

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

—
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : assemblage soudée et matériaux

Par : ZENKRI MOHAMMED ISLAM

Sujet

Etude de l'effet des variations de courant sur la zone soudée par le procédé TIG,
la méthode cyclique : cas d'un métal inoxydable

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

M/CHORFI SIDI MED

M/ACHOUI MED

M/SEBAA FETHI

M/BELABED YOUSOUF

MCA

MAA

Professeur

Dr

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadrant

Co-Encadrant

Année universitaire : 2021/2022

Sommaire

Sommaire

Sommaire	II
LISTE DES FIGURES.....	VI
Liste des tableaux.....	IX
Remerciements	XI
DEDICACE.....	XII
Résumé.....	XIII
Introduction générale.....	1

Chapitre I

I-1. Historique des aciers inoxydables :	3
I-2. Généralités sur les aciers inoxydables :	4
I-3. L'utilisation des aciers inoxydables :	4
I-4. Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :	5
I-5. Les différentes familles d'aciers inoxydables :	6
I-5.1. Les aciers inoxydables martensitiques	6
I-5.2. Les aciers inoxydables ferritiques :	7
I-5.3. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) :	8
I-5.4. Les aciers inoxydables austénitiques :	9
I-6. Rôle des principaux éléments d'addition :	10
I-7. Les éléments alphagènes :	10
I-7.1. Le chrome (Cr).....	10
I-7.2. Le molybdène (Mo)	10
I-7.3. Le silicium (Si)	10
I-7.4. Le vanadium (Va)	10
I-7.5. Le titane (Ti)	10
I-7.6. Le niobium (Nb)	10

Sommaire

I-8. Les éléments gamma gènes :.....	10
I-8.1. Le nickel (Ni).....	10
I-8.2. Le manganèse (Mn)	11
I-8.3. Le carbone (C)	11
I-8.4. L'azote (N).....	11
I-8.5. Le soufre (S)	11
I-8.6. Le cuivre (Cu).....	11
I-9. Propriétés physiques des aciers inoxydables	11
I-9.1. Capacité thermique, conductibilité thermique et conductivité électrique.....	11
I-9.2. Coefficient de dilatation thermique	12
I-9.3. Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques	12

Chapitre II

II-1. Généralités sur le soudage :	17
II-1.1. Définition du soudage :.....	17
II-1.2. Histoire du soudage :	17
II-2. Les types de soudage :	18
II-3. Soudage et comparaison avec d'autres procédés d'assemblage et de fabrication :	19
II-4. Capacité de charge élevée :.....	20
II-5. Zones constitutives d'un joint soudé :	20
II-6. Morphologie de la zone de fusion :.....	21
II-7. Énergie de soudage :.....	22
II-8. Consommables pour le soudage :	22
II-9.1. Les procédés de soudage des métaux :.....	22
II-9.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique :.....	23
II-9.3. Soudage par point	23
II-9.4. Soudage a la molette :.....	24
II-9.5. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique :	25

Sommaire

II-9.6.	Soudage par diffusion :	26
II-9.7.	Soudage par friction :	26
II-9.8.	Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :	26
II-9.9.	Soudage par ultrasons :	26
II-9.10.	Soudage par explosion :	27
II-9.11.	Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique :	27
II-9.12.	Soudage à la flamme :	27
II-9.13.	Soudage aluminothermique	28
II-9.14.	Soudage par faisceau d'électrons	28
II-9.15.	Soudage par faisceau Laser :	28
II-9.16.	Soudage à l'arc	29
II-9.17.	Soudage à l'arc avec électrode enrobé (SMAW)	29
II-9.18.	Définition de l'électrode enrobée :	30
II-9.20.	Les électrodes enrobées utilisées sont couramment :	31
II-9.21.	Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées :	31
II-9.22.	La polarité de l'électrode enrobée :	31
II-9.23.	Les différents types de générateurs de soudage :	31
II-10.	Soudage semi-automatique	32
II-11.	Le procédé de soudage TIG ou GTAW :	33
II-11.1.	Définition du procédé :	33
II-11.2.	Principe :	34
II-11.3.	Paramètres technologiques	34
II-11.4.	Intensité et vitesse de soudage :	36
II-11.5.	Nature de l'électrode	36
II-11.6.	Gaz de protection	36
II-11.7.	Mise en œuvre des soudures TIG	37

Sommaire

Chapitre III

III-1.	Introduction :	39
III-2.	La Simulation numérique :	39
III-3.	Les méthodes numériques connues :	39
III-3.1.	La méthode des éléments finis :	39
III-6.1.	Le maillage :	42
III-7.	Préparation de simulation numérique :	43
III-8.	Résultats et interprétations :	43
III-8.1.	Le critère de pénétration :	43
III-8.2.	L'effet d'épaisseur sur le courant principal :	44
III-8.3.	L'effet d'épaisseur sur le courant départ :	44
III-8.4.	L'effet d'épaisseur sur le temps de montée :	45
III-8.5.	Pénétration de la soudure a fonction de longueur de plaque soudée	45
III-8.6.	Les contraintes résiduelles	46
III-8.7.	Validation des résultats :	46
III-9.2.	Caractéristiques Générale :	48
III-9.5.	“EASY PULSE” – SYN :	48
III-9.6.	LE CYCLE DE SOUDAGE EN COURANT COUNTINU PULSE :	49
III-9.7.1.	Les interface de l'application :	49
III-9.7.2.	L'Interface des entres (inputs) :	50
III-9.7.3.	L'exemple de simulation :	51
III-10.	Conclusion de chapitre :	54
	Conclusion générale	55
	Référence bibliographique :	56

LISTE DE FIGURE

FIGURE 1- 1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU FILM PASSIF DES ACIERS INOXYDABLES, SELON OKAMOTO	5
FIGURE 1- 2: MODELE BICOUCHE DU FILM PASSIF.....	5
FIGURE 1- 3: MICROGRAPHIE D’UN ACIER INOXYDABLE MARTENSITIQUE.	6
FIGURE 1- 4: MICROGRAPHIE D’UN ACIER INOXYDABLE FERRITIQUES.....	7
FIGURE 1- 5: ACIER DUPLEX ATTAQUE PAR ELECTROLYSE AVEC UNE SOLUTION AQUEUSE D’HYDROXYDE DE SODIUM A 40 %, MONTRANT DE L’AUSTENITE MARRON ET DE LA FERRITE BLEUE. FOND CLAIR.	8
FIGURE 1- 6: MICROGRAPHIE D’UN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE.....	9
FIGURE 1- 8: MISE EN EVIDENCE DE LA FORMATION DE PHASE Σ ET DE SES CONSEQUENCES SUR LA RESILIENCE EN FONCTION DU TRAITEMENT THERMIQUE - ACIER 317.[10]	12
FIGURE 1- 7: DIAGRAMME DE SCHAEFFER. [10]	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 1- 9: APPAUVRISSEMENT LOCAL EN CHROME POUVANT ETRE A L’ORIGINE DE CORROSION	13
FIGURE 1- 10: STRUCTURE DE FER EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.[12].....	15
FIGURE 1- 11: PASSAGE GAMMA VERSUS DELTA.[12]	15
FIGURE 1- 13: DIAGRAMME FER CARBONE.[12].....	15
FIGURE 1- 12: ALLOTROPIE DU FER GRANDE IMPORTANCE.[12].....	15
FIGURE 1- 14: DIAGRAMME DES PHASES MICROSTRUCTURE.[12].....	15
FIGURE 2- 1: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU JOINT SOUDE.	21
FIGURE 2- 2 : FORCES ET COURANTS DE CONVECTION DANS LE BAIN DE FUSION DE PARAMETRES IMPORTANTS DANS LE SOUDAGE	21
FIGURE 2- 3: JOINT COMPRENANT DIFFERENTES EPAISSEURS DE TOLE SOUDEE ANGULAIRE	22
FIGURE 2- 4: REPRESENTATION SCHEMATISEE DES PHASES DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINT.....	23
FIGURE 2- 5: REPRESENTATION SCHEMATISEE DES PHASES DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR MOLETTE	25
FIGURE 2- 6: DIFFERENTES ETAPES DU SOUDAGE PAR FRICTION.....	26
FIGURE 2- 7: MATERIEL PROPRE AU SOUDAGE OXYACETYLENIQUE.....	27
FIGURE 2- 8: SOUDAGE PAR FAISCEAU D’ELECTRON.....	28
FIGURE 2- 9: SOUDAGE PAR FAISCEAU LASER.	29

Liste de Figure

FIGURE 2- 10 : ELECTRODE POUR SOUDAGE MMA	30
FIGURE 2- 11: PRINCIPE DE SOUDAGE A L'ELECTRODE ENROBEE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 2- 12: PRINCIPE SOUDAGE SEMI-AUTOMATIQUE.	33
FIGURE 2- 13: PRINCIPE DU PROCEDE SOUDAGE TIG	34
FIGURE 2- 14: FORME DE L'ARC ELECTRODE DE TIG	34
FIGURE 2- 16: CYCLE D'APPARITION DU COURANT PULSE.	35
FIGURE 2- 15: CARACTERISTIQUES DES MODES DE FONCTIONNEMENT POSSIBLES POUR LE SOUDAGE TIG. [21] ..	35
FIGURE 2- 17: INFLUENCES DU COURANT ET DE LA VITESSE DE SOUDAGE SUR LA PENETRATION ET SUR LA LARGEUR DU CORDON DE SOUDURE TIG D'UNE TOLE EN TA6V DE 3,7MM D'EPAISSEUR[22].....	36
FIGURE 3- 1: DOUBLES ELLIPSOÏDES DE GOLDAK [26].....	40
FIGURE 3- 3: LES FORCE DE SERRAGE.....	42
FIGURE 3- 4: LINEAIRE ELEMENT C3D8T 8-NEODE BRIQUE	42
FIGURE 3- 5: MODELE DE MAILLAGE UTILISE POUR L'ANALYSE	43
FIGURE 3- 6: LE FLUX DE CHALEUR DE GOLDAK VUE ISOMETRIQUE.....	43
FIGURE 3- 7: L'INTENSITE OPTIMALE EN FONCTION D'EPAISSEUR.....	45
FIGURE 3- 8: AMPERAGE D'AMORÇAGE A FONCTION D'EPAISSEUR	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 3- 9: TEMP D'AMORÇAGE ENTRE DEUX CAS (INOX ET GENERALE)	45
FIGURE 3- 10: PENETRATION DE LA SOUDURE A FONCTION DE LONGUEUR DE PLAQUE SOUDEE.....	45
FIGURE 3- 11: LES CONTRAINTES RESIDUELLES	46
FIGURE 3- 12: CORDON DE SOUDURE DE DEUX PLAQUES D'INOX SOUDEE PAR TIG	47
FIGURE 3- 13: POSTE SOUDURE MATRIX 3000 AC/DC	47
FIGURE 3- 14: FONCTION DE PULSATION	48
FIGURE 3- 15: CYCLE DE SOUDAGE TIG COURANT PULSE	49
FIGURE 3- 16: L'INTERFACE DE L'APPLICATION	49
FIGURE 3- 17: INTERFACE DES INPUTS	50
FIGURE 3- 18 : (REGLAGE DE POSTE) LES INPUTS DE COMPARAISON ENTRE L'APPLICATION ET LA SIMULATION....	51
FIGURE 3- 19: LE CHOIX D'ELECTRODE	52

Liste de Figure

FIGURE 3-20 : QUALITE DE BUSE UTILISE	53
----------------------------------------------------	-----------

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1- 1: COMPOSITION CHIMIQUE DES PRINCIPAUX ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES.	7
TABLEAU 1- 2: PRINCIPAUX ACIERS INOXYDABLES DUPLEX ET SUPER DUPLEX.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 1- 3: PRINCIPAUX ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES.....	9
TABLEAU 2- 1: QUELQUES PRÉPARATIONS DE JOINTS	32
TABLEAU 3- 1: PARAMETRE GEOMETRIQUE.....	41
TABLEAU 3- 2: PROPRIETE THERMO PHYSIQUE.....	41
TABLEAU 3- 3: PROPRIETE MECANIQUE DE SUS304.....	41

LISTE D'ABREVIATION ET SYMBOLES

GTAW : Gas - tungsten arc welding
TIG Tungsten Inert Gas
M.I.G: Métal Inert gaz
M.A.G : Métal active gaz
ZAT : Zone Affectée Thermiquement
IRSID : L'Institut de Recherche de la Sidérurgie française.
FDA: code of federal regulations
ISO: International organization standardization
Céq : Carbone équivalent
Tp : Température de préchauffage
CC : Courant direct
AC : Courant alternative
PAF : Profilé à froid
Ø : Diamètre (mm)
Uo : La tension à vide de générateur (V)
I : Intensité de soudage en Ampères (A)
e : Diamètre de l'électrode (mm)
U : Tension de soudage en Voltes (V)
E : L'énergie de soudage (J / mm)
V, Vitesse d'avance de l'arc électrique (mm / s)
P: Phosphore
S: Soufre
Cr: Chrome
Ni: Nickel
Nb: Niobium
V: Vanadium
Mo : Molybdènes
Cu : Cuivre
Al : Aluminium
Ti : Titane
C : Carbone
Fe : Fer
Si : Silicium
CO : Cobalt

Remerciements

Remerciements

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

Le présent mémoire a été dirigé par Monsieur BELABED YOUSOUF ET Mr. SEBAA FETHI c'est grâce à eux, leurs commentaires, leurs conseils et leur soutien que j'ai pu finaliser.

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

Je remercie mon camarade BENTAIBI Youcef pour ces efforts.

Je remercie les membres de jures Mr. ACHOU MED et Mr. CHORFI SIDI MED qui ont accepté d'évaluer et juger le présent travail.

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

DEDICACE

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

Je dédie ce Mémoire

A ma mère et mon père pour leur soutien indéfectible,

A la mémoire de mon père Abdelkader,

Ainsi qu'à

Ma Mère pour son continuel soutien et encouragement,

A mes sœurs, Rahma, Radhia, Kawther

A tous mes proches,

Amjed, Youcef, Redwan Walide BENAADA

A tous mes enseignants

Du primaire à l'université

Notamment mes encadrant Dr BELABED YOUSSEUF

Et

Pr. SBAA FTHI.

A toute la promotion Master II 2021/2022

Résumé

Différents procédés de soudage sont présents, parmi les différents procédés de soudage, le soudage au gaz inerte au tungstène (TIG) joue un rôle majeur dans le soudage de l'acier doux ou des sections minces de métaux non ferreux tels que les alliages de cuivre, les alliages d'aluminium, le magnésium et l'acier inoxydable. De nombreux avantages sont obtenus dans le soudage TIG pour assembler des métaux dissemblables, comme éviter les scories, minimiser la zone affectée par la chaleur, etc. Étant donné que les paramètres d'entrée jouent un rôle majeur dans la détermination de la qualité d'une plaque soudée. Le soudage TIG des tôles en acier inoxydable dépend d'un grand nombre de facteurs. Tels que la vitesse de soudage, le courant, l'électrode et le gaz inerte. Dans ce travail, une enquête est menée pour étudier l'effet de la variation de courant sur la soudure de l'INOX S304 et pour établir une relation entre la qualité de la soudure et le courant d'entrée. Nous avons simulé numériquement le soudage de deux plaques d'inox sur logicielle Abaqus pour créer une application numérique qui nous aide d'observer les paramètres appropriés d'intensité de poste soudure TIG, MATRIX 3000 AC/DC. A fine, pour la validation de travail qui fait une expérience dans la société ALZINC GHAZAOUET.

MOTS CLÉS : Assemblages soudées, éléments finis, aciers inoxydables 'inox S304', Abaqus, MATRIX 3000 AC/DC.

ملخص

توجد عمليات لحام مختلفة ، من بين عمليات اللحام المختلفة ، يلعب اللحام بالغاز الخامل (TIG دوراً رئيسياً في لحام الفولاذ الطري أو الأجزاء الرقيقة من المعادن غير الحديدية مثل سبائك النحاس وسبائك الألومنيوم والمغنيسيوم والفولاذ المقاوم للصدأ. يتم تحقيق العديد من المزايا في لحام TIG للانضمام إلى معادن غير متشابهة ، مثل تجنب رواسب وتقليل المنطقة المتأثرة بالحرارة ، إلخ. نظراً لأن معلمات الإدخال تلعب دوراً رئيسياً في تحديد جودة اللوحة الملحومة. يعتمد لحام صفائح الفولاذ المقاوم للصدأ TIG على عدد كبير من العوامل. مثل سرعة اللحام والتيار والكهرباء والغاز الخامل. في هذا العمل ، يتم إجراء تحقيق لدراسة تأثير التباين الحالي على لحام S304 INOX وإقامة علاقة بين جودة اللحام وتيار الإدخال. قمنا بمحاكاة لحام لوحين من الفولاذ المقاوم للصدأ رقمياً في برنامج Abaqus لإنشاء تطبيق رقمي يساعدنا في اختيار معلمات كثافة اللحام TIG المناسبة للعلامة التجارية MATRIX 3000 AC / DC. غرامة للتحقق من صحة الأعمال في الواقع تجربة في شركة ALZINC GHAZAOUET.

الكلمات الرئيسية: التجميعات الملحومة ، العناصر المحدودة ، الفولاذ المقاوم للصدأ "inox S304" ، Abaqus ، MATRIX 3000 AC / DC.

Abstract

Résumé

Different welding processes are present, among the different welding processes, tungsten inert gas (TIG) welding plays a major role in welding mild steel or thin sections of non-ferrous metals such as copper alloys, aluminum alloys, magnesium and stainless steel. Many advantages are achieved in TIG welding for joining dissimilar metals, such as avoiding slag, minimizing the heat affected zone, etc. Since the input parameters play a major role in determining the quality of a welded plate. TIG welding of stainless steel sheets depends on a large number of factors. Such as welding speed, current, electrode and inert gas. In this work, an investigation is carried out to study the effect of current variation on the welding of S304 INOX and to establish a relationship between the quality of the weld and the input current. We digitally simulated the welding of two stainless steel plates in Abaqus software to create a digital application that helps us choose the appropriate TIG welding intensity parameters of the MATRIX 3000 AC/DC brand. A fine for the validation of works in fact an experiment in the company ALZINC GHAZAOUET.

KEYWORDS: Welded assemblies, finite elements, 'inox S304' stainless steels, Abaqus, MATRIX 3000 AC/DC.

Introduction générale

L'utilisation des aciers inoxydables est actuellement largement répandue en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur grande résistance à la corrosion. Ils sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines réunissant à la fois de sévères conditions d'environnement et des sollicitations mécaniques élevées (industries, navale, chimique, pétrochimique, du papier... etc.).

Du fait qu'une grande partie de leurs applications utilise le soudage comme procédé de fabrication, la compréhension de la métallurgie du soudage de ces aciers joue un rôle primordial dans leur mise en œuvre. Différents procédés de soudage sont appliqués aux constructions réalisées en aciers inoxydables, parmi ces procédés le soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) est largement utilisé dans le domaine pétrochimique.

Ce processus peut être utilisé pour assembler un certain nombre de métaux communs tels que l'acier, le magnésium et l'aluminium. Les paramètres du procédé interagissent directement ou indirectement sur la géométrie du cordon de soudure, les propriétés mécaniques et métallurgiques des assemblages soudés. La qualité du joint de soudure dépend essentiellement du paramètre de réglage d'entrée. Les paramètres de processus d'entrée était un problème commun au fabricant pour obtenir un bon joint soudé avec la qualité de soudure requise.

