

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux

Par :

MENDI Omar

Sujet

Étude de l'influence des paramètres de soudage par point sur les caractéristiques mécaniques des structures soudées

Soutenu le 22 septembre 2019 devant le jury composé de :

Président :	CHEIKH Abdelmadjid	Professeur	Université de Tlemcen
Encadreur :	GUEZZEN Samir	MCB	Université de Tlemcen
Co-encadreur :	HADJOUI Abdelhamid	Professeur	Université de Tlemcen
Examineur :	BENSAID Ismail	MCB	Université de Tlemcen
Examineur :	ACHOUI Mohammed	MAA	Université de Tlemcen

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

*Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise **SOREMAP** et le laboratoire (**RDM**) à l'université de Tlemcen.*

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir donnée le courage, la foi et la sagesse d'accomplir ce modeste travail.

*Mes sincères remerciements vont à Mr. **GUEZZEN Samir** et Mr.**HADJOUI Abdelhamid** pour avoir encadré ce travail et de m'avoir apporté leur connaissances, ils étaient toujours avec moi quand j'en ai besoin d'eux. Ils ont de très bonnes qualités humaines qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire, à qui j'exprime toute ma gratitude, mes plus profondes reconnaissances et mes sincères remerciements pour leurs précieux conseils et leur soutien.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury le Président Mr. **CHEIKH Abdelmadjid** qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance ainsi qu'au Mr. **BENSAID Ismail** et Mr. **ACHOUI Mohammed** d'avoir accepté d'examiner mon travail, Je tiens à remercier tous mes professeurs pour leurs connaissances qu'ils ont données pendant ma formation.*

*Je remercie le directeur de l'entreprise **SOREMAP** de m'avoir accepté pour faire mon travail au sein de l'entreprise ainsi que Mr. **LARBI CHERIF Mohammed** ingénieur au Sein de l'entreprise **SOREMAP** pour ses précieux conseils.*

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

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

*Mes très chères parents pour leur soutien et leur aide durant toute
ma période 'étude, dont*

Je leurs doit toute ma reconnaissances et mon respect

Toute la famille MENDI

A ma chère sœur SARA.

A mon cher ami ZIANI.

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de près ,Nabil ,

Ahmed, Nasradine, Abdelatif, Housine, Zohir, Djamel wahadj ,

Momammed, Abdelhak, Sid Ali, Djamel , Moussa, Walid , Hanan,

Abdeladim, Youcef, Moussa , Salah adin, Ismail hadouch, wissam .

Tous mes enseignants

A toute la promotion ASM 2019

MENDI Omar

Résumé

Le soudage par résistance par point est un procédé sans métal d'apport qui utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble, pièces électrodes, est traversé par un courant de soudage qui, sous une faible tension, provoque une forte élévation de la température par effet de joule. Ce procédé présente une large utilisation dans le domaine industriel et spécialement pour les tôles minces. L'assemblage de deux tôles minces par soudage par points requiert une connaissance du matériau à assembler et la sélection optimale des paramètres de soudage. Cela n'est évident que sur des études établies

L'objectif de ce travail est de déterminer l'influence des paramètres du soudage par point sur les caractéristiques mécaniques des structures et quelles sont les meilleurs paramètres pour obtenir une soudure de qualité.

Mots clés : soudage ; métallurgie ; soudage par point ; caractérisation ; essai de traction.

Abstract

Spot resistance welding is a process without a filler metal that uses the combined effects of mechanical pressure and electrical current passing through the parts. The parts to be welded are superimposed and are clamped locally between two copper alloy electrodes. The assembly, electrode parts, is crossed by a welding current, which, under a low voltage, causes a strong rise in temperature by Joule effect. This method has a wide use in the industrial field and especially for thin sheets. The assembly of two thin sheets by spot welding requires knowledge of the material to be assembled and the optimal selection of the welding parameters. This is evident only in established studies

The aim of this work is to determine the influence of the spot welding parameters on the mechanical characteristics of the structures and which the best parameters to obtain a quality weld are.

Keywords: welding; metallurgy; spot welding; characterization; stress test

ملخص

التلحيم بالمقاومة بالنقط طريقة لا يستخدم فيها معدن التلحيم وإنما تعتمد على التقاء الضغط الميكانيكي مع مرور التيار الكهربائي بالقطعة المراد تلحيمها. فالقطع المصنوفة الواحدة فوق الأخرى تضغط موضعيا بين قطبين كهربائيين مصنوعين من النحاس يمر عبر مجموع القطعتين والقطبين، تيار التلحيم الذي وتحت توتر ضعيف يولد ارتفاعا قويا في درجة الحرارة وذلك بفعل جول. الجمع بين صفيحتين رقيقتين بطريقة التلحيم بالنقط يتطلب معرفة دقيقة بالمواد المراد جمعها والاختيار الصائب للعوامل المؤثرة في التلحيم. هذا الأمر لا يمكن بلوغها إلا من خلال القيام بدراسة ميدانية. الهدف من هذا العمل هو تحديد تأثير خصائص اللحام بالنقط على الخصائص الميكانيكية للهياكل وبالتالي تحديد أفضل الخصائص للحصول على لحام عالي الجودة.

كلمات البحث: لحام ; المعادن; لحام البقعة ; تشخيص ; اختبار الإجهاد

Liste des figures

Chapitre I : Procédés et matériels de Soudage

Figure I.1 : Classification des procédés de soudage.....	2
Figure I.2 : Installation de soudage au gaz.....	3
Figure I.3 : La flamme de soudage oxyacéthylique.....	5
Figure I.4 : Représente la classification des procédés de soudage à l'arc.....	5
Figure I.5 : Fiche pratique de sécurité, Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées	7
Figure I.6 Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobée.....	8
Figure I.7 : Principe procédé de soudage TIG.....	12
Figure I.8 : Procédés de soudage MIG/MAG.....	14
Figure I.9 : Principe de procédé de Soudage à l'arc Submergé.....	17
Figure I.10 : Installation de SAFE.....	18
Figure I.11 Schéma de soudage par fuseau électrons	19
Figure I.12 : Soudure par faisceau électron.....	20
Figure I.13 : Principe de procédé de Soudage laser.....	24
Figure I.14 : Présentation modes soudeuse laser.....	25
Figure I.15 : Configuration de joints soudés laser.....	27
Figure I.16 Principe de procédé de soudage par point	28

Figure I.17 Principe du soudage par friction	29
Figure I.18 : La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F2 est exercée....	30
Figure I.19 Arbres de transmission soudés par friction.....	30
Figure I.20 Engrenage soudé par friction.....	31
Figure I.21 Assemblage aluminium-acier	31

Chapitre II : Procède de soudage par points

Figure II.1 : Procédés de soudage par résistance.....	33
Figure II.2 Soudeuse par points disponible au CEWAC.....	34
Figure II.3 : a) Soudage d'une tresse en cuivre sur un support en acier inoxydable	
b) Raccord entre un fil en laiton et un support en cuivre.....	34
Figure II.4 : Configuration typique pour l'utilisation du soudage par bossage.....	35
Figure II.5 soudeuse à la molette.....	36
Figure II.6 : Boite de starisation assemblée par soudage à la molette... ..	36
Figure II.7 : Représentation schématisé des phases du procédé de soudage par point.....	38
Figure II.8 : Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm.....	41
Figure II.9 : a) Variation qualitative du diamètre du bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à $4t/2$ (t = épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en mm) d'un assemblage de trois tôles.....	43
Figure. II.10 : Différentes zones métallurgiques et la géométrie d'un point soudé en cas d'un assemblage de trois tôles	44
Figure II.11 : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point	45
Figure II.12 : Schéma des interactions entre les états électriques, thermiques, métallurgiques, mécaniques.....	45
Figure II.13 Schéma d'un point soudé selon une coupe.....	46

Figure II.14 Microstructures génères par l’opération de soudage.....	48
-----------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre III : Conception des structures soudées

Figure III.1 : Concentration de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction.....	49
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Figure III.2 : Similarité de distribution des contraintes dans une plaque entaillée (gauche) et un joint soudé bout-à-bout (droit).....	51
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Figure III.3 : Vue schématique de l’évolution de la température avec la contrainte résiduelle Au cours du soudage.....	52
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre IV : Etude expérimentale

Figure IV.1 Dimension des éprouvettes soudées	59
------------------------------------------------------------	----

Figure IV.2 : Poinçonneuse (AMADA).....	60
------------------------------------------------	----

Figure IV.3 : (A) Tôle avant découpage (B) Après le découpage.....	60
---------------------------------------------------------------------------	----

Figure IV.4 : Machine de soudage	61
-----------------------------------------------	----

Figure IV.5 Opération de soudage.....	64
----------------------------------------------	----

Figure IV.6 : Opération de traction.....	64
-------------------------------------------------	----

Figure IV.7 : Machine de traction avec le système d'acquisition de données.....	65
----------------------------------------------------------------------------------------	----

Figure IV.8 : Courbe De Traction Charge / Déplacement.....	66
-------------------------------------------------------------------	----

Figure IV.9 : Courbes Conventiionnelles Contraintes / Déformations.....	66
--------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre V : Résultats et discussion

Figure (V.1) : Les éprouvettes rompues après l’essai de traction.....	67
------------------------------------------------------------------------------	----

Figure (V.2) : Effet des matériaux sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé	68
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Figure V.3 : Variation de la charge maximale on fonction du type du matériau des pièces soudées par point	69
Figure (V.4) Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour différent temps de soudage.....	70
Figure V.5 : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique des pièces soudées	70
Figure V.6 : Variation de la charge maximale on fonction du temps de soudage.....	71
Figure V.7 Influence de temps de soudage sur la formation de point du soudeur avec le matériau de l'acier doux et la charge entre les électrodes $F=6$ Bars et de l'épaisseur des pièces $e=2$ mm, et une intensité du courant $I=14$ KA.....	71
Figure (V.8) Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour différente intensité du courant.....	72
Figure V.9 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles.....	73
FigureV.10 : Variation de la charge maximale on fonction du l'intensité de courant	74
Figure V.11 : Influence de l'intensité du courant sur le diamètre final du noyau pour un matériau acier doux et de la charge entre les électrodes $F=6$ Bars et de l'épaisseur des pièces = 2mm et un temps du soudage $T=18$ cycles.....	74
Figure V.12 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour $I=14$ KA, $T=18$ Cycle, et $F=6$ Bars.....	75
Figure V.13 : Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et $T=18$ cycle.....	76
Figure V.14 : Variation de la charge maximale on fonction du l'épaisseur de pièces	77
Figure V.15 Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour $I=14$ KA, $T=18$ Cycle..	78
Figure V.16 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 18 cycles.....	78

Figure V.17 : Variation de la charge maximale on fonction de la pression entre les électrodes	79
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Liste des tableaux

Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableau IV.1 : Composition Chimique de l'acier doux revêtus Z275.....	57
Tableau IV.2 : Caractérisations mécanique de l'acier doux revêtus Z275.....	57
Tableau IV.3 : Composition Chimique de l'acier	58
Tableau IV.4 : Caractéristique mécanique de l'acier.....	58
Tableau IV.5 : Caractérisations mécanique inox 304L.....	59
Tableau IV.6 : Composition Chimique d'inox 304 L.....	59
Tableau IV.7 Paramètre de soudage avec différent type de matériau.....	62
Tableau IV.8 paramètre de soudage avec différent temps de soudage	62
Tableau IV.9 paramètre de soudage avec différent intensité du courant	62
Tableau IV.10 paramètre de soudage avec différent épaisseur	63
Tableau IV.11 paramètre de soudage avec différent pression appliquée entre les deux électrodes.....	63

Notation utilisée

Q : La chaleur produite

R : résistance électrique rencontrée par le courant

I : intensité du courant,

T : durée du phénomène,

t : épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en (mm)

D_n: Dia du noyau fondu

D_{haz}: Dia de la ZAT

D_{ENT1}:Dia de l'entaille entre tôle 1 et 2

D_{ent2}:Dia de l'entaille entre tôle 2 et 3

e₁:Jeu aux bords entre tôle 1 et 2

e₂:Jeu aux bords entre tôle 2 et 3

H_n : Epaisseur du noyau fondu

H_A : Epaisseur de l'assemblage

I_{INF} : Indentation de l'électrode sur la tôle inférieure

I_{sup} : Indentation de l'électrode sur la tôle supérieure

R₀: Résistivité de l'électrode

R₁: Résistance du contact électrode-tôle-

R₂: Résistivité de la tôle

R3: Résistance du contact tôle-tôle

Ψ : Angle de raccordement ou Angle d'entaille

ρ : Rayon au pied du cordon ou Rayon d'entaille

Re : Limite d'élasticité

Rm : Résistance a la traction (N/mm²)

A% : Allongement

ReH : Limite d'élasticité minimale

I : intensité

Ep : épaisseur

F :force

ν :Le coefficient de poisson

E :Le module de Young

A% :L'allongement a la rupture

σ_m ou f_u :limite ultime

Rm : charge à la rupture (N/mm²)

Fm :charge maximale (KN)

F : pression (bar)

R : Résistance (Ω)

L : Longueur de matériau

E : Epaisseur de l'éprouvette

HRB : Essai de dureté Rockwell a bille

T : Température

S ; Section de matériau

t : Temps de soudage –cycle- (seconde)

W :la l'argeure de la piece

σ_c :est la contrainte critique (MPa),

E :est le module d'Young (MPa),

γ_s :est l'énergie de surface (J.m⁻²),

b :est la distance inter réticulaire (m).

σ_L : contrainte locale

Liste d'abréviation

TIG :Tungstène Inerte Gaz.

MIG : Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusibleMAG

MAG : Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible.

ZAT : La zone dite affectée thermiquement

LBC : Le coupage par faisceau laser

LBW : Le soudage par faisceau laser

YAG : Yttrium aluminium garnet

RSW : Le soudage par point

RSEW : Le soudage à la molette

ZF : Zone fondu

GGZAT : La zone à grande grains de la zone d affectée thermiquement

CFZAT : La zone à grain fins de la zone d affectée thermiquement

ICZAT : La zone intercritique de la de la zone d affectée thermiquement

SCZAT : La zone subcritique de la zone d affectée thermiquement

MB : La zone associé au métal de base

SAW : Submerged Arc Welding

SAFP : Soudage à l'Arc sous Flux en Poudre

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	X
Notation utilisées	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	XVIII
Chapitre I : Procédés et matériels de Soudage	
I.1 Introduction.....	1
I.2 Classification des procédés de soudage.....	1
I.3 Soudage par fusion.....	3
I.3.1 Soudage aux gaz.....	3
I.3.2 Soudage a l'arc électrique.....	6
I.3.2.1 Soudage manuel a l'arc électrique avec électrode enrobée.....	6
I.3.2.2 Soudage à l'arc électrique type TIG (Tungstène inert gaz).....	11

I.3.2.3 Soudage semi-automatique : MIG, MAG.....	13
I.3.2.4 Soudage à l'arc électrique sous flux ou soudage à l'arc électrique submergé.....	16
I.3.3 : Soudage par faisceau haut densité d'énergie.....	19
I.3.3.1 : Soudage par faisceau électrons.....	19
I.3.3.2. Soudage laser.....	22
I.4 Soudage par pression et fusion.....	28
I.4.1 Soudage par point.....	28
I.5 Soudage par pression.....	29
I.5.1 Soudage par friction.....	29
I.6 Conclusion.....	31

Chapitre II : Procède de soudage par point

II.1 Généralités.....	26
II.1.1 Principe.....	26
II.1.2. Les différents procédés de soudage par résistance.....	27
II.2 Soudage par Résistance par Points.....	31
II.2.1 Principe du Procédé.....	31
II.2.2 Paramètres du Procédé.....	33
II.2.3 Domaine de Soudabilité.....	35
II.2.4 Microstructures d'un Point Soudé.....	37
II.2.5 Mécanisme de formation de la soudure.....	38
II.2.6. Interaction Electrique, Thermique, Métallurgique, Mécanique.....	39
II.2.7. Le Point Soudé.....	40

II-3 Conclusion	48
-----------------------	----

CHAPITRE III : Conception des structures soudées

III.1 Introduction	49
III.2 Concentration des contraintes.....	49
III.3 Les contraintes résiduelles de soudage.....	51
III.3.1 Effet de contraintes résiduelles sur la rupture fragile.....	53
III.4 Les ruptures	53
III.4.1 Rupture fragile.....	53
III.4.2 Rupture ductile.....	53
III.4.3 Rupture par fatigue.....	54
III.4.5 Rupture inter granulaire.....	54
III.4.2 Mécanisme de la rupture fragile.....	55
III.5 Conclusion.....	56

CHAPITRE IV : Etude expérimentale

IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Matériaux d'étude : Acier doux galvanisé Z275, aciers doux non alliés, inox 304L.....	57
IV.2.1 Définition acier doux galvanisé Z275.....	57
IV.2.2 Définition d'acier.....	58
IV.2.3 Définition d'acier inoxydable.....	58
IV.3 Etapes de la réalisation des éprouvettes.....	59
IV.3.1 Machines utilisées.....	60
IV.3.1.1 Poinçonneuse (AMADA).....	60
IV.3.1.2 Machine de soudage (TECNA).....	61
IV.3.1.3 Essai de traction.....	64

IV.4 Description de l'essai de traction.....	65
IV.5 Conclusion.....	66

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1 Introduction.....	67
V.2 Effet du type de matériau sur le comportement mécanique des pièces soudées par point.....	69
V.3 Effet du temps de soudage sur le comportement mécanique des pièces soudées par point.....	69
V.4 Effet de l'intensité du courant sur le comportement mécanique des pièces soudées par point.....	71
V.5 Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique des pièces soudées par point	74
V.6 Effet de l'effort sur le comportement mécanique des pièces soudées par point	76
Conclusion générale	81

Introduction générale

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans différentes industries : automobile, mécano soudé, assemblages métalliques. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide et économique.

Le récent développement des tôles revêtues électro zinguées nécessitent l'optimisation des techniques classiques d'assemblage, particulièrement en ce qui concerne le soudage par résistance par points.

Cette nouvelle génération de tôles, largement utilisées dans l'industrie automobile, augmente de façon significative la durée de vie des carrosseries des véhicules en limitant la corrosion. Cependant, avec l'arrivée de ces tôles de faibles épaisseurs (0.7 mm) revêtues, est survenu un nouveau problème : celui de la durée de vie des électrodes de cuivre destinées à assurer le soudage.

Nous proposons dans ce travail l'étude de l'influence des paramètres tel que (le type du matériau des pièces soudées, intensité du courant, le temps du soudage, l'épaisseur des pièces et la force appliquée entre les électrodes) sur le comportement mécanique des structures soudées par point. Pour cela nous avons procédé aux essais de traction appliqués

sur plusieurs échantillons de pièces soudées par point on faisons varier les paramètres précédents.

Ces essais de traction vont nous permettre de déterminer la force maximale appliquée jusqu'à la rupture de point soudure ainsi que les courbes de traction qui vont nous permettre d'analyser le comportement mécanique des différents échantillons jusqu'à la rupture.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré au procédés et matériels de soudage.

Le deuxième chapitre est consacré au procédé du soudage par résistance par points.

Le troisième chapitre introduit les notions générales de la conception des joints soudés.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de l'étude expérimentale.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus.

Une discussion sur les effets des paramètres de soudage par points étudiés est menée afin de comprendre globalement la tenue mécanique des assemblages soudés par points pour des aciers doux, inoxydables et galvanisés. Le mémoire est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

Le soudage signifie de manière générale, l'action d'assembler des pièces mécaniques et métalliques, sous l'action d'une énergie calorifique générée par divers procédés, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages par liaisons permanentes, notamment dans l'univers de la construction mécanique.

Ce chapitre présente de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés.

I.2 Classification des procédés de soudage

Plusieurs critères peuvent être retenus pour classer les procédés de soudage :

la nature de l'énergie utilisée, le type de protection du bain métallique, l'origine de la formation de la continuité métallique (phase liquide ou phase solide), la performance du procédé... FiguerI.1

➤ **Soudage par pression**

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

➤ **Soudage par pression et fusion**

On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de Contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.

➤ Soudage par fusion sans pression

La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés.[1]

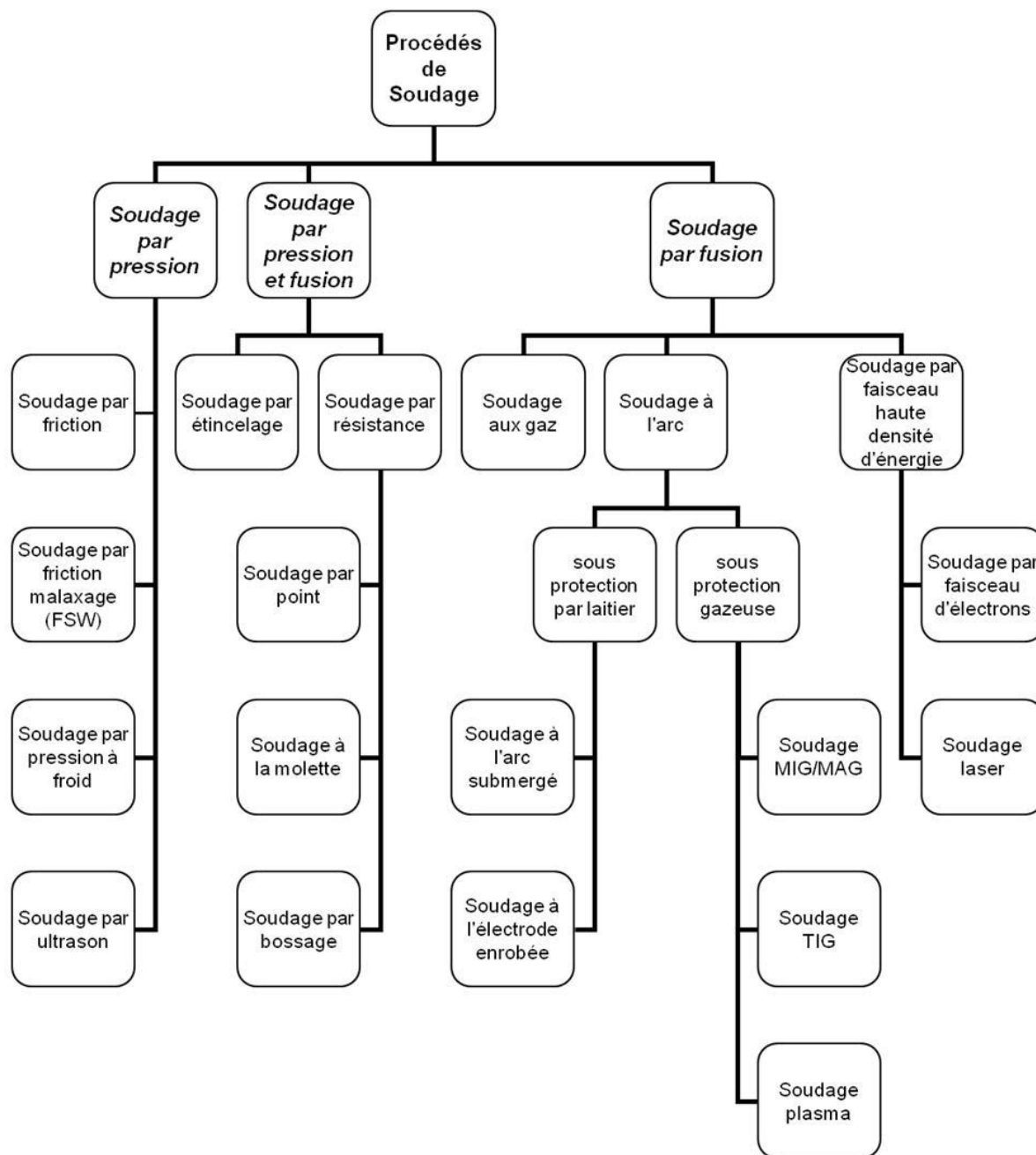


Figure I.1: Classification des procédés de soudage [1]

I.3 Soudage par fusion

I.3.1 Soudage aux gaz

➤ Principes

Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux (boyaux) de gaz à la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar) un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule la pression et l'arrivée des gaz. Figure I.2 [1]

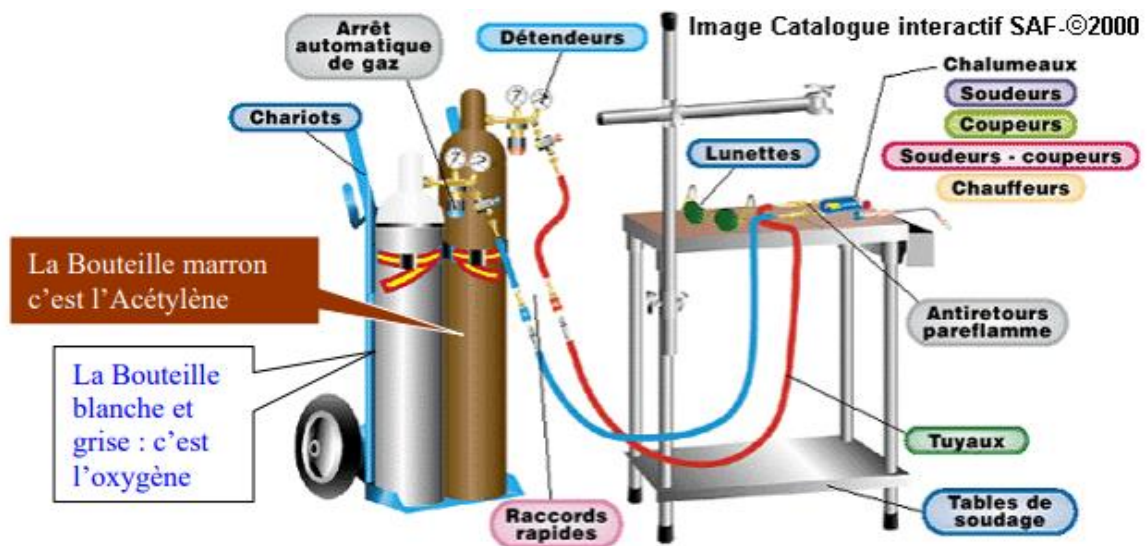


Figure I.2 : Installation de soudage au gaz[2]

➤ Détail du matériel de soudage

1. Un chalumeau haute ou basse pression
2. Un dispositif de sécurité anti-retour de l'oxygène vers l'acétylène
3. Un manodétendeur d'oxygène avec tuyau ou boyau d'alimentation couleur bleu (Normes !)
4. Une bouteille d'oxygène
5. Un manodétendeur d'acétylène avec boyau d'alimentation rouge (Normes)
6. Une bouteille d'acétylène
7. Un jeu de buses calibrées

8. Une paire de lunettes teintées Un allume-gaz

➤ Les différents chalumeaux

1. Haute pression (les deux gaz sont à des pressions supérieures à 0,15 bar)
2. Basse pression (l'acétylène est à une pression comprise entre 0,010 à 0,1 bar et l'oxygène est à une pression comprise entre 1 et 3 bar.)

