REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
Faculté *des Sciences et de la technologie*
Département de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Génie mécanique**

Spécialité : Génie des Matériaux

Par

ROUABHI AYOUB

Intitulé

Optimisation des paramètres de soudage par point des aciers dissimilaires

Soutenu le : 30/06/2025

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	*Grade*	*Qualité*	*Etablissement*
M. Tayebi Tahar	*Pr*	*Président*	*Univ-BBA*
M. Saidani Lyamine	*MCB*	*Encadreur*	*Univ-BBA*
M. Djendel Mokhtar	*MCA*	*Co-encadreur*	*Univ-BBA*
M. Raouache Elhadj	*Pr*	*Examinateur*	*Univ-BBA*
M. Laouissi Aissa	*MCB*	*Examinateur*	*Univ-BBA*

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Saïdani Elyamine, pour m'avoir guidé avec beaucoup de patience, de rigueur et de bienveillance tout au long de ce travail. Son encadrement, ses conseils précieux et son expertise ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur Djendel Mokhtar, pour sa disponibilité, ses orientations et ses remarques constructives qui m'ont permis d'approfondir mes connaissances et d'améliorer la qualité de ce travail.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement l'administration de l'entreprise pour l'accueil qui m'a été réservé, ainsi que pour les moyens techniques et logistiques mis à ma disposition durant la période de stage. Leur collaboration a grandement facilité la mise en œuvre de ce projet.

Je remercie sincèrement l'entreprise **Condor** pour m'avoir permis d'effectuer une partie de mes essais pratiques dans leurs ateliers, et plus particulièrement **M. Mohamed Lamara**, manager, pour sa disponibilité et son soutien.

Je remercie également l'entreprise **Anabib** pour leur accueil chaleureux et les moyens techniques mis à ma disposition, ainsi que **M. Naïli**, chef de laboratoire, pour son accompagnement et ses conseils précieux.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs prières constantes qui ont toujours été ma force.

À mes frères et sœurs, pour leur patience et leurs encouragements.

À mes enseignants et encadrants, pour leur accompagnement, leur savoir et leurs précieux conseils.

À tous mes amis sincères, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables de fatigue, de stress et de réussite. Et enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Merci à vous, du fond du cœur.

Nomenclature

I : Intensité du courant (en Ampères)

P : Pression appliquée pendant le soudage (en MPa)

t : Temps d'application du courant (en secondes)

Rm : Résistance maximale mesurée lors des essais (en N/mm^2)

Re : Limite d'élasticité (en MPa)

Rp0.2 : Limite d'élasticité conventionnelle à 0.2 % (en MPa)

A : Allongement après rupture (%)

HBW : Dureté Brinell

HRB : Dureté Rockwell B

W/m·K : Conductivité thermique

MPa : Mégapascal – unité de pression

kN : Kilonewton – unité de force

ΔL : Allongement mesuré lors de l'essai de traction

σe : Limite d'élasticité

σr : Résistance à la rupture

ν : Coefficient de Poisson

E : Module d'élasticité

FSW : Friction Stir Welding (Soudage par friction malaxage)

TIG : Tungsten Inert Gas – Soudage à l'arc avec électrode non fusible

MIG-MAG : Metal Inert/Active Gas – Soudage à l'arc sous gaz de protection

GMAW : Gas Metal Arc Welding – Autre nom du procédé MIG-MAG

DX52D+Z80 : Acier galvanisé utilisé dans les essais

SUS430 : Acier inoxydable utilisé dans les essais

Liste des figures

Figure 1.4. : Procédés de soudage MIG/MAG. ……..... 2
Figure 1.5. : Principe du soudage laser. 3
Figure 1.8. : Soudage par diffusion 4
Figure 1.9. : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en so udage par friction malaxage (FSW)…… 5
Figure 1.10. : Schéma du soudage par Ultrasons…….…….. 6
Figure 2.1. : Principe du soudage par point…… 7
Figure 2.3. : Les différentes phases de réalisation d'un point ……..…. 8
Figure 2.3. : Cycle de soudage d'un point de soudure 9
Figure 3.1 : Dimensions des éprouvettes soudées (L= 135 mm ; LT = 240 mm ;W= 20 mm ; A= 30 mm) …….. 10
Figure 3.2 : Des éprouvettes avant soudage ……..... 11
Figure 3.3 : Machine de soudage par point. 12
Figure 3.4 : Eprouvettes après le soudage 13
Figure 3.5 : Placement des éprouvettes 14
Figure 3.6 : Soudage des éprouvettes 15
Figure 3.7 : Point de soudage 16
Figure 3.8 : Machine d'essai de traction. 17
Figure 4.1 : Eprouvette d'acier galvanisé après l'essai de traction …… 18
Figure 4.2 : Figure 4.2 : Courbes contrainte/allongement éprouvette d'acier galvanisé ..…….. 19
Figure 4.3 : Eprouvette d'acier Inox après l'essai de traction ……..….. 20
Figure 4.4 : Courbes contrainte/allongement éprouvette d'acier inoxydable..... 21
Figure 4.5 : Eprouvettes de l'acier galvanisé après le soudage ……..... 22
Figure 4.6 : Eprouvettes de l'acier Inoxydable après le soudage …… 23
Figure 4.7 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : l'intensité = 20 A …… 24
Figure 4.8 : Courbe après l'essai de traction avec Intensité = 20 Ampère…….. 25
Figure 4.9 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : l'intensité = 25 A …… 26
Figure 4.10 : Courbe après l'essai de traction avec Intensité = 25 Ampère …… 27
Figure 4.11 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : l'intensité = 30 A..…….. 28
Figure 4.12 : Courbe après l'essai de traction avec Intensité = 30 Ampère 29

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Composition et applications des procédés de soudage…….. 10

Tableau 3.1 : Composition chimique des aciers galvanisé…… 20
Tableau 3-2 : Composition chimique des aciers Inox SUS430..…… 21
Tableau 3.3 : Les déférant paramètres de soudage par point…..…… 25
Tableau 4.1. Les différant Résistance Maximal après l'essai de traction de l'acier galvanisé…….…… 36
Tableau 4.2. Les différant Résistance Maximal après l'essai de traction de l'acier Inox ……..... 39
Tableau 4.3. Les différant Résistance Maximal après l'essai de traction…… 47

Table des matières

Introduction 1
Chapitre 1 : Présentation des différents procédés de soudage 1
1.1 Introduction 2
1.2 Classification des procédés 2
1.2.1 Procédés de soudage avec fusion 03
1.2.2 Procédés de soudage par pression 08
1.2.3 Comparaison et applications 10
1.3 Références bibliographiques 11
Chapitre 2 : Procédé de soudage par point 7
2.1 Introduction 7
2.2 Principe du soudage par point 8
2.3 Paramètres de soudage par point 9
2.4 Mécanisme de formation de la soudure 10
2.5 Avantages et inconvénients 11
2.6 Domaine d'applications 12
2.7 Propriétés métallurgiques 13
2.8 Références bibliographiques 14
Chapitre 3 : Méthodologie expérimentale 15
3.1 Introduction 15
3.2 Matériaux d'étude 16
3.3 Étapes de réalisation des éprouvettes 17
3.4 Machine de soudage 18
3.5 Méthode de soudage 19
3.6 Essai de traction 20
3.7 Conclusion 21
3.8 Références 22
Chapitre 4 : Résultats et discussion 23
4.1 Introduction 23
4.2 Résultats de l'essai de traction 24
4.3 Impact intensité et pression 25
4.4 Résistance maximale 26
4.5 Conclusion 27
Conclusion Générale 28

Introduction générale

Le soudage par résistance par points est l'un des procédés d'assemblage les plus utilisés dans l'industrie, notamment dans le secteur automobile et la fabrication des secteurs métalliques. Ce procédé repose sur le passage d'un courant électrique de forte intensité à travers les pièces à assembler, provoquant leur fusion localisée au niveau des points de contact et les paramètres de soudage jouent un rôle crucial dans la qualité et la performance des assemblages obtenus par soudage points. Chaque paramètres – qu'il s'agisse du courant de soudnage du temps d'impulsion, de la face d'électrode ou encore du diamètre des électrodes – influence directement la formation du noyau de soudure, la résistance mécanique du joint, ainsi que l'apparition éventuelle de défauts. C'est pourquoi la maitrise et l'optimisation des paramètres de soudage sont essentielles dans tout processus de fabrication utilisant le soudage par résistance par points.

Le soudage des aciers semblables, bien que relativement maitrisé, nécessite une attention particulière aux paramètres de soudage afin d'éviter des défauts comme les inclusions, les fissures ou les soudures faibles. Toutefois, ce type d'assemblage reste plus prévisible du fait de la similarité des propriétés thermiques, électriques et mécaniques des matériaux à souder.

En revanche, le soudage des aciers dissemblables présente un défi beaucoup plus complexe. La différence de composition chimique, de conductivité thermique, de coefficient de dilatation ou encore de point de fusion entre les deux matériaux peut entrainer des déséquilibres lors de la fusion et du refroidissement. Ces différences augmentent le risque de formation de contraintes résiduelles, de fissures, ou de zones affectées thermiquement fragiles. De plus, l'interface entre les deux métaux peut être sujette à la formation de phases intermétalliques, souvent dures et cassantes, compromettent la qualité et la durabilité de la soudure.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des différents procédées de soudage. Le deuxième chapitre est consacré à une revue de la littérature. Le troisième chapitre est dédié à une méthodologie expérimentale. Enfin, le quatrième chapitre présente résultats et discussion de cette étude.

Chapitre 1

Présentation des différents procédées de soudage

Sommaire

1.1 Introduction…….…….. **02**
1.2 Classification des procédés ……...……... **02**
1.2.1 Procédés de soudage avec fusion**...**……...……... **03**
1.2.1.1 Soudage à l'arc électrique……..…….…..…… **03**
- Soudage à l'arc électrique (TIG) ……..... **03**
- Soudage à l'électrode enrobée (MMA).…….. **03**
- Soudage électrique (MIG-MAG)……. **04**

1.2.1.2 Soudage au laser……..……..…….. **05**
1.2.1.3 Soudage au Gaz…….……..……..…….. **07**
1.2.2 Procédés de soudage par pression ……...…….. **08**
1.2.2.1 Soudage par diffusion ……..… **08**
1.2.2.2 Soudage par friction-malaxage (FSW)……... **08**
1.2.2.3 Soudage par ultrason……..……. **09**
1.2.3 Comparaison et applications……... **10**
1.3 Références bibliographiques……..……..…… **11**

1.1. Introduction

Le soudage constitue l'un des procédés d'assemblage les plus cruciaux dans l'ensemble des secteurs industriels, en raison de sa capacité à assurer la continuité mécanique, métallurgique et parfois chimique entre les pièces assemblées. Il permet d'optimiser la conception des structures en fonction des sollicitations mécaniques, thermiques ou dynamiques auxquelles elles seront soumises en service, tout en offrant une grande flexibilité dans le choix des matériaux et la géométrie des assemblages [1].

1.2. Classification des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents, La figure 1.1 présente un classement des procédés de soudage en fonction de la source d'énergie utilisée pour réaliser une soudure. Les procédés de soudage se subdivisent en deux groupes, en l'occurrence les procédés de soudage par fusion et les procédés de soudage par pression.

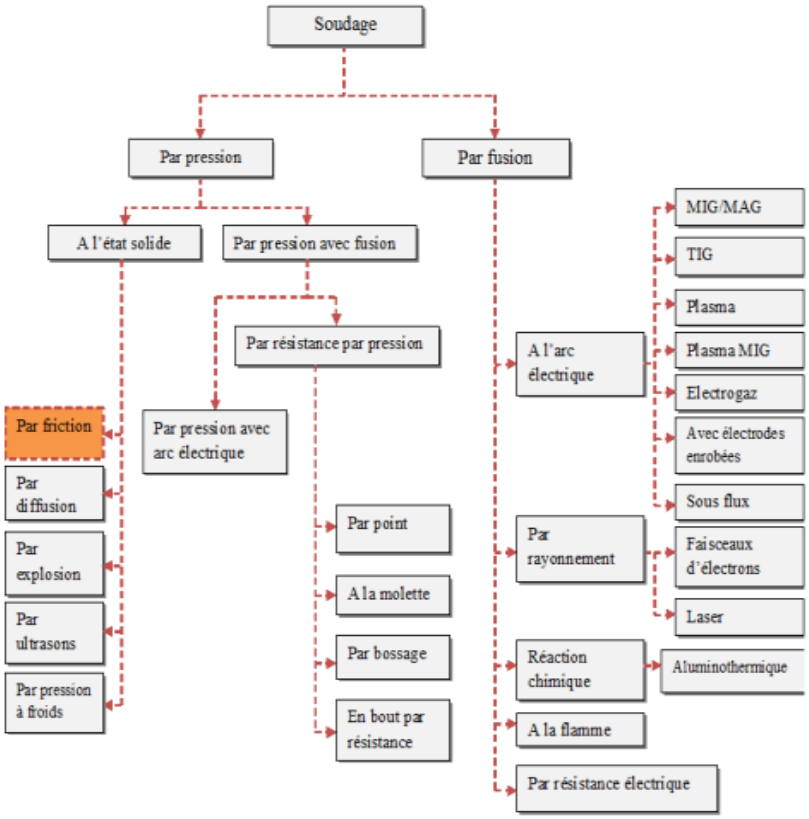


Figure 1.1. Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [2].

Dans le cas de soudage par fusion, les matériaux à assembler sont portés à fusion, avec ou non un métal d'apport ou une atmosphère protectrice (un gaz ou un vide) et le deuxième groupe de procédés sont les procédés de soudage par pression, ou les matériaux à assembler

sont pressés l'un contre l'autre, avec ou sans chauffage additionnel des surfaces à souder [2].

1.2.1 Procédés de soudage avec fusion

I.2.1.1 Soudage à l'arc électrique

Le soudage à l'arc repose sur la production de chaleur générée par un arc électrique entre une électrode (baguette de métal d'apport) et les pièces à assembler. Cette chaleur permet la fusion des bords des matériaux, entraînant la formation d'un bain de métal liquide qui se solidifie naturellement. La soudure est protégée soit par un gaz, soit par l'enrobage de l'électrode. Dans ce procédé nous pouvons citer :

- **Le Soudage à l'arc électrique (TIG)**

Le soudage TIG (Tungstène liner Gas), utilise une électrode non fusible constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire (buse) de gaz inerte couramment de l'argon ou de l'hélium, ce gaz protège l'arc électrique et le bain de fusion de l'atmosphère externe durant le soudage. Le plasma engendré par le passage de l'arc apporte la chaleur provoquant la fusion des pièces à assembler. (Figure 1 .2) [3].