Traditionnellement, les opérateurs ou ingénieurs qualifiés choisissaient les paramètres basés sur une méthode d'essais qui prenait du temps pour chaque nouveau produit soudé afin d'obtenir un joint soudé avec les spécifications requises. Ensuite, les soudures sont examinées pour déterminer si elles répondent ou non aux spécifications.

Dans ce travail, une étude de l'effet de la variation de courant est réalisée pour déterminer la configuration optimale du procédé de soudage TIG dans le cas de l'Inox S304 et pour créer et développer une application sur la plateforme Android. L'objectif de ce logiciel est de réaliser un manuel informatique sur la façon d'utiliser la soudure TIG spécifiquement la machine MATRIX 3000.

Ce travail de mémoire est structuré essentiellement en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, quelques rappels théoriques de base et des définitions des aciers inoxydables.

Le deuxième chapitre sera consacré aux techniques de soudages des aciers inoxydables.

Le troisième chapitre, étude approfondie sur la simulation de variation de courant soudure en fonction d'épaisseur des tôles pour création d'une application numérique.

Une conclusion, présentée en fin du mémoire résumera l'essentiel de la conclusion obtenues dans le cadre de ce travail.

Chapitre I

Les aciers inoxydables

I-1. Historique des aciers inoxydables :

L'histoire des aciers inoxydables est intimement liée à celle du chrome et aux travaux du chimiste français Nicolas-Louis Vauquelin (1763-1889) qui, en 1797, fut le premier à isoler cet élément. [1]

Les premières observations des propriétés « inoxydables » du fer allié au chrome furent faites par Berthier, un autre français. Il montra dès 1821 que l'alliage fer-chrome était d'autant plus résistant à certains acides que sa teneur en chrome était plus élevée. Par contre, la quasi-impossibilité d'abaisser la teneur en carbone de l'alliage constitua un obstacle majeur à son développement.

En 1904, Léon Guillet puis Albert Portevin publièrent une série d'études relatives à la structure et aux propriétés des alliages fer-chrome couvrant les nuances martensitiques à 13 % de chrome et les nuances ferritiques à 17 % de chrome.

En 1909, L. Guillet publia une étude sur les aciers inoxydables au chrome-nickel ou aciers inoxydables austénitiques complétant ainsi ses études précédentes sur les alliages fer-chrome et couvrant pratiquement l'ensemble de la famille des aciers inoxydables. Le métallurgiste allemand W. Giesen fit, de son côté, et à la même époque, des recherches comparables. Les études de L. Guillet, A. Portevin et W. Giesen permirent ainsi, dès 1909, de classer les aciers inoxydables en fonction de leur structure et de définir les trois familles principales : martensitique, ferritique et austénitique.

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913. Un mérite analogue reviendrait aux allemands Benno Strauss et Eduard Maurer pour la production des aciers inoxydables austénitiques et aux américains Frederick Becket et Christian Dantsizen pour celle des aciers inoxydables ferritiques.

La première description de la passivité des aciers inoxydables est attribuée à l'allemand Philipp Monnartz.

Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard. Enfin, c'est au début des années 1930 que J. Hochmann a découvert les nuances biphasées austéno ferritiques appelées de nos jours duplex.

Si la période comprise entre 1904 et 1920 a été riche en travaux de laboratoire, il a fallu attendre presque un demi-siècle pour atteindre un stade véritablement industriel. [1]

I-2. Généralités sur les aciers inoxydables :

Le Fer, le Chrome et le Nickel sont les éléments fondamentaux des aciers inoxydables. Ils sont équilibrés en fonction des conditions particulières de corrosion ou des impératifs de caractéristiques mécaniques à haute température.

Il en est de même du Molybdène qui présente une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion en milieu sulfurique ou en présence de chlorures.

Le Carbone par ailleurs est maintenu bas ou stabilisé par du Titane ou du Niobium si l'acier est utilisé pour des raisons de résistance à la corrosion. Il sera plus haut si l'on désire des caractéristiques mécaniques élevées à haute température (fluage).

C'est cependant le Chrome qui est l'élément fondamental car responsable de la passivité des aciers. Ainsi, pour qu'un acier soit dit inoxydable, il est nécessaire mais aussi suffisant qu'il contienne au moins 13 % de Chrome.

Les différents diagrammes d'équilibre de la (figure 13) montrent que selon la teneur en chrome on peut avoir ou ne pas avoir la transformation α en fonction de la température. Ils montrent par ailleurs que la teneur minimum en chrome qui provoque la disparition du domaine d'existence de la phase γ dépend du caractère plus ou moins gamma-gène ou alpha-gène des autres éléments d'alliage présents. Sur la base des diverses évolutions structurales possibles en fonction de la température, on distingue trois types d'aciers inoxydables :

- ❖ Les aciers inoxydables martensitiques (ils se transforment totalement en austénite au chauffage et en martensite au refroidissement du fait de leur forte trempabilité),
- ❖ Les aciers inoxydables ferritiques (Ils présentent une structure ferritiques à toute température)
- ❖ Les aciers inoxydables austénitiques
- ❖ Les aciers duplex (austéno-ferritiques). [1]

I-3. L'utilisation des aciers inoxydables :

Actuellement largement répandue en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur grande résistance à la corrosion.

Ils sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines réunissant à la fois de sévères conditions d'environnement et des sollicitations mécaniques élevées (industries, navale, chimique, pétrochimique, du papier... etc.). Du fait qu'une grande partie de leurs applications utilise le soudage comme procédé de fabrication ou de maintenance, la compréhension de la métallurgie du soudage de ces aciers joue un rôle primordial dans leur mise en œuvre. Différents procédés de soudage sont appliqués aux constructions réalisées en aciers inoxydables, parmi ces procédés le soudage TIG (tungstène inerte Gas) est largement utilisé dans le domaine pétrochimique. L'apport de la chaleur lors du soudage est à l'origine de nombreuses transformations métallurgiques. Dans certains cas, ces transformations induisent des microstructures complexes qui peuvent présenter une certaine hétérogénéité mécanique et structurale à travers des joints soudés. Encore, des contraintes résiduelles importantes peuvent provenir des phénomènes mécaniques qui accompagnent le soudage et qui se manifestent lors de la mise en service des assemblages soudés, en conséquence, des ruptures brutales graves peuvent être occasionnées.

Chapitre 01 : Les aciers inoxydables

Selon l'importance de ces contraintes, des traitements de décontraction sont donc à prescrire ou non avant la mise en service des joints soudés.

I-4. Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :

Le phénomène de passivité présente une très grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables. Le phénomène de passivité se caractérise par la présence d'un film très mince (épaisseur de l'ordre de 10 à 20 nm), appelé film passif ou couche passive, à la surface de l'alliage métallique qui rend sa vitesse de corrosion négligeable. Le film passif, fortement solidaire du substrat métallique, empêche ou rend insignifiant le contact entre l'alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant.

Pour que le phénomène de passivité puisse s'établir, et se maintenir, il est nécessaire que l'alliage fer-chrome ait une teneur minimale en chrome de l'ordre de 11 %. Autrement dit, il existe un effet de seuil au-delà duquel le phénomène de passivité peut exister et au-dessous

duquel il est impossible. De plus, si la couche passive devait être détruite localement par suite d'un endommagement accidentel (rayure par exemple), elle possède la propriété de pouvoir se reconstituer dans un grand nombre de milieux, ce qui traduit la propriété d'auto passivation de l'alliage métallique dans ce milieu. [4]

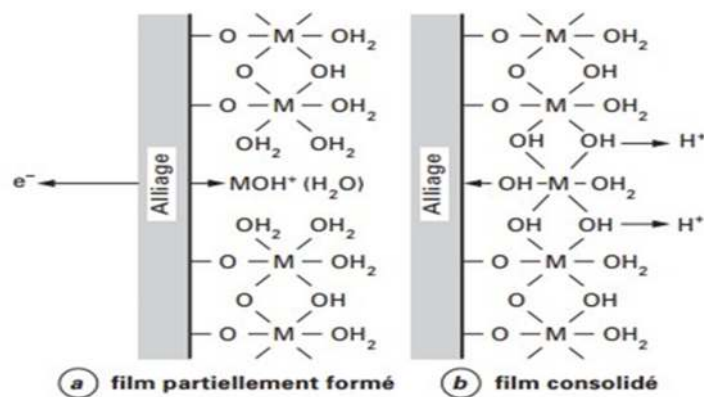


Figure 1- 1 : Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamoto

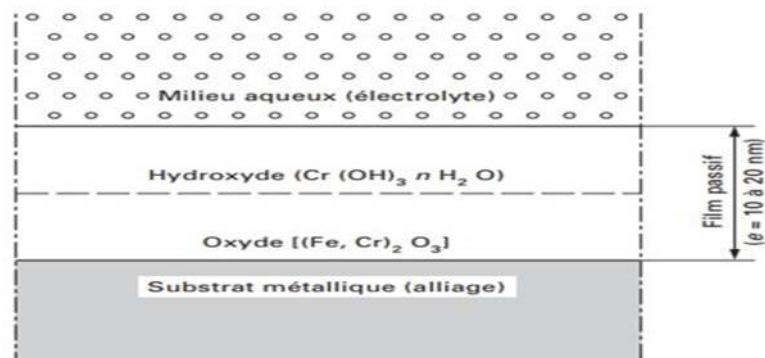


Figure 1- 2: Modèle bicouche du film passif

Le plus utilisé pour décrire le mécanisme de formation de leur couche passive est emprunté à Okamoto et Shibata. Sa représentation schématique est donnée à la figure 2. Les principaux éléments constituant le film passif sont d'une part des cations M^{z+} de valence z provenant du substrat et ayant une grande affinité pour l'oxygène. Il s'agit, pour l'essentiel, de Cr^{3+} et de Fe^{3+} , bien que le fer puisse se trouver sous la forme de Fe^{2+} . D'autre part, aux éléments en provenance du substrat, vont être associées des molécules d'eau provenant de la solution. Certaines molécules d'eau ayant perdu des protons H^+ , de manière à équilibrer la présence des cations métalliques donnent naissance à des ions OH^- et O^{2-} , constitutifs de l'hydroxyde ou de l'oxyde. Le film passif des aciers inoxydables est de type « bicouche ». La couche interne, en contact direct avec le substrat métallique, est formée d'oxydes de type $(Fe, Cr)_2O_3$ et la couche externe est essentiellement constituée par des hydroxydes de type $Cr(OH)_3 \cdot nH_2O$. La représentation schématique de ce modèle est donnée à la figure 3. [5]

I-5. Les différentes familles d'aciers inoxydables :

I-5.1. Les aciers inoxydables martensitiques

Ces alliages comprennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone pouvant atteindre environ 1% et ils peuvent contenir jusqu'à 7% de nickel, et jusqu'à 3% de molybdène. Ils présentent des propriétés intéressantes en termes de limite d'élasticité, de résistance à la corrosion et de dureté. Ils possèdent une structure martensitique (quadratique, notée α') obtenue après trempe de la phase austénitique. Cette transformation homogène se produit avec une augmentation de volume, responsable de fortes contraintes de compression et qui tend à stabiliser de l'austénite résiduelle. Ces aciers sont utilisés pour leur résistance mécanique élevée. Voir (figure 1-3)

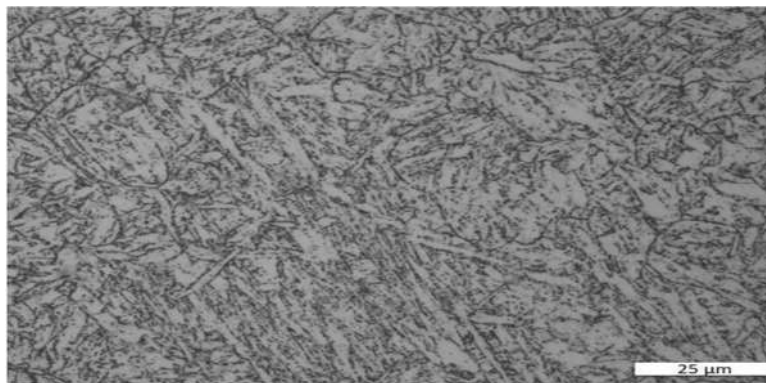


Figure 1- 3: Micrographie d'un acier inoxydable martensitique.

Ils sont utilisés comme matériaux de construction, outillage à main, coutellerie (aubes de turbines, soupapes, boulons, arbres et hélices marines, et pour les plus chargés en carbone : coutellerie, lames de rasoir et instruments de chirurgie). [6]

Chapitre 01 : Les aciers inoxydables

Tableau 1- 1: Composition chimique des principaux aciers inoxydables martensitiques.

Normes		C	Mn MAX	Si MAX	S MAX	P MAX	Cr	
AISI	Afnor							
403	Z8C13	<0,15	1,00	0,50	0,030	0,040	11,5 / 13	
410	Z12C13	<0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	11,5 / 13	
414		<0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	11,5 / 13	Ni : 1,25 / 2,50
416	Z12CF13	<0,15	1,25	1,00	0,15	>0,060	12 / 14	Zr, Mo < 0,60
420	Z20C13	>0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	12 / 14	
431		<0,20	1,00	1,00	0,030	0,040	15 / 17	Ni : 1,25 / 2,50
440A		0,60 / 0,75	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	Mo < 0,75
440B		0,75 / 0,95	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	
440C	Z100CD1 7	0,95 / 1,20	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	Mo < 0,75

I-5.2. Les aciers inoxydables ferritiques :

La proportion de chrome dans ces alliages varie de 11 à 17 % et peut atteindre jusqu'à 24 à 28 %. On parle alors d'aciers ferritiques à haute teneur en chrome ou encore d'aciers super-ferritiques. Ces derniers présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres et par crevasses en milieux riches en chlorures. (Figure 1-4)



Figure 1- 4: Micrographie d'un acier inoxydable ferritiques.

Les aciers inoxydables ferritiques possèdent une structure cubique centrée (notée α) et ils sont caractérisés par une remontée de la température de transition α du diagramme de phase, qui fait qu'en pratique leur structure reste ferritiques dans tout l'intervalle de température c'est-à-dire il y a l'absence de transformation structurale (ils sont à l'état d'équilibre).

Pour garantir une structure ferritiques aux hautes températures, on rajoute des éléments d'alliage dits « stabilisants » (Ti, Nb, Zr) qui ont la propriété de piéger le carbone et l'azote, éléments hautement austénitisant.

Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion mais des caractéristiques mécaniques faibles. Ils sont ainsi facilement mis en forme par emboutissage. Ils sont utilisés dans le domaine des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif (eau de mer). [7]

I-5.3. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) :

Contenant moins de Nickel (4 à 7%) que les aciers inoxydables austénitiques classiques, les aciers duplex sont équilibrés chimiquement pour présenter à la température ambiante une structure mixte composée sensiblement de 50% d'austénite et de 50% de ferrite.

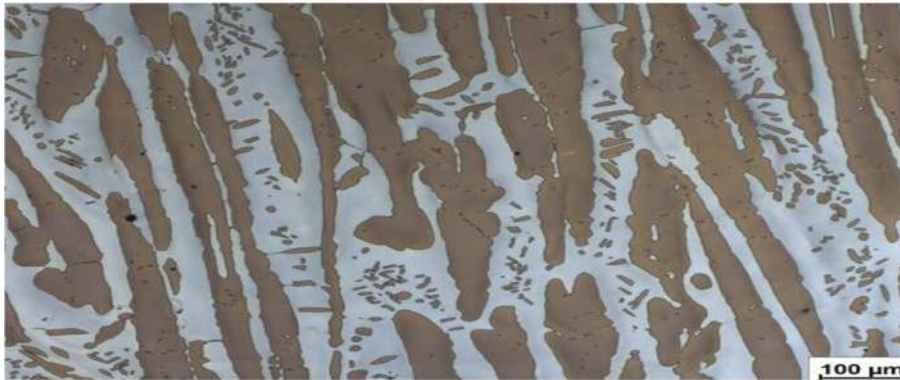


Figure 1 - 5: Acier duplex attaqué par électrolyse avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40 %, montrant de l'austénite marron et de la ferrite bleue. Fond clair.

Ils sont ainsi appelés parce que leur microstructure est composée d'environ 50% d'austénite et 50% de ferrite. Ils contiennent habituellement une forte teneur en chrome (de 20 à 30%), du nickel (de 5 à 10%), du molybdène, de l'azote pour stabiliser l'austénite, et parfois des additions de cuivre et de tungstène. Ceci leur confère une bonne résistance à la corrosion sous tension induite par les chlorures et une bonne résistance à la corrosion par piqûre. Leur intervalle de température d'utilisation s'étend de -60 à 300°C (-75 à 570°F) selon l'alliage. Ils se retrouvent principalement dans les industries chimique, pétrochimique, du contrôle de la pollution, des pâtes et papiers, etc.

Leur intérêt vient de ce qu'ils possèdent :

- ❖ Une forte teneur en Chrome, Molybdène et Azote qui leur confère une excellente résistance à la corrosion dans de nombreux milieux.
- ❖ Une dureté élevée qui les rend très résistants aux phénomènes d'abrasion - corrosion,
- ❖ Une résistance à la rupture et une limite d'élasticité beaucoup plus élevées que les aciers inoxydables austénitiques (+35 à 40 %) ce qui permet de réduire les épaisseurs et donc le coût des constructions.

Toutefois, le domaine d'application des aciers Duplex est limité en température à l'intervalle (-50°C / + 280°C) :

- ❖ En dessous de -50 °C, ils présentent une fragilité excessive liée à leur forte teneur en ferrite,
- ❖ Au-dessus de 280 °C, ils sont le siège de précipitations (Phases α , γ et σ) qui les fragilisent et altèrent leur résistance à la corrosion. [6]

I-5.4. Les aciers inoxydables austénitiques :

Ce sont les aciers inoxydables les plus répandus mais aussi les plus coûteux. Fondamentalement, ce sont des alliages Fer - Chrome - Nickel avec des additions variables de Carbone et d'autres éléments qui permettent d'obtenir des propriétés particulières vis à vis de la corrosion, l'oxydation ou la résistance mécanique à haute température (fluage). Ils présentent une structure austénitique à toutes températures (cubique à faces centrées) et ne peuvent donc pas durcir par trempe. Ils sont beaucoup moins sensibles au phénomène de grossissement de grain à haute température que les aciers ferritiques et, du fait de leur structure (CFC), ils ne présentent pas de rupture par clivage (rupture fragile) ce qui minimise considérablement les conséquences du grossissement des grains et fait d'eux des matériaux de choix pour les applications cryogéniques.

L'absence de transformation structurale en fonction de la température fait que les propriétés mécaniques de ces aciers dépendent uniquement de leur composition chimique (effet de solution solide) et éventuellement du degré d'écroutissage. [7]



Figure 1- 6: Micrographie d'un acier inoxydable austénitique

La composition chimique des principaux aciers inoxydables austénitiques est indiquée dans le tableau 1.3.

Tableau 1- 2: Principaux aciers inoxydables austénitiques.