➤ La mise en œuvre du procédé

1. Le soudeur ouvre les robinets des bouteilles de gaz
2. Puis il règle ou vérifie les pressions d'utilisation sur les manomètres
3. Il est recommandé d'ouvrir légèrement en premier le robinet d'oxygène* du chalumeau, puis légèrement le robinet l'acétylène et d'enflammer le gaz.
4. Le soudeur augmente le débit d'acétylène : la flamme ne doit pas décoller de la buse.
5. Il augmente le débit d'oxygène jusqu'à l'obtention d'une flamme neutre pour éviter les fumées noires. Les soudeurs professionnels font l'inverse généralement pour l'arrêt momentané : on peut poser le chalumeau sur l'économiseur s'il y en a un. Le chalumeau sera toujours réglé et donc prêt à fonctionner.
6. Pour l'arrêt définitif : fermer les robinets sur les bouteilles et laisser la flamme s'éteindre d'elle même de façon à vider les tuyaux (les aiguilles des manos doivent retomber à zéro).

➤ La flamme neutre du chalumeau

On peut avoir trois types de flammes pour le soudage oxyacétylénique :

• **Flamme neutre ou normale** : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage.

Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse.

• **Flamme oxydante** : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement. Le panache est plus lumineux.

• **Flamme carburante** : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. Figure I.3 [2]

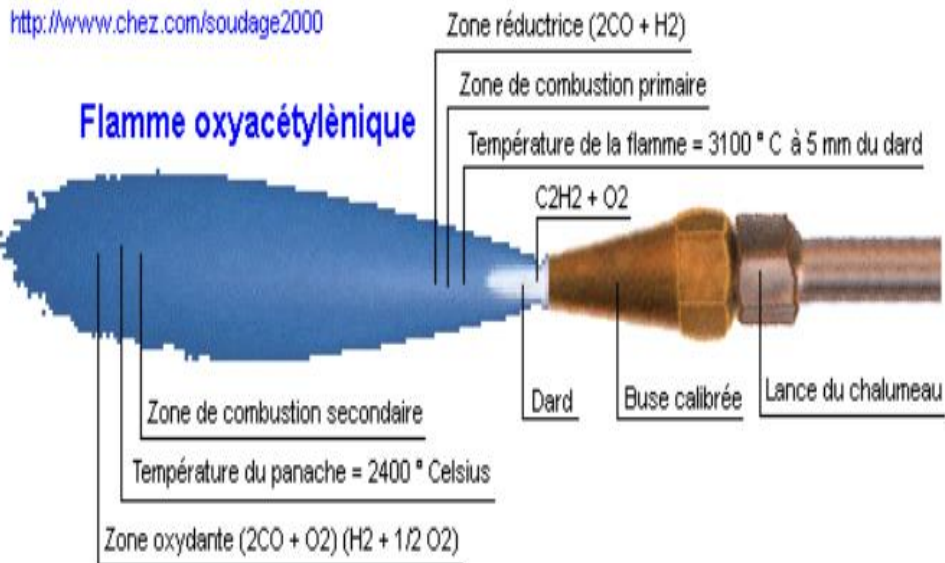


Figure I.3: La flamme de soudage oxyacétylénique [2]

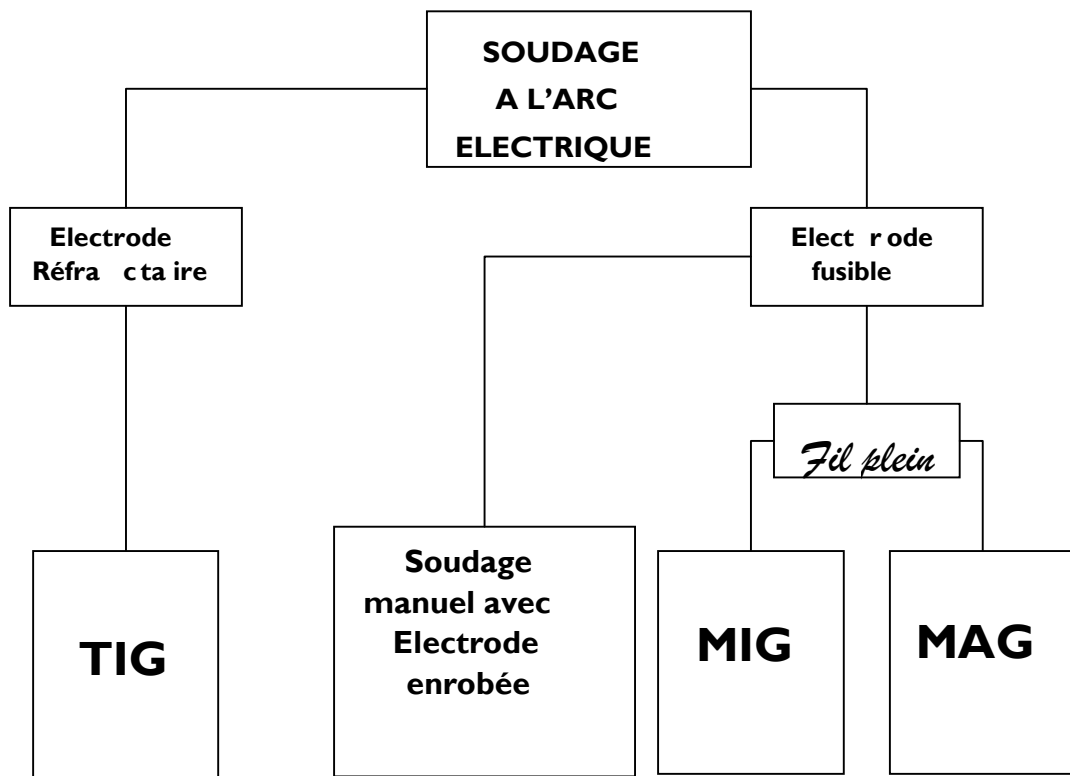


Figure I.4 Représente la classification des procédés de soudage à l'arc [3]

I.3.2 Soudage à l'arc électrique

Les différentes techniques de soudage à l'arc utilisent l'énergie calorifique d'un arc électrique entretenu entre une électrode et le métal à assembler. Le métal d'apport est apporté par une baguette. Et la protection de la soudure se fait soit par un gaz ou par l'enrobage de la baguette.[4]

L'échauffement local produit un bain de fusion qui, en se refroidissant, constitue le cordon de soudure.

Les phénomènes métallurgiques qui se produisent pendant l'opération de soudage sont complexes en raison de :

- ✓ La nature du métal de base
- ✓ Les gradients de température influant sur sa structure granulaire et sur sa composition chimique
- ✓ L'oxydation provoquée par l'atmosphère entourant le bain de fusion

Le courant électrique continu ou alternatif est fourni par un générateur dont la tension à vide doit être supérieure à la tension d'amorçage. Figure I.4

L'intensité du courant est réglée en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage éventuel, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. Les autres paramètres à régler sont la distance de l'électrode par rapport au métal de base et sa vitesse d'avance.

I.3.2.1 Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée

➤ Principe

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure.

Il s'agit du type de soudage le plus répandu.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc électrique jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport.

La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l'acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage.

Procédés et matériels de Soudage

Les applications de ce procédé sont particulièrement nombreuses. La mobilité des appareils et la grande diversité des types d'électrodes permettent d'effectuer des travaux sur un certain nombre de métaux et de leurs alliages comme les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables, les fontes et dans certaines conditions, l'aluminium, le cuivre et le nickel. Tous les types d'assemblage (bord à bord, d'angle...) et toutes les positions de soudage (à plat, en corniche...) sont possibles.

Il y a mise en fusion des pièces à souder et du métal d'apport, pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal d'apport) en créant un «arc électrique» qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intenses . [5]

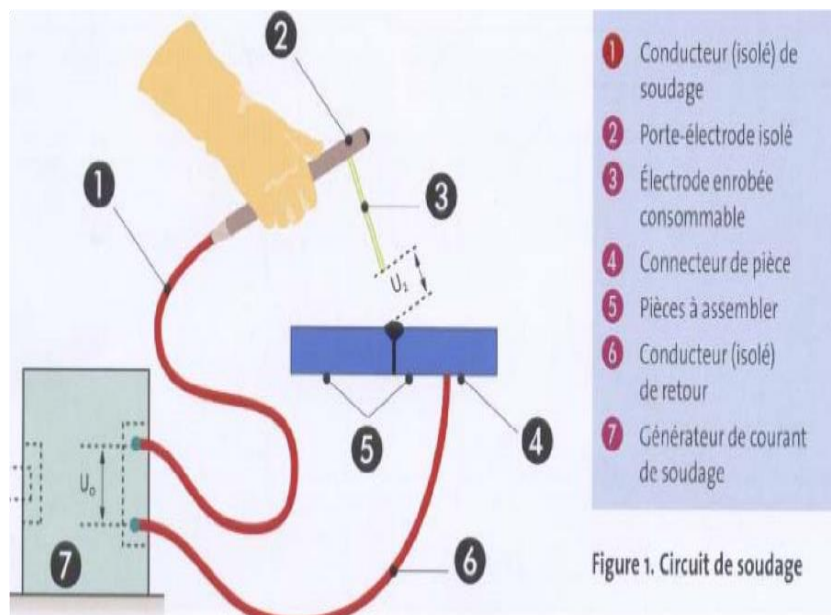


Figure I.5 :Fiche pratique de sécurité, Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées [5]

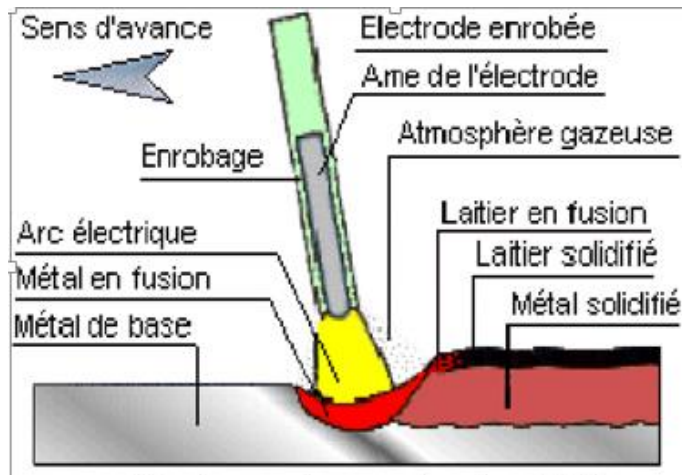


Figure I.6 : Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées [6]

➤ Le poste à souder

L'arc électrique permet d'amorcer le soudage en apportant la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport, mais il ne fait pas le soudage. [Figure 5 ; Figure 6]

Il est produit à l'aide d'une génératrice haute fréquence qui a pour fonction de :

- Faire fondre l'électrode. Le poste à souder transforme le courant d'alimentation du secteur, afin de fournir à la sortie du poste, des intensités suffisamment élevées pour permettre la fusion de l'électrode de soudage.
- Stabiliser l'arc électrique. La continuité de l'arc électrique permet une soudure régulière. L'onduleur qui remplace les anciens transformateurs et redresseurs, corrige les variations du courant électrique et apporte une puissance et une tension électrique constante.

Une intensité élevée permet le soudage de pièces épaisses, si l'intensité est trop faible, la fusion

du métal d'apport n'est pas bonne et la soudure sera moins résistante. La tension à 50 Volt minimum permet d'amorcer plus facilement le soudage, en évitant les effets de «colle» de l'électrode.

En fondant, l'enrobage de l'électrode remplit différents rôles :

- **Rôle électrique** : l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air
- **Rôle physique** : l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique. Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.
- **Rôle mécanique** : l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage
- **Rôle métallurgique** : il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse. Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure. Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (acide, basique, cellulosique ou rutile : oxyde de titane TiO_2).

➤ **Composition de l'électrode** :

- La soudure est de type autogène, le métal d'apport, constitué par l'âme métallique de l'électrode peut être en fonction du métal à souder, de l'acier, du cuivre, de l'inox...
- L'enrobage de l'électrode est variable, différents composants dont le fer, qui est un adjuvant pour le soudage, du cuivre, du manganèse, du silicium, du nickel, du molybdène, de l'acier...et toujours de la poudre de fer.

Le choix du type d'électrode et d'enrobage se fera en fonction de l'application : type d'assemblage (angle, à plat, sur tube...), de l'épaisseur à souder, des qualités requises : dureté, ductilité..., du type d'acier.

On choisira aussi le diamètre de l'électrode en fonction de l'épaisseur du métal à souder.

On distingue cinq grands types d'enrobage : [7]

- Type O (oxydant) : à base d'oxyde de fer
- Type A (acide) : à base d'oxyde de fer, d'oxyde de ferromanganèse, de silice, de silicate ou de ferroalliage désoxydant
- Type B (basique) : carbonate de calcium, spath fluor ou ferroalliage

Procédés et matériels de Soudage

- Type C : cellulosique, composé de cellulose et de matières organique
- Type R : rutile, comprenant 95 % d'oxyde de titane ou ilménite comprenant 50 % d'oxyde de titane et 50 % d'oxyde de fer.

Les enrobages les plus utilisés aujourd'hui sont ceux de type B et R.

Dans le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, il convient de distinguer deux techniques :

- La technique montante : la soudure est démarrée en bas et s'effectue du bas vers le haut, pour chaque moitié du diamètre du tuyau. C'est une technique plus lente, l'énergie en jeu est moyenne, l'éblouissement est aussi limité, elle est plus sécurisante. La soudure formée est de meilleure qualité, en sa défaveur, c'est une technique plus lente.
- La technique descendante : à l'inverse on démarre en haut pour aller vers le bas. C'est une technique qui développe plus d'énergie, l'éblouissement est important. Mais elle est souvent préférée car deux fois plus rapide.

➤ **Application :**

- ❖ Le soudage manuel à l'arc électrique et électrode enrobée concerne surtout les postes de tuyauteurs pour des tubulures de diamètre et d'épaisseur importante. Conférant une bonne résistance mécanique aux soudures.
- ❖ Il convient aux aciers doux (enrobage de l'électrode type O), aux aciers faiblement alliés, aux aciers inoxydables et réfractaires, à la fonte grise, aux métaux non ferreux : nickel (après décapage à l'acide et neutralisation), cuivre et cuproaluminium.
- ❖ Il est préféré au procédé TIG pour les soudures sur tuyauterie transportant du gaz, car il supprime le risque gaz lié à la présence du gaz protecteur.
- ❖ La rapidité de sa mise en œuvre est aussi appréciable ; sous arc électrique la température idéale de soudage qui est atteinte rapidement reste stable tout au long du soudage.
- ❖ Sur le plan financier son intérêt réside aussi dans le coût minime et la simplicité du matériel mis en œuvre : onduleur, porte électrode, électrode, meuleuse, brosse...
- ❖ Néanmoins la technique de l'arc électrique n'est pas facile, elle nécessite une bonne maîtrise. Avec un appui constant de l'électrode enrobée. Ceci en maintenant une distance constante de 2mm avec la zone de fusion. Le métal d'apport est alternativement poussé puis tiré au niveau de la zone de soudure.

- ❖ Ce type de procédé de soudage se pratique en général à l'extérieur, en effet il rend possible le soudage quelques soient les conditions météo, de température, de vent....C'est le procédé de soudage idéal par tous temps.
- Par contre, son utilisation en atelier ou en lieu clos nécessite une aspiration directe indispensable ainsi que le port d'EPI adaptées, car la production de fumées est importante, de même que la projection de particules métalliques. Ces fumées sont issues de la mise en fusion des différents métaux, base à souder, âme et enrobage de l'électrode.
- L'exposition aux risques des fumées de soudage (fièvre des métaux, irritation ORL avec enrrouement dès la première journée) projections de particules métalliques, UV et coup d'arc est important dans ce type de procédé de soudage.

I.3.2.2 Soudage à l'arc électrique type TIG (Tungstène inert gaz)

➤ Principe :

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis.

Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure. Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu.

La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

Par exemple le soudage de l'inox, avec le procédé TIG, permet d'éviter la formation d'oxydes de chrome. Formation qui entraînerait localement une baisse de la concentration en chrome et diminuerait sa résistance à la corrosion.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif) Différents types de gaz sont utilisés :

- Argon pour l'acier
- Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon- Hélium- Oxygène

Procédés et matériels de Soudage

Une électrode en tungstène réfractaire, non fusible (c'est à dire qui ne fond pas) permet le passage de l'arc électrique (le tungstène est très bon conducteur) Au tungstène était parfois ajouté du Thorium, à présent interdit et remplacé par du Cérium, pour le soudage sur les aciers alliés.

Pour le soudage sur métaux non alliés, comme l'aluminium, l'électrode est en tungstène pur (Figure I.7).

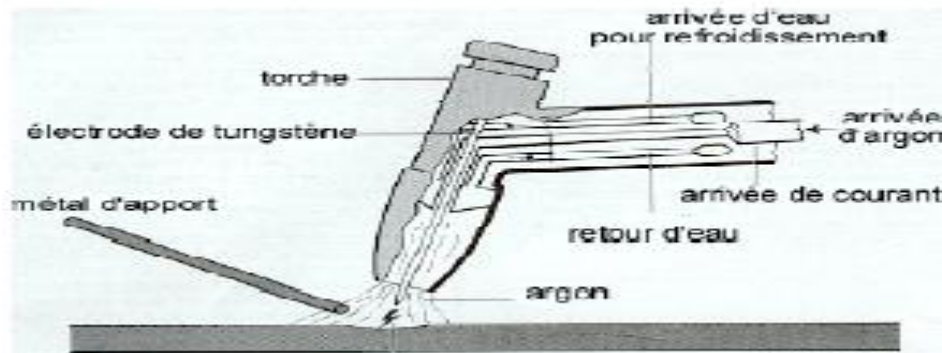


Figure I.7 : Principe procédé de soudage TIG [8]

➤ Application

- Ce procédé de soudage apporte une grande qualité de régularité au cordon de soudure.
- Il est aussi apprécié pour la rapidité de sa mise en œuvre, en effet la température de fusion au niveau de la zone à souder est obtenue quasi immédiatement, de plus elle reste bien localisée, ne s'étendant que sur une zone de quelques millimètres.
- Le métal de base devient aussi métal d'apport. Du fait d'une bonne pénétration du métal d'apport et d'une continuité en profondeur dans la matière, la quantité de métal d'apport nécessaire est plus faible qu'avec le procédé au chalumeau. Les joints ainsi obtenus sont de grande qualité.
- Il n'y a pas les défauts d'inclusion du « laitier » comme avec l'électrode enrobée.
- Les défauts observés peuvent être des excès de soufflure par manque de gaz, ou un aspect vermiculaire (bulles de gaz) par excès de gaz.
- Ce procédé de soudage est appliqué pour les soudures de tôlerie fine, de tubes par les tuyauteurs.
- Il convient à la plupart des métaux, aciers divers, aluminium, manganèse cuivre, nickel, métaux et alliages réfractaires ainsi qu'aux métaux précieux ou délicats (titane-tantale

ou zirconium)

- En raison du poids et de l'encombrement des installations nécessaires il est appliqué en atelier
- La mise en œuvre en endroits clos est possible car il n'y a pratiquement pas d'émission de fumées ni de particules métalliques. Sauf dans le cas de traitement de surface au niveau des métaux à souder. (attention aux charpentes métalliques pré peintes avant soudage)
- Par contre sur chantier extérieur, il n'est pas toujours privilégié, car la protection gazeuse est sensible au vent, au taux d'humidité. Et en cas de perte de protection il y aura oxydation de la soudure.

I.3.2.3 Soudage semi-automatique : MIG, MAG

Aussi appelé « kilomètre soudé ». Il s'agit d'un procédé de production en grande quantité. Dans les ateliers, la métallerie. Il est rapide, nécessitant moins de formation pour la mise en œuvre que le procédé TIG. Sans production de laitier comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

➤ **Principe :**

L'arc électrique est véhiculé par un fil électrode fusible (à la fois métal d'apport et électrode), ceci jusqu'à l'extrémité de la torche de soudage, qui est munie d'une gâchette.

Le fil est disposé sur le dévidoir d'une bobine. Ce dévidoir tourne pour faire avancer le fil à l'aide d'un moteur de 24 Volt. La vitesse du fil en m/min est réglée à l'aide d'un potentiomètre.

