

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

En vue de l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages Soudés & Matériaux

Présenté par : HOUARI Siham

Thème

Développement d'un module pour le choix des paramètres de soudage dans un environnement CAO

Soutenu par visioconférence, le 12/09 /2020, devant le jury composé de :

M BENACHOUR Mustapha	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M SEBAA Fethi	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M RAHOU Mohammed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
M ACHOUI Mohammed	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

Je remercie **ALLAH** Le Tout Puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je présente également à cette occasion mes chaleureux remerciements à mon encadreur monsieur **SEBAA Fethi** et à mon Co-encadreur monsieur **RAHOU Mohammed** pour Leur soutien, et leurs disponibilités tout au long de la préparation de mon projet de fin d'étude.

Je désire exprimer toute ma gratitude à mes enseignants qui ont accepté d'être membres dans le jury de soutenance de mon mémoire. Monsieur **BENACHOUR Mustapha** le président du jury, monsieur **ACHOUI Mohammed** d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit.

En fin, un très grande merci pour mes collègue de formation sans exception pour leurs encouragements, leur soutient et les bon moments qu'on a passé ensemble et à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers au monde. Ma mère et mon père en témoignage de l'amour, respect et de la gratitude que je leur porte.

HOUARI Siham

Résumé

Le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans métal d'apport, en utilisant des procédés appropriés. Il y a plusieurs paramètres qui sont influencés sur l'aspect du cordon de soudure comme la préparation des surfaces, le temps de soudage et de maintien, la position de soudage, la tension et l'intensité du courant électrique...etc.

Le but de ce travail consiste à développer une interface, sous logiciel Visual Basic, d'aide au choix des paramètres de soudage.

Afin d'atteindre cet objectif, deux parties ont été développées. La première partie regroupe les procédés et les paramètres de soudage. La seconde partie détaille chaque procédé de soudage par un choix adéquat des paramètres pour les procédés soudage oxyacétylénique, soudage par résistance, soudage à l'électrode enrobée, soudage MIG/MAG, soudage TIG.

Abstract

Welding is an operation where continuity is established between the parts to be joined, with or without filler metal, using appropriate processes. There are several parameters which are influenced on the appearance of the weld bead such as surface preparation, welding and holding time, welding position, voltage and intensity of electric current ... etc.

The objective of this work is to develop an interface, under Visual Basic software, to help choose welding parameters.

In order to achieve this goal, two parts have been developed. The first part groups together the welding processes and parameters. The second part details each welding process by an appropriate choice of parameters for the oxyacetylene welding processes, resistance welding, coated electrode welding, MIG / MAG welding, TIG welding.

المخلص

اللحام هو عملية يتم فيها إنشاء الاستمرارية بين الأجزاء المراد ربطها، مع أو بدون معدن حشو، باستخدام العمليات المناسبة. هناك العديد من المعلمات التي تتأثر بمظهر حبة اللحام مثل إعداد السطح واللحام ووقت التثبيت وموضع اللحام والجهد وشدة التيار الكهربائي... إلخ.

الهدف من هذا العمل هو تطوير واجهة، ضمن برنامج Visual Basic، للمساعدة في اختيار معلمات اللحام.

من أجل تحقيق هذا الهدف، تم تطوير جزأين. يجمع الجزء الأول عمليات اللحام ومعلماته. ويوضح الجزء الثاني كل عملية لحام عن طريق الاختيار المناسب للمعلمات لعمليات اللحام أوكسي أسيتيلين، اللحام بالمقاومة، اللحام الكهربائي المطلي، اللحام MIG / MAG، اللحام TIG.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 :	Différentes zones d'un joint soudé.....	4
Figure I.2 :	Modification structurale de la ZAT	5
Figure I.3 :	Schéma du soudage a l'arc (électrode enrobée)	6
Figure I.4 :	Principe de soudage a l'arc avec électrode enrobée.....	7
Figure I.5 :	Soudage a l'arc électrique	7
Figure I.6 :	Baguette métallique	8
Figure I.7 :	Principaux types de joints	9
Figure I.8 :	Principales positions de soudage	9
Figure I.9 :	Schéma du soudage oxyacétylénique.....	11
Figure I.10 :	Principe de soudage oxyacétylénique	12
Figure I.11 :	Flamme oxydante.....	12
Figure I.12 :	Flamme carburante.....	13
Figure I.13 :	Flamme neutre	13
Figure I.14 :	Principe de soudage MIG/MAG	15
Figure I.15 :	Schéma de procédé MIG/MAG	15
Figure I.16 :	Principe de soudage TIG.....	17
Figure I.17 :	Principe de soudage par point	19
Figure I.18 :	Les différentes phases d'une opération de soudage par points.....	20
Figure I.19 :	Schéma du soudage sous flux	21
Figure I.20 :	Principe du soudage sous flux.....	22
Figure I.21 :	Cordon soudage au plasma	24
Figure I.22 :	Principe soudage plasma.....	25
Figure I.23 :	Défauts en soudage plasma.....	25
Figure I.24 :	Soudage laser	25
Figure I.25 :	Principe du soudage laser.....	27
Figure I.26 :	Principe du soudage par ultrason	29
Figure I.27 :	Principe du soudage par friction malaxage	31
Figure I.28 :	Principe du soudage par faisceau d'électrons	32
Figure I.29 :	Principe du soudage par impulsion magnétique	32
Figure I.30 :	Schéma de principe du soudage par explosion	33
Figure I.31 :	Organigramme des procédés de soudage les plus répandus	35

Chapitre II

Figure II.1 :	Les deux sens de déplacement du chalumeau de soudage.....	38
Figure II.2 :	Poste de soudage à l'arc	40
Figure II.3 :	Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon	42
Figure II.4 :	Mauvais choix de diamètre de l'électrode	42
Figure II.5 :	Bon choix de diamètre de l'électrode	43
Figure II.6 :	Longueur d'arc supérieure à la normale	44
Figure II.7 :	Longueur d'arc inférieure à la normale	45
Figure II.8 :	Influence de vitesse par rapport l'intensité de soudage	48
Figure II.9 :	Rapport entre intensité du courant et vitesse se dévidage de fil	48
Figure II.10 :	Influence de la position de la torche sur l'aspect du cordon.....	55
Figure II.11 :	Choix de l'affûtage des électrodes	59
Figure II.12 :	Arc TIG avec argon	61
Figure II.13 :	Arc TIG avec hélium	61
Figure II.14 :	Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure.....	65
Figure II.15 :	Taux de dépôt moyen en soudage sous flux	66
Figure II.16 :	Effet de l'intensité du courant sur la pénétration	66
Figure II.17 :	Effet de la vitesse de soudage sur la largeur du cordon de soudure	67
Figure II.18 :	Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure	68
Figure II.19 :	Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon.....	68
Figure II.20 :	Macrographie ,2passes (endroit/envers), courant alternatif.....	69
Figure II.21 :	Influence de polarité sur la forme du cordon	69
Figure II.22 :	Influence de diamètres de fil sur la forme du cordon	69
Figure II.23 :	Influence de sens de soudage sur la forme du cordon	70

Chapitre III

Figure III.1 :	Interface de l'outil développé	72
Figure III.2 :	Différentes fonctions du module.....	73
Figure III.3 :	Choix de paramètres de soudage OA.....	73
Figure III.4 :	Pression d'alimentation pour soudage à la flamme	74
Figure III.5 :	Choix de la buse pour soudage à la flamme	74
Figure III.6 :	Préparation des bords pour soudage à la flamme.....	75
Figure III.7 :	Sens d'avance pour soudage à la flamme	75
Figure III.8 :	Choix de paramètres de soudage par point	76
Figure III.9 :	Intensité de soudage par point.....	76

Figure III.10 :	Temps de soudage par point	77
Figure III.11 :	Effort de soudage par point.....	77
Figure III.12 :	Energie calorifique de soudage par point.....	78
Figure III.13 :	Choix de paramètres de soudage SMAW	79
Figure III.14 :	Intensité de soudage SMAW	79
Figure III.15 :	Calcul de l'intensité de soudage à plat.....	80
Figure III.16 :	Calcul de l'intensité de soudage en angle intérieur	80
Figure III.17 :	Calcul de l'intensité de soudage en angle extérieur.....	81
Figure III.18 :	Calcul de la tension de soudage SMAW.....	81
Figure III.19 :	vitesse de soudage EE.....	82
Figure III.20 :	Longueur d'arc pour soudage EE	83
Figure III.21 :	Choix de paramètres de soudage MIG/MAG	83
Figure III.22 :	Tension de soudage MIG/MAG.....	84
Figure III.23 :	Intensité de soudage MIG/MAG.....	84
Figure III.24 :	Vitesse de dévidage de fil pour soudage MIG/MAG.....	85
Figure III.25 :	Vitesse d'avance pour soudage MIG/MAG.....	85
Figure III.26 :	Choix de paramètres de soudage TIG	86
Figure III.27 :	Intensité de soudage TIG	86
Figure III.28 :	Diamètre de l'électrode pour soudage TIG.....	87
Figure III.29 :	Tension de soudage TIG	87
Figure III.30 :	Débit du métal d'apport pour soudage TIG	88

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 :	Consignes de sécurité pour le procédé de soudage SMAW	10
Tableau I.2 :	Consignes de sécurité pour le procédé de soudage OA.....	14

Chapitre II

Tableau II.1 :	Réglage des gaz pour le soudage OA.	36
Tableau II.2 :	Quelques paramètres de soudage OA.....	37
Tableau II.3 :	Quelques préparations de joints.....	38
Tableau II.4 :	Intensité du courant (A) par rapport au diamètre de l'électrode (\emptyset) et à l'épaisseur de la pièce.....	40
Tableau II.5 :	Identification d'un bon ou d'un mauvais réglage de l'intensité.....	41
Tableau II.6 :	Influence de la vitesse de déplacement sur l'aspect du cordon	44
Tableau II.7 :	Vitesse de soudage en fonction de l'énergie nominale et le diamètre de l'électrode	44
Tableau II.8 :	Longueur d'arc en fonction de l'énergie nominale et le diamètre de l'électrode	45
Tableau II.9 :	Choix de la tension d'arc suivant le diamètre de fil de soudage.	50
Tableau II.10 :	Influence de la tension sur l'apparence du cordon de soudure	51
Tableau II.11 :	Influence de l'intensité sur l'apparence du cordon de soudure.....	53
Tableau II.12 :	Influence de la vitesse sur l'aspect du cordon.....	55
Tableau II.13 :	Choix du diamètre de l'électrode (courant continu).....	57
Tableau II.14 :	Choix du diamètre de l'électrode (courant alternatif).....	57
Tableau II.15 :	Choix du diamètre de l'électrode	58
Tableau II.16 :	Diamètre de baguette de métal d'apport par rapport l'épaisseur à souder	60
Tableau II.17 :	Effets du temps maintien.	63
Tableau II.18 :	Effets de l'effort de soudage.....	63
Tableau II.19 :	Paramètres de soudage par point pour aciers non alliés	64
Tableau II.20 :	Paramètres de soudage par point pour aciers inoxydables	64

Liste des abréviations

ZF :	Métal fondu.
ZL :	Zone de liaison.
ZAT :	Zone affecté thermiquement.
MB :	Métal de base.
SMAW :	Soudage à l'arc à l'électrode enrobée (111).
EE :	Soudage à l'arc l'électrode enrobée (111).
OA :	Soudage oxyacétylénique.
GMAW :	Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG (135).
GMAW :	Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MIG (131).
GTAW :	Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire TIG (141).
W :	Effet de joule (joule).
R :	Résistance (Ω).
I :	Intensité (ampère).
t :	Temps de soudage –cycle- (seconde).
SAW:	Soudage arc submergé.
DC:	Courant continu.
DA :	Courant alternatif.
U :	Tension (Volt).
En :	Energie de soudage (KJ/cm).
V :	Vitesse (cm/min).

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Listes des figures	I
Liste des tableaux	IV
Liste des abréviations	V
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Procédés de soudage

1. Généralité sur le soudage	2
2. Historique du soudage	2
3. Définition de soudage.....	3
4. Différents zone du joint de soudé	3
5. Aspects métallurgiques de la zone soudée	5
6. Procèdes de soudage.....	5
6.1. Soudage à l'électrode enrobée EE (SMAW)	6
6.1.1. Définition	6
6.1.2. Principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée (111).....	6
6.1.3. L'arc électrique	7
6.1.4. Electrode enrobée.....	7
6.1.5. Principaux types d'enrobage	8
6.1.6. Nature du courant et polarité utilisé	9
6.1.7. Les différents types des joints soudés	9
6.1.8. Avantages et inconvénients du procédé	10
6.1.9. Consignes de sécurité	10
6.1.10. Applications	11
6.2. Soudage Oxyacétylénique (OA).....	11
6.2.1. Définition	11
6.2.2. Principe de soudage OA	12
6.2.3. Réglage et types de flamme	12

6.2.4. Avantages et inconvénients du procédé	13
6.2.5. Consigne et sécurité	14
6.3. Soudage MIG/MAG (GMAW)	14
6.3.1. Définition	14
6.3.2. Principe du soudage MIG/MAG	15
6.3.3. Nature du courant et polarité utilisés.....	16
6.3.4. Avantages et inconvénients du procédé	16
6.3.5. Application	17
6.4. Soudage TIG	17
6.4.1. Définition	17
6.4.2. Principe du soudage TIG.....	17
6.4.3. Nature du courant et polarité utilisés.....	18
6.4.4. Avantages et inconvénients du procédé	18
6.4.5. Application	18
6.5. Soudage par point.....	18
6.5.1. Définition	18
6.5.2. Principe.....	19
6.5.3. Avantages et inconvénients du procédé	20
6.5.4. Application	21
6.6. Soudage arc submergé (Soudure sous flux solide).....	21
6.6.1. Principe.....	21
6.6.3. Fils électrode	22
6.6.4. Le flux	22
6.6.5. Types de courant	22
6.6.6. Avantages et inconvénients du procédé	23
6.6.7. Application	23
6.7. Soudage plasma.....	24
6.7.1. Définition	24
6.7.2. Principe.....	24
6.7.3. Défauts de soudage plasma	25
6.7.4. Avantages et inconvénients du procédé	26
6.7.5. Applications	26
6.8. Soudage laser.....	26
6.8.1. Définition	26
6.8.2. Principe.....	27

6.8.3. Déclinaison de la soudure laser	27
6.8.4. Avantages et inconvénients du procédé	28
6.8.5. Application	29
6.9. Soudure par ultrason.....	29
6.9.1. Définition	29
6.9.2. Principe de la soudure par ultrason	29
6.9.3. Avantages et inconvénients du procédé	30
6.9.4. Application du soudage par ultrason	30
6.10. Autre procédés.....	30
6.11. Nomenclatures numérotation des procédés de soudage	33

Chapitre II: Paramètres de soudage

1. Introduction	36
2. paramètres de soudage oxyacétylénique	36
2.1. Réglage de gaz	36
2.2. Choix de la buse	37
2.3. Préparation des bords	37
2.4. Déplacements du chalumeau	38
3. Paramètres et aspects du soudage à l'arc avec électrode enrobée	39
3.1. Influence de l'intensité en soudage à l'arc avec électrode enrobée	39
3.1.1. Identification d'un bon ou d'un mauvais réglage de l'intensité.....	41
3.2. Choix du diamètre de l'électrode	42
3.3. Vitesse de déplacement de l'électrode	43
3.4. Longueur d'arc	44
3.5. L'angle d'inclinaison de l'électrode.....	46
3.6. Tension utilisées en soudage SMAW.....	46
3.6.1. Tension à vide (U_0).....	46
3.6.2. Tension d'amorçage (U_a).....	46
3.6.3. Tension de soudage (ou d'arc U_s).....	46
3.6.4. Tension du réseau (U)	46
3.7. Energie de soudage.....	47
4. Paramètres et aspects de soudage MIG/MAG.....	47
4.1. Choix de la vitesse de dévidage de fil	47
4.2. Choix des diamètres du fil d'apport	49
4.3. Choix de la tension de soudage	49

4.3.1. Influence de voltage sur l'apparence du cordon de soudure	51
4.4. Choix de l'intensité de soudage	52
4.4.1. Influence de l'intensité sur l'apparence du cordon de soudure	52
4.5. Distance de la torche à la tôle.....	53
4.6. Vitesse de déplacement de la torche	54
4.6.1. Influence de la vitesse d'avance sur l'apparence du cordon de soudure.....	54
4.7. Position de la torche	55
5. Paramètres et aspects du soudage TIG	56
5.1. Dimension et nature du matériau à souder	56
5.2. Vitesse de soudage	56
5.3. Affutage et le diamètre de l'électrode réfractaire.....	57
5.3.1. Choix du diamètre de l'électrode	57
5.3.2. Affutage des électrodes	59
5.4. Choix et débit du métal d'apport.....	59
5.5. Choix et débit du gaz de protection.....	60
6. Paramètres et aspects du soudage par points.....	62
6.1. Intensité de soudage	62
6.2. Temps de maintien	63
6.3. Effort de soudage	63
6.4. Quelques paramètres indicatifs pour le soudage par points	64
7. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé	65
7.1. Influence de l'intensité (I_s)	65
7.1.1. Courbes de fusion.....	65
7.1.2. Influence de l'intensité du courant de soudage et de la vitesse de soudage.....	66
7.2. Influence de la tension de soudage (U_s).....	67
7.3. Influence de la vitesse de soudage (V_s)	68
7.4. Nature du courant et polarité.....	68
7.4.1. Le courant.....	68
7.4.2. Polarité	69
7.5. Diamètres de fil	69
7.6. Sens de soudage	70

Chapitre III: Module développé

1. Introduction	71
2. Présentation de logiciel	71
3. Présentation de l'outil développé	72

4. Principales fonctions du module	72
5. Choix des paramètres de soudage oxyacétylénique	73
5.1. Pression d'alimentation	74
5.2. Choix de la buse	74
5.3. Préparation des bords	75
5.4. Sens d'avance	75
6. Choix des paramètres de soudage par points.....	76
6.1. Intensité de soudage	76
6.2. Temps de soudage	77
6.3. Effort de soudage	77
6.4. Energie calorifique	78
7. Choix des paramètres de soudage à l'électrode enrobée	79
7.1. Intensité de soudage	79
7.2. Tension de soudage	81
7.3. Vitesse de soudage	82
7.4. Longueur d'arc	83
8. Choix des paramètres de soudage MIG/MAG	83
8.1. Tension de soudage	84
8.2. Intensité de soudage	84
8.3. Vitesse de dévidage de fil.....	85
8.4. Vitesse d'avance.....	85
9. Choix des paramètres de soudage TIG.....	86
9.1. Intensité de soudage	86
9.2. Diamètre de l'électrode	87
9.3. Tension de soudage	87
9.4. Débit de métal d'apport.....	88
10. Conclusion.....	88
Conclusion générale	89
Référence bibliographique	90

**Introduction
générale**

Introduction générale

Parmi les définitions variées du soudage, on trouve la plus indiquée celle qui fait appel à la notion de continuité métallique et structurale. Selon cette définition, le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans métal d'apport, en utilisant des procédés appropriés.

Le choix du procédé de soudage repose généralement sur deux critères : les limitations techniques et le coût. Les limitations techniques peuvent être inhérentes au type de matériaux, au type de joint, à la disposition de soudage et aux facteurs ayant rapport directe avec la possibilité offerte par les procédés de soudage mis en œuvre.

Plusieurs paramètres sont influencés sur l'aspect du cordon de soudure comme la préparation des surfaces, le temps de soudage et de maintien, la position de soudage, la tension et l'intensité du courant électrique...etc.

L'objectif de ce travail consiste à développer une interface, sous logiciel Visual Basic, d'aide au choix des paramètres de soudage. Afin d'atteindre ce but, ce manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre rassemble des généralités sur les procédés de soudage.

Le deuxième chapitre est réservé aux paramètres de soudage.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du module développé en Visual Basic.

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

Chapitre I
Procédés de Soudage

1. Généralités sur le soudage

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique, pour fabriquer des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyauteries, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage [1].

2. Historique du soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{me} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux était réalisé principalement par forgeage. Les premières techniques de soudage utilisaient l'électricité comme source d'énergie, tel que le soudage à l'arc avec électrode enrobée, dont l'invention date de 1904, ou le soudage par résistance. Vers la même période, l'arrivée du soudage oxyacétylénique (soudage aux gaz), utilisant l'acétylène et l'oxygène pour produire une flamme dont la température atteint 3100°C, permet de constituer un joint entre les parties à assembler par mélange du métal à l'état liquide puis solidification.

En 1930, l'introduction de fils-électrodes fusibles facilite l'automatisation de l'apport de métal, et conduit au développement du procédé de soudage à l'arc submergé. Dès 1940, des scientifiques américains ont essayé de maintenir l'arc électrique, amorcé à l'aide d'une électrode non fusible en tungstène, au sein d'un gaz inerte afin de protéger le métal chauffé de l'oxydation, ce qui conduit au développement du procédé TIG (Tungsten Inert Gas). Le procédé MIG (Metal Inert Gas) apparaît quelques années plus tard, vers 1950. Il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continu et de l'argon ou de l'hélium comme gaz de protection. Le remplacement de ces gaz par du CO₂ donne ensuite naissance au procédé MAG (Metal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons, en 1958, permet de souder en une seule passe de fortes épaisseurs, grâce à la vaporisation localisée du métal qui permet de réaliser des joints étroits et profonds. Avec l'introduction du procédé laser dans les années 1980, les opérations de soudage deviennent encore plus rapides [1].

3. Définition de soudage

Le soudage consiste à assembler deux pièces en réalisant la continuité de la matière qui les compose. Le joint qui en résulte est la soudure.

Le soudage est dit autogène lorsque les bords adjacents des pièces sont portés à fusion et participent à la formation du joint. Il est souvent nécessaire, pour former le joint soudé, d'ajouter au métal de base un métal d'apport, identique au précédent ou différent, mais de toute façon étranger au métal de base. Le métal d'apport et le métal de base doivent pouvoir former un alliage.

Lorsque le métal de base n'est pas porté à fusion et que le métal d'apport constitue seul le joint, on est en présence d'une brasure. En soudage autogène, la continuité de la matière est obtenue par fusion, par pression ou par ces deux moyens combinés. Le soudage fait donc appel à une source d'énergie qui, selon le procédé considéré peut-être de différente nature :

- Thermo-chimique (soudage au chalumeau, soudage par aluminothermique).
- Électrothermique (soudage à l'arc et ses nombreuses variantes, soudage par résistance, soudage par bombardement électronique).
- Mécanique (soudages par pression à froid, par explosion, par friction, par ultrasons)
- Lumineuse (laser).

Certains procédés de soudage ont donné naissance à des techniques connexes fortes importantes telles que le coupage thermique (coupage aux gaz ou oxycoupage, coupage à l'arc au plasma), le soudobrasage et la métallisation (aux gaz, à l'arc, au plasma). Ces techniques utilisent les mêmes sources d'énergie que le procédé de soudage dont elles dérivent et nécessitent l'usage de matériels analogues [2].

4. Différentes zones du joint soudé

Sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

1-Zone fondue «ZF»

2-Zone de liaison «ZL»

3-Zone affectée thermiquement «ZAT»

4-Métal de base «MB»

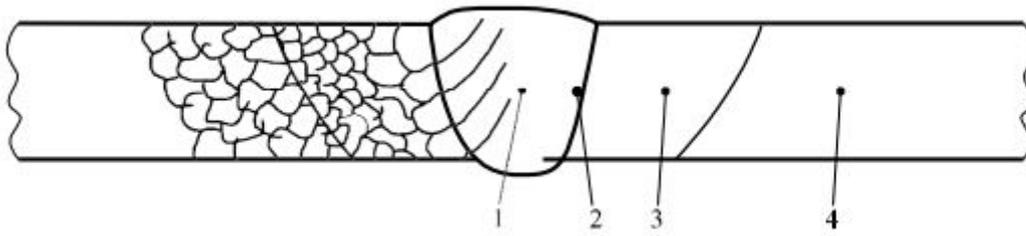


Figure I.1: Différentes zones d'un joint soudé.

1-Zone fondue

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal.

2-Zone de liaison

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu.

3-Zone affectée thermiquement

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physicochimiques (natures et proportions des constituants). Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage. Et constitue le domaine le plus délicat.

4-Métal de base

Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physicochimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations. Cette zone commence à l'isotherme A1 pour le soudage d'une tôle d'acier normalisé.

5. Aspects métallurgiques de la zone soudée

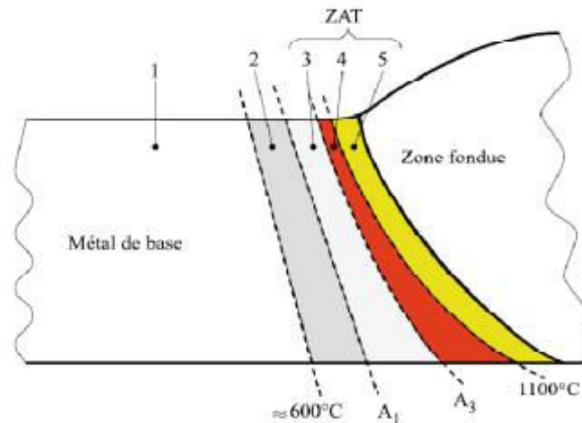


Figure I.2: Modification structurale de la ZAT.

Partie 1 : Aucune modification décelable sur la constitution et la microstructure.

Partie 2 : La température proche de A1 permet de déceler des modifications selon l'état initial du métal de base : précipitations, revenu, globulisation.

Partie 3 : La température est comprise entre A1 et A3. Les modifications sont importantes, l'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de la structure au refroidissement.

Partie 4 : La température est comprise entre A3 et 1100°C environ. Après refroidissement on obtient des structures normalisées.