Normes		C max	Ni	Cr	Mo	Autres
AISI	AFNOR					
304L	Z2CN18.10	0,030	9 / 11	17 / 19		
304	Z6CN18.09	0.07	8 / 10	17 / 19		
321	Z6CNT18.11	0.08	10 / 12	17 / 19		5C < Ti < 0,6
347	Z6CNNb18.11	0.08	10 / 12	17 / 19		10C < Nb+Ta < 1
316L	Z2CND17.12	0,030	11 / 13	16 / 18	2 / 2,5	
316	Z6CND17.11	0.07	10 / 12	16 / 18	2 / 2,5	
310	Z12CN25.20	0.12	19 / 21	24 / 26		

I-6. Rôle des principaux éléments d'addition :

Les éléments additionnels sont divisés en deux familles : les éléments alpha gènes (silicium, aluminium, chrome, molybdène, tungstène, titane, niobium) et les éléments gamma gènes (nickel, manganèse, azote, carbone, cuivre, cobalt). Certains éléments ont des effets plus importants que d'autres, notamment l'azote et le carbone dont l'effet gamma gène est environ trente fois plus puissant que celui du nickel.

I-7. Les éléments alpha gènes :

I-7.1. Le chrome (Cr)

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud. Lorsqu'il est associé avec le molybdène et le nickel, il confère de bonnes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 500°C.

I-7.2. Le molybdène (Mo)

Élément alpha gène, trempant très actif. Il augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion inter cristalline et par piqûres. Il confère une plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation pour maintiens entre 1000 et 1100 °C. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud.

I-7.3. Le silicium (Si)

C'est un élément également alpha gène, il améliore la résistance à la corrosion et améliore les propriétés d'emploi à haute température ce qui lui confère une bonne résistance à l'oxydation à chaud dans le cas de l'acide nitrique mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

I-7.4. Le vanadium (Va)

Il est un fort stabilisateur de ferrite. Il améliore la résistance mécanique au choc.

I-7.5. Le titane (Ti)

Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former un carbure de titane, et l'azote pour former un nitrure de titane, dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion inter cristalline.

I-7.6. Le niobium (Nb)

C'est un élément alpha gène, il se combine avec le carbone dans les aciers inoxydables et forme les carbures pour s'opposer à la corrosion inter granulaire. [8]

I-8. Les éléments gamma gènes :

I-8.1. Le nickel (Ni)

Au-delà de 6 % à 8 %, sa présence se traduit par un effet gamma gène et l'acier devient austénitique à toutes températures. Il élargit ainsi le domaine d'existence de l'austénite. Il favorise la mise en œuvre par déformation plastique, améliore la résistance à la corrosion, en particulier la résistance à la corrosion sous tension, il affine le grain et améliore la ductilité.

Le nickel a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance au choc et la ténacité des calamines.

I-8.2. Le manganèse (Mn)

Bien que classé comme élément gamma gène, a un rôle alpha gène pour des teneurs supérieures à 7 %, rend ainsi difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr-Ni et lors des sollicitations mécaniques aux basses températures.

I-8.3. Le carbone (C)

Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % conduisant à la corrosion inter granulaire). Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0,03%).

I-8.4. L'azote (N)

Stabilisateur d'austénite, associé à une basse teneur de carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion inter granulaire. Il a une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion par piqûres et la résistance à la corrosion par crevasse par précipitation du nitrure de chrome Cr_2N moins riche en chrome que $Cr_{23}C_6$ provoquant un moindre appauvrissement en chrome au voisinage des joints de grains. L'azote augmente aussi la résistance à la traction et diminue la ductilité des aciers inoxydables austénitiques.[8]

I-8.5. Le soufre (S)

Des teneurs de l'ordre de 0,2 %, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres.

I-8.6. Le cuivre (Cu)

Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid, le cuivre aide aussi à la lutte contre la corrosion bactérienne. En outre le cuivre améliore l'usinabilité des aciers inoxydables austénitiques. [9]

I-9. Propriétés physiques des aciers inoxydables

I-9.1. Capacité thermique, conductibilité thermique et conductivité électrique

La capacité thermique de l'acier inoxydable, soit la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'acier inoxydable de 1°C, est essentiellement la même que celle de l'acier doux. Par contre, sa conductibilité thermique est inférieure à celle de l'acier au carbone et peut être seulement le quart de cette dernière dans le cas d'un acier inoxydable austénitique. C'est pourquoi lorsque la pièce est froide il faut beaucoup d'énergie (apport thermique) pour faire la première passe, mais moins pour les passes subséquentes car la chaleur ne se dissipe pas dans la pièce. On rencontre ce phénomène surtout lors du soudage au GTAW

Chapitre 01 : Les aciers inoxydables

(TIG) où, lors des passes subséquentes, il y a risque d'effondrement du bain de fusion. Finalement, la

Conductivité électrique des aciers inoxydables est jusqu'à cinq fois moins élevée que celle de l'acier, ce qui favorise la fusion des fils MIG (augmente la vitesse de dévidage) mais aussi l'échauffement de l'âme des électrodes enrobées.

I-9.2. Coefficient de dilatation thermique

Lors du chauffage, l'acier inoxydable austénitique se dilate environ une fois et demie plus que l'acier au carbone. Son retrait au refroidissement sera donc plus important et il y aura plus de déformations au soudage. Il faut aussi tenir compte de cet aspect lors d'assemblage dissimilaire car il y aura plus de contraintes dans le joint.

Les aciers inoxydables duplex, ferritiques et martensitique ont cependant un coefficient de dilatation thermique similaire à celui de l'acier doux.

I-9.3. Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers ne subissent pas de transformation de phase en fonction de la température. Ils sont donc insensibles au phénomène de trempe et ne présentent donc pas d'augmentation de dureté dans la zone affectée thermiquement.

De plus dans le cas de constructions soudées, ils sont la plupart du temps utilisés à l'état hypertrempe (refroidissement rapide depuis 1100 à 1050°C), c'est-à-dire non écroui.

- suivant la composition, il existe ou non à très haute température, un domaine de stabilité de la ferrite. Or, l'expérience montre que la formation d'un minimum de ferrite dans la zone fondue lors de la solidification permet de diminuer considérablement les risques de fissuration à chaud. La composition chimique du métal d'apport devra dans la mesure du possible, être ajusté de manière à avoir de 2 à 10 % de ferrite dans le métal fondu (en dessous de 2 %, les risques de fissuration à chaud augmentent fortement, au-delà de 10 % on observe une baisse sensible de la ténacité à basse température),

- la quantité de ferrite formée dépend de l'ensemble des éléments alpha gènes et gamma gènes de la zone fondue. Elle peut être prédite avec une approximation souvent suffisante en calculant les concentrations en chrome et nickel équivalents et en se reportant au diagramme de Schaeffle (figure 1-7). [8]

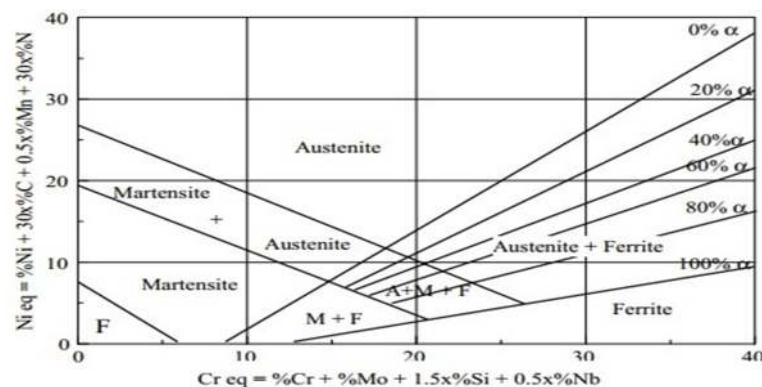


Figure 1- 7: Mise en évidence de la formation de phase σ et de ses conséquences sur la résilience en fonction du traitement thermique - Acier 317.[10]

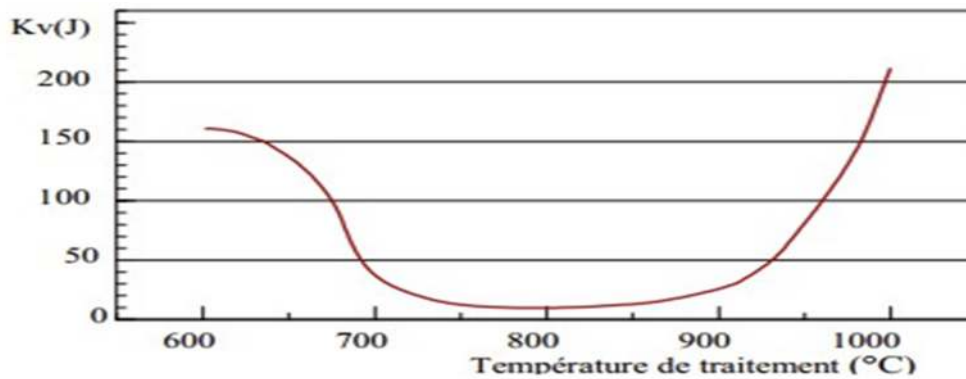


Figure 1-8 : diagramme de qchaffer[8]

la ferrite dans la zone fondue a une action très favorable en petite quantité puisqu'elle limite fortement les risques de fissuration à chaud. Elle peut cependant être à proscrire dans le cas d'une utilisation des matériaux à haute température. En effet, après un maintien prolongé entre 450° et 900° C environ, elle donne naissance à la phase « σ » particulièrement fragile. L'apparition de cette phase (composée Fe-Cr à 45% de chrome) provoque une importante diminution de la résistance à la corrosion, de la ductilité ainsi que de la résilience et une augmentation de la dureté. Cette phase peut être dissoute par un chauffage à une température supérieure à 1000° C.

- La précipitation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ (94 % de Cr) après maintien entre 420 et 650 °C

peut entraîner, suivant la teneur en carbone de l'acier, une déchromisation importante au voisinage des joints de grains et donc une grande sensibilité à la corrosion de ces zones (corrosion inter granulaire figure 9).

Le temps de maintien nécessaire à la précipitation étant très court, ce phénomène se produira dans la zone affectée thermiquement par le soudage.[8]

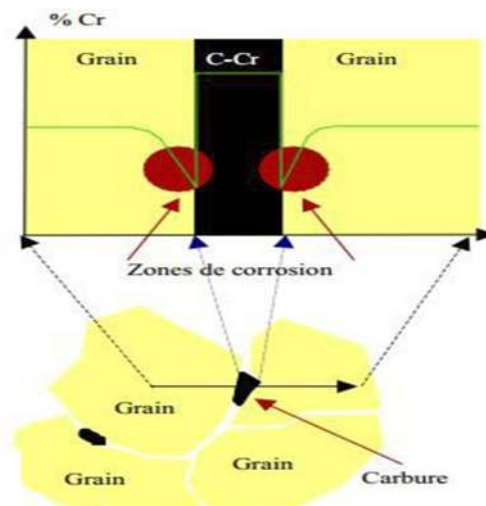


Figure 1- 8: Appauvrissement local en Chrome pouvant être à l'origine de corrosion

Chapitre 01 : Les aciers inoxydables

Pour éviter cette corrosion, on dispose de plusieurs moyens :

- Utiliser des aciers à basse teneur en carbone ($C < 0,03$). Dans ces conditions, la quantité de carbures précipités sera faible et la teneur en chrome au voisinage des joints de grains ne descendra pas en dessous du seuil critique d'in oxydabilité (13 %),
- Effectuer une hypertrempe : un chauffage vers 1050°C suivi d'un refroidissement

Rapide permet la redissolution des carbures de chrome. Cette opération est cependant souvent impossible à réaliser industriellement après soudage.

- Utiliser des aciers stabilisés par des additions d'éléments fortement carburières (Ti, Nb, Zr, Ta) : l'affinité de ces éléments pour le carbone étant supérieure à celle du chrome, les carbures de chrome ne se formeront généralement pas. [8]
- Les quelques phénomènes métallurgiques qui viennent d'être exposés permettent de comprendre la quasi-totalité des problèmes que peut poser le soudage des aciers inoxydables austénitiques. Dans ces conditions, il est clair que ces aciers présentent une excellente soudabilité.
- En fait, la variation des cycles thermiques de soudage n'entraînant pas de modification

Significative de la microstructure de ces aciers, les procédés se distinguent principalement par la morphologie des cordons qui est propre à chacun d'entre eux et par la compacité des joints qu'ils permettent de réaliser. Ces différences de morphologie se traduisent par des différences dans les taux de dilution. En ce sens, les caractéristiques mécaniques des joints soudés pourront varier selon les procédés utilisés puisque la composition chimique de la zone fondue dépend de la composition des métaux de base et d'apport par l'intermédiaire du taux de dilution. Mais, si l'on compare, à composition chimique identique, les caractéristiques mécaniques de joints obtenus dans des conditions normales de soudage avec les différents procédés, on s'aperçoit que celles-ci sont relativement voisines. Seule la résilience peut présenter des variations notables car cette caractéristique est fortement tributaire de la teneur en oxygène du métal déposé (et du taux de ferrite), laquelle peut varier dans de grande proportion selon les procédés et les produits de soudage :

- Procédé T.I.G. - Plasma : $\text{O}_2 < 100$ ppm (ou O_2 métal de base)
- Procédé M.I.G. : $200 < \text{O}_2 < 400$ ppm
- Procédés AS et Electrode enrobée : $400 < \text{O}_2 < 1100$ ppm

A taux de ferrite équivalent, plus la teneur en oxygène est faible, moins le dépôt contient d'inclusions et plus l'énergie de rupture ductile est élevée (il n'y a pas de rupture fragile dans une structure cubique à faces centrées). C'est la raison pour laquelle lorsque l'on doit obtenir de bonnes valeurs de résiliences aux températures de l'azote ou de l'hélium liquide, les procédés de soudage sous flux solide (Electrode enrobée ou Arc Submergé) ne pourront être envisagés qu'à condition d'utiliser des produits relativement basiques qui seuls conduisent à des teneurs en oxygène compatibles avec le niveau de résilience exigé. [8]

Chapitre 01 : Les aciers inoxydables

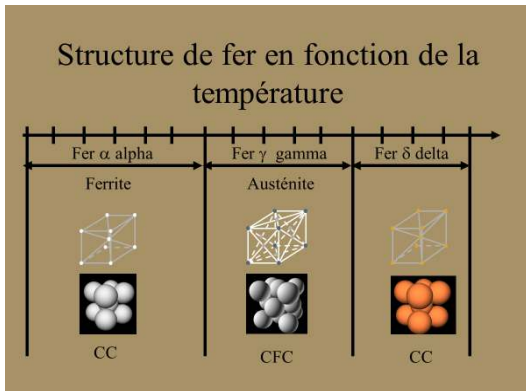


Figure 1- 11: structure de fer en fonction de la température.[9]

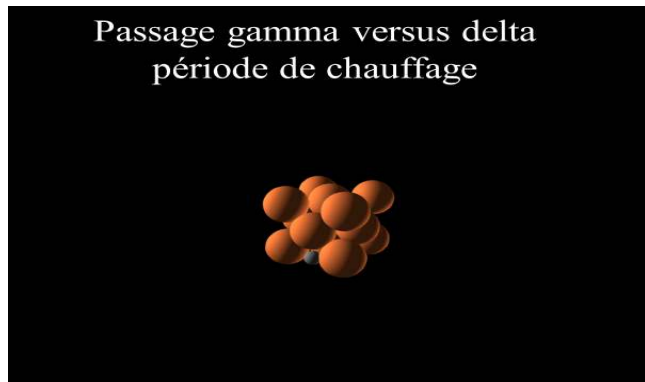


Figure 1- 12: passage gamma versus delta.[9]

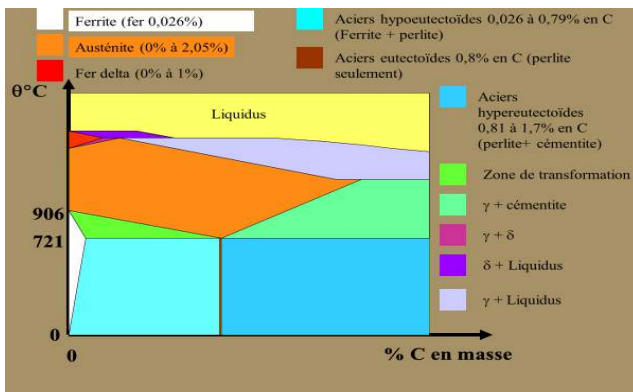


Figure 1- 10: diagramme fer carbone.[9]

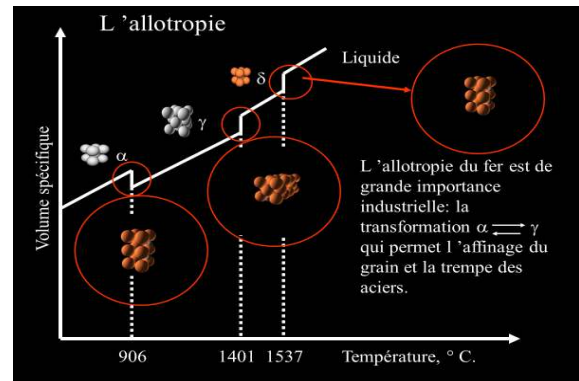


Figure 1- 9: allotropie du fer grande importance.[9]

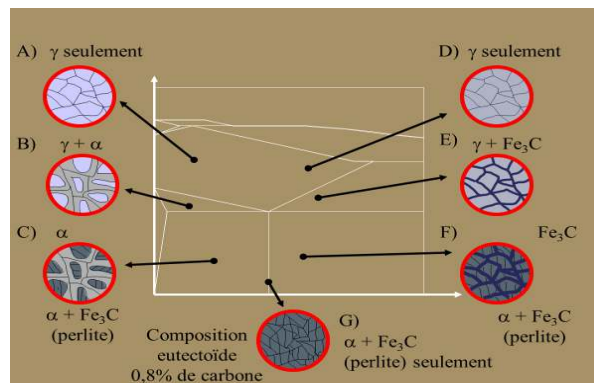


Figure 1- 13: Diagramme des phases microstructure.[9]

Chapitre II

Soudage des aciers inoxydables

II-1. Généralités sur le soudage :

II-1.1. Définition du soudage :

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. En ce qui concerne les métaux, beaucoup sont soudables moyennant les études préalables requises pour la mise au point du mode opératoire ; citons les aciers (dits soudables), le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages. [9]

Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe Le Brasage :

C'est une opération qui consiste à assurer l'assemblage de pièces métalliques en utilisant un produit d'apport dont la température de fusion est nettement inférieure à celle des métaux de base.

On distingue :

- le brasage tendre (improprement appelé soudage à l'étain) qui est réalisé avec une brasure dont la température de fusion est inférieure à 450 °C.
- est fort qui est réalisé avec une brasure dont la température est supérieure à 450°C. dans ce cas où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler.

Le soudage des plastiques est une technique d'assemblage permanent qui assure une continuité de même nature par fusion des surfaces à joindre, rapprochement, contact puis maintien jusqu'à solidification du mélange ainsi formé. La plupart des plastiques appartiennent à deux catégories, les thermoplastiques qui sont soudables et les thermodurcissables qui ne le sont pas. Comme pour le soudage des métaux, il existe divers procédés utilisant ou non des produits d'apport.

II-1.2. Histoire du soudage :

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- À l'âge de fer on soudait à la forge

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'âge du bronze et assemblées par chauffage et martelage d'un joint constitué de deux surfaces se recouvrant. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans. Pendant l'âge du bronze, les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3000 ans ont été retrouvés.