Le soudeur appuie sur la gâchette pour débiter le gaz protecteur, alimenter l'arc électrique et dévider le fil électrode. [8]

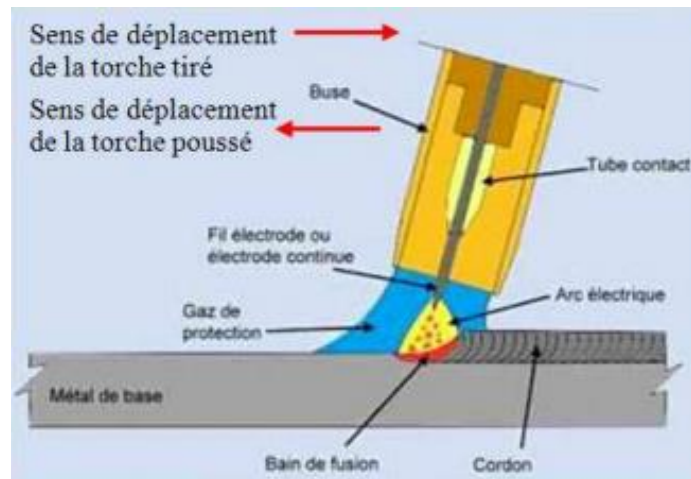


Figure L.8 : Procédés de soudage MIG/MAG[9]

Protection gazeuse inerte (MIG : Metal Inert Gas) le gaz s'écoule de façon continue et protège le métal en fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. En général de l'Argon ou du mélange Argon-Hélium.

Protection gazeuse active (MAG : Metal Active Gas) le plus souvent par CO_2 ou mélange Argon- CO_2 ou Argon- CO_2 - O_2 . Le gaz protecteur participe activement au processus en réagissant, dans l'arc, avec les métaux d'apport et de base.

Caractéristiques du fil d'apport : fils pleins ou fils nus

➤ **Application** :

- Protection gazeuse inerte (MIG : Metal Inert Gas) : Ce procédé autogène (assemblage de pièces de métal de même nature) convient aux aciers alliés, inoxydables, à la fonte, à l'aluminium et aux alliages légers, au cuivre et aux cuproalliages, au manganèse, au nickel et aux métaux et aciers réfractaires.
- Protection gazeuse active (MAG : Metal Active Gas) : Ce procédé s'adapte aux aciers doux non alliés, galvanisés ou zingués et aux métaux ferreux.

On peut décrire 3 modes de fusion, ceci quel que soit la puissance, la nature ou l'origine de l'appareil à souder.

- court-circuit :
- ✓ Vitesse et intensité faible, 1 et 2/6.
- ✓ Appliqué pour le soudage de tôles fines, les positions délicates, les soudures au

plafond...

- ✓ Lorsque le fil touche le métal de base il y a court-circuit, l'extrémité du fil sous forme d'une boule, se trouve collée sur le métal de base. Il y a alors brisure du fil suivi de sa rétraction.
- ✓ La circulation du courant et l'avancée du fil reprennent et le même processus peut recommencer à côté.
- ✓ Le cordon de soudure est donc formé par la mise bout à bout de ces «boules».
 - globulaire ou grosse goutte :
- ✓ Vitesse et intensité moyenne 3 et 4/6.
- ✓ Application pour le soudage en angle, à plat ou en position montante. La zone d'impact est plus grande, ainsi que la pénétration dans la matière.
- ✓ La «goutte» sera plus grosse et c'est pourquoi elle se détache spontanément avant que le fil de soudure ne touche le métal de base ; donc avant le court-circuit.
- ✓ Ce procédé de soudage offre une meilleure résistance mécanique à la soudure.
 - PA ou pulvérisation axiale :
- ✓ Vitesse et intensité élevée, 5 et 6/6.
- ✓ Le fil ne touche pas le métal de base. Quand il arrive à proximité il y a pulvérisation dans l'espace du métal du fil de soudure.
- ✓ La pénétration du métal d'apport est importante et le cordon de soudure a une forte épaisseur.

Ce procédé est appliqué en production de masse, pour les soudures en angle et à plat.

L'automatisation est possible, il n'y a pas de meulage, ni de reprise nécessaire.

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients [9]

➤ **Avantages et inconvénients :**

1 Avantages

- Forte productivité.
- Grande vitesse de soudage (gain de temps). - Taux de dépôt de métal important.
- Limitation des déformations.

- Nombre de reprises de soudure limité. - Pas de laitier à enlever.
- Large gamme d'épaisseur.
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.
- Soudage dans toutes les positions.
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court
- -circuit.
- Aspect de cordon correct.
- Procédé automatisable.
- Fatigue moindre du soudeur

2 Inconvénients

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

I.3.2.4 Soudage à l'arc électrique sous flux ou soudage à l'arc électrique submergé

➤ Principe

Dans ce procédé la protection de la soudure se fait, non pas par l'enrobage ni par un gaz, mais par un flux (par exemple sous forme pulvérulente)

Flux qui est déversé automatiquement, par un dispositif, devant le fil électrode. A noter que le flux peut aussi être présent à l'intérieur du fil électrode qui sera alors appelé « fil fourré » (Figure I.9).

Ce flux forme une couche en excès qui protège l'arc. [4]

Il n'y a pas de projections et le cordon de soudure est recouvert d'un laitier auto détachable qui laisse apparaître un métal fondu lisse et brillant.

Il s'agit d'un procédé essentiellement automatique qui produit peu d'émissions de fumées

Procédés et matériels de Soudage

- ☀ Le flux permet de décaper les pièces à assembler, de faciliter le mouillage de l'alliage d'apport et d'éviter la formation d'oxydes lors du brasage.
- ☀ Les flux peuvent être incorporés dans les alliages d'apport. La quantité de flux varie selon les produits de 0,6 % à 3,9 %.
- ☀ Les fils à flux incorporé sont parfois appelés fils à âme décapante.
- ☀ Les flux peuvent aussi être appliqués séparément sous forme liquide, solide ou pâteuse.
- ☀ Le choix du flux approprié dépend essentiellement de la nature des Matériaux à braser.

Les flux peuvent être :

- résineux à base de colophane
- organiques, non résineux, solubles ou non dans l'eau, à base d'alcools (isopropanol, propanol, éthanol) ou de solvants organiques...
- inorganiques, à base de chlorures, de fluorures, de borates, d'acides phosphoriques, d'amines... [6]

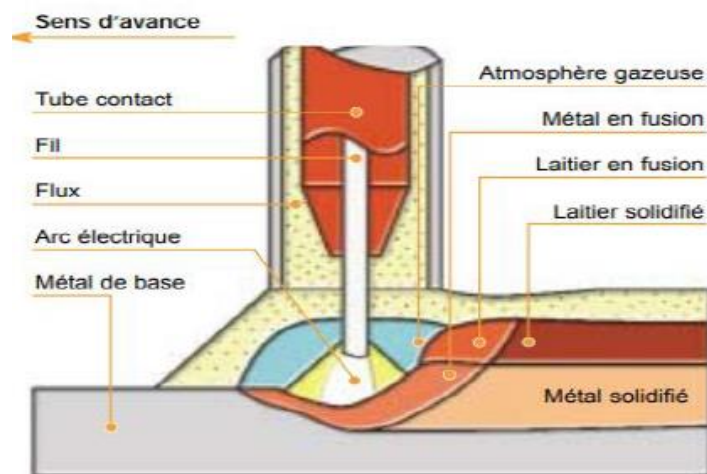


Figure I.9 : Principe de procédé de Soudage à l'arc Submergé [9]

➤ Désignation

- Désignation française : Soudage à l'Arc sous Flux en Poudre (SAFP)
- Désignation américaine : Submerged Arc Welding (SAW)
- Désignation numérique : 121
- Une installation de SAFP comprend :

- Un générateur de courant continu ou alternatif ;
- Un coffret de commande et autre d'automatisme ;
- Un dévidoir entraînant le fil à une vitesse régulière ;
- Une alimentation en flux en poudre (trémie) ;
- Une torche qui assure le guidage du fil électrode ; dirige l'arc et amène le flux de protection ;
- Une gaine de torche et un câble de masse(Figure I.10)

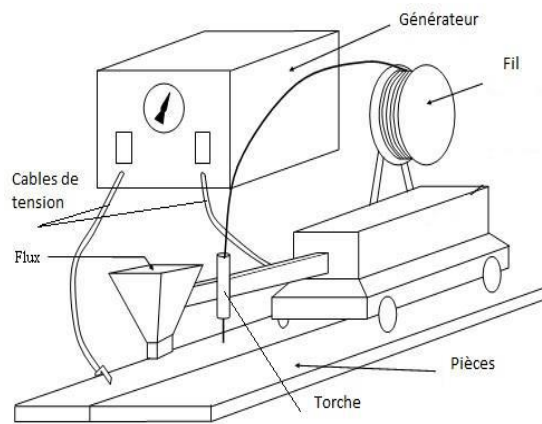


Figure I.10 : Installation de SAFP [9]

❖ Type de courant utilisé

En courant continu, l'arc submergé peut être utilisé en polarité :

- DC+ pour favoriser la pénétration
- DC- pour favoriser le taux de dépôt

Le courant continu est d'un emploi plus aisé et donne lieu à un meilleur amorçage et une stabilité supérieure de l'arc ainsi qu'une meilleure qualité du cordon.

❖ Domaines d'applications

- Industrie légère ou lourd (aciers non alliés) ;
- Appareils à pression (aciers faiblement alliés) ;
- Industrie pétrochimique (aciers inoxydables/base nickel) ;

- Les travaux de grande distance.[10]

I.3.3 : Soudage par faisceau haut densité d'énergie

I.3.3.1 : Soudage par faisceau électrons

➤ Principe

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé de soudage par fusion, utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec des pièces à assembler où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis et accélérés par un canon à électrons. L'émission, l'accélération et le trajet des électrons se fait sous vide. C'est un procédé qui est généralement automatisé, du fait de l'environnement nécessaire à la génération du faisceau d'électrons. Il permet l'assemblage de tôles d'acier de quelques 0,001 à 300 mm d'épaisseur en une seule passe (Figure I.11). [11]

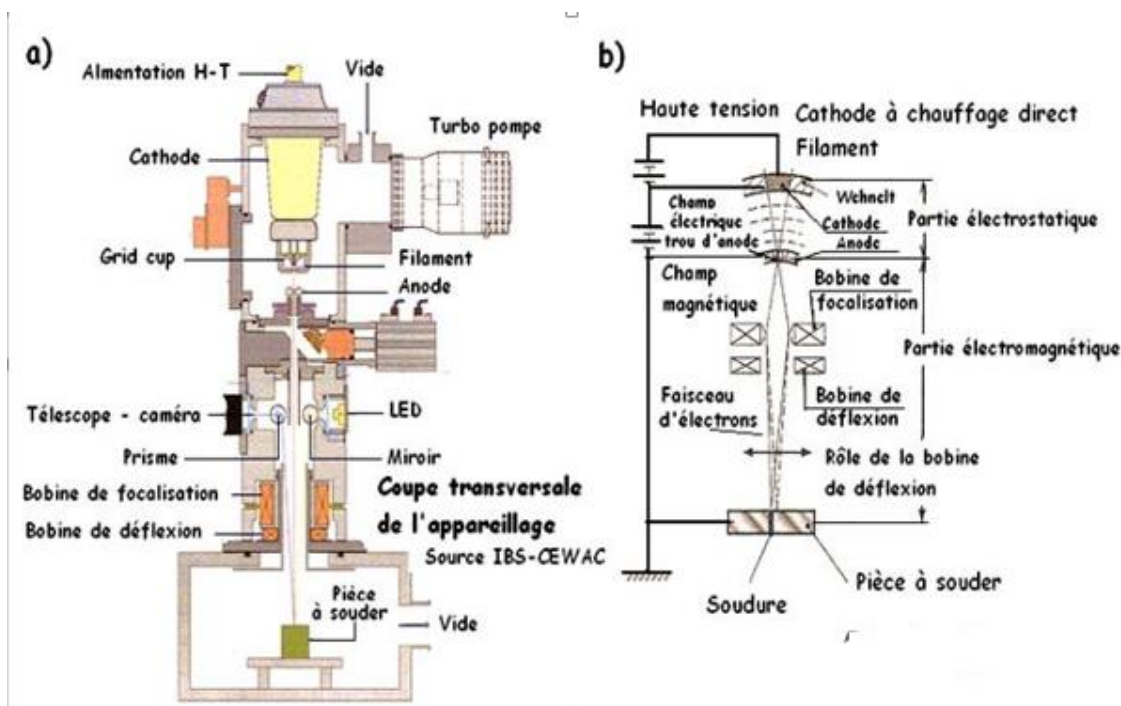


Figure I.11 : Schéma de soudage par faisceau électrons [11]

➤ Principe du canon à électrons

L'équipement générateur de faisceau est très proche, dans le principe, d'un tube cathodique pour téléviseur. L'émetteur est un système cathode-anode porté à un très haut potentiel dans un vide poussé (10⁻⁶ mbar) (Figure I.12).

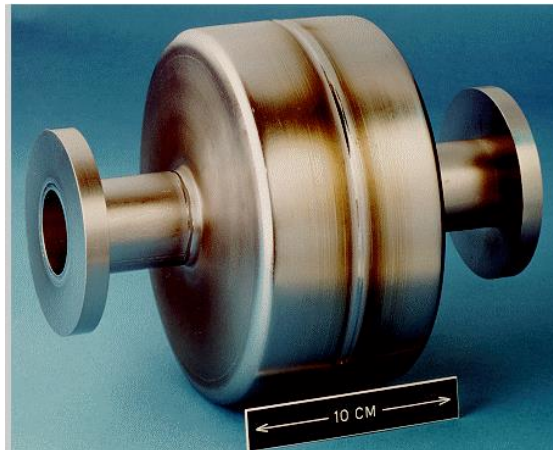


Figure I.12 : Soudure par faisceau électron [11]

a) La cathode : Elle peut être en tungstène, en tantale ou Lab6. Elle est chauffée par effet Joule (intensité de 10 à 500 mA , tension de 10 à 150 kV, puissance de 3 à 500 kW). L'effet thermoïonique crée, à haute température (1200 à 2400°C selon la nature de la cathode), un nuage d'électrons à sa surface. La cathode et le filament sont les seuls éléments d'usure du canon.

b) Le Wehnet ou Grid-cup : Il est polarisé négativement et joue le rôle de grille en même temps que celui du conformateur du champ électrique. Ce champ accélère les électrons qui sortent de l'anode en faisceau (vitesse comprise entre 50 et 200000 km/s)

c) Les lentilles magnétiques : Elles focalisent le faisceau au voisinage du joint à souder.

d) La déflexion : Réalisée par champ magnétique est parfois utilisée pour diriger le faisceau ou charger la zone d'impact. Les bobines placées près de la lentille permettent de faire vibrer le faisceau avec des fréquences variant entre quelques Hertz à 10 kHz.

➤ Paramètres de soudage

Les plus importants sont :

- ❖ La puissance : La tension (énergie cinétique, vitesse des électrons) et l'intensité de soudage (quantités d'électrons) quand le courant de soudage augmente, la quantité d'électrons par secondes augmentent, la pénétration augmente ainsi que lorsque la différence de potentiel augmente (valeurs de 30 à 150 kV pour un courant de soudage de 1 mA à 1A).

Procédés et matériels de Soudage

- ❖ La vitesse de soudage : (vitesse relative du faisceau par rapport à la pièce m/min).
Lorsque cette vitesse augmente, la pénétration diminue.
- ❖ Focalisation du faisceau : Lorsque le foyer du faisceau est au-dessus du bain, la pénétration est peu profonde. Lorsque le foyer du faisceau est en dessous du bain, on a un bain en forme de V.
- ❖ Déflexion et vibrations : Forme, amplitude, fréquence et direction.
- ❖ Pression de travail : (Pour l'enceinte et le canon à électrons). – de 10^{-3} à 10^{-6} mbar = pureté maximale, grande précision et un rapport hauteur/largeur de soudure plus élevé.
- ❖ de 10^{-1} à 10^{-3} mbar = faisceau plus dispersé (utilisé pour le soudage de l'aluminium ou des applications dans l'industrie automobile).

➤ **Avantages et inconvénients :**

1. Avantages

- Qualité exceptionnelle, pas de contamination du bain de fusion par fusion par oxydation et inclusion.
- Permet le soudage de pièces dans des endroits difficilement accessibles (ex. un anneau peut être soudé en une seule passe, côté supérieur et côté inférieur)
- Peu d'apport calorifique, ZAT très étroite
- Déformations minimales, faible retrait mécanique
- Grande vitesse de soudage jusqu'à 15 m/min
- Soudage des assemblages hétérogènes y compris soudage des métaux difficiles à assembler
- Fiabilité et répétabilité parfaites des soudures d'une pièce à l'autre sans intervention d'un opérateur.
- Pas de fumées, pas de poussières, protection complète contre les rayonnements dangereux.

2. Inconvénients

- Coût élevé de l'équipement selon la puissance variable jusque 150000 € voir plus.
- L'investissement dans cette technique doit être justifié par le soudage de grandes séries ou le soudage de produits à haute valeur ajoutée.

- Dispositif à vide nécessaire et temps pour le faire
- Extrême précision de la préparation des bords à assembler
- Dimensions importantes de l'enceinte sous vide
- Sensible au magnétisme
- Matériaux magnétiques en permanence non soudables
- Le rapport h/L et le fait de ne pas avoir de métal d'apport augmentent le risque de fissuration
- Distance limitée dans le non vide

➤ Applications

- Automobile : Boîte de vitesse, embrayage, ailettes de turbine sur moyeux
- Aéronautique : Flotteurs, corps de vanne, filtres, arbres, girouettes, pièces de structure, supports moteurs, accumulateurs de pression, pièces moteurs
- Spatial : Filtres, vérins, cadres miroirs, allumeurs, piquages, tuyauteries, pièces de satellites, blindages.
- Médical : Prothèse osseuses, instrumentation chirurgicale, lunetterie
- Nucléaire, off-shore
- Tout composant mécanique exigeant des déformations très faibles ou en matériaux difficiles à souder.[11]

I.3.3.2. Soudage laser

➤ Application

Le coupage par faisceau laser (LBC) est un procédé très efficace qui permet une très grande précision de coupe. Ce procédé très polyvalent permet de couper divers matériaux allant du tissu au métal. Encore peu répandu dans l'industrie, le soudage par faisceau laser (LBW) sert dans l'industrie automobile pour souder des pièces de précision avec une soudure très étanche, par exemple des composantes d'engrenages de transmission. Le soudage au laser à arc pulse (YAG ou yttrium aluminium garnet) pourrait également remplacer le soudage par résistance par point pour certaines applications où les pièces soudées sont sensibles à la chaleur, par exemple les piles au lithium et les détonateurs pour coussins gonflables.

➤ Principe

Dans le procédé de coupage et de soudage par faisceau laser, la chaleur générée par un faisceau de lumière cohérente très intense sert à réchauffer, à fondre ou à vaporiser un solide. Dans le cas du soudage, le faisceau laser est convenablement focalisé sur le joint à souder. Pour le coupage, on utilise la chaleur fournie par le faisceau laser, avec ou sans application d'un jet de gaz, pour augmenter la quantité de matière enlevée.

Deux procédés sont couramment utilisés pour le coupage au laser, soit le coupage au CO₂ qui utilise un courant direct pouvant aller jusqu'à 10 000 volts et le coupage au YAG qui fonctionne avec un courant pulsé. La différence majeure entre ces deux procédés réside dans la façon de produire le rayon laser : pour le coupage au CO₂, c'est le gaz qui produit le rayon tandis que le coupage YAG utilise un cristal pour produire le rayon laser. On utilise également dans ces procédés un gaz de protection [12]

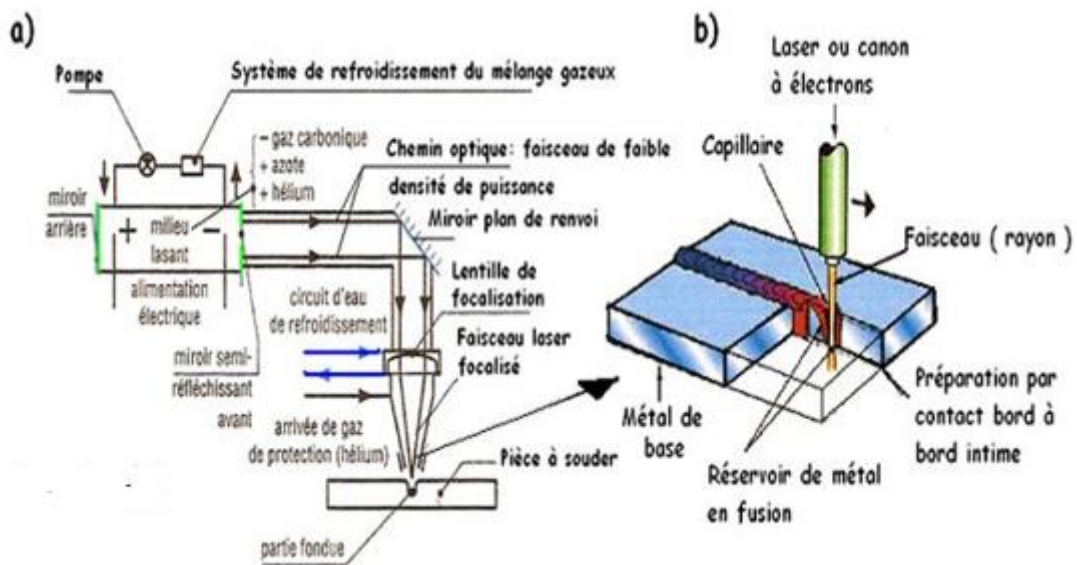


Figure I.13 : Principe de procédé de Soudage laser[12]

❖ Principe de soudage

Durant l'opération de soudage à l'aide d'un procédé à haute densité d'énergie, la concentration énergétique sur la pièce est suffisamment intense pour vaporiser le métal se trouvant sous le faisceau sur lequel le faisceau va se concentrer grâce au système d'optique.

Après focalisation, son éclairement peut atteindre 108 W/cm² à 109 W/cm². Il suffit de quelques microsecondes pour obtenir la fusion et la vaporisation du matériau à souder.

Il est possible de souder au Laser selon deux modes : – Mode conduction (Figure I.13 b) ou en trou de serrure (Keyhole) Figure I.13 a. Le soudage par conduction s'effectue à l'état liquide. Le soudage par trou de serrure, quant à lui, implique la vaporisation du métal et demande donc une quantité d'énergie supérieure au mode par conduction(Figure I.14).

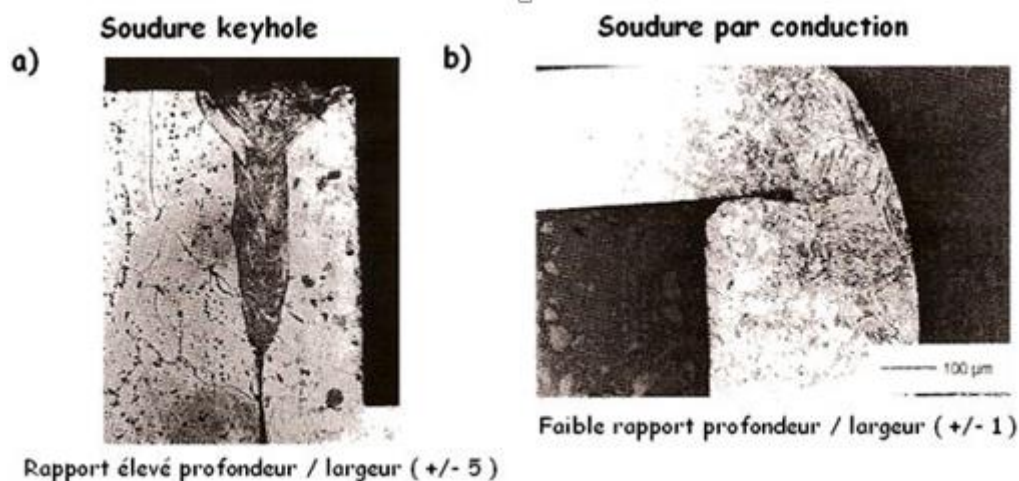


Figure I.14 : Présentation modes soudure laser[13]

A l'heure actuelle, plusieurs sources Laser sont proposées par les fournisseurs. Les sources les plus courantes sont celles à diodes CO₂, Nd – YAG à barreau ou encore Laser hybride. Plus récemment les sources à fibres et YD – YAG à disques.

