

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

- **ABOU ABDELMADJID**
- **LATOUI MOHAMED**

Intitulé

Optimisation des paramètres de soudage par point des aciers dissemblables

Soutenu le : 18 septembre 2024

Devant le Jury composé de :

| <i>Nom & Prénom</i> | <i>Grade</i> | <i>Qualité</i> | <i>Etablissement</i> |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <i>Dr SAIDANI LYAMINE</i> | <i>MAA</i> | <i>Président</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr LAOUISSI AISSA</i> | <i>MAB</i> | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr RAOUACHE ELHADJ</i> | <i>MCA</i> | <i>Encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr KHALFALLAH FARES</i> | <i>MCB</i> | <i>Co Encadreur</i> | <i>Univ-Msila</i> |

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

On tient à remercier tout d'abord notre directeur de recherches, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

On voudrait également remercier les membres du jury pour avoir acceptés d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de l'Université.

On tient aussi à remercier monsieur le chef du département ainsi que tout le personnel et les enseignants du département pour leur soutien inestimable.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille Et A toutes mes amies.

A tous les gens qui me connaissent et que je connais.

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas devant les obstacles de la vie.

LATTAOUI Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille Et A toutes mes amies.

A tous les gens qui me connaissent et que je connais.

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas devant les obstacles de la vie.

ABOU Abdelmadjid

Nomenclatures

- SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée
- GMAW: Soudage sous protection gazeuse actif a électrode fusible (MAG)
- GMAW: Soudage sous protection gazeuse inerte a électrode fusible (MIG)
- FCAW : Soudage fil fourre sans gaz
- GTAW : Soudage sous protection gazeuse a électrode réfractaire (TIG)
- PAW : Soudage plasma
- RSW : Soudage par résistance par point
- FSW : Soudage par friction-malaxage
- EBW : Soudage par faisceau d'électrodes
- ZAT : Zone affecte e thermiquement
- MB : Métal de base
- ZF : Zone fondue
- ZL : Zone de liaison
- Rm : Resistance maximal (en N /mm²)
- Rp0,2 : Limite d'élasticité conventionnelle
- α : Ferrite
- γ : Austénite
- A% : Allongement
- I : Intensité du courant (en A)
- U : Tension (en V)
- L: Longueur d'éprouvette (en mm)
- S : Section d'éprouvette (en mm²)
- T : Temperature (en °C)
- F : Effort (en bar)
- ∅ : Diamètre du noyau (en mm)
- V : Vitesse de soudage (en cm/min)

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-01 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) | 6 |
| Figure I-02 : Principe de fonctionnement du procédé GMAW | 8 |
| Figure I-03 : Soudage avec fil fourré et gaz de protection | 11 |
| Figure I-04 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents procédés | 14 |
| Figure I-05 : Principe du procédé GTAW | 14 |
| Figure I-06 : Mécanisme du soudage par point | 16 |
| Figure I-07 : Principe du soudage par molette | 16 |
| Figure I-08 : Principe du soudage oxygaz | 17 |
| Figure I-09 : Principe du soudage par faisceau d'électrons | 18 |
| Figure I-10 : Principe du soudage laser | 19 |
| Figure I-11-a : Soudage par friction-malaxage | 19 |
| Figure I-11-b : Soudage par friction-malaxage | 20 |
| Figure II-1 : Mécanisme du soudage par point | 23 |
| Figure II-2 : (a) Principe du soudage par résistance. (b) Exemple de zone fondue | 24 |
| Figure II-3 : Principe du soudage par point | 24 |
| Figure II-4 : Les différentes phases d'un cycle de soudage | 25 |
| Figure II-5 : Coupe d'un point soudé | 26 |
| Figure II-6 : Arcs chauffants en soudage par points | 27 |
| Figure II-7 : procédé de soudage par points | 28 |
| Figure II-8 : Les électrodes de cuivre créent une soudure par points | 29 |
| Figure III-1 : Dimensions des éprouvettes soudées | 36 |
| Figure III-2 : Des éprouvettes avant soudées | 37 |
| Figure III-3 : Machine de soudage par point (DALEX) ; a) Vision générale ; b) Fixation de rallonge | 38 |

| | |
|--|----|
| Figure III-4 : Collier..... | 39 |
| Figure III-5 : l'éclisse..... | 39 |
| Figure III-06 : Rallonge | 39 |
| Figure III-07 : Placement des éprouvettes | 41 |
| Figure III-08 : Soudage des éprouvettes | 41 |
| Figure III-09 : Point de soudage | 41 |
| Figure III-10 : Cycle de soudage constant. | 42 |
| Figure III-11 : Variation de la pression | 42 |
| Figure III-12 : Variation de l'Intensité de courant..... | 42 |
| Figure III-13 : Electrode de soudage | 43 |
| Figure III-14 : Machine d'essai de traction Z010/TH2S..... | 44 |
| Figure III-15 : Eprouvette d'Acier E 24 après l'essai de traction | 45 |
| Figure III-16 : Courbes Contrainte/Allongement Eprouvette d'Acier E 24. | 45 |
| Figure III-17 : Eprouvette d'Acier XC 75 après l'essai de traction..... | 45 |
| Figure III-15 : Courbes Contrainte/Allongement Eprouvette d'Acier XC 75 | 46 |
| Figure IV-1 : Eprouvettes après le soudage..... | 51 |
| Figure IV-2 : Eprouvette après l'essai de traction..... | 51 |
| Figure IV-3- : Eprouvette après l'essai de traction avec P=1,5 bar et intensité = 80 A..... | 52 |
| Figure IV-4 : Eprouvette après l'essai de traction avec P=2 bar et intensité = 40 A | 52 |
| Figure IV-5 : Eprouvette après l'essai de traction avec P=2,5 bar et intensité = 50 A | 53 |
| Figure IV-6 : Courbe après l'essai de traction avec intensité = 30 Ampères | 54 |
| Figure IV-7 : Courbe après l'essai de traction avec intensité = 40 Ampères..... | 55 |
| Figure IV-8 : Courbes après l'essai de traction avec intensité = 50 Ampères | 56 |
| Figure IV-9 : Courbes après l'essai de traction avec intensité = 60 Ampères | 57 |
| Figure IV-10 : Courbes après l'essai de traction avec intensité = 70 Ampères | 58 |
| Figure IV-11 : Courbe après l'essai de traction avec intensité = 80 Ampères..... | 59 |
| Figure IV-12 : Courbe de Résistances maximal des éprouvettes. | 61 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau III-01 : Composition chimique des aciers E 24 (Norme AFNOR)..... | 35 |
| Tableau III-02 : Composition chimique des aciers XC 75 (Norme AFNOR)..... | 36 |
| Tableau III-03 : Les différent paramètres de soudage par point..... | 40 |
| Tableau IV-01 : Les différent Résistances maximal après l'essai de traction..... | 60 |

T able des matières

| | |
|-----------------------------|-----|
| Liste des figures | i |
| Liste des tableaux..... | ii |
| Liste des abréviations..... | iii |
| Introduction générale | 1 |

Chapitre I : Généralités sur le soudage

| | |
|--|----|
| I -1- Introduction..... | 3 |
| I-a- Définitions de base | 3 |
| I-b- Histoire de Soudage | 3 |
| I-2- Procédés de soudage | 4 |
| I-2-1- Soudage à l'arc | 4 |
| I-2-1-1- Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) | 5 |
| I-2-1-2- Soudage MIG/MAG fil plein (GMAW)..... | 8 |
| I-2-1-3- Soudage MAG fil fourre (FCAW) | 11 |
| I-2-1-4- Soudage TIG (GTAW)..... | 14 |
| I-3- Soudage par point (RSW)..... | 15 |
| I-4- Soudage oxy-gaz | 17 |
| I-5- Autres procédés | 18 |

Chapitre II : Soudage par points

| | |
|---|----|
| II-1-Introduction..... | 23 |
| II-2-Le principe du soudage par point..... | 23 |
| II-3-Déroulement du cycle de soudage..... | 25 |
| II-4-Géométrie d'un point soudé..... | 26 |
| II-5-Les types du soudage par point..... | 26 |
| II-6-Fonctionnement de soudage par points | 27 |
| II-7-Avantages du soudage par point..... | 29 |

| | |
|---|----|
| II-7-1-La rapidité du soudage par point..... | 29 |
| II-7-2-Le coût moins cher du soudage par point..... | 29 |
| II-7-3-Une économie d'énergie considérable..... | 30 |
| II-7-4-Un processus bien compris..... | 30 |
| II-8-Inconvénients du soudage par point..... | 30 |
| II-8-1-Le soudage par point peut être relativement faible | 30 |
| II-8-2-Plus d'espace est indispensable | 30 |
| II-8-3-Le soudage par point peut être laide..... | 31 |
| II-9-Applications du soudage par point..... | 31 |
| II-9-1. Automobile | 31 |
| II-9-2. Electronique..... | 31 |
| II-9-3. Ustensiles de cuisine..... | 31 |
| II-9-4. Orthodontie | 31 |
| II-9-5. Réparation..... | 31 |

Chapitre III : Etude Expérimentale

| | |
|---|----|
| III-1- Introduction | 34 |
| III-2- Matériaux d'étude..... | 34 |
| III-2-1- Acier E 24 | 34 |
| III-2-2- Acier XC 75 | 35 |
| III-3- Etapes de la réalisation des éprouvettes | 36 |
| III-4- Machine de soudage (DALEX)..... | 38 |
| III-5- Méthode de soudage des éprouvettes | 40 |
| III-6- Etude d'impact de variation de l'intensité et la pression..... | 42 |
| III-6- Electrode de soudage par résistance par point..... | 43 |
| III-6- Essai de traction..... | 44 |
| III-7- Conclusion..... | 46 |
| III-8- Références | 46 |

Chapitre VI : Résultats & Discussion

| | |
|---|----|
| IV-1- Introduction | 48 |
| IV-2- Présentation des éprouvettes après le soudage | 48 |
| IV-3- Etude d'impact de variation de pression..... | 52 |
| IV-4 Résultats des résistances maximales..... | 60 |
| IV-5 Conclusion..... | 62 |

Introduction générale

L'assemblage par soudage est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie. Son développement a évolué à travers plusieurs étapes, aboutissant aux techniques modernes telles que le soudage MIG, MAG, ASW, et le soudage par résistance par point.

Les pièces assemblées par soudage sont soumises à diverses sollicitations, telles que la traction et la rupture. Les paramètres de soudage peuvent parfois entraîner des défauts, notamment des ruptures au niveau des soudures. L'objectif de notre travail est d'étudier les différents paramètres du soudage par résistance par point afin d'optimiser la qualité des soudures tout en réduisant les coûts de production.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble du processus de soudage. Le deuxième chapitre est consacré à une description générale du soudage par résistance par points. Le troisième chapitre est dédié à une étude expérimentale qui a été réalisée, incluant un soudage par points ainsi que des essais de traction. Enfin, le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus au cours de cette étude.

Chapitre 1

Généralités sur le soudage

Sommaire

| | |
|---|----|
| I -1- Introduction..... | 3 |
| I-a- Définitions de base..... | 3 |
| I-b- Histoire de Soudage..... | 3 |
| I-2- Procédés de soudage..... | 4 |
| I-2-1- Soudage à l'arc..... | 4 |
| I-2-1-1- Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)..... | 5 |
| I-2-1-2- Soudage MIG/MAG fil plein (GMAW)..... | 8 |
| I-2-1-3- Soudage MAG fil fourre (FCAW)..... | 11 |
| I-2-1-4- Soudage TIG (GTAW)..... | 14 |
| I-3- Soudage par point (RSW)..... | 15 |
| I-4- Soudage oxy-gaz..... | 17 |
| I-5- Autres procédés..... | 18 |

I-1- Introduction

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage occupe une place prépondérante dans toutes les branches de l'industrie, car il permet d'adapter de manière optimale les formes de construction aux contraintes [1].

a- Définitions de base

- **Soudage** : Le soudage est une technique permettant d'assembler de manière permanente deux ou plusieurs pièces constitutives d'un ensemble.
- **Soudure** : est le résultat obtenu à l'issue du processus de soudage. Elle représente la jonction permanente entre les pièces assemblées, assurant leur continuité mécanique et, dans certains cas, leur étanchéité. La qualité de la soudure dépend de nombreux facteurs, tels que la méthode utilisée, les matériaux assemblés et les conditions d'exécution.
- **Soudage homogène** : désigne un procédé où les deux parties à assembler possèdent une constitution physico-chimique identique, ou lorsque le métal d'apport utilisé pour l'assemblage présente des caractéristiques physico-chimiques similaires à celles du matériau de base. Ce type de soudage favorise une fusion harmonieuse entre les matériaux, garantissant ainsi une meilleure compatibilité et une continuité plus homogène dans l'assemblage final.
- **Soudage hétérogène**: se produit lorsque le métal d'apport utilisé pour l'assemblage a une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base, ou lorsque les pièces assemblées, sans l'utilisation de métal d'apport, sont de nature différente. Ce procédé est souvent utilisé pour lier des matériaux dissemblables, nécessitant une expertise particulière afin de garantir une soudure solide et durable malgré les différences entre les matériaux.
- **Soudage autogène** désigne un type de soudage où les bords des pièces à assembler participent directement à la composition du joint sans apport de métal supplémentaire. Autrement dit, la fusion des matériaux des pièces elles-mêmes forme la soudure, créant ainsi une liaison homogène entre les deux parties. Ce procédé est utilisé lorsqu'il n'est pas nécessaire d'ajouter un métal d'apport pour garantir la solidité ou la qualité de l'assemblage.

b- Histoire de soudage :

Le **soudage** est une technique qui remonte à l'**âge des métaux**, lorsque l'humanité a commencé à maîtriser l'art de l'assemblage de pièces métalliques.

À l'**âge du bronze**, le soudage se faisait par "soudage à la poche", une technique rudimentaire de chauffage et martelage des métaux.

À l'**âge du fer**, le soudage s'effectuait principalement à la forge, où les métaux étaient chauffés puis martelés ensemble pour créer des joints solides.

L'un des exemples les plus anciens de soudage provient de l'âge du bronze, avec de petites boîtes circulaires en or, datées de plus de **2000 ans**. Ces boîtes ont été assemblées par

chauffage et martelage d'un joint composé de deux surfaces recouvrances. Les **Égyptiens** et les peuples de la région méditerranéenne orientale avaient déjà appris à souder des pièces en fer, et plusieurs outils datant d'environ **3000 ans** ont été retrouvés, attestant de cette compétence.

Durant le **Moyen Âge**, les chaudronniers et forgerons ont perfectionné leurs techniques, notamment à travers le **martelage** et le soudage pour produire divers objets en fer. Ce savoir-faire artisanal a perduré jusqu'au **milieu du XIXe siècle**, avec peu d'évolutions significatives.