Partie 5 : La température est comprise entre 1100°C et 1500°C environ. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité est considérablement augmenté et les structures obtenues après refroidissement varient de structures aciculaires très grossières à des structures de trempe pour les vitesses les plus élevées. La majorité des problèmes métallurgiques du soudage sont relatifs à la constitution de la zone sous cordon dans laquelle a lieu un véritable traitement thermique dans des conditions d'austénitisation particulières, à une température supérieure à 1200°C pendant un temps très court.

6. Procèdes de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenus par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie.

6.1. Soudage à l'électrode enrobée EE (SMAW)

6.1.1. Définition

Le soudage à l'électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l'arc », il utilise des baguettes comme métal d'apport. La soudure autogène à l'électrode enrobée consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode). Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, (3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un "arc électrique" qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense.

La baguette fond dans le bain de fusion formant ainsi la soudure, l'enrobage de l'électrode (laitier) fond à la température de l'arc et protège la soudure contre l'oxydation [3].

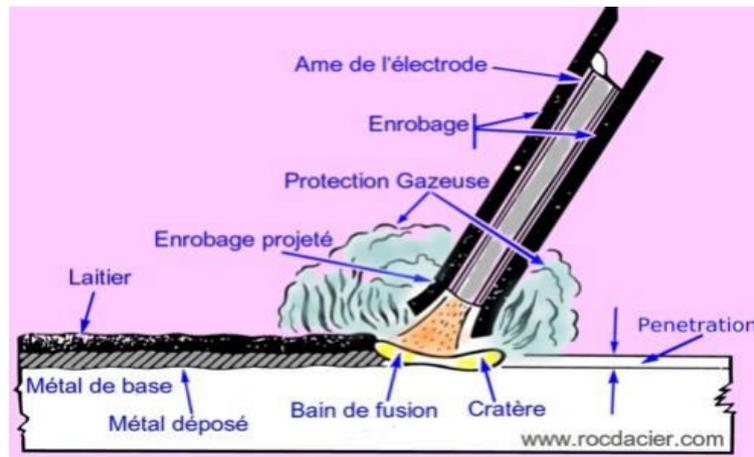


Figure I.3 : Schéma du soudage a l'arc (électrode enrobée) [3].

6.1.2. Principe du soudage a l'arc avec électrode enrobée (111)

Le poste de soudage produit un fort courant électrique qui va traverser l'électrode enrobée, liée à sa borne phase. D'autre part, La pièce à souder est liée à la borne neutre du poste de soudage et très légèrement éloignée de l'électrode enrobée (distance d'éloignement de 2 à 3 mm à peu près). Le haut ampérage fait que le courant électrique puisse traverser l'air existant entre l'électrode enrobée et la pièce à souder. Cet air, initialement isolant, devient, alors, conducteur sous l'influence du fort ampérage : un arc électrique est créé. L'air traversé par le courant électrique dégage de la chaleur par effet joule. D'où la fusion des bords à souder et de l'électrode enrobée [4].

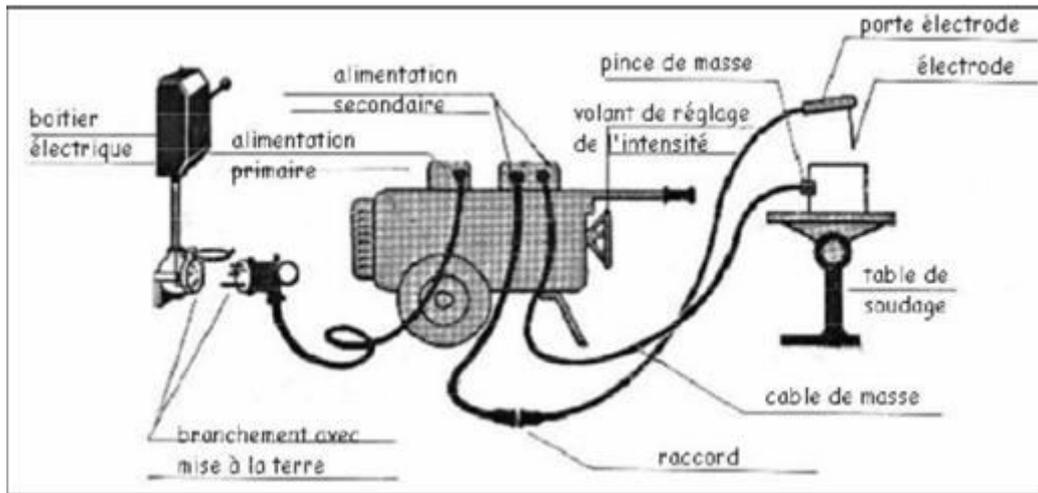


Figure I.4 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée.

6.1.3. L'arc Electrique

Pour qu'il y a un arc électrique, il faut:

- La présence d'une tension suffisante entre les électrodes
- Le maintien d'une intensité minimale
- Un milieu suffisamment ionisable [3].



Figure I.5 : Soudage à l'arc électrique.

6.1.4. Electrodes Enrobée

L'électrode enrobée est constituée: d'une tige métallique appelée "âme" recouverte d'un enrobage. Ces deux parties, l'enrobage et la tige métallique, jouent plusieurs rôles: assurer la formation de l'arc, l'élaboration et la protection du bain de fusion, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect et des propriétés mécaniques intéressantes [3].

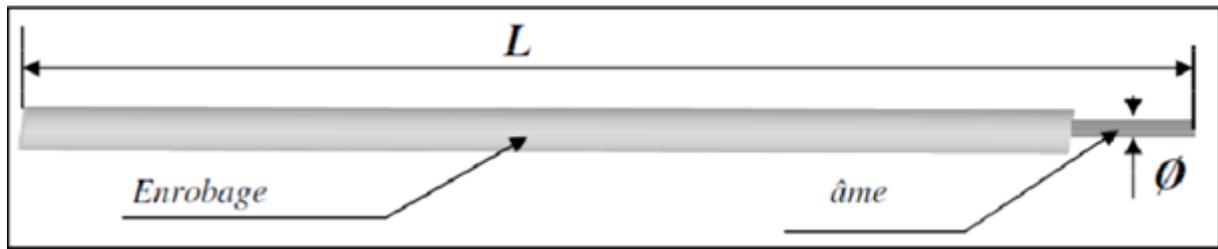


Figure I.6 : Baguette métallique.

Les principaux rôles de l'enrobage peuvent être résumés comme suit :

- Rôle métallurgique : protection du bain de fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air, néfastes pour les propriétés mécaniques du cordon de soudure, en produisant une couche protectrice, appelée laitier, qui va envelopper ce cordon en fusion.
- Rôle électrique : faciliter l'amorçage de l'arc électrique. maintenir la stabilité de l'arc électrique.
- Rôle mécanique : canaliser le métal [4].

6.1.5. Principaux types d'enrobages

Les enrobages des électrodes utilisées pour souder l'acier doux sont classés selon la nature chimique des substances constituant l'enrobage: enrobage cellulosique, enrobage rutile, enrobage basique, enrobage acide [3].

Enrobage cellulosique

Les électrodes à enrobage cellulosique produisent, après leur fusion: une soudure dont les propriétés mécaniques sont bonnes, un laitier qui se détache facilement, un cordon d'aspect grossier; une bonne pénétration. Ce type d'électrode est faiblement influencé par l'humidité.

Enrobage rutile

Les électrodes à enrobage rutile offre: une soudure de bel aspect, de bonnes propriétés mécaniques.

Enrobage basique

Les électrodes à enrobage basique produisent, après leur fusion: une soudure dont les propriétés mécaniques sont très bonnes, un laitier qui se détache facilement, un cordon de bel aspect, une pénétration moyenne.

Enrobage acide

L'introduction de poudre de fer dans l'enrobage des électrodes: Augmente la qualité du métal déposé, facilite le détachement du laitier, produit un arc plus stable.

6.1.6. Nature du courant et polarité utilisés

On emploie généralement une soudeuse à courant continu avec ce type de procédé. La polarité inversée permet une plus grande pénétration de la soudure parce que le métal en fusion de l'électrode, qui se dépose sur la pièce, atteint des températures plus élevées, ce qui procure une meilleure pénétration [5].

6.1.7. Les différents types des joints soudés

Les principaux types de joints soudés sont les suivants : le joint bout à bout, le joint à recouvrement, le joint à angle extérieur, le joint à angle intérieur, en "T"[3].

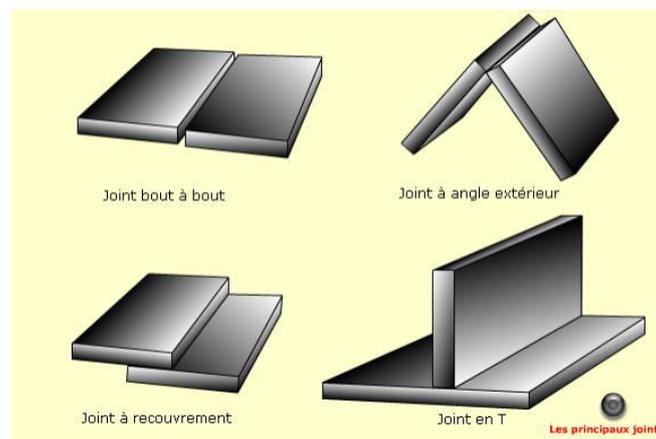


Figure I.7 : Principaux types de joints.

Ils peuvent être exécutés dans diverses positions : à plat, horizontale, verticale; et au plafond.

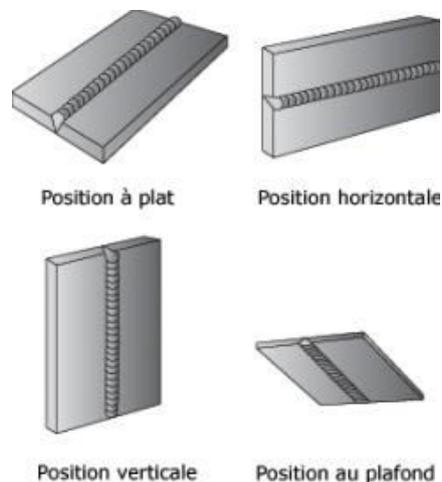


Figure I.8 : Principales positions de soudage.

6.1.8. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Plus polyvalent, s'exécute dans tous les milieux.
- Équipement moins complexe et moins coûteux.
- Le laitier protège la soudure contre l'oxydation pendant le processus de solidification et de refroidissement.
- Haute qualité de soudage possible.
- Paramètres de soudage faciles à régler.

Inconvénients

- Pénétrations faibles.
- Longueur limitée des électrodes.
- Procédé peu productif surtout à cause des arrêts pour l'enlèvement du laitier.
- Mécanisation difficile.
- Fumées nocives.
- Arc visible émettant des radiations UV et infrarouges, température de 3000 °C à 5000 °C.

6.1.9. Consignes de sécurité

Le tableau I. 1 montre les consignes de sécurité pour le procédé de soudage SMAW.

Risques	Consignes de sécurité
Fort courant : électrocution.	-Vérification des câbles électriques. -Gants de sécurité.
Rayons ultraviolets : micro blessures dans les yeux.	Masque de sécurité.
Fumées dégagées : Intoxication par inhalation. Brûlures aux yeux.	-Circuit d'aspiration de fumée pour le soudage en local fermé. -Soudage en plein air.
Important dégagement de chaleur : brûlures des mains et éventuellement du corps.	-Gants de sécurité. -Tablier.

Tableau I.1 : Consignes de sécurité pour le procédé de soudage SMAW.

6.1.10. Applications

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier [5].

6.2. Soudage Oxyacétylénique (OA)

6.2.1. Définition

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 de soudure [3].

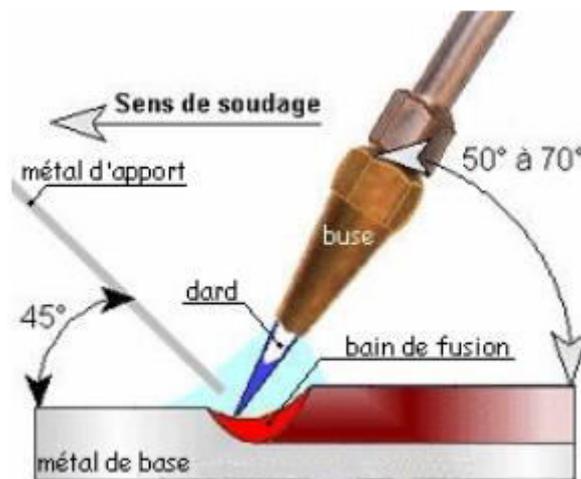


Figure I.9 : Schéma du soudage oxyacétylénique.

6.2.2. Principe de soudage oxyacétylénique

Un mélange de deux gaz : acétylène (carburant) et oxygène (comburant) est dosé dans un chalumeau. La combustion de ce mélange produit une flamme dont la chaleur dégagée sera exploitée pour fusionner les bords des pièces à souder. Le métal d'apport est introduit par une baguette séparée. Pour ce type de soudage, la protection contre l'oxygène et l'azote de l'air se fait en introduisant un produit désoxydant dans le bain de fusion.

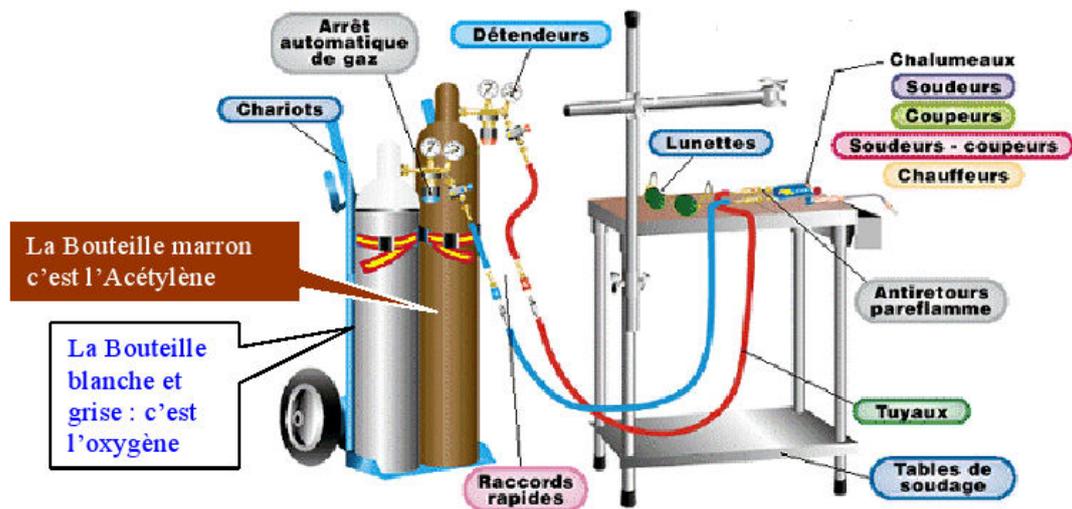


Figure I.10 : Principe de soudage oxyacétylénique [7].

6.2.3. Réglage et types de flamme

La pression de service des manomètres étant réglée à 1bar pour l'oxygène et entre 0,2 et 0,5 bar pour l'acétylène. Ouvrir et enflammer l'acétylène jusqu'à obtenir une flamme avec un panache sans fumeroles noirâtres, amener régler rapidement l'oxygène pour obtenir un dard bien net.

La flamme oxyacétylénique est la seule flamme permettant la soudure, car elle possède une zone réductrice qui protège le bain de fusion de l'oxydation de l'air ambiant [6].

Flamme oxydante : le dard est plus pointu et la flamme siffle. La soudure sera oxydée avec des soufflures [4].



Figure I.11 : Flamme oxydante.

Flamme carburante : le dard est très brillant avec une auréole. La soudure sera plus dure et plus cassante [4].



Figure I.12 : Flamme carburante.

Flamme neutre : dite aussi réductrice. Le dard est brillant et bien net. C'est la flamme utilisée en soudage [4].



Figure I.13 : Flamme neutre.

6.2.4. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Le faible coût des installations et l'absence d'aménagement électrique.
- La possibilité de souder dans toutes les positions et sur des préparations de qualités moyennes. D'où son utilisation pour l'artisanat ou pour les situations de chantier.
- La possibilité d'utiliser le chalumeau pour du soudobrasage, de la chauffe ou de la coupe.

Inconvénients

- Le soudage OA est limité aux faibles épaisseurs (inférieure à 5 mm hors préparation de bord).
- Cette technique est limitée à une utilisation manuelle.
- Provoque des déformations importantes.

6.2.5. Consignes de sécurité

Le tableau I. 2 montre les consignes de sécurité pour le procédé de soudage OA.

Risques	Consignes de sécurité
Flamme dégagée : Brûlures des mains et éventuellement du corps.	-Gants de sécurité. -Tablier.
Flamme dégagée : brûlures des yeux.	Lunette de sécurité.
Flamme dégagée : brûlures des voisins.	Attention aux gestes.
Flamme dégagée : incendie.	Extincteur proche.
Fumée dégagée : intoxication par inhalation des fumées.	-Circuit d'aspiration de fumée pour le soudage en local fermé. -Soudage en plein air.

Tableau I.2 : Consignes de sécurité pour le procédé de soudage OA.

6.3. Soudage MIG/MAG (GMAW)

6.3.1. Définition

Le soudage MIG – MAG est un procédé de soudage semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l'énergie générée par un arc électrique qui éclate entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler. Les acronymes MIG (131) et MAG (135) signifient respectivement Metal inert gas et Metal active gas. La différence entre les deux tient à la composition du gaz.

Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu, contrairement au procédé MAG. Le MIG-MAG est utilisé systématiquement lorsqu'on recherche du rendement (soudage en continu) ou de fortes épaisseurs de cordons comme pour les charpentes métalliques.

Le matériel requis est composé généralement d'un poste à souder MIG-MAG avec un dévidoir continu de fil de soudage. Le gaz est conditionné dans des bouteilles reliées à la torche à souder [8].

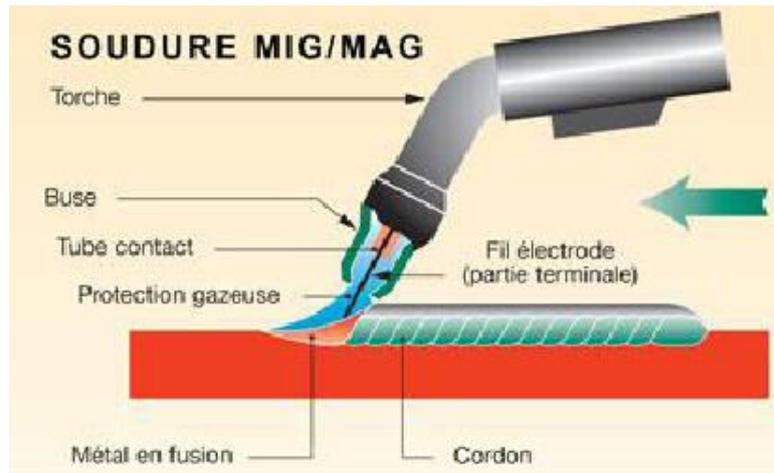


Figure I.14 : Principe de soudage MIG/MAG.

6.3.2. Principe du soudage MIG-MAG

C'est le même principe que celui du soudage à l'arc avec électrode enrobée sauf que l'électrode ici est un fil conducteur généralement nu (fourré pour les applications de rechargement), fusible et se déroulant à une vitesse choisie par l'opérateur. Quant au bain de fusion, il est protégé contre l'oxygène et l'azote de l'air par un jet gazeux, injecté en continu. Si le gaz de protection est neutre (ne réagit pas avec le métal fondu), on parle du Metal Inert Gas (MIG). Ce gaz neutre est généralement de l'argon ou un mélange d'argon et d'hélium. Dans le cas où le gaz de protection réagit avec le métal fondu (gaz active), on parle du Métal Active Gas (MAG). Le gaz actif est généralement un mélange d'argon avec du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en proportion variable selon les métaux à souder [4].

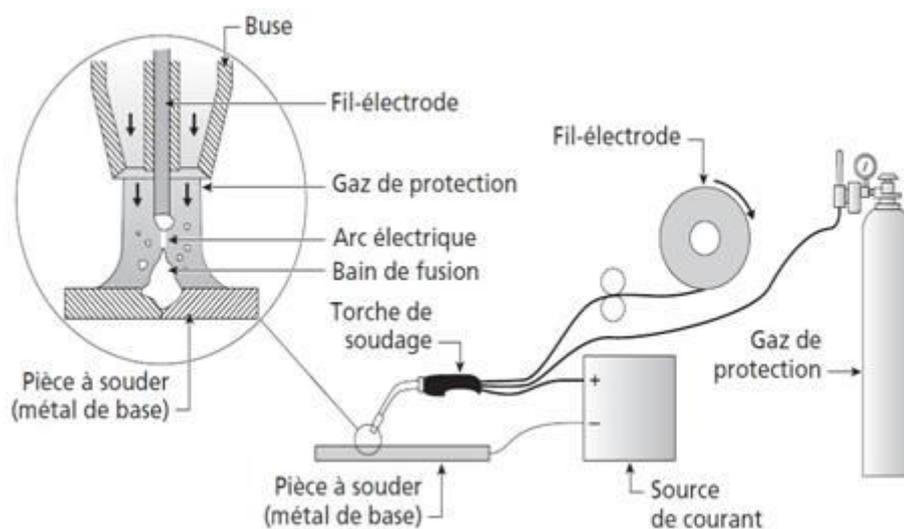


Figure I.15 : Schéma de procédé MIG/MAG.

6.3.3. Nature du courant et polarité utilisés

Le courant continu est le seul courant de soudage utilisé par ce procédé. On utilise toujours la polarité positive (Pôle positive au fil électrode et Pôle négative à la pièce à souder). Cela permet une plus grande vitesse de fusion du fil et dans le soudage de l'aluminium et de ses alliages, de briser la couche réfractaire les recouvrant [9].

6.3.4. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Ford productivité.
- Grand vitesse de soudage (gain de temps).
- Taux de dépôts de métal important.
- Limitation des déformations.
- Nombre de reprises de soudure limité.
- Pas de laitier à enlever.
- Large gamme d'épaisseur.
- Bonnes qualité de joie et bonnes caractéristiques mécaniques.
- Soudage dans toutes les positions.
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit.
- Aspect de cordon correct.
- Procédé automatisable.

Inconvénients

- Entretien fréquent et minutieux.
- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et tu peu pratiques pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures.
- Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent-être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.

6.3.5. Applications

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé [10].

6.4. Soudage TIG (GTAW)

6.4.1. Définition

Le procédé T.I.G (141) signifie (Tungsten Inert Gas), l'arc établi au sein d'une atmosphère neutre entre la pièce à souder et une électrode métallique réfractaire non consommable en tungstène pur ou thorié. Procédé utilisé de façon courante dans les industries de chaudronnerie pour le soudage des métaux et alliages [11].

6.4.2. Principe du soudage TIG

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne d'une part la sortie du gaz, et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le soudeur apporte manuellement (ou automatiquement sur certaines installations) le métal d'apport (d'un diamètre d'environ 0,8 mm à 4 mm) pour le mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue en créant le cordon de soudure. Le tout s'exécute sous protection gazeuse. La soudure TIG a la particularité d'être exécutée sous protection de gaz inerte avec une électrode non fusible et réfractaire (en tungstène) [3].

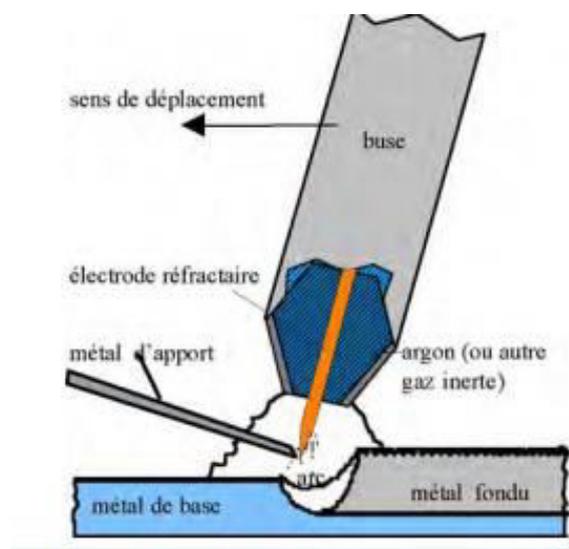


Figure I.16 : Principe de soudage TIG.

6.4.3. Nature du courant et polarité utilisés

On utilise le courant continu (DC) en polarité directe (- à l'électrode tungstène et + à la masse) pour souder l'acier, l'innox, le titane, les inconels, les duplex,...).

On utilise le courant alternatif(AC) en polarité directe surtout pour détruire la couche d'alumine lors du soudage de l'aluminium. Pour les autres cas, la pénétration est favorisée.

6.4.4. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Large gamme d'épaisseurs à souder.
- Simple d'emploi.
- Travail précis et esthétique.
- Peu de fumées.
- Soudage dans toutes les positions.
- Procédé automatisable.

Inconvénients

- Équipement dispendieux.
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement.
- Déformations des pièces soudées.

6.4.5. Applications

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces [10].

6.5. Soudage par point

6.5.1. Définition

Le soudage par résistance par points a été inventé en 1877 par E. Thomson et continue aujourd'hui à être largement employé dans l'industrie automobile.

Le soudage électrique par résistance par points est un procédé de soudage sans métal d'apport dit autogène. La fusion du métal localisée entre les tôles à assembler, est obtenue par effet Joule (courant électrique de quelques kilos ampères).

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes.

6.5.2. Principe

Le soudage par points s'applique généralement à des assemblages de deux tôles de faibles épaisseurs (0.1 à quelques millimètres mm) que l'on cherche à joindre par un point de soudure. Les tôles, mises en contact et soumises à un effort de pression par l'intermédiaire de deux électrodes reliées aux bornes du secondaire d'un transformateur, sont ainsi traversées par un courant alternatif de forte intensité sous une faible tension.