2. Laser à CO₂ : Le milieu actif est généralement un mélange de gaz différents (CO₂, N₂, H₂, He).

Ces Laser peuvent fournir de fortes puissances (plusieurs centaines de kW et jusque 1 GW/cm² avec des systèmes amplificateurs. Ces Laser sont utilisés en soudure, découpe, en chirurgie. Les Laser CO₂ fournissent un rayon ayant une longueur d'onde de 10,6 μm (milieu infrarouge), le rayon n'est donc pas visible à l'œil nu et donc très dangereux. Le transport du faisceau est réalisé par miroirs. La masse d'un Laser à CO₂ peut atteindre plusieurs tonnes pour de fortes puissances.

3. Le Laser Nd – YAG : Le milieu actif est un solide, plus précisément (Neodymium-dopet Ythrium Aluminium Garnet). La source de pompage est généralement une lampe flash (stroboscope) contenant du Xénon ou du krypton. Les tubes flashes laissent actuellement leur place à des DEL de forte puissance fournissant des flashes lumineux

puissants au milieu actif pour exciter les atomes. Le rayon obtenu se situe à 1065 nanomètres (infrarouge), donc invisible à l'œil nu (spectre visible est entre 400 et 700 nanomètres). La puissance maximale est d'environ 5 kW en régime continu et 25 kW en régime pulsé. Le gros avantage de ce Laser est que le rayon produit peut être très facilement transportable par fibres optiques, à cause de sa longueur d'onde. Ils sont utilisés en ophtalmologie, en médecine et bien entendu en soudage, découpage, etc... La fréquence de l'onde lumineuse peut être doublée pour fournir un rayon Laser dans le spectre visible de couleur verte (532 nanomètres). La masse d'un Laser Nd-YAG est de plusieurs centaines de kilogrammes.

4. Laser hybride : Il combine le soudage Laser avec la technique du soudage à l'arc (ex. MIG-MAG). Cette combinaison permet une grande souplesse de positionnement des pièces, car le soudage à l'arc apporte du métal en fusion pour remplir le joint et l'usage du Laser augmente la vitesse de travail par rapport à ce qu'il est possible avec le seul système à l'arc, les déformations induites sont faibles et la qualité de la soudure est ainsi améliorée. On réalise très souvent des soudures sans préparation de joints.

5. Gaz de protection : En soudage au Laser, on utilise des gaz pour trois raisons :

- La protection des composants optiques (par jet d'air propre)
 - La suppression du plasma
 - L'amélioration de la qualité des joints (contrôle de l'oxydation, des porosités, etc ...)
- La nature du gaz de projection influe sur la formation du plasma et par conséquent sur les performances du procédé. L'interaction entre gaz de projection, les vapeurs métalliques et le faisceau Laser. En général, les gaz de protection utilisés sont des gaz inertes (Ar, He), l'argon étant le plus couramment utilisé, car moins cher que l'hélium. Dans certains cas, on utilise l'azote à cause de son prix très bas, le profil étroit du joint et un temps de solidification très court (une fraction de seconde) empêche le fer de réagir significativement avec l'azote. Pour de nombreuses applications, aucun gaz de protection n'est utilisé, la réaction entre le bain de soudure et l'air ambiant étant limitée à une petite surface pendant une fraction de seconde(FigureI.15). [13]

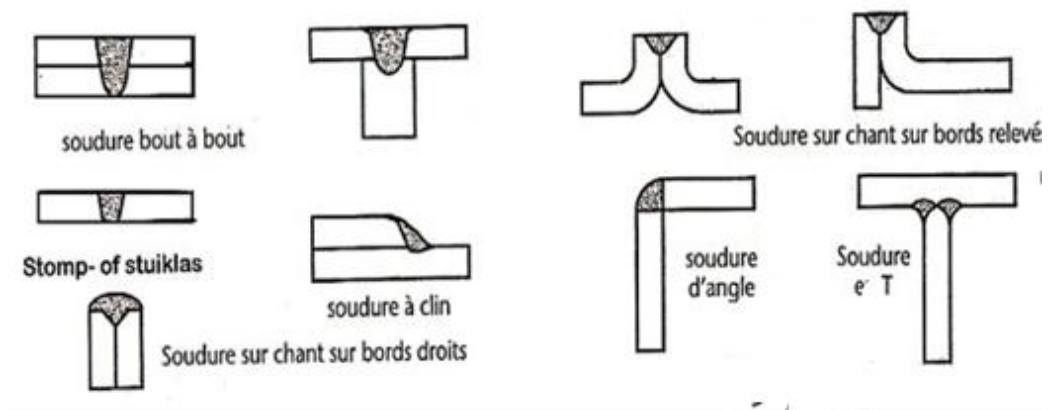


Figure I.15 : Configuration de joints soudés laser [13]

❖ Avantages du soudage laser

1. Avantages

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

2. Inconvénients

- Coût d'acquisition et de maintenance très élevés
- Niveau important de formation des opérateurs
- Précision requises pour la préparation des joints
- Aspects liés à la sécurité (faisceau invisible et énergétique) avec port de protections adaptées très coûteuses [13]

I.4 Soudage par pression et fusion

I.4.1 Soudage par point

On retrouve généralement deux types de procédés de soudage par résistance: le soudage par point (RSW) et le soudage à la molette (RSEW).

➤ Principe

Le procédé de soudage par résistance consiste à faire passer un courant électrique entre deux électrodes sans produire d'arc électrique. Les électrodes, places de chaque côté des deux pièces minces à fusionner, laissent passer le courant, ce qui a pour effet d'élever la température et d'amorcer la fusion du métal. Le soudage se produit sous l'effet de la chaleur, du temps et de la pression exercée par

les électrodes. Le poste de soudage par résistance est un transformateur électrique qui fonctionne sur le courant alternatif (CA) ; il produit un courant de forte intensité de plusieurs milliers d'ampères à une faible tension d'environ 10 volts.

➤ Application

Le soudage par point est de loin le plus répandu des deux procédés. On le retrouve dans l'assemblage de tôles minces pour la fabrication de meubles en métal, de boîtiers métalliques, de casiers, d'étagères ainsi que pour l'assemblage de treillis à partir de tiges métalliques (paniers d'épicerie, grilles, présentoirs, etc.) L'industrie de l'automobile fait souvent appel à des robots pour le soudage par résistance par point (Figure I.16). [13]

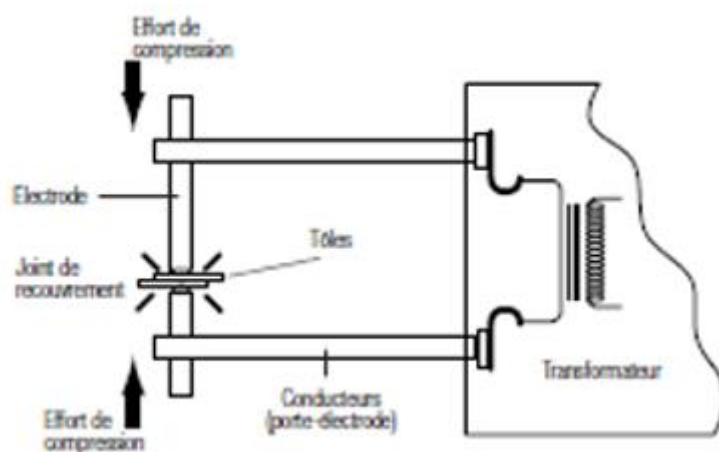


Figure I.16 : Principe de procédé de Soudage par point [13]

I.5 Soudage par pression

I.5.1 Soudage par friction

➤ Principe

Le soudage par friction est un procédé de soudage dans lequel l'assemblage est réalisé en frottant l'une contre l'autre les surfaces à assembler et ce, sous une pression contrôlée. Le frottement entre les pièces à assembler crée de la chaleur (figure I.17). La température dans la surface de contact augmente sans atteindre la température de fusion. Quand la température désirée est atteinte, le frottement est arrêté et les pièces devenues plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former l'assemblage. La friction fournit un chauffage de façon relativement simple et assure également que les surfaces de la soudure soient suffisamment nettoyées. Par le mouvement relatif, les impuretés ou les oxydes sont éliminés de la zone de la soudure. Les paramètres à contrôler pour tous les procédés basés sur le frottement sont la force de contact, la vitesse relative et la durée du frottement. (Température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total. Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme, voir (figure I.18).

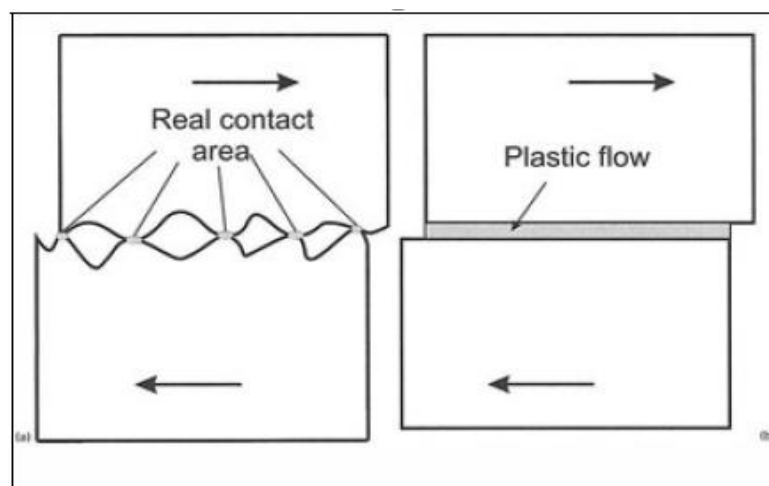


Figure I.17 : Principe du soudage par friction [14]

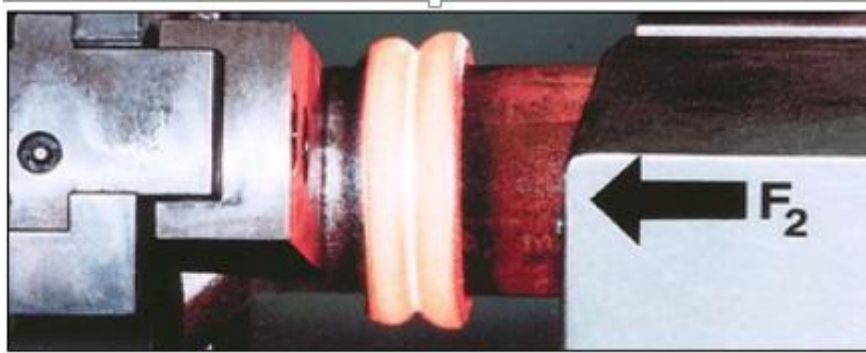


Figure I.18 : La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée [14]

➤ Applications

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents. Les domaines d'application sont entre autres l'industrie aéronautique et la pétrochimie (soudage de brides ou de tubes de forage). Le soudage par friction est fortement utilisé lors de la production de pièces pour camions et engins agricoles (p.ex. des tiges à des yeux de tige (figure I.19). Une nette économie peut être réalisée en remplaçant des pièces complètement forgées par de plus petites pièces forgées soudées à des produits standard comme des barres ou des tubes. Le soudage par friction est également utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des engrenages (figure I.20), des soupapes, des arbres de transmission, ... Le grand avantage de cette technique de soudage réside dans le fait que certaines combinaisons de matériaux peuvent être soudées, alors qu'elles ne le sont pas avec des techniques de soudage traditionnelles. Exemples: assemblage aluminium-acier (figure : I.21) ou titane-cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies en ayant une conception judicieuse de telles pièces. Un exemple est la conception d'une soupape de moteur à combustion. La tête en matériau réfractaire est soudée à la tige en matériau résistant à l'usure.[14]



Figure I.19 : Arbres de transmission soudés par friction [14]



Figure 1.20 : Engrenage soudé par friction [14]



Figure I.21 : Assemblage aluminium-acier [14]

I.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents procédés de soudage. Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients selon l'application, selon que l'on soude en atelier, ou en extérieur, selon l'accessibilité de la pièce, selon les possibilités d'utiliser. Le choix du procédé le plus adapté dépend de très nombreux paramètres, à la fois techniques et économiques. Nous avons choisi d'étudier le procédé du soudage par point, compte tenu de ses nombreux avantages et facile à utiliser.

II.1 Généralités

II.1.1 Principe

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877.

Ce procédé met en œuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre et sur lesquelles il est naturellement ou convenablement concentré (Figure II.1).

La chaleur produite Q s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T RI^2 dt \quad \text{II.1}$$

Avec R résistance électrique rencontrée par le courant,

I : Intensité du courant,

T : Durée du phénomène,

t : Variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la **fusion des matériaux métalliques** usuels.

Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

Les différentes formes du soudage par résistance incluent (à quelques variantes près) une phase de **forgeage** dont l'importance métallurgique est fondamentale.

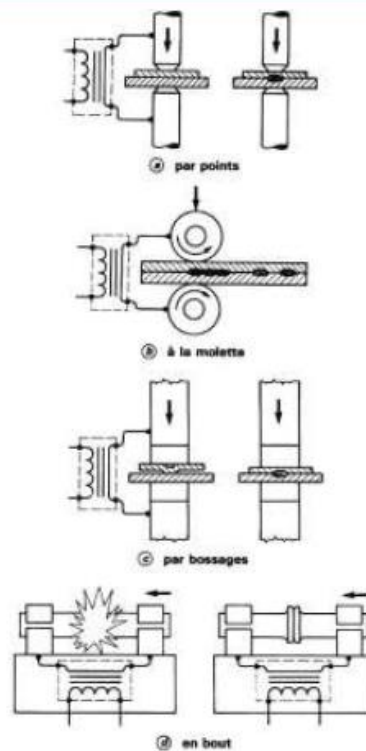


Figure II.1 – Procédés de soudage par résistance[15]

II.1.2. Les différents procédés de soudage par résistance

Il existe de nombreux procédés de soudage par résistance. Ceux-ci sont souvent peu connus en dehors de leur domaine de prédilection. Le but de cet article est de présenter brièvement ces différents procédés et leurs applications. Le Cewac développe plus particulièrement les applications de micro-soudage par résistance dans le cadre du projet

➤ Le soudage par points

Dans le cas du soudage par points, les électrodes ne peuvent effectuer qu'un mouvement vertical (pas de déplacement horizontal), le résultat du soudage est donc un point de soudure circulaire. En respectant certaines précautions, plusieurs points peuvent être effectués les uns à la suite des autres. Un exemple d'installation de micro-soudage par points est montré sur la figure II.2.



Figure II.2 : soudeuse par points disponible au Cewac[15]

Ce procédé est beaucoup utilisé en industrie automobile, mais également par exemple pour la fabrication de batteries ou d'ustensiles de cuisine. Il se prête particulièrement bien à l'assemblage des aciers ou d'aciers inoxydables, mais moyennant certaines précautions, d'autres matières peuvent également être soudées, telles que l'aluminium, le cuivre, voire même des soudures hétérogènes comme présenté sur la figure II.3.

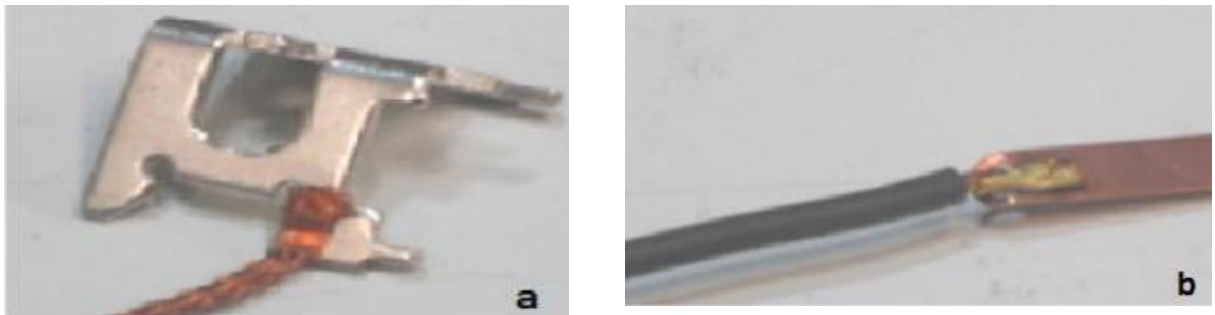


Figure II.3 : a) soudage d'une tresse en cuivre sur un support en acier inoxydable

b) Raccord entre une fil en laiton et un support en cuivre[15]

➤ Le soudage par bossage

Le procédé de soudage par bossage est une méthode d'assemblage directement dérivée du procédé classique de soudage par résistance par points. Dans le cas de ce dernier, la surface de passage du courant est déterminée par la forme des électrodes et de l'effort de compression qui doit vaincre la raideur des tôles. La surface de contact peut donc

être variable et elle est relativement mal contrôlée. Dans le cas du soudage par bossage, l'effort de compression et l'endroit du passage du courant sont localisés à un ou des points déterminés par des bossages préexistants sur une des deux pièces à assembler. En effet, les bossages, grâce à leur effet de concentration délimitent parfaitement la surface de passage du courant de soudage. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser. Le soudage par bossage est souvent utilisé dans le cas d'assemblage des tôles ayant une certaine courbure, car sans le bossage, il est difficile de garantir un contact correct des deux tôles à l'endroit de la soudure comme illustré sur la figure II.4

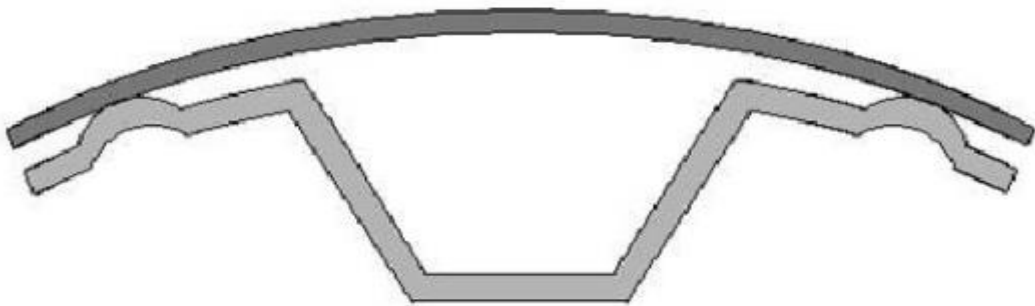


Figure II.4 : configuration typique pour l'utilisation du soudage par bossage [15]

Le soudage de barres et de fils en croix, utilisé par exemple pour la fabrication de chariots de supermarché, est également assimilé au soudage par bossage, car il présente de nombreuses similitudes dans sa mise en œuvre

➤ Le soudage à la molette

Dans le cas du soudage à la molette, les électrodes sont constituées par deux disques mobiles (galets) permettant le déplacement des pièces pendant le soudage (voir figure 4). Les points soudés sont réalisés sans relâcher la pression de serrage. Chaque point résulte d'une impulsion de courant qui a lieu pendant la rotation des galets, c'est-à-dire, pendant l'avance des pièces à souder. Si les points sont jointifs ou se recouvrent, l'assemblage est étanche. Si les points sont espacés, on réalise simplement une jonction mécanique par un cordon de soudage discontinu. Des vitesses de soudage de 2 à 4 m/minutes sont typiques, cependant il est possible d'atteindre des vitesses beaucoup plus élevées, le maximum se situant aux environs de 15 m/min. L'utilisation des

Procède de soudage par point

machines spécifiques à très haute fréquence permet d'arriver à 50 m/min dans le cas particulier du soudage longitudinal des boîtes de conserve qui est une application phare du soudage à la molette. Une autre application très répandue est le soudage des filtres. En effet, le fait de ne pas utiliser un arc électrique pour le soudage permet de souder facilement des fins treillis sans risque de les brûler (Figure II.5, Figure II.6)



Figure II.5 : soudeuse à la molette [15]

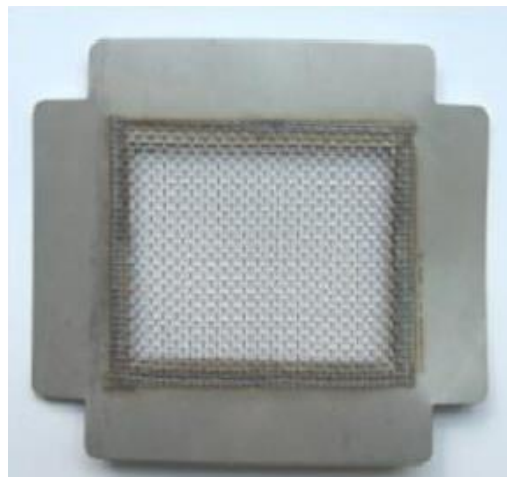


Figure II.6 : Boite de stérilisation assemblée par soudage à la molette [15]

➤ Le soudage en bout

On distingue le soudage en bout par résistance pure et par étincelage. Dans le cas du soudage en bout par résistance pure, les deux pièces à souder sont maintenues dans des mâchoires reliées électriquement à chacune des bornes du secondaire du transformateur de soudage. Un jeu de mâchoires est solidaire de la table fixe tandis que l'autre est fixé

sur une table mobile. Ces mâchoires mobiles transmettent aux pièces un mouvement relatif de translation l'une vers l'autre et exercent un effort de compression sur les faces à souder. Les extrémités des pièces à souder sont amenées en contact sous pression assez forte avant de provoquer un passage de courant dans les pièces. Les pièces à souder offrant une résistance largement supérieure à tous les autres éléments du circuit deviennent le siège d'un échauffement important par effet joule. Le soudage par résistance pure n'est généralement appliqué qu'au soudage de faibles sections de forme massive, comme par exemple des ronds en acier ou en alliages d'aluminium. Dans le cas du soudage en bout par étincelage, les surfaces des pièces à assembler sont d'abord amenées à la température de soudage par l'effet Joule, dû à un courant électrique important traversant les résistances élevées des surfaces des deux pièces en contact imparfait, provoquant la combustion d'une quantité de matière de celles-ci. Ensuite, un effort de forgeage est appliqué pour finaliser la soudure.

En conclusion

Le principal avantage des procédés de soudage par résistance est une automatisation aisée des processus et une très bonne reproductibilité pour autant que les conditions de soudage ne soient pas modifiées. De plus, les opérations de soudage sont très rapides. Dans son domaine d'application, le soudage par résistance est considéré comme un procédé économique ayant une productivité très élevée. Au niveau de micro-soudage, les épaisseurs soudables sont très fines et l'apport d'énergie peut être parfaitement contrôlé. On peut dès lors souder des tôles de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur sans problème.[15]

II.2 Soudage par Résistance par Points :

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

II.2.1 Principe du Procédé :

Le principe du soudage par points schématisé sur la figure. II.7 illustre les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui va

Procède de soudage par point

créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles.

