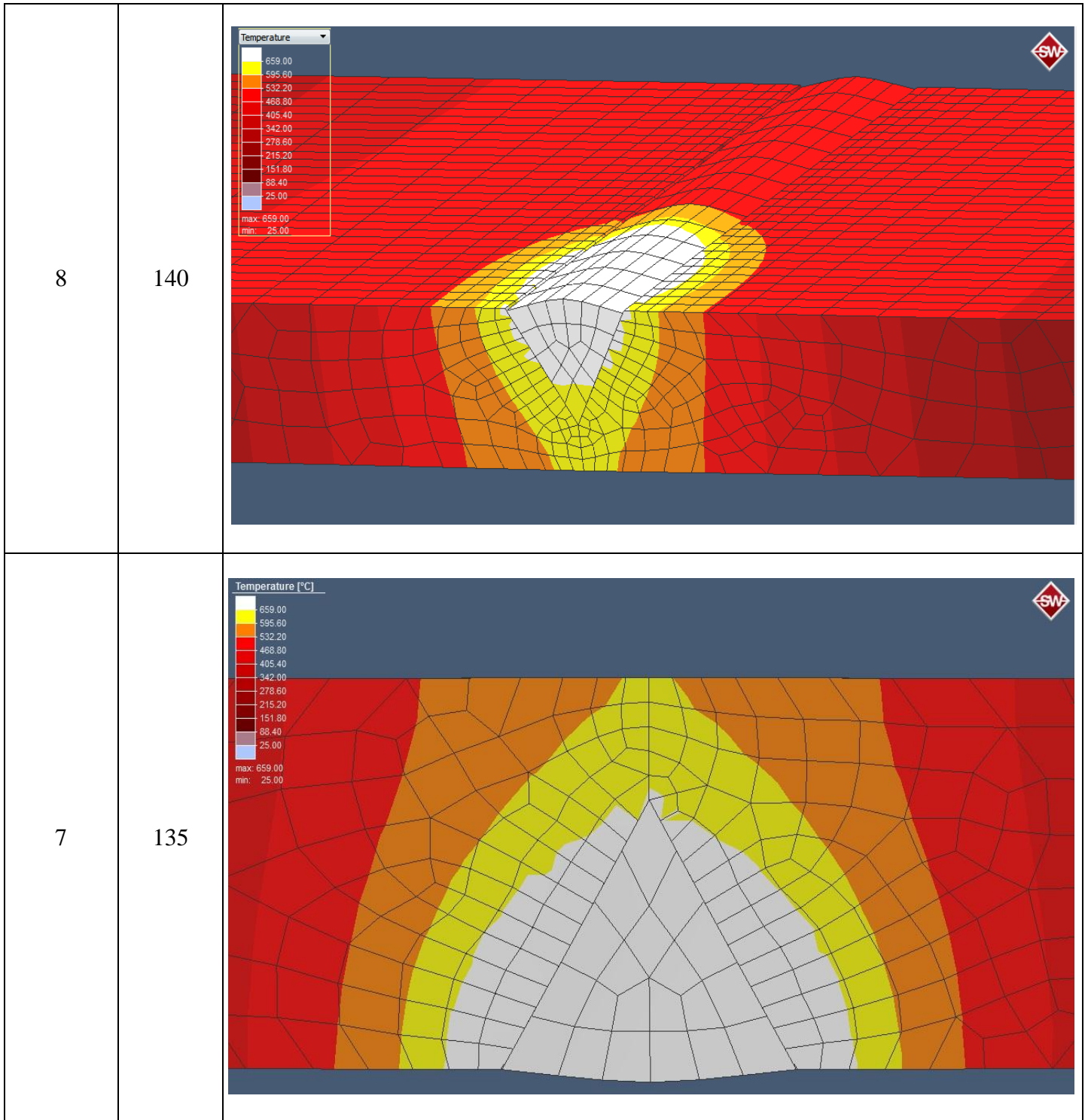
Tableau III-4 Validation des résultats et optimisation

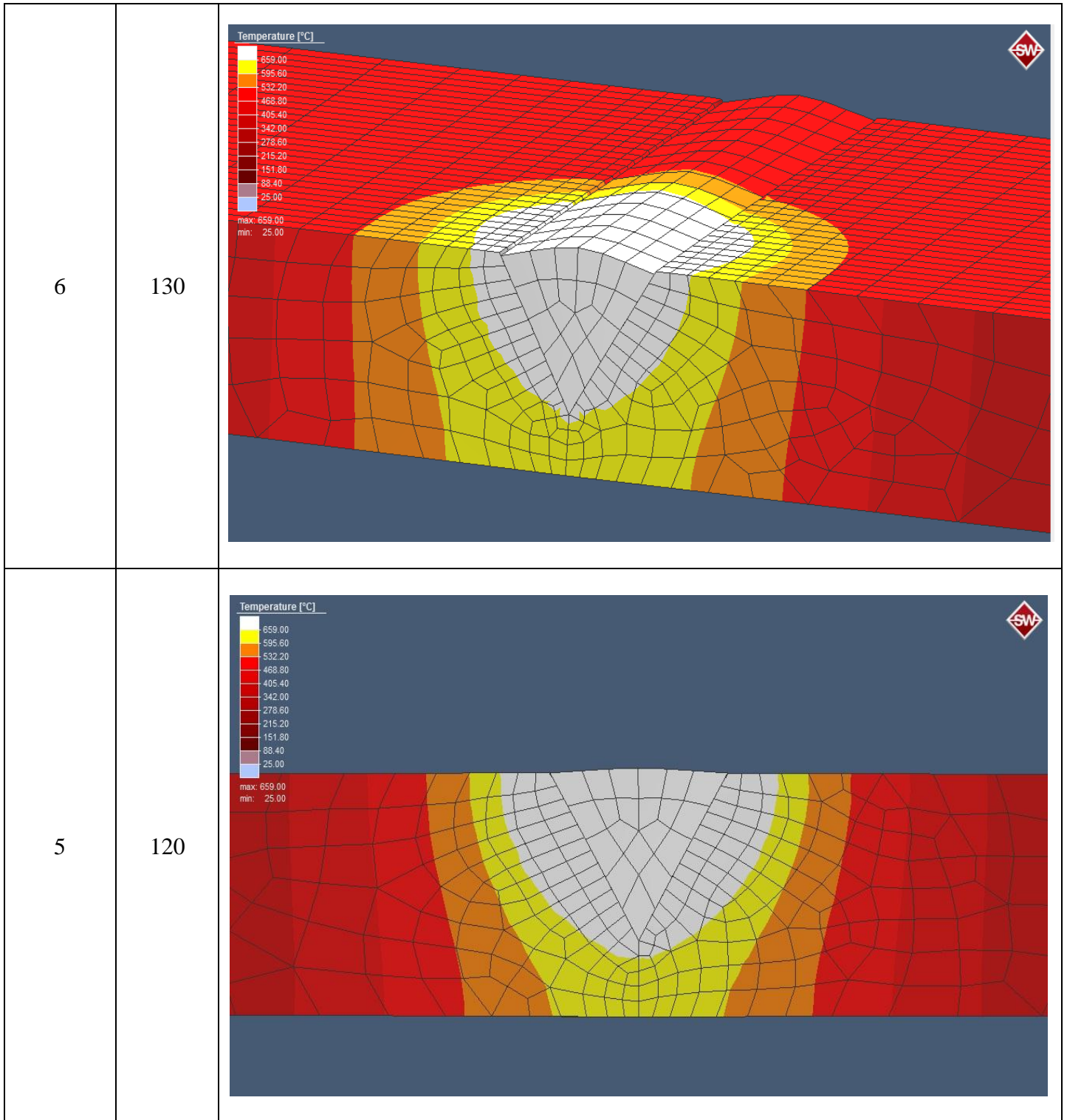
Epaisseurs (mm)	Intensité (A)	Validation et optimisation
15	180	