Pendant le Moyen Âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage / soudage. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

- Type de joint requis pour une demande est temporaire ou permanente

- Si des matériaux similaires ou dissemblables doivent être joints pour prendre en compte l'aspect de compatibilité, l'incompatibilité métallurgique peut être désastreuse pour la performance des joints
- Propriétés métallurgiques physiques et chimiques des matériaux à assembler
- Les exigences du service à partir du joint dans des conditions spéciales de température, de corrosion, d'environnement et de fiabilité
- Type et nature des conditions de chargement (charge statique et dynamique sous tension, cisaillement, compression, flexion, etc.)
- L'économie ou la rentabilité est l'un des facteurs les plus importants influençant la sélection des joints pour la fabrication d'un composant technique

Les processus de fabrication ou d'assemblage font partie intégrante de la fabrication où deux éléments solides ou plus sont assemblés de manière temporaire ou permanente pour former un composant unique. Le soudage est un type de procédé d'assemblage permanent dans lequel deux matériaux ou plus peuvent être assemblés en permanence par formation de cordon de soudure. Malgré la présence de nombreuses alternatives pour les procédés de soudage, y compris quelques processus de jonction permanents et de nombreux procédés de jonction temporaires, le soudage est largement utilisé dans les industries manufacturières. La définition technique du soudage et l'explication des termes cruciaux de la définition sont expliquées dans les passages suivants.

Le soudage est le premier et le plus important exemple de procédé d'assemblage permanent dans lequel deux matériaux ou plus peuvent être assemblés par formation de coalescence. Il est l'un des procédés de fabrication par lesquels deux matériaux similaires ou dissemblables peuvent être assemblés en permanence par formation de coalescence avec ou sans application de pression externe, de chaleur ou de matériau d'apport.

II-2. Les types de soudage :

Soudure autogène, homogène et hétérogène

❖ **La soudure Autogène** : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder

✚ **Avantages du soudage autogène :**

- ✓ Le soudage par fusion de tôles minces n'est possible que de manière autogène.
- ✓ Pas de coût supplémentaire pour le matériau de remplissage.
- ✓ L'apparence de la soudure est bonne.

✚ **Inconvénients du soudage autogène :**

- ✓ L'épaisseur des plaques est également limitée à 2 - 3 mm seulement pour obtenir une soudure solide.
- ✓ La résistance du joint n'est pas bonne - il est inférieur à la résistance des plaques de base.

❖ **Le soudage homogène** : Le soudage homogène est un moyen de réaliser le soudage par fusion avec l'application d'un matériau de remplissage externe dont la composition métallurgique est presque identique à celle des métaux de base. Ainsi, en soudage homogène, on applique un matériau de remplissage ayant une composition identique à celle du métal de base. [9]

✚ **Avantages du soudage homogène :**

- ✓ Des plaques épaisses peuvent être soudées efficacement avec une préparation appropriée des bords.
- ✓ La résistance du joint est excellente - meilleure que le soudage autogène.
- ✓ En raison d'un apport suffisant de métal en fusion, la tendance à la formation de fissures lors de la solidification diminue.

✚ **Inconvénients du soudage homogène :**

- ✓ Pas possible de joindre des feuilles très fines (provoque une distorsion).
- ✓ L'excès de matériau filtrant provoque un renforcement du cordon de soudure, qui doit être enlevé après soudage par meulage (post-traitement obligatoire).
- ✓ L'apparence du cordon de soudure n'est pas bonne.

❖ **La soudure Hétérogène :** Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder

✚ **Avantages du soudage hétérogène :**

- ✓ Diverses propriétés de soudure, telles que la résistance aux contraintes et à la corrosion, etc. peuvent être améliorées en choisissant un matériau de remplissage approprié.
- ✓ Des plaques épaisses peuvent être soudées efficacement avec une préparation appropriée des bords.
- ✓ La résistance du joint est excellente - meilleure que le soudage autogène.
- ✓ En raison d'un apport suffisant de métal en fusion, la tendance à la formation de fissures lors de la solidification diminue.
- ✓ Il est également possible de souder divers joints, tels que le joint bout à bout, le joint de recouvrement, le joint en té, le joint de coin, etc.
- ✓ Les joints sont plus fiables, donc moins de risques de défaillance s'ils sont soudés correctement. [9]

✚ **Inconvénients du soudage hétérogène :**

- ✓ En raison de la non-uniformité de la composition entre les métaux d'apport et les métaux de base, il existe une forte tendance au développement de discontinuités de soudure et de formation de fissures.
- ✓ La compatibilité entre le matériau de remplissage et le matériau de base doit être vérifiée correctement, faute de quoi le soudage sera défectueux.
- ✓ Le matériau de remplissage est généralement plus coûteux et nécessite également un entretien approprié.
- ✓ L'application d'un excès de filer entraîne un renforcement important du cordon de soudure, qui doit être enlevé après soudage par meulage.
- ✓ L'apparence du cordon de soudure n'est pas bonne.

II-3. Soudage et comparaison avec d'autres procédés d'assemblage et de fabrication :

Le soudage est l'une des techniques de fabrication les plus couramment utilisées pour la fabrication de composants d'ingénierie pour l'énergie, les engrais, la pétrochimie, l'automobile, la transformation des aliments et de nombreux autres secteurs. Le soudage utilise généralement un chauffage localisé au cours des procédés courants de soudage par fusion (arc métallique blindé, arc submergé, soudage à l'arc sous gaz métallique, etc.) pour faire fondre les surfaces et le métal d'apport. Cependant, le chauffage et le refroidissement localisés et différentiels subis par le métal pendant le soudage le rendent très différent des autres techniques de fabrication :

- ✓ Les contraintes résiduelles sont induites dans les composants soudés (le développement de contraintes résiduelles de traction affecte négativement les propriétés de traction et de fatigue de la pièce)
- ✓ Les composants de forme simple à assembler sont partiellement fondus
- ✓ La température du métal de base lors du soudage dans et autour de la soudure varie en fonction du temps (cycle thermique de la soudure)
- ✓ Les propriétés chimiques, métallurgiques et mécaniques de la soudure sont généralement anisotropes
- ✓ La fiabilité du joint de soudure est faible.
- ✓ Peu de métal est gaspillé sous forme d'éclaboussures, coule et coule
- ✓ Les capacités du soudage en termes de précision dimensionnelle, de précision et de finition sont médiocres.
- ✓ Les joints de soudure pour les applications critiques nécessitent généralement un traitement post-soudage tel qu'un traitement thermique ou un travail mécanique pour obtenir les propriétés désirées.
- ✓ Le problème lié au comportement de la transition ductile-fragile de l'acier est plus grave avec les joints soudés dans des conditions de basse température.

II-4. Capacité de charge élevée :

La résistance du joint soudé étant similaire à celle des pièces de base, la capacité de charge des composants soudés reste inchangée avant et après l'assemblage.

- ✓ Possibilité de modifier les propriétés mécaniques - En utilisant un matériau de remplissage, un gaz de protection et un revêtement d'électrode appropriés, diverses propriétés mécaniques du cordon de soudure peuvent être améliorées au niveau souhaité.
- ✓ Les assemblages soudés sont plus légers - Par rapport aux joints rivetés (qui nécessitent des sangles, des rivets, etc.), les joints soudés sont légers.
- ✓ Différentes formes peuvent être jointes. La possibilité de joindre différentes formes, y compris des plaques, des tiges, des feuilles, etc., rend le processus de soudage unique parmi les différents procédés d'assemblage.
- ✓ Assemblage de métaux dissemblables : l'assemblage de deux métaux différents ou plus est également possible, avec ou sans application de charge. Cependant, des assemblages de métaux différents nécessitent des précautions supplémentaires.
- ✓ Possibilité de joindre des plastiques - Outre les métaux, les plastiques peuvent également être soudés de différentes manières.

II-5. Zones constitutives d'un joint soudé :

Afin d'obtenir un joint soudé, en faisant fondre le métal de base des deux composants à relier avec ou sans métal d'apport. Dans la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé on distingue cinq zones (figure 1).

-La zone de fusion (ZF) mélangé : la zone où de métal d'apport et le métal de base sont mélangés de façon homogène (Bain de fusion) sous une température élevée adaptée dit température de liquidus.

-La zone affectée thermiquement (ZAT) : ou zone affectée par la chaleur est la zone de métal de base où ses propriétés mécaniques et microstructures sont modifiées par la chaleur du soudage.

- La zone fondue partiellement (ZFP) : elle est nommée aussi par la zone de liaison, elle se situe entre la zone de fusion et la zone affectée thermiquement.

-La racine : endroit jusqu'ou le métal d'apport a pénétré. Le Face ou surépaisseur : surface extérieure de la soudure.

II-6. Morphologie de la zone de fusion :

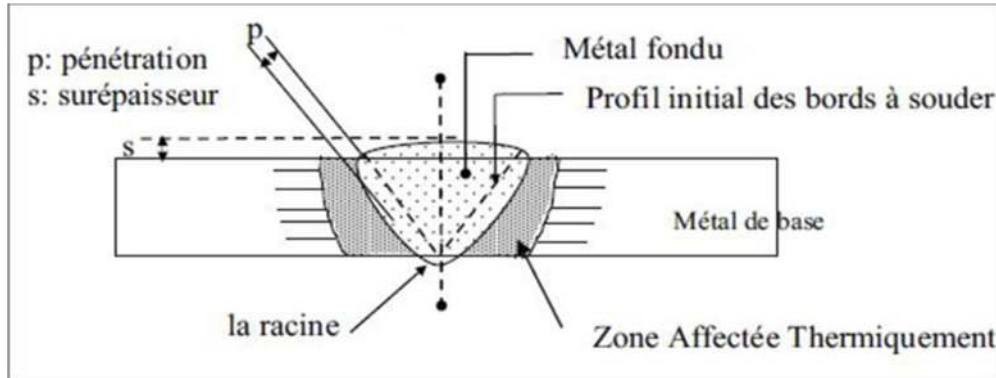


Figure 2- 1: Représentation schématique du joint soudé.

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion. Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé.

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origine différentes sont. [10]

- les forces de gravité (ou flottabilité),
- les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- la pression du plasma ou de l'arc en surface,
- les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à l'arc,

La (figure 2-2) présente les forces agissant sur la forme du bain de fusion par procédé de soudage TIG. Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par rayonnement, convection et conduction dans le métal adjacent.

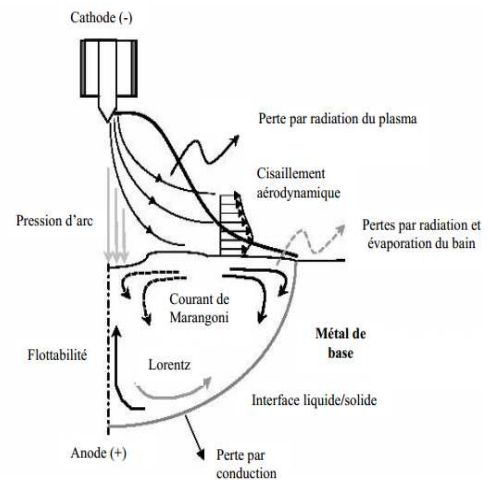


Figure 2- 2 : Forces et courants de convection dans le bain de fusion de Paramètres importants dans le soudage

II-7. Énergie de soudage :

Un soudage respectant les températures de soudage préconisées vous apportera des bonnes propriétés mécaniques dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

La chaleur dégagée par le procédé de soudage affecte les propriétés mécaniques du joint soudé. Ceci est décrit par l'énergie de soudage (Q) qui peut être calculée à l'aide de cette formule.

Les différentes méthodes de soudage présentent une efficacité thermique (k) variable.

Les préconisations pour l'acier Hardox doivent être considérées comme des valeurs approximatives.

Quand un joint comprenant différentes épaisseurs de tôle est soudé, l'énergie de soudage recommandée est basée sur la tôle la plus mince du joint soudé. [11]

$$E = (60 \times I \times U) / (1000 \times V_c)$$

J/mm
I (A)
U (V)
Vc (mm/S)

Efficacité Thermique	K adimensionnelle
EE	0.8
MAG, tous types	0.8
Submergé	1.0
TIG	0.6

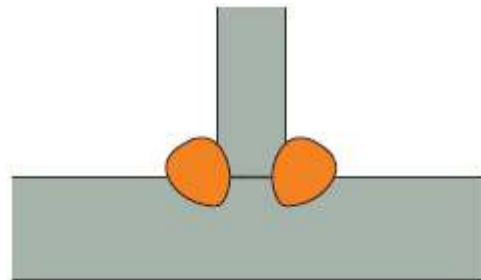


Figure 2- 3: joint comprenant différentes épaisseurs de tôle soudée angulaire

II-8. Consommables pour le soudage :

Des matériaux consommables non-alliés, faiblement alliés et inoxydables peuvent être utilisés pour le soudage. L'acier Hardox doit être soudé avec des matériaux de faible résilience comme le montre la figure ci-dessous. [12]

II-9. Présentation des principaux procédés de soudage :

II-9.1. Les procédés de soudage des métaux :

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont des types chimiques, électriques, ou mécaniques.

Ces procédés sont classés ici selon :

- Les procédés faisant intervenir la fusion locale avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec une action mécanique.

- Les procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage
- Les procédés faisant intervenir la fusion locale sans une action mécanique. [13]

II-9.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique :

Dans ces procédés, la chaleur utilisée pour former le bain du métal fondu est assurée par la combinaison entre l'effet Joule d'un courant électrique alternatif à haute intensité et une pression ponctuelle. L'énergie nécessaire de la fusion des métaux est obtenue par effet Joule, caractérisée par :

$$W = R \cdot I^2 \cdot T$$

Avec W : quantité d'énergie engendrée par l'effet joules en joules

R : la Résistance en Ohm

I : intensité en ampère

T : temps de soudage en millisecondes (très court).

Ces procédés ne nécessitent pas d'apport extérieur (Soudage autogène) car la résistance de contact entre les surfaces des deux pièces à assembler permet la localisation de la fusion dans ce plan. Ces procédés sont :

- Le soudage par point
- Le soudage à la molette

II-9.3. Soudage par point

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ($I > 2000$ A) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression « forge » la soudure. De nombreux procédés de soudure par résistance existent, nous allons voir le plus caractéristique : le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder. [16]

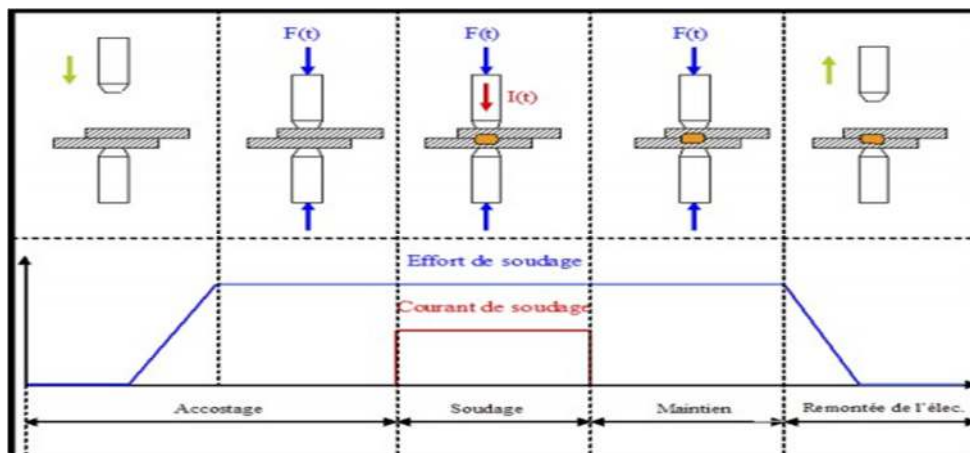


Figure 2- 4: Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point

Chapitre 02 : Soudage des aciers inoxydables

Le cycle de soudage schématisé sur la Figure 4, se décompose en trois phases principales :

-l'accostage : Les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas de la soudeuse du CRDM, seule l'électrode supérieure descend. L'électrode inférieure est fixée la soudeuse. Cette phase se termine dès que l'effort est stabilisé.

- le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle/tôle pour qu'une zone fondue apparaisse. En termes de variation de la résistance électrique, il y a deux étapes consécutives pour l'apparition de la soudure.

Au début du soudage, la résistance de contact entre deux tôles est plus importante que celle de la tôle à basse température. Par conséquent, l'interface chauffe plus rapidement que les pièces.

Lorsque la température augmente, la résistance de contact diminue considérablement avec la température.

Le développement du noyau progresse alors dans l'assemblage par l'augmentation de la résistivité de la tôle avec la température.

- le maintien : cette phase a pour but de solidifier le noyau et la ZAT. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. Les pièces sont maintenues par un effort, qui a généralement la même magnitude que celui de soudage. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. La durée du temps de maintien est normalement la même que celle du soudage. En fin d'un cycle, c'est la remontée de l'électrode supérieure.

L'ensemble des deux tôles peut alors translater afin de procéder à un nouveau soudage par point. [14]

II-9.4. Soudage a la molette :

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou molettes rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser. Un cycle de soudage comporte donc les phases suivantes, similaires à celles du soudage par points :

- L'accostage : les deux molettes viennent serrer, pour les accoster et localiser le courant, les deux pièces à souder au point de départ.
- Le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue.

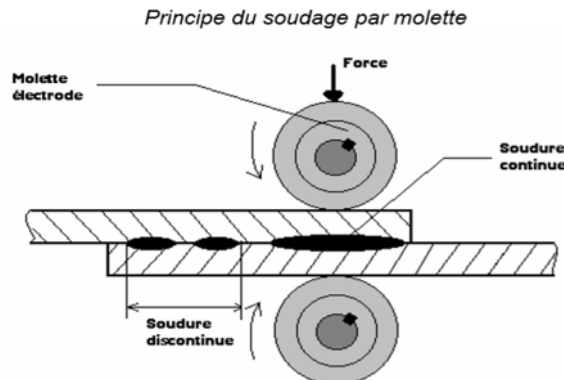


Figure 2- 5: Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par molette

Le cycle de soudage est celui de la figure 13 où l'on a également représenté machine typique et les différentes phases opératoires.

Ainsi qu'il en sera question plus loin, la soudure peut être due au passage de façon continue d'un courant alternatif, ou à celui d'un courant dit modulé donnant lieu à une soudure formée de points juxtaposés se chevauchant. Dans ce dernier cas, les molettes sont entraînées soit de façon continue, soit de façon discontinue, leur arrêt correspondant à la formation d'un point sur lequel il devient alors possible d'exercer un forgeage réglable, indépendant de la vitesse. On utilise également le procédé pour réaliser des soudures discontinues non étanches, les molettes maintenues serrées réalisant alors entre les points un accostage mécanique des tôles qui ont toujours tendance à s'écarter naturellement. [15]

Exemples d'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...

II-9.5. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique :

Le chauffage peut être effectué par apport extérieur de chaleur ou par action mécanique (frottement). Les efforts appliqués doivent être soigneusement pilotés.