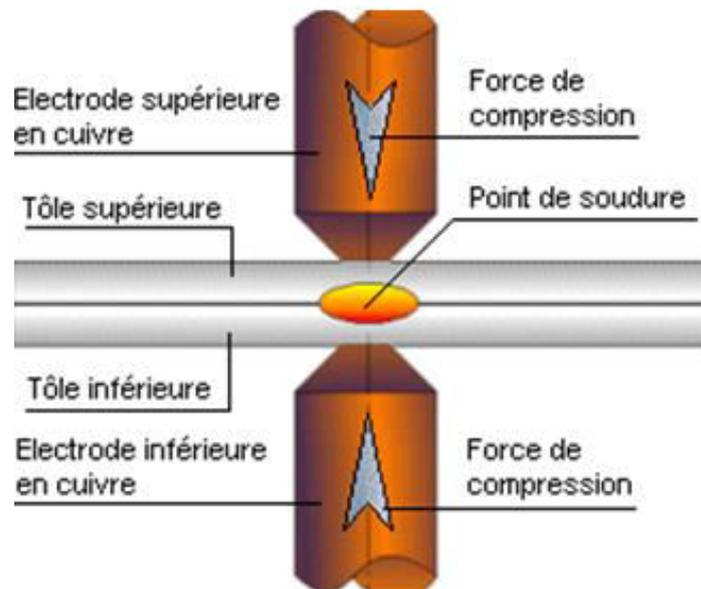


Figure I.17 : Principe de soudage par point.

Cycle de soudage

- Accostage : établissement d'un bon contact entre les deux tôles par pression entre les deux électrodes.
- Soudage : Après accostage, le courant passe entre les électrodes pendant un temps déterminé. La fusion se forme entre les deux épaisseurs.
- Forgeage : Ensuite, la pression est maintenue pour permettre aux deux parties en fusion de se lier.
- Temps mort : évite les projections de métal en fusion et au point de soudure de se refroidir sans déformation [9].

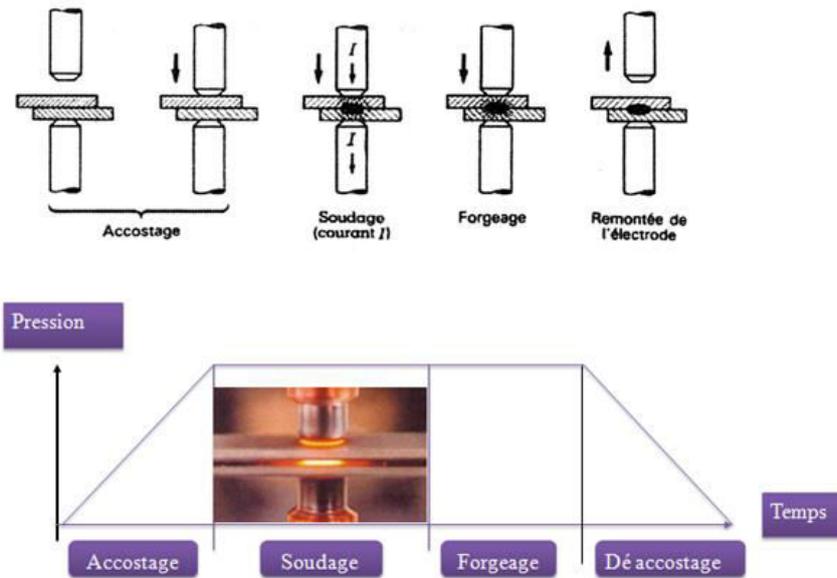


Figure I.18 : Les différentes phases d'une opération de soudage par points.

L'énergie calorifique nécessaire à la fusion des pièces est engendrée par l'effet JOULE.

W (en Joules) = R (Ohm) $\times I^2$ (Ampères) $\times t$ (Secondes)

$$W = R I^2 t$$

W : Energie calorifique.

R : résistance entre les 2 pièces à assembler. Cette résistance dépend de l'état de surface des pièces à assembler. Celle-ci est inversement proportionnelle à la force appliquée.

I : réglage imposé par la machine entre 5 et 200 kA.

t : temps de soudage : très court (inférieur à 1s) d'où utilisation comme unité la période du courant alternatif sinusoïdal soit 20mS.

6.5.3. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Rapidité.
- Peu de déformations.
- Soudage des tôles minces.
- Maîtrise des paramètres (contrôle en temps réel).
- Automatisation et robotisation possible.

Inconvénients

- Pas étanche.
- Recouvrement nécessaire (conception des pièces).
- Indentation.

6.5.4. Applications

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...(10)

6.6. Soudage arc submergé (Soudure sous flux solide)

6.6.1. Définition

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.

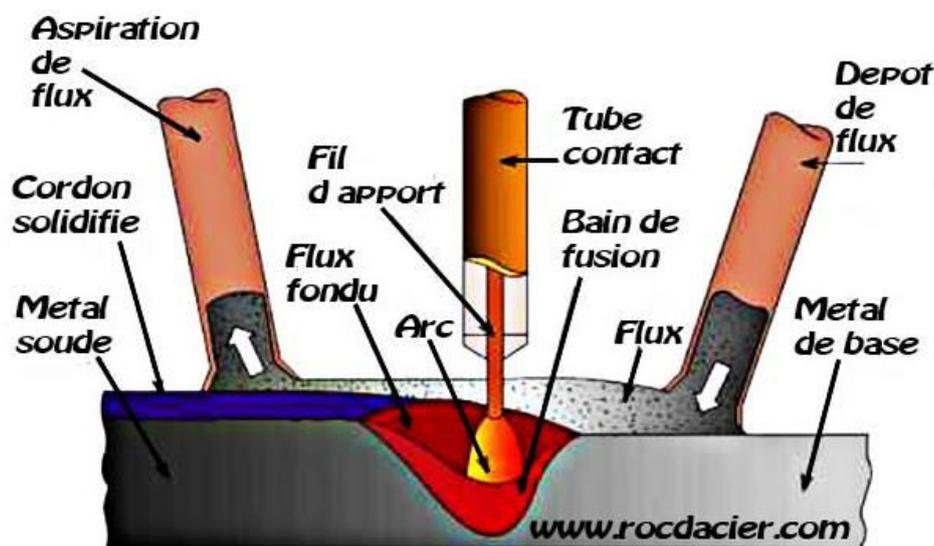


Figure I.19 : Schéma du soudage sous flux.

6.6.2 Principe

Un arc électrique libre, jaillit à l'intérieur du flux en poudre déversé en talus autour du fil électrode. Ceci assure la fusion simultanée des pièces à souder avec appui d'un ou plusieurs

fils électrodes fournissant le métal d'apport. Le transfert du métal fondu dans l'arc de soudage se fait par gouttelette enrobée de flux fondu protégé par sa gangue de laitier (auto détachable), le métal déposé est lisse et brillant. L'excédent du flux qui n'a pas été fondu est aspiré [3].

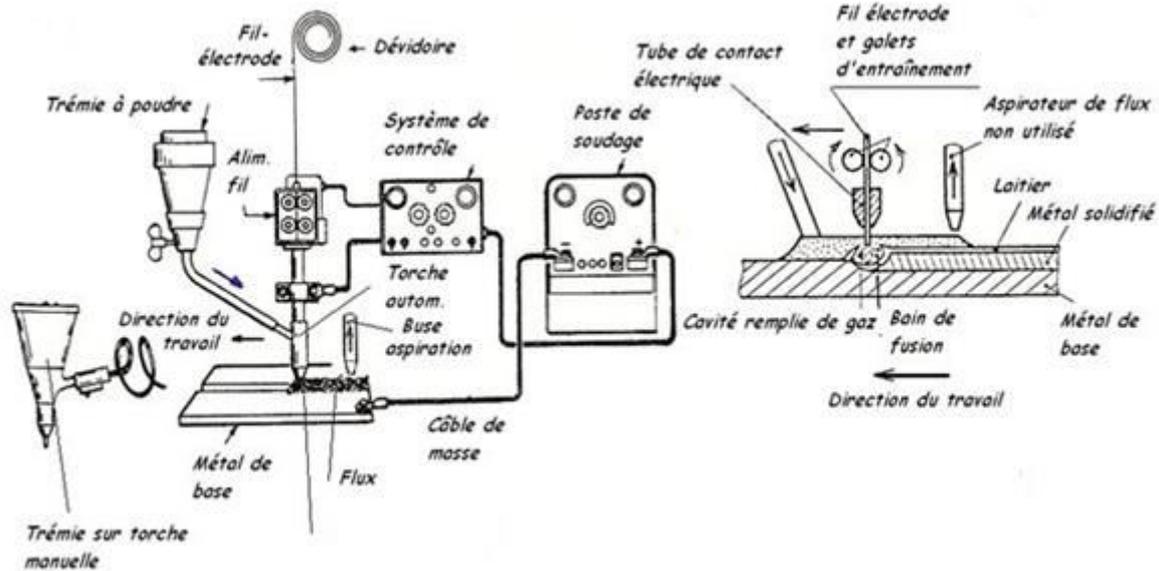


Figure I.20 : Principe du soudage sous flux.

6.6.3. Fils électrode

Le procédé ne s'applique qu'au soudage des aciers. Les fils sont choisis en fonction de la nature de l'acier à souder, associé parfois à un flux aggloméré permettant l'amélioration de la quantité du métal déposé. Les diamètres les plus couramment utilisés vont de 1 à 6 mm, livrés en bobine de plusieurs centaines de mètre [3].

6.6.4. Le flux

Le flux conducteur de courant électrique à chaud participe à la formation du bain de fusion et génère un dépôt important. Le flux est en général du type basique ou acide avec parfois des éléments d'addition qui permettent de modifier sensiblement la composition chimique du métal déposé et les caractéristiques mécaniques du joint soudé [3].

6.6.5. Types de courant

- **Courant continu avec électrode positive DC(+)** : permet d'optimiser la pénétration.
- **Courant continu avec électrode négative DC(-)** : permet d'optimiser le taux de dépôt.

- **Courant alternatif (AC) :** permet d'avoir un compromis entre le DC(+) et le DC(-). On obtient donc une meilleure pénétration que le DC(-) et un taux de déposition supérieur au DC(+).

6.6.6. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Grande vitesse de soudage.
- Pénétration très importante.
- Taux de dépôts de 3 à 10 kilogrammes par heure.
- Pas de préparation de chanfreins dans certains cas.
- Très bel aspect du cordon lorsque les paramètres sont correctement réglés.
- Limitation des déformations.
- Arc non visible.
- Confort de l'opérateur (pas d'émission de rayons U.V).
- Pratiquement aucune émission de fumées.
- Large gamme d'épaisseur et d'application.
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.
- Bonnes répétitivité des paramètres de sondage.

Inconvénients

En raison de l'importance du bain de fusion et du risque de fissuration à chaud, il faut respecter certaines règles : le rapport largeur par profondeur du bain ($L/P < 1,5$ ou $P/L > 0,7$)
Le procédé sous flux ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontale sauf un dispositif particulier, sur des aciers exclusivement. Le coût des équipements est assez élevé, d'où la nécessité des travaux en série pour assurer l'amortissement des matériels (machine de soudage, positionneur) [3].

6.6.7. Applications

Essentiellement utilisé en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 200/300 mm et apporte, à la fois en usine et sur chantier, une grande vitesse de soudage et des taux de dépôt élevés. On rencontre ce procédé, avec un ou plusieurs fils dans beaucoup d'industries, notamment en charpente métallique,

chantier naval, chaudronnerie (appareils sous pression), tuyauteries industrielles, off-shore, industrie chimique/pétrochimique, rechargement cylindres de laminoirs, etc

6.7. Soudage plasma

6.7.1. Définition

Le soudage à l'arc plasma ressemble au soudage TIG, sauf qu'ici, l'arc électrique est fortement resserré par une buse de gaz refroidie à travers laquelle passe le plasma de gaz. Le gaz de protection passe dans la buse de gaz située à l'extérieur et assure une protection gazeuse optimale de la soudure. L'arc électrique concentré délivre une énergie maximale et agit en profondeur sur la pièce à souder, comme seul le rayon laser en est capable. La vitesse de soudage est elle aussi jusqu'à 20 % plus élevée qu'avec le soudage TIG mécanique [12].

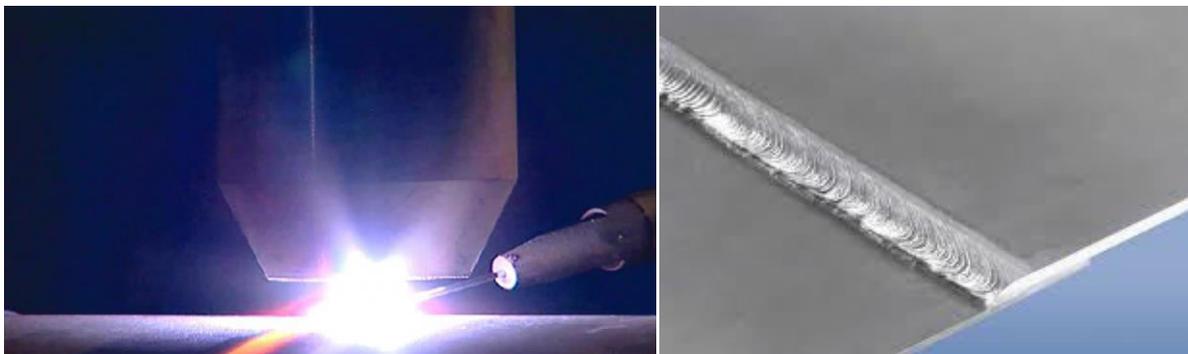


Figure I.21 : Cordon soudage au plasma.

6.7.2 Principe

Le soudage plasma peut être considéré comme une évolution des procédés TIG, un arc électrique éclate entre le métal d'apport constitué d'un fil fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder. Ce procédé s'apparente au soudage TIG.

Le plasma désigne le quatrième état de la matière, après les états solides, liquides et gazeux. Il s'agit donc d'un état gazeux mais entièrement ionisé donc électriquement neutre et excellent conducteur de l'électricité, c'est-à-dire de résistance électriquement neutre. Le plasma crée un champ électromagnétique qui se manifeste par un effet de striction (contraction) tendant à regrouper les particules ionisées, donc les plus chaudes, dans l'axe de la colonne d'arc. Si le gaz est forcé dans un orifice de faible diamètre produisant l'étranglement du jet, la température du filet central est forcément accrue, l'effet précédent est intensifié et la veine plasma occupe alors 30 à 40% de la section de la tuyère, peut approcher les 20000 °K à cet endroit, d'où la possibilité de fondre les métaux les plus réfractaires.

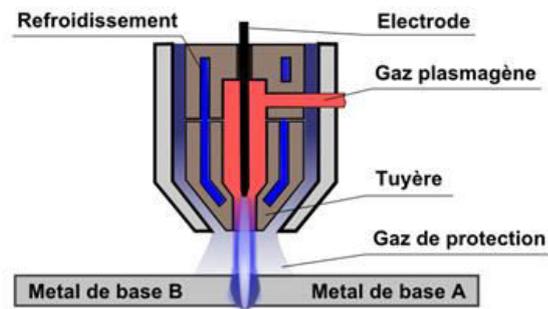


Figure I.22 : Principe soudage plasma.

6.7.3. Défauts en soudage plasma

1ère soudure de figure. I.23

- Soudure affaissée pénétration trop importante.
- Intensité de courant trop forte ou vitesse de soudage trop lente.



2ème soudure de figure. I.23

- Soudure trop étroite, irrégulière, faible pénétration.
- Intensité de courant trop faible ou trop faible.
- quantité de gaz plasmagène, ou vitesse de gaz trop faible.



3ème soudure de figure. I.23

- Forme des bords irréguliers.
- Trop grande quantité de gaz plasmagène.



4ème soudure de figure. I.23

- Bonnes dimensions du joint.
- Ondulations d'égale largeur, bonne pénétration.
- Intensité de courant correcte.
- Bon mouvement de la torche.
- Tension d'arc bien adaptée et bon débit de gaz [13].

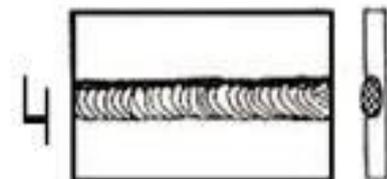


Figure I.23 : Défauts en soudage plasma.

6.7.4. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Soudage de qualité (rapide, fin et précis).
- Soudage de pièce de 3 à 8 mm en une seule passe sans préparation.
- Procédé automatisable.
- Haute qualité du joint soudé.
- Vitesse de soudage élevée (jusqu'à 50 m / h), ce qui augmente la productivité du travail.

Inconvénients

- Procédé coûteux (personnel, gaz de protection et équipement).
- Déformations des pièces soudées.
- Procédé très bruyant.
- Fort radiations.

6.7.5. Applications

Nucléaire, chimie, aéronautique, industries alimentaires,...etc

6.8. Soudage laser

6.8.1. Définition

Le soudage LASER est un procédé à haute densité d'énergie utilisant une source d'énergie lumineuse. Il s'agit d'une technique d'assemblage extrêmement fine et particulièrement bien adaptée au soudage de petits éléments avec peu de déformations [3].

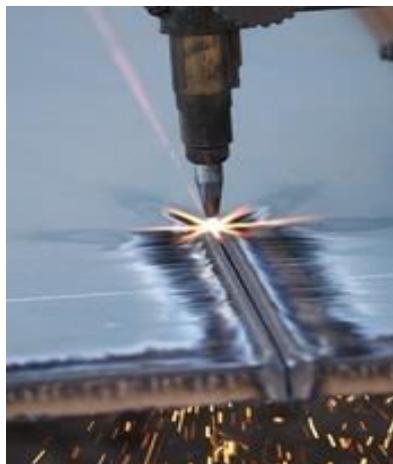


Figure I.24 : Soudage laser.

6.8.2 Principe

Le soudage laser assure la fusion des lèvres des matériaux à souder grâce à un flot de lumière cohérente qui élève très rapidement la température des matériaux jusqu'à leur point de fusion avec une précision et une finesse que la flamme ou l'arc électrique sont incapables d'atteindre.

Un système génère et concentre l'énergie d'un faisceau laser, de 105 W/cm² à 106 W/cm² environ :

- Le faisceau laser est de l'épaisseur d'un cheveu (capillaire) dans lequel le métal est porté jusqu'à son point de vaporisation au centre et au niveau liquide sur ses parois. Le bain de fusion est déplacé mécaniquement pour la précision du soudage.
- Une fois solidifié à nouveau après le passage du faisceau, le métal assure la continuité métallurgique entre les pièces soudées rendant la soudure invisible à l'œil nu.

Selon les matériaux à souder et l'aspect attendu de la soudure, un gaz inerte ou une poudre fusible peut être apporté sur le bain de fusion afin d'augmenter ses performances et protéger la zone de soudure de l'oxydation par l'air ambiant [14].

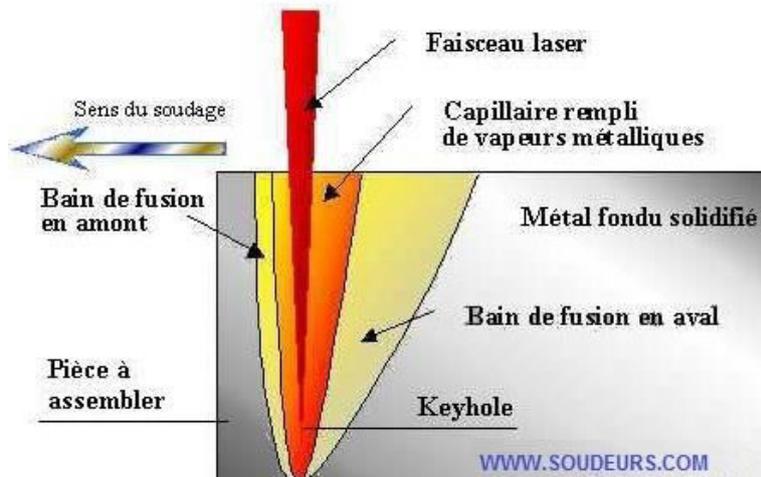


Figure I.25 : Principe du soudage laser.

6.8.3. Déclinaisons de la soudure laser

Le soudage laser regroupe deux grandes catégories :

Laser CO₂

- Le laser CO₂ utilise un mélange de dioxyde de carbone associé à de l'hélium et de l'azote pour protéger et parfaire la zone de fusion.

- Avec peu de puissance ; le laser CO2 est principalement utilisé pour la découpe de matériaux non métalliques.
- Le faisceau laser doit être dirigé par miroirs orientables ce qui rend l'usage en mono-poste seulement.

Laser YAG

- C'est un faisceau laser à état solide appelé ainsi car produit à l'aide d'une barre de grenat d'yttrium-aluminium au néodyme placée au milieu de la source laser.
- De puissance supérieure à 2 kW, le laser YAG est réservé à la soudure et la découpe des matériaux métalliques.
- Le flux laser peut être dirigé par fibre optique ce qui autorise plusieurs postes de soudage pour une seule source laser [14].

6.8.4. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

- Rapidité du procédé, absence de métal d'apport.
- Précision et propreté.
- Possibilité de joindre des matériaux différents.
- Le peu d'espace requis pour l'accès du faisceau à la pièce.
- L'excellent contrôle de projections.
- Les déformations très limitées, ZAT réduite.
- La possibilité de souder par transparence.
- La possibilité de réaliser des joints parfaitement étanches.
- Bonne résistance mécanique du joint soudé.

Inconvénients

- Coût d'acquisition et de maintenance très élevés.
- Niveau important de formation des opérateurs.
- Précision requises pour la préparation des joints.
- Aspects liés à la sécurité (faisceau invisible et énergétique) avec port de protections adaptées très coûteuses.

6.8.5. Applications

Le mécano-soudage, l'aéronautique, constructions automobiles, mécanique de précision, nucléaire.

6.9. Soudure par ultrason

6.9.1. Définition

Le soudage par ultrasons permet un assemblage rapide et économique des matériaux plastiques, sans apport de matière et sans avoir recours aux adhésifs. Couramment utilisé dans l'industrie, il permet d'obtenir une jonction à la fois solide et précise [8].

6.9.2. Principe de la soudure par ultrason

Les pièces à souder sont placées entre "l'enclume" (pièce massive) et un index ou doigt métallique animé de vibrations à fréquence ultrasonore (20 000 à 100 000 Hz).

Les ultrasons sont engendrés grâce aux phénomènes de piézo-électricité ou de magnétostriction. Le courant qui alimente le générateur d'ultrasons est un courant à haute fréquence dont les vibrations provoquent le phénomène de magnétostriction. Une pression exercée sur les pièces placées à recouvrement assure une friction entre celles-ci ; l'énergie vibratoire par le sonotrode provoque la dilatation locale des réseaux cristallins dans la zone des deux pièces à assembler, ce qui provoque une interpénétration moléculaire des deux éléments. L'énergie est fonction de l'épaisseur minimum à assembler et de la nature du métal.

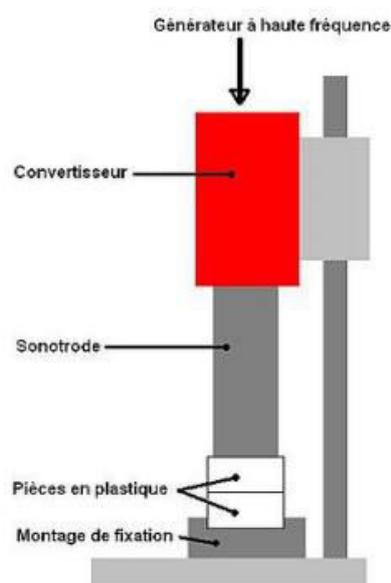


Figure I.26 : Principe du soudage par ultrason.

6.9.3. Avantages et inconvénients du procédé

Avantages

Les raisons pour lesquelles le soudage ultrason est privilégié dans l'industrie sont nombreuses :

- Soudage extrêmement propre.
- Très rapide à réaliser.
- Mise en place et automatisation facilitées.
- Aucune modification de la structure cristalline des matériaux.
- Assemblage de métaux différents.
- Assemblage de pièces d'épaisseurs différentes.
- Aucun métal d'apport.
- Suppression des opérations de nettoyage avant et après soudage.

Inconvénients

- Soudage bout à bout est pas possible (limitation de forme).
- Coût de la machine de soudage.
- Propriété mécanique du joint soudé faible.

6.9.4. Applications du soudage par ultrasons

- Les assemblages se réalisent toujours par recouvrement.
- Très employé en électronique.
- Application dans le domaine de textile.
- Utilisation dans le domaine médicale.
- Les matériaux les plus généralement soudés sont : certaines matières plastiques (polyéthylène, p.v.c.) ou les métaux tels que molybdène, tungstène, platine.

6.10. Autre procédés

- **Soudage par friction malaxage**

Le soudage par friction malaxage (FSW-Friction stir welding) est un procédé de soudage à l'état solide, qui utilise un outil spécial pour assembler deux pièces adjacentes, sans que les matériaux ne fondent. La chaleur est générée par le frottement entre l'outil rotatif et les pièces, ce qui plastifie le matériau dans la zone de soudage.

Le soudage par friction malaxage est une technologie intéressante pour l'assemblage de matériaux divers. Le processus fournit des connexions de haute qualité, avec des contraintes résiduelles et une distorsion minimales.

Contrairement aux procédés de soudage conventionnels, le FSW ne nécessite aucun matériau d'apport, gaz de protection, ou d'autres consommables, et consomme beaucoup moins d'énergie. Il ne génère aucun gaz nocifs, ou bavures de soudage et ne produit que peu de bruit. Le processus contribue activement à l'amélioration des conditions de travail, et accroît en même temps la productivité.