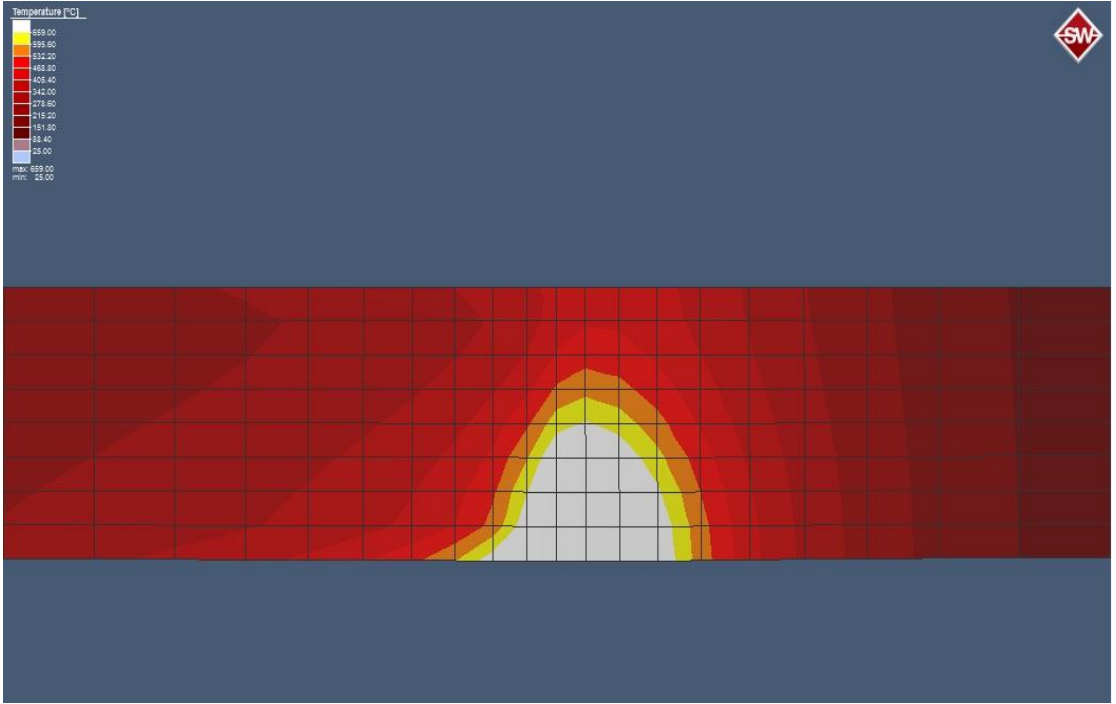
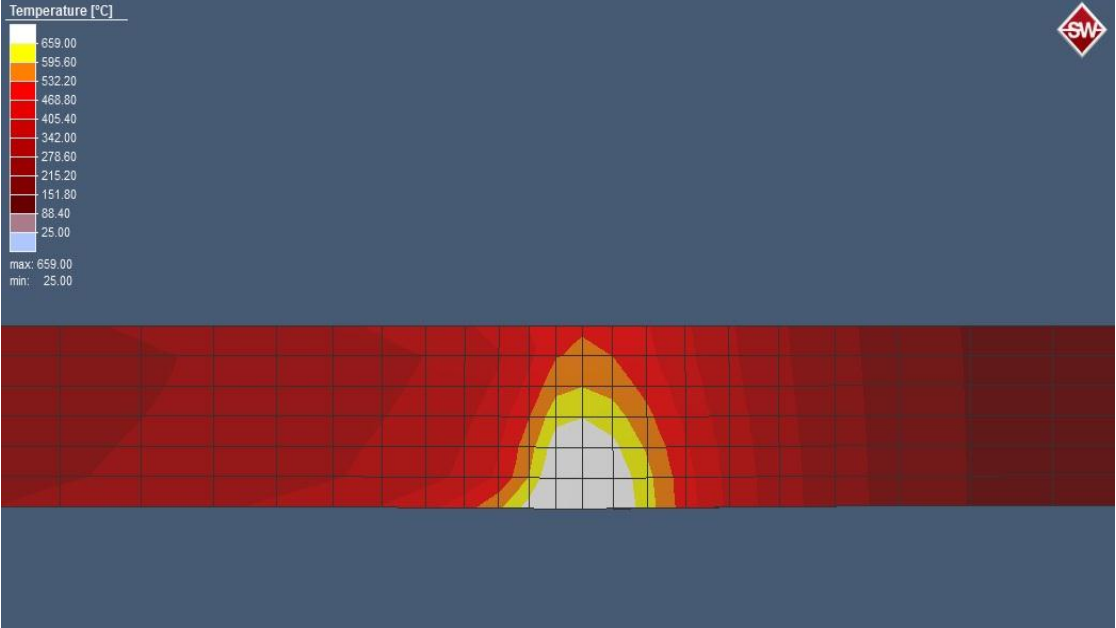
14	170	
13	165	

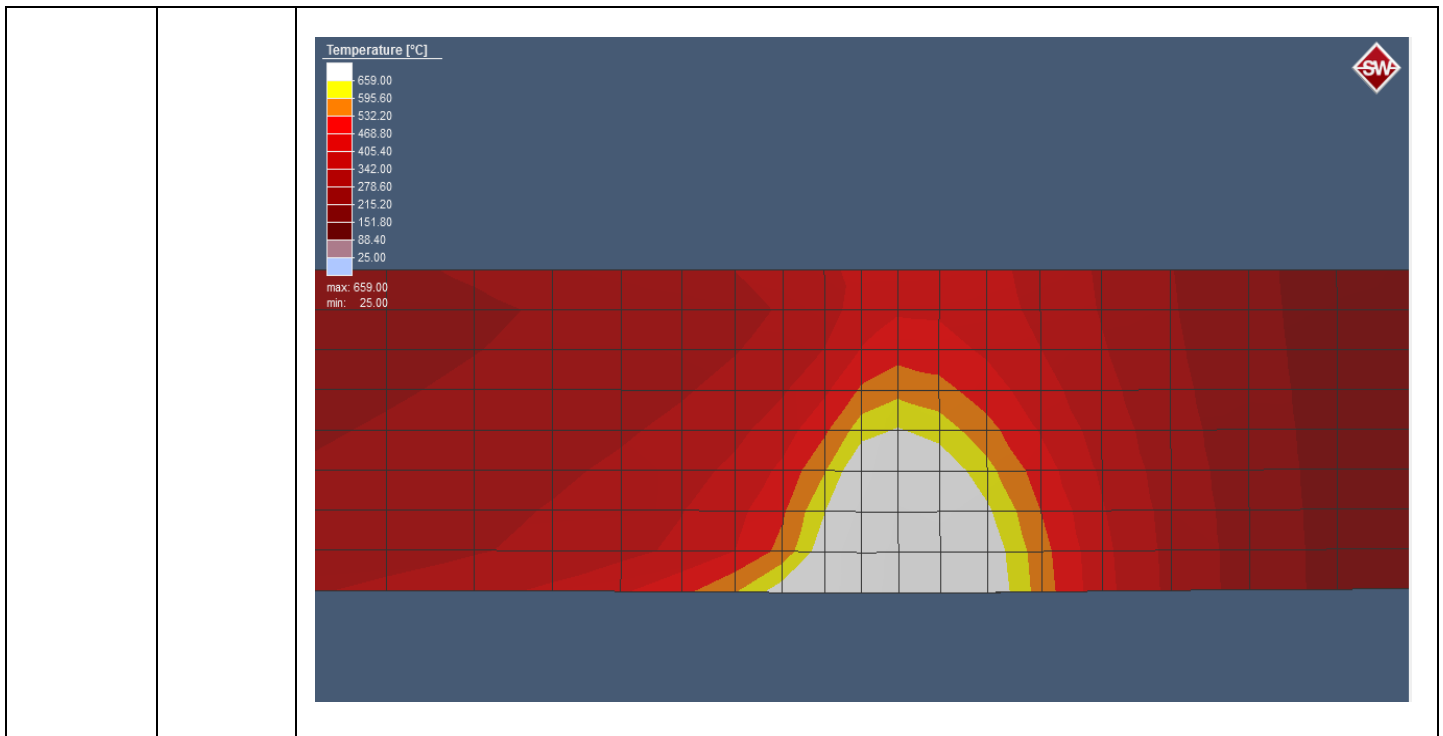
12	160	
11	155	







4	100	
3	90	
2	60	



III.11.1 Interprétations

Ce travail a porté sur la prédiction numérique de la distribution de la température, engendrées par le procédé de soudage TIG sur un alliage d'aluminium Al-MgSi (6060), par la méthode des éléments finis. Les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel Simufact.welding, en utilisant la méthode du goldak et une distribution du flux de chaleur pour simuler la source de chaleur.

Nous avons exposé la distribution de la température dans des différents instants de la simulation, ou on a remarqué que la répartition thermique à l'intérieur de la soudure (diffusion de la chaleur), s'effectue si on peut dire suivant des lignes isothermes. Ceci nous a permis de déterminer les frontières de la zone affectée thermiquement sous trois couleurs. La couleur blanc signifie la fusion de métal dans la température $+650^{\circ}\text{C}$ et la couleur jaune montre le début de fusion de métal à la température $+550^{\circ}\text{C}$, la couleur orange représente le chauffage de métal jusqu'à $T= 500^{\circ}\text{C}$.