Révolution du soudage au XIXe siècle

Vers **1850**, des avancées significatives ont eu lieu, notamment avec l'introduction de l'utilisation du **gaz** pour chauffer les métaux avant soudage. Cette innovation marque le début d'une évolution rapide des techniques de soudage.

À la **fin du XIXe siècle**, plusieurs nouveaux procédés ont vu le jour :

1. **Le soudage oxyacétylénique**, qui utilise un mélange de gaz oxygène et acétylène pour produire une flamme très chaude.
2. **Le soudage aluminothermique**, basé sur une réaction chimique entre l'aluminium et un oxyde métallique pour générer une chaleur intense.
3. **Le soudage à l'arc électrique**, où un arc électrique est utilisé pour faire fondre les métaux à assembler.
4. **Le soudage par résistance**, qui utilise une combinaison de pression et de courant électrique pour créer une soudure.

Ces procédés ont connu un essor industriel important à partir de 1920, marquant une nouvelle ère pour l'industrie et les techniques d'assemblage [2].

I-2- Procédés de soudage

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir une continuité métallique lors du soudage. Dans la majorité des cas, cette continuité est réalisée par fusion locale des matériaux à assembler. Cependant, d'autres techniques, comme la diffusion ou la déformation des matériaux, peuvent également être utilisées pour souder.

Les procédés de soudage peuvent être classés en fonction de la manière dont l'énergie est transférée pour réaliser l'assemblage des pièces. Voici une présentation des procédés les plus courants,

I-2-1- Soudage à l'arc

Le soudage à l'arc est un procédé de soudure par fusion, où la chaleur nécessaire à la fusion des matériaux est produite par un arc électrique. Cet arc se forme entre le métal de base (les pièces à souder) et une électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le processus commence par un contact de l'électrode avec les pièces, suivi d'un léger éloignement, créant ainsi l'arc électrique. Cet arc génère une chaleur intense, capable de faire fondre les bords des pièces et, dans certains cas, l'électrode elle-même.

L'électrode, qui sert souvent de métal d'apport, est fabriquée dans un matériau dont les

caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches de celles des pièces à assembler, garantissant ainsi la qualité et la solidité du joint soudé.

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

I-2-1-1- Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

a- Définition

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée, également appelé SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ou soudage à la baguette, est l'un des procédés de soudage les plus couramment utilisés, en particulier pour les travaux d'entretien et de réparation. Ce procédé repose sur la création d'un arc électrique entre l'extrémité de l'électrode et le métal de base à souder. L'électrode est composée d'une âme métallique, qui fond pendant l'opération pour devenir du métal d'apport, et elle est recouverte d'un flux ou d'un enrobage.

Lors du soudage, l'électrode fond au fur et à mesure que le processus progresse, déposant ainsi du métal sur le joint à assembler. L'enrobage de l'électrode se décompose sous l'effet de la chaleur, produisant un gaz protecteur qui isole la soudure de l'atmosphère environnante et empêche la contamination par l'oxygène et l'azote de l'air. En même temps, une couche de laitier se forme à la surface de la soudure, apportant une protection supplémentaire contre l'oxydation.

Ce procédé est largement utilisé pour sa simplicité, sa flexibilité d'utilisation dans différentes positions de soudage, et sa capacité à souder différents types de matériaux, notamment les aciers doux, les aciers inoxydables, et les fontes. (Figure I-01)

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG/MAG.

b- Avantages :

- **Polyvalence des Positions** : Le procédé SMAW peut être utilisé pour souder dans toutes les positions (à plat, en angle, vertical, etc.), ce qui le rend très flexible pour différents types de travaux.
- **Autonomie** : Il offre une grande autonomie sur le chantier, car l'équipement nécessaire est relativement simple et facile à manipuler. Cela est particulièrement avantageux pour les travaux d'entretien et de réparation.
- **Coût Équipement** : L'équipement requis pour le SMAW est généralement peu coûteux par rapport à d'autres techniques de soudage, ce qui le rend accessible pour divers types d'applications.
- **Adaptabilité** : Le procédé peut être utilisé avec différents types de matériaux et d'électrodes, ce qui le rend adapté à de nombreuses applications industrielles et de maintenance.

- **Simplicité** : La technique est relativement simple à mettre en œuvre, même pour les soudages moins expérimentés.

c- Inconvénients :

- **Chaleur Intense et Déformation** : La chaleur au centre de l'arc est très intense, ce qui peut entraîner une déformation angulaire des pièces soudées, surtout si la gestion de la chaleur n'est pas optimale.
- **Coefficient de Transmission Thermique** : Bien que le coefficient de transmission thermique (la quantité de chaleur transmise à la pièce) soit généralement élevé (entre 50 et 85 %), ce facteur peut varier, influençant la profondeur de pénétration et la qualité de la soudure.
- **Amorçage de l'Arc** : Pour amorcer l'arc, notamment avec des électrodes à enrobage basique, la tension à vide doit être suffisamment élevée, généralement autour de 70V. Cela peut nécessiter un équipement spécifique et des réglages adaptés.
- **Produits de Soudage Résiduels** : La décomposition de l'enrobage produit du laitier et des gaz qui doivent être éliminés après le soudage, ce qui peut nécessiter un nettoyage supplémentaire.
- **Limitation de la Vitesse** : La vitesse de soudage avec le SMAW est généralement plus lente comparée à d'autres procédés modernes, ce qui peut influencer la productivité dans des applications à grande échelle.

En résumé, le soudage SMAW est une méthode robuste et polyvalente adaptée à divers contextes, mais elle présente certaines limitations en termes de gestion de la chaleur et d'efficacité qui doivent être prises en compte lors de la planification des opérations de soudage.

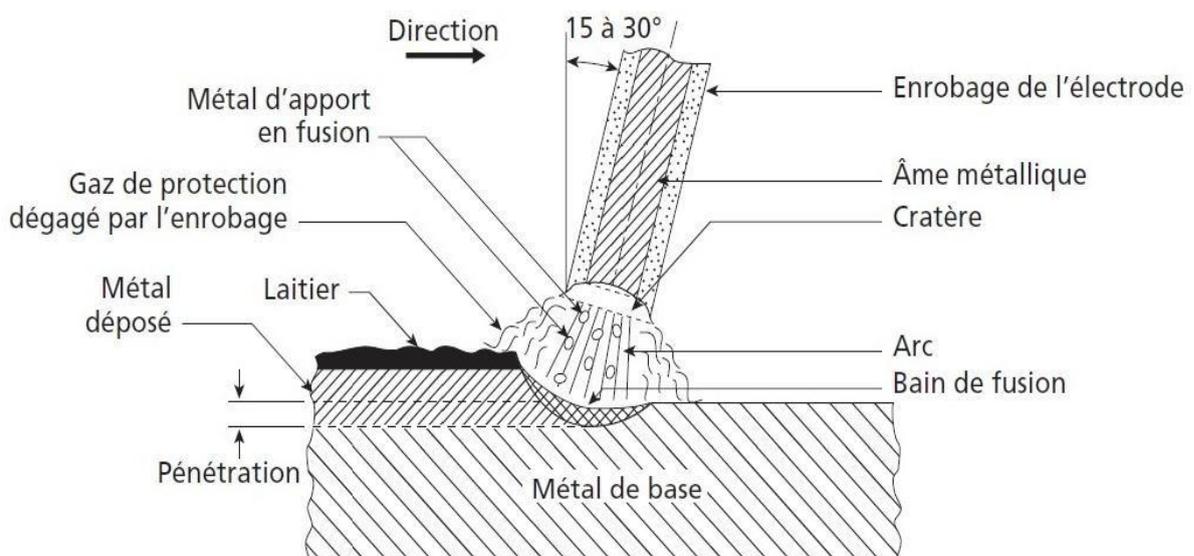


Figure I-01 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) [3].

d- Applications

Le procédé SMAW est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles et de construction en raison de sa flexibilité et de sa simplicité. Voici quelques-unes de ses applications courantes :

- **Récipients et Tuyaux Sous Pression** : Le SMAW est souvent utilisé pour souder des récipients et des tuyaux conçus pour contenir des fluides ou des gaz sous pression. Sa capacité à fournir des soudures robustes est essentielle pour garantir la sécurité et la fiabilité de ces équipements.
- **Réservoirs de Stockage** : Les réservoirs de stockage, qu'ils soient pour les liquides, les gaz ou les solides, bénéficient de la polyvalence du SMAW pour assurer des joints solides et étanches.
- **Ponts et Bâtiments** : Dans la construction de ponts et de bâtiments, le SMAW est utilisé pour assembler des structures en acier. Sa capacité à fonctionner dans diverses positions le rend idéal pour des applications sur site et en chantier.
- **Navires et Wagons** : Le SMAW est également couramment employé dans la construction et la réparation de navires et de wagons ferroviaires. Sa mobilité et sa simplicité le rendent adapté aux conditions de travail sur le terrain ou en environnement maritime.
- **Réparations et Entretien** : Grâce à sa mobilité et à la possibilité de souder à l'extérieur sans exigences particulières, le SMAW est souvent utilisé pour des réparations et des tâches d'entretien sur des équipements industriels, des infrastructures et des machines.

Le SMAW est apprécié pour sa capacité à être utilisé dans des environnements variés et son efficacité dans des travaux nécessitant des soudures robustes et durables. Sa simplicité d'utilisation le rend également adapté aux réparations sur site et aux conditions de travail difficiles. [4].

I-2-1-2- Soudage MIG/MAG fil plein (GMAW)

a- Définition

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein, également connu sous le nom de GMAW (Gas Metal Arc Welding), est un procédé de soudage semi-automatisé qui utilise un fil-électrode continu et fusible pour créer l'arc de soudage et pour servir de métal d'apport. Voici comment il fonctionne :

Arc de Soudage : L'arc est formé entre l'extrémité du fil-électrode et le métal de base. La chaleur dégagée par cet arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode ainsi que du métal de base, créant ainsi une soudure solide.

Fil-Électrode : Le fil-électrode est continuellement alimenté à l'arc de soudage à travers une torche par un mécanisme de dévidoir. Ce fil sert à la fois de métal d'apport et de conducteur pour l'arc.

Protection du Bain de Fusion : Comme dans le soudage TIG (GTAW), le bain de fusion est protégé par un gaz de protection. Ce gaz (souvent de l'argon, du dioxyde de carbone, ou un mélange des deux) empêche l'oxydation et les contaminants atmosphériques qui pourraient compromettre la qualité de la soudure.

Dévidoir : Le fil-électrode est alimenté dans la torche à l'aide d'un dévidoir, qui peut être à vitesse fixe ou variable. Ce mécanisme pousse ou tire le fil pour le maintenir en continu vers l'arc.

Ce procédé est souvent appelé **MIG** (Metal Inert Gas) lorsque le gaz de protection est un gaz inerte, et **MAG** (Metal Active Gas) lorsque le gaz utilisé est actif comme le dioxyde de carbone.

Le **GMAW** est apprécié pour sa capacité à produire des soudures rapides et de haute qualité avec un contrôle précis de la fusion et du dépôt de métal. Il est largement utilisé dans divers secteurs industriels, y compris l'automobile, la construction navale, et la fabrication métallique. (Figure I-02).

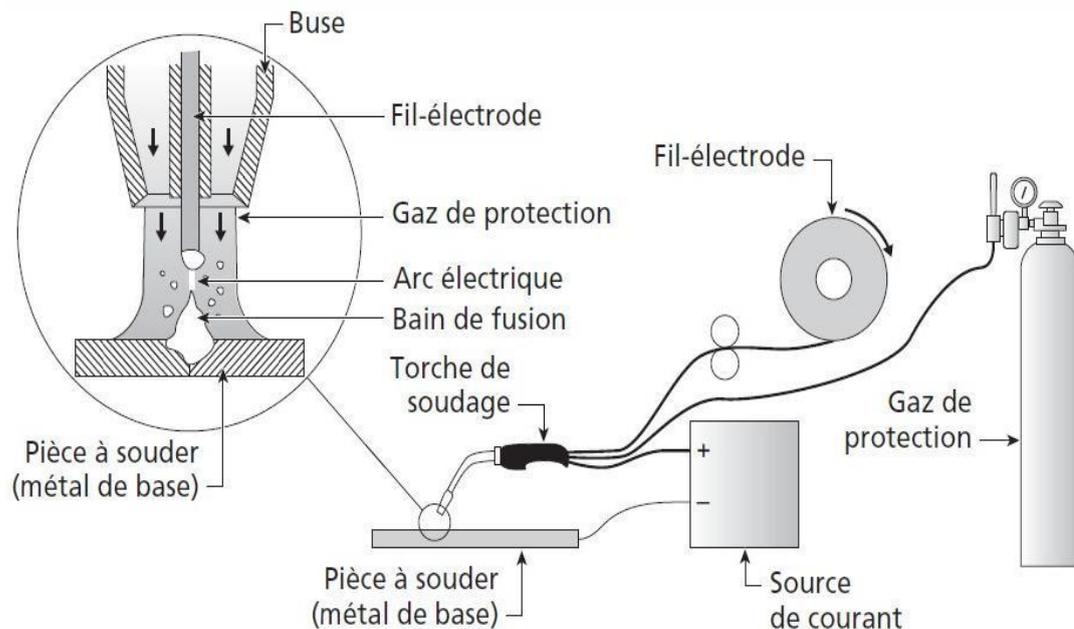


Figure I-02 : Principe de fonctionnement du procédé GMAW [3].

b- Avantages :

- **Polyvalence des Matériaux** : Le procédé GMAW est capable de souder une grande variété de métaux, y compris l'aluminium (où il commence à remplacer le GTAW), les aciers inoxydables, ainsi que les aciers au carbone et faiblement alliés. Cela en fait une méthode très flexible pour différents types de projets.
- **Taux de Dépôt Élevé** : Grâce aux fortes intensités de courant utilisées, le GMAW offre un taux de dépôt élevé. Cela permet une application plus rapide de métal d'apport et une productivité accrue.
- **Rapidité d'Exécution** : Le procédé est rapide, ce qui est particulièrement avantageux pour les applications industrielles où la vitesse est cruciale.
- **Pas de Changement d'Électrode** : Le fil-électrode est continu, éliminant la nécessité de changer d'électrode pendant le soudage. Cela permet de souder de longues distances sans interruption.
- **Nettoyage Post-Soudage Simplifié** : Comme le procédé n'utilise pas de laitier, le nettoyage des pièces après soudage est plus simple comparé à d'autres techniques.
- **Bonne Pénétration et Économie de Métal** : La profondeur de pénétration obtenue avec le GMAW permet de préparer les joints avec des angles plus étroits, réduisant ainsi la quantité de métal d'apport nécessaire.
- **Qualité de Soudure** : Le GMAW produit des soudures de bonne qualité avec une faible teneur en hydrogène, ce qui minimise les risques de fissuration et de défauts.

c- Inconvénients :

- **Sensibilité à la Vitesse de Dévidage** : Il est crucial que la vitesse de dévidage du fil-électrode soit correctement ajustée. Une vitesse incorrecte peut entraîner des problèmes tels que la fonte du fil dans le tube-contact ou le blocage dans le bain de fusion, ce qui peut causer des pertes de temps et d'énergie.
- **Équipement Plus Complexe** : Bien que le GMAW soit plus automatisé, il nécessite un équipement plus complexe que le SMAW, avec des composants comme des dévidoirs et des systèmes de gaz qui doivent être bien entretenus et ajustés.
- **Protection contre les Courants d'Air** : Le soudage MIG/MAG est sensible aux courants d'air et aux conditions météorologiques, car le gaz de protection peut être dispersé ou contaminé, affectant la qualité de la soudure.
- **Coût des Gaz de Protection** : Le gaz de protection peut représenter un coût supplémentaire dans le procédé, surtout lorsqu'un mélange de gaz est utilisé pour optimiser les propriétés de la soudure.