De nouvelles applications peuvent être développées via le FSW grâce à ses avantages uniques. Il est possible de souder des combinaisons de matériaux qui étaient auparavant impossibles, tels que les alliages d'aluminium à haute résistance (série 2xxx et 7xxx), ainsi que l'assemblage de matériaux dissemblables [15].

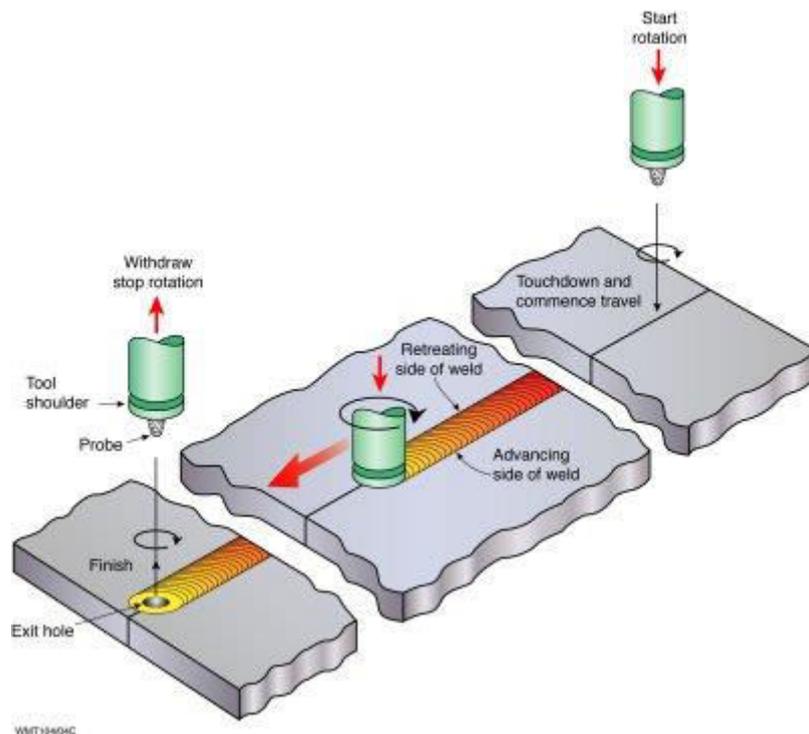


Figure I.27 : Principe du soudage par friction malaxage.

- **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.

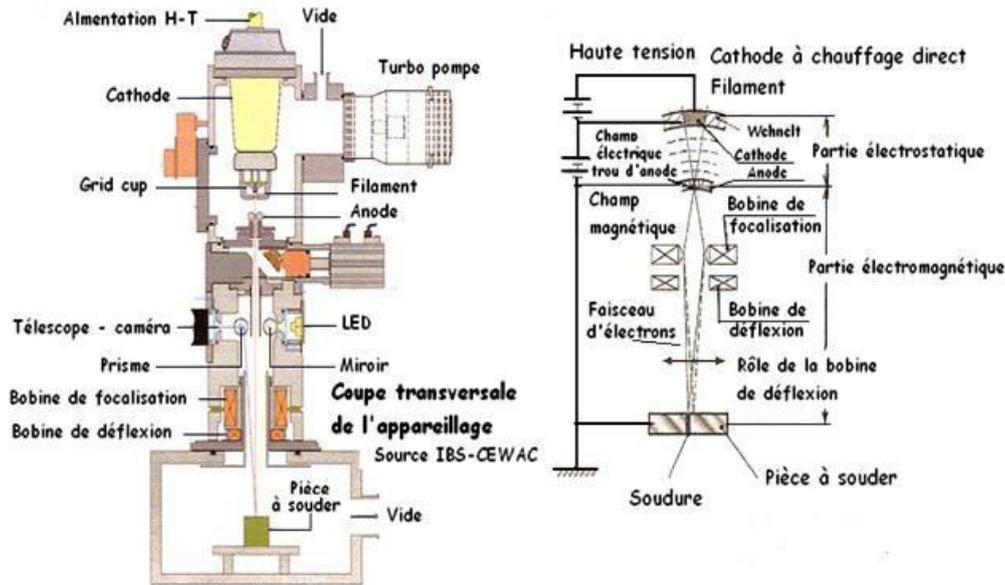


Figure I.28 : Principe du soudage par faisceau d'électrons.

- **Soudage et sertissage par impulsion magnétique**

Le soudage par impulsion magnétique est une méthode relativement jeune basée sur l'utilisation de forces électromagnétiques pour souder des pièces.

La recherche se dirige vers l'assemblage de matériaux difficilement soudables et vers des assemblages hétérogènes. Cette méthode de soudage ne fait pas usage de chaleur de telle sorte que des matériaux à point de fusion très différente peuvent être assemblés avec cette technique de soudage.

Le procédé possède un potentiel réel pour la réalisation rapide et économique de ces assemblages.

Soudage par impulsion magnétique

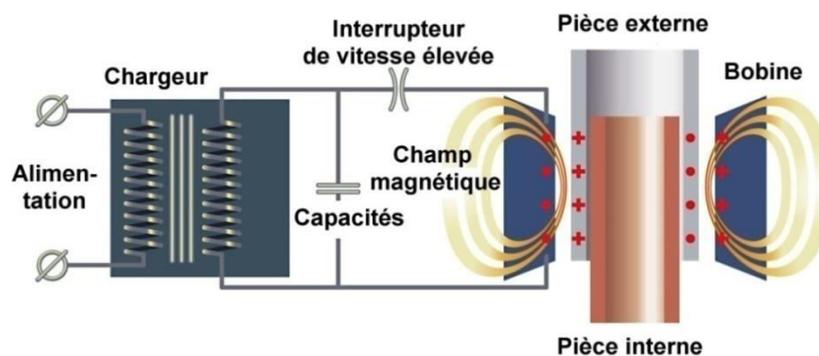


Figure I.29 : Principe du soudage par impulsion magnétique.

- **Soudage par explosion**

Le soudage par explosion est une méthode de soudage spéciale qui permet de raccorder deux types de métaux différents à l'aide d'une explosion contrôlée. Cette explosion génère une grande pression entre les plaques métalliques. Les métaux fusionnent alors au niveau atomique. La structure composite ainsi obtenue est d'une qualité exceptionnelle et possède des caractéristiques métallurgiques cohérentes.

Le soudage par explosion est utilisé lorsque deux types de métaux différents doivent être raccordés avec un joint solide [16].

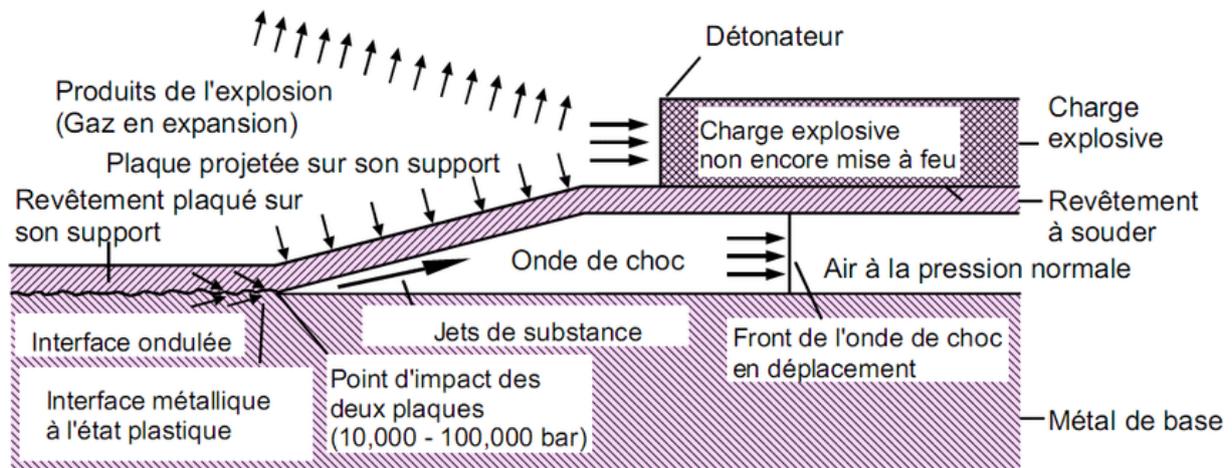


Figure. I.30 : Schéma de principe du soudage par explosion.

6.11. Nomenclature et numérotation des procédés de soudage

1 = Soudage à l'arc ; **2** = Soudage par résistance ; **3** = Soudage aux gaz ; **4** = Soudage par pression ; **5** = Soudage par faisceau ; **7** = Autres procédés de soudage ; **8** = Coupage et gougeage ; **9** = Brasage fort, brasage tendre et soudobrasage.

- **Quelques exemples de numérotations** (Selon la norme NF EN ISO 4063)

111 = Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

121 = Soudage à l'arc sous flux (en poudre) avec un seul fil (arc submergé) (SAW)

131 = Soudage MIG avec fil électrode fusible sous gaz inerte (GMAW)

135 = Soudage MAG avec fil électrode fusible sous gaz actif (GMAW)

136 = Soudage MAG avec fil fourré de flux sous gaz actif (FCAW)

138 = Soudage MAG avec fil fourré de poudre métallique sous gaz actif (FCAW)

141 = Soudage TIG avec fil d'apport sous gaz inerte (GTAW)

142 = Soudage TIG autogène sous gaz inerte (GTAW)

143 = Soudage TIG avec fil fourrée ou baguette fourrée sous gaz inerte (GTAW)

147 = Soudage TAG avec électrode réfractaire sous gaz actif (GTAW)

15 = Soudage plasma (PAW)

21 = Soudage par résistance par points (RSW)

311 = Soudage oxyacétylénique (OAW)

312 = Soudage oxypropane (OFW)

41 = Soudage par ultrason (USW)

51 = Soudage par faisceau d'électrons FE (EBW)

52 = Soudage laser (LBW)

71 = Soudage par aluminothermie (TW)

833 = Coupage plasma à l'air (PAC)

84 = Coupage laser (LBC)

871= Gougeage air – arc (CAC-A)

912 = Brasage fort aux gaz (TB)

942 = Brasage tendre aux gaz (TS)

971 = Soudobrasage aux gaz (BW)

972 = Soudobrasage à l'arc (ABW)

974 = Soudobrasage TIG (EXBW)

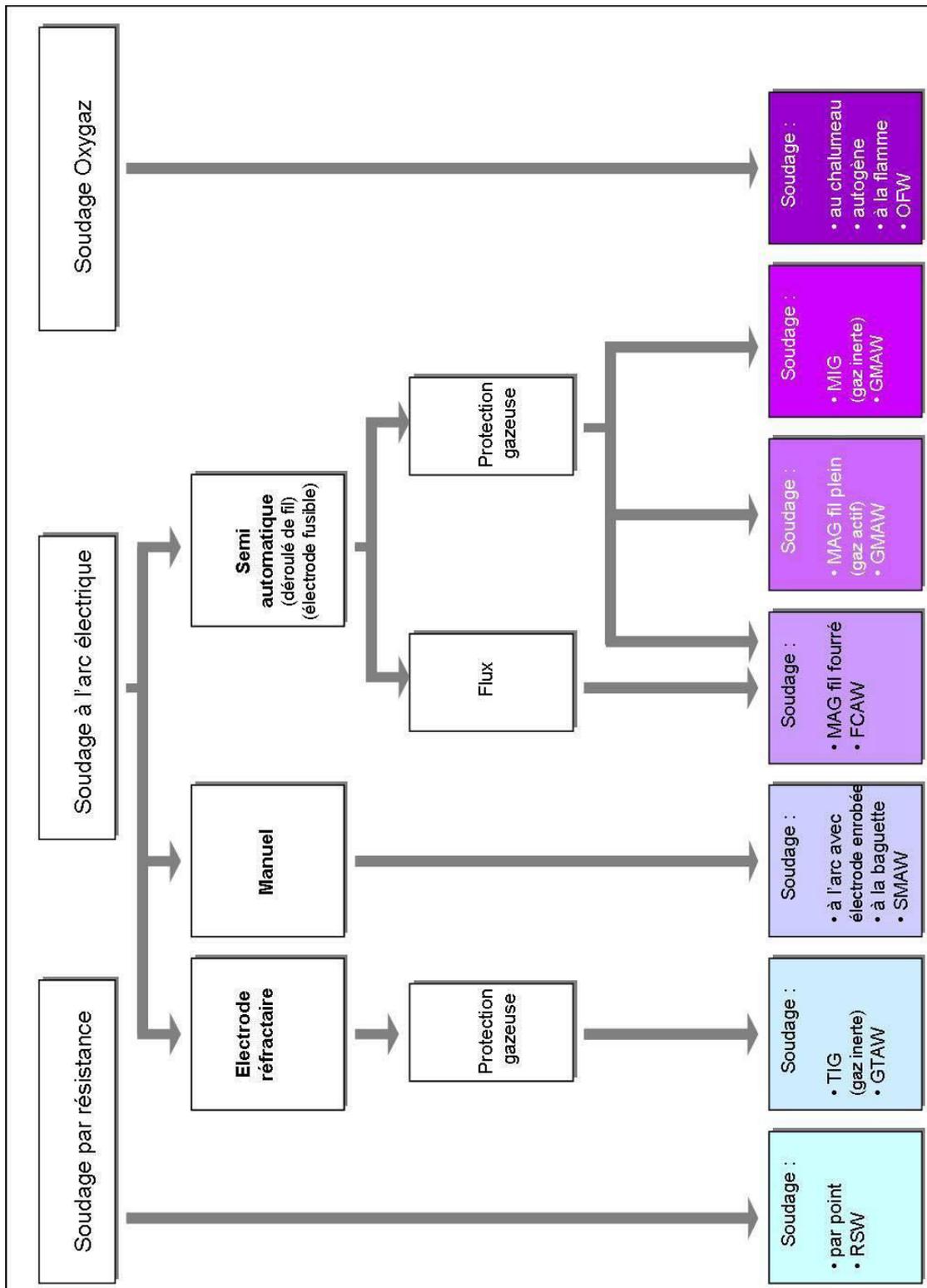


Figure I.31 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [17].

Chapitre II

Paramètres de soudage

1. Introduction

Les paramètres de soudage sont les conditions et les propriétés liées à la réalisation d'un assemblage telle que le procédé utiliser, la préparation des surfaces, le temps de soudage et de maintien, l'intensité du courant électrique, en respectant certaines règles élémentaires de sécurité.

2. Paramètres de soudage oxyacétylénique

Les paramètres importants du soudage à la flamme sont :

- Réglage des gaz.
- Choix de la buse.
- Préparation des bords.
- Sens d'avance.

2.1. Réglage des gaz

Les pressions d'alimentation affichées sur les manodétendeurs sont différentes pour l'oxygène et l'acétylène.

Le tableau II. 1 montre le réglage de pression de chaque gaz.

	PRESSION DE STOCKAGE (dans les bouteilles)	PRESSION D'UTILISATION (sur les manomètres)
Acétylène	15 bars (1.5 MPa)	0.5 bar (0.05 MPa)
Oxygène	196 bars (19.6 MPa)	De 1 à 1.5 bars (De 0.1 à 0.15 MPa)

Tableau II. 1: Réglage des gaz pour le soudage OA.

2.2. Choix de la buse

La buse permet de définir le débit du mélange gazeux oxyacétylénique. Le choix de la buse dépend de la position de soudage, de l'épaisseur à souder, de la nature du matériau...

Le tableau II. 2 montre le choix de la buse pour le procédé de soudage OA.

QUELQUES PARAMÈTRES DE SOUDAGE PAR FLAMME	
Epaisseur d'acier	Débit de la buse de soudage
1,0 mm	50 litres / heure
2,0 mm	100 litres / heure
3,0 mm	200 litres / heure
4,0 mm	250 litres / heure
5,0 mm	300 litres / heure
6,0 mm	400 litres / heure
8,0 mm	600 litres / heure
10,0 mm	800 litres / heure

Tableau II. 2 : Quelques paramètres de soudage OA.

2.3. Préparation des bords

Une bonne préparation de bord facilite l'exécution de soudures saines. Les préparations de bords dépendent :

- De la nature du matériau.
- De l'épaisseur des éléments.
- Du type de joints (bord à bord, en angle...).
- De la position de soudage (à plat, montante, descendante).

Les facteurs d'une bonne préparation sont essentiellement la propreté des tôles :

- Absence de rouille.
- Absence de corps gras.
- Absence d'humidité.
- Absence de peinture...

Le tableau II. 3 montre quelques préparations de joints.

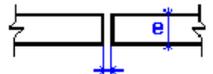
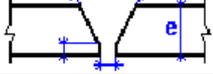
Epaisseur en mm	Débit de la buse	Ø métal d'apport	Préparation
< à 1,0 mm	40 à 60 litres / heure	Sans	
De 2,0 à 4,0 mm	60 à 200 litres / heure	Ø 2,0 mm	
De 4,0 à 12 mm	250 à 400 litres / heure	Ø 2,0 mm	
De 8,0 à 12 mm	250 à 400 litres / heure	Ø 2,0 à 3,0 mm	

Tableau II. 3: Quelques préparations de joints.

2.4. Déplacements du chalumeau

Suivant le sens du mouvement de chalumeau, on distingue:

Soudage à gauche (en poussant): La flamme est orientée vers les parties froides. Cette technique est lente, consomme beaucoup plus de gaz, limite la pénétration, mais est d'exécution facile et donne des soudures de bel aspect. Elle est appliquée aux fines épaisseurs.

Soudage à droite (en tirant): La flamme est orientée vers le bain de fusion ce qui augmente la température et donc la pénétration. Cette méthode est plus rapide et plus économique que la précédente. Elle appliquée généralement aux épaisseurs supérieures à 5 mm.

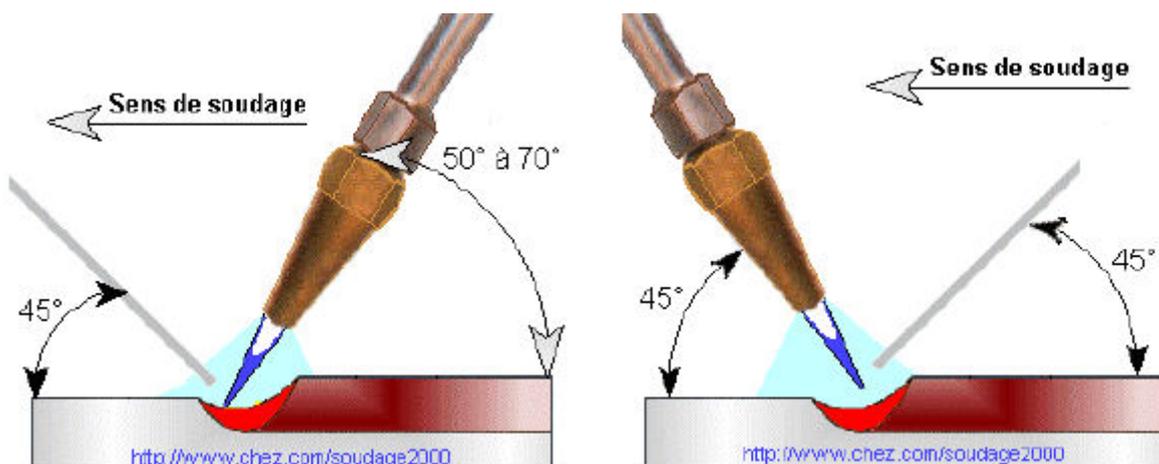


Figure II.1 : Les deux sens de déplacement du chalumeau de soudage.

3. Paramètres et aspects du soudage à l'arc avec électrode enrobée

On distingue plusieurs paramètres de soudage à l'arc avec électrode enrobée :

- Intensité du courant électrique.
- Diamètre de l'électrode.
- Vitesse de la main (vitesse de déplacement de l'électrode).
- Distance de l'électrode à la pièce à souder (Longueur d'arc).
- Position du soudage (push ou pull).

La variation de ces paramètres influe principalement sur les aspects de soudage suivants :

- Taille et forme du cordon de soudure.
- Pénétration du métal d'apport dans le métal de base (métal à souder)
- Fusibilité de l'électrode enrobée [4].

3.1. Influence de l'intensité en soudage a l'arc avec électrode enrobée

Par la possibilité d'assembler des aciers de toutes nuances et de toutes compositions ainsi qu'en raison des excellentes caractéristiques mécaniques des dépôts issus de l'enrobage, la soudure à l'électrode enrobée permet le soudage de toutes les épaisseurs d'acier dans toutes les positions de soudage en mono-cordon ou en passages multiples.

Il suffit de choisir le bon enrobage selon le métal à souder, le diamètre de l'électrode enrobée et l'intensité du courant électrique de soudage.

Lorsque l'intensité de courant est trop faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder.

- La fusion est molle, la pénétration est faible et l'amorçage difficile.
- Il y a une instabilité de l'arc provoquant une mauvaise compacité du métal déposé avec des défauts et des incrustations du laitier dans la soudure.

Lorsque l'intensité de courant est trop forte, il se produit d'importantes projections aux abords du joint et des écoulements de métal lors du soudage en position verticale [14].

Le tableau II.4 montre l'influence de l'intensité du courant par rapport au diamètre de l'électrode et l'épaisseur de la pièce.

Épaisseur	Électrode				
	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
3 mm	60 A	70 A	90 A		
4 mm		80 A	100 A	120 A	
5 mm		90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm		90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm		90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm			130 A	160 A	190 A
12 mm			130 A	170 A	190 A
15 mm			130 A	170 A	200 A
20 mm				190 A	220 A

Tableau II. 4 : Intensité du courant (A) par rapport au diamètre de l'électrode (Ø) et à l'épaisseur de la pièce [14].

Le réglage de l'intensité dépend du diamètre de l'électrode, et du type de cordon à réaliser.

- **En soudage à plat** : $I=50x$ (Diamètre électrode - 1)
- **En soudage en angle intérieur** (Il faut 20% de plus qu'en soudage à plat, donc : $I=60x$ (Diamètre électrode - 1))
- **En soudage en angle extérieur** (Il faut 20% de moins qu'en soudage à plat, donc: $I=40x$ (Diamètre électrode - 1))

Ces réglages sont des valeurs approchées qui doivent être ajustées en fonction des soudeurs.



Figure II.2 : Poste de soudage à l'arc.

3.1.1 Identification d'un bon ou d'un mauvais réglage de l'intensité

Pour une vitesse d'avance normale, la variation de l'intensité de soudage (I_s) provoque les phénomènes suivants:

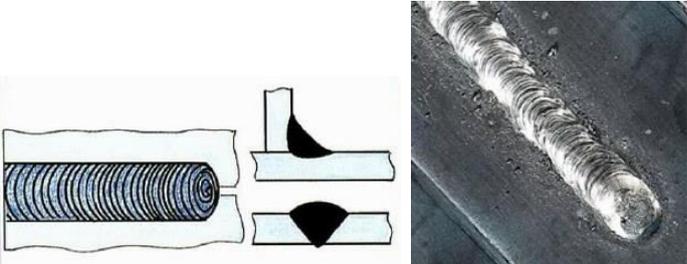
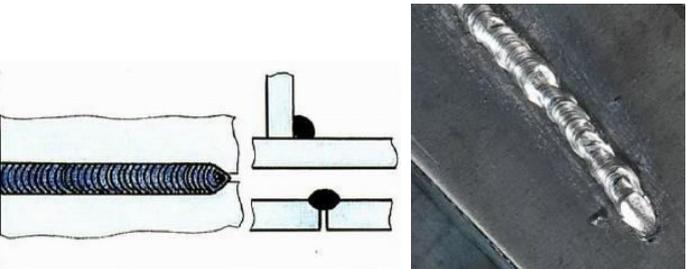
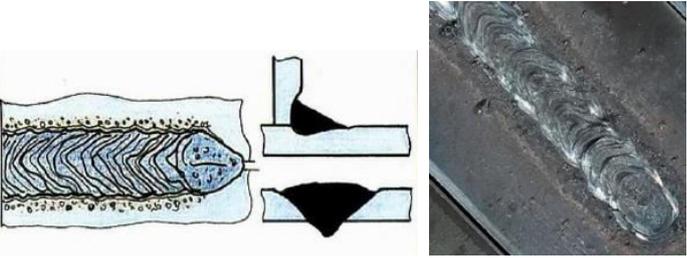
<p>Intensité de soudage normale</p>		<ul style="list-style-type: none"> - La forme du dépôt est harmonieuse. - L'aspect est propre, les fumées bleutées. - La fusion est normale. - La pénétration est bonne. - Le cratère est sain.
<p>Intensité de soudage faible</p>		<ul style="list-style-type: none"> - L'amorçage est délicat. - La forme du dépôt est étroite et bombée. - L'aspect est propre et régulier. - La fusion est molle. - La pénétration est faible. - Le cratère est sain mais allongé.
<p>Intensité de soudage forte</p>		<ul style="list-style-type: none"> - La forme du dépôt est large, plate et tourmentée. - L'aspect est sale, irrégulier avec des projections et des fumées brunes. - La pénétration est trop forte. - Le cratère est profond avec des risques de soufflures et de cirques. - Risque de caniveaux.

Tableau II. 5 : Identification d'un bon ou d'un mauvais réglage de l'intensité.

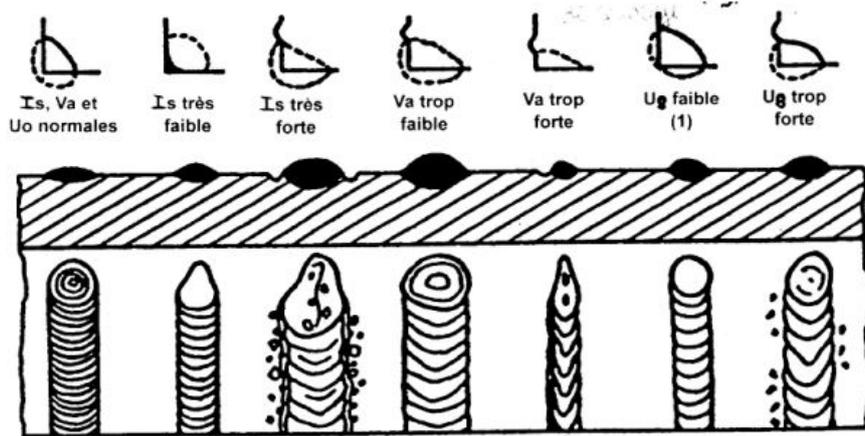


Figure II.3 : Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon.