Nous avons trouvé que pour une vitesse de soudage constant, la variation de la température est en relation avec l'intensité de soudage choisie et l'épaisseur de l'éprouvette.

III.11.2 Validation des résultats de l'étude expérimentale

La figure (III-6) illustre la relation entre intensité optimale et l'épaisseur de l'éprouvette a soudé par procédé TIG dans le cas d'un métal en aluminium et la position soudage bout à bout « plat, V, X ».

Cette relation se forme sous la forme d'une équation linéaire, $y = a*x + b$, où le coefficient a représente la pente de la droite. La pente(a) = 7.924 et « b =65.172 ». Comme indiqué dans la courbe, les points sont en bonne corrélation.

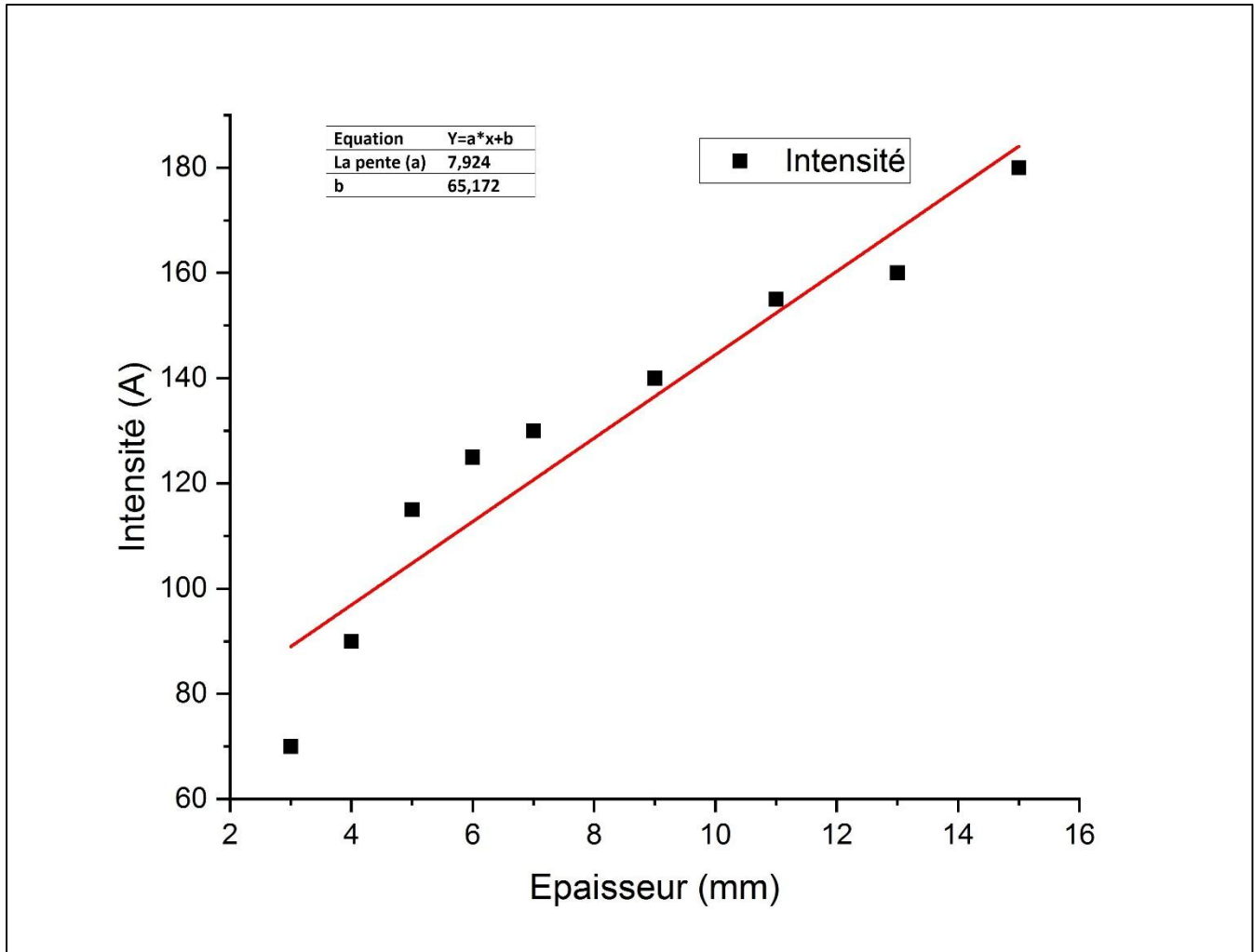


Figure III-6 L'intensité optimale en fonction d'épaisseur pour validation

La figure (III-6) 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 » pour cela). Afin d'extraire l'équation de la courbe, qui est une équation linéaire dont l'expression $y = a*x + b$, on peut remarquer facilement en chaque fois qu'augmenté l'épaisseur on a augmenté le courant.

III.11.3 Optimisation

La figure (III-7) illustre la relation entre intensité optimale et l'épaisseur de l'éprouvette a soudé par procédé TIG dans le cas d'un métal en aluminium et la position soudage bout à bout « plat, V, X ».

Cette relation se forme sous la forme d'une équation linéaire, $y = a*x + b$, où le coefficient a représente la pente de la droite. La pente(a) = 7.64835 et « b =70.7033 ». Comme indiqué dans la courbe, les points sont en bonne corrélation.

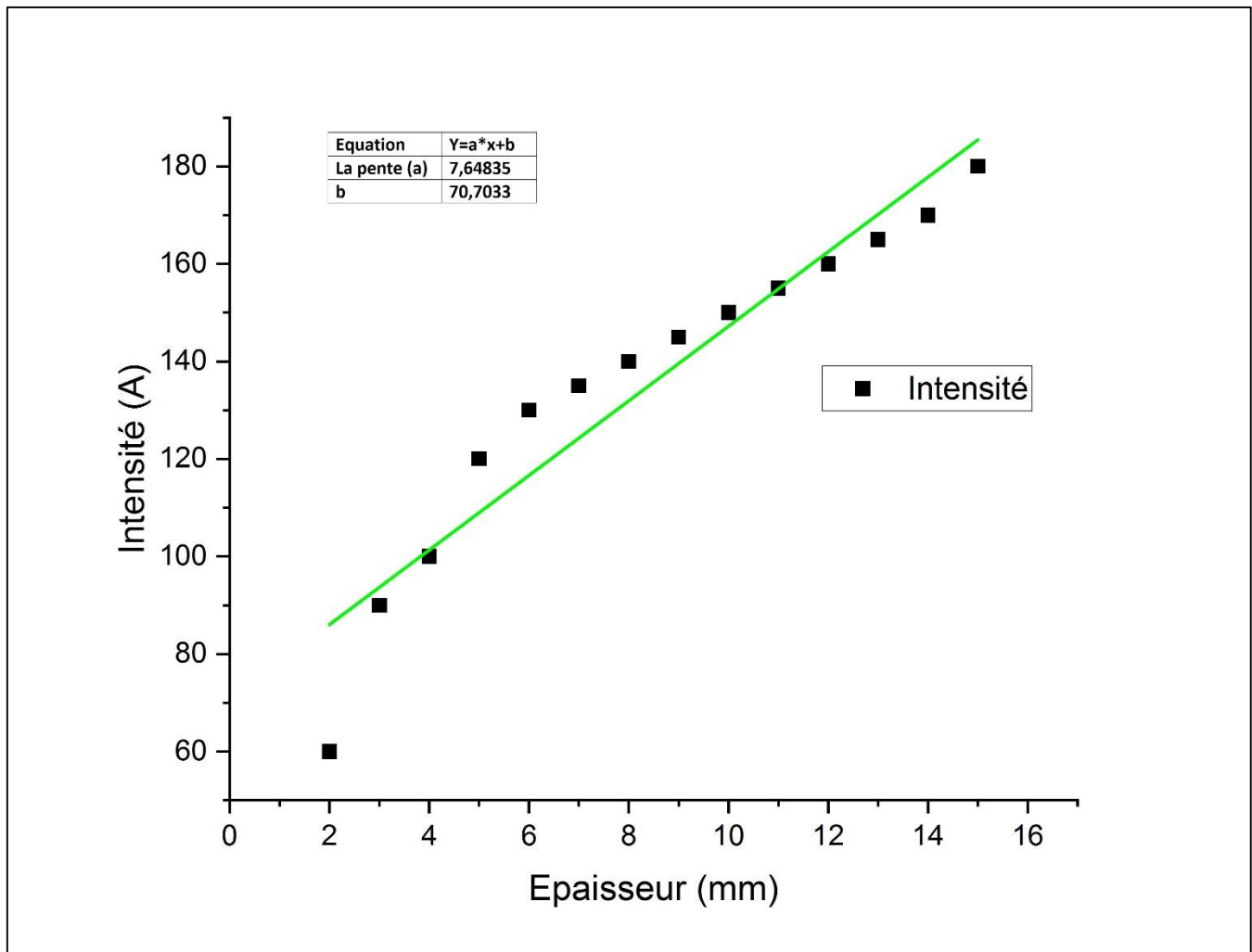


Figure III-7 L'intensité optimale en fonction d'épaisseur pour optimisation des résultats

La figure (III-7) montre les résultats de la simulation numérique. de la même manière que précédemment, en utilisant le logiciel ORIGIN on obtient le graphe qui représente la variation de courant en fonction à l'épaisseurs des éprouvettes pour d'extraire l'équation de la courbe, qui est une équation linéaire dont l'expression $Y=ax+b$.