En résumé, le soudage MIG/MAG fil plein (GMAW) est une méthode efficace et

polyvalente, offrant des avantages significatifs en termes de rapidité, de qualité de soudure, et de simplicité de nettoyage. Cependant, il nécessite une attention particulière à la gestion de l'équipement et aux conditions de soudage pour éviter des problèmes qui pourraient affecter la performance et l'efficacité du procédé. [4]

d- Applications

Le soudage GMAW est extrêmement polyvalent et largement utilisé dans divers secteurs industriels. Voici quelques-unes de ses principales applications :

- **Industrie Automobile** : Le GMAW est couramment employé pour assembler des composants de véhicules, tels que les châssis, les panneaux de carrosserie, et les structures internes. Sa rapidité et sa qualité de soudure en font un choix populaire pour les lignes de production automobile.
- **Fabrication Métallique** : Dans la fabrication de structures métalliques comme les poutres, les colonnes, et les cadres, le GMAW est utilisé pour des soudures robustes et durables.
- **Construction Navale** : Les navires et les structures offshore utilisent le GMAW pour assembler des coques, des réservoirs, et d'autres composants en métal. Le procédé est apprécié pour sa capacité à souder de grands volumes de métal rapidement.
- **Équipements Industriels** : Le GMAW est utilisé pour la fabrication et la réparation d'équipements industriels lourds, y compris les machines de production, les équipements de manutention, et les structures de soutien.
- **Construction de Bâtiments** : Dans le secteur de la construction, le GMAW est employé pour assembler des structures en acier, comme les ponts, les bâtiments, et les infrastructures de grande envergure.
- **Réparation et Maintenance** : Le procédé est souvent utilisé pour la réparation et l'entretien d'équipements métalliques, en raison de sa facilité d'utilisation et de la qualité des soudures produites.
- **Fabrication d'Appareils Électroménagers** : Les appareils électroménagers comme les réfrigérateurs, les machines à laver, et les cuisinières utilisent également le GMAW pour assembler des pièces métalliques.
- **Construction de Pipelines** : Le GMAW est utilisé pour souder des tuyaux et des pipelines dans divers contextes, y compris les pipelines pour les produits pétroliers et gaziers.

En raison de sa flexibilité, de sa rapidité, et de sa capacité à produire des soudures de haute qualité, le GMAW est un choix incontournable dans pratiquement tous les domaines de la fabrication et de la construction. Les entreprises qui utilisent fréquemment le soudage possèdent souvent plusieurs postes de travail équipés pour le GMAW. [4].

I-2-1-3- Soudage MAG fil fourré (FCAW)

a- Définition

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux, également connu sous le nom de **FCAW** (Flux-Cored Arc Welding), est un procédé de soudage semi-automatisé où un fil fourré est utilisé pour créer l'arc de soudage.

Voici les principales caractéristiques de ce procédé :

- **Fil Fourré de Flux** : Le fil utilisé dans ce procédé est constitué d'un tube métallique rempli de flux. Ce fil est déroulé à vitesse constante par la tête de soudage du pistolet. Le flux à l'intérieur du tube joue plusieurs rôles essentiels pendant le soudage.
- **Amorçage et Protection** : Le flux aide à amorcer l'arc et forme un **laitier** qui protège la soudure en cours. Il peut également contenir des adjuvants destinés à améliorer la qualité de la soudure, en renforçant les propriétés mécaniques et chimiques du joint soudé.
- **Gaz de Protection** : Le gaz de protection, tel que le dioxyde de carbone (CO_2) ou un mélange d'argon et de CO_2 , est utilisé pour protéger le bain de fusion de l'oxydation et des contaminants atmosphériques. Cependant, certains fils fourrés sont conçus pour être autoprotégés par les gaz dégagés lors de la décomposition du flux, ce qui élimine le besoin de gaz de protection externe.

En résumé, le soudage MAG fil fourré (FCAW) combine la flexibilité et la simplicité du procédé MAG avec les avantages du flux contenu dans le fil. Cela permet de souder efficacement dans divers environnements, y compris à l'extérieur ou dans des conditions de travail difficiles, tout en offrant une bonne protection et une qualité de soudure améliorée. [4].

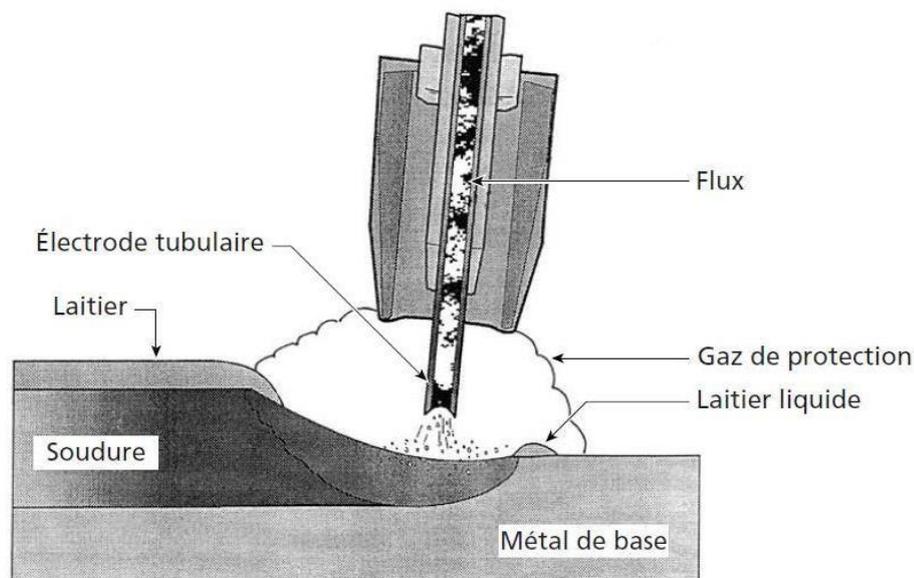


Figure I-03 : Soudage avec fil fourré et gaz de protection [3].

b- Avantages :

- **Taux de Dépôt Élevé** : Le soudage FCAW offre un taux de dépôt supérieur à celui de nombreux autres procédés de soudage, grâce à l'intensité élevée du courant utilisé. Cela permet de souder rapidement et efficacement, même sur des matériaux épais.
- **Pénétration Profonde** : Le procédé est capable d'atteindre une pénétration profonde, ce qui est particulièrement avantageux pour le soudage de fortes épaisseurs de métal, généralement comprises entre 5 et 50 mm.
- **Flexibilité d'Utilisation** : Le FCAW peut être utilisé pour souder divers types de matériaux, notamment les aciers doux, faiblement alliés, et les aciers inoxydables. Cette polyvalence en fait un choix populaire pour différentes applications industrielles.
- **Adaptabilité à Différents Environnements** : Certains fils fourrés sont conçus pour être autoprotégés, ce qui permet de réaliser des soudures sans nécessiter un gaz de protection externe. Cela est particulièrement utile pour les travaux en extérieur ou dans des environnements difficiles.
- **Efficacité en Conditions Difficiles** : Le FCAW est bien adapté aux conditions de soudage difficiles, telles que les environnements extérieurs ou les espaces confinés, où l'utilisation de gaz de protection peut être problématique.

c- Inconvénients :

- **Production de Fumées et de Gaz** : Le processus de décomposition du flux peut produire des fumées et des gaz supplémentaires, ce qui peut nécessiter une ventilation adéquate et un équipement de protection pour les opérateurs.
- **Nettoyage Post-Soudage** : Le laitier produit par le flux peut nécessiter un nettoyage supplémentaire après le soudage, ce qui peut augmenter le temps et les coûts de finition.
- **Équipement et Consommables** : Le soudage FCAW peut nécessiter des équipements spécifiques et des consommables plus coûteux comparés à d'autres procédés de soudage, notamment le fil fourré et, dans certains cas, le gaz de protection.
- **Sensibilité aux Conditions** : Bien que le FCAW soit adaptable à divers environnements, la qualité de la soudure peut être influencée par des conditions telles que la température et l'humidité, ce qui nécessite une gestion soignée du procédé.

En résumé, le soudage MAG fil fourré (FCAW) est un procédé efficace et polyvalent qui offre des avantages significatifs en termes de taux de dépôt, de pénétration, et d'adaptabilité à différents environnements. Toutefois, il présente également des inconvénients liés à la production de fumées, au nettoyage, et aux exigences en termes d'équipement et de consommables. (Figure I-04).

d- Applications

Le soudage MAG fil fourré (FCAW) est largement utilisé dans divers secteurs industriels en raison de sa capacité à souder efficacement des matériaux épais et à offrir une bonne pénétration. Voici quelques-unes de ses principales applications :

- **Fabrication de Ponts** : Le FCAW est couramment utilisé pour souder les structures métalliques des ponts, en raison de sa capacité à gérer des épaisseurs importantes de métal et à fournir des soudures robustes.
- **Fabrication de Réservoirs** : Les réservoirs de stockage, qu'ils soient pour les liquides, les gaz ou les solides, bénéficient des propriétés du FCAW pour assurer des joints solides et étanches.
- **Fabrication de Turbines** : Le procédé est utilisé pour assembler des composants de turbines, qui nécessitent des soudures de haute qualité pour résister aux conditions de fonctionnement sévères.
- **Matériel Agricole** : Le FCAW est utilisé pour la construction et la réparation de matériel agricole, qui souvent nécessite des soudures robustes et durables pour résister aux conditions de travail rigoureuses.
- **Châssis de Camions** : Les châssis de camions sont soudés en utilisant le FCAW en raison de la nécessité de soudures résistantes et de haute qualité pour les véhicules lourds.
- **Construction Navale** : Dans la construction et la réparation de navires, le FCAW est utilisé pour assembler des coques et des structures métalliques, en raison de sa capacité à souder des épaisseurs importantes et à résister aux conditions maritimes.
- **Chaudronnerie-Tuyauterie** : Le FCAW est couramment employé dans la chaudronnerie et la tuyauterie pour assembler des réservoirs, des conduits et d'autres équipements métalliques.
- **Travaux d'Entretien** : Le procédé est utilisé pour des travaux de maintenance et de réparation sur divers équipements et structures métalliques.
- **Rechargement** : Le FCAW est également utilisé pour le rechargement de pièces usées ou endommagées, en ajoutant une couche de métal supplémentaire pour restaurer les dimensions ou améliorer la résistance à l'usure.

Le soudage MAG fil fourré (FCAW) est donc un procédé polyvalent et robuste, adapté à de nombreuses applications industrielles où la qualité et la durabilité des soudures sont cruciales. [4].

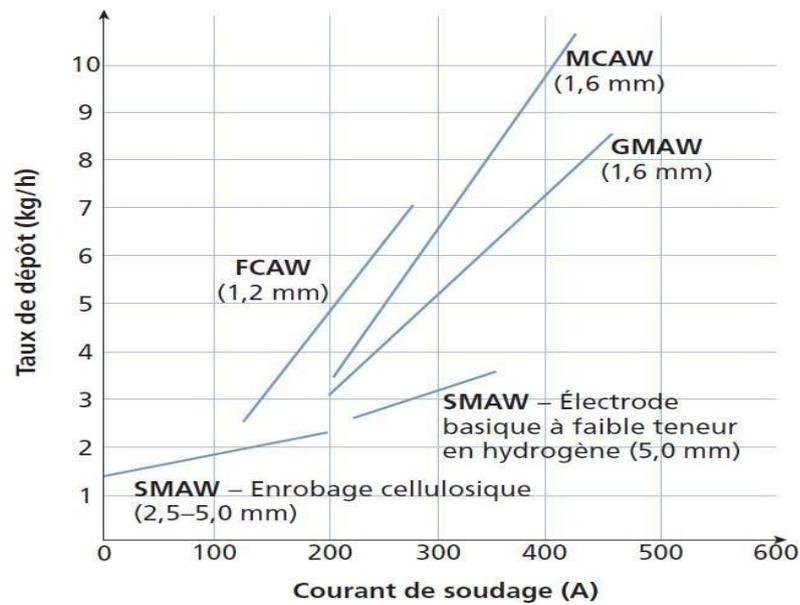


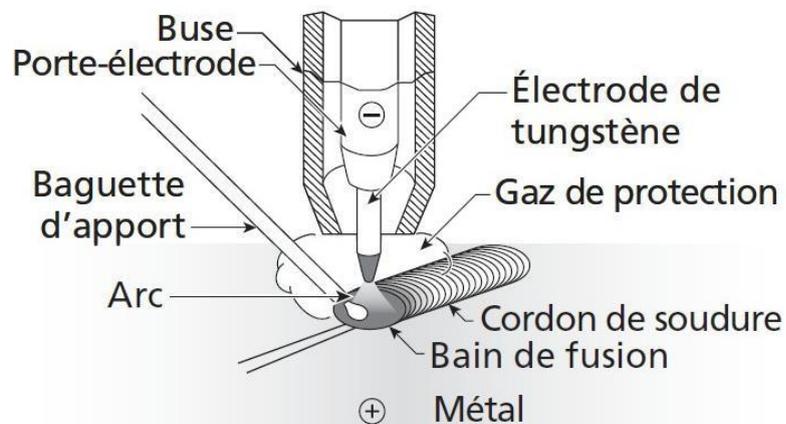
Figure I-04 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents procédés [3].

I-2-1-4- Soudage TIG (GTAW)

a- Définition:

Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon - Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette.

Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier



inoxydable.

Figure I-05 : Principe du procédé GTAW [5].

b- Avantages et inconvénients

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

c- Applications:

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces [4].

I-3- Soudage par point (RSW) :

a- Définition

Le soudage par point (RSW, Resistance Spot Welding) est un procédé de soudage par fusion où la soudure est réalisée en combinant deux éléments clés :

- **Chaleur Générée par le Passage du Courant Électrique** : La chaleur nécessaire pour fondre les matériaux est produite par l'effet Joule, où un courant électrique élevé passe à travers les pièces métalliques. Ce courant électrique génère une chaleur importante aux points de contact.
- **Pression Exercée par les Électrodes** : Les électrodes, généralement en cuivre ou en alliage de cuivre et de béryllium, exercent une pression sur les points de contact des pièces métalliques. Cette pression aide à la fusion des surfaces et à la formation d'une soudure solide.
- **Matériaux des Électrodes** : Les électrodes utilisées sont souvent en cuivre ou en alliage de

cuivre et de béryllium pour leur bonne conductivité électrique et leur résistance à la chaleur.