Un cycle de soudage schématisé sur la figure.II.7 se décompose en trois phases principales :

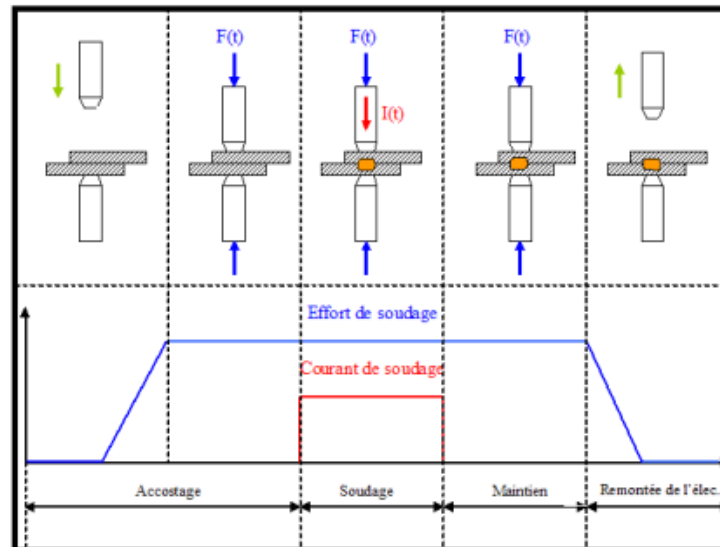


Figure.II.7 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point[16]

- ✚ 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 au bâti de 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 et de la ZAT 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 être translaté afin de procéder à un nouveau soudage par point.

II.2.2 Paramètres du Procédé :

Dans ce paragraphe, nous présenterons l'influence qualitative de toutes les variables du procédé de soudage. Les paramètres sont adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Les paramètres principaux décrits dans l'ordre de chronologie du procédé sont l'effort de soudage, l'intensité, le temps de soudage, et le temps de maintien.

- ✚ Effort de soudage : l'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, (FigureII.7), mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse.
- ✚ Intensité de soudage : l'intensité de soudage est considérée comme un paramètre important pour engendrer l'énergie dissipée. Car elle gouverne la génération de chaleur par effet Joule. L'intensité utilisée soit en courant alternatif monophasé, (AC-50Hz), ou soit courant continu moyenne fréquence, (MFDC-1000Hz).
- ✚ Temps de soudage : intervient pendant la phase de chauffage. L'ordre de grandeur typique est de quelques dixièmes de secondes. Selon la norme, le temps de soudage dépend de la nuance d'acier et son épaisseur. Dans certains cas de soudage de tôle épaisse, et haute résistance mécanique, le courant pulsé est souvent à appliquer afin de stabiliser le développement du noyau. Cette pulsation comporte le temps de chaud, séparé par le temps de maintien ou le temps de froid. Le nombre de cycles supplémentaires pour le posttraitement thermique est souvent adapté à l'assemblage de tôles hautes résistances.
- ✚ Temps de maintien : le temps de maintien est nécessaire à la solidification par l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit d'eau de refroidissement.

En général, les ordres de grandeur des paramètres de soudage sont les suivants :

- Intensité de soudage en KA, sous quelques V, (environ 7 à 10 kA)
- Effort de serrage en daN, (comprise entre 230-600 daN et dépend du comportement mécanique de l'acier)
- Durée d'un cycle, environ 1 seconde. (Sans modification particulière des conditions de soudage, ni pré-, ni post-chauffage) La détermination de ces paramètres se base préalablement sur la norme française ; [NFA 87-001]/ISO No. 18278/2.

✚ Électrode : Les électrodes sont des éléments essentiels pour ce procédé. Un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la Figure II.8. C'est un paramètre externe, qui influe directement sur le domaine de soudabilité car il gouverne la taille du contact aux interfaces par son profil de face active.

L'électrode joue trois rôles principaux :

- mécanique : c'est d'abord pendant le phase de serrage pour assurer le contact électrique entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur définie pour le soudage. Pendant le soudage et le maintien, l'électrode sert comme une stabilisatrice pour maintenir la zone fondue pendant le chauffage et le refroidissement. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit avoir une bonne tenue mécanique à chaud.
- électrique : la forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique.
- thermique : l'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface. Le matériau de l'électrode donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique.

Pour réponse à ce cahier des charges, l'alliage de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr, et Cu-Cr-Zr) est très répandu pour le matériau de l'électrode grâce à ses performances en tenue mécanique à chaud et la bonne conductivité électrique et thermique. L'électrode en alliage de cuivre à dispersoïde (Cu-Al₂O₃) avec une meilleure tenue mécanique à chaud est également commercialisée, mais avec un prix plus élevé.

La géométrie de l'électrode est variable selon les applications. Le profil de face active et le diamètre de l'électrode influent directement sur le procédé. En ce qui concerne les

paramètres du domaine de soudabilité, on peut constater que plus le diamètre de la face active n'est grand, plus le courant et l'effet Joule sont répartis en surface à cause de l'augmentation de la taille du contact. Au contraire, l'utilisation de diamètre d'électrode trop petit ne permet d'obtenir la taille du noyau suffisamment large, et par conséquent entraîne un moine tenu mécanique du point.

En effet, pour établir un domaine de soudabilité, la sélection du diamètre d'électrode, à priori, conseillée par la norme est cohérence avec l'épaisseur des tôles à souder(Figure II.8).

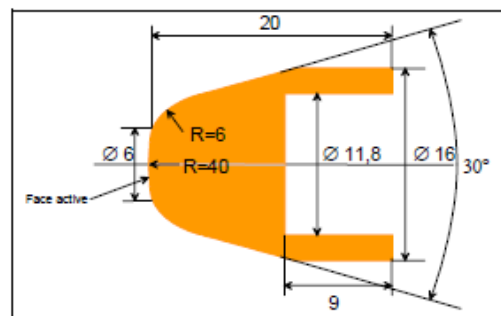


Figure. II.8 : Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm [16]

Après un certain nombre de points soudés, la face de l'électrode est détériorée et agrandie par la déformation thermique répétée en compression à chaud. Cet agrandissement de face active réduit notamment le diamètre du noyau souhaité. En premier lieu, le recalage de l'intensité s'effectue en augmentant sa magnitude pour maintenir la taille de diamètre du noyau défini. Avec un certain nombre de points soudés après recalage, il est inévitable de remplacer les électrodes à cause du mauvais état de la face active. Le nombre maximum des points soudés avant le remplacement définit la durée de vie des électrodes. Elle dépend principalement du type de revêtement ainsi que la qualité de surface pour une nuance donnée. Elle pourrait être de plusieurs dizaines de milliers pour l'assemblage de tôles nues et de quelques centaines de points pour l'assemblage de tôles à revêtement organique.

II.2.3 Domaine de Soudabilité :

➤ Définition :

Il s'agit d'une plage d'intensités efficaces du courant de soudage permettant d'obtenir un point de soudure de tenue mécanique satisfaisant aux critères définis auparavant.

Dans la pratique, on parle de diamètre du bouton déboutonné et donc la tenue mécanique varie avec l'intensité efficace. Le critère prédéfini correspondant à la norme est la taille de diamètre du noyau acceptable avec une intensité efficace minimale.

Par « domaine de soudabilité », (Figure II.9), on entend ainsi l'intervalle de $[I_{\min}, I_{\max}]$, où I_{\min} est l'intensité minimale donnant un diamètre acceptable et I_{\max} est l'intensité maximale ne provoquant pas d'expulsion. L'expulsion s'interprète par une chute de signal d'effort en cours de soudage.

On parle souvent de cette limite basse/haute en représentant le domaine de soudabilité. Pour déterminer le domaine de soudabilité, on applique souvent la condition prédéfinie, qui est indiquée par la norme, pour fixer trois paramètres suivants : le temps de soudage, le temps de maintien, et la magnitude de l'effort de soudage.

En pratique, on souhaite d'obtenir la taille de diamètre maximale avant l'expulsion pour une meilleure tenue mécanique à la rupture. Passé le seuil d'expulsion, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille, soit une des faces extérieure de la tôle. Sous l'effet de l'effort exercé par les électrodes, on assiste à une éjection ou une expulsion de métal fondu.

Compte tenu des types d'électrodes, l'intensité de soudage est variée en cas de différent type d'électrode utilisé.

Car l'électrode joue un rôle sur la taille du contact pendant le soudage. Il est donc à noter que le type de profil de l'électrode est considéré comme un des paramètres importants autant que l'intensité, le temps de soudage, le temps de maintien.

Généralement, on peut constater que plus le domaine de soudabilité est situé vers les hautes intensités, plus l'énergie à fournir pour réaliser un bon diamètre du noyau est élevée, ainsi que le domaine de soudabilité est étroit, plus le réglage de la machine de soudage est délicat.

En effet, nos études se concentrent sur la taille maximale du noyau et l'intensité trouvée en haut du domaine de soudabilité et la validation de la taille et de la forme de la soudure.

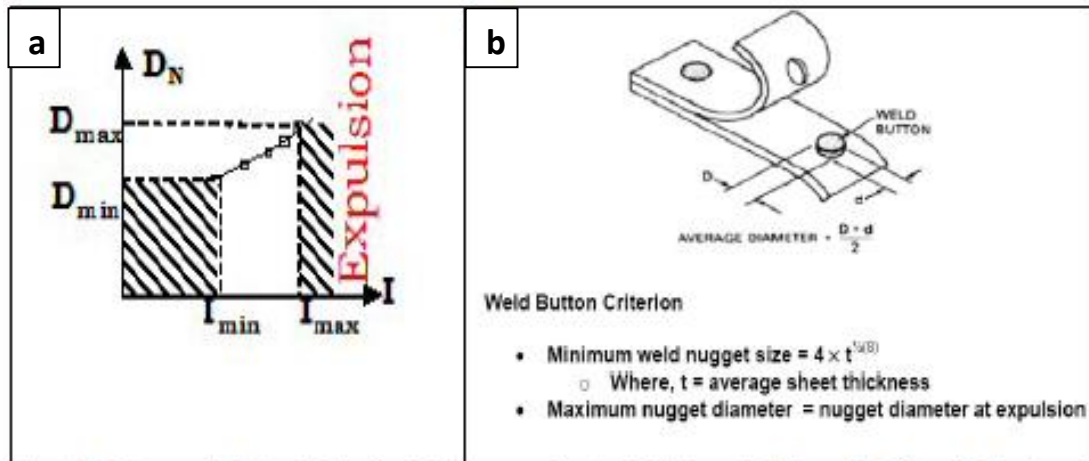


Figure. II.9 a) Variation qualitative du diamètre de bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à $4t^{1/3}$ (t = épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en mm) [16]

II.2.4 Microstructures d'un Point Soudé

➤ Généralité :

La géométrie d'un point est définie en trois zones métallurgiquement distinctes :

- Le noyau fondu,
- La zone affectée thermiquement (ZAT),
- Le métal de base.

La géométrie d'un point soudé sur la figure II.10 présente trois particularités quel que soit type d'assemblage. Il s'agit de la discontinuité de l'assemblage, une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitation mécanique, et l'indentation d'électrode des surfaces externes de l'assemblage.

Généralement, la taille du noyau est symétrique par rapport à son plan de section s'il s'agit d'un celui d'un assemblage homogène. Le noyau dissymétrique est également envisagé dans le cas de l'assemblage hétérogène ou d'un mauvais alignement entre l'axe vertical d'électrodes. Qualitativement, la tenue mécanique d'un point dépend du diamètre du noyau. Plus la taille est importante, plus la tenue en mécanique est élevée.

Procède de soudage par point

Le critère de soudabilité est donc défini en basant sur la recherche de l'intensité de soudage nécessaire afin d'engendrer le diamètre du noyau minimal et maximal.[16]

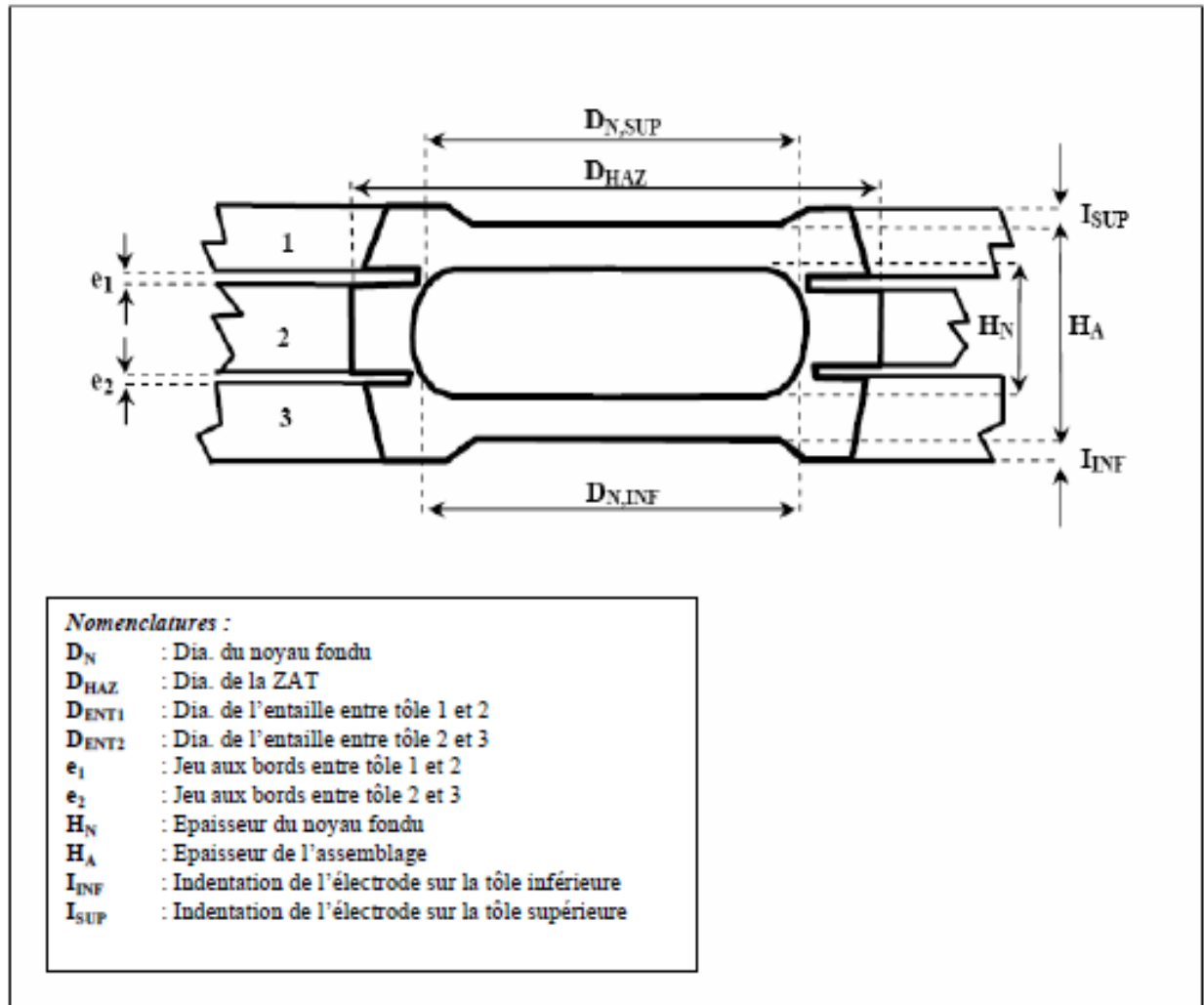


Figure. II.10: Différentes zones métallurgiques et la géométrie d'un point soudé en cas d'un assemblage de trois tôles [16]

II.2.5 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle -tôle est créée par l'effet joule durant le passage du courant dans les conducteurs. la quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation (FigureII.11):

$$Q = \int_0^T RI^2 dt \quad \text{II.2}$$

Avec R résistance électrique rencontrée par le courant,

I : Intensité du courant,

T : Durée du phénomène,

t : Variable temps.

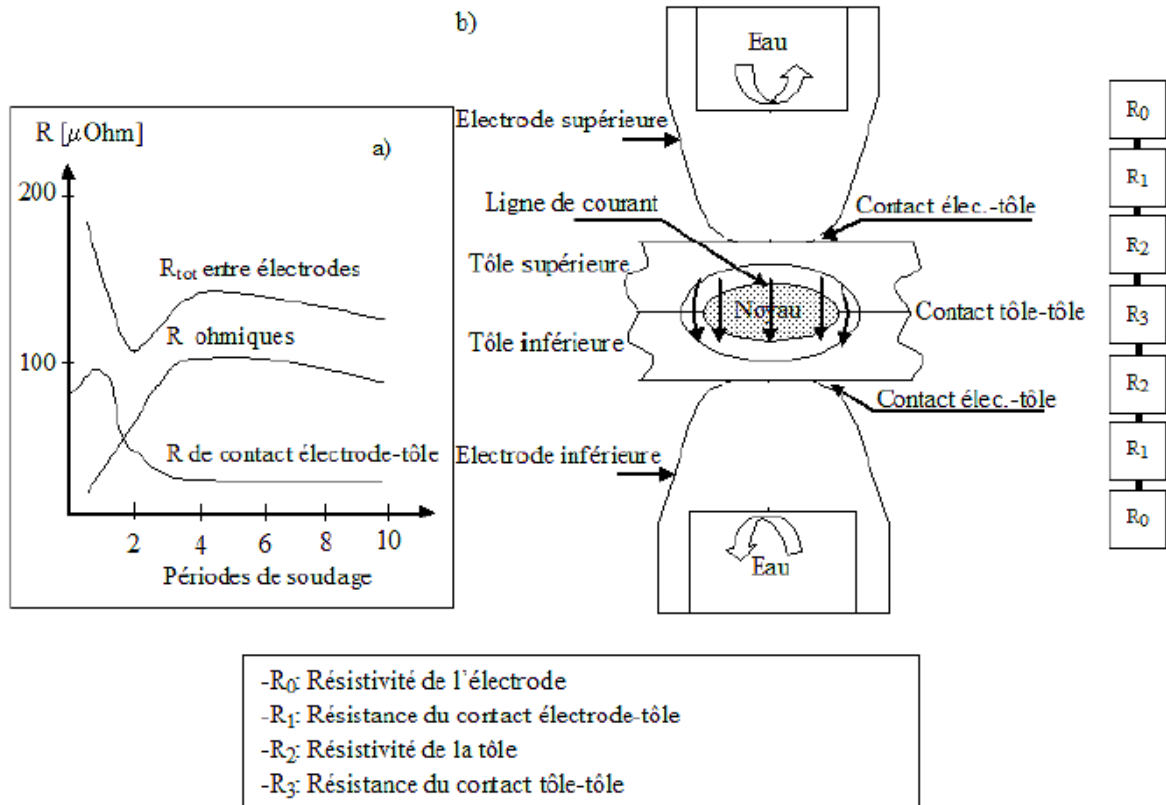


Figure II.11 : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point [16]

II.2.6. Interaction Electrique, Thermique, Métallurgique, Mécanique :

La difficulté de la compréhension du mécanisme de la formation de la soudure en soudage par résistance par point consiste, en la connaissance des différents états électriques, thermiques, métallurgiques et mécaniques et leurs interactions (Figure II.12) [17]

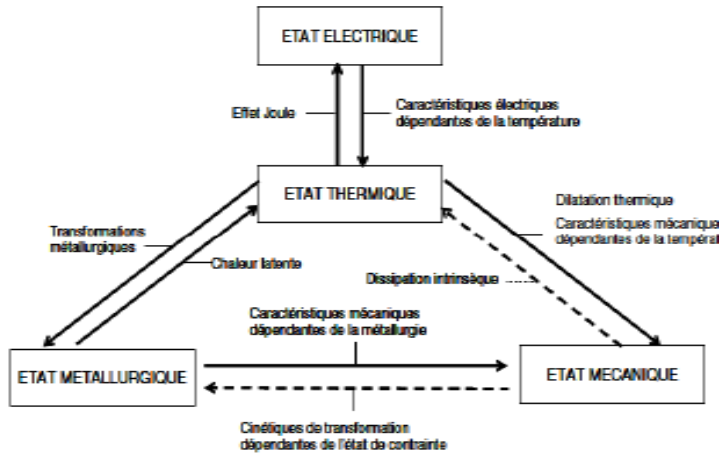


Figure II.12 : Schéma des interactions entre les états électrique, thermique, métallurgique, mécanique[17]

II.2.7. Le Point Soudé

➤ Géométrie

La figure II.13 présente le schéma d'un point soudé selon une coupe. La géométrie d'un point soudé présente trois particularités :

- Discontinuité de l'assemblage
- Présence d'une entaille susceptible de concentrer les contraintes en cas de sollicitation mécanique
- Indentation des faces externes de l'assemblage due à l'effort appliqué sur les électrodes

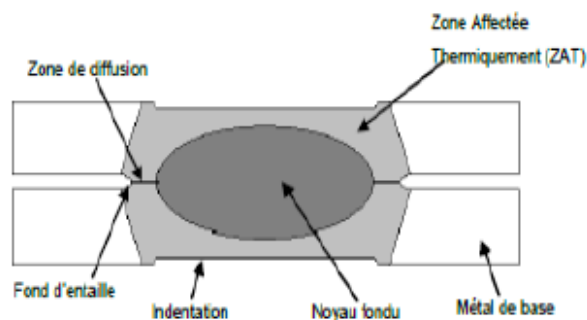


Figure II.13 : Schéma d'un point soudé selon une coupe.[18]

Globalement, trois zones principales peuvent être distinguées. La première est le noyau fondu, zone où l'acier est passé à l'état liquide puis s'est refroidi très rapidement jusqu'à la température ambiante. La deuxième est la zone dite affectée thermiquement (ZAT), c.à.d. la zone où la microstructure du métal de base a été modifiée par le cycle thermique imposé par le procédé de soudage. On considère en général que cette zone est celle où l'acier a vu des températures allant de 600 C^0 . Enfin la dernière zone est celle du métal de base (MB) proprement dit. Où la microstructure est inchangée.

➤ Microstructures

L'opération de soudage par point se caractérise par un cycle thermique très modifié, profondément la microstructure du métal de base au voisinage du point soudé. Le métal subit un chauffage à des vitesses de l'ordre du millier de degrés Celsius par seconde jusqu'à une température pouvant aller au-delà de la température de fusion. Il s'en suit immédiatement un refroidissement très rapide dont la vitesse dépend du paramètre de soudage. Un cycle de soudage par point complet est typiquement effectué en moins d'une seconde. Au niveau microstructural, on distingue plusieurs zones, illustrées schématiquement à la figure II.14

- La zone associée au métal de base **MB** : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600 C^0 environ si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.

- La zone subcritique **SCZAT** : zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600 C^0 ET $Ac1$. On n'observera globalement aucun effet sur la taille des grains mais certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial. Au chauffage, une partie du carbone peut être remis en solution. Au refroidissement, on peut observer de la précipitation-coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, des phénomènes de revenu (de la martensite du métal de base en fonction de la vitesse de refroidissement).

- La zone inter critique **ICZAT** : zone où la température est arrivée entre $Ac1$ et $Ac3$. L'austénitisation partielle (coexistence de la ferrite ∞ et de l'austénite A) conduit à des modifications importantes de la microstructure.

- La zone à grain fins **CFZAT** : zone de température entre $Ac3$ et 1100 C^0 environ. D'après le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est totale dans cette zone. Dans

le cas du soudage, AC3 peut être décalé par la rapidité du cycle thermique .au chauffage. La nouvelle structure austénitique, non homogène et globalement fine, remplace la microstructure initiale, suite au refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainito-martensitique fine avec éventuellement quelques hétérogénéités.