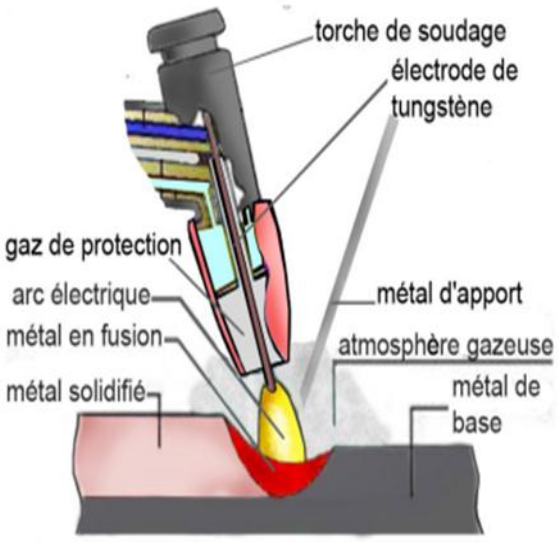


Figure 1.2. Procédé de soudage TIG [3].

- **Le soudage à l'électrode enrobée (MMA)**

Le procédé de soudage à l'électrode enrobée utilise une source d'énergie extérieure, à savoir l'arc électrique, Cet arc apporte l'énergie nécessaire pour fondre le métal de base et le métal d'apport que constitue l'électrode. L'électrode est formée d'une âme

métallique et d'un enrobage. L'âme doit avoir au moins les mêmes caractéristiques mécaniques que le métal de base. Elle fond en gouttelettes qui sont projetées dans le bain de fusion. Après refroidissement et solidification, l'âme constitue le cordon de soudure. L'enrobage de l'électrode dépose sur le métal en fusion un laitier protecteur, et participe aussi à la formation d'un gaz. Le laitier protège le bain de fusion tandis que le gaz protège le bain et l'arc. Une fois la soudure solidifiée, on enlève le laitier à l'aide d'un petit marteau à piquer [4]. La (Figure 1.3) illustré le principe du soudage par électrode enrobée [5].

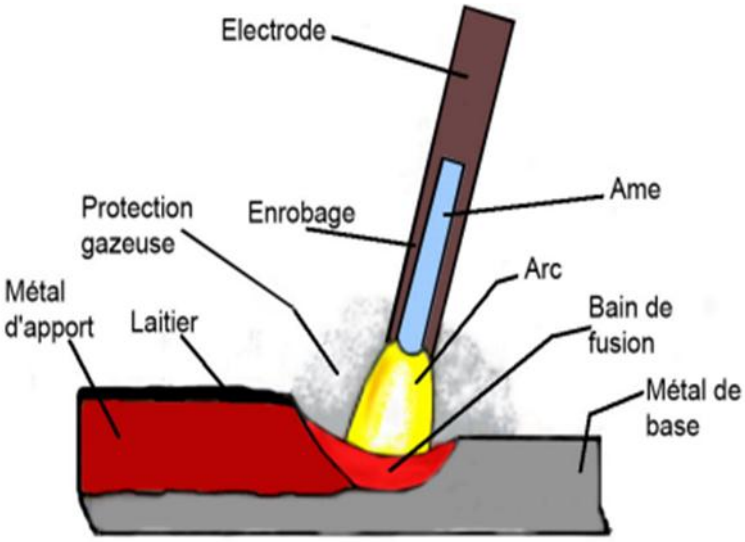


Figure 1.3. Schéma du mécanisme de soudage à électrode enrobée [5].

- **Le soudage électrique (MIG-MAG) :**

Le procédé (MIG-MAG) (nommé aussi Gaz Métal Arc Welding, GMAW), comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, s'est aussi révélé plus rapide, Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

La fusion est obtenue par la création grâce à un générateur de courant d'une différence de potentiel entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (Figure1.4), Un arc électrique est ainsi créé et il fournit toute l'énergie nécessaire pour faire fondre d'une part l'électrode qui constitue le métal d'apport et d'autre part localement le métal de base.

La puissance électrique est apportée au fil du soudage au niveau d'une pièce métallique cylindrique appelée tube-contact. La longueur de fil sortant du tube contact porte le nom de partie terminale et la hauteur de l'arc électrique porte le nom de longueur d'arc. Un

gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage.

Le procédé GMAW se divise en deux catégories Selon la nature du gaz de protection employé.

√ **Le procédé MAG** (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO_2), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO_2) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O_2).

√ **Le procédé MIG** (Metal Inert Gas) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

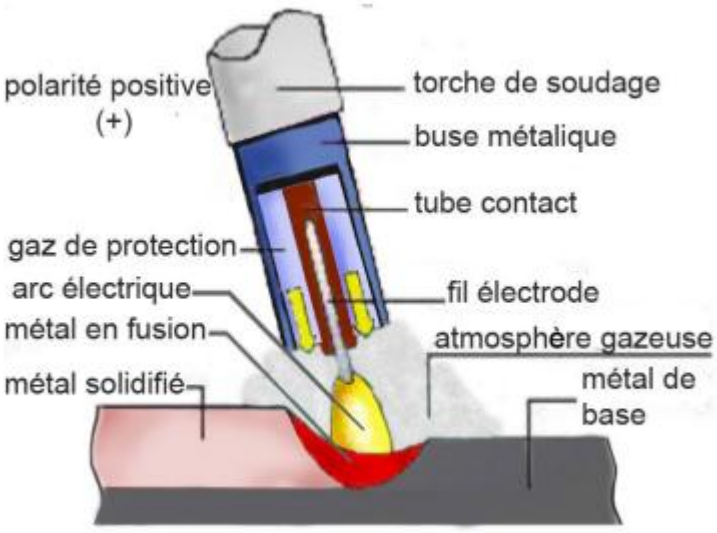


Figure 1.4. Procédés de soudage MIG/MAG. [5]

Le soudage MIG/MAG est utilisé lorsque l'utilisateur recherche une productivité importante. Avec un taux de projection faible, il est possible de souder les fortes épaisseurs et de faire du remplissage de chanfreins par passes multiples. Ce procède est utilisé en semi-automatique ainsi qu'en automatique pour un large éventail d'industrie (chaudronnerie, constructions navales…) [5-7].

I.2.1.2 Soudage au laser

Au début des années 70, la technologie laser prend place dans le milieu industriel dans le domaine des traitements des matériaux. Des outils de découpage des tôles par faisceau laser ont été utilisés pour la première fois en 1975 et c'est en 1984 que la technologie laser a été développée pour le soudage des métaux dans les industries de production en série. Le soudage laser est un procédé de soudage à haute densité d'énergie. Le faisceau laser est orienté par un jeu de miroirs ou par fibre optique de la source vers des lentilles

ou il passe par un système de focalisation permettant de réduire son diamètre. Après focalisation, le faisceau est envoyé directement sur la surface des pièces à souder (Figure 1 .5).

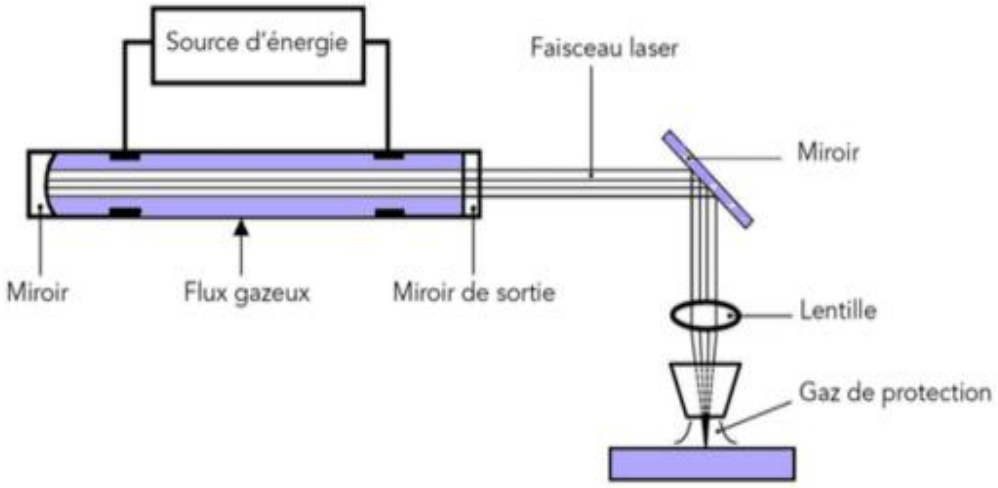


Figure 1.5. Principe du soudage laser [6].

Un bain de métal fondu se développe tout autour de capillaire. Le déplacement relatif de celui-ci engendre la formation d'un joint soudé. L'énergie thermique est distribuée non plus en surface mais sur toute la profondeur de " trou "rempli de vapeurs métalliques autour duquel la matière est fusionnée. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants (Figure 1 .6) [2, 6, 8].

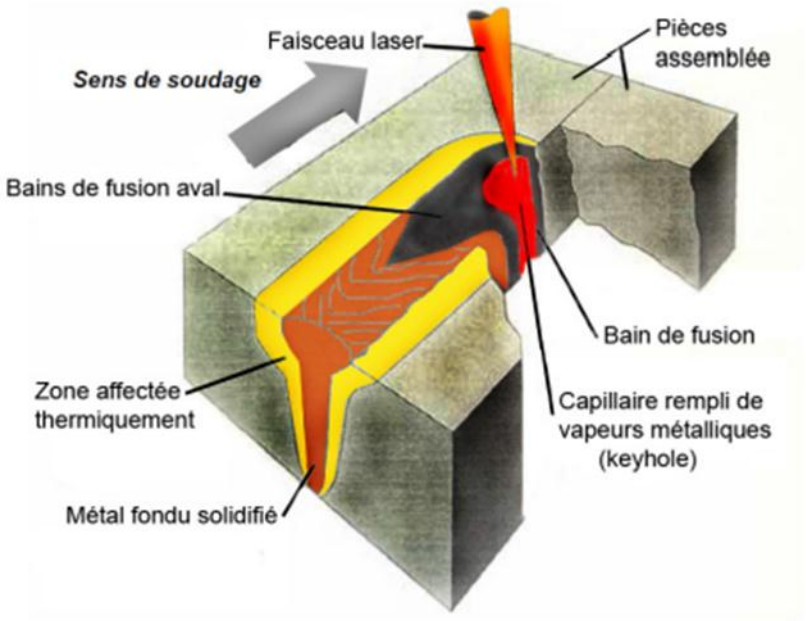


Figure 1. 6. Schéma de principe de fonctionnement du soudage laser [8].

I.2.1.3 Soudage au gaz

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau. L'apport de chaleur est fourni par la combustion d'un gaz combustible, généralement acétylène ou propane, mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (l'oxygène) dont la température de la flamme atteint environ 3100 °C.

L'acétylène (C_2H_2) est le principal gaz combustible utilisé pour le soudage au gaz. Il se compose de 92,3 % de carbone et de 7,7 % d'hydrogène. Sa combustion dans l'oxygène produit une température de combustion plus élevée que celle de tout autre hydrocarbure gazeux et sa flamme est bien plus concentrée que celle de tous les autres gaz.

La flamme est dirigée sur les surfaces du joint, qui fondent. Un métal d'apport peut être ajouté selon le besoin. Le bain de fusion est protégé de l'air par la zone réductrice et par la zone secondaire de la flamme. Il faut par conséquent retirer la flamme progressivement à la fin de l'opération de soudage (Figure 1 .7) [9].

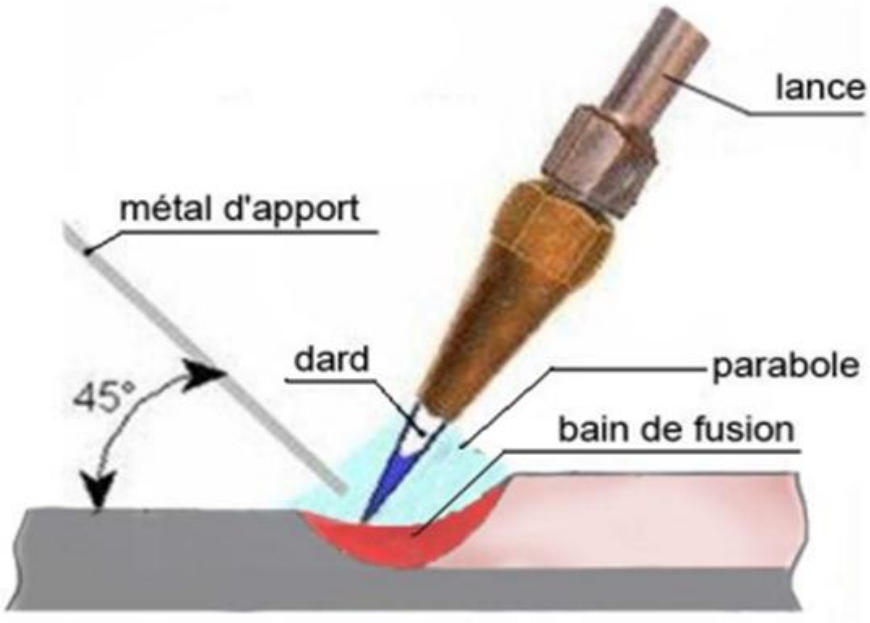


Figure 1.7. Principe de soudage au gaz (oxyacétylénique) [9].

I.2.2 procédés de soudage par pression

I.2.2.1 Soudage par diffusion

Consiste à se servir du phénomène de diffusion des atomes pour créer une liaison. Il est très utilisé pour effectuer des pièces creuses renforcées à partir de plusieurs tôles en titane. Dans ce cas, on tire au vide à l'inter-tôle et on presse avec une pression de gaz argon par l'extérieur. Cette opération est réalisée à 920 °C [12].

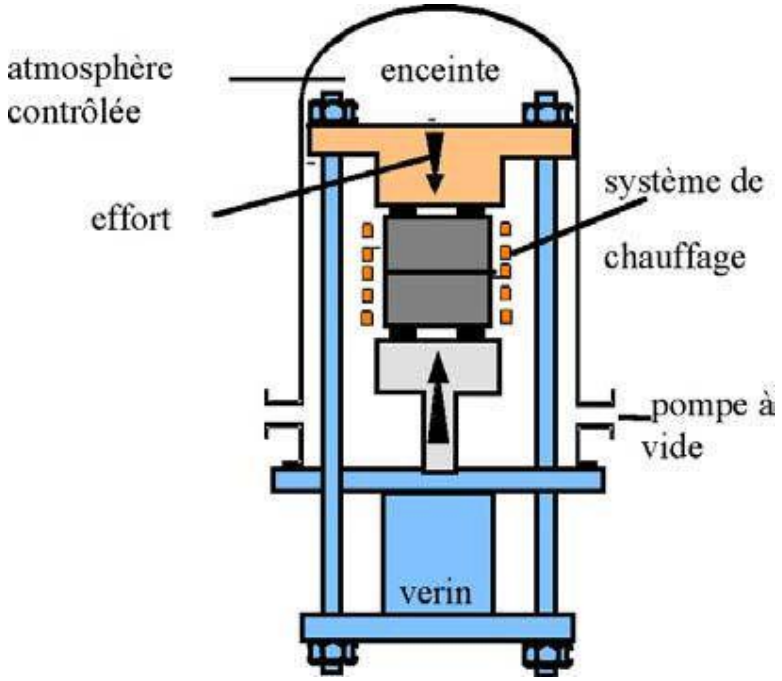


Figure 1.8. Soudage par diffusion [12].