- **Absence de Métal d'Apport ou de Flux** : Contrairement à d'autres procédés de soudage, le soudage par point ne nécessite pas de métal d'apport ni de flux. La soudure est obtenue uniquement par la fusion des surfaces des pièces métalliques en contact.

En résumé, le soudage par point est un procédé efficace qui utilise la chaleur générée par le courant électrique et la pression des électrodes pour créer des soudures solides, sans avoir besoin de matériaux d'apport supplémentaires.

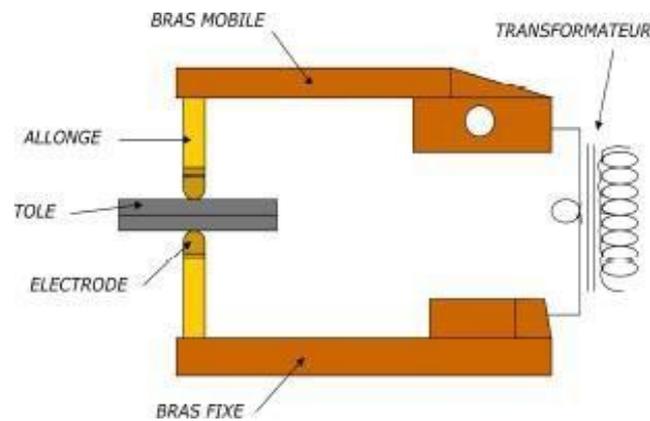


Figure I-06 : Mécanisme du soudage par point [6].

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide (Figure I-07).

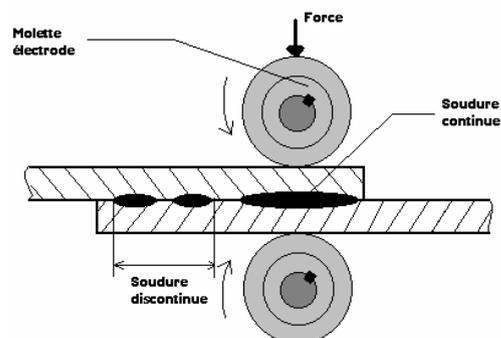


Figure I-07 : Principe du soudage par molette [3].

b- Applications

Le soudage par point est un procédé polyvalent qui trouve des applications dans de nombreux domaines industriels grâce à sa rapidité et à son efficacité pour assembler divers types de pièces métalliques, que ce soit en grande ou en petite série[4].

I-4- Soudage oxygaz :

a- Définition

Le soudage oxygaz, également connu sous le nom de soudage oxyacétylénique ou soudage oxycombustible, est un procédé de soudage qui utilise la chaleur générée par la combustion d'un gaz combustible mélangé avec un gaz comburant pour souder des pièces métalliques. Voici les éléments clés de ce procédé :

- **Gaz Combustible** : Le soudage oxygaz utilise principalement de l'acétylène ou du propane comme gaz combustible. L'acétylène est le plus couramment utilisé en raison de sa capacité à atteindre des températures élevées, mais le propane peut également être utilisé dans certains cas.
- **Gaz Comburant** : Le gaz comburant utilisé est généralement l'oxygène (O_2). Il est mélangé avec le gaz combustible pour créer une flamme de soudage.
- **Équipement** : Le poste de soudage à la flamme comprend :
 - **Bouteilles de Gaz** : Contiennent le gaz combustible et le gaz comburant.
 - **Détendeurs** : Régulent la pression des gaz sortant des bouteilles.
 - **Tuyaux Flexibles** : Transportent les gaz du détendeur au chalumeau.
 - **Chalumeau** : Outil qui mélange les gaz et produit la flamme de soudage.
 - **Électrode d'Apport** : Métal d'apport, généralement en fil, introduit à la main pour former le joint de soudure.

Le soudage oxygaz est un procédé polyvalent qui peut être utilisé pour souder divers types de métaux, y compris l'acier, l'aluminium, et les alliages non ferreux. Il est souvent employé pour des réparations, des travaux de maintenance, et dans des applications où la chaleur de la flamme peut être précisément contrôlée.

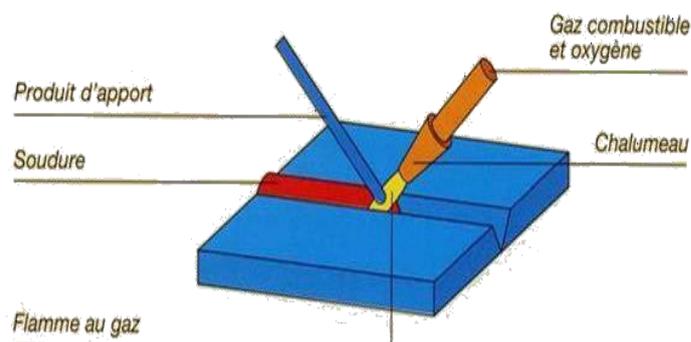


Figure I-08 : Principe du soudage oxygaz [3].

b- Application

Le soudage oxygaz est apprécié pour sa flexibilité et sa capacité à produire une chaleur contrôlée, ce qui le rend adapté à une grande variété d'applications, de la fabrication à la

réparation et l'entretien.

I-5- Autres procédés :

a- Soudage par faisceau d'électrons (SFE) :

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé de soudage qui utilise un faisceau d'électrons focalisé pour générer une chaleur intense nécessaire à la fusion des matériaux. Ce procédé est réalisé sous vide, ce qui permet de contrôler précisément les conditions de soudage et d'éviter les réactions avec l'air ambiant.

La figure I-09 montre le principe du soudage par faisceau d'électrons.

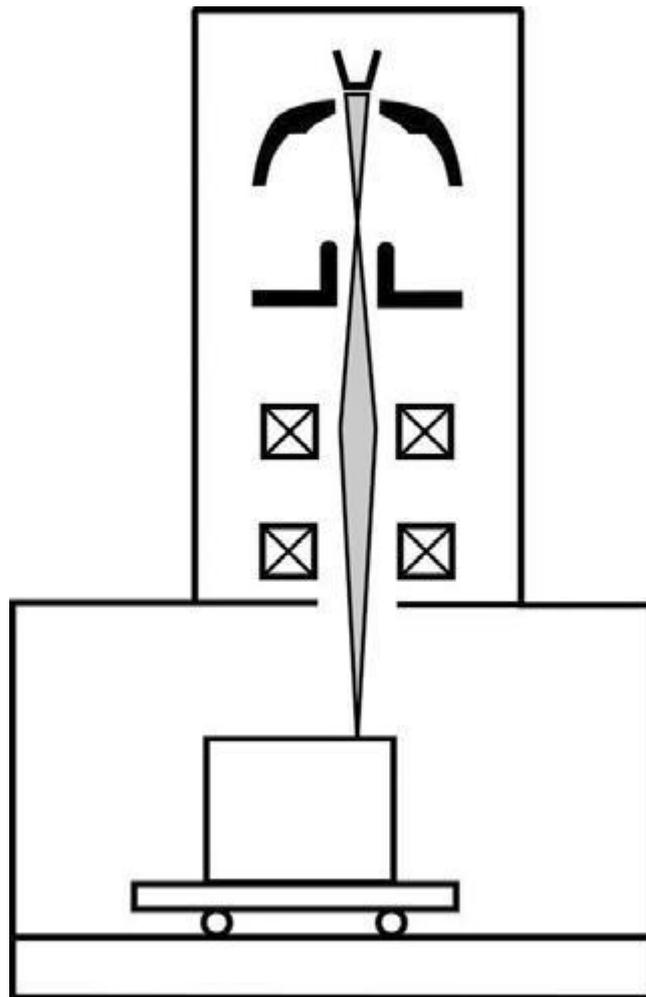


Figure I-09 : Principe du soudage par faisceau d'électrons [3].

a- Soudage (et le coupage) laser

Le soudage laser et le coupage laser sont des procédés utilisant la technologie laser pour la fusion et la coupe des matériaux. En résumé, le soudage et le découpage laser offrent des avantages significatifs en termes de précision, de vitesse, et de qualité, mais ils nécessitent des équipements coûteux et des systèmes de transmission du faisceau laser sophistiqués.

La figure I-10 montre le principe du soudage par laser.

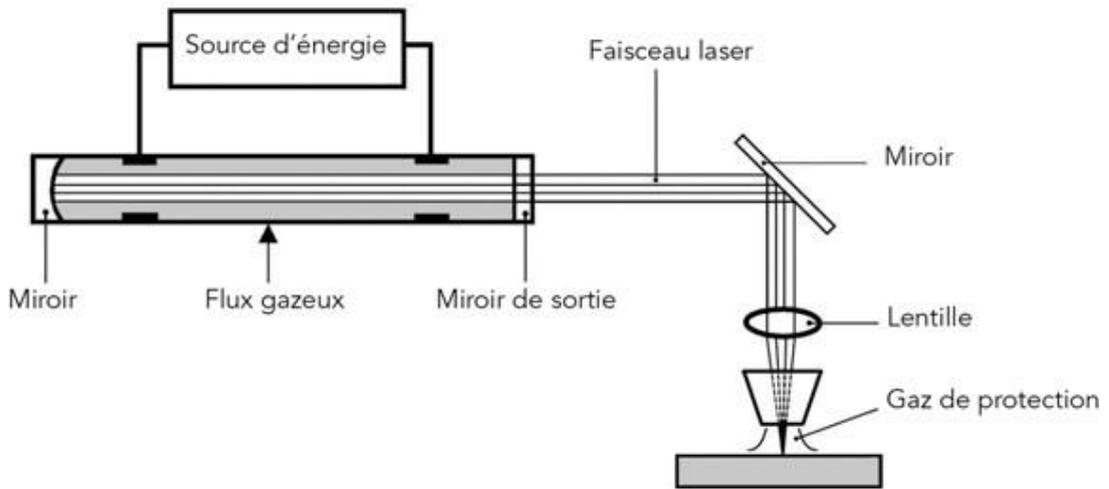


Figure I-10 : Principe du soudage laser [3].

b- Soudage par friction-malaxage (FSW)

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est un procédé moderne et efficace qui offre des avantages significatifs pour le soudage de matériaux tels que l'aluminium, en produisant des joints solides et de haute qualité tout en consommant peu d'énergie et en ayant un faible impact environnemental. [4].

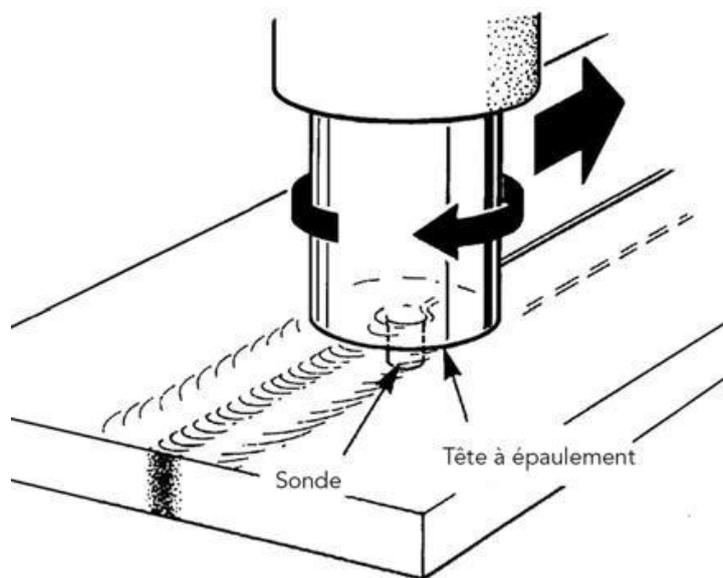


Figure I-11-a : Soudage par friction-malaxage [3].

I-6- Organigramme des procédés de soudage les plus répandus

La figure I-12 un organigramme regroupe les procédés de soudage les plus répandus[7].

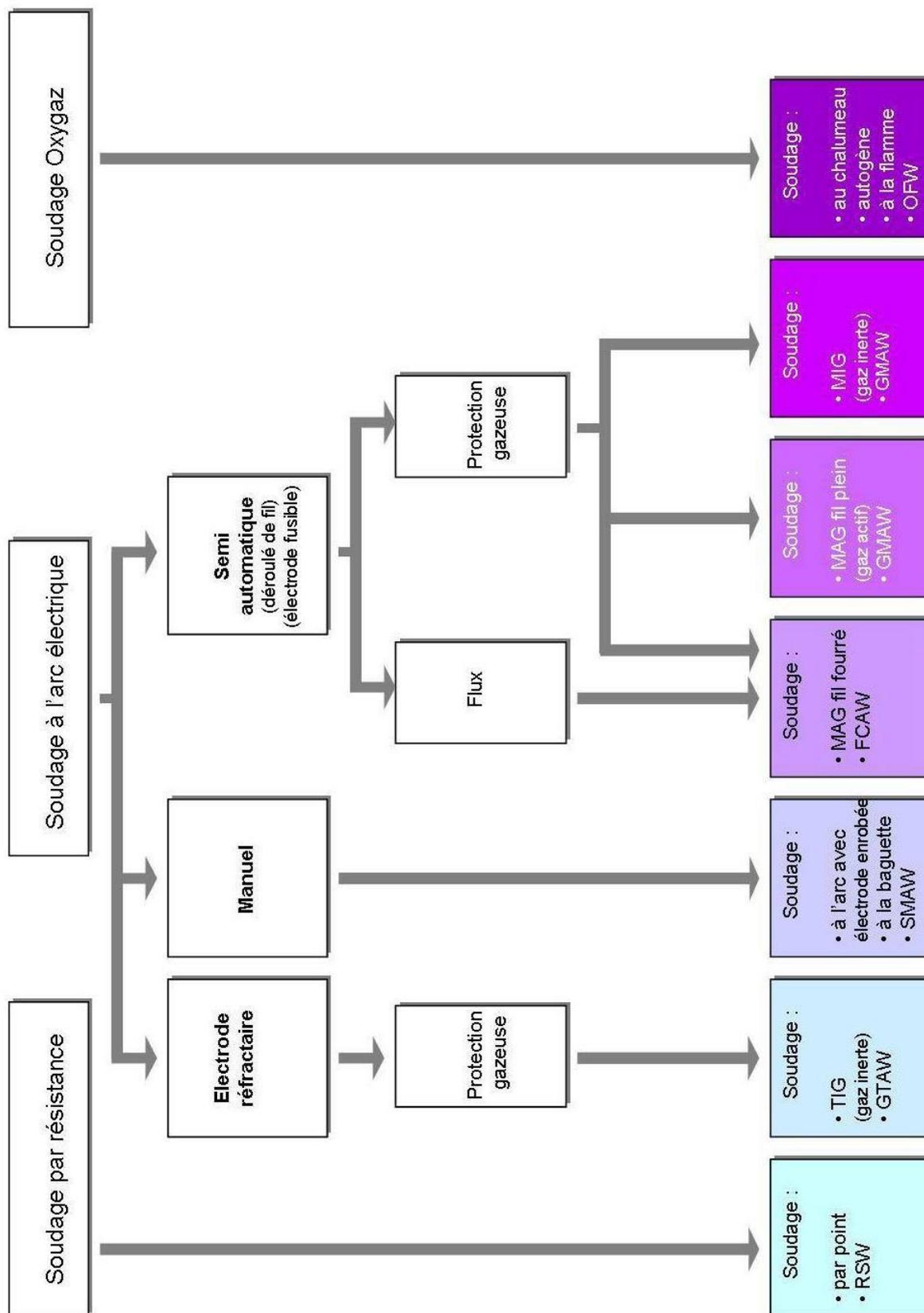


Figure I-11-b : Soudage par friction-malaxage [7].