- La zone à grande grains **GGZAT** : zone ente 1100⁰ C environ et la température de fusion .on assiste à une forte croissance du grain austénitique qui confère à cette zone une forte trempabilité.la microstructure obtenu après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.
- Zone fondu **ZF** : outre une fine zone de liaison (difficilement observable) constitué par la zone semi-solide.la dernière zone est la zone fondue, ou la température a dépassé la température de liquidus.la microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau. On peut observer de la ségrégation inter dendritique.
- Il apparait clairement que les profondes modifications de la microstructure du métal de base autour du point soudé peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la tenue mécanique du point.[18]

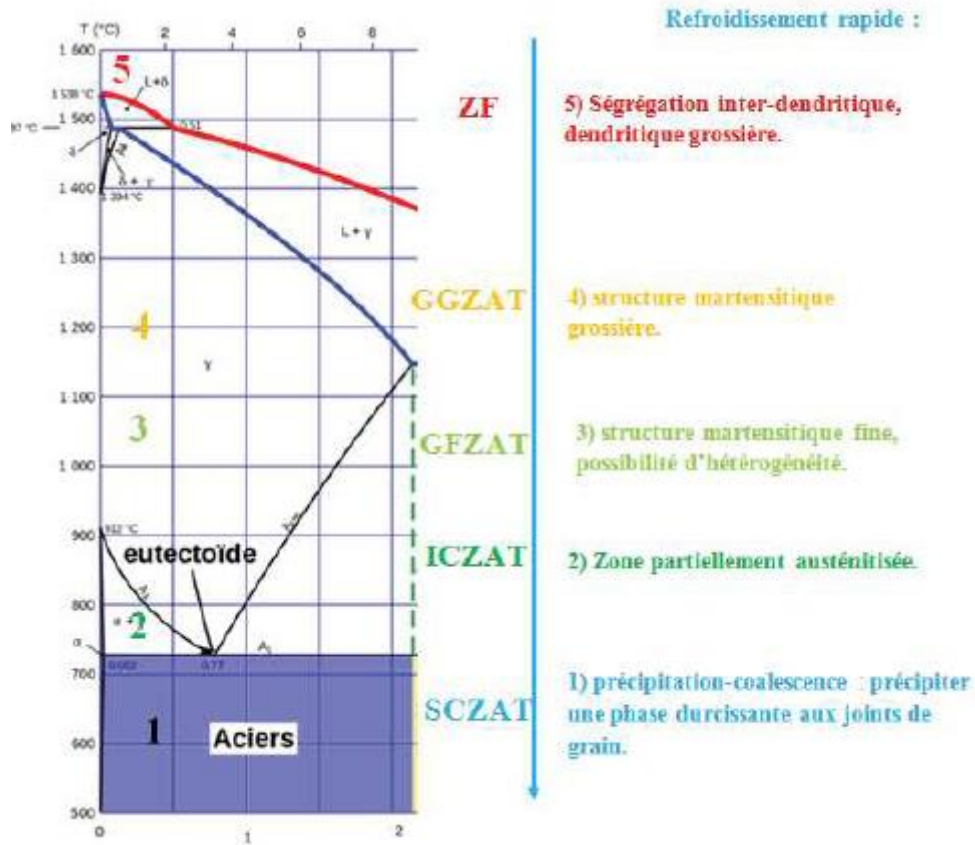


Figure II.14 : Microstructures générées par l'opération de soudage [18]

II-3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe du soudage par point, ainsi que les différents paramètres de ce procédé, nous proposons dans la suite l'étude de l'influence de ces paramètres sur le comportement mécanique des assemblages soudés par point.

III.1 Introduction

Lors du soudage, la modification des propriétés mécaniques du métal dépend fortement des contraintes résiduelles et des discontinuités géométriques telles que les désalignements, des fissures et des défauts internes. Ces discontinuités géométriques, créées sur le joint soudé, ont tendance à augmenter le champ de contraintes locales affectant ainsi la sécurité et la fiabilité des structures soudées.

III.2 Concentration des contraintes

Les discontinuités, observées dans une géométrie structurale, sont inévitables dans le processus de conception ou dans les pièces d'assemblage tel que le cordon de soudure. Ces discontinuités augmentent la concentration de contrainte locale par rapport à l'ensemble des zones de la structure comme il est présenté sur la figure III.1.

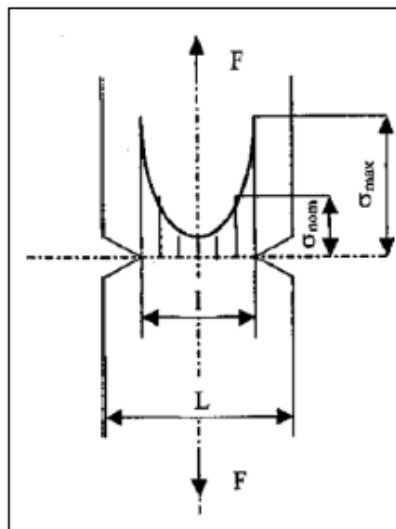


Figure III.1 : Concentration de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction [19]

L'accroissement du champ de contrainte locale peut être exprimé par le facteur de concentration de contrainte élastique, K_t qui doit être connu dans l'analyse de l'ingénierie et la conception. Le facteur théorique K_t est défini comme le rapport entre la contrainte maximale au fond d'entaille σ_{max} et la contrainte nominale de référence σ_{nom}

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

III.1

Cependant, K_t est une valeur idéale basée sur le comportement élastique linéaire et dépend uniquement des dimensions et de la partie entaillée. Dans la pratique, un certain nombre de phénomènes peuvent agir pour atténuer les effets de la concentration de contrainte. La déformation plastique locale, les contraintes résiduelles, le rayon d'entaille, la taille de la pièce, la température, les caractéristiques des matériaux (par exemple, la taille des grains, l'écroutissage), et le type de chargement (statique, cyclique) peuvent influencer la mesure de la contrainte d'entaille maximale locale.

Pour faire face aux divers phénomènes qui influencent la concentration de contrainte, le facteur de concentration de contrainte effective est calculé dans le domaine élasto-plastique.

Le facteur de concentration de contrainte effective K_σ d'une éprouvette est défini comme étant le rapport entre la contrainte locale σ_L (contrainte pour laquelle l'endommagement structural est initié dans l'échantillon) et la contrainte nominale

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_{nom}} \quad \text{III.2}$$

Pour un comportement non linéaire des matériaux, où la déformation plastique locale peut se produire près d'un trou, Neuber a établi une règle qui est utile au-delà de la limite élastique :

$$K_\sigma = (K_\sigma \cdot K_\epsilon)^{1/2} \quad \text{III.3}$$

$K_\epsilon = \epsilon_{max} / \epsilon_{nom}$ Définit le facteur de concentration de contrainte efficace, où est σ_{max} la déformation obtenue à partir du comportement du matériau pour le niveau de contrainte.

Dans un joint soudé, la concentration de contraintes existe à l'échelle macroscopique sous forme de contrainte liée au type d'assemblage et à la géométrie du cordon de soudure (Figure III.2), et à l'échelle microscopique, sous forme des contraintes induites localement par l'existence des défauts de soudage au pied ou à la racine du cordon (porosité, inclusion, fissure etc.).

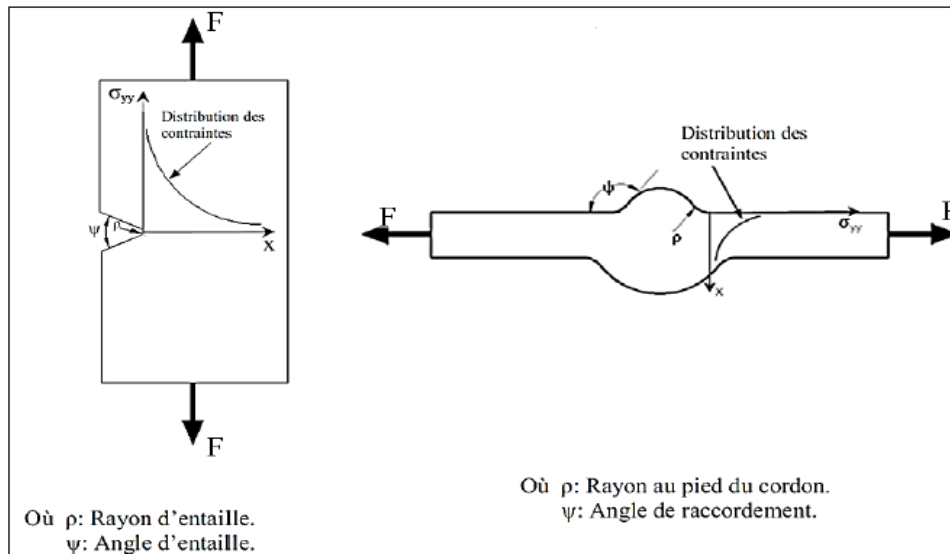


Figure III.2 : Similarité de distribution des contraintes dans une plaque entaillée (gauche) et Un joint soudé bout-à-bout (droite) [19]

III.3 Les contraintes résiduelles de soudage

Les contraintes résiduelles dans un matériau ou une structure sont les contraintes qui existent dans le corps quand il est au repos et en équilibre avec son environnement (sans l'application des chargements extérieurs). Les contraintes résiduelles sont souvent générées pendant l'élaboration des composants. Concernant le soudage, ces contraintes sont d'origine thermique principalement et mécanique. La vitesse de refroidissement et la différence de coefficient de dilatation thermique sont à l'origine de la présence de ces contraintes.

Ces contraintes résiduelles peuvent être très préjudiciables sur la performance d'un matériau ou sur la durée de vie d'un composant. Ces contraintes résiduelles se développent au cours de la plupart des processus de fabrication impliquant la déformation des matériaux, le traitement thermique, ou la modification des propriétés d'un matériau. Elles peuvent être considérées comme une des conséquences de l'interaction entre la température, la déformation et la microstructure. Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer le développement de contraintes résiduelles, par exemple, la conductivité thermique, la capacité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la plasticité, les mécanismes de transformation, la transformation plastique, etc.

Pour le soudage, sous l'effet d'une transition thermique forte et localisée, le métal de base subit un schéma complexe de dilatations thermiques et des rétrécissements métallurgiques générant la formation des contraintes résiduelles. En effet, les soudures qui connaissent une montée en température, sont exposées à la déformation thermique à cause de la dilatation thermique. La dilatation thermique dans le métal fondu est très limitée étant donné que le métal de base froid empêche la dilatation et par conséquent le métal fondu sera soumis à une compression (comme illustré sur la Figure III.3, Section B-B). A ce stade, le métal d'apport est à l'état liquide, la compression conduit alors à une déformation plastique. Par refroidissement et passage à l'état solide, le métal fondu ne peut pas circuler facilement et subit donc sous pression par le métal de base.

Les contraintes résiduelles sont localisées dans le joint soudé et à son voisinage. En général, elles atteignent un niveau proche de la limite d'élasticité du métal. Dans le cas d'un chargement multiaxial, elles peuvent conduire à la rupture fragile d'un joint soudé. De fortes contraintes résiduelles de traction dans les zones proches de la soudure peuvent provoquer l'endommagement, voire la rupture de l'assemblage.[5]

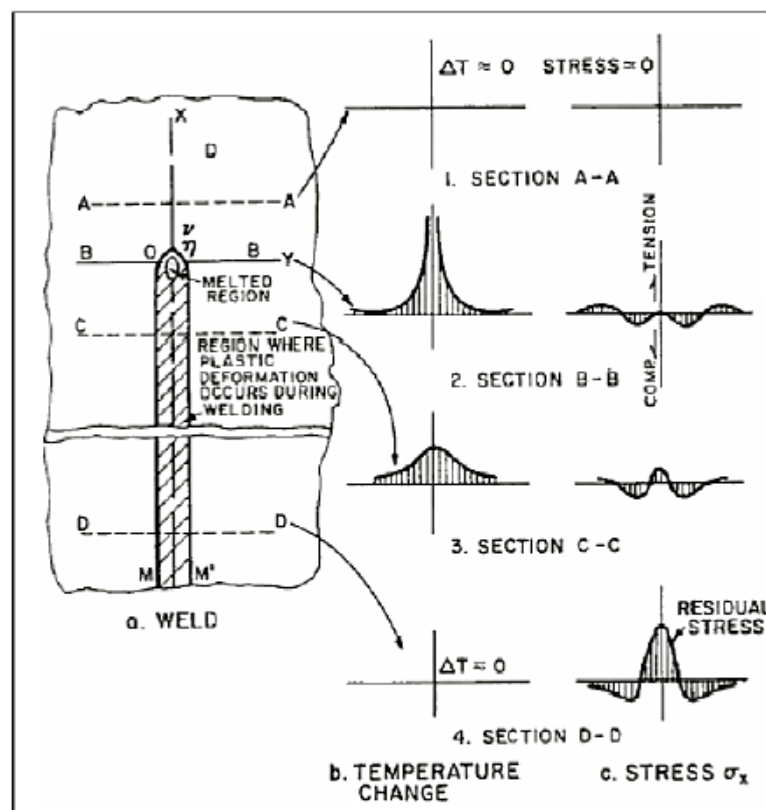


Figure III.3 : Vue schématique de l'évolution de la température avec la contrainte résiduelle Au cours du soudage [19]

III.3.1 Effet de contraintes résiduelles sur la rupture fragile

Les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans la rupture fragile du matériau.

Cependant, les contraintes résiduelles peuvent aussi avoir un effet sur d'autres mécanismes de rupture (rupture ductile, rupture par fatigue...) comme il est rapporté par Withers.

La fragilisation par l'hydrogène est un phénomène général qui abaisse la résistance à la rupture des aciers à haute résistance et soulève donc le risque de rupture des composants

Dans le cas de la rupture induite par hydrogène, le rôle des contraintes résiduelles est potentiellement double.

En premier lieu, l'effet mécanique des contraintes résiduelles s'additionne aux contraintes provoquées par la charge extérieure appliquée sur le composant. En second lieu, le champ de contrainte résiduelle hétérogène augmente le taux de transport de l'hydrogène vers des sites potentiels de rupture du composant.

III.4 La Rupture

III.4.1 Rupture fragile

La rupture fragile ou la rupture par clivage s'accompagne de très peu de déformation plastique. La rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques.

Dans les alliages métallique ce type de rupture est soit :

- ❖ Trans granulaire : rupture par clivage au par glissement dans un grain.
- ❖ Inter granulaire : rupture par glissement le long des joints de grain.

Le clivage se produit préférentiellement le long de plan cristallographique bien définis selon les matériaux, les cubiques centrées (CC) alors que les cubiques a face centrée (CFC) clive difficilement. Dans les cristaux HC à basse température se produit également par clivage.

III.4.2 Rupture ductile

Soit un alliage métallique constituer de deux phases:

- ❖ La matrice
- ❖ Des particules de seconde phase, inclusions au précipité Ce mode rupture due à la

naissance des cavités (vide) sous l'effet des contraintes et les déformations les cavités apparentes sur les inclusions ou les précipités.

Les vides se croissent au cours de la déformation en donnant des cavités tridimensionnelles et coalescent pour former des ruptures locales. Mais il faut suivre la déformation dans la matrice pour déterminer l'influence de l'état structural qui dépend de la morphologie, les vides se croissent au cours de la déformation en donnant des cavités tridimensionnelles et coalescent pour former des ruptures locales. Mais il faut suivre la déformation dans la matrice pour déterminer l'influence de l'état structural qui dépend de la morphologie, suivant que l'acier est à structure ferrito-perlitique ou à cémentite globulaire. Les bandes de glissement se manifestent différemment en relation des obstacles que doivent contourner les dislocations à l'échelle du grain les déformations sont réparties plus ou moins d'une manière homogène pour donner la ductilité macroscopique en retardant ou en favorisant l'apparition de rupture locale.

La cavité à le plus souvent au tout début une forme bidimensionnelle épousant la forme de l'interface inclusion -matrice dont l'épaisseur est très faible dans le premier stade de la déformation, la fissure se referme lors du retour élastique (déchargement).

III.4.3 Rupture par fatigue

La fatigue c'est la modification des propriétés du métal soumis à des variations périodiques d'efforts (exemple : vibration...).

Le faciès de rupture par fatigue varie suivant le type de sollicitation (flexion rotative, tension...) cependant le faciès présente toujours deux zones.

- ❖ Zone lisse c'est la zone de fatigue.
- ❖ Zone rugueuse c'est la zone de cassure instantanée.

III.4.5 Rupture inter granulaire:

Il y a séparation des grains entre eux au niveau des joints ou s'explique par une faible cohésion des joints grain. La rupture inter granulaire peut être une :

- ❖ Rupture ductile : (précipités inter granulaires)
- ❖ Rupture fragile : ségrégation d'éléments indésirables au niveau des joints (couche mono)

[20]

III.4.2 Mécanisme de la rupture fragile

Ce mode de rupture est provoqué par la propagation rapide d'une fissure initiée par un défaut dans la microstructure ou naturellement présente dans le matériau. La concentration de contrainte, provoquée par la présence d'un défaut géométrique, permet d'atteindre une contrainte critique.

Après avoir atteint cet état critique, la propagation de fissure se produit très rapidement le long d'un plan cristallographique particulier et implique généralement peu de déformation plastique. Dans les matériaux élasto-plastiques réels, les grandes déformations plastiques sont souvent nécessaires pour initier la rupture fragile.

La contrainte critique de la rupture fragile est relativement indépendante de la température et de la vitesse de déformation. Elle peut être calculée à partir de l'énergie de cohésion du cristal :

$$\sigma_c = \sqrt{E\gamma_s/b} \quad \text{III.4}$$

Avec :

σ_c : La contrainte critique (MPa),

E : Le module d'Young (MPa),

γ_s : L'Énergie de surface (J.m⁻²),

b : Distance inter réticulaire (m).

Dans la plupart des cas, c'est le type de rupture le plus défavorable puisqu'il est généralement difficile d'identifier les conditions dans lesquelles la structure est sur le point de rompre à cause de l'absence d'endommagement visible avant une défaillance catastrophique. Par conséquent, le problème de prévoir et prévenir les ruptures fragiles est l'un des principaux obstacles que l'ingénieur est confronté à évaluer pour assurer la fiabilité d'un composant.

La rupture fragile a été reconnue comme un phénomène très localisé où l'amorçage de la rupture est principalement contrôlé par la présence de défauts qui se produisent intrinsèquement dans le matériau.

La mécanique de la rupture permet de quantifier les combinaisons critiques de trois variables importantes (la contrainte appliquée, la taille du défaut et de la ténacité des matériaux) et de déterminer le comportement du système.[19]

III-5 -Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les paramètres influençant la fiabilité des assemblages soudés, tels que les discontinuités (porosités) qui provoquent une concentration de contrainte très importante et les contraintes résiduelles de traction qui peuvent conduire à la rupture fragile d'un joint soudé. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons les modèles des ruptures existant dans la bibliographie.

IV.1 Introduction

Nous proposons dans cette partie une étude expérimentale sur plusieurs échantillons de pièces soudées par points en faisons varier les paramétrés tel que (Le type du matériau, l'épaisseur des pièces, l'intensité du courant, l'effort appliqué entre les électrodes et le temps du soudage).

Afin d'étudier l'influence tu type du matériau nous avons choisi des pièces en acier doux, des pièces en aciers galvanisé et des pièces en acier inoxydable.

Pour les autres paramètres nous avons choisi des pièces en aciers doux pour chaque essai on fais varier un des paramétrés et on fixe les autres, le choix des différents paramètres est représenté sur le tableau (IV.7).

L'étude expérimentale a été réalisé en deux parie : une partie réalisé à Société métalloplastique SOREMEP et la deuxième partie réalisé au laboratoire des structures à université Abou Bekr BELKAID

IV.2 Matériaux d'étude : Acier doux galvanisé Z275, aciers doux non alliés, inox 304L

IV.2.1 Définition acier doux galvanisé Z275

Acier recouvert d'une couche de zinc (par un procédé de trempage à chaud ou de dépôt électrolytique) dans le but de le rendre plus résistant à la corrosion. L'acier galvanisé est notamment utilisé dans l'industrie automobile, la construction d'édifices et de structures telles que les pylônes.

Caractéristiques chimiques et mécanique

Elément	C	P	S	Mn	Si
Composition en coulée	<0.12%	<0.045%	<0.045%	<0.060%	<0.50%

Tableau IV.1 : Composition Chimique de l'acier doux revêtus Z275

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A ₈₀ (%)
≤ 280	270 < Rm < 410	≥ 28

Tableau IV.2 : Caractérisations mécanique de l'acier doux revêtus Z275

IV.2.2 Définition d'acier

Les aciers pour formage à froid et emboutissage sont des aciers doux non alliés

(Tableau IV.3) laminés à froid puis recuit en atmosphère contrôlée.

Ces aciers présentent une excellente aptitude au formage et emboutissage grâce à leurs caractéristiques mécaniques maximales garanties (limite d'élasticités et résistance à la traction) et des niveaux de ductilité (allongement à la rupture) (Tableau IV.4).

Les qualités proposées sont conformes à la norme EN 10130-2007. [21]

➤ Caractéristiques chimiques et mécanique

Désignation	Carbone	Manganèse	Phosphore	Soufre	Silicium
emboutissage profond	≤0.10	≤0.50	≤0.040	≤0.040	≤0.040

Tableau IV.3 : Composition Chimique de l'acier. [22]

Désignation	Résistance à la traction (N/mm ²)	Allongement %	Dureté	
			HRB	Vickers
emboutissage profond	270-410	≥ 28	57	≤ 105 HV

Tableau IV.4 : Caractéristique mécanique de l'acier [22]

IV.2.3 Définition d'acier inoxydable

Acier inoxydable avec une résistance à la corrosion moyenne, intermédiaire entre celle du 302 et du 316. La teneur limitée en carbone prévient spécialement la corrosion inter-granulaire, mais il ne contient pas de molybdène qui améliore la résistance aux acides non oxydants et à la corrosion par piqûres. En raison de son usinabilité limitée, on utilisera de préférence des aciers optimisés (PX, PM, 316 LS) lorsque des usinages complexes sont nécessaires. Dans des milieux chlorés ou l'eau saline, il est préférable

d'utiliser une nuance au molybdène (type 316L). Pour des pièces en contact prolongé avec la peau, il est préférable d'utiliser un acier inoxydable type 316L.

➤ Caractéristiques chimiques et mécanique

Désignation	Résistance a la traction Rm (MPa)	Limite d'élasticité minimale ReH	ALLONGEMENT
emboutissage profond	450-700	175 -220	35-45 /100

Tableau IV.5 : caractérisations mécanique inox 304L [23]

C	Mn	S	Ni	P	S	Cr	N
0.03	2	1	8 -10.5	0.045	0.015	17.5-19.5	011

Tableau IV.6 : Composition Chimique d'inox 304 L[23]

IV.3 Etapes de la réalisation des éprouvettes

Les échantillons d'essai sont constitués de deux pièces rectangulaire de longueur 100 mm et largeur 20 mm, soudés en un point comme représenté sur la figure IV.1.

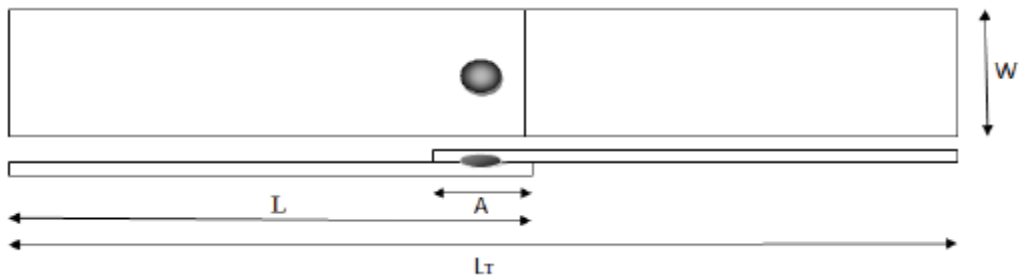


Figure IV.1 : Dimension des éprouvettes soudées

Avec :

$L = 100 \text{ mm}$

$L_T = 175 \text{ mm}$

$W = 20 \text{ mm}$

$A = 25 \text{ mm}$

IV.3.1 Machines utilisées

IV.3.1.1 Poinçonneuse (AMADA)

Une poinçonneuse (Figure IV.2) est un outil ou une machine-outil destiné à réaliser un poinçonnage dans diverses matières par l'intermédiaire d'un poinçon.

La poinçonneuse permet le marquage, le découpage ou la perforation d'un objet.



Figure IV.2 : Poinçonneuse (AMADA).