I.2.2.2 Soudage par friction-malaxage (FSW)

Le soudage par friction malaxage, présenté sur la figure I.9, un outil en rotation génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à assemblée. L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les métaux. Une pression est exercée pour que la puissance totale mécanique soit suffisamment grande. Cette puissance se transforme en chaleur et élève la température des matériaux, d'une part grâce à la friction et, d'autre part, grâce aux déformations plastiques subies par ceux –ci. L'outil est incliné d'un angle de 0.5 à 5 par rapport à la verticale [13].

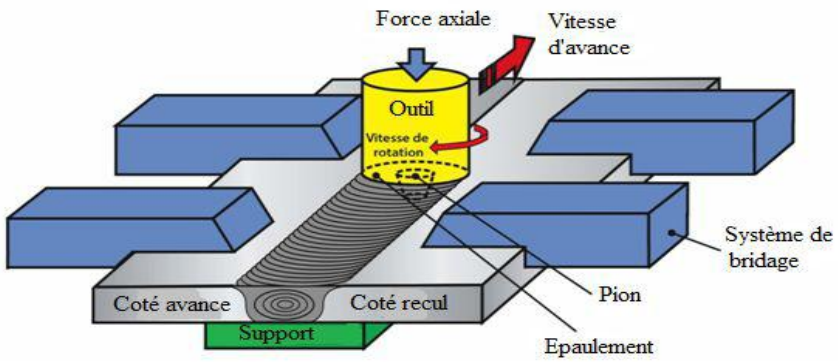


Figure 1.9. Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [13].

I.2.2.3 Soudage par ultrason

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de hautes fréquences (20 à 50Hz) qui transmises à un matériau le font vibrer. Il s'agit d'un procédé de soudage à froid en phase solide ou les atomes des surfaces à assembler se combinent entre eux sous l'effet de forces d'attraction interatomique [2]. Le transducteur génère des vibrations ultrasoniques qui sont transmises par un transformateur de vitesse amplificateur à une "sonotrode". Les pièces à souder, serrées entre une « enclume » et la « sonotrode », subissent des déformations localisées en qui rompent les pellicules superficielles des zones de contact. L'interpénétration des surfaces de contact s'ensuit. Sous l'effet du frottement à l'interface, la température s'élève, la zone de déformation s'étend et le soudage se produit. Ce procédé est surtout destiné aux pièces de faibles épaisseurs (< 2 mm). Il est à rapprocher dans son mécanisme au soudage par friction [14].

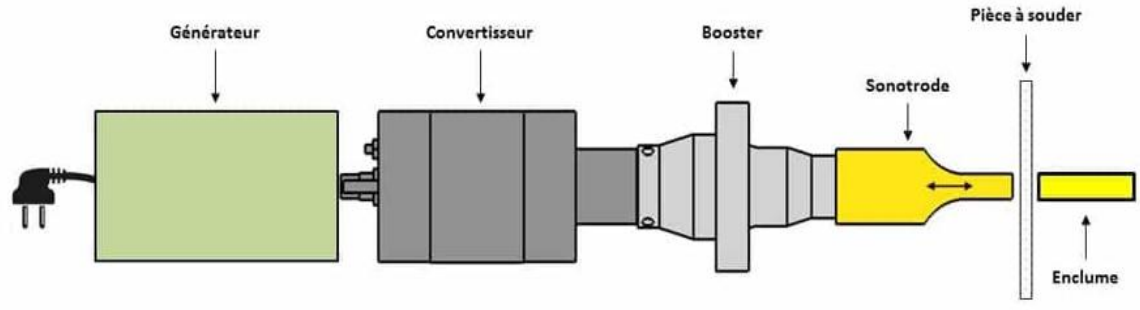


Figure 1.10. Schéma du soudage par Ultra-sons [14].

I.2.3 Comparaison et applications

Les procédés de soudage sont classés en trois grandes catégories : le soudage par fusion, le soudage par pression et le soudage à l'état solide. Le Tableau 1.1 présente les avantages, les inconvénients, et les domaines d'application spécifiques de chaque procédé [15].

Type de procédé	Avantages	Inconvenient	Applications typiques
Soudage par fusion	- Procédé courant et maîtrisé - Adapté à une grande variété de métaux - Haute résistance des assemblages	-Risques de déformation thermique -Possible apparition de défauts (fissures, porosité) -Nécessite parfois un métal d'apport	Construction métallique, chaudronnerie, automobile, navale, pipelines
Soudage par pression	- Bon contrôle de l'assemblage - Moins de défauts internes - Soudage rapide	- Nécessite des équipements spécifiques - Moins adapté aux grandes épaisseurs	Industrie automobile (carrosserie), électronique, tôlerie fine
Soudage à l'état solide	- Pas de fusion = moins de distorsion - Excellente qualité de joint - Compatible avec des matériaux dissemblables	- Coût élevé - Mise en œuvre complexe - Moins répandu industriellement	Aéronautique, spatial, électronique, industrie nucléaire, aluminium aéronautique (FSW)

Tableau 1.1. *Comparions et applications des procédés de soudage.*

I.1.3 Références bibliographiques :

[1] Belabbas, K., SOUDAGE PAR FRICTION ROTATION DE DEUX METAUX NON SEMBLABLES, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra ,2020.

[2] Klas, W., Procédés De Soudage, Dunod, Paris, 2012.

[3] Cyrille, F., Mise En Œuvre Et Caractérisation D'assemblages Soudes Par Procèdes TIG Et Laser De Tôles D'alliages De Titane Réfractaires, L'institut National Polytechnique De Toulouse, 9 Novembre 2005.

[4] Léon, L., cours de procédé de Soudage.

[5] Adnen, K., Etude Du Soufflage Magnétique De L'arc Electrique De Soudage, Université De Liège, 2013.

[6] Mmemilie, G., Etude Du Procédé De Soudage Hybride Laser/MAG. Caractérisation De La Géométrie Et De L'hydrodynamique Du Bain De Fusion Et Développement D'un Modèle 3D Thermique, Université De Bretagne-Sud, 4 Novembre 2010.

[7] Mrjean-Pierre, P., Modélisation Du Soudage MIG/MAG En Mode Short-Arc, l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 (Spécialité Automatique, Traitement Du Signal Et Génie Informatique) ,1er Juillet 2008.

[8] Massaud, M., Etude Du Perçage Et Du Soudage Laser : Dynamique Du Capillaire, Université De Bourgogne, 2011.

[9] www.Ep-C.Fr/ Services-Industriel/Le-Soudage/Soudage Au Gaz.

[10] Cazes, R., soudage par friction (10/02/1996). Techniques de l'ingénieur. http://www.techniques-ingénieur.fr/base-documentaire/soudage-par-friction. (24 avril 2018).

[11] Koen, F., soudage par friction, http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction.

[12] Anglade, B., Horisio, H., Lavernhe, S., Technique de réalisation de châssis micro-soudés : le soudage (03 février 2017). Ecole Normal Supérieure Paris-Saclay

[13] Helal, Y., thèse « L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier ». Université MOHAMMED KHAIDER Biskra (2017).

[14] Schéma du soudage par ultrasons, Wikipédia, l'encyclopédie libre.

[15] Gourdain, J. (2016). Le soudage : Principes et technologies. Éditions Techniques de l'Ingénieur.

Chapitre2

Procédé de soudage par point

Sommaire

2.1 Introduction…… **13**

2.2 Principe du soudage par point……..... **13**

- La phase d'accostage ……..…….... **15**
- La phase de soudage…….…….. **15**
- La phase de forgeage……..…… **15**
- La remontée de l'électrode ……..……...…….. **15**

2.3 Paramètres de soudage par point

2.3.1 Effort de soudage…….……. **16**
2.3.2 Intensité de soudage ……..... **16**
2.3.3 Le temps de soudage…….. **16**
2.3.4 Le temps de maintien..……..…… **16**

2.4 Mécanisme de formation de la soudure…….... **17**
2.5 Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage…… **17**
2.5.1 Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage…. **17**
2.5.2 Les inconvénients du procédé de soudage……..…… 17
2.6 Domaine d-applications……..……..……..……. **17**
2.7 Propriétés métallurgiques de l'aluminium et de l'acier galvanisé……..……. **18**
2.8 Références bibliographiques……..……..…… **18**

2.1 Introduction

Le soudage par points fait partie de la famille des procédés de "soudage par résistance", au même titre que le soudage à la molette, par bossages, ou en bout. Il est utilisé pour assembler deux tôles (ou plus) dont l'épaisseur est typiquement comprise entre 0,5 et 10 mm. Historiquement, ce fut l'Américain Thomson qui eut, en 1877, l'idée d'assembler deux tôles d'acier en utilisant, comme agent de chauffage, l'effet de la traversée de l'assemblage par un courant électrique de forte intensité. Il s'agit depuis longtemps du procédé d'assemblage numéro un des carrosseries automobiles, une voiture nécessitant en moyenne 4000 points soudés.

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. Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes.

2.2 Principe du soudage par point

Le soudage par points s'applique généralement à des assemblages de deux tôles de faibles épaisseurs que l'on cherche à joindre par un point de soudure. Les tôles, mises en contact et soumises à un effort de pression par l'intermédiaire de deux électrodes reliées aux bornes du secondaire d'un transformateur, sont ainsi traversées par un courant alternatif de forte intensité sous une faible tension [2], comme illustrer sur la figure I.1.

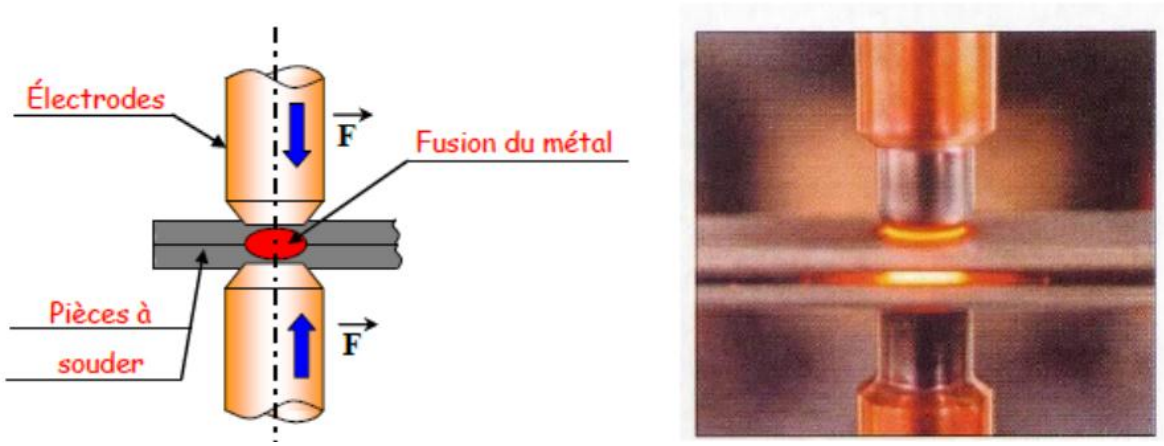


Figure 2.1. Principe du soudage par point

L'opération de soudage peut être décomposée en trois phases principales schématisées dans la Figure 2.2 et sur la Figure 2.3.

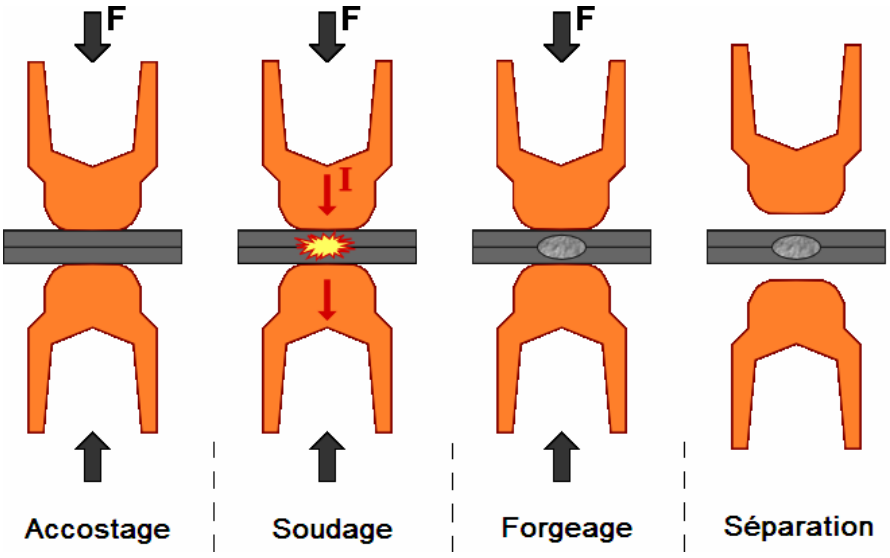


Figure 2.2. Principe du soudage par point [3].