I-6- Références

- [1] R. Cazes ; Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur, B 7700.
- [2] L. E. M. Schofield et D. F. C. Gibbings "The Welding of Aluminium and its Alloys" .
- [3] H. Granjon ; Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris (1977).
- [4] Symap ; Guide soudage/chapitre_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants).
- [5] H.P.Lieurade, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990.
- [6] F.Rossillon. "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
- [7] Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Annecy Santé au Travail Actualisé en 2009.

Chapitre 2

Soudage par point

Sommaire

| | |
|---|----|
| II-1-Introduction..... | 23 |
| II-2-Le principe du soudage par point..... | 23 |
| II-3-Déroulement du cycle de soudage..... | 25 |
| II-4-Géométrie d'un point soudé..... | 26 |
| II-5-Les types du soudage par point..... | 26 |
| II-6-Fonctionnement de soudage par points | 27 |
| II-7-Avantages du soudage par point..... | 29 |
| II-7-1-La rapidité du soudage par point..... | 29 |
| II-7-2-Le coût moins cher du soudage par point..... | 29 |
| II-7-3-Une économie d'énergie considérable..... | 30 |
| II-7-4-Un processus bien compris..... | 30 |
| II-8-Inconvénients du soudage par point..... | 30 |
| II-8-1-Le soudage par point peut être relativement faible | 30 |
| II-8-2-Plus d'espace est indispensable | 30 |
| II-8-3-Le soudage par point peut être laide..... | 31 |
| II-9-Applications du soudage par point..... | 31 |
| II-9-1. Automobile | 31 |
| II-9-2. Electronique..... | 31 |
| II-9-3. Ustensiles de cuisine..... | 31 |
| II-9-4. Orthodontie..... | 31 |
| II-9-5. Réparation..... | 31 |

II-1-Introduction :

De nos jours, le soudage par point est considéré comme l'une des méthodes de soudage les plus tendances. Ce procédé consiste à souder deux pièces métalliques en utilisant la chaleur générée par des électrodes. En appliquant une pression et un courant électrique au niveau des points de contact, un chevauchement de métal est créé. Cette technique, appelée soudure par point en raison de la formation de points de soudure ronds, est particulièrement efficace pour assembler des pièces métalliques avec précision et rapidité.

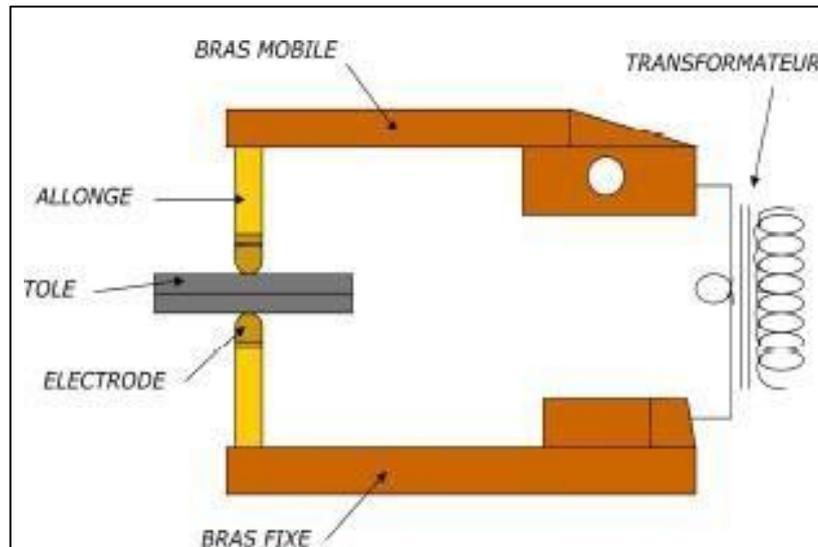


Figure II-1 : Mécanisme du soudage par point.

II-2-Le principe du soudage par point :

Le soudage par point est une méthode de soudage qui repose sur le principe du soudage par résistance. Il s'agit en effet d'une technique de soudage par résistance utilisant des électrodes, sans avoir recours à des fusibles. Ce processus implique une élévation significative de la température afin d'atteindre le point de fusion des métaux à assembler. Parallèlement, une pression mécanique élevée est appliquée pour garantir la formation d'une soudure solide et fiable. Cette combinaison de chaleur et de pression permet d'obtenir une fusion localisée au niveau des points de contact, créant ainsi une soudure efficace et résistante.

Installation de lambris sur ossature métallique astuces et techniques :

En effet, dans la soudure par point, les pièces métalliques à assembler sont comprimées l'une contre l'autre par deux électrodes en cuivre, sans fusible. Un courant électrique de haute intensité, généralement de plusieurs dizaines de milliers d'ampères, traverse alors les métaux. Ce courant crée un court-circuit au niveau des points de contact, générant une fusion locale du métal. Cette fusion se produit en 1 à 2 secondes, grâce à quelques dixièmes de seconde d'application du courant électrique, permettant ainsi une soudure rapide et efficace.

Pose d'enduit à chaux extérieur : à qui faire appel ?

Il est important de noter que la soudure par point est fréquemment utilisée pour l'assemblage des tôles métalliques, notamment dans le secteur de la construction automobile. Cette méthode est particulièrement adaptée pour ce type de travail car elle permet de localiser précisément le point de soudure entre les deux électrodes sous pression. De plus, la brièveté de l'opération minimise les risques de déformation des tôles pendant le processus de soudage, assurant ainsi une assemblage précis et stable..[2]

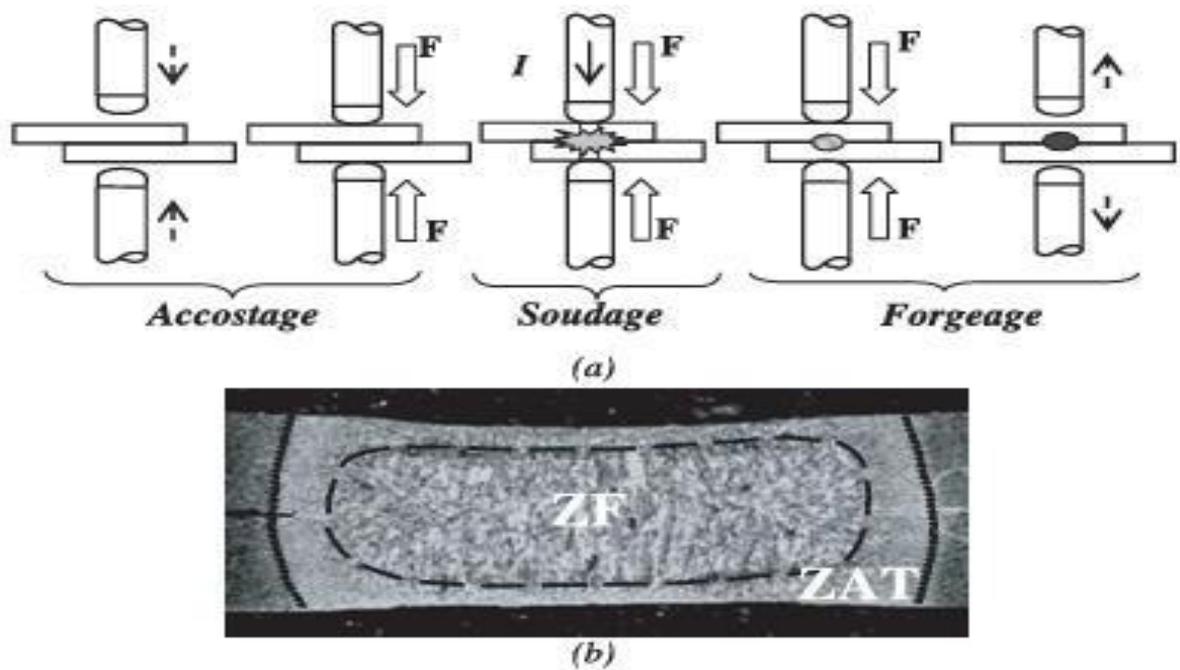


Figure II-2 : (a) Principe du soudage par résistance. (b) Exemple de zone fondue

[2]

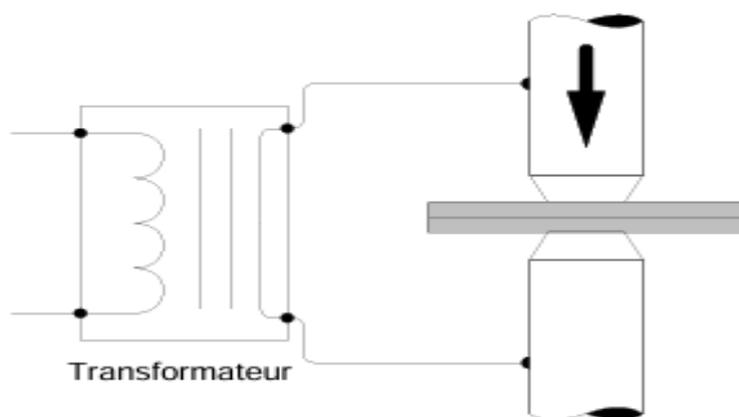


Figure II-3 : Principe du soudage par point [4]

II-3-Déroulement du cycle de soudage :

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases :

- **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 des machines du CRDM, seule l'électrode supérieure se rapproche, l'autre étant fixe. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte,
- **Le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de intensité, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse,
- **Le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné,
- **La remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point. [4]

Ces quatre phases, ainsi que les évolutions de l'effort mécanique et du courant de soudage tout au long d'un cycle, sont représentées sur la figure II-4 [4]

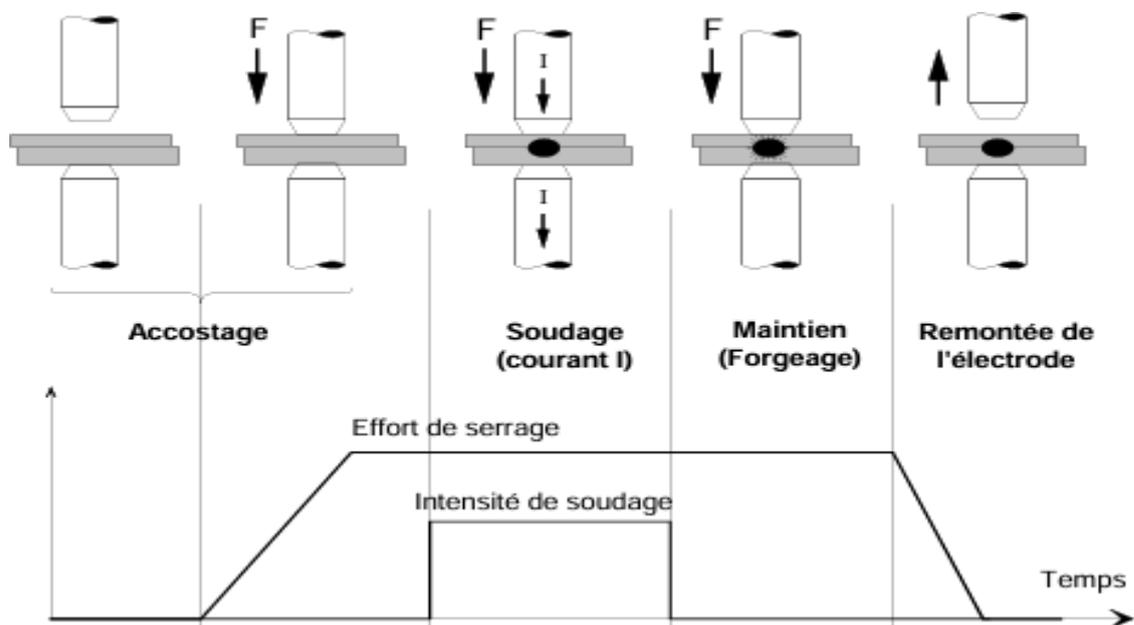


Figure II-4 : Les différentes phases d'un cycle de soudage [4]

II-4-Géométrie d'un point soudé :

La géométrie d'un point soudé présente trois particularités (voir figure 2.5)

- Discontinuité de l'assemblage.
- Présence d'une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitations mécaniques.
- Indentation, par pénétration de l'électrode, des faces externes de l'assemblage.

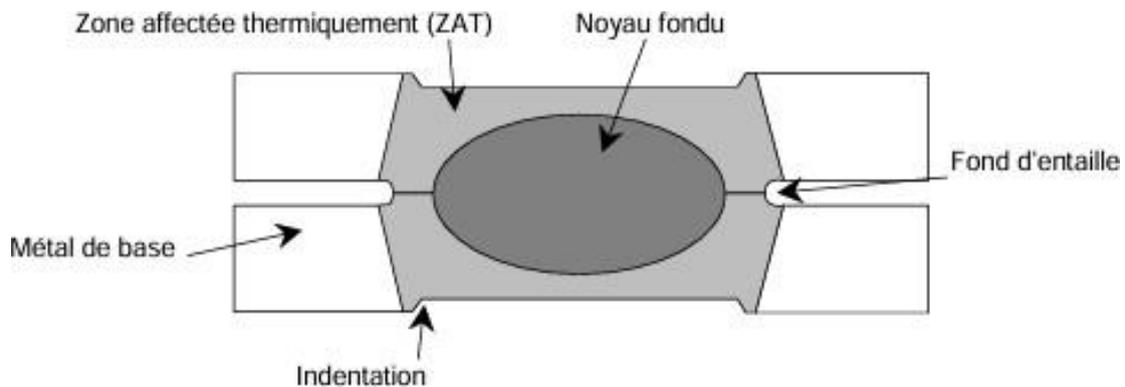


Figure II-5 : Coupe d'un point soudé

Qualitativement, on constate que les caractéristiques mécaniques de la soudure sont principalement influencées par la taille du noyau fondu, et en particulier par son diamètre dans le plan des deux tôles.

Si l'intensité électrique fournie est trop faible, le noyau fondu est trop petit, voire inexistant, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus on augmente l'intensité fournie, plus la zone fondue est étendue et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques.