3.2. Choix du diamètre de l'électrode

Le choix du diamètre d'une électrode enrobée dépend de l'épaisseur du support à souder et de la capacité du poste (intensité de soudage). Certains enrobages nécessitent aussi plus ou moins de puissance de soudage. En général, 1 mm de diamètre d'électrode nécessite 30 à 35 A d'intensité de soudage. Par exemple, un poste devra délivrer environ 60 à 75 A pour souder avec une électrode de 2 mm de diamètre.

Voici quelques expériences simples et l'étude de la notice permettent de comprendre l'importance du choix de l'électrode.

1 ère Expérience

Si l'on tente de souder avec une électrode de diamètre de 3,15mm une intensité de soudage normale de 110A sur des pièces d'épaisseur 2mm, l'arc perce ces pièces et il y a effondrement de la soudure.



Figure II.4 : Mauvais choix de diamètre de l'électrode.

2ème expérience

Si l'on renouvelle l'expérience avec une électrode de diamètre de 2mm et une intensité de soudage normale de 55A, on constate que la soudure devient possible et que la pénétration est d'environ 2mm.



Figure. II.5 : Bon choix de diamètre de l'électrode.

En conclusion on peut déduire que le diamètre de l'électrode ne doit être inférieur ou au maximum égal à l'épaisseur des pièces à souder.

3.3. Vitesse de déplacement de l'électrode

Pour une intensité normale, la variation de la vitesse provoque les phénomènes suivants:

<p>Vitesse normale</p>		<ul style="list-style-type: none"> - La forme du dépôt est harmonieuse et d'une largeur égale à deux électrodes. - La pénétration est bonne. - Le cratère est sain.
<p>Vitesse trop rapide</p>		<ul style="list-style-type: none"> - La forme du dépôt est étroite et pointue. - L'aspect est irrégulier avec des caniveaux. - Le cratère est allongé.

Vitesse lente		<ul style="list-style-type: none"> - La forme du dépôt est très bombée. - Risque de collage. - La pénétration est forte avec des risques d'effondrement. - Le cratère est profond.
----------------------	--	--

Tableau II. 6 : Influence de la vitesse de déplacement sur l'aspect du cordon.

		Ø des électrodes			
		2.5	3.2	4	5
		Vitesse de soudage cm / mn			
Energie Nominale en kJ / cm	6	18	27.9	40.5	58
	8	13.5	21	30.4	43.5
	10	10.8	16.8	24.3	34.8
	12	9	14	20.3	29
	14	7.7	12	17.4	24.9
	16		10.5	15.2	21.8
	18		9.3	13.5	19.3
	20		8.4	12.2	17.4
	25		6.7	9.7	13.9
	30			8.1	11.6
	40			6.1	8.7
	50				7

Tableau II.7: Vitesse de soudage en fonction de l'énergie nominale et le diamètre de l'électrode.

3.4. Longueur d'arc

La longueur d'arc est la distance entre le bout de l'électrode et la surface de la pièce à souder.

Une longueur d'arc supérieure à la normale:

- Donne un cordon irrégulier et plat.
- Entraîne un arc instable.
- Des porosités.
- Des soufflures.



Figure II.6 : Longueur d'arc supérieure à la normale.

Une longueur d'arc inférieure à la normale:

- Donne un cordon avec des stries grossières et irrégulières.
- Entraîne un manque de pénétration.
- Donne un arc instable qui a tendance à s'éteindre.



Figure II.7 : Longueur d'arc inférieure à la normale.

Ø des électrodes	2.5	3.2	4	5	
Longueur utile	300	400	400	400	
Intensité en A	75	110	150	200	
Tension en Volts	24	25.4	27	29	
Tps fusion d'une électrode	64	82	92	110	
Longueur du cordon en cm pour 10 cm d'électrode consommée					
Energie Nominale en kJ/ cm	6	6.4	9.5	15.5	26.6
	8	4.8	7.2	11.6	19.9
	10	3.8	5.7	9.3	16
	12	3.2	4.8	7.8	13.3
	14	2.7	4.1	6.7	11.4
	16		3.6	5.8	10
	18		3.2	5.2	8.9
	20		2.9	4.7	8
	25		2.3	3.7	6.4
	30			3.1	5.3
	40			2.3	4
	50				3.2

Tableau II. 8 : Longueur d'arc en fonction de l'énergie nominale et le diamètre de l'électrode.

3.5. L'angle d'inclinaison de l'électrode

Lors du soudage, le soudeur doit respecter l'angle d'inclinaison de l'électrode selon la position et le type du joint à souder.

- Si l'angle d'inclinaison n'est pas respecté, il est difficile pour le soudeur de bien surveiller le bain de fusion.
- De plus, le métal et le laitier en fusion ont tendance à s'écouler à l'avant du bain de fusion, provoquant ainsi une faible pénétration [18].

3.6. Tensions utilisées en soudage SMAW

3.6.1. Tension à vide (U_0)

C'est la tension électrique mesurée aux bornes du poste de soudage. La tension à vide détermine la stabilité de l'arc et facilite l'amorçage. Elle doit se situer entre 40 et 45 V pour le soudage SMAW à l'électrode Rutile. U_0 doit être supérieure à la tension d'amorçage surtout pour le courant alternatif.

3.6.2. Tension d'amorçage (U_a)

Elle varie selon le type et le diamètre de l'électrode utilisée. Elle est indiquée sur le paquet d'électrodes (ex. 45 V pour un enrobage Rutile et entre 60 à 70 V pour un enrobage Basique).

3.6.3. Tension de soudage (ou d'arc) U_s

Il s'agit de la tension dont l'électrode a besoin pour se stabiliser une fois que l'arc est établi.

Elle est généralement de l'ordre de 20 à 26 V.

On peut déterminer approximativement, pour le soudage SMAW, la tension de soudage en utilisant la relation : $U_s = 21 + (0,04 \times I)$.

Avec : I : Intensité de soudage.

3.6.4. Tension du réseau (U)

Monophasé (réseau domestique 220 V), les appareils sont branchés au réseau via des connexions à deux pôles ou 2 pôles + terre.

Triphasé (réseau industriel 380 V), les appareils sont branchés au réseau via des connexions à 3 pôles + terre ou 3 pôles + terre + neutre [13].

3.7. Énergie de soudage

En fonction de la vitesse d'avance du soudeur, de l'intensité et de la tension de soudage, on développera une énergie qu'il est nécessaire de déterminer dans des circonstances de particulières. On l'appelle énergie nominale.

On peut l'exprimer en kJ/cm : $E_n = (60 \cdot U \cdot I) / (1000 \cdot V_s)$

Avec :

U : la tension en V

I : l'intensité en A

V_s : la vitesse en cm/min

L'énergie doit être suffisante pour éviter le collage mais pas trop importante pour éviter le grossissement des grains, entraînant une diminution des propriétés mécanique.

4. Paramètres et aspects du soudage MIG-MAG

Les paramètres importants du soudage MIG-MAG sont :

- La vitesse de dévidage de fil.
- Diamètre du fil.
- Le voltage.
- La distance de la torche à la tôle.
- La vitesse de déplacement de la torche.
- La position de la torche.

La variation de ces paramètres influe principalement sur les aspects de soudage suivants :

- Taille et forme du cordon de soudure.
- Pénétration du métal d'apport dans le métal de base (métal à souder) [4].

4.1. Choix de la vitesse de dévidage de fil

Selon l'intensité à appliquer et le diamètre de fil sélectionné, nous allons appliquer un débit de dévidage de fil d'apport (en mètres/minute ou centimètres/minute).

Si la vitesse de fil est trop grande pour une tension donnée, le fil tape dans le bain de fusion.

Si la vitesse de dévidage de fil est trop faible pour une tension donnée, cela provoque une remontée du fil dans la buse et une rentrée d'Arc avec collage du fil dans le tube contact [19].

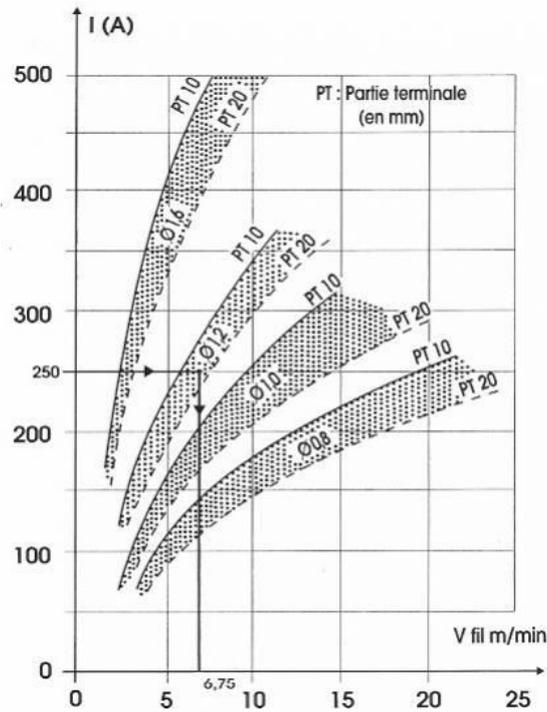


Figure II.8: Influence de vitesse par rapport l'intensité de soudage.

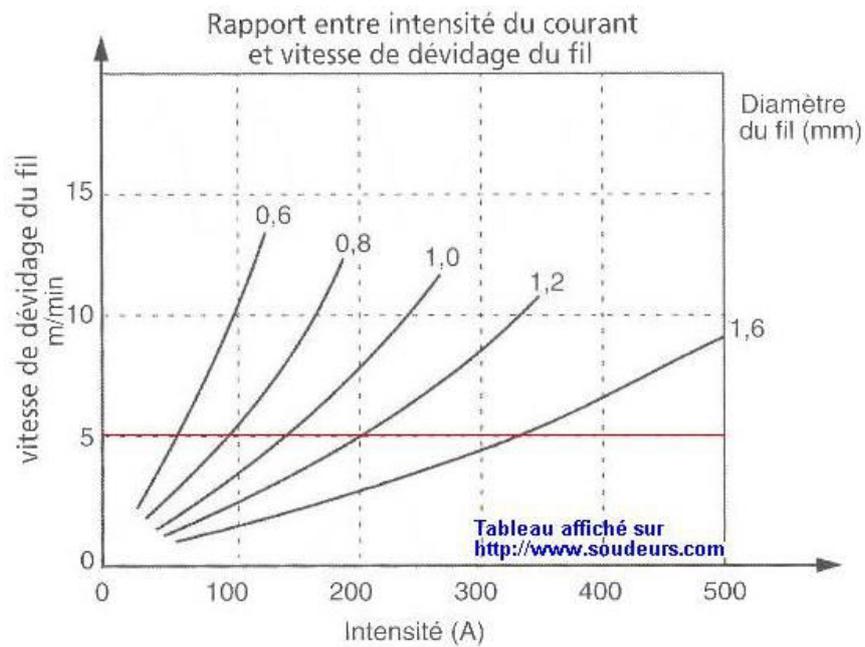


Figure II.9: Rapport entre intensité du courant et vitesse se dévidage de fil.

4.2. Choix des diamètres du fil d'apport

Le diamètre du fil s'effectue suivant les travaux de soudage à réaliser :

Exemples :

- **Carrosserie** : Ø 0,6 mm (40 à 100 A environ)
- **Tuyauterie de faible épaisseur et tôlerie fine** : Ø 0,8 mm (60 à 180 A environ)
- **Soudage courant et passes de pénétrations** : Ø 1,0 mm (100 à 300 A environ)
- **Soudage d'épaisseurs 6 – 8 mm** : Ø 1,2 mm (150 à 350 A environ)
- **Soudage d'épaisseurs de 10 mm environ**: Pour Ø 1,6 mm (200 à 700 A environ)

4.3. Choix de la tension de soudage

Il est possible de déterminer la tension de soudage d'après la formule: $U = 14 + (0.05.I)$

La longueur de fil doit être court (compris entre 7mm et 10 mm pour un fil de diamètre 0,6mm).

Un arc trop long est perméable à l'air ambiant ce qui a pour conséquence l'introduction d'oxygène, d'hydrogène et d'azote dans le métal fondu (préjudiciable aux caractéristiques mécaniques) [19].

Un arc trop long est à l'origine de soufflures dans le métal fondu.

Un arc trop court génère:

- Un risque de collage ou manque de fusion.
- Une faible pénétration.
- Une diminution de la largeur de cordon.
- Un collage de la buse dans le bain de fusion.
- Une surépaisseur de cordon.

Un arc trop long généré:

- Une perte d'énergie dans l'arc.
- Une pénétration élevée.
- Un manque de protection du bain de fusion.
- Une faible surépaisseur de cordon.

Le tableau II.9 illustre le choix de la tension d'arc suivante le diamètre de fil de soudage.

Diamètre du fil en mm	Type de transfert	Valeur de tension en Volts
Ø 0,6 mm	Court circuit	16 à 17 Volts
Ø 0,6 mm	Grosses gouttes	17 à 21 Volts
Ø 0,6 mm	Pulvérisation axiale	21 à 24 Volts
Ø 0,8 mm	Court circuit	17 à 19 Volts
Ø 0,8 mm	Grosses gouttes	19 à 23 Volts
Ø 0,8 mm	Pulvérisation axiale	23 à 26 Volts
Ø 1,0 mm	Court circuit	18 à 21 Volts
Ø 1,0 mm	Grosses gouttes	21 à 26 Volts
Ø 1,0 mm	Pulvérisation axiale	26 à 30 Volts
Ø 1,2 mm	Court circuit	21 à 24 Volts
Ø 1,2 mm	Grosses gouttes	24 à 29 Volts
Ø 1,2 mm	Pulvérisation axiale	29 à 35 Volts
Ø 1,6 mm	Court circuit	26 à 29 Volts
Ø 1,6 mm	Grosses gouttes	29 à 34 Volts
Ø 1,6 mm	Pulvérisation axiale	34 à 38 Volts

Tableau II.9: Choix de la tension d'arc suivante le diamètre de fil de soudage.

4.3.1. Influence de voltage sur l'apparence du cordon de soudure

Le tableau II.10 montre l'influence de la tension sur l'apparence du cordon de soudure.

<p>Tension de soudage normale (cordon correct)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon harmonieux. - Aspect propre et régulier. - Pénétration optimale.
<p>Tension de soudage trop faible</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon bombé, étroit et déformé. - Aspect régulier et propre. - Pénétration faible.
<p>Tension de soudage trop forte</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon large et plat. - Aspect malpropre, irrégulier avec projections fines. - Pénétration élevée.

Tableau II.10: Influence de la tension sur l'apparence du cordon de soudure.

4.4. Choix de l'intensité de soudage

L'intensité de soudage est automatiquement réglée avec le débit de fil d'apport(en centimètres par minute).

L'intensité doit être adaptée au diamètre du fil utilisé.

Il est possible de déterminer la tension de soudage d'après la formule: $I = (U-14).20$

Une intensité de soudage faible génère:

- Une faible pénétration.
- Une diminution de la largeur de cordon.
- Une forte surépaisseur de cordon avec un bombé inesthétique.
- Un manque de stabilité de l'arc électrique.
- Un risque de porosité.
- Un risque de collage du cordon sur la pièce.

Une intensité de soudage trop forte génère:

- Un risque de caniveaux.
- Une pénétration forte.
- Un risque d'effondrement du bain de fusion.
- Des projections métalliques importantes.
- Une faible surépaisseur de cordon [19].

4.4.1. Influence de l'intensité sur l'apparence du cordon de soudure

Le tableau II.11 présente l'influence de l'intensité sur l'apparence du cordon de soudure.

<p>Intensité de soudage normale (cordon correct)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon harmonieux. - Aspect propre et régulier. - Pénétration optimale.
---	--	---

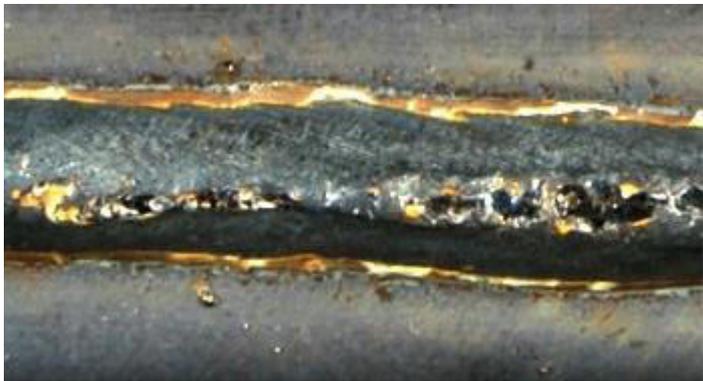
<p>Intensité de soudage trop faible</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon bombé, étroit. - Aspect propre et régulier. - Pénétration médiocre.
<p>Intensité de soudage trop forte</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon large et plat. - Aspect très irrégulier et projections importantes. - Pénétration excessive.

Tableau II.11 : Influence de l'intensité sur l'apparence du cordon de soudure.

4.5. Distance de la torche à la tôle

Dans la soudure MIG-MAG, un arc électrique est créé entre le fil qui sort de la torche, faisant fonction d'électrode (pole +) et la tôle (pole -).

La distance "torche à tôle" est la distance comprise entre le point de sortie du fil de la torche et la tôle soudée.

En éloignant la torche de la tôle, on diminue l'ampérage, donc la pénétration, et vice-versa, c'est pourquoi l'opérateur s'efforce habituellement de garder une distance constante tout au long du soudage, de l'ordre de 1cm à 1.5cm.

Une trop grande distance génère une température d'arc insuffisante et trop de métal est déposé sur le cordon, occasionnant des soudures bombées et peu pénétrantes, ainsi qu'une mauvaise stabilité de l'arc [20].

4.6. Vitesse de déplacement de la torche

La vitesse à laquelle vous maniez la torche a une influence directe sur la qualité de la soudure.

Une vitesse d'avance de soudage trop lente génère:

- Une augmentation de la largeur du cordon.
- Une augmentation de la pénétration.
- Un risque d'effondrement du bain de fusion.
- Un risque de soufflures.

Une vitesse d'avance de soudage trop rapide génère:

- Une diminution de la largeur du cordon et de la pénétration.
- Un cordon à stries allongées et à la forme très irrégulière.
- Un bombé de soudure très important.
- Un risque de caniveaux.

4.6.1. Influence de la vitesse d'avance sur l'apparence du cordon de soudure

Le tableau II.12 illustre l'influence de la vitesse sur l'aspect du cordon.

<p>Vitesse d'avance normale (cordon correct)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon harmonieux. - Aspect propre et régulier. - Pénétration optimale.
<p>Vitesse d'avance trop rapide</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon bombé, étroit et déformé. - Aspect irrégulier. - Pénétration médiocre.

<p>Vitesse d'avance trop lente</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Cordon très large et trop bombé. - Aspect régulier. - Pénétration excessive.
---	--	--

Tableau II.12: Influence de la vitesse sur l'aspect du cordon.

4.7. Position de la torche

On distingue usuellement deux mouvements possibles :

- **PUSH**: la torche est inclinée vers l'arrière comme si elle "poussait" la goutte de métal en fusion.
- **PULL**: la torche est inclinée en avant, comme si elle "tirait" le métal en fusion.

L'angle de la torche avec la verticale ne doit pas dépasser 25°, dans les deux types de position.

La position de la torche a une influence assez significative sur la forme du cordon de soudure, plus que le voltage ou la vitesse.

En mode PUSH, il y a moins de pénétration, le cordon est plus large. C'est le mode utilisé pour souder des tôles fines.

En mode PULL, par contre, la pénétration est optimale, et le cordon plus étroit [20].

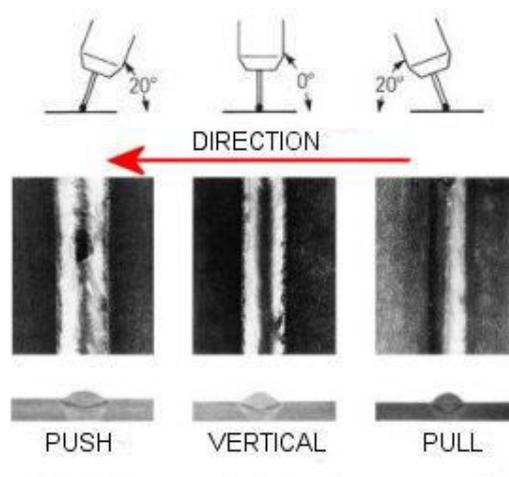


Figure II.10: Influence de la position de la torche sur l'aspect du cordon.

5. Paramètres et aspects du soudage TIG

Les principaux paramètres de soudage influents sur l'aspect du cordon de soudure (essentiellement la largeur du cordon et la pénétration) sont les suivants :

- Dimension et nature du matériau à souder.
- Vitesse de soudage
- Diamètre de l'électrode.
- Choix et débit du métal d'apport.
- Choix et débit du gaz de protection [4].

5.1. Dimension et nature du matériau à souder

Le procédé de soudage TIG ou GTAW peut être utilisé pour souder presque tous les métaux et alliages métalliques actuellement utilisés. C'est un moyen particulièrement efficace et économique de souder des métaux légers de moins de 3 mm ainsi que de souder des métaux difficiles à souder avec le procédé de soudage conventionnel. Ces métaux comprennent les suivants:

- Aluminium et alliages d'aluminium.
- Cuivre et alliages de cuivre.
- Nickel et alliages de nickel.
- Magnésium et alliages de magnésium.
- Acier faiblement allié et aciers au carbone.
- Matériaux réactifs (titane et tantale, par exemple).
- Assemblage des aciers au carbone et alliés.

5.2. Vitesse de soudage

L'influence de la vitesse de soudage peut être évaluée par son effet sur l'apport calorifique linéaire de soudage. L'apport calorifique est lié à la vitesse de soudage par la relation :

$$Q = U \cdot I / V$$

Avec:

Q : Apport calorifique (KJ/cm).

I : Courant (A) ; U : Tension (V).

V: Vitesse de soudage (cm/min).

Une augmentation de la vitesse de soudage diminue la quantité de chaleur par unité de longueur de soudure, ce qui aboutit à une diminution de la section de la zone fondue. Cependant, plusieurs auteurs ont constaté que le rendement d'arc est supérieur quand la vitesse de soudage est relativement élevée.

5.3. Affutage et le diamètre de l'électrode réfractaire

5.3.1. Choix du Diamètre de l'électrode

Deux possibilités de choix du diamètre de l'électrode :

Soit en fonction de l'ampérage admissible supporté, donc il faut calculer l'intensité de soudage avant ou alors en fonction de l'épaisseur à souder et dans les deux cas de la nature du métal à souder.

On peut calculer l'intensité de soudage à l'aide de formule suivante : $I_s = (U_s - 10) / 0.04$

Tableau par ampérage

COURANT CONTINU (polarité directe)		
Ø électrode	Tungstène pur	Tungstène thorié
Ø 1,0 mm	10 à 70 A	10 à 80 A
Ø 1,6 mm	50 à 100 A	50 à 120 A
Ø 2,0 mm	80 à 160 A	80 à 190 A
Ø 2,4 mm	100 à 200 A	100 à 240 A
Ø 3,2 mm	140 à 260 A	140 à 300 A

Tableau II. 13: Choix du diamètre de l'électrode (courant continu).

COURANT ALTERNATIF		
Ø électrode	Tungstène pur	Tungstène thorié
Ø 1,0 mm	10 à 50 A	20 à 70 A
Ø 1,6 mm	40 à 80 A	50 à 100 A
Ø 2,0 mm	60 à 110 A	70 à 180 A
Ø 2,4 mm	80 à 150 A	90 à 200 A
Ø 3,2 mm	100 à 200 A	150 à 250 A

Tableau II. 14: Choix du diamètre de l'électrode (courant alternatif).

Tableau par épaisseur

La valeur des \varnothing d'électrodes cités n'est donnée qu'à titres d'exemples.	
ACIERS ET ACIERS INOXYDABLES	ALLIAGES CUIVREUX
ALLIAGES LEGERS	
L'électrode utilisée est une électrode en tungstène pur	
De 0,5 à 3 mm le \varnothing de l'électrode utilisée est généralement égal à l'épaisseur pour tous les métaux.	
<p>Pour une épaisseur de 2 à 4 mm le \varnothing est généralement égal à 2 mm</p> <p>Pour une épaisseur de 5 à 10 mm le \varnothing est égal à 3 mm</p>	<p>Pour une épaisseur de 3 à 6 mm le \varnothing égale 3 mm</p> <p>Pour une épaisseur de 8 à 10 mm le \varnothing égale 4 mm</p> <p>Remarque : souder avec un préchauffage de 250° à 600°</p>
<p>Pour une épaisseur de 4 à 6 mm le \varnothing égale 4 mm</p> <p>Pour une épaisseur de 6 et 8 mm le \varnothing égale 5 mm</p>	

Tableau II. 15: Choix du diamètre de l'électrode.

5.3.2. Affûtage des électrodes

La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible est une variable importante. L'affûtage est exécuté à l'aide d'une meuleuse à grain fin avec récupération des poussières. L'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30 et 60 degrés. Les stries d'usinage ou de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode.

Hauteur de la pointe 1,5 à 3 fois le diamètre de l'électrode.

La pointe d'extrémité du cône doit être adoucie pour supporter les densités de courant.

La figure II.11 présente le choix de l'affûtage des électrodes.