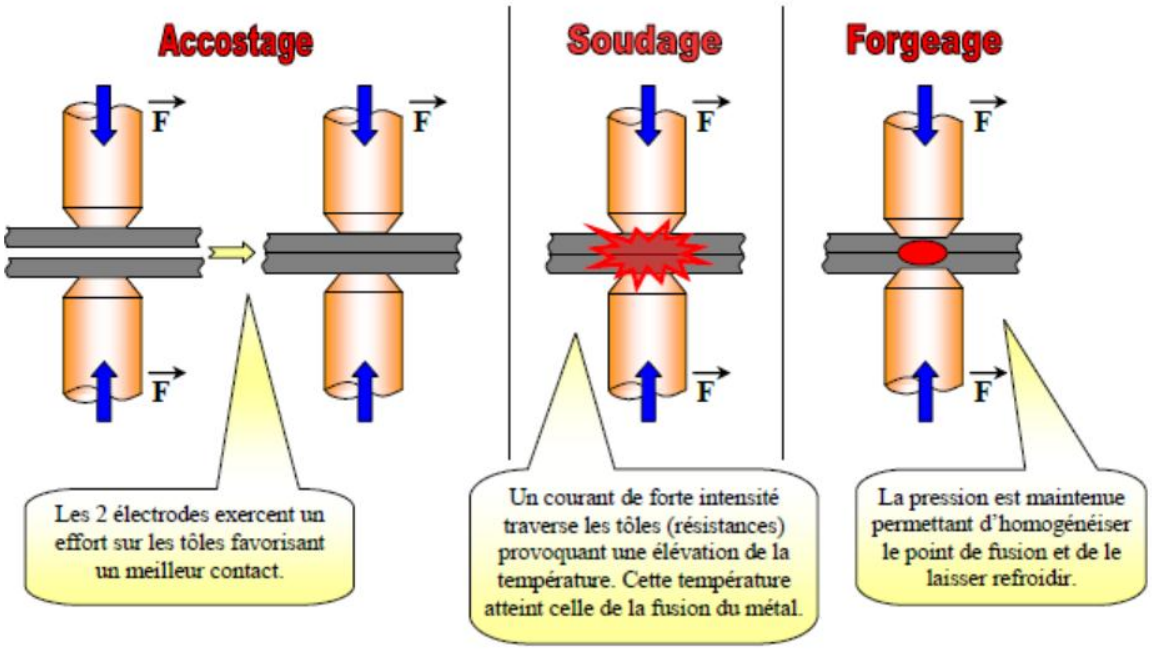


Figure 2.3. Les différentes phases de réalisation d'un point

Les évolutions de l'effort mécanique et du courant de soudage tout au long d'un cycle, sont représentées sur la Figure 2.3. Un point Soudure est égal à un cycle de soudage qui se formera en quatre étapes :

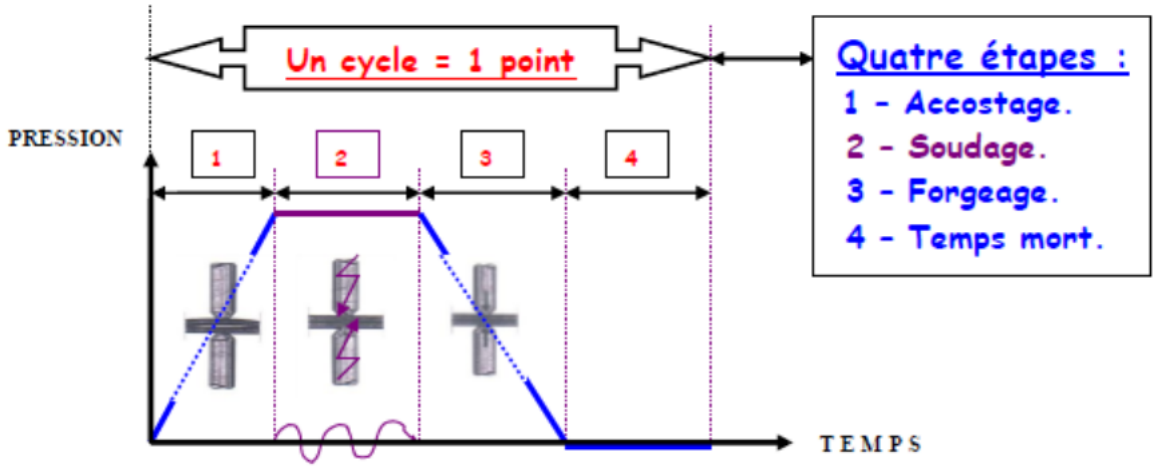


Figure 2.3. Cycle de soudage d'un point de soudure

- **La phase d'accostage :**

Le rôle de cette phase est principalement mécanique. Elle consiste à assurer le contact parfait entre les surfaces à assembler et atteindre le niveau d'effort nécessaire.

- **La phase de soudage :**

Cette phase constitue la phase la plus importante. En effet, un courant électrique (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'Ampère) est établi dans le circuit et passe par les tôles à assembler, d'où la naissance d'un effet Joule au niveau de la surface de contact,

- **La phase de forgeage :**

Au cours de cette phase l'effort de pression des électrodes sur les tôles est maintenu. Cependant, le courant électrique n'est plus appliqué. Les électrodes assurent également le refroidissement dès que l'effet Joule est interrompu. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. Le maintien de l'effort lors du refroidissement assure une bonne solidification et la formation d'un noyau homogène, et par conséquent une bonne tenue mécanique de l'assemblage. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase [4].

- **La remontée de l'électrode :**

L'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point,

2.3 Paramètres de soudage par point

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 :

1. L'effort de soudage,
2. L'intensité,
3. Le temps de soudage,
4. Le temps de maintien.

2.3.1 Effort de soudage

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

2.3.2 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).

2.3.3 Temps de soudage

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

2.3.4 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 [5].

2.4 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre le matériau métallique au niveau du contact tôle-tôle est créée par 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 :

$$\boldsymbol{Q = 0.24 I^2 . R . t} \qquad (1)$$

I : Intensité du courant en ampère.

R : Résistance du circuit à l'endroit du contact des pièces en Ohms

t : Temps de l'action du courant en seconde

2.5 Les avantages et les inconvénients du procédé de soudage

2.5.1 Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage [6]

- ✓ Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité …).
- ✓ Il répond à des sollicitations élevées.
- ✓ Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques, …)
- ✓ Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée (ex.: soudure continue de type molette).
- ✓ Limitation de la pollution, pas de modification structurale, sécurité d'exploitation, pas ou peu de préparation, pas de déformation, pas d'apport (métal ou atmosphère), esthétique du produit fini, prix de revient - peu d'énergie - vitesse d'exécution, amortissement important des machines, qualification élémentaire pour le personnel.
- ✓ Soudure "propre" et de très haute qualité (face d'aspect).
  - □ □ Rapide (5ms à 3 secondes), efficace, peu polluant.
  - □ □ Autogène, ne nécessite pas de produits d'apports.

2.5.2 Les inconvénients du procédé de soudage [6]

- □ Epaisseur soudée limitée à la puissance de la machine.
- □ Difficulté de contrôle de la qualité des points soudés.
- □ Cher, les applications sont limitées, en principe, un poste à souder ne peut réaliser qu'un seul type de soudage.
- □ Usure anormale des électrodes.

2.6 Domaines d'applications [6]

Ce procédé est essentiellement utilisé pour le plaquage des tôles, par exemple cuivre sur acier, aluminium sur acier, acier inoxydable sur acier, cuivre sur nickel, etc. Une très grande variété de tôles est ainsi laminée en sandwich. Elle est utilisée dans de nombreux domaines comme l'industrie des automobiles, électronique, industrie (radiateur, armoire, grille, etc.) et micro-soudage.

2.7 Reference :

[1] Zhang, H., & Senkara, J. (2020). Resistance Welding: Fundamentals and Applications (2nd ed.). CRC Press.

[2] Eric Thieblemont The Se Modelisation Du Soudage Par Resistance Par Points Institut National Polytechnique De Lorraine 4 Septembre 1992

[3] E.Gauthier[a] D. Carron[a] P. Rogeon[a] P. Pilvin[a] C. Pouvreau[a] T. Lety[b] F.Primaux [C] A. Limatb, Université De Bretagne-Sud, Rue De Saint-Maudé, 56321 Lorient B. Psa Peugeot- Citroën, Drd/Dchm/Cfer/Avrt, Route De Gisy, 78943 Velizy-Villacoublay C. Le Bronze Industriel, Avenue Du Général Leclerc, 51600 Suippes Modélisation Numérique De La Dégradation D'électrodes De Soudage Par Point En Alliage Cu-Cr-Zr (B o r d e a u x , 26 Au 30 Août 2013)

[4] Chtourou Rim Thèse De Doctorat Tenue Mécanique Des Assemblages Soudés Par Point Multi-Tôles Et Acier Multigrades : Etude Expérimentale, Modélisation Macroscopique Et Procédure D'identification Mécanique Des Structures [Physics.Class-Ph]. Université De Valenciennes Et Du Hainaut-Cambresis; École Nationale D'ingénieurs De Sfax (Tunisie)

[5] Chainarong Srikunwong T H E Se (Modelisation Du Procede De Soudage Par Points) 14 Octobre 2005

[6] Aluminium France. (2022). *Les propriétés de l'aluminium*.

[7] Machining Custom. (2023). *Propriétés de l'acier galvanisé.*

[8] Pouranvari, M. (2017). "Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities." *Materials Science and Technology*, 33(15), 1705–1712.

Chapitre3 Méthodologie expérimentale

Sommaire

3.1 Introduction……..…

3.2 Matériaux d'étude : ……...……...

3.2.1 Acier Galvanisé DX52D+Z80-W-Y t0.8 :……..

a- Composition et propriétés **:**……

b- Applications :…….

c- Composition chimique :……

3.2.2. Acier Inox SUS430 : :……

a- Propriété mécanique et physique :……

b-Applications :……

c-Composition chimique……..

¤

3.3 Etapes de la réalisation des éprouvettes :…….

3.4 Machine de soudage (Bolt welding machine SMD40-3-3) :……

3.5 Méthode de soudage des éprouvettes :……..

3.6 Essai de traction :…….

3.7 Reference :……..

3.1. Introduction

Nous présentons dans cette partie une étude expérimentale sur plusieurs échantillons de pièces soudées par points, en faisant varier certains paramètres.

Afin d'étudier l'influence du type de matériau, nous avons choisi des pièces en inox SUS430 et des pièces en acier galvanisé DX52D+Z80-W-Y t0.8.

Le soudage a été réalisé à l'aide de la machine à souder par points « Bolt Welding Machine SMD40-3-3 » sur des tôles d'un épaisseur de 0,4 mm pour l'inox et de 0,8 mm pour le galvanisé ont été soudées à l'aide d'électrodes.

Les paramètres et les efforts de soudage varient selon trois cycles de pression (0,2 ; 0,4 ; 0,6 MPA), avec une intensité électrique de 20, 25 et 30 Ampères.

3.2. Matériaux d'étude :

3.2.1. Acier Galvanisé DX52D+Z80-W-Y :

Selon la norme européenne, **DX52D** désigne un acier à formage à froid avec revêtement par trempe à chaud (galvanisation)

a) Les codes de revêtement indiquent le type de zinc appliqué :

- **+Z** : zinc pur (galvanisation).
- Le suffixe **Z80** indique une masse de revêtement d'environ 80 g/m².
- Le **-Z-Y** précise un traitement de surface (chromatation pour amélioration anticorrosion et adhérence de couche).
- Revêtement zinc pur d'environ **80 g/m²** (environ 8 µm par face)
- Le zinc crée une barrière anticorrosion et protège aussi par action galvanique.
- Le traitement **-Y** (chromatation/phosphatation plus huilage léger) améliore la protection et l'adhérence des peintures.
- Limite élastique (Re) : ≥ 140 MPa (jusqu'à 300 MPa selon épaisseur)
- Résistance à la traction (Rm) : entre 270 et 420 MPa
- Allongement A80 : ≥ 26 % (pour t ≤ 0,7 mm).

b) Composition chimique :

La composition sont donnés selon le tableaux suivant :

Tableau 3.1 : Composition chimique des aciers galvanisé [1]

Élément	C	Si	Mn	P	S	Ti
% maxi	0,12	0,50	0,60	0,10	0,045	0,30

c) Applications :

DX52D+Z80 est utilisé dans des secteurs variés grâce à sa bonne formabilité, résistance mécanique et résistance à la corrosion, tels que :

- Automobile : panneaux de carrosserie, renforts structuraux Bâtiment : bardage, toitures, ossature métallique
- Électroménager : carcasses, caisses, armoires électriques
- Meuble métallique, emballage, tuyauterie, etc.

3.2.2. Acier Inox SUS430 :

SUS 430 est un acier inoxydable ferritique au chrome (16–18 %), défini par la norme japonaise JIS G4303 (équivalent à AISI 430 / EN 1.4016). Il est magnétique, non durcissable par traitement thermique, mais sa dureté augmentée par écrouissage.

a) Propriété mécanique et physique :

- **Limite d'élasticité (Rp0,2)** : ≈ 205 MPa
- **Résistance à la traction (Rm) :** 450–600 MPa
- **Allongement** : 11–22 % selon condition de livraison
- **Dureté :** ≈ 183 HBW ou 88 HRB
- **Densité** : ~7,70 g/cm³
- **Conductivité thermique :** 25–26 W/m·K
- Bonne résistance à la corrosion en environnements doux (aérien, domestique), mais sensible aux chlorures.
- Magnétique, absence de nickel le rend économique et compatible avec les applications sensibles aux allergies au nickel
- Bonne formabilité, usinabilité, et soudabilité (addition de Ti stabilisant optimise la zone de soudure)

b) Composition chimique :

Tableau 3-2 : Composition chimique des aciers Inox SUS430 [2]

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Min	–	–	–	–	–	16,0	–
Max	0,12	0,75	1,00	0,04	0,03	18,0	0,60

c) Applications :

- Ustensiles et équipements de cuisine (casseroles, éviers, hottes…)
- Électroménager (tours de réfrigérateurs, tambour machine à laver …)

- Pièces automobiles (embouts d'échappement, garnitures)
- Équipements chimiques et architecturaux (tours, panneaux, revêtements)

3.3. Etapes de la réalisation des éprouvettes :

Les échantillons utilisés pour les essais sont formés de deux plaques rectangulaires, mesurant 135 mm de long et 20 mm de large, assemblées par point de soudure comme représenté sur la figure suivante.