Cependant, passé un certain seuil, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille soit une des faces extérieures de la tôle : sous l'effet de la pression mécanique exercée par les électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu (phénomène dit "d'expulsion") : la qualité du point soudé s'en trouve dégradée.

II-5-Les types du soudage par point :

On peut caractériser les différents types du soudage de point

- **Soudage par points par résistance** : C'est la méthode la plus courante de soudage par points. Il utilise un courant électrique pour générer de la chaleur à l'interface des tôles à souder, créant ainsi un point de soudure fondu.
- **Soudage par points par ultrasons** : Cette méthode utilise des vibrations ultrasoniques pour

créer de la chaleur et de la friction à l'interface des tôles à souder. Il est particulièrement adapté aux métaux fragiles ou à faible point de fusion.

- **Soudage par points par pont :** Cette méthode utilise un arc électrique pour créer un point de soudure entre les tôles à souder. Il est souvent utilisé pour des applications nécessitant une grande précision et une résistance élevée.
- **Soudage par points à chaud :** Cette méthode utilise un fer à souder chaud pour faire fondre le métal d'apport et souder les tôles ensemble. Il est simple à réaliser mais moins précis que d'autres méthodes.
- **Soudage par points par induction :** Cette méthode utilise un champ électromagnétique pour générer de la chaleur dans les tôles à souder. Il est souvent utilisé pour des applications nécessitant une soudure rapide et uniforme.
- **Soudage par points thermit :** Cette méthode utilise une réaction chimique exothermique pour générer de la chaleur et souder les tôles ensemble. Il est souvent utilisé pour des applications nécessitant une grande précision et une résistance élevée.[3]

II-6-Fonctionnement de soudage par points :

Le processus de soudage par points peut être divisé en trois étapes : réglage de la pièce, introduction du courant et solidification.

- **Etape 1 : Réglage des pièces :**
Pour commencer, les pièces doivent être placées dans la machine à souder en position de chevauchement. Les pièces peuvent varier en termes de type ou de matériaux.

Par la suite, on ajuste la pointe de l'électrode en position de soudage. En outre, il est essentiel d'aligner précisément les électrodes supérieure et inférieure avant d'appliquer la pression.

- **Etape 2 : Présentation du courant :**



Figure II-6 : Arcs chauffants en soudage par points [1]

Une fois que les pièces ont été bien positionnées, le courant commence à passer à travers les

électrodes. Au fur et à mesure que le courant passe d'une électrode à l'autre avec une grande intensité, la résistance de la pièce génère de la chaleur ($H = j e^2 R T$) et rend la zone de soudage plus mince. Il est nécessaire que les points de fusion des électrodes soient plus élevés que ceux de la pièce. Le joint se rompt lorsque le point de fusion est bas, car il fond avant la fusion de la pièce.

- **Étape 3 : Solidification**

Le temps de circulation du courant dans le point de soudure dépend de l'épaisseur et du matériau. Après avoir envoyé le courant pendant un temps spécifié, l'étape suivante consiste à refroidir la position de soudage. Les électrodes restent dans la pièce et servent de support jusqu'à ce qu'elle soit complètement solidifiée. Ici, les électrodes aident également à perdre la chaleur de l'articulation. Après avoir créé un joint étanche, les électrodes sont retirées des pièces et vont vers un autre point de soudure.

Comprenons le processus de soudage par points par un organigramme ;[1]

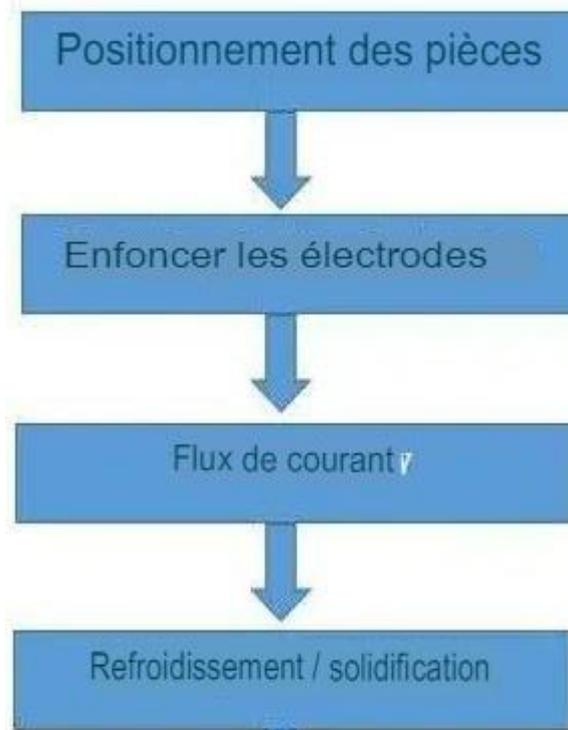


Figure II-7 : procédé de soudage par points [1]

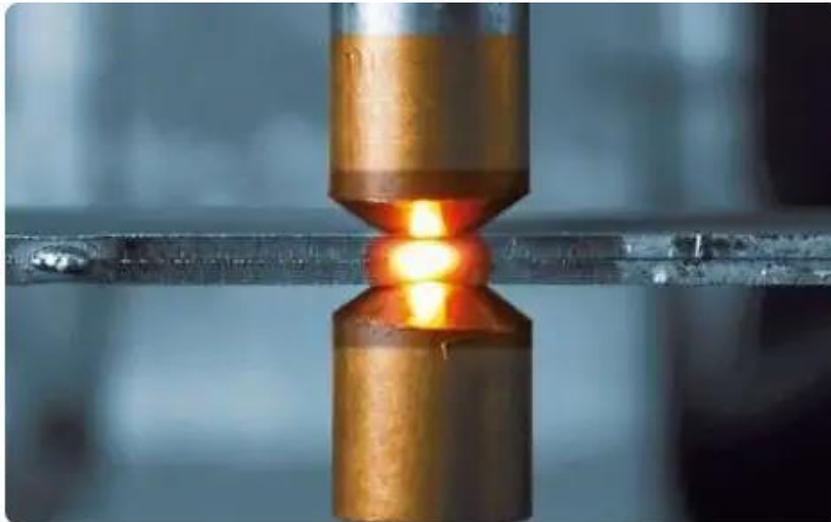


Figure II-8 : Les électrodes de cuivre créent une soudure par points.[1]

II-7-Avantages du soudage par point :

La soudure par point offre de nombreux avantages significatifs dans la vie quotidienne de nombreuses entreprises.

II-7-1-La rapidité du soudage par point :

La soudure par point se distingue par sa rapidité remarquable. Cette efficacité est due à la chaleur intense générée par le courant électrique qui traverse les électrodes et fusionne les deux morceaux de métal. Le processus est effectué de manière uniforme et efficace, permettant d'obtenir des résultats en quelques secondes seulement.

La rapidité du processus de soudage minimise les risques de déformation des matériaux, car la chaleur est appliquée de manière très localisée et pendant une très courte durée. Cela est particulièrement évident dans des applications telles que les panneaux de carrosserie des véhicules, où la soudure par point est couramment utilisée pour assembler les tôles sans altérer leur forme ou leur intégrité. Cette technique assure ainsi un assemblage rapide et précis, sans compromettre la qualité des pièces métalliques.

II-7-2-Le coût moins cher du soudage par point :

En général, la soudure par point contribue à une réduction significative des coûts de production. Cette méthode, en raison de son efficacité et de sa rapidité, permet aux entreprises de réaliser des économies substantielles. En réduisant le temps et l'énergie nécessaires pour assembler les pièces métalliques, elle améliore la rentabilité des opérations industrielles.

La soudure par point est particulièrement adaptée aux chaînes de montage en raison de sa capacité à produire des soudures rapides et précises en grande quantité. De plus, l'intégration de la robotique dans le processus de soudage par point optimise encore davantage les coûts. Les robots peuvent effectuer des soudures avec une précision constante et à une vitesse élevée, réduisant ainsi la main-d'œuvre et les erreurs humaines tout en augmentant l'efficacité globale de la production.

En somme, cette méthode offre une solution économique et performante pour des opérations de soudage de grande envergure, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses industries.

II-7-3- Une économie d'énergie considérable :

Le soudage par point est particulièrement avantageux en termes d'économie d'énergie. Ce processus est conçu pour être extrêmement efficace dans l'utilisation de l'électricité, générant un gain significatif en termes de consommation d'énergie par rapport à d'autres méthodes de soudage.

En effet, la soudure par point se concentre sur des zones spécifiques avec une application rapide de chaleur, ce qui limite la quantité d'énergie nécessaire pour effectuer les soudures. Cette méthode utilise une courte impulsion de courant électrique pour atteindre la température de fusion requise, réduisant ainsi la durée pendant laquelle l'énergie est consommée. Par conséquent, elle est beaucoup plus économique en termes de consommation d'électricité que les procédés de soudage plus longs et plus énergivores.

Cette efficacité énergétique non seulement réduit les coûts opérationnels mais contribue également à une empreinte environnementale plus faible, faisant de la soudure par point une option attrayante pour les entreprises soucieuses de leur impact énergétique et écologique.

II-7-4- Un processus bien compris :

Au premier abord, il est important de souligner que la soudure par point est l'un des procédés de soudage les plus anciens et les plus éprouvés. Bien maîtrisée par les spécialistes, cette méthode est largement reconnue pour sa fiabilité et son efficacité.

En raison de sa nature bien définie et de sa longue histoire d'utilisation, la soudure par point est particulièrement adaptée aux métaux minces, tels que les alliages de nickel, l'acier inoxydable, et le titane. Sa précision et sa rapidité font de cette technique un choix privilégié dans des secteurs industriels exigeants, tels que l'automobile et l'aérospatiale, où elle est fréquemment employée pour assembler des composants avec une grande précision et une robustesse accrue.

L'expérience et la compréhension approfondie du processus permettent aux ingénieurs et techniciens de tirer pleinement parti de ses avantages, garantissant des résultats de haute qualité dans des applications industrielles variées. [1]

II-8- Inconvénients du soudage par point :

Bien que la soudure par point offre de nombreux avantages, elle n'est pas sans inconvénients. Voici quelques-uns des principaux défis associés à cette méthode :

II-8-1- Limitation des Épaisseurs :

La soudure par point est principalement efficace pour les métaux de faible épaisseur. Les pièces plus épaisses peuvent nécessiter des ajustements ou d'autres méthodes de soudage, car la technique peut ne pas garantir une fusion uniforme sur toute l'épaisseur.

II-8-2- Contrôle de la Qualité:

Bien que le procédé soit généralement précis, le contrôle de la qualité peut parfois être un défi,

surtout si les paramètres de soudage ne sont pas correctement réglés. Des défauts peuvent survenir si la pression ou la durée de l'impulsion ne sont pas parfaitement ajustées .

II-8-3- Préparation des Pièces:

Les surfaces à souder doivent être propres et correctement préparées pour assurer une bonne conductivité électrique et une soudure efficace. Toute contamination ou irrégularité peut affecter la qualité du joint.

II-8-4- Accès Limité :

La soudure par point est souvent limitée par la capacité d'accès aux zones à assembler. Les configurations complexes ou les espaces réduits peuvent rendre l'application de cette méthode difficile ou impossible.

II-9-Applications du soudage par point :

Il est possible de souder pratiquement toutes les tôles et alliages d'une épaisseur maximale de 3mm en utilisant le soudage par points. Le soudage par points automatisé et semi-automatisé est utilisé dans de nombreuses industries, telles que l'automobile, l'aérospatiale, les ustensiles de cuisine, l'architecture, l'électricité et la construction. Examinons plus en profondeur certains d'entre eux.

II-9-1. Automobile :

Le processus de soudage par points est essentiel pour la production de carrosseries automobiles. Selon (Mishra 2016), il est couramment employé dans la production de carrosseries automobiles. Prenons l'exemple des tôles d'aluminium qui sont soudées par points afin de former une carrosserie de voiture. En outre, les secteurs de l'automobile ne font usage que de machines de soudage par points automatisées et de robots.

II-9-2. Electronique :

Le soudage par points est utilisé dans de nombreuses pièces et produits électriques. On l'emploie souvent pour la production de cartes PCB, de batteries, de capteurs, de connecteurs, de cellules solaires, de panneaux et d'autres éléments. En outre, il existe des batteries qui préfèrent utiliser le soudage par points plutôt que la soudure.

II-9-3. Ustensiles de cuisine :

Le soudage par points est applicable à la création de différents ustensiles de cuisine, notamment des spatules, un coupe-pizza, des poignées et des tasses.

II-9-4. Orthodontie :

Il se peut que vous ayez connaissance des appareils dentaires. Le réalignement des dents et d'autres traitements d'orthodontie sont fréquents chez le dentiste. L'assemblage est réalisé par une technologie de soudage par points (petite taille).

II-9-5. Réparation :

On utilise le soudage par points pour réparer des voitures, des meubles métalliques et des pièces architecturales. Il est aussi un acteur majeur dans la restauration d'une voiture endommagée. [3]

II-10- Références

- [1] ABBAS, I. (Y.Septembre 2009). *guide CND les techniques de contrôle non destructif de la soudure, Pôle d' Innovation nationale de l'Artisanat " Travail des Métaux "CFMICampus des métiers79200 PARTHENAY.*
- [2] Mécanique & Industries 7,251-263 (2006), AFM, EDP Sciences 2006
DOI:10.1051/meca:2006039
- [3] Abdallah, B. (2014). *Contrôle non destructif et destructifs du cordon de soudage à l'arc électrique des tubes en acier S355JR de canalisations d'eau du Barrage oued Atmania à Ain Kercha (mémoire de master).* Université Badji Mokhtar Annaba.
- [4] CAZES, R. (s.d.). *Roland CAZES ,ex-Directeur des recherches de la société Sciaky au canada Soudage soudabilité métallurgique des métaux- traité génie mécanique B 7 700.*
- [5] Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Annecy Santé au Travail Actualisé en 2009.

Chapitre 3

Etude expérimentale

Sommaire

| | |
|---|----|
| III-1- Introduction | 34 |
| III-2- Matériaux d'étude..... | 34 |
| III-2-1- Acier E 24 | 34 |
| III-2-2- Acier XC 75 | 35 |
| III-3- Etapes de la réalisation des éprouvettes | 36 |
| III-4- Machine de soudage (DALEX)..... | 38 |
| III-5- Méthode de soudage des éprouvettes | 40 |
| III-6- Etude d'impact de variation de l'intensité et la pression..... | 42 |
| III-6- Electrode de soudage par résistance par point..... | 43 |
| III-6- Essai de traction..... | 44 |
| III-7- Conclusion..... | 46 |
| III-8- Références | 46 |

III-1- Introduction :

Nous proposons dans cette partie une étude expérimentale sur plusieurs échantillons de pièces soudées par points en faisons varier les paramétrés.

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

Le procédé de soudage est réalisé par une machine DALEX. Des tôles de 1,5 mm d'épaisseur, l'acier inoxydable XC 75 étudié (Tableau III-01) avec un acier E 24 (Tableau III-02) sont soudées avec des électrodes.