Figure II.11: Choix de l'affûtage des électrodes.

5.4. Choix et débit du métal d'apport

Le procédé TIG peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport, selon le type de joint et le métal à souder. Ainsi, il est souvent possible de fusionner des pièces minces sans avoir recours à une baguette d'apport. C'est le cas des joints à bords relevés, des joints d'angle extérieur et des joints à recouvrement. Cependant, le métal d'apport est indispensable pour souder des pièces épaisses.

La composition des baguettes d'apport doit s'apparenter le plus possible à celle du métal de base de façon que le mélange soit homogène.

Les baguettes de métal d'apport utilisées doivent être spécifiques au soudage TIG : les baguettes d'apport en acier recouvertes d'une couche de cuivre et utilisées en soudage oxyacétylénique sont déconseillées parce qu'elles entraînent l'inclusion d'impuretés.

Le tableau II.16 illustre l'influence du diamètre de baguette de métal d'apport par rapport l'épaisseur à souder.

Diamètre	Épaisseur à souder
2	0.5 à 2
3	2 à 5
4	5 à 8
4 ou 5	8 à 12
5 ou 6	12 ou plus

Tableau II. 16 : Diamètre de baguette de métal d'apport par rapport l'épaisseur à souder.

Le métal d'apport ainsi que le métal de base se mélangent durant le soudage, et leur composition a une influence directe sur la qualité de la soudure. Aussi, il est nécessaire de bien nettoyer les baguettes et le métal de base afin qu'il n'y ait aucune contamination.

5.5. Choix et débit du gaz de protection

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:

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

Argon

L'argon est le gaz le plus couramment utilisé pour le soudage à l'arc au tungstène. Il est plus lourd que l'air, 10 fois plus lourd que l'hélium et offre une meilleure couverture de protection que l'hélium à des débits plus faibles, car il a moins tendance à s'envoler ou à se détacher de la zone de soudage. L'argon est moins coûteux que l'hélium et peut être fourni dans des bouteilles sous forme de gaz ou de liquide. L'argon fournit un arc lisse et silencieux et peut être utilisé à une tension d'arc inférieure; l'argon peut donc être utilisé pour le soudage de métaux minces. L'argon présente des caractéristiques spéciales lorsqu'il est utilisé avec un

courant alternatif, ce qui est particulièrement important pour le soudage de l'aluminium. Soudure d'aluminium. L'utilisation de l'argon permet d'obtenir une qualité de soudure élevée et un bel aspect.

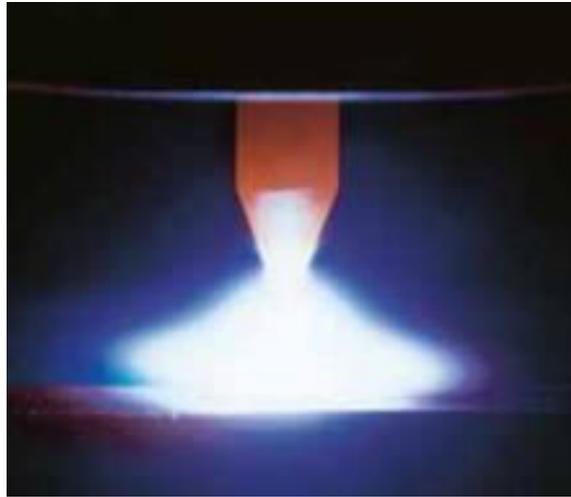


Figure. II.12: Arc TIG avec argon.

Hélium

L'hélium peut être utilisé seul ou en combinaison avec de l'argon. L'hélium nécessite une tension d'arc supérieure à celle de l'argon. Comme l'hélium est plus léger que l'argon, il nécessite des débits plus élevés deux à trois fois supérieurs à celui de l'argon pour fournir une protection anti-gaz adéquate à la zone de soudure. L'hélium est utilisé pour souder des métaux épais et pour souder des métaux à haute conductivité thermique, car ils perdent de la chaleur de manière féroce. De tels métaux nécessitent des tensions d'arc plus élevées avec de l'hélium[21].

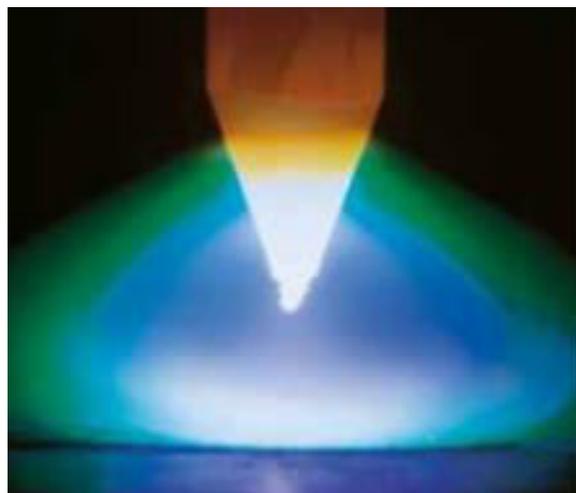


Figure II.13: Arc TIG avec hélium.

6. Paramètres et aspects du soudage par points

Le soudage par résistance utilise principalement comme phénomène physique l'échauffement dû à la résistance de passage à un courant déterminé pendant un certain temps. Les paramètres principaux de ce procédé sont :

- Intensité du courant, plusieurs milliers et dizaines milliers d'ampères.
- Le temps de soudage, généralement exprimé en période (1 période=20 millisecondes). Ce temps de soudage est toujours très rapide (inférieur à une seconde).
- Le Temps de maintien
- L'effort de pression aux électrodes (en daN ou Kg).

6.1. Intensité de soudage

L'intensité de soudage est considérée comme un paramètre important pour engendrer l'énergie dissipée. Car elle gouverne la génération de chaleur par effet Joule. L'intensité utilisée soit en courant alternatif monophasé, (AC-50Hz), ou soit courant continu moyenne fréquence, (MFDC-1000Hz).

Si trop élevée alors il y aura usure prématurée des électrodes et une soudure peu solide, une indentation trop importante, des projections, et de la déformation de la soudure [13].

Si trop faible cela donnera aussi une soudure fragile mais parce que le point sera trop petit.

Intervient pendant la phase de chauffage. L'ordre de grandeur typique est de quelques dixièmes de secondes. Selon la norme, le temps de soudage dépend de la nuance d'acier et son épaisseur. Dans certains cas de soudage de tôle épaisse, et haute résistance mécanique, le courant pulsé est souvent à appliquer afin de stabiliser le développement du noyau. Cette pulsation comporte le temps de chaud, séparé par le temps de maintien ou le temps de froid. Le nombre de cycles supplémentaires pour le post traitement thermique est souvent adapté à l'assemblage de tôles hautes résistances [22].

6.2. Temps de maintien

Le temps de maintien est nécessaire à la solidification par l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit d'eau de refroidissement [22].

Le tableau II.17 illustre l'effet du temps maintien.

Un temps trop long provoque	Un temps trop court provoque
Un cuivrage des tôles.	Pas ou peu de fusion.
Des projections de métal en fusion, une indentation trop importante.	Soudage réalisé mauvais.
Une détérioration rapide des électrodes.	
Un collage des électrodes sur la tôle.	

Tableau II. 17 : Effets du temps maintien.

6.3. Effort de soudage

L'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse [22].

Le tableau II.18 illustre l'effet du l'effort de soudage

Un effort trop important provoque	Un effort insuffisant provoque
Une réduction des résistances.	Une augmentation des résistances.
Des points trop petits ou collés.	Des projections de métal en fusion /points brûlés.
Un écrasement ou emboutissage des bossages.	Une usure anormale des électrodes.

Tableau II. 18: Effets de l'effort de soudage.

6.4. Quelques paramètres indicatifs pour le soudage par points

Le tableau II.19 illustre les paramètres de soudage par point pour aciers non alliés.

PARAMÈTRES DE SOUDAGE RÉSISTANCE PAR POINTS				
ACIERS NON ALLIÉS				
Epaisseur	Ø pointe	Intensité	Temps	Pression
0,5 mm	4 mm	2 000 A	0,2 s	60 daN
0,5 mm	4 mm	4 000 A	0,04 s	150 daN
1,0 mm	5 mm	3 000 A	0,4 s	100 daN
1,0 mm	5 mm	8 000 A	0,1 s	250 daN
2,0 mm	7 mm	5 000 A	1,0 s	200 daN
2,0 mm	7 mm	14 000 A	0,3 s	500 daN
3,0 mm	9 mm	8 000 A	2,0 s	300 daN
3,0 mm	9 mm	19 000 A	0,6 s	800 daN
4,0 mm	11 mm	10 000 A	3,2 s	380 daN
4,0 mm	11 mm	24 000 A	0,9 s	1 250 daN
5,0 mm	13 mm	12 000 A	4,5 s	450 daN
5,0 mm	13 mm	28 000 A	1,4 s	1 700 daN

Tableau II.19: Paramètres de soudage par point pour aciers non alliés.

Le tableau II.20 illustre les paramètres de soudage par point pour aciers inoxydables.

PARAMÈTRES DE SOUDAGE RÉSISTANCE PAR POINTS				
ACIERS INOXYDABLES (Documentation SCIAKY)				
Epaisseur	Ø pointe	Intensité	Temps	Pression
0,5 mm	4,0 mm	3 750 A	0,04 s	175 daN
0,8 mm	4,5 mm	6 000 A	0,10 s	300 daN
1,0 mm	5,0 mm	7 600 A	0,14 s	400 daN
1,5 mm	6,0 mm	11 000 A	0,20 s	650 daN
2,0 mm	7,0 mm	14 000 A	0,24 s	900 daN
2,5 mm	7,5 mm	16 000 A	0,28 s	1 200 daN
3,0 mm	8,5 mm	18 000 A	0,32 s	1 500 daN

Tableau II.20: Paramètres de soudage par point pour aciers inoxydables.

7. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé

La géométrie du cordon peut évoluer sous l'influence des principaux facteurs ci-après:

- Intensité de soudage (I_s).
- Tension de soudage (U_s).
- Vitesse de soudage (V_s).
- Nature du courant et polarité.
- Diamètre du fil électrode (\emptyset).
- Position du fil et inclinaison par rapport à la surface de la tôle.

7.1. Influence de l'intensité (I_s)

L'intensité influence la profondeur de pénétration, la hauteur du cordon, la quantité de métal déposé et parfois les pertes en éléments d'alliage. Plus l'intensité est élevée plus la pénétration et la surépaisseur du cordon sont grandes. La figure II.14 illustre l'influence de l'intensité sur la pénétration et la surépaisseur d'un cordon.

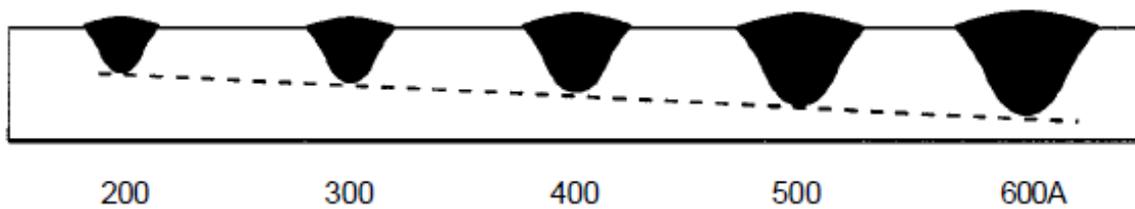


Figure II.14 : Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure.

7.1.1. Courbes de fusion

Les courbes de fusion des fils électrode précisent la relation entre l'intensité de soudage et la vitesse de dévidage du fil pour différents diamètres. On constate qu'une augmentation de l'intensité provoque:

- Une vitesse de dévidage plus rapide.
- Une quantité de métal déposé plus importante.

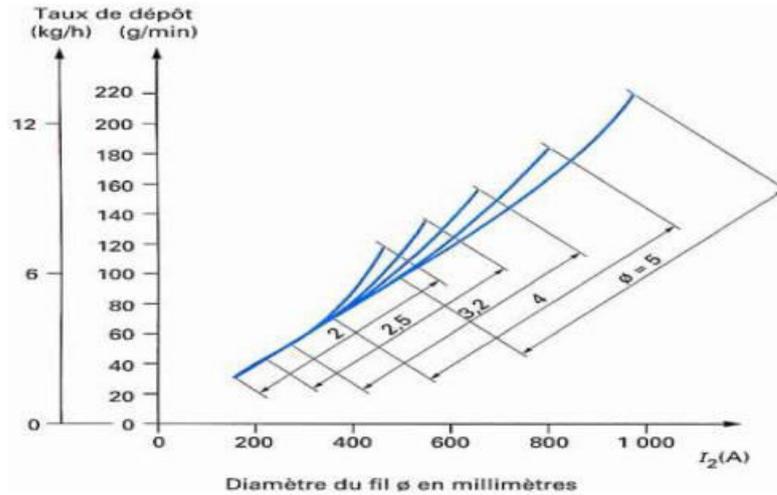


Figure II.15: Taux de dépôt moyen en soudage sous flux.

En moyenne, la vitesse de dépôt croît d'environ 1.5 kg/heure par tranche d'augmentation d'intensité de 100 ampères [23].

7.1.2. Influence de l'intensité du courant de soudage et de la vitesse de soudage

On appelle intensité du courant de soudage, la quantité d'électricité qui traverse l'électrode et la pièce lorsque l'arc est amorcé. la vitesse de soudage et la vitesse d'avancement de l'électrode le long de la ligne à souder.

La figure II.16 indique l'effet de l'intensité du courant sur la pénétration (profondeur de bain de fusion formé dans le métal de base).

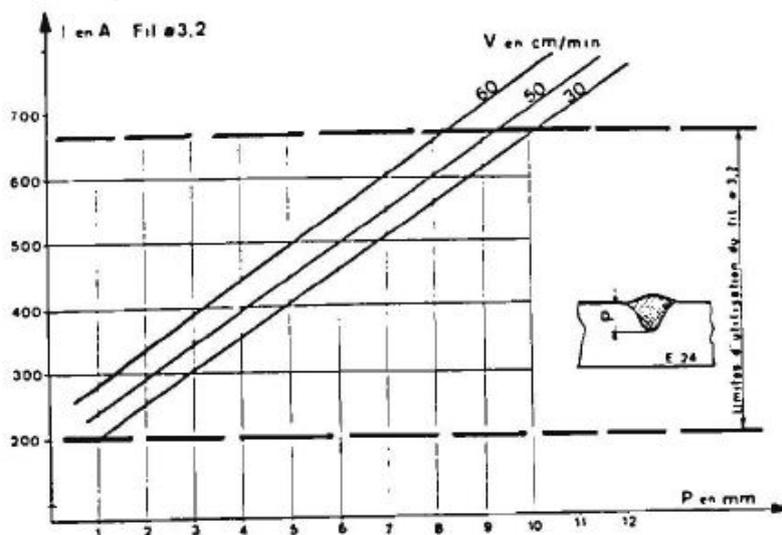


Figure II.16: Effet de l'intensité du courant sur la pénétration.

On voit que la profondeur de la pénétration de la soudure augmente avec l'intensité du courant. Par contre, plus l'avancement du cordon de soudure est rapide, pour une même intensité de courant, moins la soudure est profonde. L'intensité du courant a peu d'influence sur la largeur et l'épaisseur du cordon de soudure, mais la vitesse de soudage, elle exerce une certaine influence sur ces deux paramètres. La largeur du cordon est inversement proportionnelle à la vitesse de soudage (Figure II.17).

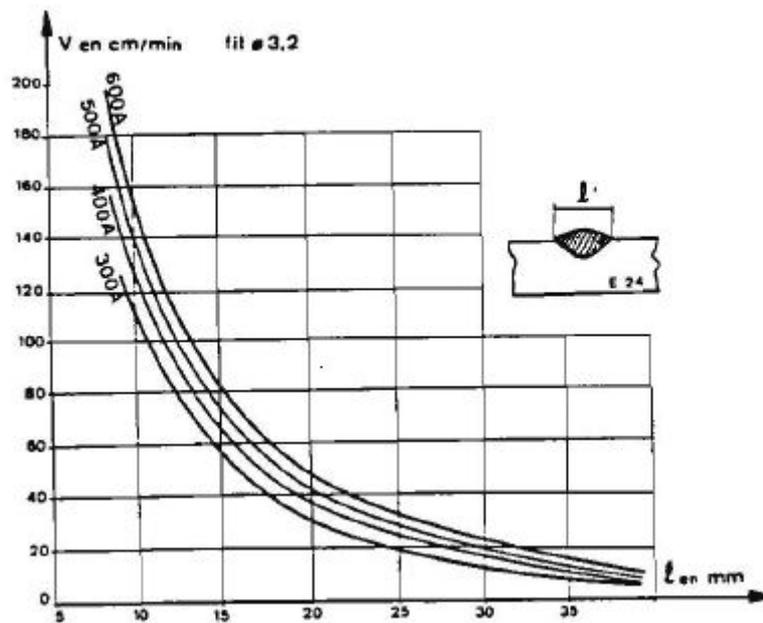


Figure. II.17: Effet de la vitesse de soudage sur la largeur du cordon de soudure.

7.2. Influence de la tension de soudage (Us)

Une tension d'arc élevée donne une soudure large et peu pénétrante, qui convient au soudage de bords très écartés et permet l'incorporation d'un plus grand nombre d'éléments d'alliage au flux. Mais une tension d'arc élevée augmente aussi la consommation de flux et complique l'élimination du laitier refroidi en même temps. Elle accroît le risque de formation de caniveaux, notamment lors de la réalisation de soudures d'angle. À l'inverse une faible tension d'arc donne à la soudure une convexité excessive ainsi qu'un mauvais angle de contact avec la pièce à souder [23].

En pratique les tensions d'arc sont comprises entre 20 et 45 volts.

La figure II.18 indique l'effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure.

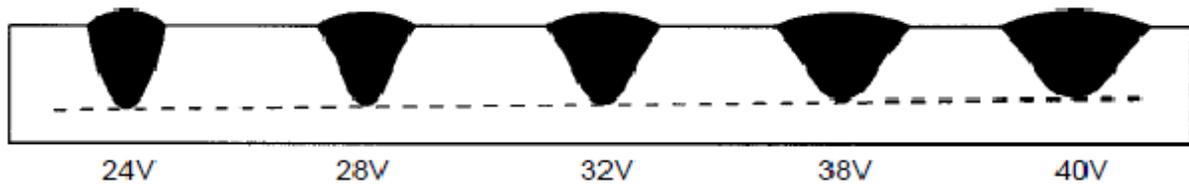


Figure II.18: Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure.

7.3. Influence de la vitesse de soudage (V_s)

La vitesse influence sur la pénétration et la géométrie du cordon. A tension et intensité de soudage constantes, l'accroissement de la vitesse a pour effet d'affiner le cordon. La profondeur de pénétration diminue avec la vitesse de soudage. Un accroissement de la vitesse de soudage peut provoquer l'apparition de porosités du fait de la solidification rapide du bain de fusion entraînant un dégazage insuffisant. Un soudage trop rapide peut également provoquer l'apparition de caniveaux [23].

En pratique la vitesse de soudage va de 25 Centimètres par minute à 2 mètre par minute.

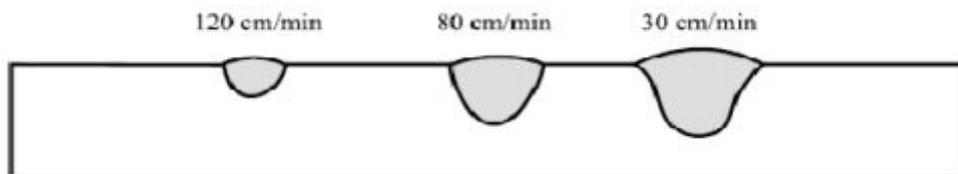


Figure II.19: Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon.

7.4. Nature du courant et polarité

7.4.1. Le courant

Comme pour l'électrode enrobée, on peut utiliser du courant continu ou alternatif. Le courant continu est d'un emploi plus aisé et donne lieu à un meilleur amorçage, une stabilité supérieure et une meilleure qualité du cordon.

Le courant alternatif, insensible au phénomène de soufflage magnétique, permet, en modifiant la position de la courbe (signal carré), de favoriser, soit le dépôt (phase négative), soit la pénétration (phase positive).

En pratique les intensités utilisées varient entre 200 et 600 Ampères.

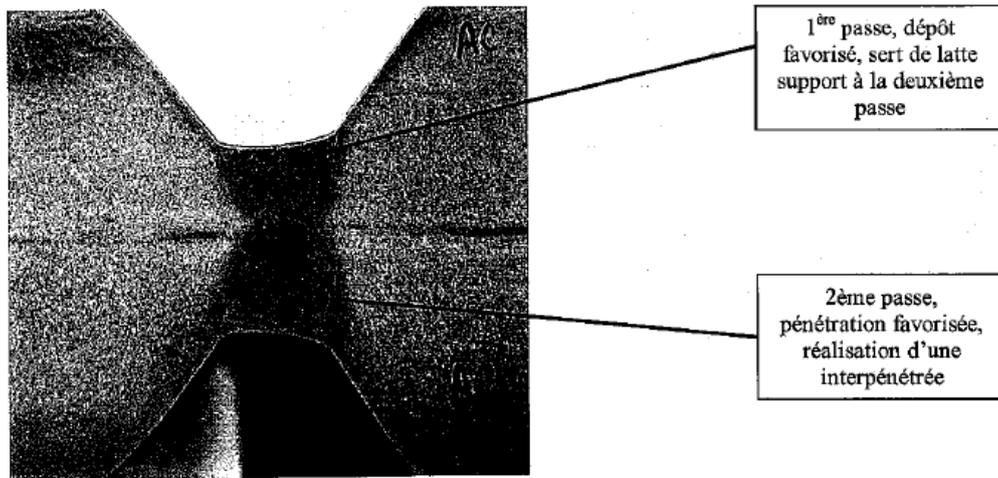


Figure II.20 : Macrographie ,2passes (endroit/envers), courant alternatif.

7.4.2. Polarité

La polarité utilisée a aussi son effet sur la soudure résultante. Si le fil est lié au pôle positif du générateur de courant (polarité indirecte), le cordon résultant est plus pénétrant qu'on cas de polarité direct. Donc la polarité directe est utilisée surtout pour le placage afin d'éviter que le matériau déposé trop se mélange avec celui de base.

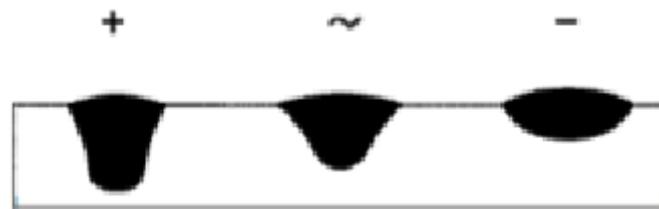


Figure II.21: Influence de polarité sur la forme du cordon.

7.5. Diamètres de fil

Avec un faible diamètre de fil, le cordon est plus pénétrant ainsi que l'arc est plus stable car la densité de courant est plus élevée. Inversement, un fil épais est utilisé surtout pour remplir facilement les joints larges.

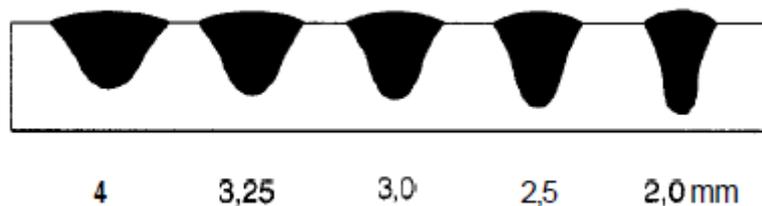


Figure II.22: Influence de diamètres de fil sur la forme du cordon.

7.6. Sens de soudage

La forme de cordon dépend aussi du sens de soudage. Le soudage en poussant produit une soudure de faible pénétration.

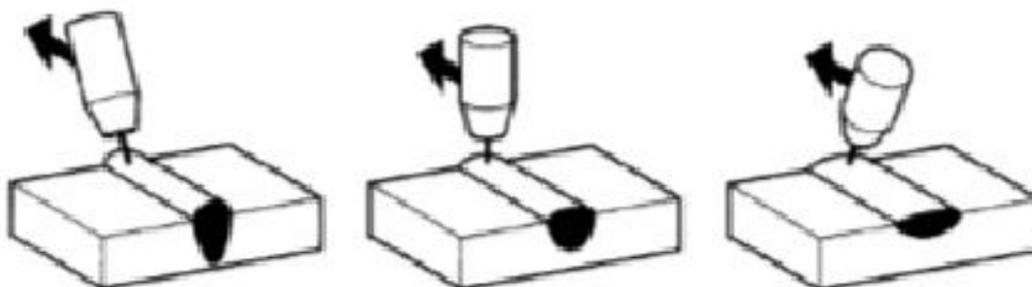


Figure. II.23: Influence de sens de soudage sur la forme du cordon.

Chapitre III

Module développé

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'outil développé. Cette interface a été développée sous logiciel Visuel Basic 6.0.

2. Présentation de logiciel

Visual Basic (VB) est un langage de programmation événementielle de troisième génération ainsi qu'un environnement de développement intégré, créé par Microsoft pour son modèle de programmation. Visual Basic est directement dérivé du BASIC et permet le développement rapide d'applications, la création d'interfaces utilisateur graphiques, l'accès aux bases de données en utilisant les technologies DAO, CAO, ... ainsi que la création de contrôles ou objets ActiveX. Les langages de script tels que *Visual Basic for Applications* et *VBScript* sont syntaxiquement proches de Visual Basic, mais s'utilisent et se comportent de façon sensiblement différente.

Un programme en VB peut être développé en utilisant les composants fournis avec Visual Basic lui-même. Les programmes écrits en Visual Basic peuvent aussi utiliser l'API Windows, ceci nécessitant la déclaration dans le programme des fonctions externes.