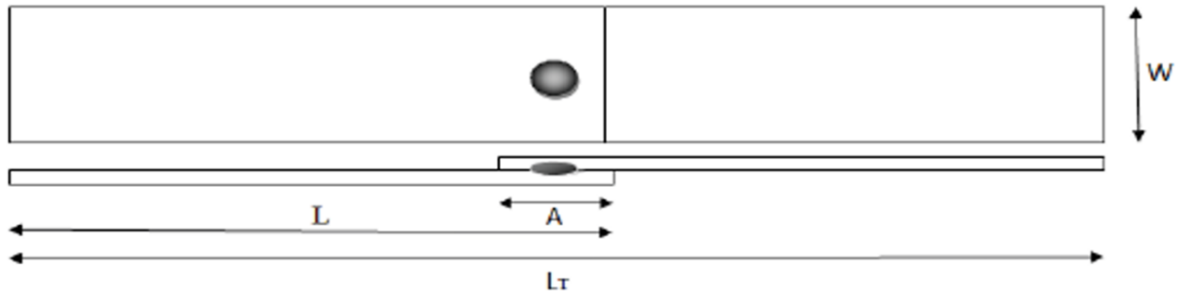


Figure 3.1: Dimensions des éprouvettes soudées (L= 135 mm ; LT = 240 mm ; W= 20 mm ; A= 30 mm)

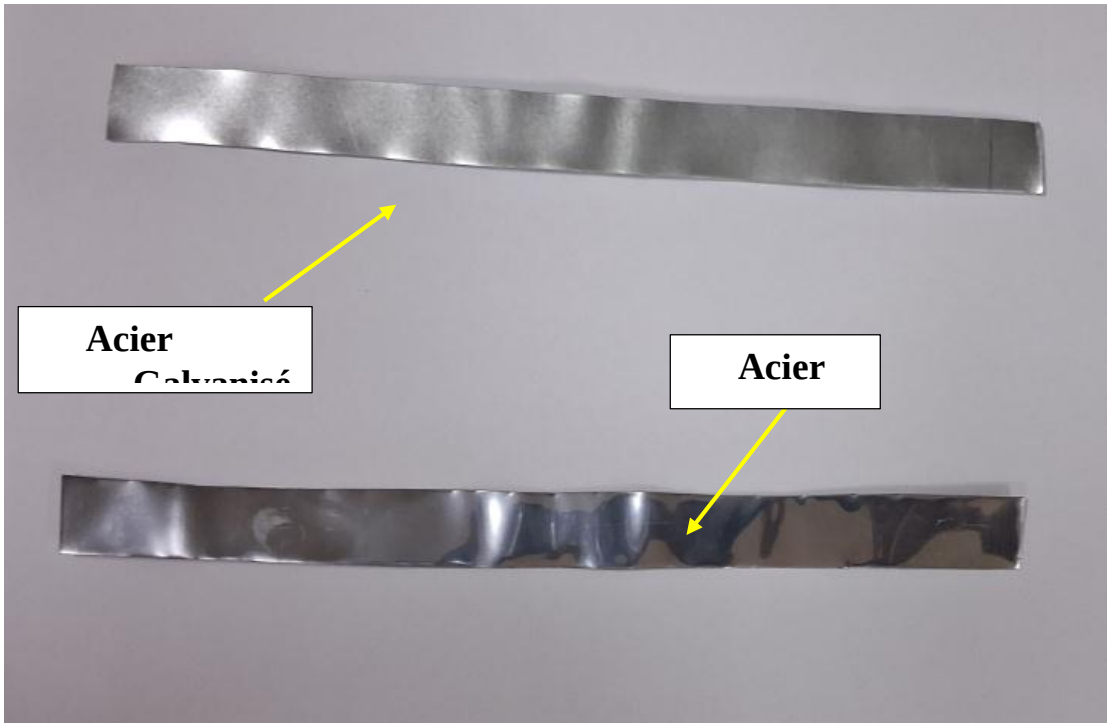


Figure 3.2 : Des éprouvettes avant soudage

3.4. Machine de soudage (Bolt welding machine SMD40-3-3) :

Aussi appelées resistance spot welder**,** ces machines utilisent de forts courants électriques combinés à une pression mécanique pour créer des points de soudure par fusion locale du métal. Le modèle **SMD40-3-3** est typiquement pneumatique ou à commande servo, avec contrôle micro-ordinateur pour le courant, et la pression.

Dans l'Entreprise Condor l'utilisation de la machine de soudage par point a des paramètres régler de (Intensité = 20 ampère et Pression = 0.4MPA) pour souder les pieds sur chassis pour obtenir un ensemble des pièces (la base).

Figure 3.3 : Machine de soudage par point.

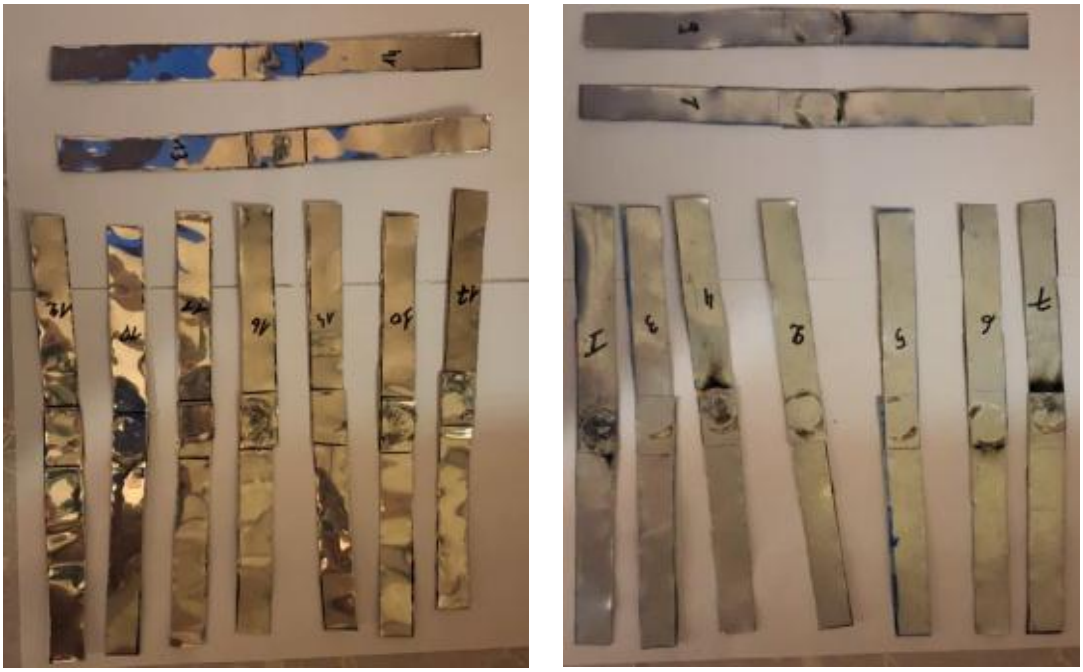


Figure 3.4 : Eprouvettes après le soudage

3.5. Méthode de soudage des éprouvettes :

La méthode utilisée pour le soudage des éprouvettes est illustrée à **la Figure 3.4**. Le **placement des éprouvettes** est présenté dans la **Figure 3.5**, tandis que les **points de soudage** sont indiqués dans la **Figure 3.6**. Dans le cadre de notre étude, les **paramètres de soudage ont été variés** selon les valeurs indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Les déférant paramètres de soudage par point

N° d'éprouvette			Intensité (Ampère)	Pression (MPa)
Galv	Inox	Inox+Galv		
Ep01	Ep10	Ep19	20	0.2
Ep02	Ep11	Ep20		0.4
Ep03	Ep12	Ep21		0.6

Ep04	**Ep13**	**Ep22**	**25**	**0.2**
Ep05	**Ep14**	**Ep23**		**0.4**
Ep06	**Ep15**	**Ep24**		**0.6**
Ep07	**Ep16**	**Ep25**	**30**	**0.2**
Ep08	**Ep17**	**Ep26**		**0.4**
Ep09	**Ep18**	**Ep27**		**0.6**

Figure 3.5 : Placement des éprouvettes

Figure 3.6 : Soudage des éprouvettes

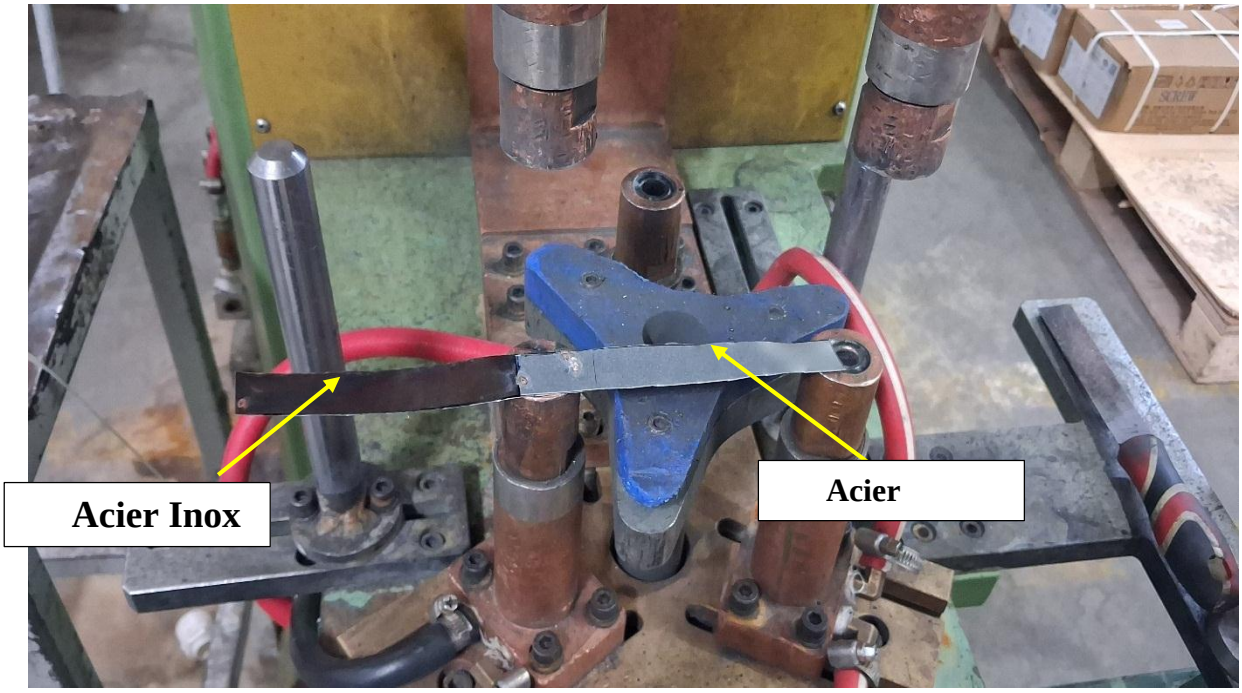


Figure 3.7 : Point de soudage

Dans la présentation des éprouvettes soudées**,** les points de soudage présentent une surface de contact entre l'électrode mobile et l'acier inox**.** On remarque qu'avec l'augmentation de l'intensité du courant, l'inox fonds plus facilement que l'acier galvanisé, et le point de soudage apparaît lorsque la fusion de l'inox devient plus importante que celle de l'acier galvanisé (voir Figure 3.7).

3.6. Essai de traction :

Une fois les différents échantillons de pièces soudées réalisés avec des paramètres variés, des essais de traction ont été effectués. Ces essais consistent à appliquer une charge de traction progressive sur chaque pièce soudée jusqu'à sa rupture (voir Figure 3.8).

Figure 3.8 : Machine d'essai de traction.

Les essais de traction réalisés ont permis de tracer les courbes contrainte–allongement. Le principe de l'essai de traction consiste à appliquer une charge croissante sur une éprouvette en acier jusqu'à sa rupture**.** Les charges appliquées sont ramenées à la section initiale de l'éprouvette, et l'allongement est mesuré au moment de la rupture**.**

- **Caractéristiques de la machine d'essai de traction :**

La machine dont fait état la description est une machine d'essais de table avec une capacité maximale de 10 kN. Les données essentielles à la machine d'essais des matériaux figurent sur sa plaque signalétique [3].

Z = Machine d'essais des matériaux Zwick.

010 = Capacité maximale de 10 kN.

T = Machine d'essais, version de table.

H =Bâti rallongé.

2 = Entraînement DC, 500W.

S = Electronique de pilotage Standard.

- **Exécution de l'essai :**

L'éprouvette est placée dans la machine d'essai (Figure 3.8). L'une des têtes est fixée dans une mâchoire fixe et l'autre dans une mâchoire mobile. La machine fournit un effort de traction F variable dont l'action s'exerce jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La vitesse de mise en charge ou vitesse de traction doit être assez faible ; elle est de l'ordre de 10 N/mm^2 /s. Des appareils de mesures installés sur la machine permettent de connaitre à chaque instant l'effort appliqué F sur l'éprouvette et la variation de longueur $\Delta L=L-Lo$ (Fig. 4.) de cette éprouvette.

F est mesuré par un indicateur de force et ΔL correspondante est mesurée par un extensomètre mécanique.

L'essai de traction constitue le choix le plus logique grâce à sa simplicité du montage et sa répartition uniforme des contraintes et des déformations qui simplifie les mesures. a déformation de la plupart des matériaux se caractérise par un domaine linéaire qui correspond à une déformation élastique suivie par un domaine non linéaire qui correspond à une déformation plastique et se termine par la rupture de l'éprouvette. Ces différentes phases nous permettent de déterminer les principales caractéristiques mécaniques du matériau telles que le module d'élasticité E, le coefficient de Poisson ν, la limite d'élasticité σ_e, la résistance à la rupture σ_r, l'allongement après rupture et le coefficient de striction (étranglement).

Dans l'unité ANABIB de Bordj Bou Arreridj, la machine d'essai comporte un mécanisme enregistreur, où on obtient après l'essai de l'échantillon un diagramme représentant la relation entre les efforts F et les allongements ΔL ''F=f (ΔL)'' tracé à une échelle déterminée sur une feuille de papier et qu'on appelle diagramme ''efforts-allongements''

3.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents paramètres à analyser dans le cadre de notre expérimentation, ainsi que les deux matériaux utilisés et les différentes étapes à

suivre. Les résultats obtenus à l'issue de ces essais seront exposés dans le chapitre suivant.

3.8. Références :

[1] Thyssenkrupp Materials Europe. *DX52D | 1.0918 (EN 10346) – Chemical composition*. 2025.

[2]. **Xometry Europe.** (2023). *430 Stainless Steel Material Properties*.

Chapitre 4

Résultats et Discussions

Sommaire

4.1 Introduction..... ……..

4.2 Etude d'impact de variation de pression et de la résistance ..... ……

4.3 Résultats des résistances maximales ..... ……..

4.4 Résultats des résistances maximales……

4.5 Conclusion .....

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus à partir de l'essai de traction appliqué sur les éprouvettes des pièces soudées, en faisant varier certains paramètres tels que l'intensité du courant et la pression. L'essai de traction permettra de déterminer la force maximale appliquée jusqu'à la rupture du point de soudure, ainsi que les courbes de traction qui nous aideront à analyser le comportement mécanique des différentes éprouvettes jusqu'à leur rupture.

4.2. Résultats de l'essai de traction des aciers utilisés

La figure 4.1 montre l'éprouvette d'acier galvanisé après l'essai de traction, et la figure 4.2 représente la courbes contrainte/allongement l'éprouvette d'acier galvanisé où la résistance maximale (R_m) près de 170 N/mm².