III.12 Configuration de générateur (MATRIX 3000 AC/DC)

■ Tableau de commande

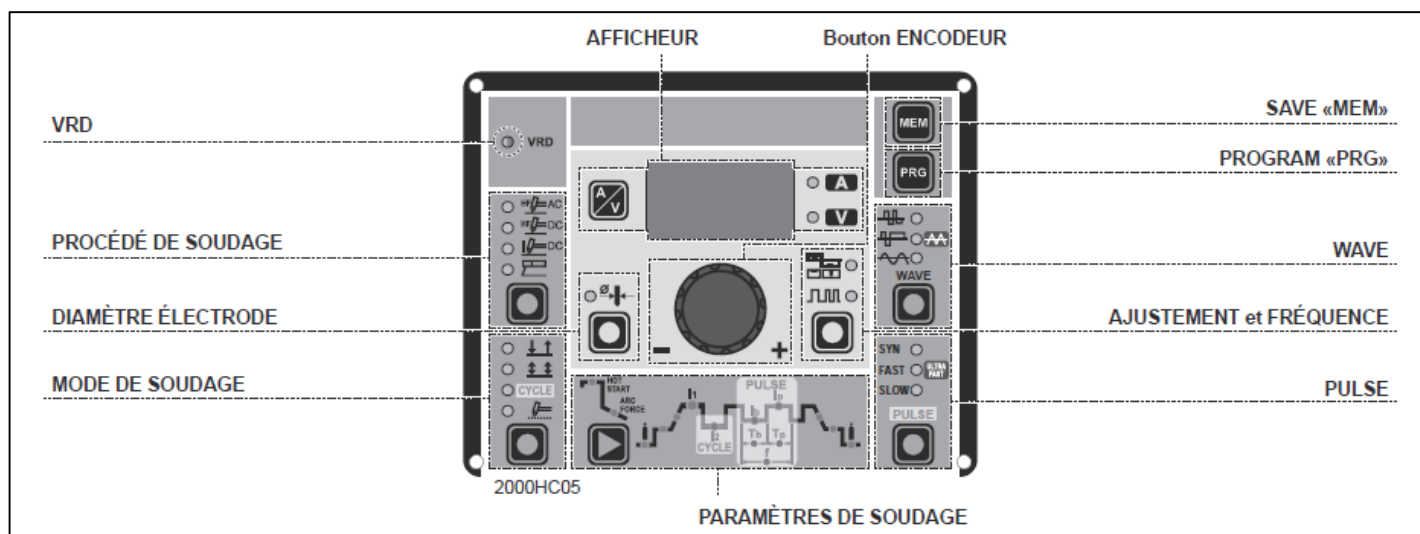


Figure III-8 Tableau de commande [42]

■ VRD

Le «Voltage Reduction Device» (VRD) est un dispositif de sécurité permettant de réduire la tension. Il empêche la formation de tensions sur les bornes de sortie susceptibles de représenter un danger pour les personnes. LED bicolore (éteinte - rouge - verte) de signalisation de mise en service du dispositif VRD.

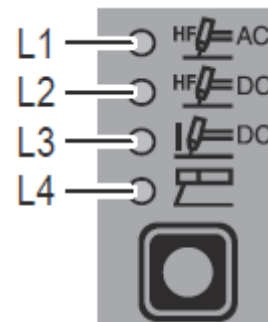


Les configurations standards et prédéfinies par la société ne prévoient pas que la fonction VRD soit activée sur le poste à souder et donc cette LED, normalement, est éteinte. Pour l'activation du dispositif VRD voir le paragraphe correspondant.

■ 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 :

- L1 TIG AC AVEC AMORÇAGE HF
- L2 TIG DC AVEC AMORÇAGE HF
- L3 TIG DC AVEC AMORÇAGE TYPE «LIFT»
- L4 ÉLECTRODE (MMA)



■ DIAMÈTRE ÉLECTRODE

Permet, pendant le procédé de soudage TIG avec amorce HF, de configurer avec la touche et/ou de modifier avec le bouton ENCODEUR le diamètre de l'électrode en tungstène utilisée, afin de mieux contrôler de façon synergique l'amorce de l'arc en CA.



ATTENTION : Le diamètre de l'électrode ne peut pas être sélectionné lorsque la configuration spécial est active sur la machine à souder.

■ MODE DE SOUDAGE

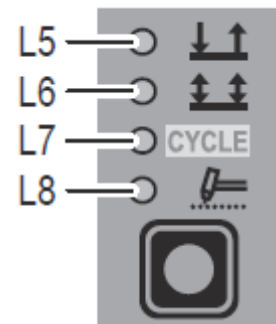
La machine à souder MATRIX offre 4 modes de soudage. A chaque pression de la touche, la machine à souder sélectionne le procédé de soudage indiqué par la LED correspondante qui s'éclaire fixement, dans l'ordre suivant :

L5 (2 TEMPS)

L6 (4 TEMPS)

L7 CYCLE

L8 POINTAGE



- **L5 (2 TEMPS)**

En appuyant sur la touche torche on commence à souder avec le courant initial (si une rampe de montée est configurée) tandis qu'en relâchant on termine la soudure, en arrivant au courant final (si une rampe d'évanouissement est configurée).

- **L6 (4 TEMPS)**

Le soudage TIG s'effectue de la manière suivante :

- En appuyant sur la touche torche on commence à souder avec le courant initial.
- En lâchant la touche torche la rampe de montée est effectuée

(Si elle est présente) et le courant passe à la valeur principale « I1 ».

- En appuyant sur la touche torche la rampe d'évanouissement est effectuée (si elle est présente) et le courant passe à la valeur finale.

- En lâchant la touche le cycle de soudage prend fin.

- **L7 CYCLE**

Le soudage TIG, lorsque cette fonction est activée, s'effectue de la manière suivante :

- En appuyant sur la touche torche on commence à souder avec le courant initial.

- En lâchant la touche torche la rampe de montée est effectuée

(Si elle est présente) et le courant passe à la valeur principale I1.

- En appuyant et en lâchant la touche torche après une durée inférieure à 1 seconde, le courant de soudage passe à la valeur.

CYCLE (I2) ; en répétant l'opération il est possible de se déplacer un nombre illimité de fois entre les deux niveaux de courant (I1, I2).

- En appuyant et en maintenant la touche torche appuyée (pendant plus d'une seconde) on sort du cycle, la rampe d'évanouissement est effectuée (si elle est présente) et le courant passe à la valeur finale). En lâchant la touche torche, le cycle de soudage prend fin.

Ce mode de soudage est particulièrement indiqué pour souder des profilés ayant des épaisseurs différentes, lorsqu'une variation continue du courant est nécessaire.

Pendant le soudage de l'aluminium il permet en outre d'avoir un courant initial plus élevé, ce qui favorise le préchauffage de la pièce.

- **L8 POINTAGE**

Il permet d'effectuer, en appuyant sur la touche torche, le pointage pour une durée préréglée (en secondes) au terme de laquelle l'arc s'éteint automatiquement. La fonction soudage par points se divise en 3 types :

- Soudage par points en TIG AC et TIG LIFT DC.
- Soudage par points en TIG HF DC avec fonction point simple coldTack.
- Soudage par points en TIG HF DC avec fonction Multi-coldTack.

Consultez les paragraphes concernés dans les pages suivantes de ce manuel.

■ AFFICHEUR

Fiche les sélections effectuées à l'aide des différentes touches (qui correspondent à des LED allumées ou clignotantes) et les réglages effectués à l'aide du Bouton ENCODEUR.

La touche  permet en outre d'afficher :

- **L32 AMPERE (COURANT)**
- lorsque la machine est au repos, les Ampères (A) préréglés.
- au cours de la phase de soudage, les ampères (A) réels utilisés par l'opérateur pour souder.