Dans une étude conduite en 2005, 62 % des développeurs déclaraient utiliser l'une ou l'autre forme de Visual Basic. Selon la même étude, les langages les plus utilisés dans le domaine commercial sont Visual Basic, C++, C# et Java.

La dernière mise à jour de Visual Basic est la version 6.0, sortie en 1998. Le support étendu Microsoft a pris fin en 2008. À partir de la version 7, le Visual Basic subit des changements substantiels le rapprochant de la plate-forme « dot Net », et qui amènent Microsoft à le commercialiser sous le nom de Visual Basic .NET

3. Présentation de l'outil développé

L'écran de la figure III.1 présente le module développé sous Visual Basic version 6.0.



Figure III.1 : Interface de l'outil développé.

4. Principales fonctions du module

Les principales fonctions remplies sont la recherche des paramètres des procédés de soudage suivants :

- Soudage oxyacétylénique.
- Soudage par résistance.
- Soudage à l'électrode enrobée.
- Soudage MIG/MAG.
- Soudage TIG.

L'écran de la figure III.2 illustre les différentes fonctions de module.

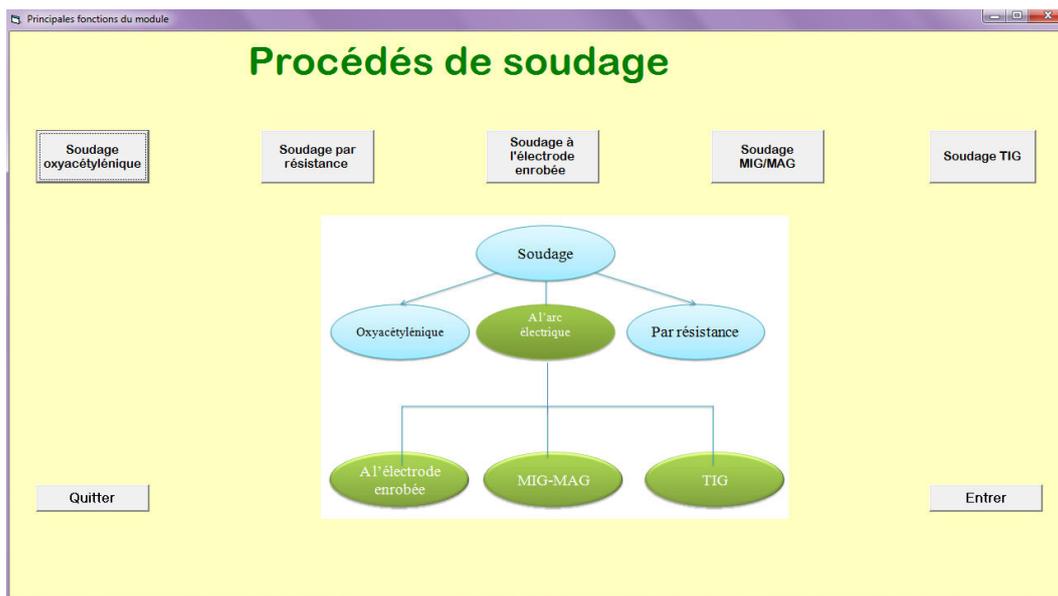
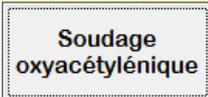


Figure III.2 : Différentes fonctions du module.

Pour accéder à l'un de ces procédés, il suffit de cliquer sur la commande concernée.

5. Choix des paramètres de soudage oxyacétylénique

☞ Cliquer sur le bouton  pour accéder au paramètre de ce procédé.

L'écran de la figure III.3 illustre les différents paramètres de soudage OA.

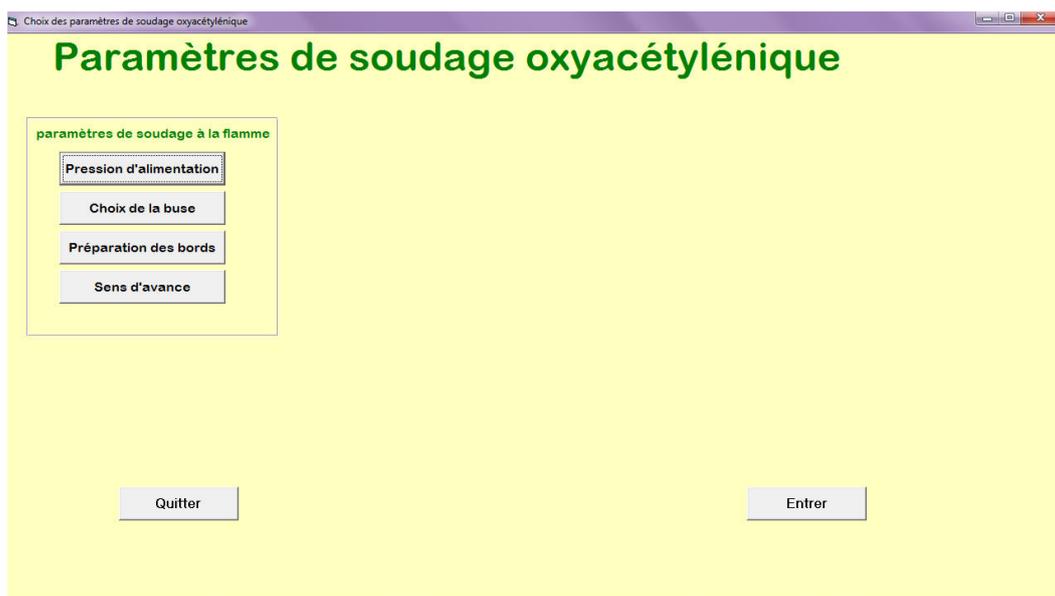


Figure III.3: Choix de paramètres de soudage OA.

5.1. Pression d'alimentation

Pression d'alimentation

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton

L'écran de la figure III.4 illustre le réglage de pression d'alimentation pour soudage à la flamme.

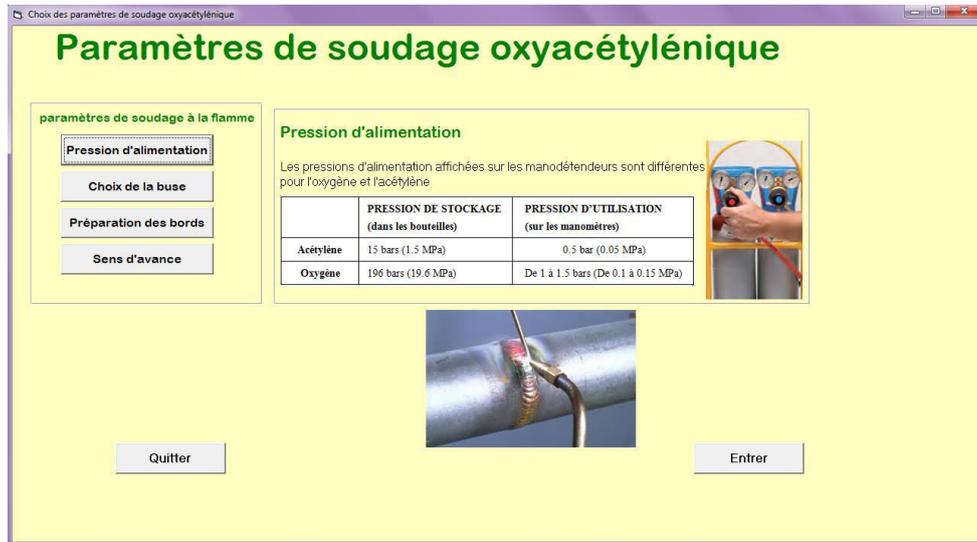


Figure III.4: Pression d'alimentation pour soudage à la flamme.

5.2. Choix de la buse

Choix de la buse

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton

L'écran de la figure III.5 illustre le choix de débit de la buse pour soudage OA.



Figure III.5 : Choix de la buse pour soudage à la flamme.

5.3. Préparation des bords

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton



L'écran de la figure III.6 illustre la préparation des bords pour soudage OA.

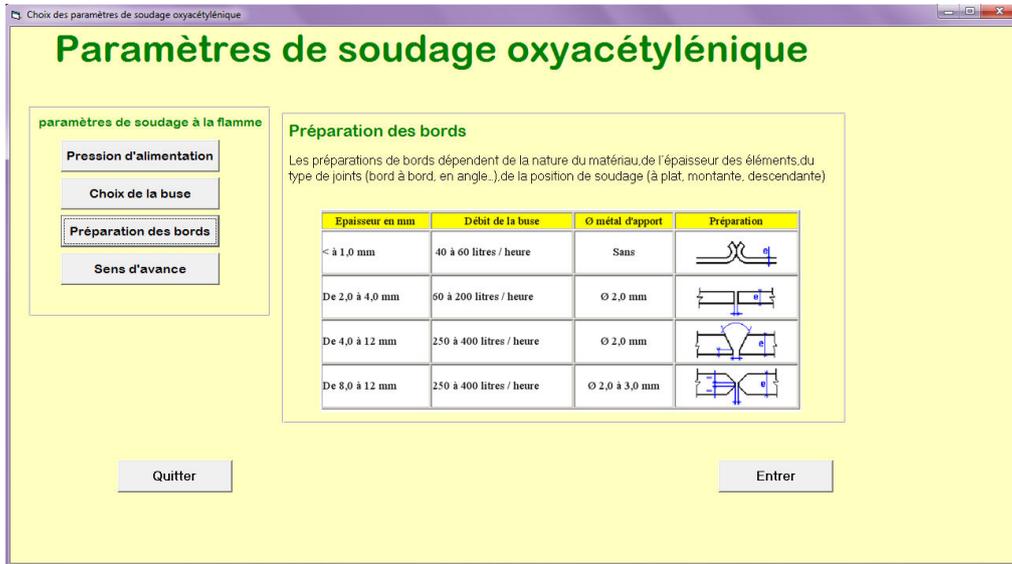


Figure III.6 : Préparation des bords pour soudage à la flamme.

5.4. Sens d'avance

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton



L'écran de la figure III.7 présente le sens d'avance pour soudage OA.

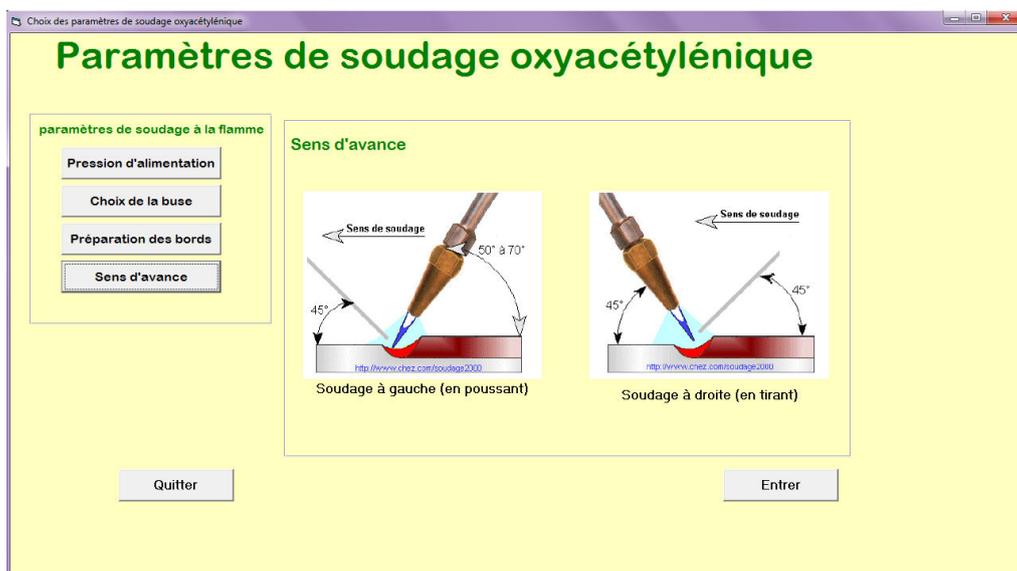


Figure III.7: Sens d'avance pour soudage à la flamme.

6. Choix des paramètres de soudage par point

☞ Cliquer sur le bouton  pour accéder au paramètre de ce procédé.

L'écran de la figure III.8 illustre les différents paramètres de soudage par point.

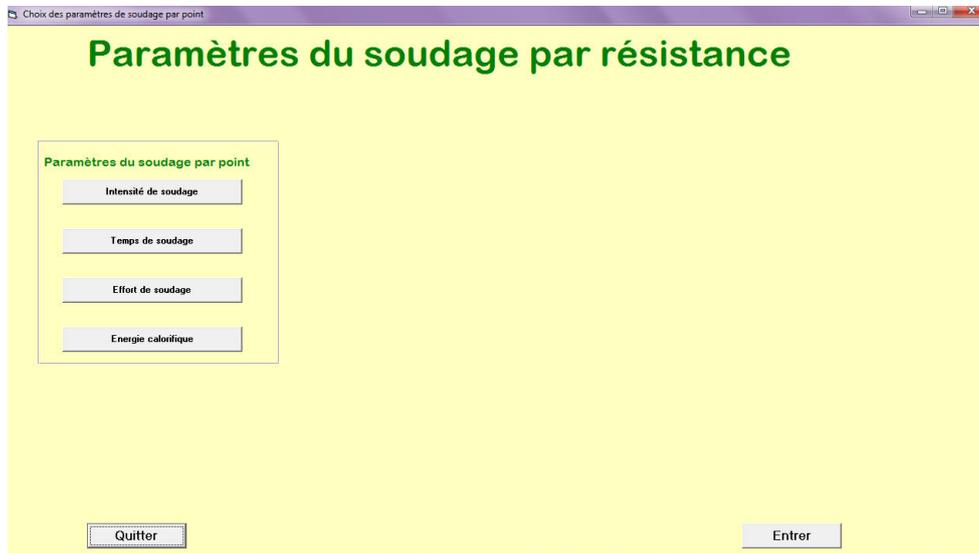


Figure III.8: Choix de paramètres de soudage par point.

6.1. Intensité de soudage

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton .

L'écran de la figure III.9 illustre le choix de l'intensité pour soudage par point.

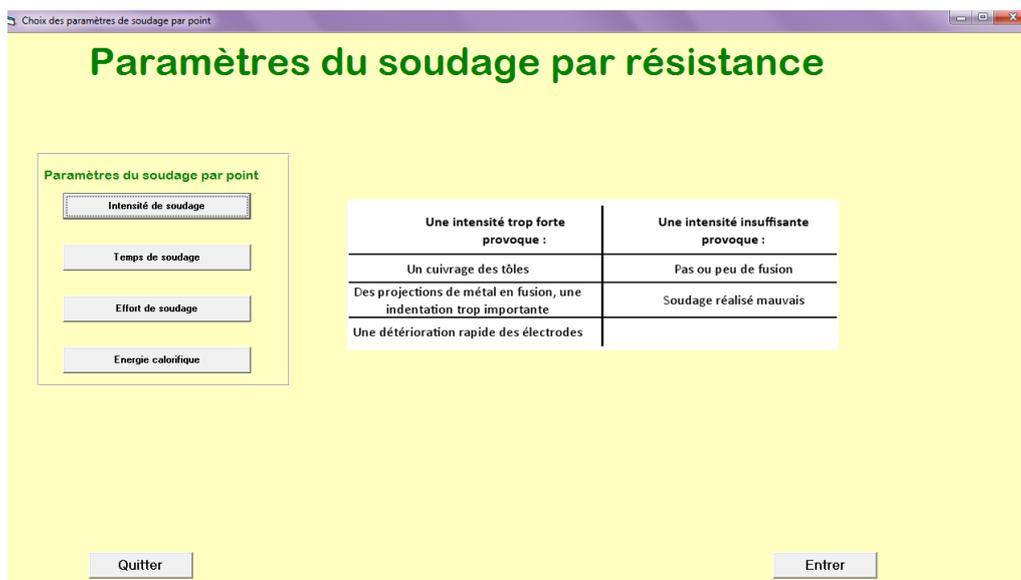


Figure III.9: Intensité de soudage par point.

6.2. Temps de soudage

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton



L'écran de la figure III.10 illustre le temps pour soudage par point.

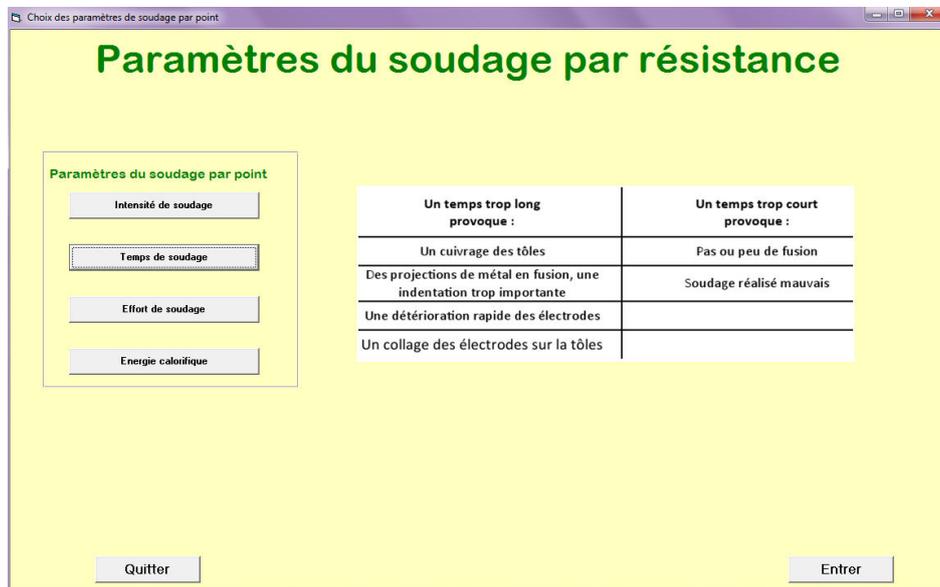


Figure III.10: Temps de soudage par point.

6.3. Effort de soudage

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton



L'écran de la figure III.11 présente l'effort pour soudage par point.

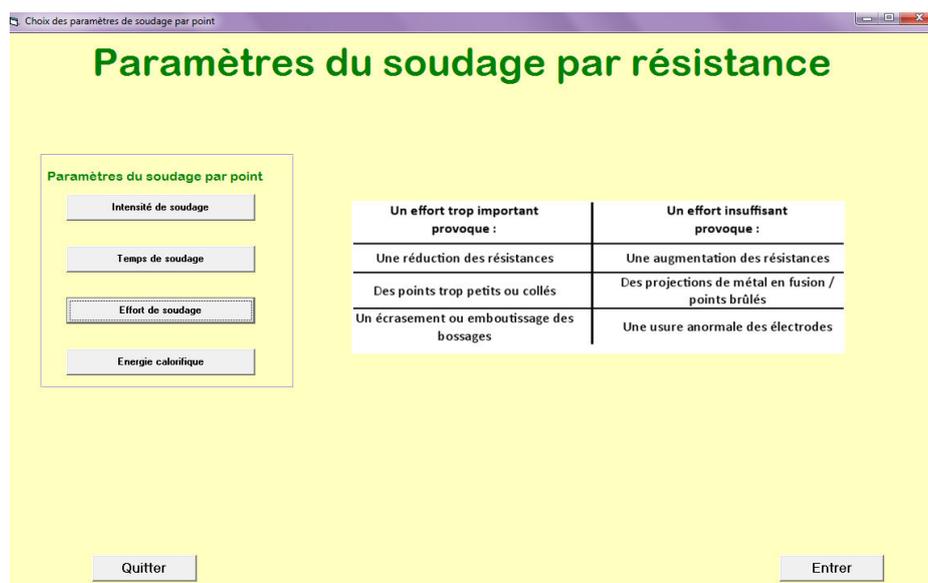


Figure III.11 : Effort de soudage par point.

6.4. Energie calorifique

Cliquer sur le bouton **Energie calorifique** pour accéder au calcul de l'énergie calorifique.

L'écran de la figure III.12 présente l'énergie calorifique de soudage par point.

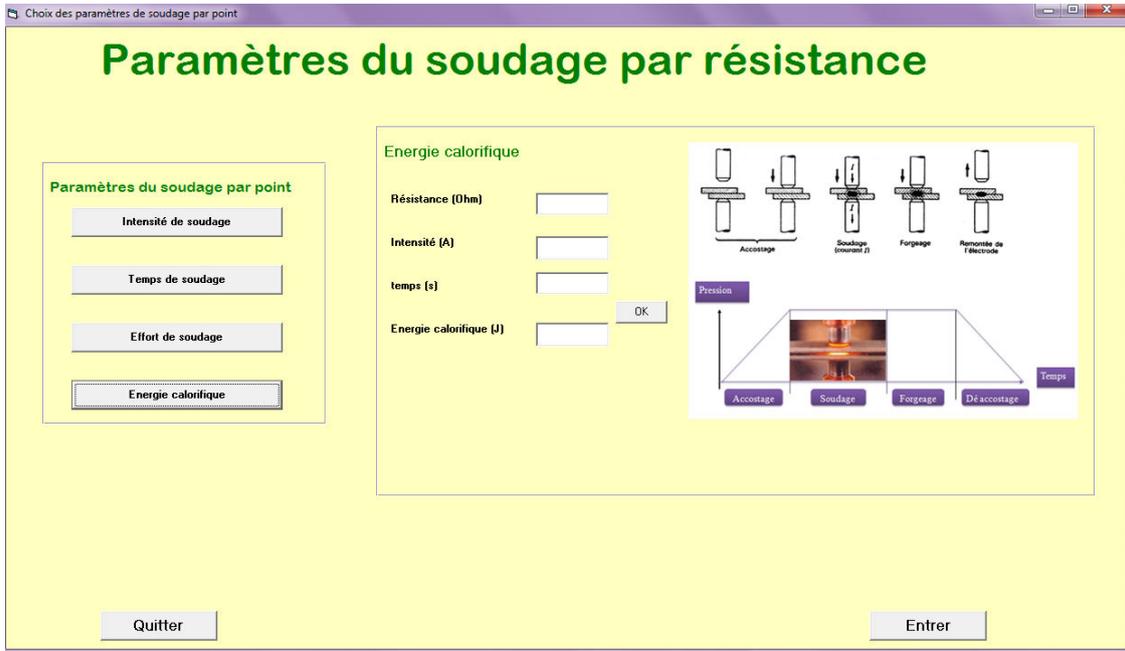


Figure III.12 : Energie calorifique de soudage par point.

Pour calculer l'énergie calorifique de soudage, il faut remplir :

La résistance entre les 2 pièces à assembler \longrightarrow **Résistance (Ohm)**

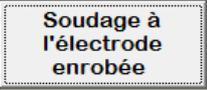
L'intensité de soudage \longrightarrow **Intensité (A)**

Temps de soudage \longrightarrow **temps (s)**

Pour obtenir le résultat ☞ cliquer sur le bouton **OK**

Energie calorifique (J)

7. Choix des paramètres de soudage à l'électrode enrobée

 Cliquer sur le bouton  pour accéder au paramètre de ce procédé.

L'écran de la figure III.13 illustre les différents paramètres de soudage EE.

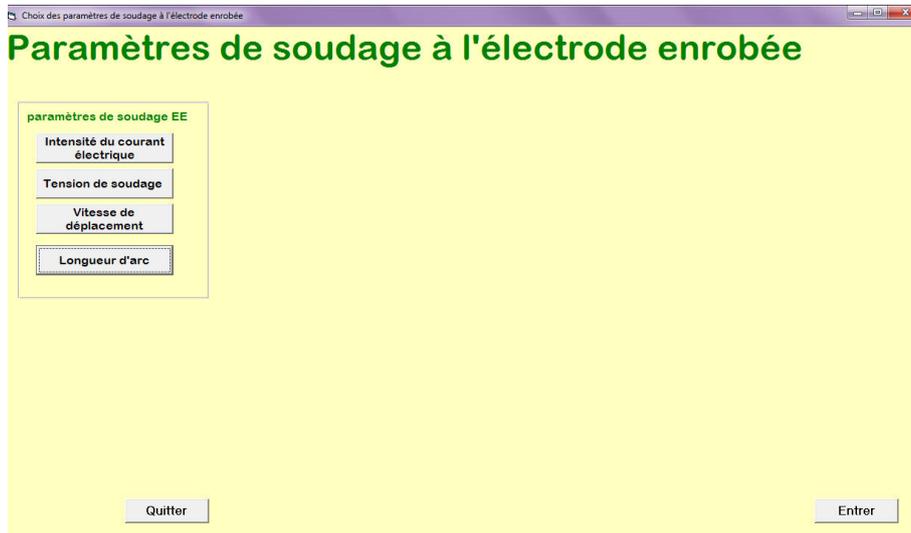


Figure III.13: Choix de paramètres de soudage SMAW.

7.1. Intensité de soudage

Cliquer sur le bouton  pour accéder au calcul de l'intensité.

L'écran de la figure III.14 présente l'intensité de soudage EE.



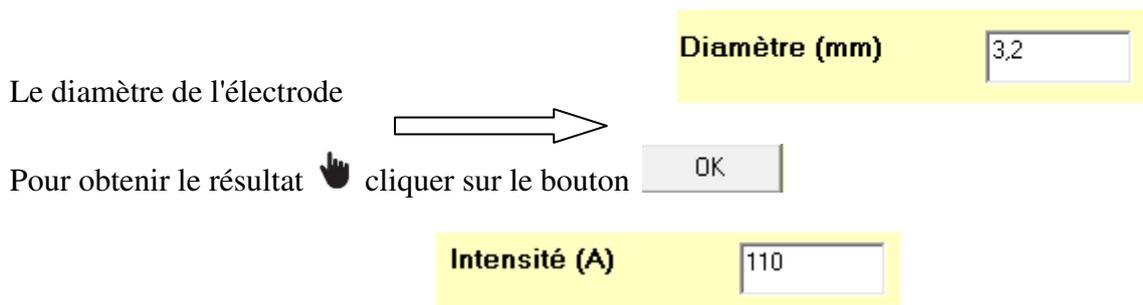
Figure III.14: Intensité de soudage SMAW.