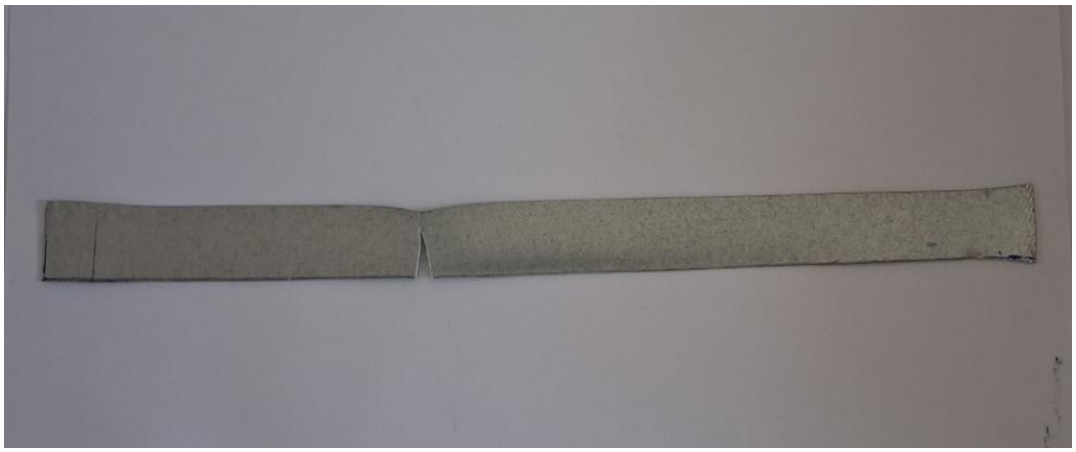


Figure 4.1 Eprouvette d'acier galvanisé après l'essai de traction

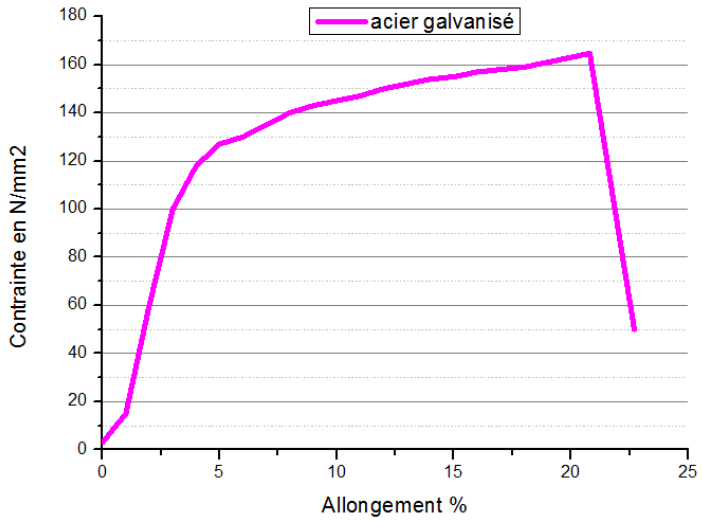


Figure 4.2. Courbes contrainte/allongement éprouvette d'acier galvanisé

La figure 4.3 montre l'éprouvette d'acier galvanisé après l'essai de traction, et la figure 4.4 représente la courbes contrainte/allongement de l'éprouvette d'acier inoxydable où la résistance maximale (R_m) près de 425 N/mm².

Figure 4.3: Eprouvette d'acier Inox après l'essai de traction

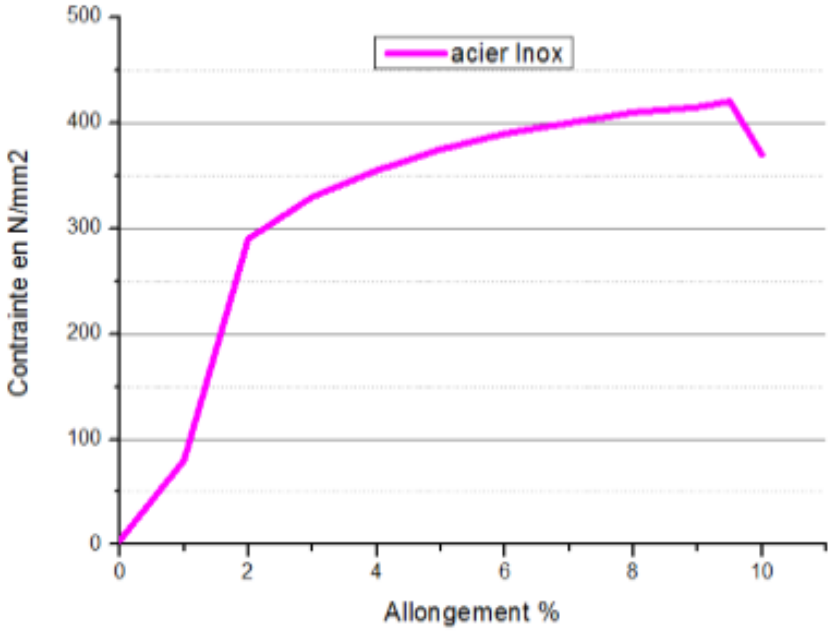
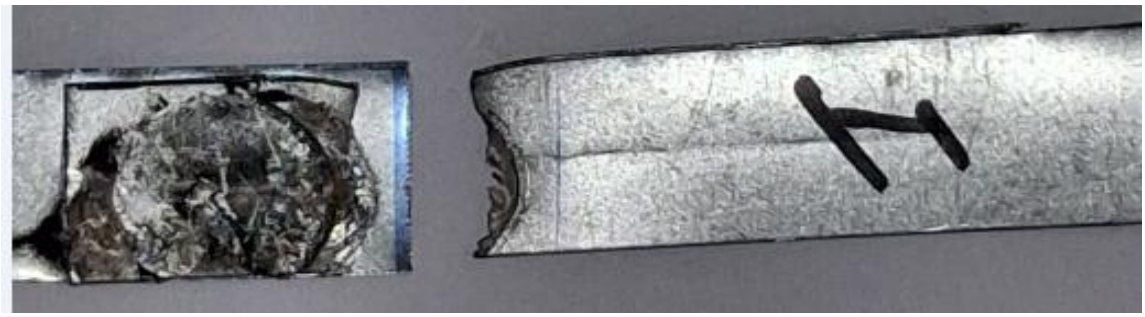


Figure 4.4, : Courbes contrainte/allongement éprouvette d'acier inoxydable

4.3. Impact l'intensité et la pression sur le soudage de l'acier galvanisé DX52

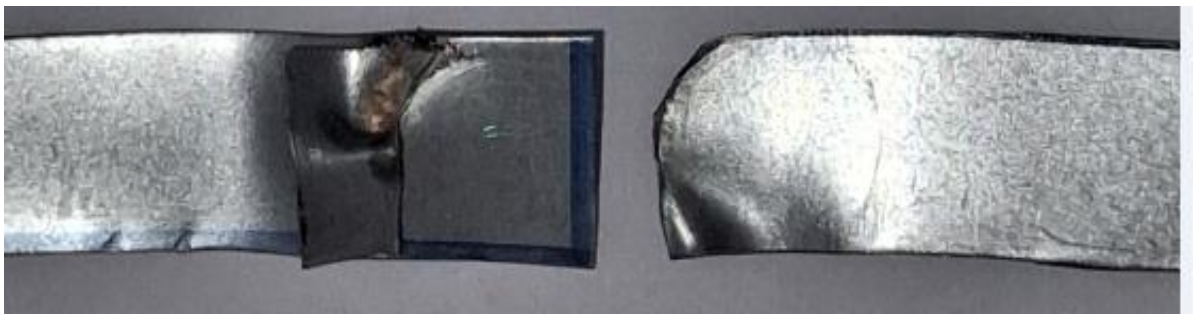
Les figures suivantes présentent les différents résultats de l'essai de traction avec la variation des pressions et intensités. D'après ces figures on observe que :

- Pour une intensité de 20 Ampère, et une pression de 0,2 MPA, la résistance maximale est inférieure à celle de l'acier galvanisé. La rupture se produite au niveau du point de soudage, indiquant une soudure faible. Mais par ailleurs si on augmente la valeur de la pression à 0.4 MPA, la résistance maximale augmente est sera proche de celle de l'acier galvanisé, et la rupture se produite loin du point de soudure.



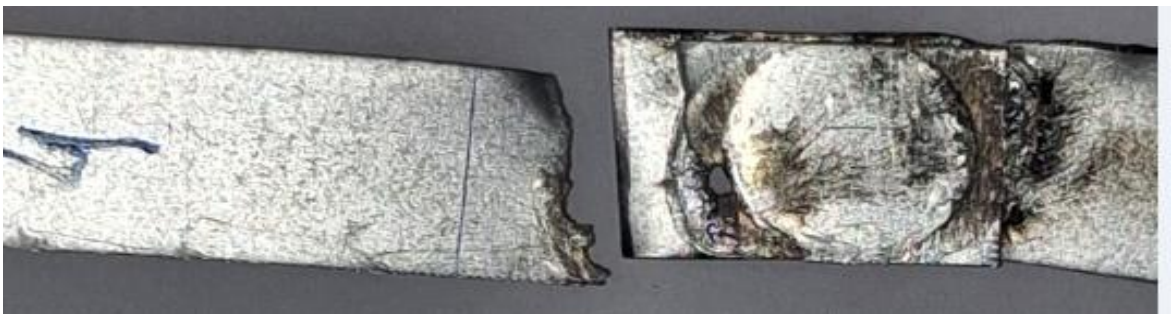
Ep01 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

Ep02 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.4 MPA



Ep03 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

- Pour les éprouvettes avec une intensité de 25 Ampère, la meilleur valeur la résistance maximale ce trouve avec une valeur de pression = 0.4 MPA, où la résistance maximale est plus proche de celle l'acier galvanisé. Les trois éprouvettes ci-dessous montrent la variation des points de soudage :



Ep04 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

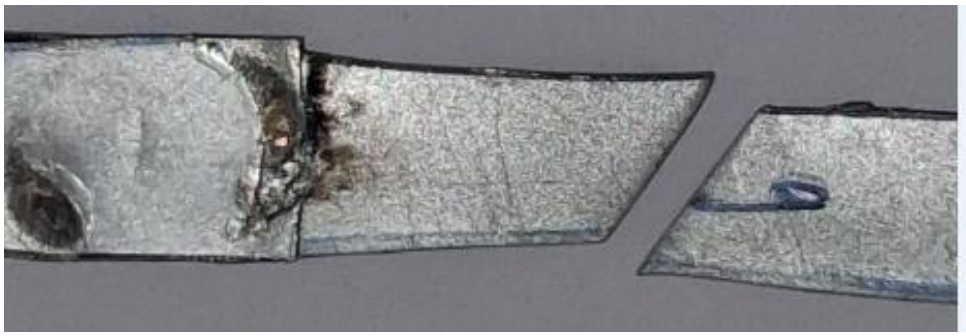
Ep05 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.4 MPA

Ep06 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

- Pour les éprouvettes avec une intensité de 30 Ampère, la meilleure valeur de la résistance maximale ce trouve avec une valeur de pression = 0.6 MPA, où la résistance maximale est plus proche aussi de celle l'acier galvanisé. Les trois éprouvettes ci-dessous montrent la variation des points de soudage :

Ep07 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

Ep08 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.4 MPA



Ep09 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

Figure 4.5 : Eprouvettes de l'acier galvanisé après le soudage

Le tableau **4.1**, résume les résultats des résistances maximales de chaque éprouvette de l'acier galvanisé.

N° d'éprouvette	Intensité (Ampère)	Pression (MPa)	Rm (N/mm²)
Galvanisé			
Ep1	**20**	**0.2**	**81.89**
Ep2		**0.4**	**162.26**
Ep3		**0.6**	**109.70**
Ep4	**25**	**0.2**	**130.48**
Ep5		**0.4**	**169.51**
Ep6		**0.6**	**129.32**
Ep7	**30**	**0.2**	**135.79**
Ep8		**0.4**	**113.69**
Ep9		**0.6**	**167.44**

Tableau 4.1. Les différant Résistance Maximal après l'essai de traction de l'acier galvanisé

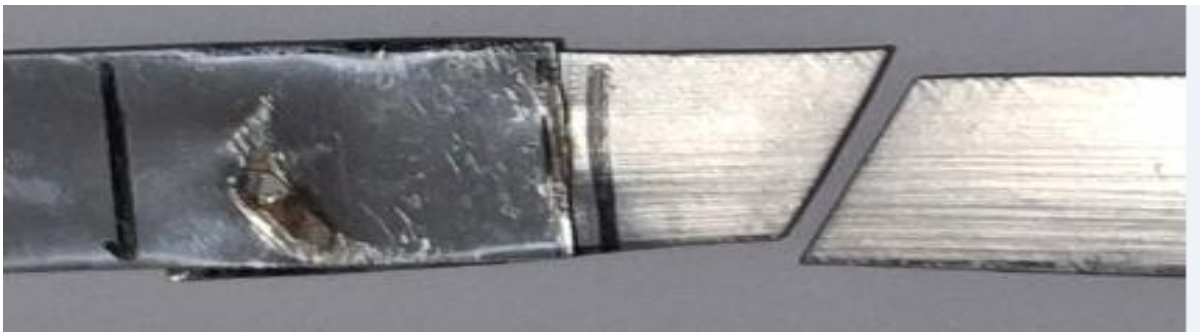
4.3. Impact l'intensité et de la pression sur le soudage de l'acier inoxydable

Les figures suivantes présentent les différents résultats de l'essai de traction avec la variation des pressions et intensités. D'après ces figures on observe que :

- Pour une intensité de 20 Ampère, et des valeurs de pression de 0,2 ; 0.4 ; la résistance maximale est inférieure à celle de l'acier inoxydable et la rupture se produite au niveau du point de soudage. Mais avec une pression = 0.6 MPA on voit que la rupture se produite loin du point de soudure et la résistance maximale plus proche de l'acier inoxydable.

Ep10 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

Ep11 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.4 MPA



Ep12 Intensité = 20 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

- Pour les éprouvettes avec une intensité de 25 Ampère, avec une pression de 0.2 et 0.4 MPA la rupture se produite au point de soudure et la résistance maximale et très faible et loin de celle de l'acier inoxydable. Mais par ailleurs si on augmente la pression à 0.6

MPA avec même valeur d'intensité (0.25 Ampère), la résistance maximale augmente est sera plus proche de celle de l'acier inoxydable, et la rupture se produite loin du point de soudure, indiquant une soudure fiable. Les trois éprouvettes ci-dessous montrent la variation des points de soudage :

Ep13 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

Ep14 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.4 MPA

Ep15 Intensité = 25 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

- Pour les éprouvettes avec une intensité de 30 Ampère, et des valeurs de pression =0.2 ; 0.4 et 0.6 MPA on obtient des valeurs de résistance maximale faible. Les trois éprouvettes ci-dessous montrent la variation des points de soudage où la rupture se fait aux points de soudure et la résistance maximale est inférieure à celle de l'acier inoxydable :

Ep16 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.2 MPA

Ep17 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.4 MPA

Ep18 Intensité = 30 Ampère ; Pression = 0.6 MPA

Figure 4.6 : Eprouvettes de l'acier Inoxydable après le soudage

Le tableau 4.2, résume les résultats des résistances maximales de chaque éprouvette de l'acier inoxydable.

N° d'éprouvette	Intensité (Ampère)	Pression (MPa)	Rm (N/mm²)
Inox			
Ep10	**20**	**0.2**	**383.58**
Ep11		**0.4**	**312.00**
Ep12		**0.6**	**445.89**
Ep13	**25**	**0.2**	**230.03**
Ep14		**0.4**	**208.58**
Ep15		**0.6**	**444.67**
Ep16	**30**	**0.2**	**72.31**
Ep17		**0.4**	**354.64**
Ep18		**0.6**	**218.62**

Tableau 4.2. Les valeurs de la résistance maximale après l'essai de traction de l'acier inoxydable

4.2. Etude d'impact de variation de pression sur les éprouvettes dissimilaires :

Les différents résultats de l'essai de traction en fonction de la variation de la pression mettent en évidence l'efficacité du soudage pour les différentes valeurs de pressions.