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques et elles regroupent :

- Le soudage par diffusion
- Le soudage par friction. [15]

II-9.6. Soudage par diffusion :

Procédé de soudage en phase solide dans lequel les pièces à assembler, maintenues en contact sous une pression adaptée, sont portées et maintenues à une température suffisamment élevée pour que la diffusion des atomes à travers le plan de joint, aidée par les déformations plastiques locales, puisse assurer la continuité métallique. Les surfaces à assembler doivent avoir subi une préparation soignée par polissage fin (pour assurer le contact le plus intime) et nettoyage (pour éliminer toute pollution susceptible de gêner la diffusion). Des précautions doivent être prises pour éviter toute réaction à chaud de ces surfaces avec l'atmosphère (soudage sous vide ou en atmosphère neutre) [16]

II-9.7. Soudage par friction :

Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (Figure 2-6 sous fig. 1). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé (Figure 2-6 sous fig. 2). Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ($V = 100$ m/min.). Un bourrelet commence à se former (Figure 2-6 sous fig. 3). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (Figure 2-6 sous fig. 4). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine

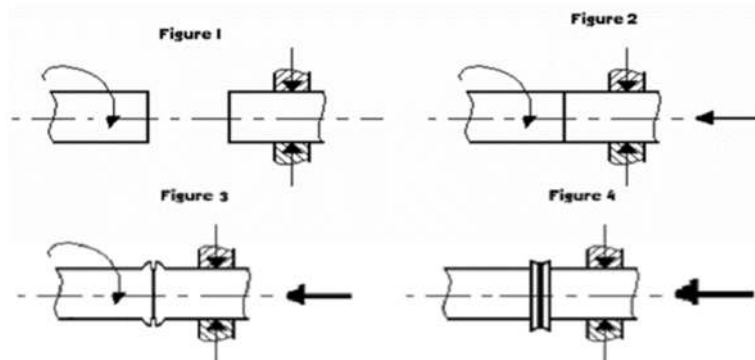


Figure 2- 6: Différentes étapes du soudage par friction

ensuite ce bourrelet par usinage. [16]

II-9.8. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :

Ces procédés l'assemblage des pièces se fait par recouvrement et seulement par une action mécanique (pression) à la mise en œuvre des outils particuliers, et elles contiennent :

II-9.9. Soudage par ultrasons :

Procédé de soudage sous pression de contact au cours duquel des vibrations ultrasonores (15 à 60 kHz) sont appliquées brièvement de telle sorte que les deux faces à assembler soient mises en mouvement l'une par rapport à l'autre ; un volume infime de métal, de part et d'autre du plan de joint, est ainsi porté à la température de recristallisation et assure de ce fait la liaison.

II-9.10. Soudage par explosion :

Procédé de soudage utilisable pour réaliser des assemblages par recouvrement ou des placages, le métal de recouvrement ou le métal de placage est violemment projeté de proche en proche contre le métal de base par la détonation progressive d'une couche d'explosif répartie sur sa face extérieure. L'onde de choc, en se propageant, provoque l'éjection, en avant de la zone de contact, d'un jet de métal qui nettoie parfaitement les faces à assembler et permet l'établissement de la liaison. Il est néanmoins nécessaire que ces faces aient été préalablement décapées.

II-9.11. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique :

La fusion locale des pièces à assembler peut-être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le moyen de protection du métal fondu contre l'action chimique de l'atmosphère ambiante. C'est ainsi on peut répertorier :

- le soudage à la flamme
- le soudage aluminothermique
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie
- soudage à l'arc

II-9.12. Soudage à la flamme :

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO4063) est connu par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène O₂) et un gaz combustible (généralement l'acétylène C₂H₂), en créant une flamme qui peut atteindre une température située entre 2850°C et 3200 °C à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré. [17]

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion (figure 7).

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement. Le soudage O.A est limitée pour les pièces de faible épaisseur environ de 5 mm

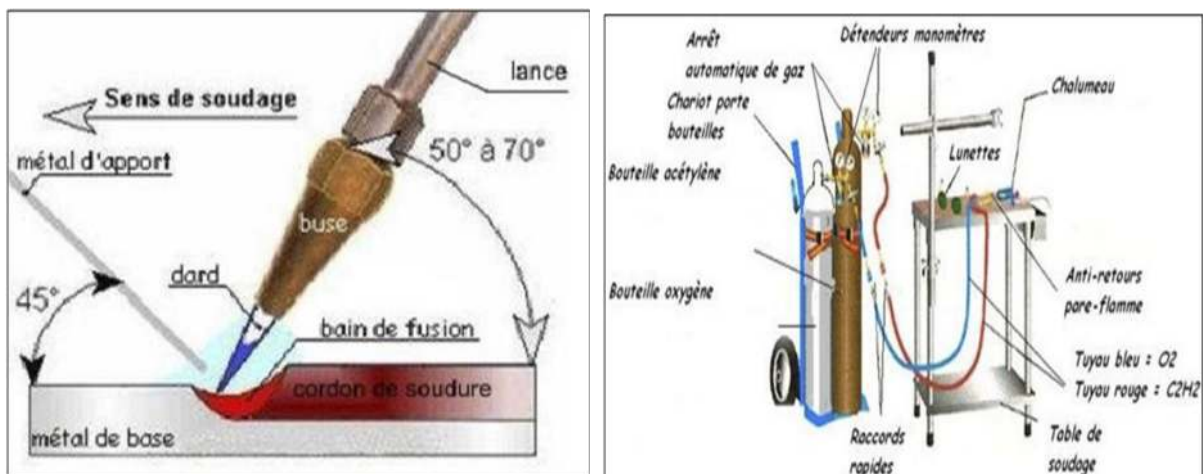


Figure 2- 7: Matériel propre au soudage oxyacétylénique

II-9.13. Soudage aluminothermique

Dans ce procédé, la soudure est réalisée par coulée d'un métal en fusion (le métal d'apport) dans un moule constitué entre les deux faces des pièces à assembler placées bout à bout et, éventuellement, préchauffées. Le métal liquide est élaboré sur place par aluminothermie, c'est-à-dire par réaction exothermique entre des oxydes (du métal qui doit constituer le métal d'apport) et de l'aluminium en poudre. Lors de la coulée du métal d'apport, la surface des pièces à assembler est fondue avant que la solidification ne constitue l'assemblage. La protection du métal fondu est assurée par le laitier qui se forme au cours de la réaction aluminothermique.[17]

II-9.14. Soudage par faisceau d'électrons

Est un procédé de soudage par fusion utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec les pièces à assembler où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis à forte vitesse et accélérés dans le vide par un canon à électrons (figure 2-8).

Ce procédé de soudage est essentiellement automatisé et il permet de souder des épaisseurs importantes en une seule passe ainsi que de très fines épaisseurs sans besoin du métal de base généralement.

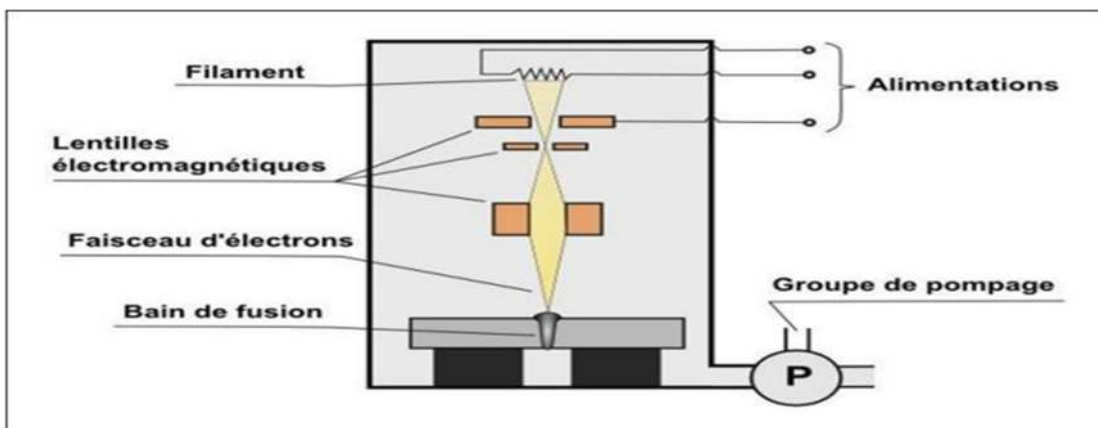


Figure 2- 8: Soudage par faisceau d'électron

II-9.15. Soudage par faisceau Laser :

Le mot laser indique « amplification de lumière par émission stimulée de radiation » (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), le faisceau laser rempli de vapeur métallique dit capillaire est la source de chaleur qui est extrêmement concentrée et guidé vers le joint soudé, ce qui permet des soudures étroites, profonds, à une cadence rapide (procédé 52 selon l'ISO 4063).

Une opération de soudage par laser (figure 2-9), se conduit au moyen d'une machine automatique ou d'un robot. La démarche est similaire à celle du soudage automatique par fusion à l'arc TIG/plasma ou par faisceau d'électrons avec les particularités suivantes :

- la source laser prend la place du générateur de courant d'arc ;
- une tête de focalisation remplace la torche ;

- un conduit optique amène le rayon de la source à la tête Cette technique est souvent utilisée dans le cas de gros volumes de production comme l'industrie automobile rempli de vapeurs métalliques. [18]

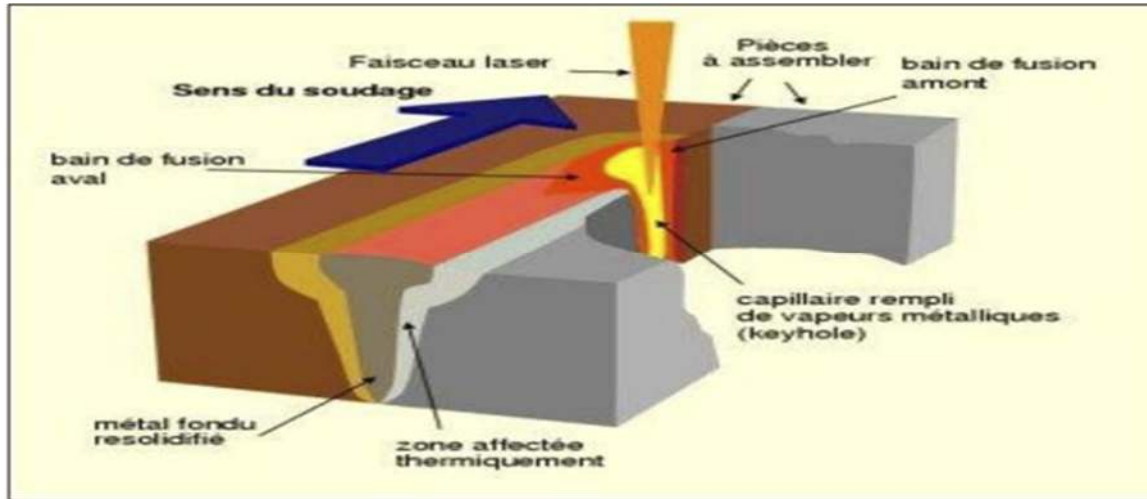


Figure 2- 9: Soudage par faisceau Laser.

II-9.16. Soudage à l'arc

Bernanos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tous premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Le procédé se développe essentiellement grâce à la mise au point d'une électrode enrobée en cellulose qui, du fait de sa vaporisation formant écran de protection, réalise l'impérative condition, pour obtenir des soudures saines, de soustraire les métaux en fusion à l'action de l'air. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire. [19]

II-9.17. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé soudage manuel à l'arc (manuel arc wading, shielded metal arc welding processus), s'exécute d'une façon très simple.

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse.

L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur, (figure2-11)

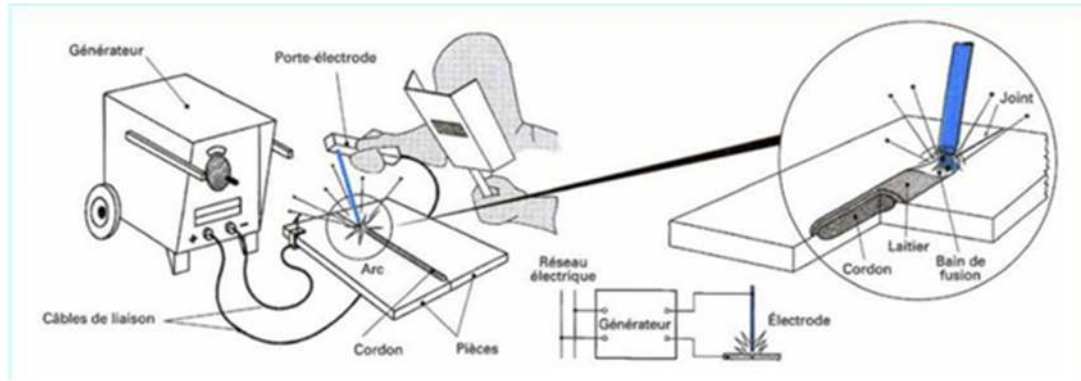


Figure 2-11 : principe de soudage à l'électrode enrobée

-à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement.

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable. Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments Fondamentaux :

- La technologie des électrodes
- L'habileté de l'opérateur.

L'électrode enrobée (au sens générique du terme) constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

II-9.18. Définition de l'électrode enrobée :

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

L'âme : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.

L'enrobage : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.



Figure 2-12 : électrode pour soudage MMA

L'enrobage a un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe.

Chapitre 02 : Soudage des aciers inoxydables

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de \varnothing 1,6 à \varnothing 8 mm La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm Certaines électrodes peuvent atteindre 1 mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique).

II-9.19. Classification des enrobages des électrodes enrobées :

- ❖ Acide ou A (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages)
- ❖ Basique ou B (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium)
- ❖ Cellulosique ou C (à base de cellulose)
- ❖ Oxydant ou O (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages)
- ❖ Rutile ou R (à base d'oxyde de titane)
- ❖ Haut rendement ou RR (à base de poudre métallique)
- ❖ Spécial ou S

II-9.20. Les électrodes enrobées utilisées sont couramment :

- ❖ Rutilés pour les travaux courants.
- ❖ Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression)
- ❖ Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position descendante

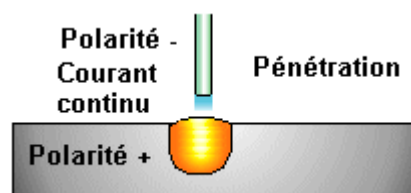
II-9.21. Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées :

- ❖ Lorsque l'intensité est trop faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder, la fusion est molle et la pénétration est faible, l'amorçage est difficile, une instabilité de l'arc et une mauvaise compacité du métal déposé (présence de défaut type soufflure et inclusion de laitier)
- ❖ Lorsque l'intensité est trop forte, vous constatez des projections importantes à l'abord du joint, des écoulements de métal lors du soudage en position.

II-9.22. La polarité de l'électrode enrobée :

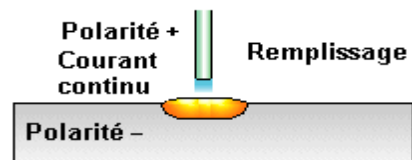
Les passes de pénétration (non reprises à l'envers) réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité négative à l'électrode.

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (-)
- La fiche du câble de la pince de masse est raccordée à la borne (+)



Les passes de remplissage et de finition réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité positive à l'électrode.

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (+)
- La fiche du câble de la pince de masse est raccordée à la borne (-)



II-9.23. Les différents types de générateurs de soudage :

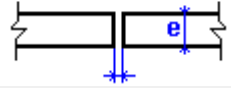
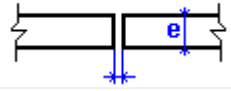



Les différents types de postes de soudage ou générateurs sont :

Chapitre 02 : Soudage des aciers inoxydables

- ❖ Les transformateurs statiques monophasés qui fournissent du courant alternatif à 50 hertz. Ces postes sont les plus économiques du marché et les plus simples.
- ❖ Les transformateurs statiques monophasés ou triphasés à redresseur (pont de diodes, thyristors ou transistors) qui fournissent du courant continu. Les bornes électriques de sortie sont repérées par les signes conventionnels (+) et (-).
- ❖ Les groupes rotatifs à changeur de fréquence. Ils se composent d'un moteur entraînant une génératrice à courant alternatif de 150 à 450 Hertz.
- ❖ Les transformateurs rotatifs à redresseur qui fournissent un courant continu redressé.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre. [19]

Tableau 2- 1: quelques préparations de soudage

QUELQUES PRÉPARATIONS DE JOINTS			
Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø électrode	Préparation
De 1,0 à 2,5 mm	30 à 60 ampères	Ø 1,6 mm	
De 2,0 à 4,0 mm	50 à 90 ampères	Ø 2,0 à 3,2 mm	
De 4,0 à 20 mm	60 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 4,0 à 20 mm	70 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 8,0 à 30 mm	80 à 200 ampères	Ø 3,2 à 5,0 mm	

II-10. Soudage semi-automatique

La figure 13 représente une installation de soudage semi-automatique, procédé que l'on désigne également par les expressions MIG et MAG selon que le gaz est respectivement inerte ou actif (Métal Inerte Gas et Métal Active Gas). Dans les pays anglo-saxons, on utilise aujourd'hui de préférence et indifféremment les expressions suivantes : semi-automatique welding, Gas métal arc welding ou GMA, Gas shielded arc welding processus.

Le soudage semi-automatique s'apparente par le fil électrode au soudage sous flux. Bien que parfois actif, le gaz de protection joue un rôle métallurgique ment beaucoup plus restreint que le flux mais simplifie la mise en œuvre du procédé.

Chapitre 02 : Soudage des aciers inoxydables

L'appareillage comporte : une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitué par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires. L'arc étant visible, les accessoires de protection sont identiques à ceux du soudage à l'électrode enrobée.

La torche a pour rôle de guider le fil sur la soudure et d'amener le courant à son extrémité par un tube-contact de la même façon qu'en soudage sous flux. Lors du soudage, l'appui sur la gâchette commande l'ouverture automatique de la vanne de gaz, la fermeture du contacteur qui met le générateur sous tension faisant apparaître la tension à vide, et également le moteur de l'entraîneur qui dévide le fil. L'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion s'installe instantanément pour former le cordon.

L'avance du fil-électrode à vitesse constante, conjuguée avec la caractéristique horizontale du générateur, rend le fonctionnement de l'arc et le processus de fusion indépendants de l'opérateur dont le seul rôle ne réside plus que dans le guidage du cordon sur le joint, d'où le caractère semi-automatique du soudage manuel.

Le cordon ne se recouvre d'aucun laitier après soudage ; c'est un des avantages de ce procédé qui peut se conduire dans toutes positions.

Le soudage semi-automatique peut s'automatiser facilement. Il peut s'appliquer sur la presque totalité des matériaux soudables sans grande difficulté pour le mettre en œuvre, de là son intérêt dans tous les domaines industriels. [19]

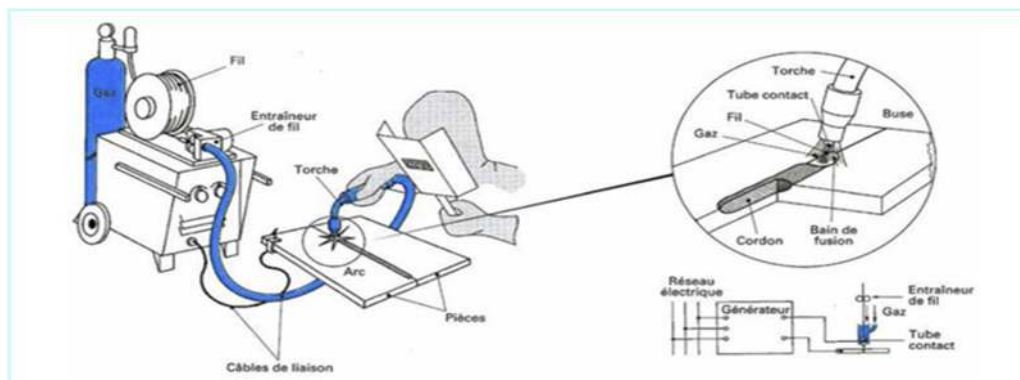


Figure 2-13 : principe Soudage semi-automatique.