A. Opération de découpage

Les tôles ont été découpées avec la poinçonneuse AMADA pour leur donner la forme voulue (Figure IV.3)



Figure IV.3 : (A) Tôle avant découpage (B) Après le découpage.

IV.3.1.2 Machine de soudage (TECNA)

La machine de soudage par résistance (TECNA) un moyen d'assembla indémontable de tôles associée à un tableau de commande pour le réglage de différents paramètres (FigureIV.4)



Figure IV.4 : Machine de soudage

A.1 Réglage des paramètres de soudures

Nous avons choisi d'étudier cinq paramètres principaux :

- Intensité du courant (en Ampères)
- Temps de soudage (en périodes ou millisecondes)
- Effort sur électrodes (en Bar)
- Type de matériau (acier doux, acier galvanisé, acier inoxydable)
- Epaisseur de la pièce (en mm)

Paramètres	<u>Essai 1</u>	<u>Essai 2</u>	<u>Essai 3</u>
Paramètre 1 :	Pièce (1)	Pièce (2)	Pièce (3)
Type du matériau	Matériau (acier)	Matériau 2 (inox)	Matériau 3 (galvanisé)
	T = 18 cycles	T = 18 cycles	T = 18 cycles
	I(KA) = 14 KA	I(KA)= 14 KA	I(KA)= 14 KA
	Ep =2 mm	Ep= 2mm	Ep= 2 mm
	F =6 bar	F = 6bar	F = 6 bar

Tableau IV.7 Paramètres de soudage avec différent type de matériaux

Paramètres	<u>Essai 1</u>	<u>Essai 2</u>	<u>Essai 3</u>
Paramètre 2 :	Pièce (4)	Pièce (5)	Pièce (6)
Temps de soudage (cycle)	Matériau (acier doux)	Matériau (acier doux)	Matériau (acier doux)
	T = 18 cycles	T = 20 cycles	T = 25 cycles
	I = 14 KA	I= 14 KA	I= 14 KA
	Ep= 2 mm	Ep= 2 mm	Ep= 2 mm
	F= 6 bar	F= 6 bar	F= 6 bar

Tableau IV.8 Paramètres de soudage avec différent temps de soudage

Paramètres	<u>Essai 1</u>	<u>Essai 2</u>	<u>Essai 3</u>
Paramètre 3 :	Pièce (7)	Pièce (8)	Pièce (9)
Intensité du courant (KA)	Matériau (acier doux)	Matériau (acier doux)	Matériau (acier doux)
	T= 18 cycle	T= 18 cycle	T= 18 cycle
	I=12 KA	I=10 KA	I=14 KA
	Ep= 2 mm	Ep= 2 mm	Ep= 2 mm
	F= 6 bar	F= 6 bar	F= 6 bar

Tableau IV.9 Paramètres de soudage avec différentes intensités du courant

Paramètres	<u>Essai 1</u>	<u>Essai 2</u>	<u>Essai 3</u>
<u>Paramètre 4:</u> Epaisseur des pièces soudées	Pièce (10)	Pièce (11)	Pièce (12)
	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 3 mm F(bar)= 6 bar	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 1.5 mm F(bar)= 6 bar	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 1 mm F(bar)= 6 bar

Tableau IV.10 paramètres de soudage avec différent épaisseur

Paramètres	<u>Essai 1</u>	<u>Essai 2</u>	<u>Essai 3</u>
<u>Paramètre 5 :</u> Pression appliquée entre les deux électrodes	Pièce (13)	Pièce (14)	Pièce (15)
	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 2 mm F= 6 bar	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 2 mm F= 7 bar	Matériau (acier doux) T= 18 cycle I=14 KA Ep= 2 mm F= 5 bar

Tableau IV.11 paramétrés de soudage avec différent pression appliquée entre les deux électrodes

A.2 Opération de soudage

Les pièces sont soudées avec le soudage par point à l'aide d'un passage de courant qui varie entre 8KA à 16 KA avec la présence d'un effort F qui maintien les de deux pièces pour assurer l'opération de soudage. (Figure IV.5).



Figure IV.5 Opération de soudage.

IV.3.1.3 Essai de traction

Après avoir réalisé les différents échantillons des pièces soudées avec les différents paramètres nous avons procédé aux essais de traction en appliquant une charge de traction sur les différentes pièces soudées jusqu'à la rupture (Figure IV.6).



Figure IV.6 : Opération de traction.

IV.4 Description de l'essai de traction

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de ce matériau, des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction 600 KN



Figure IV.7 : Machine de traction avec le système d'acquisition de données.

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge croissante jusqu'à provoquer la rupture. On détermine ainsi une limite élastique, et une charge de rupture. Ces charges sont rapportées à la section initiale de l'éprouvette, on mesure aussi l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, et la striction, qui est le rapport entre la section de l'éprouvette au niveau de la rupture et sa section initiale.

La limite élastique et la charge de rupture expriment la ténacité de l'acier, tandis que l'allongement et la striction sont des mesures de la ductilité.

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements (figure IV.8).

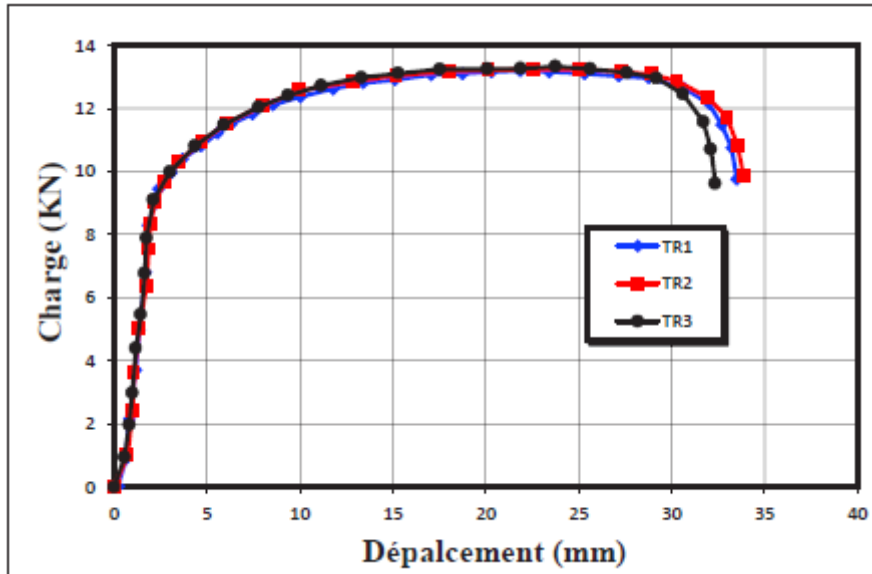


Figure IV.8 : Courbe De Traction Charge / Déplacement.

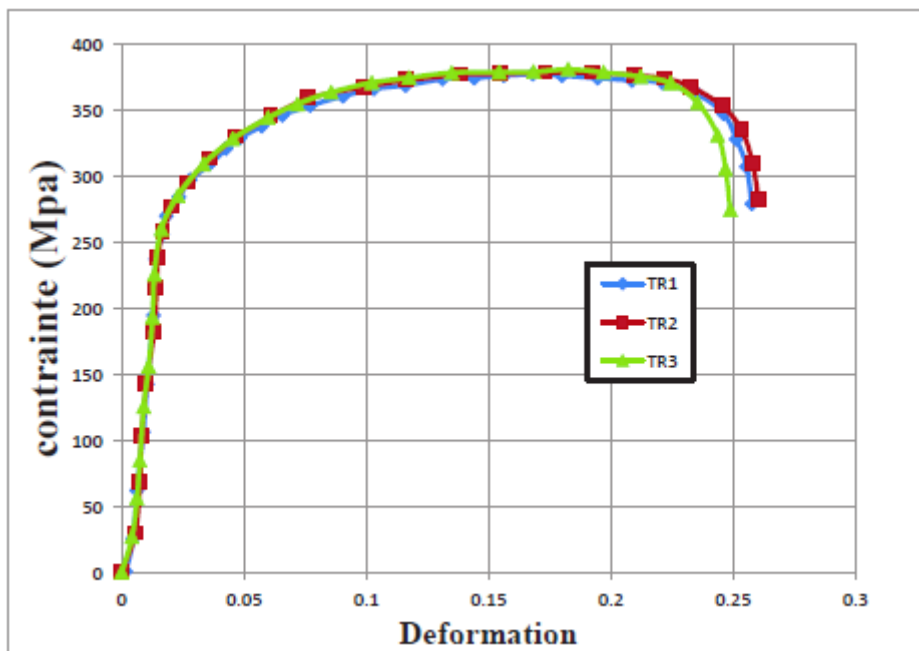


Figure IV.9 : Courbes Conventiennelles Contraintes / Déformations..

On peut déterminer à partir de la courbe de traction charge /déplacement plusieurs caractéristiques mécaniques :

Le module de Young, E, ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en Méga pascals (MPa) ou en Giga pascals (GPa) ;

La limite d'élasticité R_e , sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ; La résistance à la traction R_m , σ_m ou f_u (limite ultime), qui définit la limite à la rupture ;

L'allongement à la rupture $A\%$, qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ; Le coefficient de Poisson ν , qui correspond à la proportion entre la déformations transversale (diminution de section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique.

IV.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents paramètres à analyser dans notre expérimentation ainsi que les différents matériaux utilisés et les différentes étapes à réaliser commençant par le découpage des pièces, la soudure jusqu'à l'essai de traction.

Les résultats obtenus de ces différents essais sont représentés dans le chapitre suivant.

V.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats obtenus de l'essai de traction appliqué sur plusieurs échantillons de pièces soudées en faisant varier les paramètres tels que : le type du matériau des pièces soudées, le temps du soudage, l'intensité de courant, les épaisseurs des pièces soudées ainsi que la force sur les électrodes.

L'essai de traction va nous permettre de déterminer la force maximale appliquée jusqu'à la rupture de point de soudure ainsi que les courbes de traction qui vont nous permettre d'analyser le comportement mécanique des différents échantillons jusqu'à la rupture.

V.2 Effet du type de matériau sur le comportement mécanique des pièces soudées par point

Afin de déterminer l'influence du type de matériau des pièces soudées par point nous avons réalisé trois échantillons : Un en acier, un en galvanisé et un troisième en acier inoxydable en fixant les paramètres de soudage pour tous les échantillons (Efforts sur les électrodes : 6 Bars, Epaisseurs des pièces soudées = 2mm, Temps de soudure $T=18$ cycle et l'intensité du courant $I=14$ KA. (Figure (V-1).

La Figure V.2 représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture des pièces soudées par point.

On remarque que pour l'acier inoxydable la charge à la rupture R_m est de 672.177 N/mm² tandis que pour l'acier doux elle atteint la valeur de $R_m=406.795$ N/mm² et pour l'acier galvanisé on a $R_m=485.767$ N/mm².



Figure (V.1) : Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour différents types de matériaux

Avec :

P1 : Acier doux

P2 : Acier inoxydable

P3 : Acier galvanisé

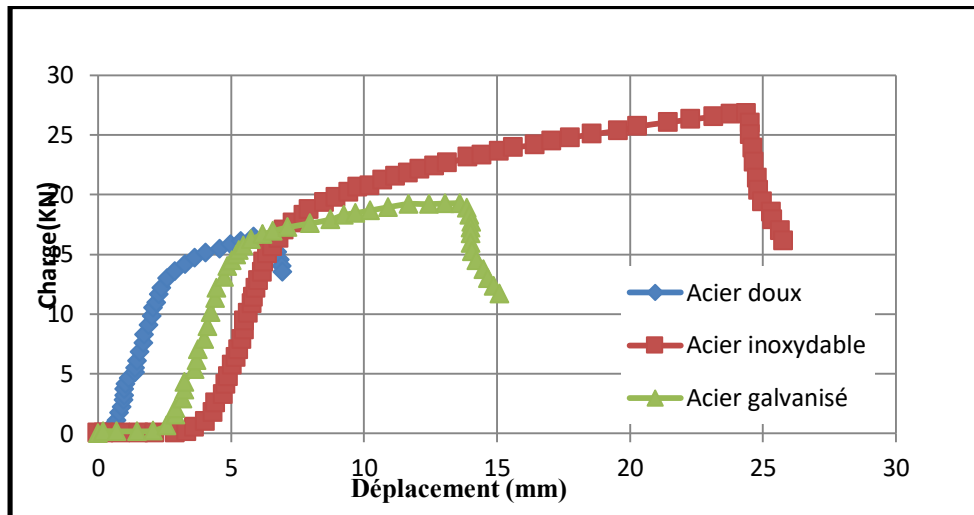


Figure (V.2): Effet des matériaux sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de (Épaisseur = 2mm, F=6 Bars, I=14 KA, T=18 Cycles)

La Figure V.3 représente la variation de la charge maximale en fonction du type des matériaux des pièces soudées.

On remarque que pour l'acier doux la charge maximale est de $F_m=16.272$ KN, pour l'acier galvanisé on a $F_m= 19.431$ KN tandis que pour l'acier inoxydable $F_m =26.887$ KN.

A partir de là on peut dire que la tenue du point de soudure dans le cas de l'acier inoxydable est plus importante que dans le cas d'un acier ordinaire ou galvanisé, car l'acier doux peut contenir des impuretés ou une couche corrosive qui peut affaiblir la tenue du point de soudure contrairement à l'acier inoxydable.

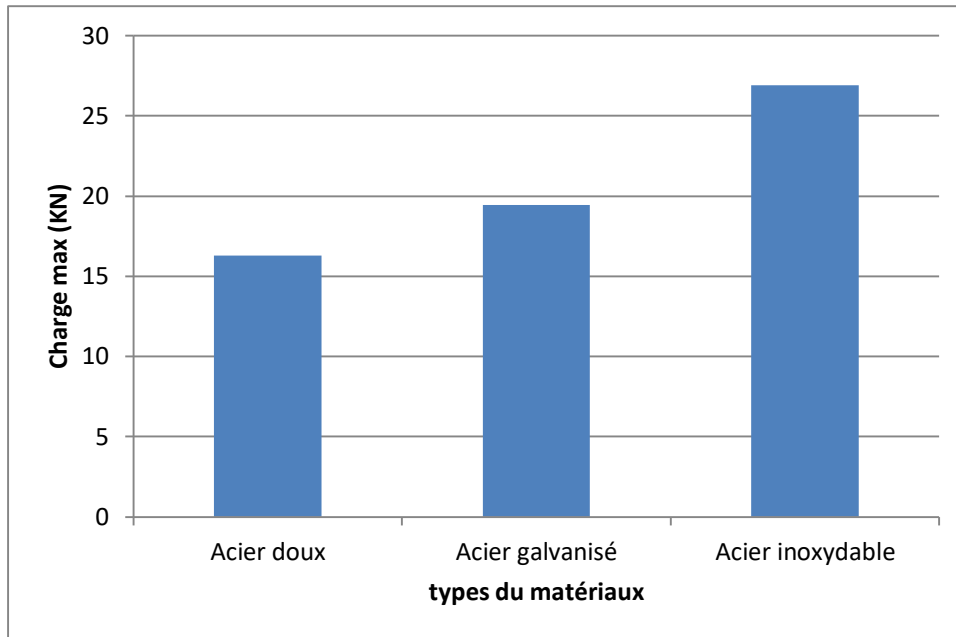


Figure V.3 : Variation de la charge maximale on fonction du type du matériau des pièces soudées par point (Pour une charge de $F=6$ Bars, Epaisseur des pièces = 2mm, l'intensité du courant $I=14$ KA et un temps de soudage $T=18$ Cycles).

V.3 Effet du temps de soudage sur le comportement mécanique des pièces soudées par point

Afin de déterminer l'influence du temps du soudage sur le comportement mécanique des pièces soudées par point nous avons réalisé trois échantillons pour différents temps de soudage ($T=18$ cycles, 20 cycles et 25 cycles) on fixant les autres paramètres de soudage pour tous les échantillons (Type de matériau : acier doux, Efforts sur les électrodes : $F=6$ Bars, Epaisseurs des pièces soudées = 2mm, et Intensité du courant $I=14$ KA. (Figure V-4).

La Figure (V.5) représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture des pièces soudées par point.

On remarque que plus le temps de soudage augmente la charge à la rupture augmente aussi, pour un temps de soudage $T=18$ la charge à la rupture R_m est de 384.757 N/mm², pour un temps $T=20$ cycles $R_m=393.940$ N/mm² tandis que pour un temps de soudage $T=25$ cycles on a $R_m=413.223$ N/mm².

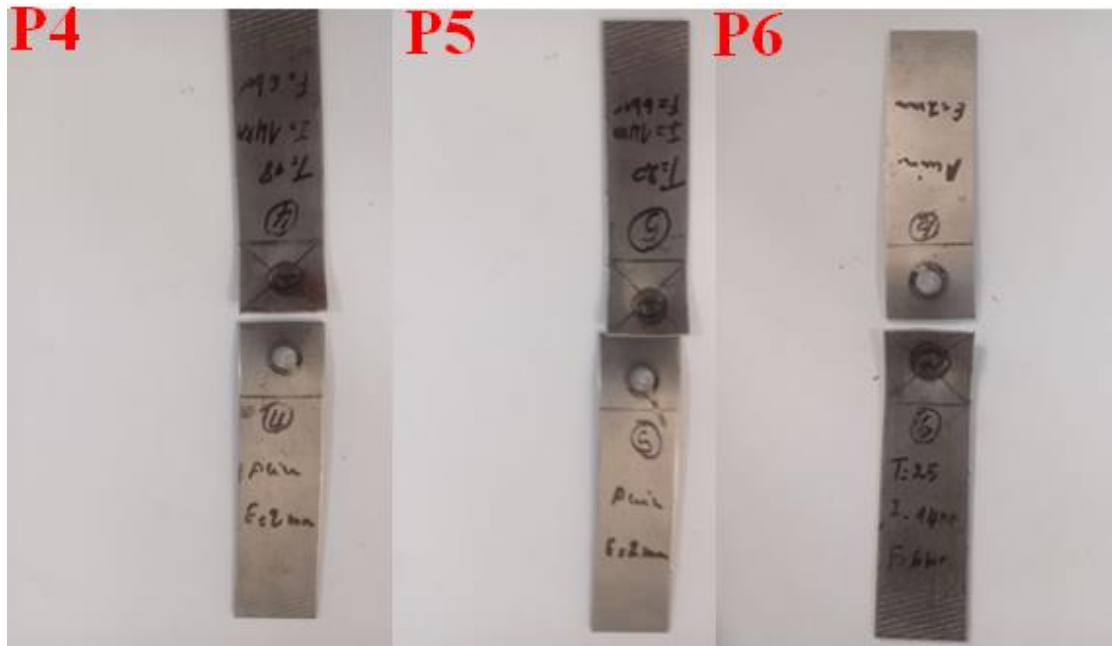


Figure (V.4) Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour différent temps de soudage

Avec :

P4 : éprouvette soudée avec T=18 Cycle.

P5 : éprouvette soudée avec T=20 Cycle.

P6 : éprouvette soudée avec T=25 Cycle.

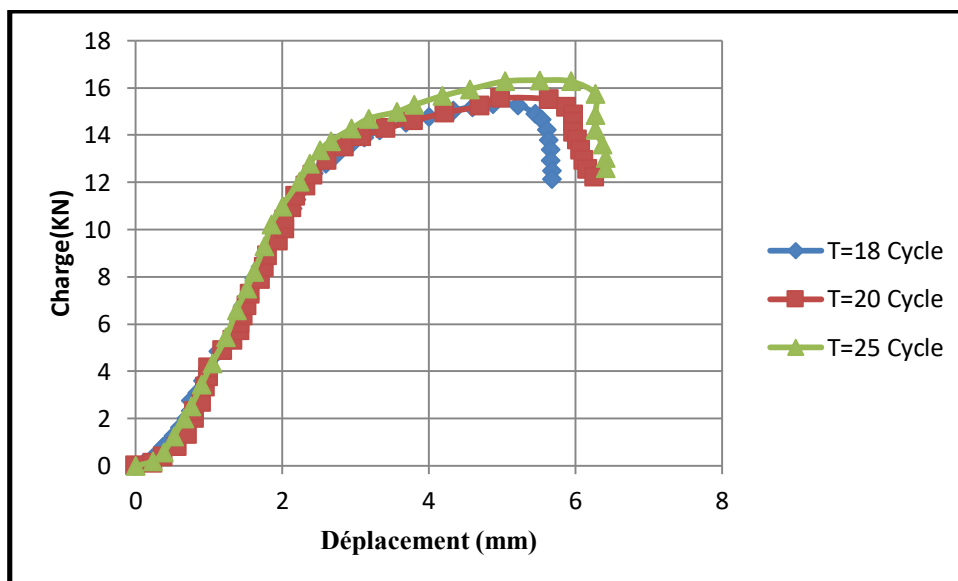


Figure V.5 : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique des pièces soudées
(Matériau : Acier doux, $e=2\text{mm}$, $F=6\text{ Bars}$, $I=14\text{ KA}$)

Résultats et discussion

La Figure V.6 représente la variation de la charge maximale en fonction du temps du soudage des pièces soudées.

On remarque que pour un temps de soudage $T=18$ cycles la charge maximale est de $F_m=15.390$ KN, pour un temps de soudage $T=20$ cycles on a $F_m= 15.758$ KN tandis que pour un temps $T=25$ cycles $F_m =16.529$ KN.

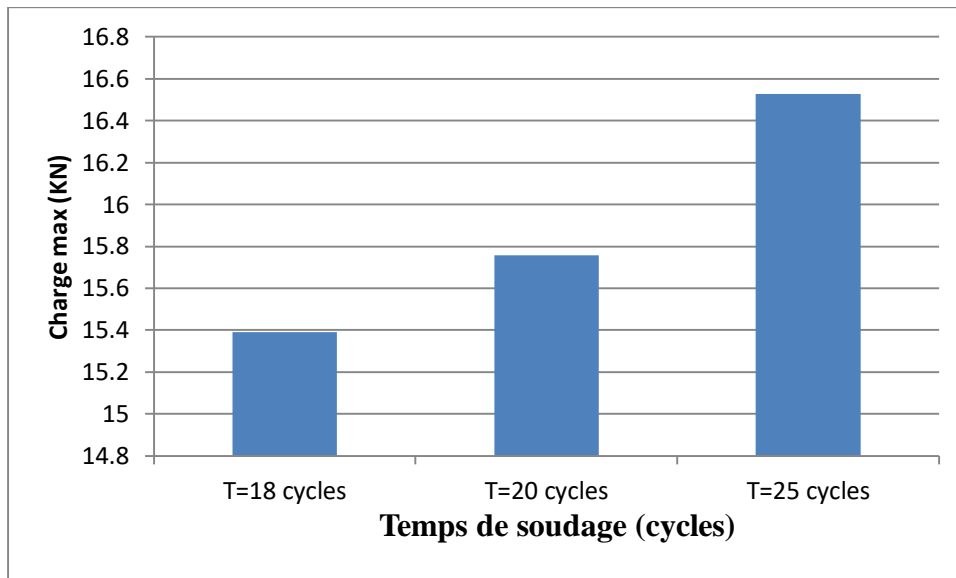


Figure V.6 : Variation de la charge maximale on fonction du temps de soudage (Matériau : acier doux, Charge entre les électrodes $F=6$ Bars, Epaisseur des pièces $e= 2$ mm, et une intensité du courant $I=14$ KA)



Figure V.7 Influence de temps de soudage sur la formation de point du soudeur avec (Acier doux et la charge entre les électrodes $F=6$ Bars, $e= 2$ mm, et $I=14$ KA)

On peut dire que plus le temps de soudage augmente plus le maintien et la stabilisation du noyau augmente aussi.