- Soudage à plat

Pour calculer l'intensité de soudage, il faut remplir :

Le diamètre de l'électrode

Pour obtenir le résultat  cliquer sur le bouton 



L'écran de la figure III. 15 illustre les données ainsi que les résultats pour soudage à plat.



Figure III.15 : Calcul de l'intensité de soudage à plat.

- Soudage en angle intérieur

L'écran de la figure III. 16 illustre les données ainsi que les résultats pour soudage en angle intérieur.

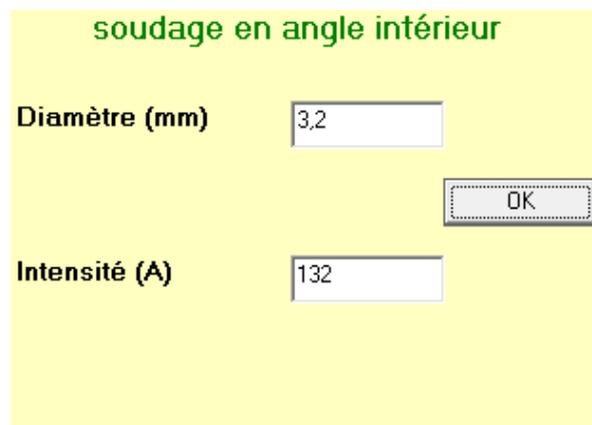


Figure. III.16 : Calcul de l'intensité de soudage en angle intérieur.

- Soudage en angle extérieur

L'écran de la figure III.17 : illustre les données ainsi que les résultats pour soudage en angle extérieur.



soudage en angle extérieur

Diamètre (mm) 3,2

Intensité (A) 88

OK

Figure. III.17 : Calcul de l'intensité de soudage en angle extérieur.

7.2. Tension de soudage

Cliquer sur le bouton **Tension de soudage** pour accéder au calcul de la tension.

L'écran de la figure III.18 : illustre les données ainsi que les résultats pour le calcul de la tension de soudage EE



Tension de soudage

Intensité (A) 110

Tension (V) 25,4

OK

Figure. III.18: Calcul de la tension de soudage SMAW.

7.3. Vitesse de soudage

Cliquer sur le bouton **Vitesse de déplacement** pour accéder au calcul de la vitesse.

L'écran de la figure III. 19 présente la partie calcul de vitesse de soudage EE

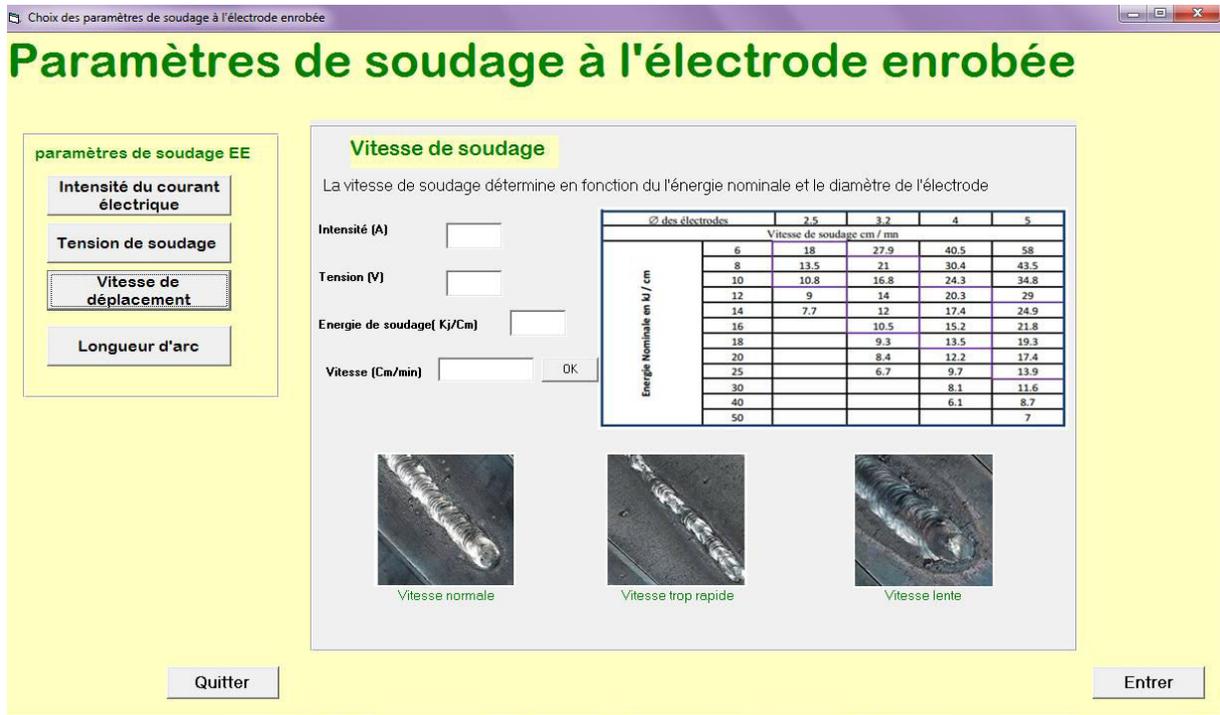


Figure III.19 : vitesse de soudage EE.

Pour calculer la vitesse de soudage, il faut remplir :

L'intensité de soudage → **Intensité (A)**

La tension de soudage → **Tension (V)**

L'énergie de soudage → **Energie de soudage(Kj/Cm)**

Pour obtenir le résultat cliquer sur le bouton **OK**

Vitesse (Cm/min)

7.4. Longueur d'arc



Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton

L'écran de la figure III. 20 illustre la longueur d'arc pour de soudage EE.

Paramètres de soudage à l'électrode enrobée

paramètres de soudage EE

Intensité du courant électrique

Tension de soudage

Vitesse de déplacement

Longueur d'arc

Quitter

Longueur d'arc

La longueur d'arc est la distance entre le bout de l'électrode et la surface de la pièce à souder

Ø des électrodes	2,5	3,2	4	5
Longueur utile	300	400	400	400
Intensité en A	75	110	150	200
Tension en Volts	24	25,4	27	29
Tps fusion d'une électrode	64	82	92	110

Longueur du cordon en cm pour 10 cm d'électrode consommée

Energie Nominale en kJ/cm	6	6,4	9,5	15,5	26,6
	8	4,8	7,2	11,6	19,9
	10	3,8	5,7	9,3	16
	12	3,2	4,8	7,8	13,3
	14	2,7	4,1	6,7	11,4
	16		3,6	5,8	10
	18		3,2	5,2	8,9
	20		2,9	4,7	8
	25		2,3	3,7	6,4
	30			3,1	5,3
	40			2,3	4
50				3,2	

Longueur d'arc supérieure à la normale

Longueur d'arc inférieure à la normale

Entrer

Figure. III.20 : Longueur d'arc pour soudage EE.

8. Choix des paramètres de soudage MIG/MAG



Cliquer sur le bouton

pour accéder au paramètre de ce procédé.

L'écran de la figure III.21 illustre les différents paramètres de soudage MIG/MAG.

Choix des paramètres de soudage MIG/MAG

Paramètres du soudage MIG-MAG

Tension de soudage

Intensité de soudage

Vitesse de dévidage de fil

Vitesse d'avance

Quitter

Entrer

Figure III.21:Choix de paramètres de soudage MIG/MAG.

8.1. Tension de soudage

Cliquer sur le bouton **Tension de soudage** pour accéder au calcul de la tension.

L'écran de la figure III. 22 illustre le calcul de la tension pour de soudage MIG/MAG.



Figure. III.22 : Tension de soudage MIG/MAG.

8.2. Intensité de soudage

Cliquer sur le bouton **Intensité de soudage** pour accéder au calcul de l'intensité.

L'écran de la figure III. 23 illustre le calcul de l'intensité pour de soudage MIG/MAG.



Figure. III.23 : Intensité de soudage MIG/MAG.

8.3. Vitesse de dévidage de fil

Cliquer sur le bouton **Vitesse de dévidage de fil** pour accéder à cette fonction.

L'écran de la figure III.24 illustre la vitesse de dévidage de fil pour de soudage MIG/MAG.

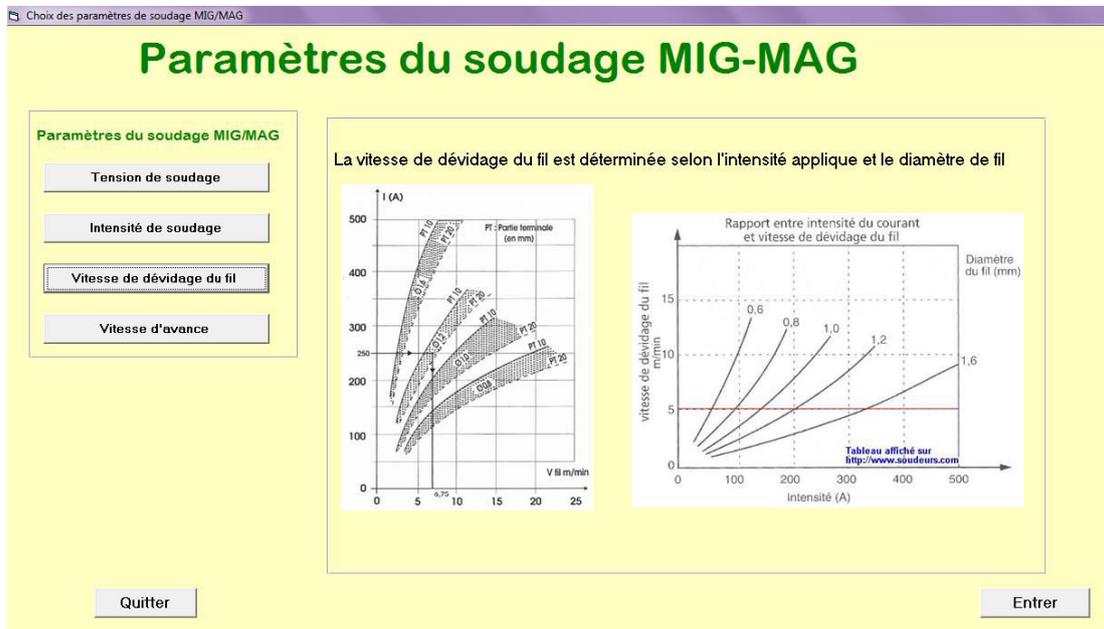


Figure. III.24 : Vitesse de dévidage de fil pour soudage MIG/MAG.

8.4. Vitesse d'avance

Cliquer sur le bouton **Vitesse d'avance** pour accéder à cette fonction

L'écran de la figure III.25 illustre la vitesse d'avance pour de soudage MIG/MAG.



Figure. III.25 : Vitesse d'avance pour soudage MIG/MAG.

9. Choix des paramètres de soudage TIG

☞ Cliquer sur le bouton  pour accéder au paramètre de ce procédé.

L'écran de la figure III.26 illustre les différents paramètres de soudage TIG.

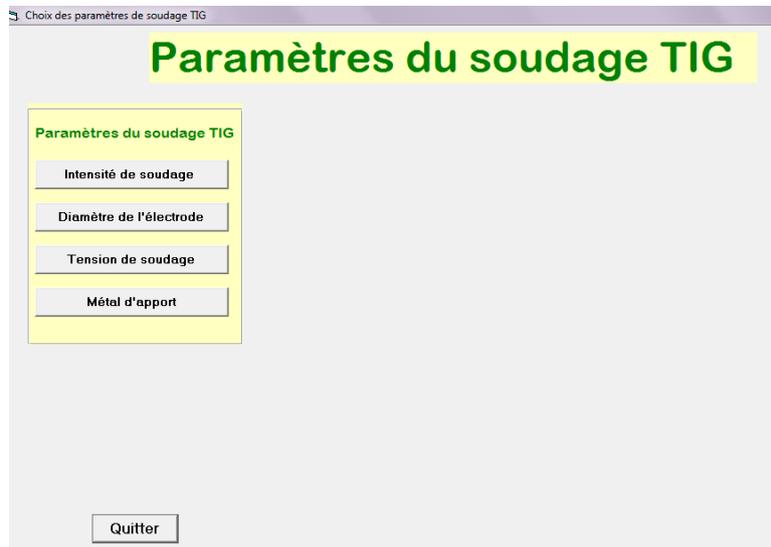


Figure III.26: Choix de paramètres de soudage TIG.

9.1. Intensité de soudage

Cliquer sur le bouton  pour accéder au calcul de l'intensité.

L'écran de la figure III. 27 illustre le calcul de l'intensité pour de soudage TIG.

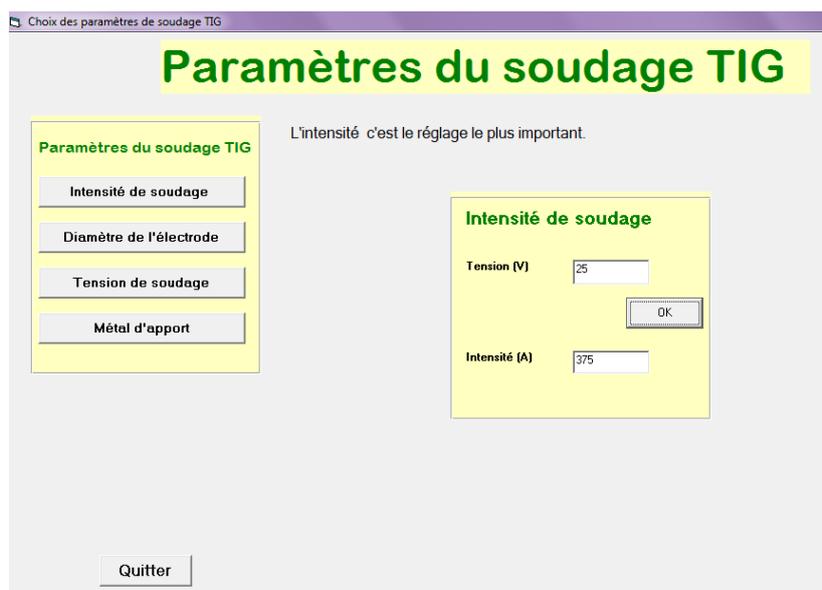


Figure. III.27 : Intensité de soudage TIG.

9.2. Diamètre de l'électrode

Cliquer sur le bouton **Diamètre de l'électrode** pour accéder à cette fonction.

L'écran de la figure III.28 illustre le choix de diamètre de l'électrode pour soudage TIG.

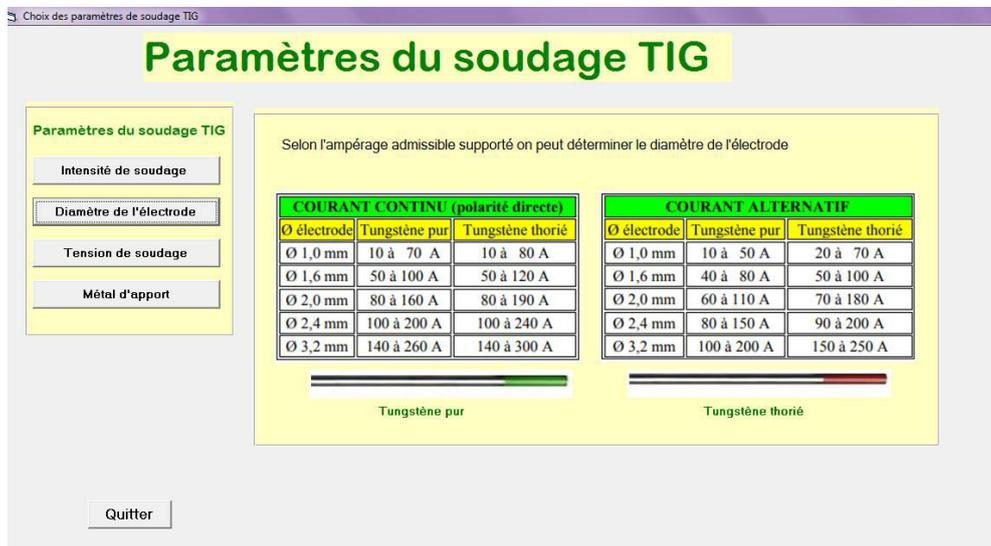


Figure. III.28 : Diamètre de l'électrode pour soudage TIG.

9.3. Tension de soudage

Cliquer sur le bouton **Tension de soudage** pour accéder à cette fonction.

L'écran de la figure III.29 présente la tension de soudage TIG.

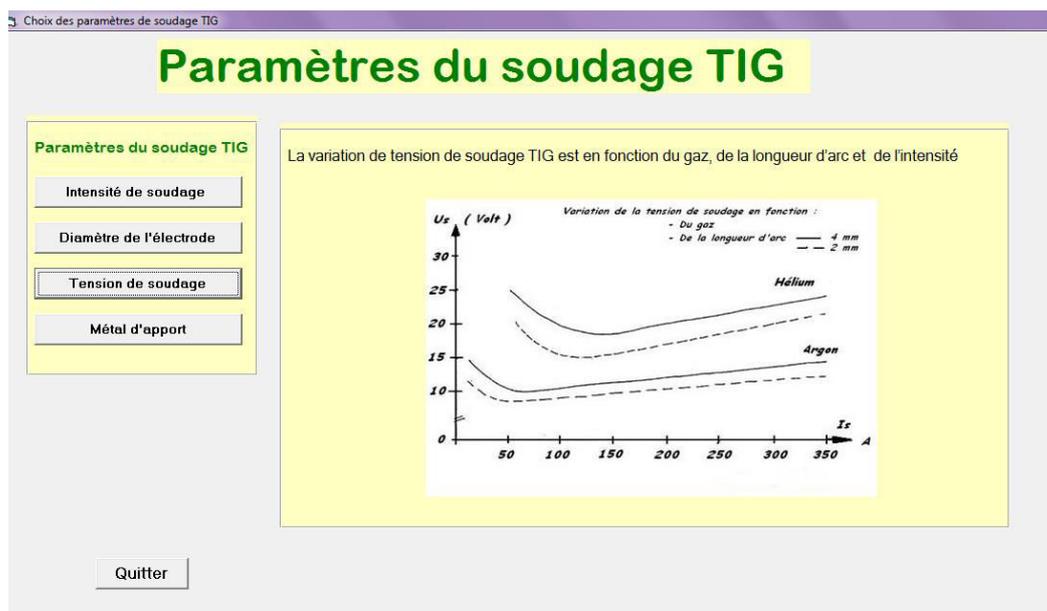


Figure. III.29 : Tension de soudage TIG.

9.4. Métal d'apport

Pour accéder à cette fonction cliquer sur le bouton

Débit du métal d'apport

L'écran de la figure III.30 présente le métal d'apport pour soudage TIG.

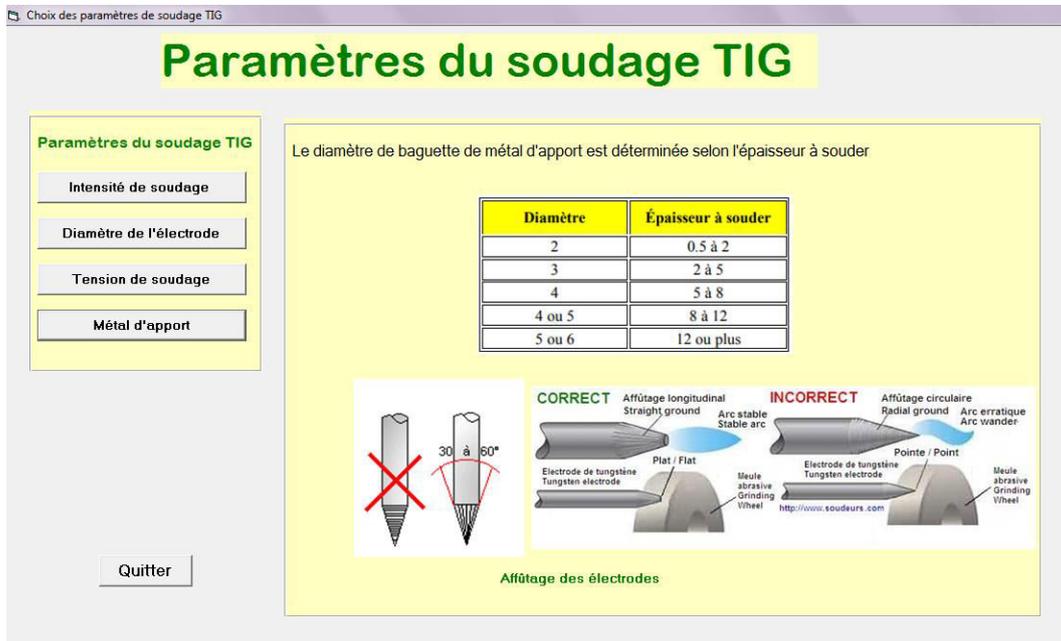


Figure. III.30: Métal d'apport pour soudage TIG.

10. Conclusion

Ce chapitre présente une méthodologie d'utilisation de l'outil développé sous logiciel Visuel Basic 6.0, d'aide à la modélisation des paramètres de soudage pour chaque procédés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les paramètres de soudage sont les conditions et les propriétés liées à la réalisation d'un assemblage tel que le procédé utilisé, la préparation des surfaces, le temps de soudage et de maintien, l'intensité du courant électrique...etc.

Le but de ce travail consiste à développer un outil d'aide au choix des paramètres de soudage, sous logiciel Visual Basic. Deux parties ont été développée .La première partie présente les principaux paramètres de soudage.

La seconde partie traite l'automatisation du choix des paramètres de différents procédés de soudage suivants :

- Soudage oxyacétylénique : Pression d'alimentation, choix de la buse, préparation des bords, sens d'avance.
- Soudage par résistance (par point) : Intensité de soudage, temps de soudage, effort de soudage.
- Soudage à l'électrode enrobée : Intensité du courant électrique, tension de soudage, vitesse de déplacement, longueur d'arc.
- Soudage MIG/MAG : Tension de soudage, intensité de soudage, vitesse de dévidage de fil, vitesse d'avance.
- Soudage TIG : Intensité de soudage, tension de soudage, diamètre de l'électrode, débit du métal d'apport.

En perspective, ce travail sera élargi à d'autres procédés de soudage ainsi que le choix des paramètres en vue du réglage des équipements de soudage TW (plasma, multiprocédé, TIG, MIG/MAG) de l'atelier de soudage de la faculté de technologie.

Références bibliographiques

- [1] : MEZRAG Bachir, « *Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT. Matériaux* », Université de Montpellier; Université Abou Bekr BelKaid-Tlemcen, 2015.
- [2] : Centre d'Information du Cuivre, Brasage et Soudobrasage du Cuivre et de ses Alliages, Paris, 2013.
- [3] : FRIJA Mounir. « *Assemblage Thermique par SOUDAGE* ».Tunisie, 151p.
- [4] :http://www.isetgf.rnu.tn/ENS/uploads/nciri_rached/AtelierProcedes_et_Methodes_I_TP_Rached_Nciri.pdf. Consulté le 03-06-2020
- [5] : ALLOU Djilali. « *Elaboration et caractérisation d'un Bi-Matériau AISI 4130-ENiCr-3 obtenu par rechargement SMAW. Application : vanne d'obturation de tête de puits de pétrole* ». Mémoire de Magister, Université de Houari Boumediene,2014.
- [6] :<https://lechaudronnier.pagespersoorange.fr/Technologie/4procedeetmoyensassembl/soudagOA.pdf>. Consulté le 03-06-2020
- [7] : http://www4.ac-nancy-metz.fr/autocompetences/2_ressources_pedagogiques/12_parcset-jardins/stockage_debatty-jc/h-dossiers-divers/2_maintenance/2b_metallerie-soudure/6_soudage-oxyacetylenique.pdf. Consulté le 06-06-2020
- [8] <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87>. Consulté le 08-06-2020
- [9] : KHALFI Abdelwahed, TECHNOLOGIE EN CHODRONERIEET EEN TYAUTRIE. Maroc, 153p.
- [10] : Symap ; Guide soudage/chapitre_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants.
- [11] :<https://www.etudier.com/dissertations/Proc%C3%A9d%C3%A9DeSoudageTig/81433.html>. Consulté le 10-06-2020
- [12] :<https://www.fronius.com/fr-fr/france/techniques-de-soudage/competences/process-de-soudage/plasma> Consulté le 10-06-2020

[13] : Jean MATON .Technologie de soudage .<http://www.rocdacier.com>.

Consulté le 10-06-2020

[14] :<https://poste-a-souder.ooreka.fr>. Consulté le 11-06-2020

[15] :<https://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction-malaxage>. Consulté le 14-06-2020

[16] :<https://www.kemppi.com/fr-FR/assistance/l-abc-du-soudage/autres-methodes-de-soudage/>. Consulté le 16-06-2020

[17] : Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Annecy Santé au Travail Actualisé en 2009.

[18] :<https://www.maxicours.com/>. Consulté le 20-06-2020

[19] :<https://www.soudeurs.com/>. Consulté le 29-06-2020

[20] :<http://mai.manosque.free.fr/Pages/Rendu/Soudage/Soudage%20MIG%20MAG/page%202.html>. Consulté le 01-07-2020

[21] :<https://www.emploissoudeur.ca/principe-et-description-du-soudage-tig/6i>.

Consulté le 10-07-2020

[22] : Chainarong Srikunwong, « *Modélisation du procédé de soudage par points* », Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, octobre 2005.

[23]: HAMAIDI Amer, MADJOUR Younes, «*Contrôle qualité des soudures X52M réalisées par les procédés SAW et SMAW* », Université Mouloud Mammeri -Tizi-Ouzou, 2014.