II-11. Le procédé de soudage TIG ou GTAW :

II-11.1. Définition du procédé :

Les procédés de soudage par fusion qui utilisent un arc électrique comme source de chaleur sont appelés « procédés de soudage à l'arc ». C'est la source d'énergie la plus utilisée car la chaleur de fusion peut être facilement produite, concentrée et contrôlée. Le procédé de soudage TIG, également appelé GTAW (Gas Tungstène Arc Welding) aux Etats-Unis, est le procédé le plus souple des procédés de soudage à l'arc car il ne nécessite pas obligatoirement de métal d'apport pour transmettre la chaleur à la pièce à souder, contrairement au soudage à électrode fusible ou enrobée. La simplicité technologique du dispositif et l'absence de projection au soudage en font un procédé de soudage de haute qualité, facilement

automatisable pour des joints de petites dimensions et faciles d'accès. Ce procédé est également le plus répandu pour le soudage du titane et de ses alliages.

Généralement les procédures de soudage TIG des alliages de titane sont similaires à celles utilisées pour les aciers inoxydables austénitiques et les alliages base nickel. Des soudures de bonne qualité sont facilement obtenues si une protection sous gaz inertes pour des températures au-dessus de 420°C est utilisée et si la propreté des matériaux est assurée. Le préchauffage n'est pas requis et les fissurations qui peuvent se créer sont souvent en relation avec une contamination du cordon de soudure. En configuration de soudage bord à bord, le pointage avant soudure permet un accostage optimal des bords à souder en évitant un équipement trop élaboré.

Les nombreuses études appliquées au soudage TIG des aciers inoxydables, sur l'amélioration du procédé et les caractéristiques des assemblages, concernent essentiellement les aciers inoxydables comme titane couramment utilisés dans les domaines aéronautique ou naval comme le TA6V, le Ti6242 ou le T40. [19]

II-11.2. Principe :

A l'aide d'un courant électrique, on fait jaillir dans une veine d'argon un arc électrique entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder de polarité (figures 13 et 14). Cet arc électrique engendre un champ magnétique auto induit qui crée à son tour des forces de Lorentz qui vont entraîner le gaz en projection vers la surface de la pièce. L'énergie calorifique provenant du plasma constitué des particules d'ionisation du gaz de protection, des électrons de l'arc électrique et d'éléments métalliques vaporisés, permet de faire fondre localement la pièce formant ainsi le joint soudé après refroidissement

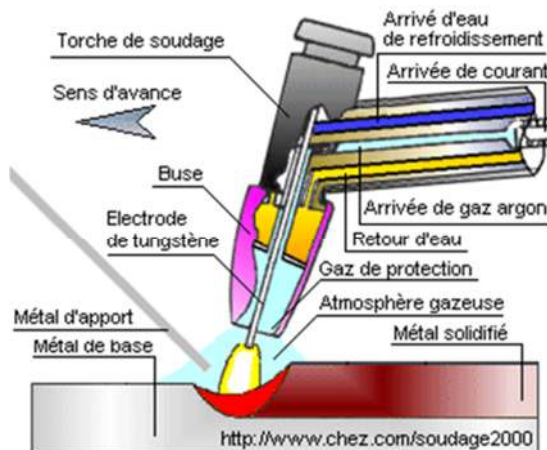


Figure 2- 10: principe du procédé soudage TIG

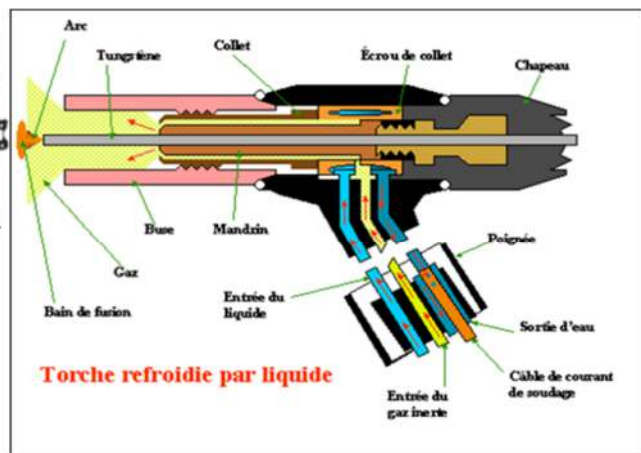


Figure 2- 11: forme de l'arc électrode de TIG

II-11.3. Paramètres technologiques

Nature du courant de soudage Les procédés de soudage à l'arc peuvent être utilisés en courant continu (DC), avec l'électrode négative (EN) ou positive (EP), ou en courant alternatif (AC). Ces différentes configurations présentées sur la figure 14 se traduisent par des différences de morphologies du bain de fusion.[20]

Chapitre 02 : Soudage des aciers inoxydables

Type de courant	CCEN	CCEP	CA
Polarité de l'électrode	Négative	Positive	
Flux d'électrons et d'ions			
Forme de pénétration			
Effet du nettoyage	non	oui	oui, tous les demi-cycles
Répartition de la chaleur dans l'arc (±)	70% sur la pièce 30% à l'électrode	30% sur la pièce 70% à l'électrode	50% sur la pièce 50% à l'électrode
Pénétration	profonde et étroite	faible et large	moyenne

Figure 2- 13: Caractéristiques des modes de fonctionnement possibles pour le soudage TIG. [21]

En courant continu, lorsque l'électrode est connectée à la borne négative (DC-), les électrons sont émis de l'électrode de tungstène vers la pièce de travail de polarité positive. Ces électrons hautement énergétiques rentrent en collision avec la pièce en abandonnant leur énergie cinétique et génèrent un échauffement considérable. Il en résulte une pénétration importante, un cordon de soudure étroit mais aussi un apport de chaleur significatif pouvant induire des contraintes résiduelles et des déformations non désirables. Cependant ce mode est le plus employé pour des procédés comme le TIG où l'électrode est non consommable. Lorsque l'électrode est connectée à la borne positive (DC+) l'effet de l'apport de chaleur des électrons par leur énergie cinétique se concentre sur l'électrode plutôt que sur la pièce de travail. Ceci nécessite un refroidissement plus important des électrodes et cela engendre un cordon moins pénétrant, plus large, et un faible échauffement de la pièce de travail. De plus les ions positifs qui rentrent en collision avec la pièce de travail en provenance de l'électrode positive ont un effet nettoyant sur la surface oxydée. Ce mode de soudage est préconisé pour le soudage de faibles épaisseurs des métaux s'oxydant rapidement comme l'aluminium et le magnésium. Le courant continu en mode pulsé engendre une succession de temps froids, avec maintien de l'arc, et de temps chauds (pics d'intensité) assurant la pénétration (figure 16). Cette technique permet de mieux maîtriser l'énergie apportée à la pièce. [21]

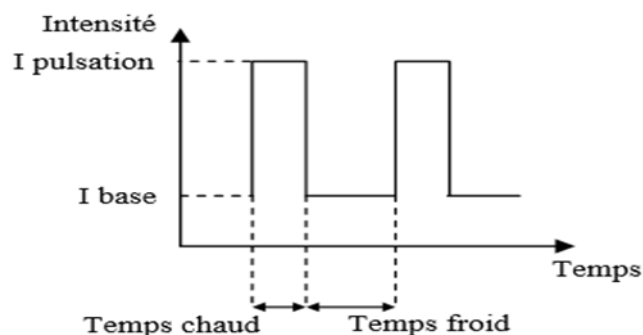


Figure 2- 12: Cycle d'apparition du courant pulsé.

Enfin le courant alternatif peut être utilisé pour alterner les avantages des deux modes cités précédemment durant la moitié des cycles ; la pénétration est assez bonne avec une action de nettoyage des surfaces oxydées.

II-11.4. Intensité et vitesse de soudage :

L'intensité et la vitesse de soudage sont les paramètres les plus importants à contrôler parce qu'ils sont directement liés à la profondeur de pénétration, à la largeur du bain de fusion, et à la qualité du joint soudé. L'intensité affecte également la tension si la longueur de l'arc (distance entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder) est fixée. D'après L'Houel la morphologie d'un cordon de soudure TIG de tôles en alliage de titane TA6V d'épaisseur 3,7 mm, caractérisée par le rapport profondeur de pénétration sur la largeur du cordon (P/L), est plutôt conditionnée par chacun des paramètres technologiques séparés que par l'apport thermique théorique résultant de la combinaison de ces paramètres. Ainsi l'augmentation de l'intensité de courant favorise une pénétration et une largeur de cordon

Importantes alors qu'une augmentation de la vitesse de soudage aura une influence inverse (figure 2.17).[22]

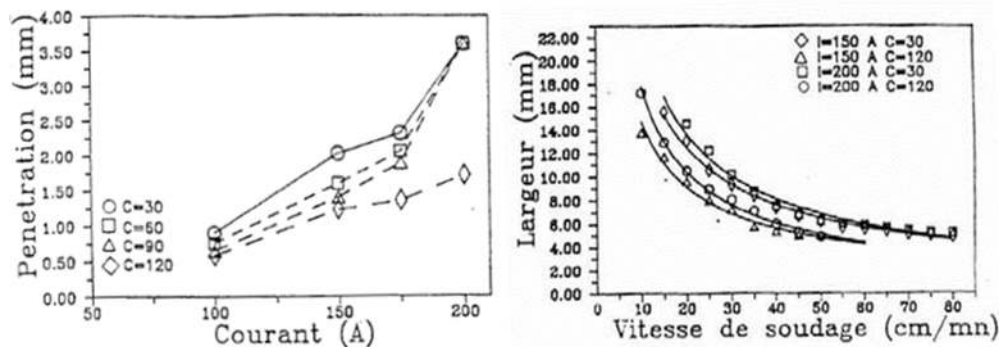


Figure 2- 14: Influences du courant et de la vitesse de soudage sur la pénétration et sur la largeur du cordon de soudure TIG d'une tôle en TA6V de 3,7mm d'épaisseur[22]

II-11.5. Nature de l'électrode

L'électrode est généralement composée d'un alliage de tungstène avec 2% de ThO₂ ; l'ajout de thorine entraîne une plus grande émissivité que le tungstène pur et de ce fait une plus grande efficacité du courant produit. La forme de la pointe de l'électrode peut affecter la forme du bain de fusion et généralement les pointes des électrodes utilisées en courant direct sont ragrées sous une forme conique.

II-11.6. Gaz de protection

Traditionnellement le soudage TIG dans l'air est très pratiqué avec l'utilisation de techniques de protections gazeuses adaptées. Pour le soudage TIG des alliages de titane l'électrode est protégée par un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium (ou un mélange des deux) pour empêcher sa dégradation. Ces gaz servent également de gaz de protection, et comme la géométrie de l'électrode, ils peuvent être optimisés pour réaliser des cordons pénétrants ou plus mouillants.

L'argon est le gaz le plus utilisé actuellement dû à un moindre coût et à son faible potentiel d'ionisation qui favorise la formation d'un plasma au passage de l'arc électrique. De plus, l'argon étant plus lourd que l'hélium, il reste plus facilement sur la surface de soudage assurant ainsi une meilleure protection. On notera que l'utilisation de l'hélium, de par son potentiel d'ionisation élevé et sa meilleure conductivité thermique, conduit à une tension d'arc supérieure et donc à une énergie transférée plus importante. Cependant sa densité plus faible entraîne une distribution spatiale de température plus large. Le débit optimal de gaz ne doit pas perturber le bain liquide et un écoulement laminaire est préférable.

II-11.7. Mise en œuvre des soudures TIG

Les paramètres de soudage varient en fonction de l'épaisseur, de la conception des joints et de la configuration de soudage en automatique ou en manuel. L'interaction entre les nombreux paramètres opératoires du soudage TIG ne permet pas de définir des paramètres de soudage optimum pour une application donnée. Cependant des « fenêtres de travail » peuvent être établies en essayant de trouver les meilleurs compromis en fonction des connaissances de l'influence des différents paramètres. En général des combinaisons entre la tension, l'intensité et la vitesse de soudage permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

L'utilisation courante du procédé de soudage TIG dans l'industrie aéronautique, notamment en chaudronnerie, nécessite des plages de paramètres afin de garder une certaine flexibilité d'application suivant le large éventail des formes, des épaisseurs et de la nature des matériaux à assembler.

De ce fait, l'expérience des soudeurs de la société EXAMECA et quelques essais préliminaires ont été suffisants pour obtenir des cordons de soudure TIG présentant une conformité à la fois dimensionnelle, métallurgique et mécanique. La réalisation des éprouvettes de soudage TIG s'est faite par procédé de soudage automatique, permettant la reproductibilité et la régularité des assemblages avec des paramètres fixés, afin d'établir une campagne de caractérisation post soudage homogène. Cependant, le soudage TIG manuel effectué pour l'assemblage de pièces de la maquette HORTIA a également été précédé d'essais sur éprouvettes et suivi de contrôles visuels, par ressuage et radiographie [22]

Chapitre 03

Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-1. Introduction :

De nos jours, la simulation numérique est très utilisée afin de déterminer les niveaux de contraintes et déformations résiduelles générés par le procédé de soudage. En effet, la réalisation de structures mécano-soudées complexes n'exige la prise en compte fine des contraintes et déformations résiduelles dès l'étape de conception.

Dans ce chapitre, une étude sur l'effet de variation de courant d'entrée sur la qualité de soudure par la simulation numérique avec logiciel Abaqus.

Dans cette étude, nous avons limité l'expérience sur l'inox S304 avec une soudure d'angle. Utilisant différentes épaisseurs des tôles pour déterminer les paramètres de soudage.

Le but de ce chapitre consiste à présenter et interpréter les résultats de simulation des caractéristiques électriques tension/courant pour créer une application numérique.

III-2. La Simulation numérique :

Les avantages d'utiliser la simulation numérique :

- Elle est presque toujours plus rapide et beaucoup moins coûteuse que l'expérimentation.
- Elle fournit des informations qu'il est difficile ou impossible de mesurer.
- Facile à interpréter et à afficher les résultats.

En effet, la simulation basée sur la méthode des éléments finis est la mieux adaptée au problème posé. Les logiciels basés sur cette méthode numérique couvrent généralement un domaine plus vaste que le problème étudié et dans certains cas ils ne répondent pas aux exigences spécifiques du problème. La résolution du problème (définition des conditions initiales et conditions aux limites, et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme des courbes)).

III-3. Les méthodes numériques connues :

Les grandes familles de méthodes numériques de résolution d'équations aux dérivées partielles sont au nombre de quatre :

- La méthode des différences finies (**MDF**).
- La méthode des volumes finis (**MVF**).
- La méthode des éléments finis (**MEF**).
- La méthode des caractéristiques (**MC**).

III-3.1. La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis a été initialement développée pour l'analyse des structures mécaniques et, plus généralement pour traiter les problèmes de milieux continus déformables.

Elle repose sur un formalisme qui la rend très flexible et elle a rapidement été appliquée à d'autres domaines tels que la mécanique des fluides, la thermique, l'électromagnétisme...

La méthode des éléments finis repose sur une formulation vibrationnelle (ou formulation faible) du problème. On a utilisé cette méthode dans notre travail.

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-4. Modèle analytique :

Le procédé de rechargement TIG consiste à chauffer localement la pièce à réparer jusqu'à fusion du métal.

Le flux de chaleur généré au cours du soudage TIG est le résultat d'interactions complexes entre le plasma de l'arc et la matière. Lors d'une opération de soudage, la puissance globale apportée par l'arc à la pièce peut être exprimée par (eq.1) :

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

Où U représente la tension (V),

I : l'intensité (A) et

μ : le rendement.

La répartition d'énergie entre l'avant et l'arrière de la torche est représentée par les variables f_f et f_r , (proportionnelles aux énergies distribuées à l'avant et à l'arrière de la torche) avec les conditions permettant d'assurer la continuité entre les flux à l'avant et à l'arrière de la source :

Généralement, les valeurs pour f_f et f_r respectivement prises égales à 0,6 et 1,4 [25]

$$f_f + f_r = 2 \quad (2)$$

La distribution volumique d'énergie à l'avant et à l'arrière de la torche est donnée respectivement par les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \\ q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[x+v(\tau-t)]^2/c^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

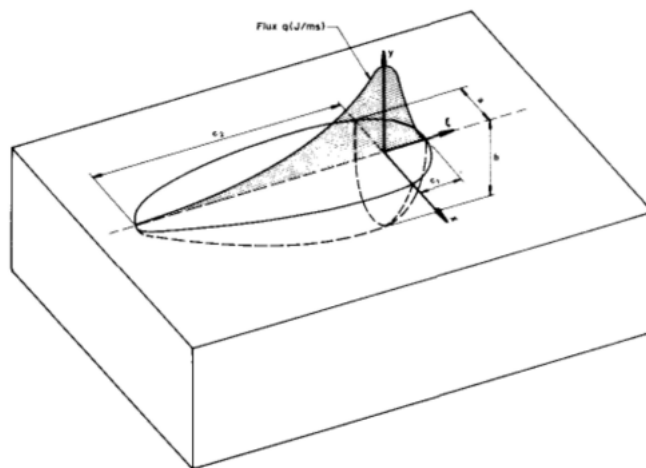


Figure 3- 1: doubles ellipsoïdes de goldak [26]

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-5. Propriétés géométriques et physiques des matériaux :

Le modèle est composé de deux plaques de même métal (inox) assemblée angulaire (L) par procédé TIG. Pour la simulation numérique nous avons les caractéristique géométrique figure 3-2, et les valeur d'épaisseur utilisiez. Temps de soudage = 25s et les propriété physique (tableau 3-3) de plusieurs cas tableau 3-1

Tableau 3-1 : Les cas étudiés à fonction de courant

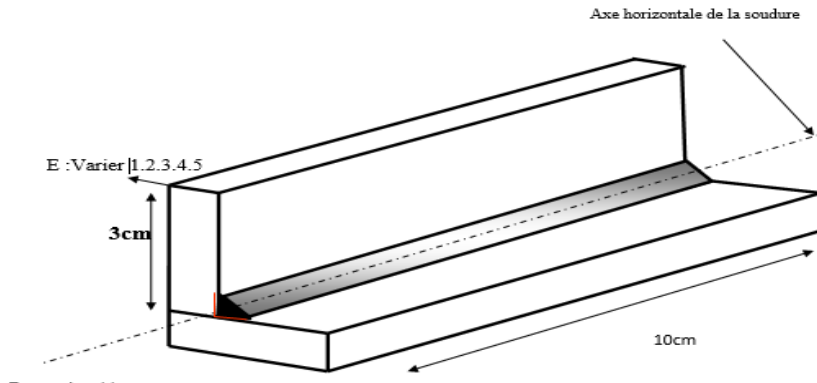


Tableau 3- 1: paramètre géométrique

Cas	1	2	3	4	5
e₁	1	2	3	4	5
e₂	1	2	3	4	5
I(A)	30-50	60-100	100-120	140-170	170-190

Tableau 3- 2: propriété thermo physique

Chaleur latente J/kg	Température de solidus °C	Température de liquidus °C
270000	1400	1454

Tableau 3- 3: propriété physique de S304

T °C	Coefficient de dilatation (°C ⁻¹)	Module De Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Densité (g/mm ³)	Conductivité (J/mm°C s)	Limite d'élasticité (MPa)	Chaleur spécifique (J/g°C)
0	1.7E-05	1,99E+11	0.294	7900	14.6	265000000	462
100	1.74E-05	1,93E+11	0.295	7880	15.1	218000000	496
200	1.8E-05	1,85E+11	0.301	7830	16.1	186000000	512
300	1.86E-05	1,76E+11	0.31	7790	17.9	170000000	525
400	1.91E-05	1,67E+11	0.318	7750	18	155000000	540
600	1.96E-05	1,59E+11	0.326	7660	20.8	149000000	577
800	2.02E-05	1,51E+11	0.333	7560	23.9	91000000	604
1200	2.07E-05	6E+10	0.339	7370	32.2	25000000	676

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

1300	2.11E-05	2E+10	0.342	7320	33.7	21000000	692
1500	2.16E-05	1E+10	0.338	7300	120	10000000	700

III-5.1. Condition au limite et initiale :

Les conditionne aux limites pour la simulation numérique de model utilisé on fixe les deux plaques soudées avec une force de serrage voir (figure 3-3).
Température ambient 22C ° pour les conditions initiales

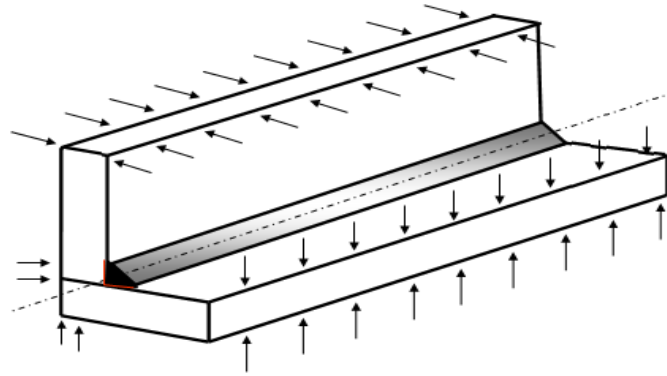


Figure 3-2: les force de serrage

III-6. Les éléments dans Abaqus :

Un très large choix d'éléments (plus de 100)

Chaque élément est caractérisé par : famille, nombre de nœuds, intégration. Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard). [28]

Nous avons utilisé l'élément C3D8T un élément solide couplé déplacement-température à 8 nœuds qui est capable de coupler à la fois la charge thermique et le déplacement et mécanique (Figure 3-3).