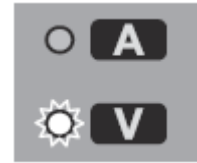


ATTENTION : LED **L32** éclairée fixement.

- **L33 VOLT (TENSION)**

• Les volts (V) réels présents sur les bornes de soudage (la valeur affichée ne peut être ni modifiée ni réglée)

ATTENTION : LED **L33** éclairée fixement.



- **BOUTON ENCODEUR**

Permet de régler et modifier les paramètres de soudage, selon la LED correspondante éclairée et la valeur apparaissant sur l'afficheur, nécessaires pour que la machine fonctionne correctement.



- **SAVE «MEM»**

Elle permet de sauvegarder des paramètres dans les programmes de soudage.



- **PROGRAM «PRG»**

Elle permet de retrouver les programmes de soudage.



- **WAVE**

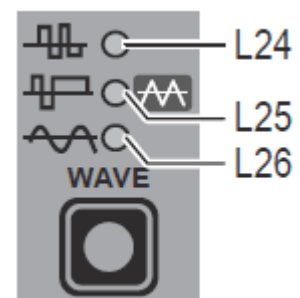
Permet de contrôler, pendant le procédé de soudage TIG CA avec amorce HF, les formes d'onde suivantes :

- **L24 DYNAMIC TIG**

- **L25 SPEED TIG**

- **L25 COLD TIG**

- **L26 SOFT TIG**



- **L24 DYNAMIC TIG**

Onde carrée : dynamique élevée de l'arc pour toutes les applications.

- **L25 SPEED TIG**

Onde mixte : excellente pénétration avec vitesse élevée de soudage et basse consommation de l'électrode.

- **L25 COLD TIG**

Onde triangulaire : faible apport thermique avec réduction des déformations, idéale pour les petites épaisseurs.

- **L26 SOFT TIG**

Onde sinusoïdale : arc doux et souple avec bruit réduit, idéale pour les épaisseurs moyennes.

ATTENTION : LED L24, L25, L26 éclairée fixement.

■ **LA BALANCE ET LA FREQUENCE**

Permet de configurer avec la touche, pendant le procédé de soudage

TIG CA avec amorce HF, l'un des paramètres suivants :

L30 ÉQUILIBRAGE du TEMPS et de l'AMPLITUDE DU COURANT CA DE SOUDURE (BALANCE PLUS)

L31 FRÉQUENCE DU COURANT CA DE SOUDAGE

- **L30 ÉQUILIBRAGE DU TEMPS ET DE l'AMPLITUDE DU COURANT CA DE SOUDURE (BALANCE PLUS)**

Possibilité de régler séparément le temps (t) et l'amplitude (I) du courant ou simultanément les deux paramètres de permanence de l'électrode positive ou négative. Ces réglages garantissent un contrôle parfait de la pénétration et de la propreté ainsi qu'une réduction importante des incisions latérales.

- **L31 FRÉQUENCE DU COURANT CA DE SOUDAGE**

La fréquence élevée permet de souder, avec d'excellents résultats, de très petites épaisseurs, tandis que la basse fréquence est idéale pour souder des épaisseurs moyennes ou dont les pans ont été mal préparés.

ATTENTION : LED L31 éclairée et clignotante.

■ **PULSE**

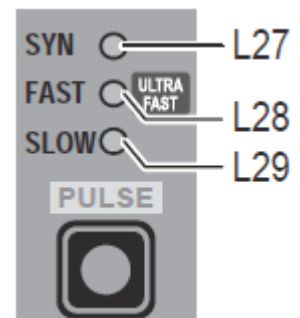
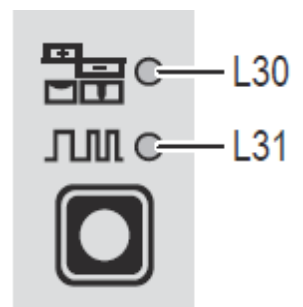
Permet de configurer avec la touche, pendant l'un des 3 procédés de soudage TIG, l'un des 4 modes de pulsation présents sur la machine à souder.

L27 SYN PULSE

L28 FAST PULSE

L28 ULTRA FAST PULSE

L29 SLOW PULSE



- **L27 PULSE SYNERGIQUE (SYN PULSE)**

ATTENTION : LED L27 éclairée fixement.

Activable uniquement avec les procédés de soudage TIG DC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage type «Lift».

- **L28 PULSE ULTRA RAPIDE (FAST PULSE)**

ATTENTION : LED L28 éclairée fixement.

Activable uniquement avec les procédés de soudage TIG DC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage type «Lift».

- **L28 PULSE ULTRA RAPIDE (ULTRA FAST PULSE)**

ATTENTION : LED L28 éclairée et clignotante.

Activable uniquement avec les procédés de soudage TIG DC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage type «Lift».

- **L29 PULSE LENT (SLOW PULSE) ATTENTION : LED L29 éclairée fixement.**

Programmable uniquement avec les 3 procédés de soudage TIG.

ATTENTION : L'opérateur peut aussi décider de souder en TIG sans utiliser un mode de pulsation ; dans ce cas les 4 LED sont éteintes.

■ 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...

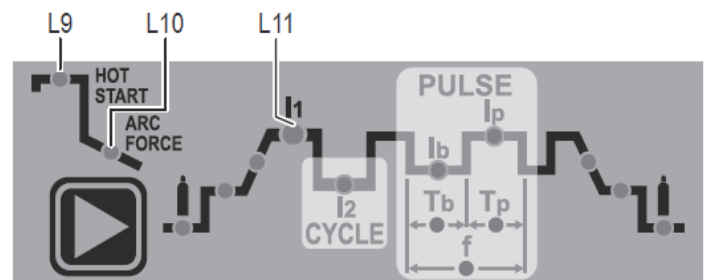
1A - CONFIGURATION STANDARD SOUDAGE A ELECTRODE (MMA)

Elle permet, lorsqu'on utilise le procédé de soudage à électrode, de sélectionner les paramètres de soudage suivants, en fonction de la LED clignotante correspondante :

L9 HOT START

L10 ARC FORCE

L11 COURANT PRINCIPAL DE SOUDAGE
I1



1B - CONFIGURATION STANDARD SOUDAGE TIG

Elle permet, lorsque l'un des 3 procédés de soudage TIG disponibles sur le poste à souder est activé, de sélectionner les paramètres de soudage suivants, en fonction de la LED clignotante correspondante :

- **L12 DUREE DU PRÉ-GAZ**
- **L13 DUREE DE LA RAMPE DE MONTÉE**
- **L14 DUREE DU COURANT DE BASE T_b**

ATTENTION : Programmable uniquement avec le mode pulsé slow activé.

- **L15 DUREE DU COURANT DE PIC T_p**

ATTENTION : Programmable uniquement avec le mode pulsé slow activé.

- **L16 DUREE DE L'ÉVANOUISSEMENT**
- **L17 DUREE DU POST-GAZ**
- **L18 COURANT INITIAL DE SOUDAGE**
- **L11 COURANT PRINCIPAL DE SOUDAGE I_1**
- **L19 COURANT de CYCLE I_2**

ATTENTION : Programmable uniquement avec le mode de soudage cycle actif.

- **L20 COURANT DE BASE I_b**

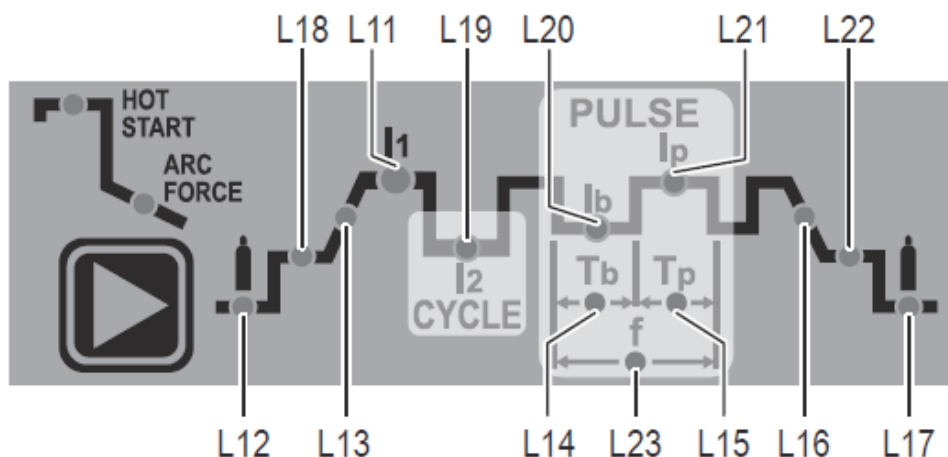
ATTENTION : Programmable uniquement avec au moins un mode pulsé activé.