Les figures ci-dessous présentent les différents résultats de l'essai de traction. A partir de ces figures on observe que :

- Pour une intensité de 30 Ampère, la résistance maximale est inférieure à celle de l'acier galvanisé et en remarque une fusion de l'acier galvanisé en raison de l'augmentation de l'intensité. La rupture se produit au niveau du point de soudage, indiquant une soudure faible.

- Pour une intensité de 25 Ampère, la résistance maximale est plus que l'acier galvanisé.

Montre que :

- L'éprouvette avec une pression de 0.4 MPA présente une résistance maximale de 348.71 N/mm² plus que l'acier galvanisé (164.68 N/mm²), si la rupture se produit dans l'acier galvanisé. (Soudage résistant)

- Pour une intensité de 20 Ampère, la résistance maximale est plus que l'acier galvanisé.

Montre que :

- L'éprouvette avec une pression de 0.6MPA présente une résistance maximale de 347.66 N/mm² plus que l'acier galvanisé (164.68 N/mm²), si la rupture se produit dans l'acier galvanisé. (Soudage résistant)

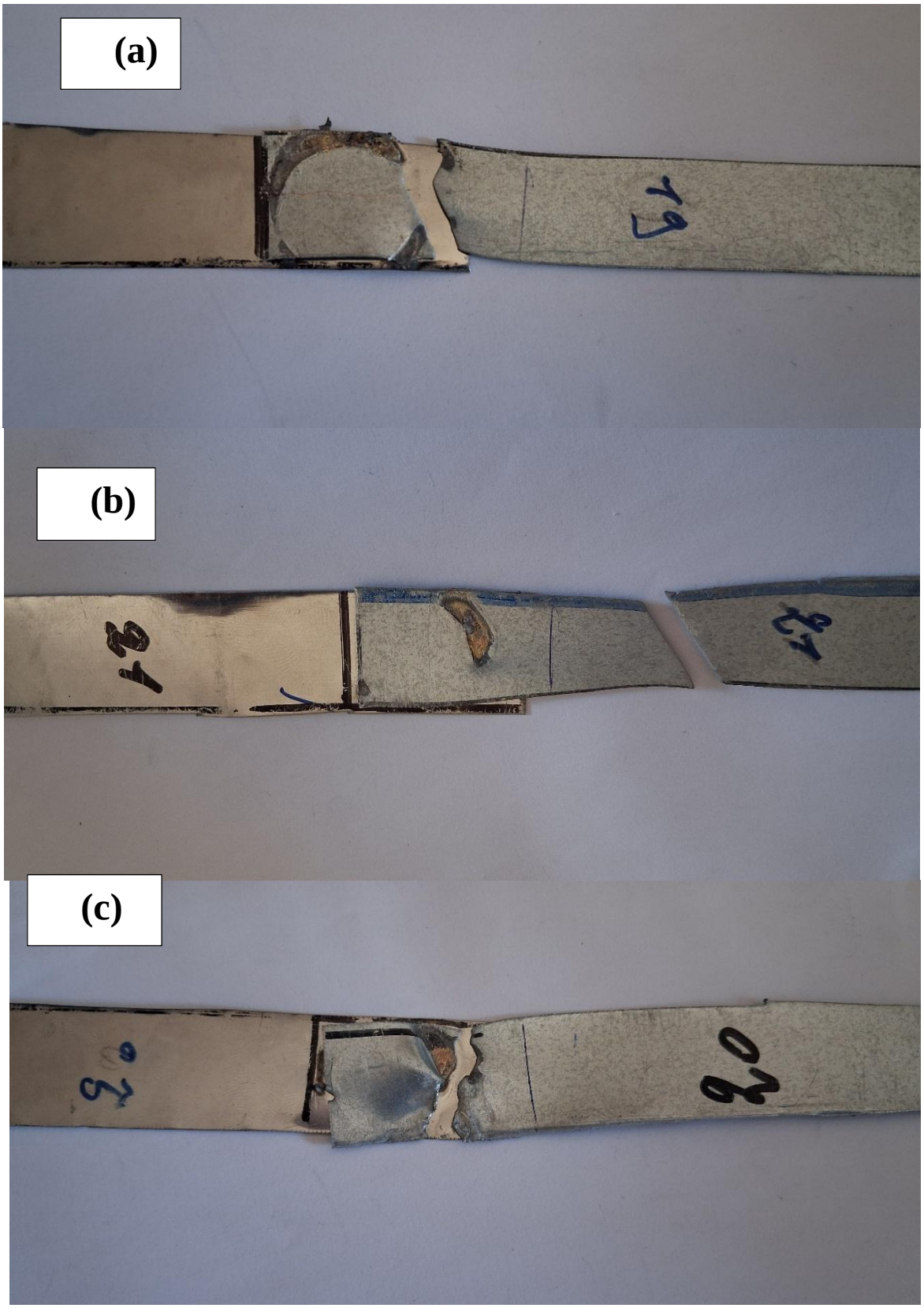


Figure 4.7 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : **l'intensité = 20 A**
a) pression = 0.2 MPA ; b) pression = 0.4 MPA ; c) pression =0.6 MPA

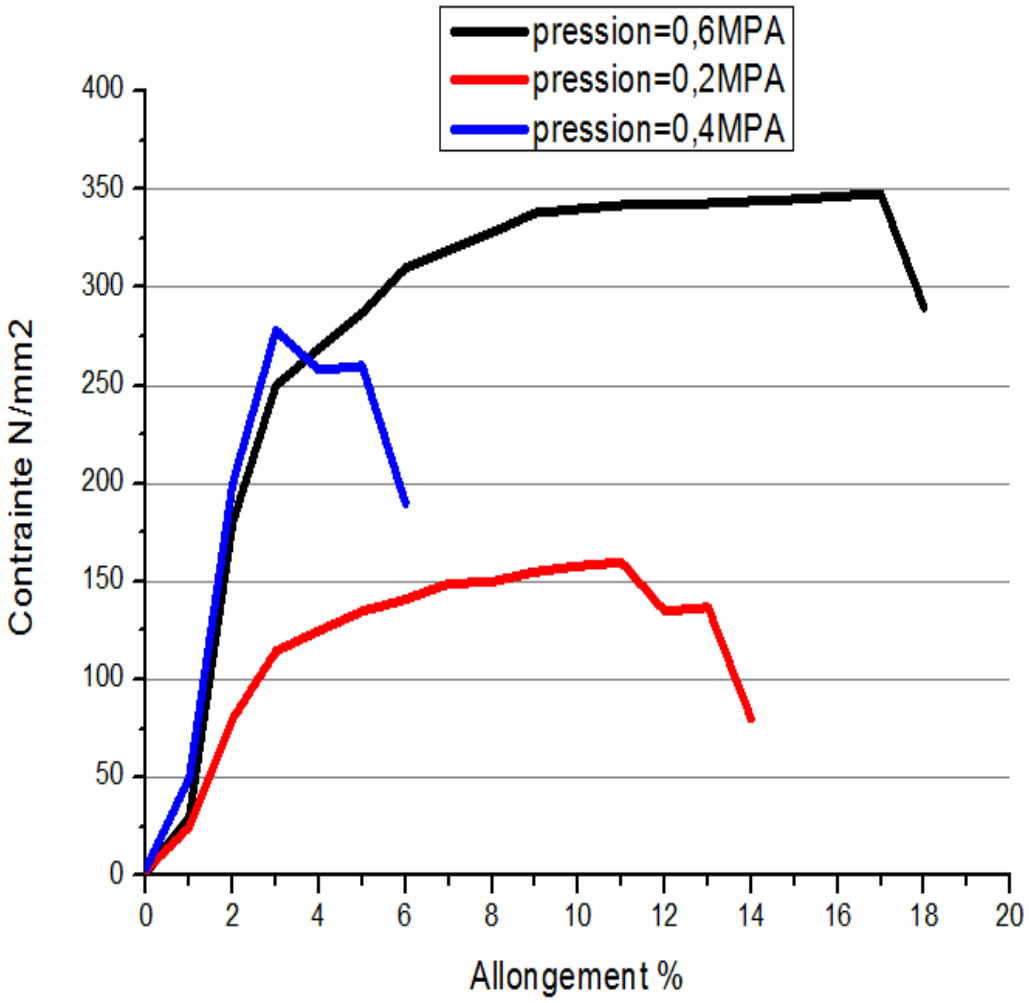


Figure 4.8 : Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 20 Ampère**

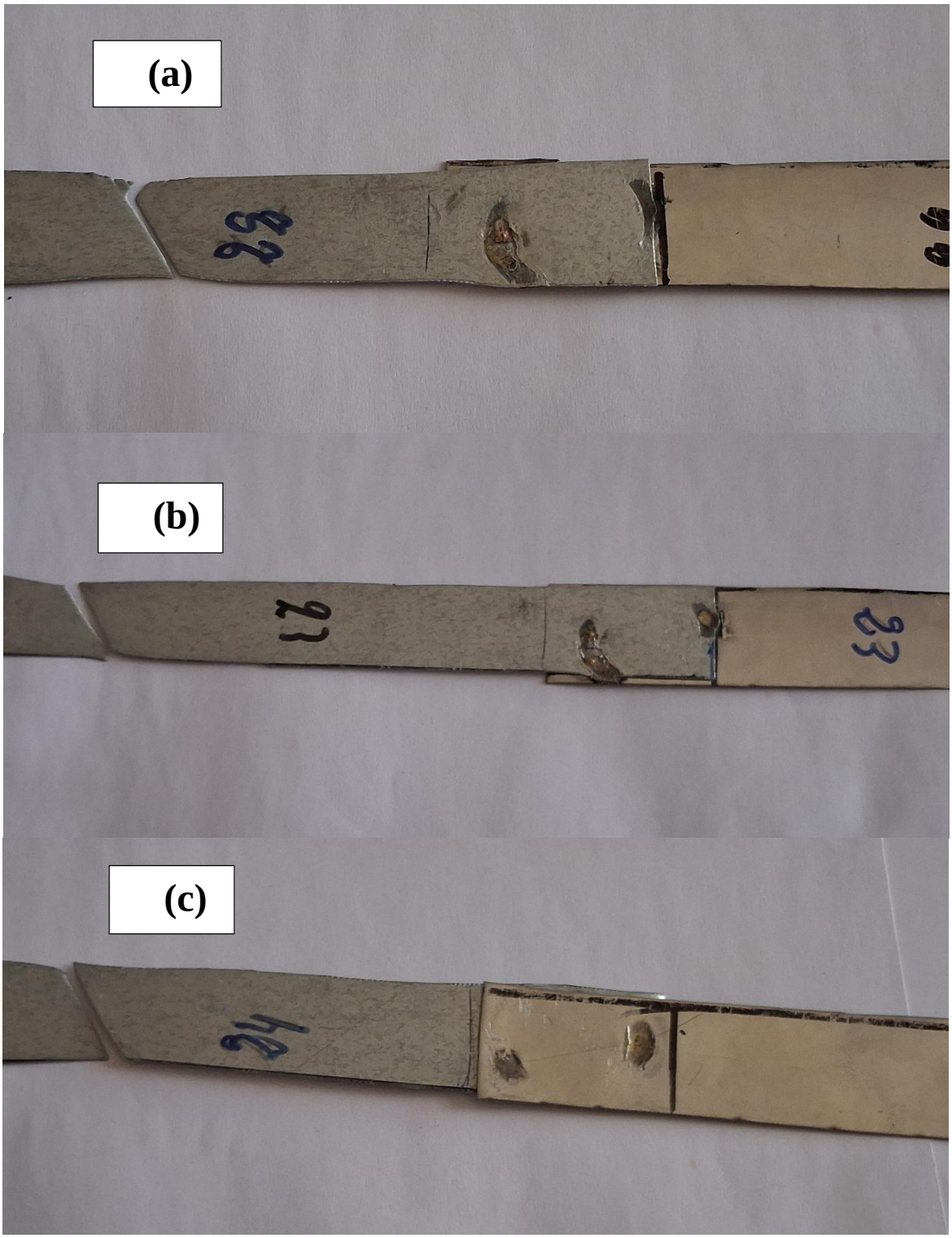


Figure 4.9 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : **l'intensité = 25 A**
a) pression= 0.2 MPA ; b) pression = 0.4 MPA ; c) pression = 0.6 MPA

Le Tableau 4.3. Représente les résultats des résistances maximales de résistance relevées pour chaque éprouvette.

D'après le tableau 4.3. La résistance maximale la plus élevée enregistrée est de Rm = 378,21 N/mm², obtenue sous une pression de 0,6 MPa et une intensité de 25 A.

En analysant la courbe de la **Figure 4.10**, nous observons que la résistance maximale (Rm) atteint 347,66 N/mm², ce qui indique que la rupture s'est produite dans l'acier galvanisé.

Cette conclusion est renforcée par la **Figure 4.11**, qui met en évidence une bonne qualité du point de soudage, puisque la rupture a eu lieu dans l'acier galvanisé.

La **Figure 4.12** montre que la résistance maximale du point de soudure est faible, et que la rupture se produit au point de soudure.

Enfin, on peut déduire que la qualité du soudage varie selon les conditions de fonctionnement, notamment en fonction de la pression et de l'intensité du courant.