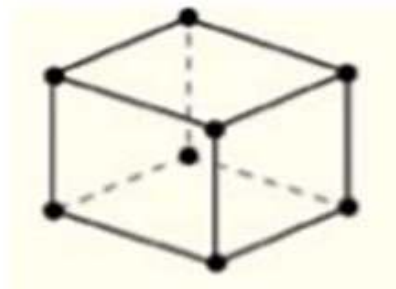


Figure 3-3: linéaire élément C3D8T 8-neode brique

III-6.1. Le maillage :

Les calculs numériques effectués par la méthode des éléments finis s'appuient sur un maillage associé à la géométrie du domaine dans lequel on désire effectuer la simulation. Leur précision dépend de la taille des éléments (le pas de discrétisation). Plus ces derniers sont petits plus les calculs sont précis et plus la simulation est lente. En pratique, il n'est pas possible de raffiner uniformément la taille des éléments autant que nécessaire, pour des raisons évidentes de temps et de coûts de calculs. Toutefois, il est possible de raffiner le maillage dans les zones critiques de la plaque simulée. Dans notre étude, les zones les plus sensibles et qui demandent par

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

conséquent un raffinement sont la zone de contact métal de base/métal d'apport et les interfaces entre les passes dans le cas du soudage. Le choix de la taille du maillage se fait par une simulation de convergence jusqu'à l'obtention de la meilleure taille compte tenu des conditions précision/temps. Donc la taille de maille est 0.5mm dans la structure en générale, 0.2mm dans la direction de « x » et 0.1mm dans la zone de soudure (Figure 3-5).

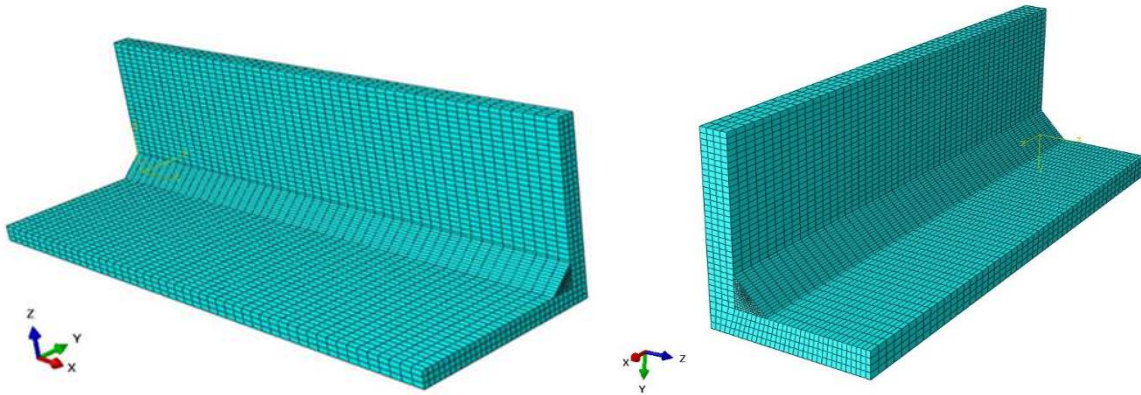


Figure 3- 4: Modèle de maillage utilisé pour l'analyse

III-7. Préparation de simulation numérique :

Les expériences consistaient en la modélisation numérique de plusieurs cas. Par logiciel ABAQUS pour déterminer les paramètres de soudage des tôles minces cas soudage en angle « L ».

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

En fait la simulation numérique 40 fois avec un PC calculateur 24 cœurs chaque, simulation prendre 20H. donc environ 100 heures de simulation.

III-8. Résultats et interprétations :

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

III-8.1. Le critère de pénétration :

Dans cette étude, le facteur déterminant pour choisir le courant optimal est la taille de pénétration de la soudure, en d'autres termes, si la zone de pénétration est petite, cela signifie que nous avons un joint faible et s'il est grand et couvre toute l'épaisseur, cela signifie que nous avons un sur-pénétration. Ainsi afin de choisir le meilleur courant pour l'épaisseur correspondante on recherche la zone de pénétration en gris où le métal est complètement liquide température $>1500^{\circ}\text{C}$.

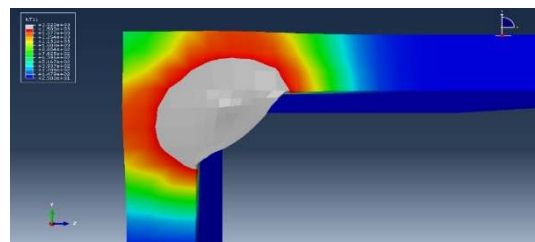


Figure 3- 5: la zone fondu en gris.

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-8.2. L'effet d'épaisseur sur le courant de soudage :

Figure 3-7 illustre la relation entre intensité optimale et l'épaisseur de plaque à soudé par TIG dans le cas d'un métal inox et la position soudage d'angle « fw ». Cette relation se forme une relation d'une équation linéaire se forme $y=a*x+b$; ou le pente(a) = 33.45 et « b=15.71 ». Comme indiqué dans le courbe, les points sont en bonne corrélation.

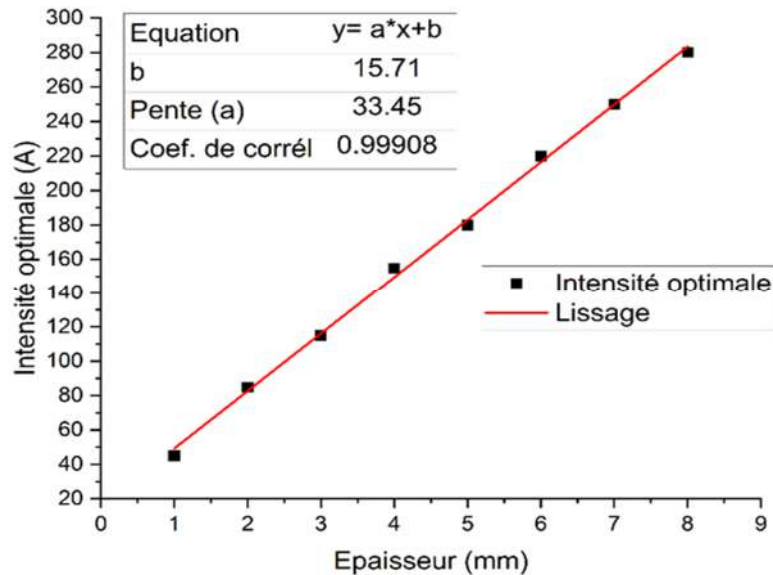


Figure 3- 7 : L'intensité optimale en fonction d'épaisseur

III-8.3. L'effet d'épaisseur sur le courant départ :

Sur ce graphique on peut remarquer facilement en chaque fois qu'augmenté l'épaisseur on a augmenté le courant départ par cinq fois l'épaisseur.

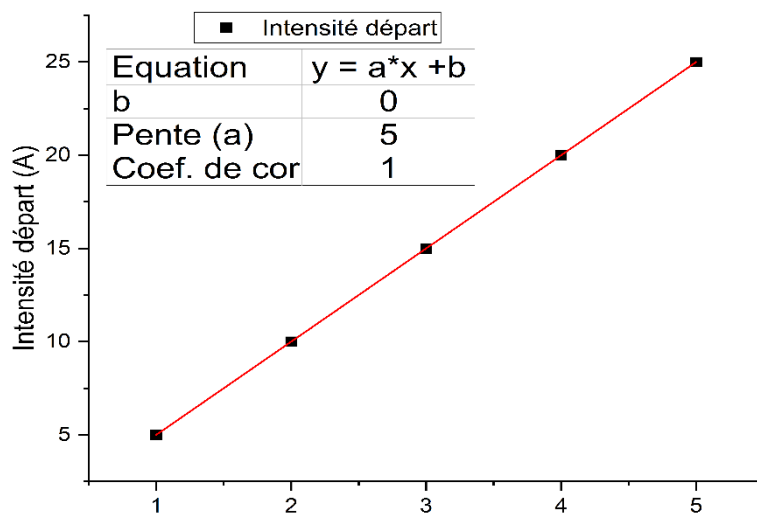


Figure 3- 8 : L'intensité de départ.

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-8.4. L'effet d'épaisseur sur le temps de montée :

Sur cette figure (3-9), nous montrons la relation entre l'épaisseur et le temps de démarrage de deux cas, l'un pour le métal de construction et le second pour l'acier inoxydable. Dans le premier cas nous remarquons une relation linéaire entre l'épaisseur et le temps de démarrage car pour l'inox nous avons trouvé une relation polynomiale et un temps de démarrage faible est nécessaire et cela se justifie car la nature de l'inox qui nécessitait un minimum d'exposition à la chaleur car le chrome ne résiste pas aux températures élevées.

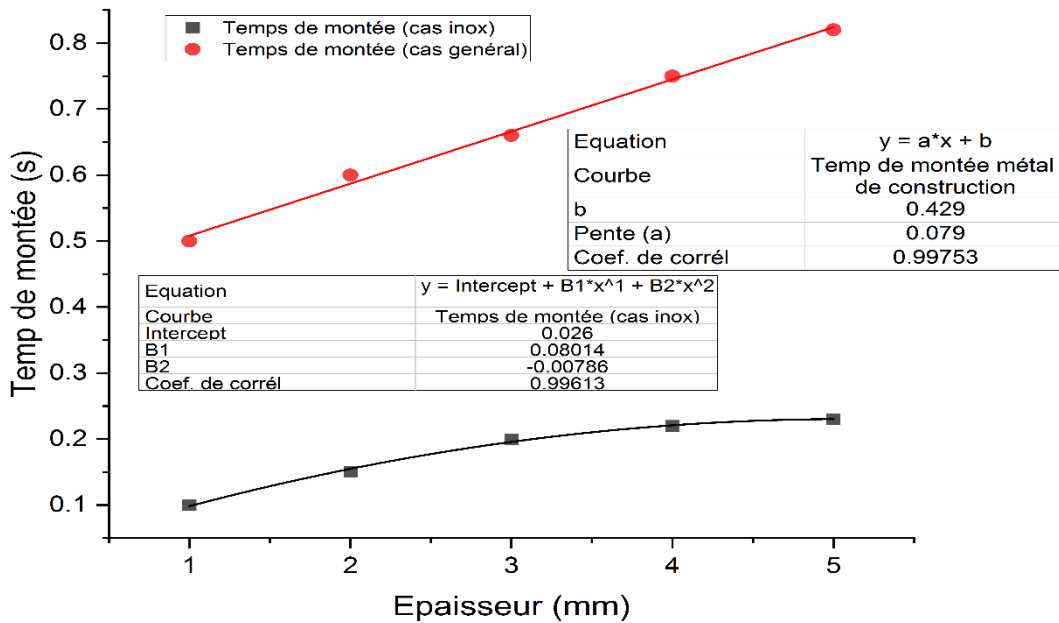


Figure 3- 9 : temps de montée de deux cas (inox et métal de construction)

III-8.5. Pénétration de la soudure en fonction de la longueur de la plaque soudée

La courbe dans le Figure (3-10) présente le pourcentage de pénétration de soudure sur la longueur de la plaque, remarque le pourcentage de pénétration augmenté à l'extrémité parce que nous réglé pas le courant et la durée d'ampérage de départ.

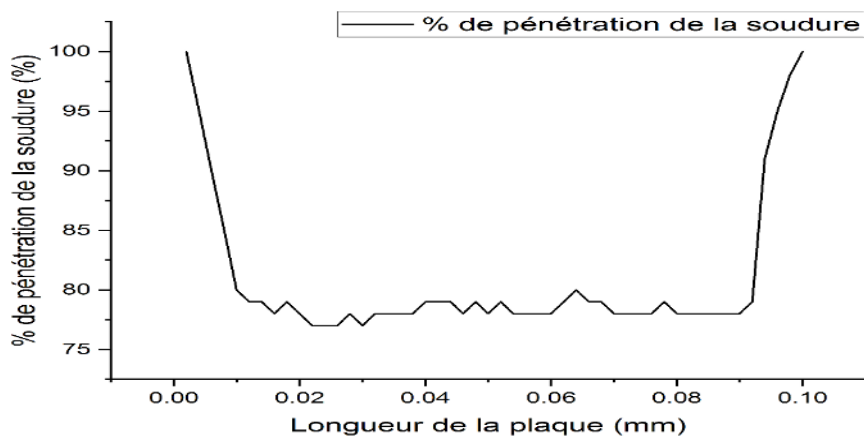


Figure 3-10 : pénétration de la soudure a fonction de longueur de plaque soudée

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

Ce résultat représente l'importance de commencer avec un courant faible pour donner au métal une chance de refroidir et d'éviter la déformation par choc thermique et pour donner plus de temps au soudeur pour ajuster la baguette et commencer à souder. Quant à la finition, il est important de diminuer la température lentement pour bien finir le cordon sans causer les fissures ou une surfusion.

III-8.6. Les contraintes résiduelles de soudage

La Figure (3-11) représente la contrainte résiduelle en travail continu. Ou la valeur la plus élevée est 1,6 MPa après 100s de temps de refroidissement, La courbe discountisée représente les contraintes résiduelles de soudage par impulsion (Pulse welding) la valeur maximale de contrainte est 1 MPa nous remarquons que la contrainte résiduelle de travail par impulsion est moins que le cas de travail continu parce que la fonction d'impulsion diminue la surchauffage de la plaque ainsi les contraintes sont moindres, car il n'y a pas de changement de température significatif.

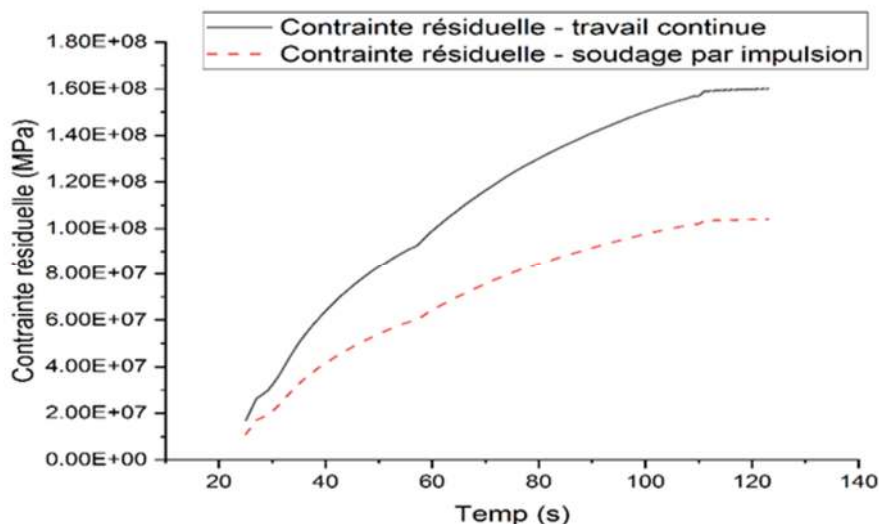


Figure 3-11 : les contraintes résiduelles

III-8.7. Validation des résultats :

Pour valider notre résultat, nous avons fait un essai expérimental qui nous permet de faire une comparaison pour confirmer les résultats de simulation.

Un essai de soudure a été réalisé dans la société ALZINC, Le réglage de poste de soudage s'est fait selon les mêmes paramètres constatés de l'Abaqus. Nous avons remarqué :

- Nous obtenons une bonne pénétration et bons résultats de joints soudés (voir Figure 3-12).

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

- Il y'a un surchauffage (changement de couleur) dans la pièce soudée à cause de manque de fonction pulsation dans le poste de soudage utilisé, par contre dans la simulation nous avons constaté changement thermique minimal.



Figure 3-12 : cordon de soudure de deux plaques d'inox soudée par TIG

III-9. Création d'une application pour régler les paramètres de soudage par TIG :

Notre but est création d'une application qu'insérée les inputs devant l'application :

- La nature de matière (acier inoxydable, acier galvanisé ...)
- Les épaisseurs des plaques
- Mode de soudage (angle, plat ...)

Après l'insertion, L'application nous a donné les sortie (le réglage de l'intensité)

Cette application spécifique uniquement pour la poste a soudure TIG model MATRIXE 3000 AD/CD, (voire la figure 3-13),



Figure 3- 13 : poste soudure MATRIX 3000 AC/DC

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-9.1. Description de poste soudure MATRIX 3000 :

Exilente caractéristique technique de ce poste de soudage couplé avec la caractéristique de contrôle digital, offrent un soudage TIG de haut qualité permanent de satisfaire toutes les applications industrielles et maintenance.