Les paramètres et un effort aux variations de Pression changeable en trois cycles de (300 ; 400 et 500 daN). Dans une Intensité de 30, 40, 50, 60 ,70 ,80 et 90 Ampère

III-2- Matériaux d'étude :**III-2-1- Acier E 24 :**

L'acier E24 (également connu sous les désignations A37 ou S235JR) est un acier de construction soudable doux, à faible teneur en carbone (ne dépassant pas 0,1%)

a- Composition et propriétés :

- Acier non allié, facilement usinable
- Adapté pour des pièces mécaniques peu sollicitées
- Traitement thermique et soudage faciles
- Limite élastique minimale garantie de 235 MPa
- Résistance à la traction de 370 MPa

b- Applications :

L'acier E24 est couramment utilisé pour :

- La construction mécanique générale
- Les structures soudées peu sollicitées
- Les pièces de machines et d'appareils
- Les éléments de charpentes métalliques
- Les pièces forgées et embouties

Équivalences :

- Ancienne norme française : A37
- Norme européenne actuelle : S235JR

En résumé, l'acier E24 est un acier de construction soudable, à faible teneur en carbone, offrant de bonnes propriétés mécaniques et une facilité de mise en œuvre. Il est largement utilisé dans de nombreuses applications mécaniques et de construction.

c- Composition chimique des aciers E 24 :**Tableau III-01 :** Composition chimique des aciers E 24[1]

| Elément | C | Mn | P | S | N |
|------------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| E 24 (Max wt %) | 0,2 | 1,4 | 0,04 | 0,04 | 0,012 |

III-2-2- Acier XC 75 :

L'acier XC 75, également connu sous le nom de tôle bleue. Voici un résumé des caractéristiques et des applications de cet acier :

a- Composition et Propriétés :

- L'acier XC 75 est un acier fin avec une teneur en carbone comprise entre 0,65% et 0,80% et une faible addition de chrome, facilitant la trempe à l'huile.
- L'acier XC 75 présente une excellente homogénéité de dureté sur toute la surface et à cœur, avec une résistance à la traction de 610 N/mm² et une limite élastique minimale garantie de 235 MPa.

b- Traitement Thermique :

Pour l'acier XC 75, le traitement thermique implique une trempe à l'huile à 840 °C pour atteindre une dureté de 58-60 Rockwell, suivi d'un revenu à une température de 180°C à 200°C.

c- Applications :

L'acier XC 75 est conçu pour des applications en extérieur, notamment pour des systèmes d'affichage digitaux. Il est caractérisé par une bonne résistance à la traction et une bonne dureté, ce qui en fait un choix approprié pour des pièces mécaniques et des outils tranchants. Voici quelques-unes des utilisations courantes de l'acier XC 75:

- Applications en extérieur : Les appareils de la série XC 75 sont conçus pour fonctionner en conditions climatiques difficiles, ce qui en fait un choix approprié pour des systèmes d'affichage digitaux en plein air.
- Pièces mécaniques : L'acier XC 75 est utilisé pour les pièces mécaniques, comme les ressorts, les outils tranchants et les pièces d'usure, en raison de sa bonne résistance à la traction et de sa dureté élevée.
- Outillage : Le XC 75 est également utilisé pour les outils tranchants, comme les couteaux et les lames, en raison de sa bonne résistance à la traction et de sa facilité à travailler.

En résumé, l'acier XC 75 est conçu pour des applications en extérieur et est utilisé pour des pièces mécaniques, des outils tranchants et des systèmes d'affichage digitaux.

d- Composition chimique des aciers XC 75 :

Tableau III-02 : Composition chimique des aciers XC 75 [1].

| Elément | C | Si | Mn | S | P |
|---------|------|------|------|-------|-------|
| XC 75 | 0,75 | 0,65 | 0,30 | 0,035 | 0,035 |

III-3- Etapes de la réalisation des éprouvettes :

Les échantillons d'essai sont constitués de deux pièces rectangulaires de longueur 135 mm et largeur 20 mm, soudés en un point comme représenté sur la figure suivante [2].

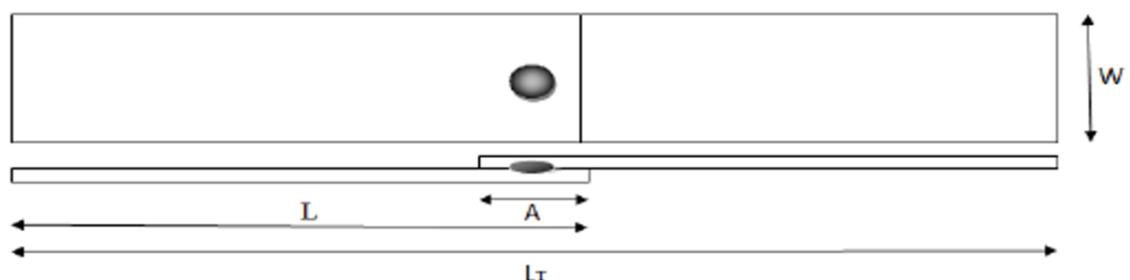


Figure III-1 : Dimensions des éprouvettes soudées ($L = 135$ mm ; $L_r = 240$ mm ; $W = 20$ mm ; $A = 30$ mm ; $E = 1,5$ mm)



Figure III-2 : Des éprouvettes avant soudées

III-4- Machine de soudage (DALEX) :

La machine de soudage par point (DALEX) un moyen d'assemblage indémontable de tôles associée à un tableau de commande pour le réglage de différents paramètres comme la pression et l'intensité. [3]

Dans l'Entreprise EPE ANABIB l'utilisation de la machine de soudage par point (DALEX) a des paramètres régler de (Intensité = 90 ampère et Pression = 400 daN) pour souder la pièce collier (figure III-04) sur un tube pour fixer l'éclisse (figure III-05) pour obtenir un ensemble de pièces Rallonge (Figure III-06).

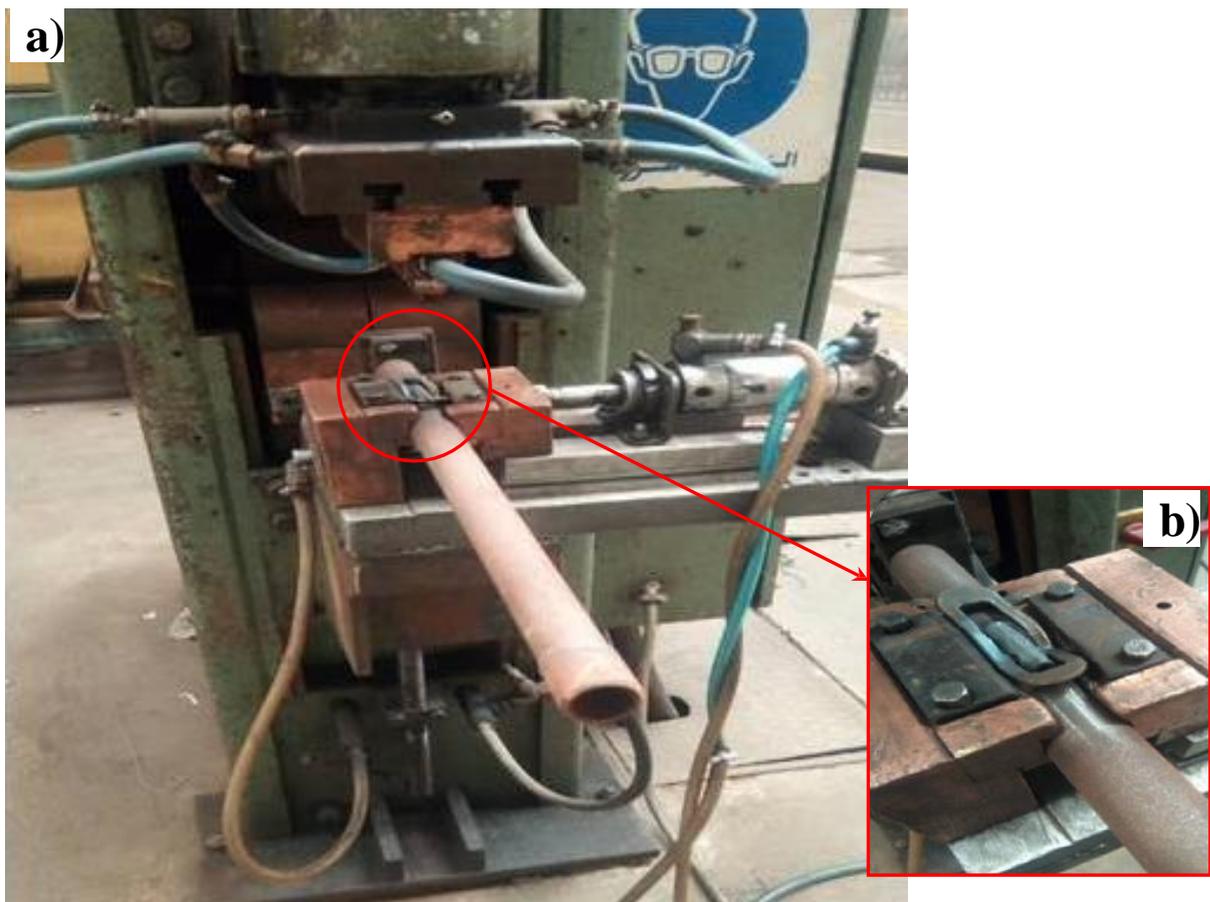


Figure III-3 : Machine de soudage par point (DALEX) ; a) Vision générale ; b) Fixation de rallonge [3]

III-5- Méthode de soudage des éprouvettes :

La méthode de soudage des éprouvettes situé au figure Suivant (**Figure III-07**) Placement des éprouvettes ;(**Figure III-08)** Soudage des éprouvettes et (**Figure III-09**) Point de soudage.

Dans notre étude, nous avons mené des expériences préliminaires sur les échantillons, en commençant avec des intensités de courant initiales de 10 et 20 ampères. Cependant, ces essais n'ont donné aucun résultat concluant, et nous avons décidé d'adopter les variations présentées dans le tableau suivant

Tableau III-103 : Les déférant paramètres de soudage par point

| N° d'éprouvette | Intensité (Ampère) | Pression (daN) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|
| S1 | | 300 |
| S2 | 30 | 400 |
| S3 | | 500 |
| S4 | | 300 |
| S5 | 40 | 400 |
| S6 | | 500 |
| S7 | | 300 |
| S8 | 50 | 400 |
| S9 | | 500 |
| S10 | | 300 |
| S11 | 60 | 400 |
| S12 | | 500 |
| S13 | | 300 |
| S14 | 70 | 400 |
| S15 | | 500 |
| S16 | | 300 |
| S17 | 80 | 400 |
| S18 | | 500 |



Figure III-07 : Placement des éprouvettes



Figure III-08 : Soudage des éprouvettes



Figure III-09 : Point de soudage

III-6 Etude d'impact de variation de l'intensité et la pression:

L'effet de l'essai de traction sur les éprouvettes souder avec un temps constant (Figure III-10), avec une variation de la pression (Figure III-11) et l'augmentation de l'intensité de courant (Figure III-12).



Figure III-10 : Cycle de soudage constant.



Figure III-11 : Variation de la pression.



Figure III-12 : Variation de l'Intensité de courant

III-7- Electrode de soudage par résistance par point:

L'électrode de soudage en cuivre est largement utilisées dans divers procédés de soudage, notamment le soudage par résistance et le brasage. Le cuivre est apprécié pour sa conductivité électrique et thermique élevée, ce qui en fait un excellent matériau pour la dissipation rapide de la chaleur, réduisant ainsi les risques de surchauffe pendant le soudage. De plus, les électrodes en cuivre résistent bien à l'usure, offrant une longue durée de vie même dans des conditions de soudage à haute intensité

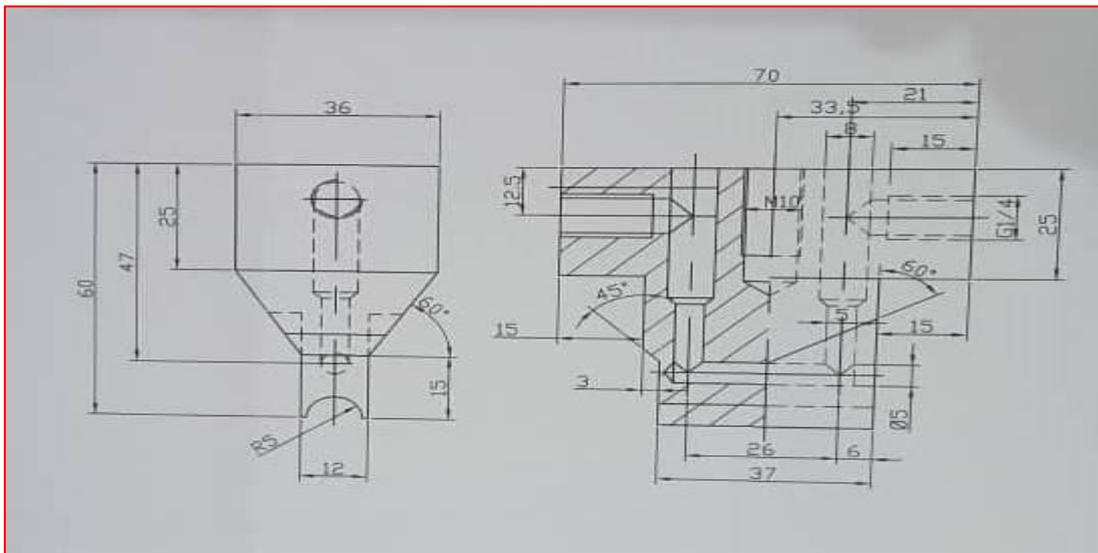


Figure III-13 : Electrode de soudage.

III-8- 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 III-14).

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes Contrainte/Allongement.



Figure III-14 : Machine d'essai de traction Z010/TH2S [4]

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes Contrainte/Allongement.

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge croissante jusqu'à provoquer la 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.

III-8-1- 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. [4]

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.