Le courant pulsé est souvent appliqué afin de stabiliser le développement du noyau. Cette pulsation comporte le temps de chaud, séparé par le temps de maintien ou le temps de froid. (Figure v.7)

V.4 Effet de l'intensité du courant sur le comportement mécanique des pièces soudées par point

Afin de déterminer l'influence de l'intensité du courant sur le comportement mécanique des pièces soudées par point nous avons réalisé trois échantillons pour différentes intensités ($I=10\text{KA}$, $I=12\text{KA}$ et $I=14\text{KA}$) on fixant les autres paramètres de soudage pour tous les échantillons (Type de matériau : acier doux, Efforts sur les électrodes : 6 Bars, Epaisseurs des pièces soudées = 2mm, Le temps de soudage = 18 Cycles) (Figure V.8).

La Figure V.9 représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture des pièces soudées par point.

On remarque que plus l'intensité du courant augmente la charge à la rupture augmente aussi, pour une intensité du courant $I=10\text{KA}$ la charge à la rupture R_m est de 350.781 N/mm^2 , pour une intensité $I=12\text{KA}$ $R_m=403.122\text{ N/mm}^2$ tandis que une intensité $I=14\text{KA}$ on a $R_m=440.771\text{ N/mm}^2$.

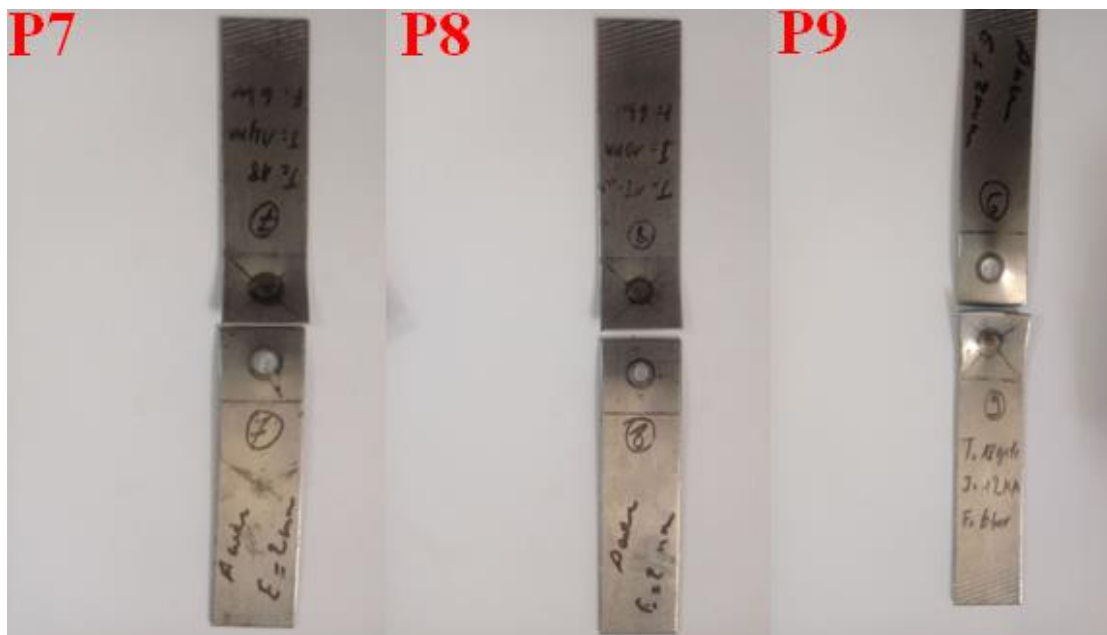


Figure (V.8) Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour différente intensité du courant

Avec:

P7: I=12 KA

P8: I=10 KA

P9: I=14 KA

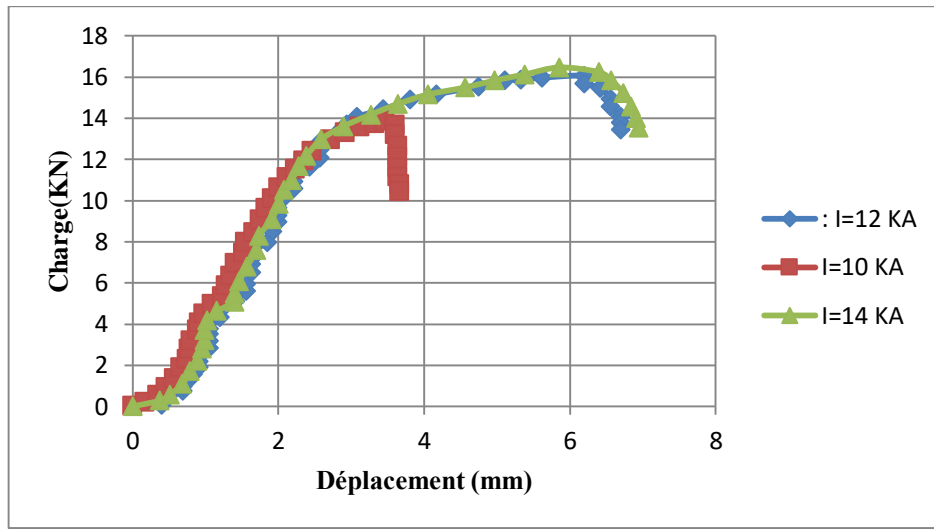


Figure V.9 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles.

La Figure V.10 représente la variation de la charge maximale en fonction du temps du soudage des pièces soudées.

On remarque que dans le cas d'une intensité de courant I=10 KA la charge maximale est de $F_m=14.031$ KN, pour une intensité de courant I=12KA on a $F_m= 16.125$ KN tandis que pour I= 14 KA on a $F_m =17.631$ KN.

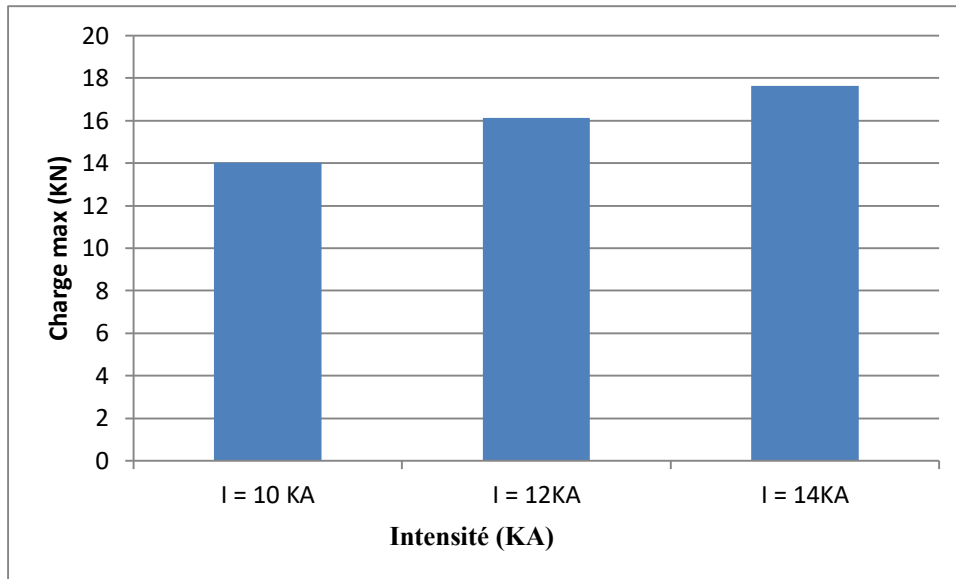


Figure V.10 : Variation de la charge maximale on fonction du l'intensité de courant (Matériau : acier doux, Charge entre les électrodes F=6 Bars, Epaisseur des pièces = 2mm, temps du soudage T=18 cycles)



Figure V.11 : Influence de l'intensité du courant sur le diamètre final (Acier doux et de la charge entre les électrodes F=6 Bars, e = 2mm et T=18 cycles)

L'augmentation de l'intensité du courant influe sur le maintien du point de soudure, plus l'intensité du courant augmente, plus les dimensions du point de soudure augmentent et donc l'augmentation du maintien et de la stabilité de la soudure,

A force d'utiliser les électrodes plusieurs fois, les dimensions des points de soudure ne vont pas beaucoup changer même avec une intensité du courant plus élevée (figure V.11).

V.5 Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique des pièces soudées par point

Afin de déterminer l'influence de l'épaisseur sur le comportement mécanique des pièces soudées par point nous avons réalisé trois échantillons pour différentes épaisseur

($e=1\text{mm}$, $e=1.5\text{mm}$ et $e=3\text{mm}$) on fixant les autres paramètres de soudage pour tous les échantillons (Type de matériau : acier doux, Efforts sur les électrodes : 6 Bars, Intensité du courant =14 KA, Le temps de soudage = 18 Cycles) (Figure V.12).

La Figure V.13 représente l'évolution de la charge en fonction de l'épaisseur des pièces soudées jusqu'à la rupture.

On remarque que plus l'épaisseur des pièces soudées augmente la charge à la rupture augmente aussi, pour une épaisseur de 1mm la charge à la rupture R_m est de 347.108 N/mm² et pour une épaisseur de 1.5mm, $R_m=375.880$ cette augmentation est plus significative pour une épaisseur de 3mm talque R_m est de 563.820 N/mm².



Figure V.12 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour $I=14\text{ KA}$, $T=18$ Cycle, et $F=6\text{ Bars}$

Avec :

P10 : $e=3$ mm

P11 : $e=1.5$ mm

P12 : $e= 1$ mm

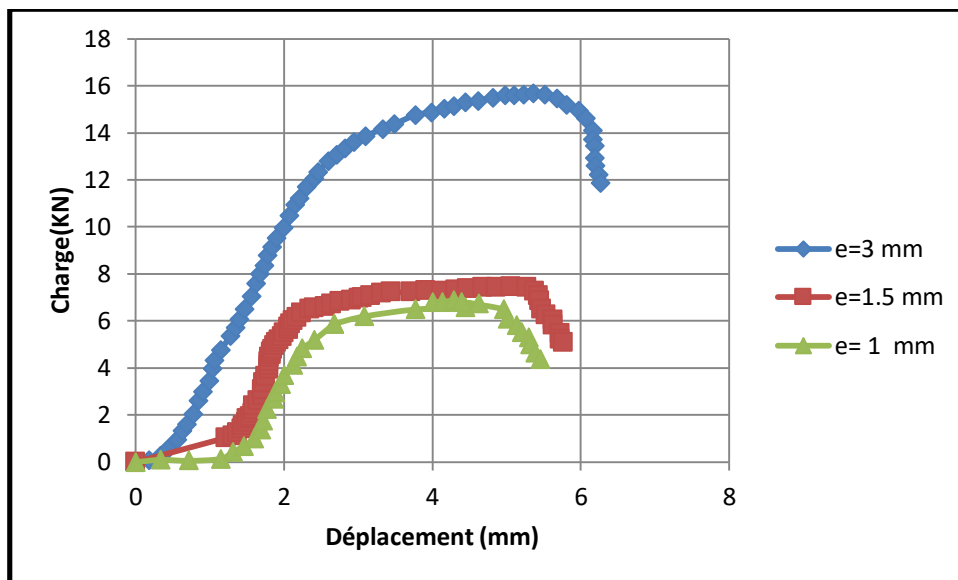


Figure V.13 : Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et $T=18$ cycle

La Figure V.14 représentent la variation de la charge maximale en fonction du l'épaisseur des pièces soudées.

On remarque que pour la pièce d'épaisseur 1 mm la charge maximale est de $F_m=6.942$ KN, pour la pièce de l'épaisseur 1.5mm on a $F_m= 11.276$ KN tandis que pour la pièce du l'épaisseur 3mm $F_m=33.229$ KN.

L'augmentation de l'épaisseur augmente la tenue de l'assemblage cela est due à la vitesse de dissipation de la chaleur. Plus l'épaisseur des pièces soudées augmente, plus

la vitesse de dissipation de la chaleur diminue et plus la tenue du point de soudure augmente, cela est applicable seulement pour les pièces minces.

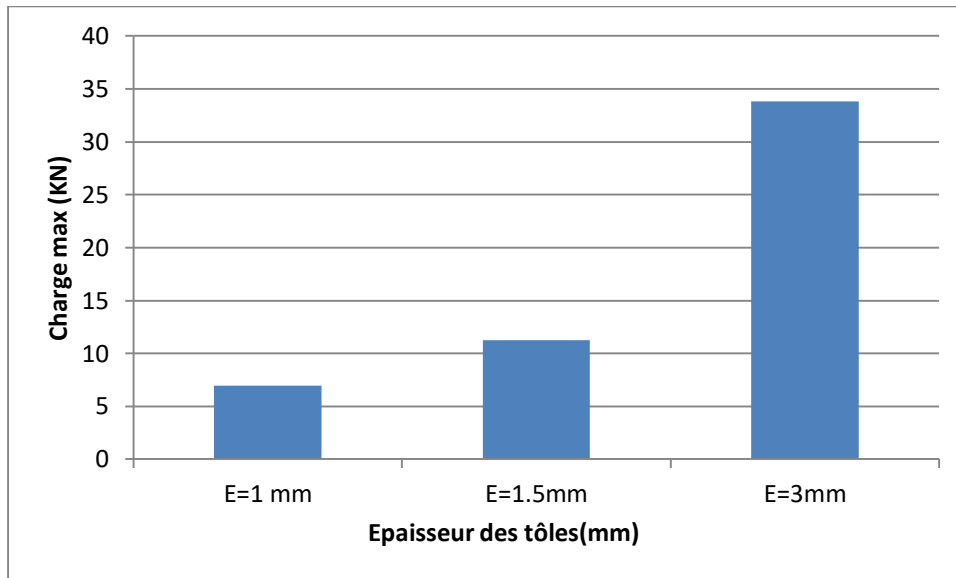


Figure V.14: Variation de la charge maximale on fonction du l'épaisseur de pièces (Matériau : acier doux, Charge entre les électrodes F=6 Bars, intensité du courant I=14 KA , temps du soudage T=18 cycles)

V.6 Effet de l'effort sur le comportement mécanique des pièces soudées par point

Afin de déterminer l'influence de l'effort entre les deux électrodes sur le comportement mécanique des pièces soudées par point nous avons réalisé trois échantillons pour différentes pressions entre les électrodes on fixant les autres paramètres de soudage pour tous les échantillons (Type de matériau : Acier doux, épaisseur des pièces e=2mm, Intensité du courant =14 KA et le temps de soudage = 18 Cycles) (Figure V.15).

La Figure V.16 représente l'évolution de la charge en fonction de la pression appliquées entre les électrodes jusqu'à la rupture.

On remarque que plus la pression entre les électrodes augmente la charge à la rupture augmente aussi, pour une pression de F=5 bar la charge à la rupture R_m est de 382.002 N/mm² et pour une pression de 6 bar on a $R_m=409.550$ et si on augmente la pression jusqu'à 7 bar la charge à la rupture augmente jusqu'à 423.122 N/mm².



Figure V.15 Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour $I=14$ KA, $T=18$ Cycle.

Avec :

P13 : $F= 6$ Bars

P14 : $F= 7$ Bars

P15 : $F= 5$ Bars

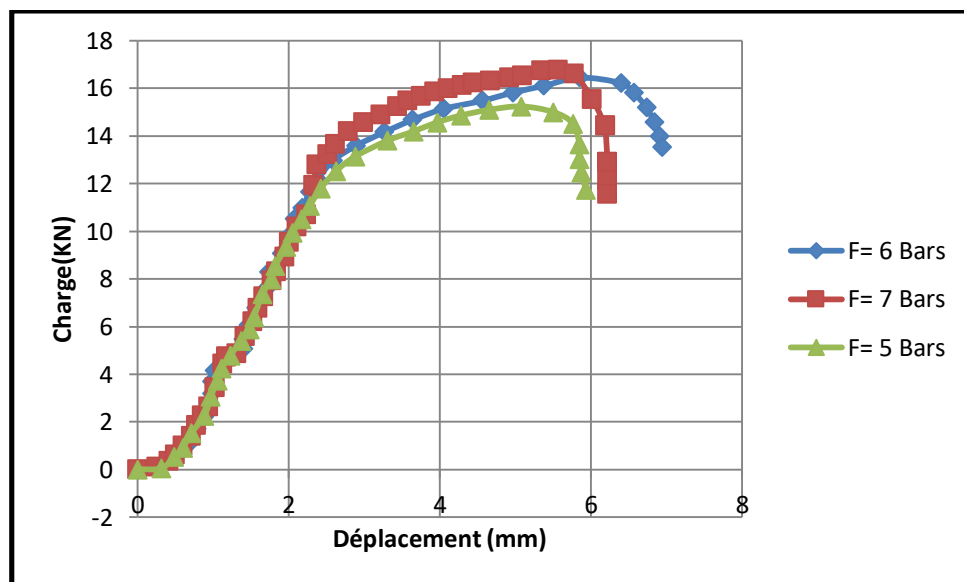


Figure V.16 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 18 cycles.

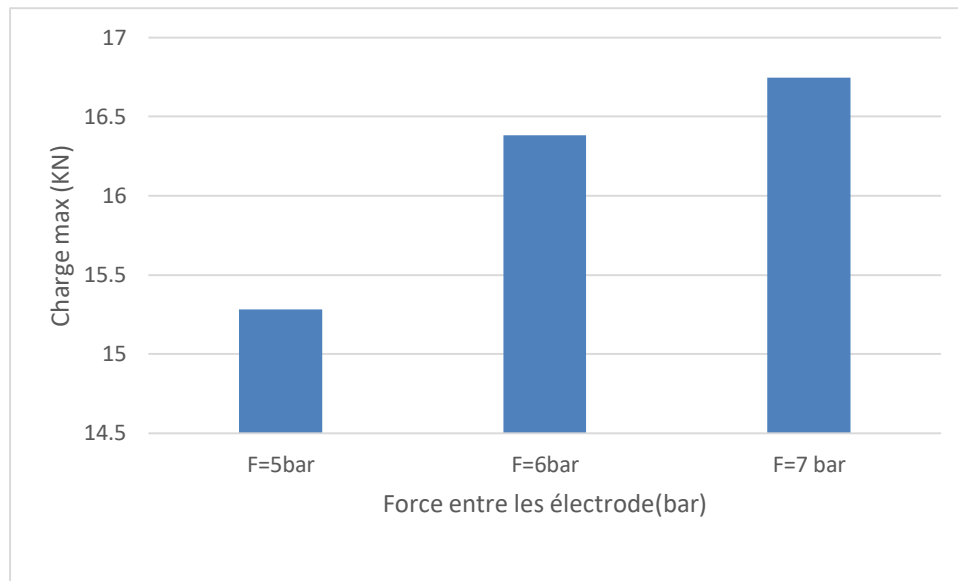


Figure V.17 : Variation de la charge maximale on fonction de la pression entre les électrodes (Matériau : acier doux, Epaisseur des pièces $e= 2\text{mm}$, intensité du courant $I=14 \text{ KA}$, temps du soudage $T=18 \text{ cycles}$)

La Figure V.17 représente la variation de la charge maximale en fonction de la pression appliquée entre les deux électrodes.

On remarque que plus la pression augmente plus la charge maximale augmente aussi, cette augmentation est plus significative entre les pressions 5 bar et 6 bar et elle est un peu moins entre 6 bar et 7 bar, on peut dire qu' à partir de cette pression (7 bar) on s'approche de la pression de saturation et pour laquelle la force maximale ne va pas beaucoup changer et au-delà de cette pression le point de soudure ou le noyau de soudure risque d'être détérioré.

C Conclusion générale

Le soudage par résistance par point est un procédé sans métal d'apport qui utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble, pièces électrodes, est traversé par un courant de soudage qui, sous une faible tension, provoque une forte élévation de la température par effet de joule.

L'objectif de ce travail est de déterminer l'influence des paramètres de soudage par point sur les caractéristiques mécaniques des structures et quelles sont les meilleurs paramètres pour obtenir une soudure de qualité.

L'étude expérimentale réalisé en deux parties : une partie réalisée à la société SOREMEP et la deuxième partie au laboratoire des structures à université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen nous a permis de ressortir les points suivants :

- La tenue du point de soudure dans le cas de l'acier inoxydable est plus importante que dans le cas d'un acier ordinaire ou galvanisé, car l'acier doux peut contenir des impuretés ou une couche corrosive qui peut affaiblir la tenue du point de soudure contrairement à l'acier inoxydable
- L'augmentation de l'épaisseur des pièces augmente la tenue de l'assemblage cela est due à la vitesse de dissipation de la chaleur. Plus l'épaisseur des pièces soudées augmente, plus la vitesse de dissipation de la chaleur diminue et plus la tenue du point de soudure augmente, cela est applicable seulement pour les pièces minces.
- Plus la pression entre les électrodes augmente plus la charge maximale augmente aussi jusqu'à la pression de saturation et pour laquelle la force maximale ne va pas beaucoup changer et au-delà de cette pression le point de soudure risque d'être détérioré.

CONCLUSION GENERALE

- L'augmentation du noyau de point de soudure dépend de l'augmentation de l'intensité et donc plus l'intensité du courant augmente plus les dimensions du point de soudure augmentent aussi.
- l'augmentation du temps de soudage stabilise le développement du noyau et augmente le maintien du point de soudure.

A partir de cette étude on peut dire que la variation des paramètres de soudage a une grande influence sur le maintien et la stabilité du point de soudure ainsi que les caractéristiques mécaniques des structures soudées par point à condition de ne pas négliger la qualité des électrodes utilisés.

Nous proposons dans le futur de faire une étude sur la durée de vie des électrodes et définir l'influence du temps d'utilisation de ces électrodes sur le maintien et la qualité du point de soudure.

Références bibliographiques et webographies

- [1] Bachir MEZRAG, Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT, Thèse de doctorat, 10 septembre 2015.
- [2] www.chez.com/soudage2000
- [3] Opérations de soudage à l'arc. Guide pratique de ventilation n° 7. Editions 1996
- [4] Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique www.angers.ensam.fr.
- [5] Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées. Fiche pratique de sécurité ED 83. INRS, 1999.
- [6] Thaon I, Guillemin M, Gonzalez M, Cantineau A. Risques toxiques et pathologies professionnelles liés au soudage métallique. Encycl. Méd. Chir.
- [7] Drui M, Henni A, Heugel M, Martin C, Simon C. Les différents procédés manuels de soudage, leurs risques et leur prévention, 2003.
- [8] Emilie LE GUEN, Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG
- [9] <https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K356-2/SUBARC-WELDING-fr.pdf>
- [10] <https://www.rocdacier.com/soudage-faisceau-delectrons/>
- [11] <https://www.rocdacier.com/le-soudage-laser/>
- [12] <http://www.sdservice.fr/Recapitulatif-procedes-soudage.pdf>
- [13] <https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2018/11/guide-multiprevention-soudage-coupage.pdf>
- [14] https://www.bilibs.be/sites/default/files/publicaties/metallerie.fr/201104_special_soudage_148f09_le_soudage_par_friction_un_procede_de_soudage_multiple_et_innovateur.pdf
- [15] [https://www.academia.edu/10181021/Soudage par résistance](https://www.academia.edu/10181021/Soudage_par_résistance).
- [16] Chainarong SRIKUNWONG « Modélisation du procédé de soudage par points » Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, octobre 2005.
- [17] Frédérique ROSSILON, "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007.

- [18] Syvain Dancett, Comportement mécanique des soudures par point : mécanisme et stratégie de prédiction dans le cas des tôles en aciers pour automobile. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2009.
- [19] Intisser FRIH dimensionnement mécano-fiabiliste des structure soudée content un défaut, thèse de Doctorat, 14 juin 2016.
- [20] Dominique FRONCOIS, Essais de rupture. Technique de l'ingénieur M126-3
- [21] PX PRECIMET SA : Sélection des fiches techniques de société SOREMEP)
- [22] Wikibooks.org/wiki/Technologie/Matériaux/Généralités/Désignation_normalisée des aciers Consulter le 28/3/2019
- [23] Johan steel, fiche technique, www.johan-steel.com