- **L21 COURANT DE PIC I_p**

ATTENTION : Programmable uniquement avec au moins un mode pulsé activé.

- **L22 COURANT FINAL DE SOUDAGE**
- **L23 FRÉQUENCE DE PULSATION f**

ATTENTION : PAS programmable avec le mode de pulsation slow (lent) actif.



2 - CONFIGURATION SPÉCIALE (UNIQUEMENT POUR SOUDEURS EXPERIMENTES) SOUDAGE TIG

Dans cette configuration il est également possible de régler, outre les paramètres déjà définis dans la configuration standard, les paramètres suivants :

- **L9 COURANT d'AMORÇAGE**

ATTENTION : Programmable uniquement avec les procédés de soudage TIG AC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage HF.

- **L9 DUREE DU TEMPS D'AMORÇAGE**

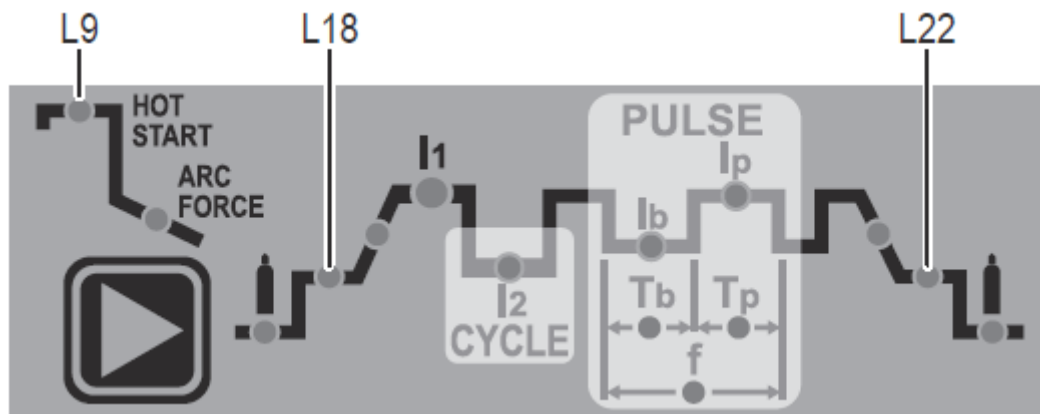
ATTENTION : Programmable uniquement lorsque le procédé de soudage TIG CA avec amorce HF est actif.

- **L18 COURANT INITIAL DE SOUDAGE**

ATTENTION : Programmable uniquement avec les procédés de soudage TIG AC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage HF et mode de soudage 2 temps activés.

- **L22 COURANT FINAL DE SOUDAGE**

ATTENTION : Programmable uniquement avec les procédés de soudage TIG AC avec amorçage HF ou TIG DC avec amorçage HF et mode de soudage 2 TEMPS activés.



ATTENTION : L'activation de ces paramètres de soudage spéciaux doit être faite uniquement par un personnel qualifié ou formé par des techniciens [42].

III.13 L'application numérique

Nous avons développé une application pour le calcul des paramètres de soudure bord à bord des différents cas pour le post-soudage TIG MATRIX 3000. Il vous suffit de télécharger l'application sur votre smartphone ou votre tablette Android pour commencer. En utilisant cette application, vous bénéficierez de plusieurs avantages, notamment :

- Une interface conviviale et facile à utiliser.
- Aucune connexion Internet requise, vous pouvez donc utiliser l'application où que vous soyez.
- Des résultats instantanés affichés rapidement.

Permettez-moi de vous guider à travers un exemple. Veuillez lancer l'application sur votre smartphone ou votre tablette pour continuer.

III.13.1 Les interfaces de l'application

Notre application est spécifiquement conçue pour le générateur TIG MATRIX 3000 (**figure III-9**) Son objectif principal est de faciliter le choix de la configuration appropriée pour le soudage en trois catégories distinctes :

- Réglage de l'interface principale
- Aide au choix de l'électrode
- Calcul automatique du débit de gaz et du diamètre de la buse nécessaire

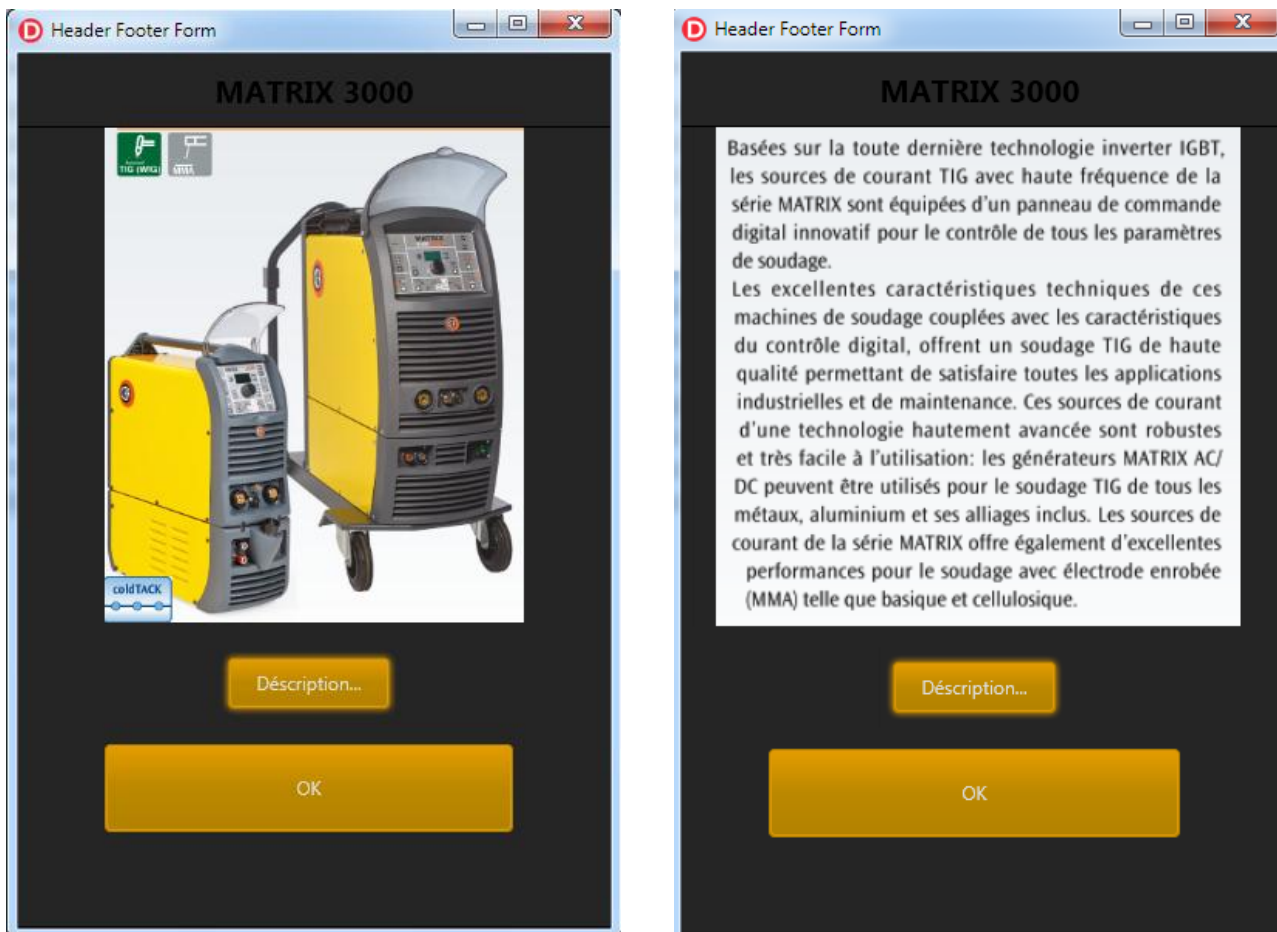


Figure III-9 Présentation de l'interface de l'application

III.13.2 L'Interface des entres (inputs)

L'application offre une interface conviviale et intuitive qui permet aux utilisateurs de choisir les techniques de soudage appropriées. Vous pouvez entrer le type de matériau utilisé ainsi que la position de soudage pour obtenir des recommandations adaptées.

Cette application prend en charge deux positions courantes pour les soudures bord à bord, telles qu'illustrées dans (la figure III-10).

Elle supporte également deux cas de configuration géométrique. Soit de même épaisseur soit d'épaisseur différente.