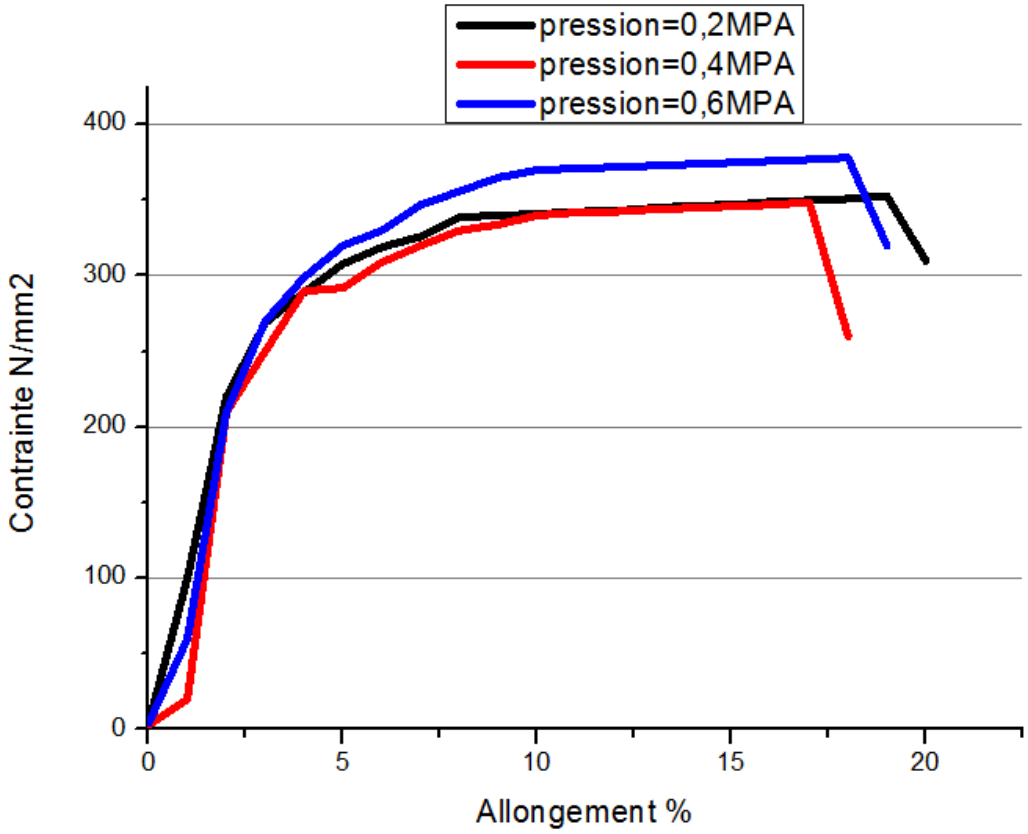


Figure 4.10: Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 25 Ampère**

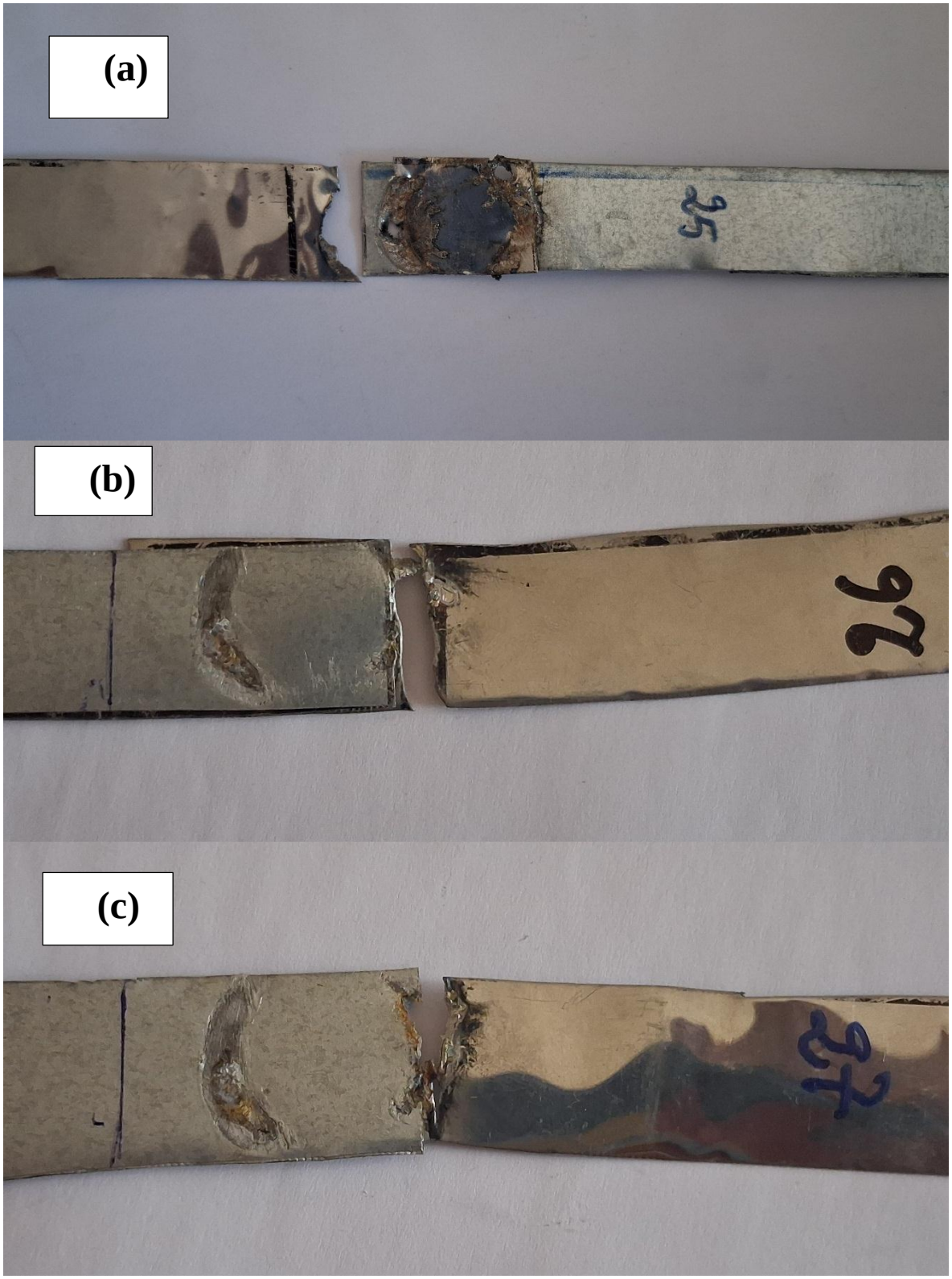


Figure 4.11 : Eprouvettes après l'essai de traction avec : **l'intensité = 30 A ; a) pression = 0.2 MPA ; b) pression = 0.4 MPA ; c) pression = 0.6 MPA**

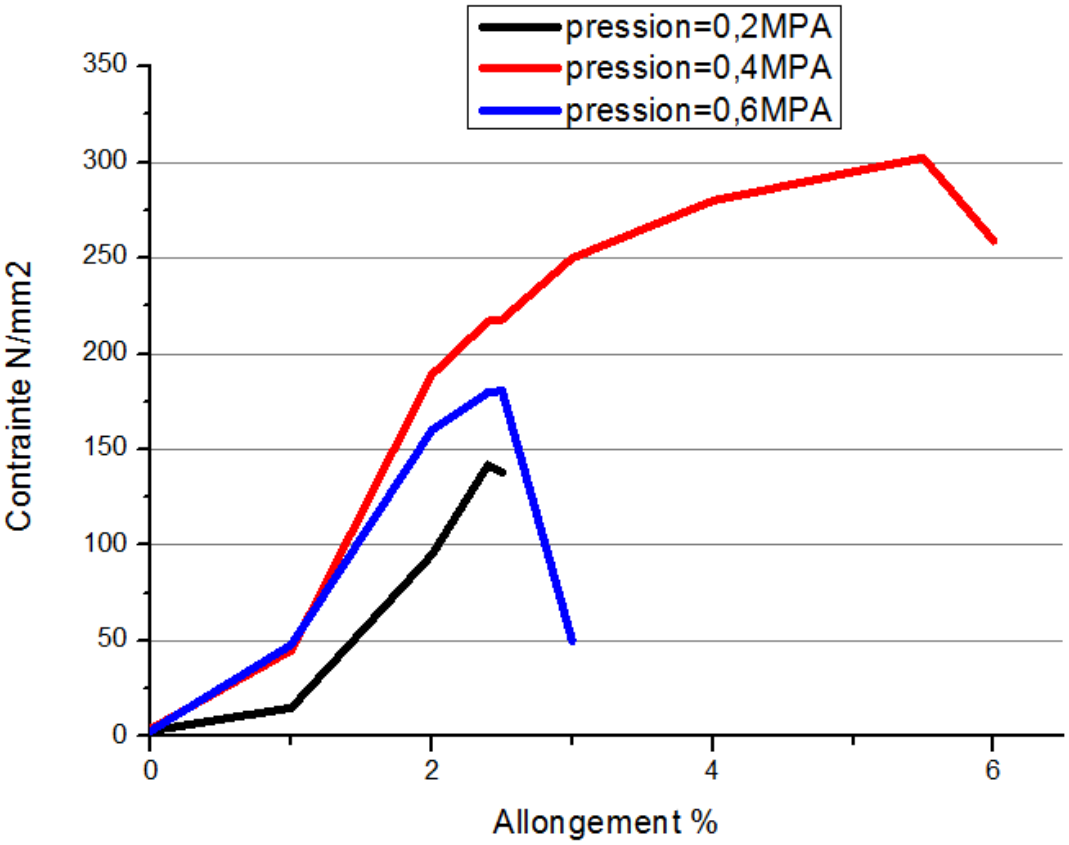


Figure 4.12 : Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 30 Ampère**

N° d'éprouvette	Intensité (Ampère)	Pression (MPa)	Rm (N/mm²)
Inox + Galva			
Ep19	**20**	**0.2**	**159.99**
Ep20		**0.4**	**281.83**
Ep21		**0.6**	**347.66**
Ep22	**25**	**0.2**	**352.80**
Ep23		**0.4**	**348.71**
Ep24		**0.6**	**378.21**
Ep25	**30**	**0.2**	**141.81**
Ep26		**0.4**	**302.33**
Ep27		**0.6**	**180.73**

Tableau 4.3. Les différant Résistance Maximal après l'essai de traction

4.5 Conclusion :

Grâce à cette étude, les constats suivants ont pu être établis :

- La résistance du point de soudure est généralement plus élevée avec l'acier inoxydable lorsqu'il ne subit pas de fusion excessive. En revanche, l'acier galvanisé peut présenter des impuretés ou une couche de zinc oxydée qui affaiblit la résistance du point de

soudure, contrairement à l'inox, qui offre une meilleure stabilité structurelle lors du soudage.

- Lorsque l'intensité augmente, la qualité du point de soudage diminue.
- Avec un courant de 25 A, on obtient la soudure la plus performante, la résistance maximale se rapprochant de celle de l'acier inoxydable.

Conclusion

Ce travail de recherche a permis d'explorer en profondeur le procédé de soudage par points, en mettant particulièrement l'accent sur son application sur deux matériaux industriels largement utilisés : l'acier galvanisé DX52D+Z80-W-Y et l'acier inoxydable SUS430. À travers une approche expérimentale rigoureuse, nous avons étudié l'impact de plusieurs paramètres clés, notamment l'intensité du courant et la pression exercée, sur la résistance mécanique des assemblages soudés.

Les résultats obtenus démontrent que la qualité du point de soudure varie significativement en fonction des conditions de soudage. Il a été établi que l'intensité de 25 A combinée à une pression de 0,6 MPa offre les meilleures performances mécaniques, avec une résistance maximale atteignant 378,21 N/mm², preuve d'une soudure efficace et homogène. Ce comportement a été particulièrement remarquable dans le cas des assemblages mixtes acier galvanisé / inox.

Par ailleurs, l'étude a révélé que le soudage de l'inox présente une stabilité supérieure, tandis que l'acier galvanisé peut souffrir d'une altération de la zone de soudure due à la présence de la couche de zinc, influençant négativement la qualité du joint. Les essais de traction ont également mis en évidence que des intensités trop élevées dégradent le point de soudure, en causant une fusion excessive ou une rupture prématurée.

En conclusion, cette étude met en exergue l'importance du contrôle précis des paramètres de soudage afin d'optimiser la qualité des assemblages. Elle ouvre également la voie à des perspectives d'amélioration, notamment par l'utilisation de techniques de contrôle non destructif et l'intégration de systèmes de régulation automatique dans les machines de soudage.

Resume

الملخص:

يركز هذا البحث على دراسة عملية اللحام النقطي (Resistance Spot Welding) على نوعين مختلفين من الفولاذ الصناعي واسع الاستخدام: الفولاذ المجلفن والفولاذ غير القابل للصدأ.

تم تنفيذ التجارب باستخدام آلة لحام بالنقطة، مع تغيير قيم شدة التيار الكهربائي (30،25،20 امبير)والضغط الميكانكي المطبق(0.2، 0.4، 0.6 ميغاباسكال) بهدف تحديد التأثيرات المباشرة لهذه المتغيرات على مقاومة اللحام القصوى وجودة الصلة.

أظهرت النتائج أن الجمع بين شدة 25 أمبير وضغط 0.6 ميغاباسكال حقق أفضل أداء ميكانيكي، حيث بلغت المقاومة القصوى 378.21 نيوتن/مم²، مع حدوث الكسر بعيداً عن نقطة اللحام، مما يدل على جودة عالية للوصلة. كما تبين أن الفولاذ غير القابل للصدأ يتميز بثبات أفضل أثناء اللحام، في حين أن طبقة الزنك في الفولاذ المجلفن قد تتسبب في ضعف نقطة اللحام نتيجة لتأكسدها أو انصهارها الجزئي. وتؤكد هذه الدراسة أن التحكم الدقيق في معايير اللحام، خاصة شدة التيار والضغط، ضروري لتحقيق وصلات عالية الجودة وموثوقة في التطبيقات الصناعية

RESUME :

Ce mémoire porte sur une étude expérimentale du soudage par résistance par points appliqué à deux aciers industriels largement utilisés : l'acier galvanisé DX52D+Z80 et l'acier inoxydable SUS430. Les essais ont été effectués à l'aide d'une machine de soudage par points, en faisant varier l'intensité du courant (20, 25, 30 A) et la pression exercée (0,2 ; 0,4 ; 0,6 MPa), afin d'analyser l'influence de ces paramètres sur la résistance mécanique maximale et la qualité du joint soudé.

Les résultats ont montré que la combinaison d'une intensité de 25 A et d'une pression de 0,6 MPa offre les meilleures performances, avec une résistance maximale atteignant 378,21 N/mm² et une rupture localisée loin du point de soudure, signe d'une excellente qualité de liaison. L'acier inoxydable a présenté une meilleure stabilité au soudage, tandis que la couche de zinc de l'acier galvanisé peut se détériorer sous l'effet de la chaleur, réduisant la qualité du point. Cette étude met en évidence l'importance d'un

réglage précis des paramètres de soudage pour garantir des assemblages fiables et performants dans le contexte industriel.

ABSTRACT :

This thesis presents an experimental study of resistance spot welding applied to two widely used industrial steels: galvanized steel DX52D+Z80 and stainless steel SUS430. Experiments were carried out using a spot welding machine, varying current intensity (20, 25, 30 A) and applied pressure (0.2, 0.4, 0.6 MPa) to assess their impact on maximum tensile strength and weld quality.

The results indicated that the combination of 25 A current and 0.6 MPa pressure achieved the best mechanical performance, with a maximum strength of 378.21 N/mm² and fracture occurring away from the weld nugget, demonstrating high joint quality. Stainless steel showed greater welding stability, while the zinc coating on galvanized steel may degrade under heat, leading to reduced weld strength. This study highlights the importance of precise control over welding parameters—particularly current and pressure—to ensure strong, reliable joints for industrial applications.