III-9.2. Caractéristiques Générale :

- Equipement standard comprend le mode pulsé avec la fonction « EASY-PULSE » disponible
- Amorçage avec haute fréquence, toujours précis et efficace même avec de longue distance
- Fonction « Energy Saving » qui active la ventilation du générateur et le refroidissement de la torche seulement quand nécessaire
- Avec l'utilisation de torches TIG Up/Down il est possible de régler directement sur la torche les paramètres de soudage et les configurations mémorisés.
- Panneau de contrôle protégé contre les impacts accidentels
- Face avant inclinée permettant une visibilité accrue pour le réglage et la lecture des paramètres dans toutes les directions
- Sélecteur de procédé : TIG AC • TIG DC • TIG DC « Lift » • MMA
- Sélecteur de mode de soudage : 2/4 Temps • Cycle • Soudage par Points
- Soudage TIG Pulse réglable de 0,5 à 2000Hz avec possibilité d'utiliser la fonction « EASY-PULSE »
- Préréglage du diamètre de l'électrode utilisée pour un meilleur contrôle de l'arc d'amorçage ainsi que des caractéristiques dynamiques

Tableau 3- 4 : paramétré techniques

DONNEES TECHNIQUES		3000 AC/DC
Alimentation triphasée 50/60 Hz	V	400 +20% -20%
Puissance d'installation @ I2 Max	kVA	9,6
Fusible (fusion lente) (Ieff)	A	10
Facteur de puissance / cos φ		0,95/0,99
Rendement		0,76
Tension secondaire à vide	V	100
Gamme d'intensité	A	5 - 300
Facteur de marche à (40°C)	A 100%	210
	A 60%	250
	A 35%	300
Normes		EN 609
Degré de protection	IP	23 S
Classe d'isolation		F
Dimensions	↗ mm	495
	→ mm	185
	↑ mm	390
Poids	kg	19

Voltages différents disponibles à la demande

III-9.5. “EASY PULSE” – SYN :

La fonction « EASY-PULSE » -SYN insère, en mode simple et efficace, une fréquence de pulsation adéquate et un courant de base variable en mode synergique, en fonction du pic de courant sélectionné. La valeur des paramètres de pulsation préréglé dans le contrôle offre une réduction des temps de réglages et la garantie d'utiliser la meilleure combinaison des paramètres de soudage pulsé même par des utilisateurs peu expérimentés

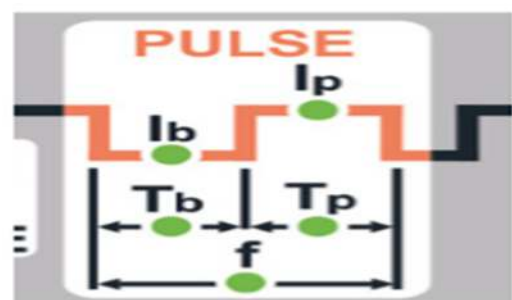


Figure 3- 14 : fonction de pulsation

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-9.6. LE CYCLE DE SOUDAGE EN COURANT CONTINU PULSE :

Le courant continu pulsé est principalement utilisé en soudage automatique. (Figure 3-15) Il permet une maîtrise du bain de fusion en soudage en position selon les différents secteurs du tube et évite les effondrements du bain de fusion. Il est utilisé quelque fois en TIG manuel pour les très fines épaisseurs sur tube circulaire à l'angulaire au plat en soudage.

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

- SYN PULSE
- FAST PULSE
- ULTRA FAST PULSE
- SLOW PULSE

III-9.7. L'APPLICATION NUMERIQUE :

Nous avons utilisé le logiciel Delphi XE11 pour développer notre application car il offre une possibilité d'exportation multiplateforme (Windows, Android, IOS et Linux).

III-9.7.1. Les interface de l'application :

Cette application est spécifiquement pour le générateur TIG MATRIX 3000 (figure 3-16) le rôle principal de cette application est de choisir la bonne configuration de la poste à souder en trois catégories : 1- le réglage de l'interface principale, 2- aide au choix de l'électrode et 3- calculer automatiquement le débit et le diamètre de la buse nécessaire.

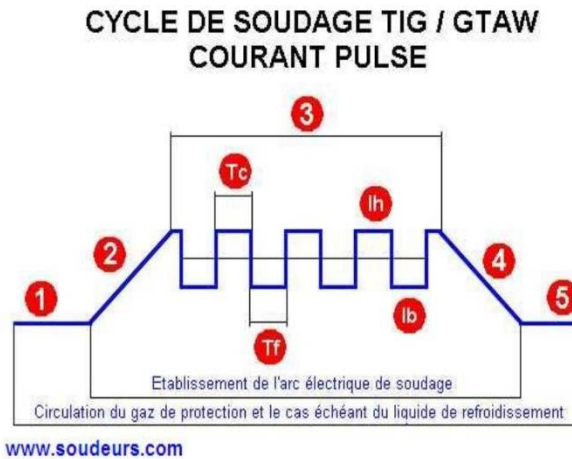


Figure 3-15 : cycle de soudage TIG courant pulse



Figure 3-16: l'interface de l'application

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-9.7.2. L'Interface des entres (inputs) :

Cette application se caractérise par une interface claire et facile à utiliser, à travers laquelle vous pouvez choisir les techniques de soudage à souder, et entrer le type de matériau utilisé et la position de soudage.

L'application supporte deux position bord-a-bord aux soudures d'angle. Voir la (figure 3-17)

Il supporte deux cas de configuration géométrique, soit de même épaisseur soit d'épaisseur différente.

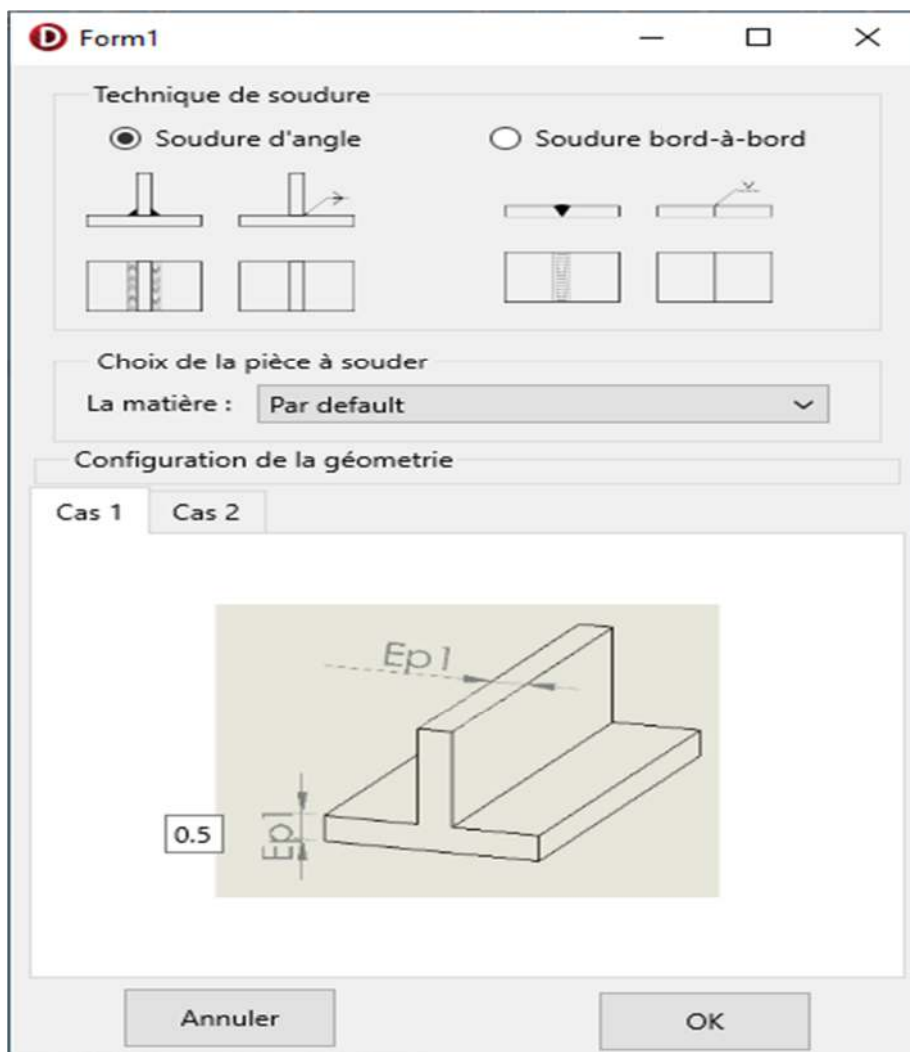


Figure 3-17 : interface des entres

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-9.7.3. L'exemple de simulation :

Après la simulation et la création de l'application en a faite des exemples d'application qu'insérer les inputs (figure 3-18) le mode d'angle, métal inox S304, épaisseur 2 mm,

Donc le programme d'application nous a donné les sorites de générateur MATRIX 3000 pour un excellent joint soudure comme la montre dans la (figure 3-18).

a) Réglage de poste :

DC - 4T - PULSE SLOW - I=82,61(A) – U=15(V)

Temps de montée/ évanouissement =0,15484

Intensité départ/ final = 10

Ib = 41,305 Ip =82,61 Tb= 0,5 Tp=0,5

Temps de pré Gaz =0,5s temps de post Gaz =3s

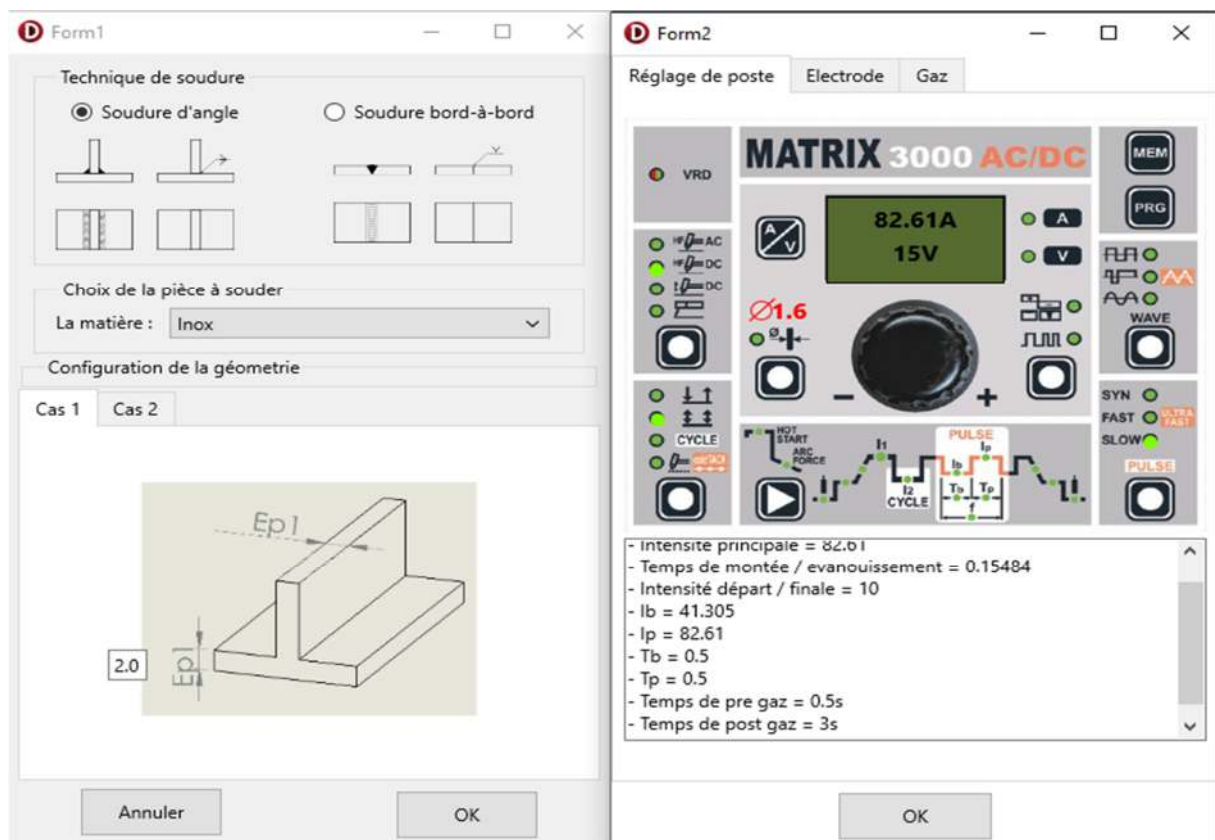


Figure 3- 18 : (réglage de poste) les inputs de comparaison entre l'application et la simulation

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

b) Électrode utilisée :

L'application sélectionne automatiquement les électrodes qu'il est possible d'utiliser et désélectionne les électrodes dont l'utilisation n'est pas recommandée (Figure 3-19). Chaque électrode est caractérisée et toutes les informations s'y rapportant sont données. Il est à noter que certaines de ces électrodes peuvent être utilisées mais ne sont pas recommandées en raison du faible risque de rayonnement lors du meulage de l'électrode.

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

Aucun affûtage requis pour l'electrode vert.

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

OK

Figure 3-19: le choix d'électrode

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

c) Réglage de Gaz :

Ces-la dernier fonction que l'application nous a donnée aussi le diamètre approprié de buse et Débit de Gaz 8,3044 litre/mm (Figure 3-20).



Figure 3-20 : qualité de buse utilisé

Chapitre 03 : Étude et analyse des effets de la variation du cycle de courant de soudage

III-10. Conclusion de chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons étudié divers paramètres qui influent sur le choix de la bonne configuration optimale en soudage avec TIG, nous avons établi un modèle numérique avec le logiciel Abaqus capable d'étudier la chaleur électrothermique générée par l'arc d'électrode et nous avons interprété les résultats et trouvé la relation entre l'épaisseur et le courant de soudage optimal, le courant de démarrage et le bon temps aux points de départ et final. Et enfin une application a été créée pour faciliter l'utilisation des résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié des simulations de procédé de soudage TIG pour les plaques inoxydables (inox « S304 ») en utilisant le programme de simulation ABAQUS.

Nous avons appris à connaître les aciers inoxydables et ses caractéristiques et sa soudabilité. Pour donner aux soudures les propriétés attendues, les paramètres de soudage sont optimisés en réalisant des cas tests de soudage. Ceci permet de valider les paramètres de soudage et de minimiser les contraintes résiduelles introduites par les opérations de soudage.

On sait ce que constitue cet alliage, la propriété de chacun de ses composants et les propriétés qui le distinguent. Cet alliage se caractérise par une bonne ductilité, une meilleure résistance mécanique, une excellente résistance à la corrosion, à l'oxydation.

Il est utilisé dans les industries chimiques et pétrochimiques et dans la construction des turboréacteurs aéronautiques et des turbines à gaz ... Où nous avons également étudié le soudage TIG et ce qui le distingue des autres types de soudage,

Où nous avons également étudié le soudage TIG et ce qui le distingue des autres types de soudage, ses préparations et les facteurs qui l'affectent, les types de joints soudés que nous pouvons créer,

Nous nous sommes familiarisés avec le programme de simulation ABAQUS et en quoi il consiste. Divers fichiers de simulation sous Abaqus et l'organisation de son interface. Et nous avons appris la répartition de la chaleur, les contraintes en utilisant le programme de simulation ABAQUS.

Et nous avons fait des simulations de joint entre deux plaques de inox S304 soudées en angle avec procédé TIG pour les épaisseurs minces de (0.5mm à 6mm) pour observer les valeurs appropriées d'intensité de courant.

A la fin nous avons créé une application numérique à partir des courbes extraites de l'ABAQUS.

Référence bibliographique :

- [1] Pierre-Jean, CUNAT ; M 4 540-aciers inoxydables. Critères de choix et structure ; centre français d'exploitation. P 50 -51
- [2] Christian, Bonnet ; Le Soudage Métallurgie et Produits ; Air Liquide /CTAS 2001 ; Chapitre 3 page 41-44-46-47.
- [4] N. Perry, « Étude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables ». Thèse doctorat, Université de Nantes, (2000).
- [3] Azem, Saïd ; caractérisation de l'acier inoxydable x5crni18-10 et étude de son oxydation à température ; année 2013 université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou faculté du génie de la construction département de génie mécanique ; mémoire de magister ; Tizi-Ouzou
page 14, 15 ,16
- [4] Oulbani Saïd ; A. Ait Saada ; K. Rehouma ; influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécanique d'un joint soude en acier inoxydable austénitique 316l ;2008 universités Mohamed bourras Boumerdes faculté des sciences de l'ingénieur département maintenance industrielle ; mémoire de magister ; Boumerdes ; page 5-6.
- [5] Amy, Zahia ; Azem, Saïd ; caractérisation de l'acier inoxydable x5crni18-10 et étude de son oxydation à température ; année 2013 université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou faculté du génie de la construction département de génie mécanique ; mémoire de magister ; Tizi-Ouzou
page 20 ,21, 25
- [6] JF Kennedy – ALPHAND, illustré par Mac'Avoy – Club du livre 1967
- [7] SARKIS Elias ; Machine de soudage à la molette pour les gaines circulaires ;2012 ; Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ; Projet de fin d'étude ; p28,29.
- [8] SARKIS Elias ; Machine de soudage à la molette pour les gaines circulaires ;2012 ; Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ; Projet de fin d'étude ; p40,41.
- [9] Guy MURRY, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, Techniques de l'Ingénieur, centre français d'exploitation ; article ; page 5- 6.
- [10] S.A. David, J. A Siefert J.N. Dupont &J.P. Shingledecker, "Weld ability and weld performance of candidate nickel base super alloys for advanced ultra-supercritical fossil power plants part I: fundamentals", Science and Technology of welding, and VOL20NO7, P:532-552, 2015.
- [11] Régis BLONDEAU. Métallurgie et mécanique du soudage. Mémoire fin d'étude awani ; Amin Edition LAVOISIER, PARIS. p23.
- [12] CSMOFMI. Soudage et assemblage Guide d'auto – apprentissage. P.8, Le commuté sectorielle de la main – d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle.
- [13] Principaux procédés du soudage, 2017.description, démarche d'évaluation et prévention des risques .<https://www.slideshare.net/>.
- [14] Roland CAZES ; Soudage à l'arc ; Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique ; article ; pages 7-14-16-17.

Référence bibliographique

[15] B. Taylor, A. Guesnier, « Métallographie des soudures », www.struers.com/-/media/Library/Brochures/.../Metallographiedes-soudures.pdf

[16] K. Mariche, « Comportement structural et mécanique de soudures d'acier inoxydable austénitique du type 316 L vieillies ». Thèse doctorat, spécialité : métallurgie, ENP El Harrach, 2013.

[17] S. Kou, "Welding metallurgy -2nd ed". Copyright © by John Wiley & Sons, Inc, 2003

[18] B. Taylor, A. Guesnier,« Métallographie des soudures », www.struers.com/-/media/Library/Brochures/.../Metallographiedes-soudures.pdf

[19] MEFTEH KAMEL. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.

[20] MEFTEH KAMEL. Présentation Abaqus. Formation des masters ; université de Biskra .2014.

[21] Goldak J. and Chakravarty A., A new finite element model for welding heat sources. Métallurgique transactions, 15B :299– 305, 1984.

[22] ABAQUS. Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit, élève ingénieur ; université de Nantes. 2007.