Exemple :

Technique de soudure : soudure bord à bord

Choix de la pièce à souder : Aluminium

Configuration de la géométrie : (9) mm

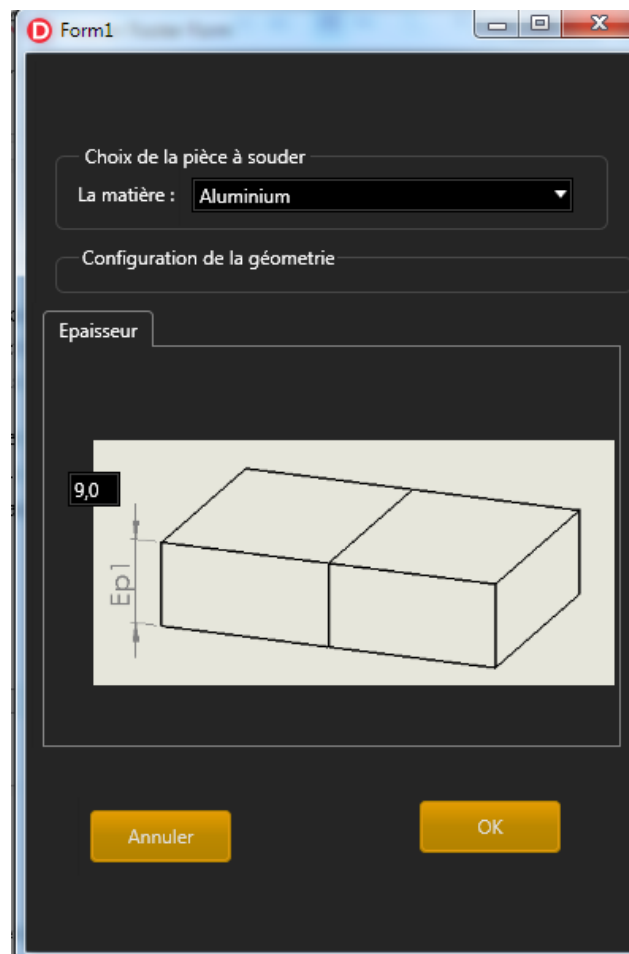


Figure III-10 L'Interface des entres (inputs)

III.13.3 L'interface de réglage de poste (MATRIX 3000 AC/DC)

Après avoir choisi les paramètres mentionnés précédemment, vous accéderez à une interface qui présente des options distinctes.

- Option concerne les réglages de la machine à souder
- La taille des électrodes
- L'intensité de travail
- Le temps de montée
- Evanouissement avec les intensités de départ et finale
- Les temps de pré-gaz et de post-gaz

Exemple :

- Le procédé de soudage : TIG AC avec amorçage HF
- Le diamètre d'électrode : 1,6 mm et 2,4 mm
- Le mode de soudage : 2 TEMPS
- Ampérage : 135,488
- Voltage : 17 V
- Wave : Dynamique TIG
- Fréquence : 100 Hz
- L'évanouissement de l'arc : 1,14s
- Intensité départ / finale = 45
- Pré de gaz : 0,5s
- Durée de poste gaz : 3s



Figure III-11 L'interface de réglage de poste pour soudage bout à bout

III.13.4 Interface d'électrodes utilisée

Dans notre application, la sélection des électrodes est automatisée. Elle identifie les électrodes compatibles et recommande celles qui conviennent le mieux à votre soudage bord à bord. Les électrodes qui ne sont pas recommandées en raison de risques potentiels, tels que le faible risque de rayonnement lors du meulage de l'électrode, sont désélectionnées. Pour chaque électrode sélectionnée, l'application fournit des informations détaillées sur ses caractéristiques spécifiques, vous permettant ainsi de prendre une décision éclairée sur le choix de l'électrode appropriée pour votre soudage.

Exemple :

- Electrodes vert

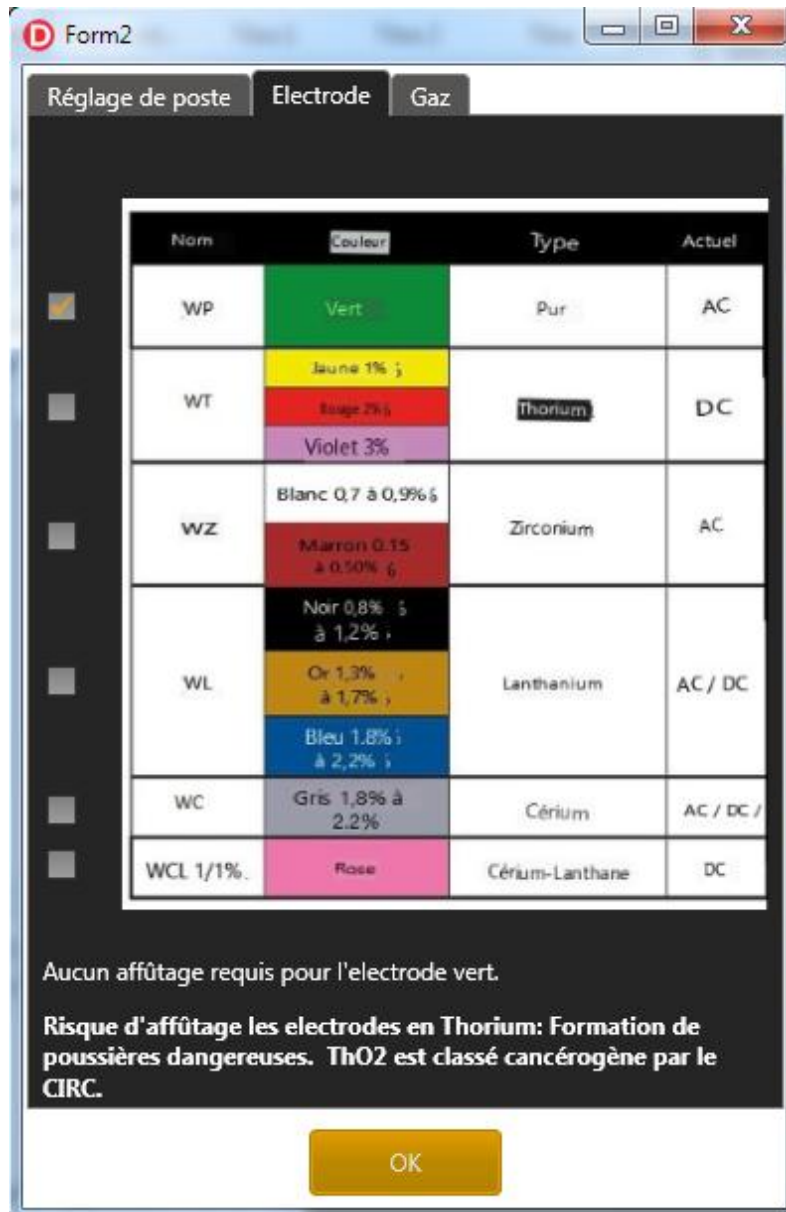


Figure III-12 Interface d'électrodes utilisée

III.13.5 Interface de réglage de Gaz

La dernière fonctionnalité que l'application nous a fournie est le diamètre approprié de la buse et le débit de gaz.

Exemple :

- Buse céramique de diamètre intérieur de 10mm ou N°6
- Débit de Gaz 10, 41952 litre/mm

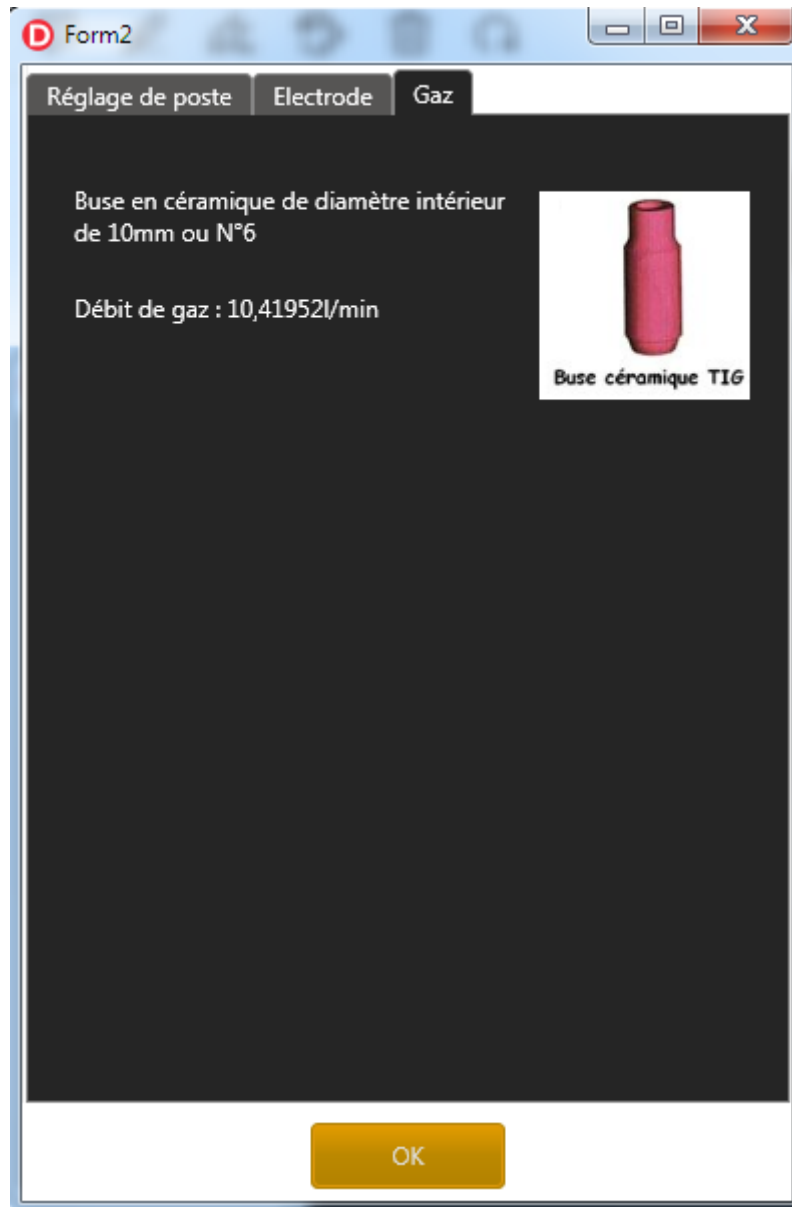


Figure III-13 Interface de réglage de Gaz

III.14 Conclusion

Dans ce chapitre, le model d'analyse de simulation traite divers paramètres qui influent sur le choix de la configuration optimale en soudage de procédé TIG, le modèle numérique avec le logiciel (simufact welding 6.0) est capable d'étudier la chaleur électrothermique générée par l'arc d'électrode en tungstène. L'interprétation des résultats assure la relation entre l'épaisseur et le courant de soudage optimale, le courant de démarrage et le bon temps aux points de départ et final. Et enfin une application a été créée pour faciliter l'utilisation des résultats obtenus.

Conclusion générale

Ce travail a pour objet la contribution au développement des paramètres de soudage TIG tel que l'intensité nécessaire en fonction d'épaisseur.

Pour atteindre ce but, deux parties ont été développées. La première partie est consacrée à l'étude paramétrique de procédé TIG par poste MATRIX 3000, suivie d'une étude expérimentale.

La seconde partie aborde la simulation numérique par logiciel *simufact welding 6.0* pour valider les résultats acquis.

L'étude expérimentale est axée sur :

- Préparation du brut des éprouvettes (75*30*15) mm à partir d'une plaque (2000*80*15) mm en alliage d'aluminium Al-MgSi (6060). ayant pour appellation commerciale péralumin.

- Fraisage des éprouvettes (surfaçage, chanfreinage)

- Préparation de poste de soudage TIG MATRIX 3000 :

- Réglage de type du procédé de soudage
- Réglage de l'intensité $I(A)$
- Réglage de la tension $U(V)$
- Réglage automatique de vitesse de soudage $V (m/min)$
- Réglage de fréquence $f (Hz)$
- Réglage de cycle de soudage
- Réglage de type de courant (AC/DC)
- Réglage de diamètre d'électrode

- Soudage des éprouvettes par procédés TIG

- Microscopie (microscope optique)

- Traction (machine de traction (600KN))

- Simulation (module développée (logiciel *simufact welding 6.0*))

- Application

Le but de l'étude expérimentale est déterminé le comportement des joints soudés avec les paramètres de soudage TIG choisi en fonction des épaisseurs des éprouvettes d'aluminium.

La limite à la résistance élastique et la résistance à la rupture n'est pas pris en considération.

Le meilleur comportement de joint soudée :

La fréquence $f= 100\text{Hz}$ et le voltage $V= 17$ volts sont constants .seule l'intensité est variable en fonction des épaisseurs.

Epaisseurs (mm)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Intensité (A)	60	90	100	120	130	135	140	145	150	155	160	165	170	180

En perspectives, ce travail sera élargi à l'étude paramétrique sur le soudage d'aluminium par les procédés MIG et MMA.

Références Bibliographiques

- (1). Young, Pierre. 27 May 2022. <https://weldingheadquarters.com/history-of-welding/>.
- (2). <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-welding>.
- (3). BELCADHI, Feriel. 28 May 2015. <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87>.
- (4). HAMZA-Soumia. CARACTERISATION DES JOINTS SOUDES DES PIPELINES EN ACIER INOX 304L. 2019. pp. 9-10.
- (5). <https://byjus.com/physics/welding/>.
- (6). <https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/mechanism.jsp>.
- (7). <https://material-properties.org/fr/quest-ce-que-le-soudage-par-friction-definition/>.
- (8).dr. ir. Koen. <https://bil-ibs.be/fr/soudage-par-ultrasons-de-metaux>.
- (9). <https://www.metal-interface.com/soudage-par-resistance-definition-et-differentes-formes>.
- (10). <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage-par-resistance#>.
- (11).<https://www.metal-interface.com/soudage-par-resistance-definition-et-differentes-formes>.
- (12).<https://material-properties.org/fr/quest-ce-que-le-soudage-par-fusion-et-le-soudage-a-letat-solide-definition/>.
- (13). <https://electricite2.blogspot.com/2016/08/le-soudage-oxycetylenique.html>.
- (14). <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Soudage-laser.html>.
- (15). Verlinde, ir. Wim. <https://bil-ibs.be/fr/soudage-par-faisceau-delectrons>.
- (16).<https://www.canambridges.com/fr/connaissez-vous-le-procede-de-soudage-a-larc-submerge/>.
- (17). <https://www.metal-interface.com/soudage-lelectrode-enrobee>.
- (18). <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-soudage-plasma>.
- (19).<https://www.fronius.com/fr-fr/france/techniques-de-soudage/univers-du-soudage/soudage-mig-mag>.
- (20).<https://www.fronius.com/fr-fr/france/techniques-de-soudage/univers-du-soudage/soudage-tig>.
- (21). <https://www.isgroupe.com/fr/blog/le-soudage-tig-groupe-institut-de-soudure>.
- (22). <https://www.lorch.eu/fr/produits/soudage-manuel/soudure-tig>.
- (23). <https://www.isgroupe.com/fr/blog/le-soudage-tig-groupe-institut-de-soudure>.

- (24). <https://www.soudure.pro/poste-a-souder/65-quelle-difference-entre-mig-mag-tig-inverter-mma-definitions>.
- (25). <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/poste-a-souder-tig>.
- (26). <https://www.axxair.com/fr/blog/les-differents-types-delectrodes-utilises-en-soudage-tig-orbital>.
- (27). fethi, SEBAA. Procédés et matériels de soudage. *Préparation aux examens IWT*. Tlemcen : s.n., 2019-2020.
- (28). <https://workshopinsider.com/gtaw-tig/>.
- (29). <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-metal-dapport>.
- (30). <https://www.mabeo-direct.com/document/A-753235-mabeo-experts-epi-du-soudeur-quelle-protection-individuelle-pour-le-soudeur->.
- (31). <https://www.expondo.fr/inspirations/le-soudage-tig-description-informations-appareilsle-soudage-tig-description-informations-appareils/>.
- (32). [https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/COURS_Soudage_TIG\(1\).pdf](https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/COURS_Soudage_TIG(1).pdf).
- (33). <https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/tig-welding/>.
- (34). <https://www.soudeurs.com/site/comprendre-le-schema-du-cycle-de-soudage-sur-un-generateur-tig-gtaw-371/>.
- (35). <https://weldguru.com/2t-vs-4t/>.
- (36). <https://www.maxicours.com/se/cours/soudage-bout-a-bout-de-deux-plaques-en-position-a-plat-avec-electrodes-enrobees/>.
- (37). <https://aluquebec.com/ceial/l-aluminium/alliages-et-applications/>.
- (38). <https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>.
- (39). <https://www.okw.co.uk/en/Aluminium-ALMgSi-0.5/Aluminium-ALMgSi-guide-values.pdf>.
- (40). <https://www.weldx.com/fiche-339-weldx-fils-pour-soudage-tig-alliages-daluminium-tig-5356.html>.
- (41). David. *Modèles hyper-réduits pour la simulation simplifiée du soudage en*. PARIS : MINES ParisTech, 2018.
- (42). MANUEL UTILISATION MATRIX 2200-3000 AC-DC. Italy : CEA.