Figure III-15 : Eprouvette d'Acier E 24 après l'essai de traction

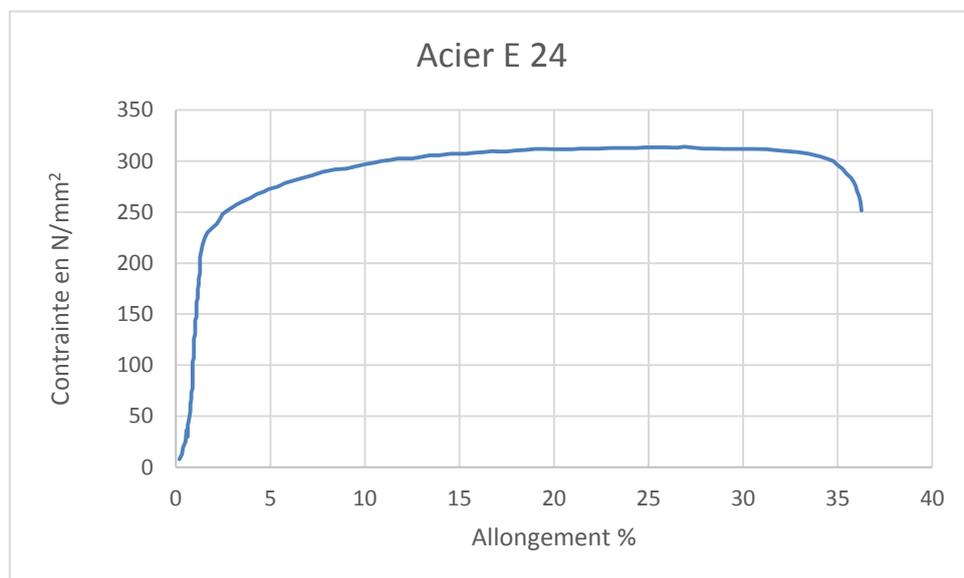


Figure III-16 : Courbes Contrainte/Allongement Eprouvette d'Acier E 24.



Figure III-17 : Eprouvette d'Acier XC 75 après l'essai de traction

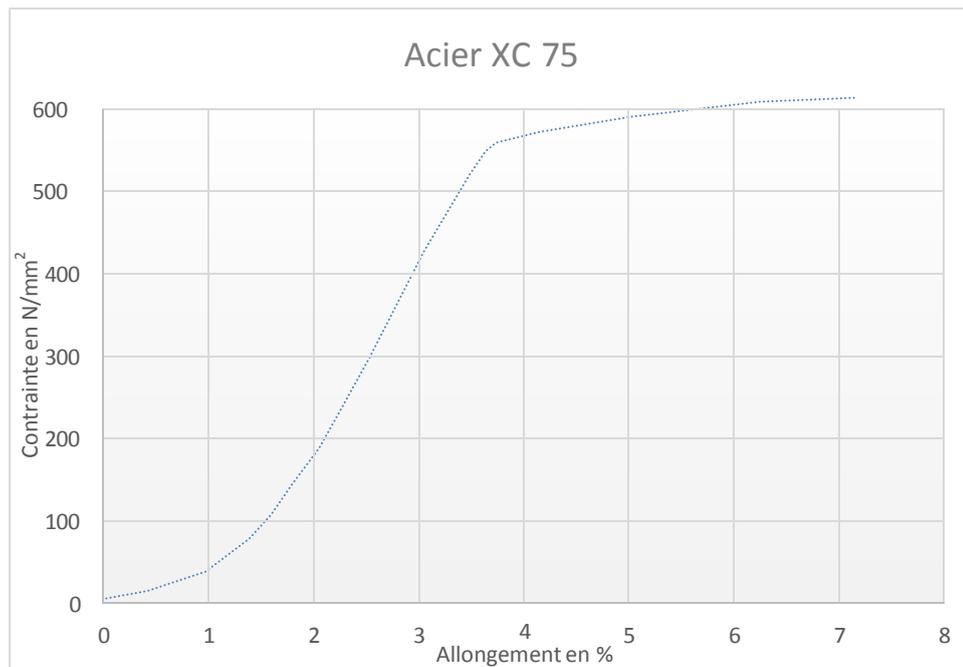


Figure III-18 : Courbes Contrainte/Allongement Eprouvette d'Acier XC 75.

III-9- Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents paramètres à analyser dans notre expérimentation ainsi que les deux 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.

III-9- Références :

- [1] Norme NF EN 10025 correspondant à la norme DIN 17100 .
- [2] Norme Internationale ISO 6892-1 :2019(fr).
- [3] Documentation de l'entreprise EPE-ANABIB (Manuelle de Machine de soudage (**DALEX**)).
- [4] Documentation de l'entreprise EPE-ANABIB (Manuelle de Machine d'essai de traction (**Z010/TH2S**)).

Chapitre 4

Résultats & Discussions

Sommaire

| | |
|---|----|
| IV-1- Introduction | 48 |
| IV-2- Présentation des éprouvettes après le soudage | 48 |
| IV-3- Etude d'impact de variation de pression..... | 52 |
| IV-4 Résultats des résistances maximales..... | 60 |
| IV-5 Conclusion..... | 62 |

IV-1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir les différents résultats obtenus de l'essai de traction appliqué sur les éprouvettes des pièces soudées en faisant varier les paramètres tel que : l'intensité et la pression.

Le type du matériau des pièces soudées, le temps du soudage et l'épaisseurs des pièces soudées et la vitesse de traction ($V=400$ mm/min) sont des paramètres constants.

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 différentes éprouvettes jusqu'à la rupture.

IV-2- Présentation des éprouvettes après le soudage :

Dans la présentation des éprouvettes soudées, le point de soudage comporte une surface de contact d'électrode mobile avec l'acier XC 75, et on remarque que selon l'augmentation de l'intensité l'acier XC 75 est très fondu, et le point de soudage apparaît lorsque l'acier fondu XC 75 plus que l'acier E 24 (Figure IV-1)



S 1 Intensité =30 Ampère ; Pression = 300 daN



S 2 Intensité =30 Ampère ; Pression = 400 daN



S 3 Intensité =30 Ampère ; Pression = 500 daN



S 4 Intensité =40 Ampère ; Pression = 300 daN



S 5 Intensité = 40 Ampère ; Pression = 400 daN



S 6 Intensité =40 Ampère ; Pression = 500 daN



S 7 Intensité = 50 Ampère ; Pression = 300 daN



S 8 Intensité = 50 Ampère ; Pression = 400 daN



S 9 Intensité = 50 Ampère ; Pression = 500 daN



S 10 Intensité = 60 Ampère ; Pression = 300 daN



S 11 Intensité = 60 Ampère ; Pression = 400 daN



S 12 Intensité = 60 Ampère ; Pression = 500 daN



S 13 Intensité = 70 Ampère ; Pression = 300 daN



S 14 Intensité = 70 Ampère ; Pression = 400 daN



S 15 Intensité = 70 Ampère ; Pression = 500 daN



S 16 Intensité = 80 Ampère ; Pression = 300 daN



S 17 Intensité = 80 Ampère ; Pression = 400 daN



S 18 Intensité = 80 Ampère ; Pression = 500 daN

Zone Fondu

Figure IV-1 : Eprouvettes après le soudage



Figure IV-2 : Eprouvette après l'essai de traction.

IV-3- Etude d'impact de variation de pression

Les différents résultats de l'essai de traction sur la variation de pression présente l'efficacité du soudage $P= 300$ daN (**Figure IV- 3**) ; $P= 400$ daN (**Figure IV-4**) et $P= 500$ daN (**Figure VI-5**).



Figure IV-3- : *Eprouvette après l'essai de traction avec $P=300$ daN et l'intensité = 80 A.*



Figure IV-4 : *Eprouvette après l'essai de traction avec $P=400$ daN et l'intensité = 40 A.*



Figure IV-5 : *Eprouvette après l'essai de traction avec $P=500$ daN et l'intensité =50 A.*

Les figures suivantes présentent les différents résultats de l'essai de traction. On observe que :

- Pour une intensité de 40 Ampère, la résistance maximale est inférieure à celle de l'acier E24. La rupture se produit au niveau du point de soudage, indiquant une soudure faible.
- Pour une intensité de 50 Ampère, la résistance maximale est proche de celle de l'acier E24. Les trois éprouvettes montrent une variation des points de soudage :
 - L'éprouvette avec une pression de 300 daN présente une résistance maximale (R_m) de 315,73 N/mm², avec rupture au niveau du point de soudage (soudage faible).
 - L'éprouvette avec une pression de 400 daN présente une (R_m) de 316,37N/mm², avec rupture au niveau de l'acier E24 (point de soudage fiable).
 - L'éprouvette avec une pression de 500 daN présente une (R_m) de 275,69N/mm², avec rupture au niveau du point de soudage (soudage faible).
- Pour une intensité de 60 Ampère, la résistance maximale est proche de celle de l'acier E24. Les trois éprouvettes montrent une rupture au niveau de l'acier E24 (point de soudage fiable).
- Pour une intensité de 70 Ampère, on remarque une fusion de l'acier XC75 en raison de l'augmentation de l'intensité, avec une rupture au niveau du point de soudage.
- Pour une intensité de 80 Ampère, la rupture se produit au niveau du point de soudage avec une fusion remarquable de l'acier XC75.

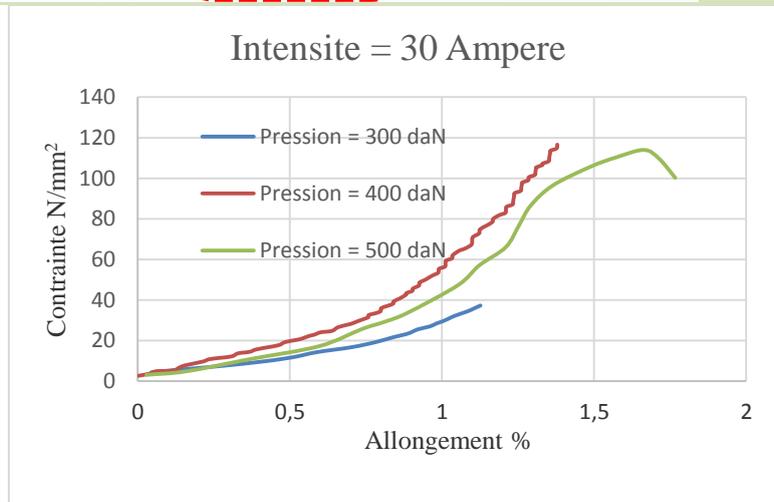
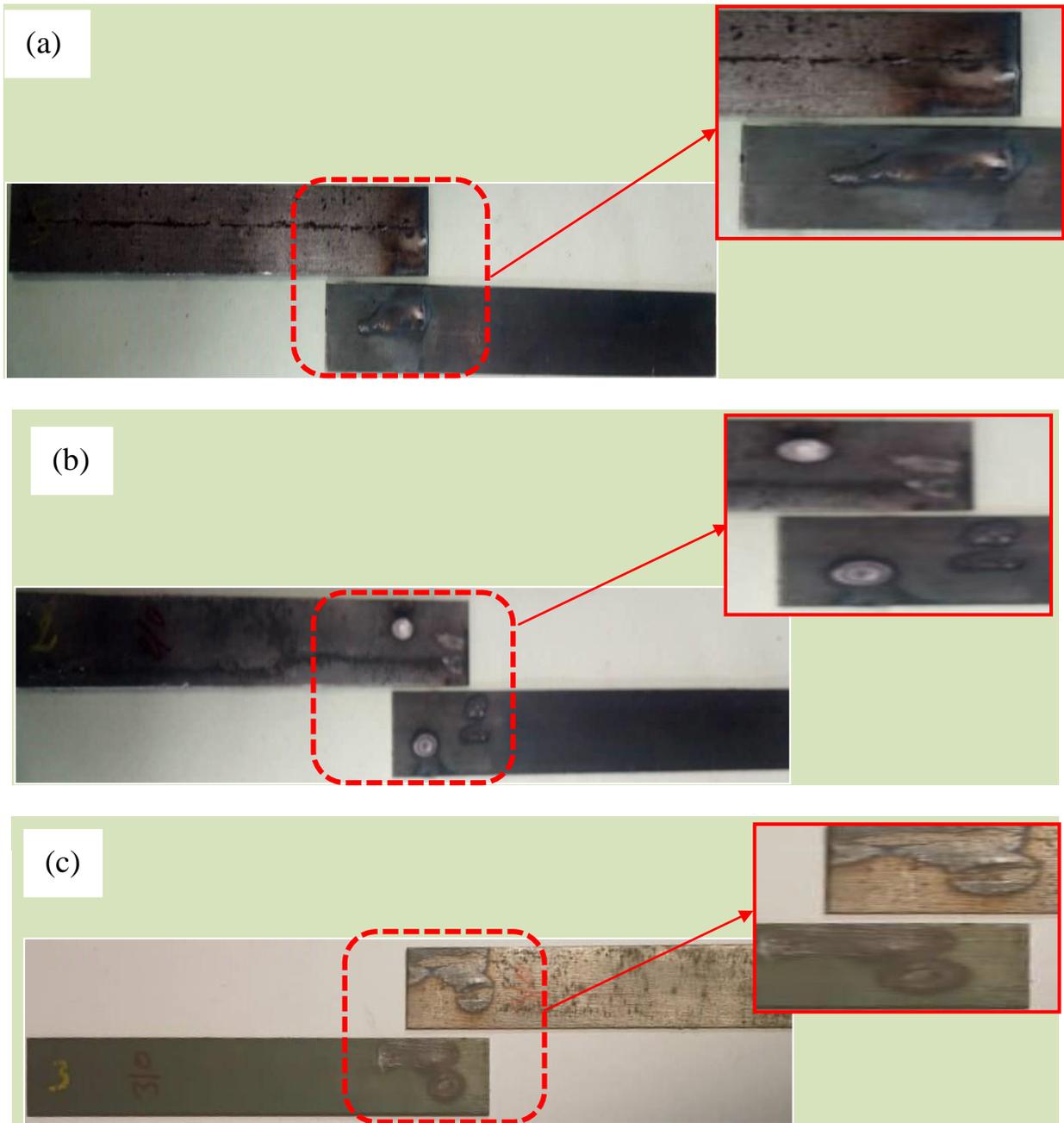


Figure IV-6 : Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 30 Ampère**.

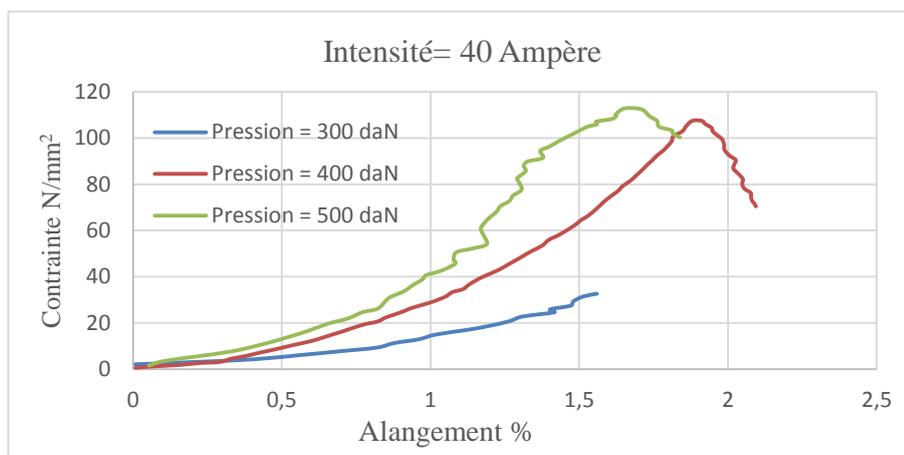
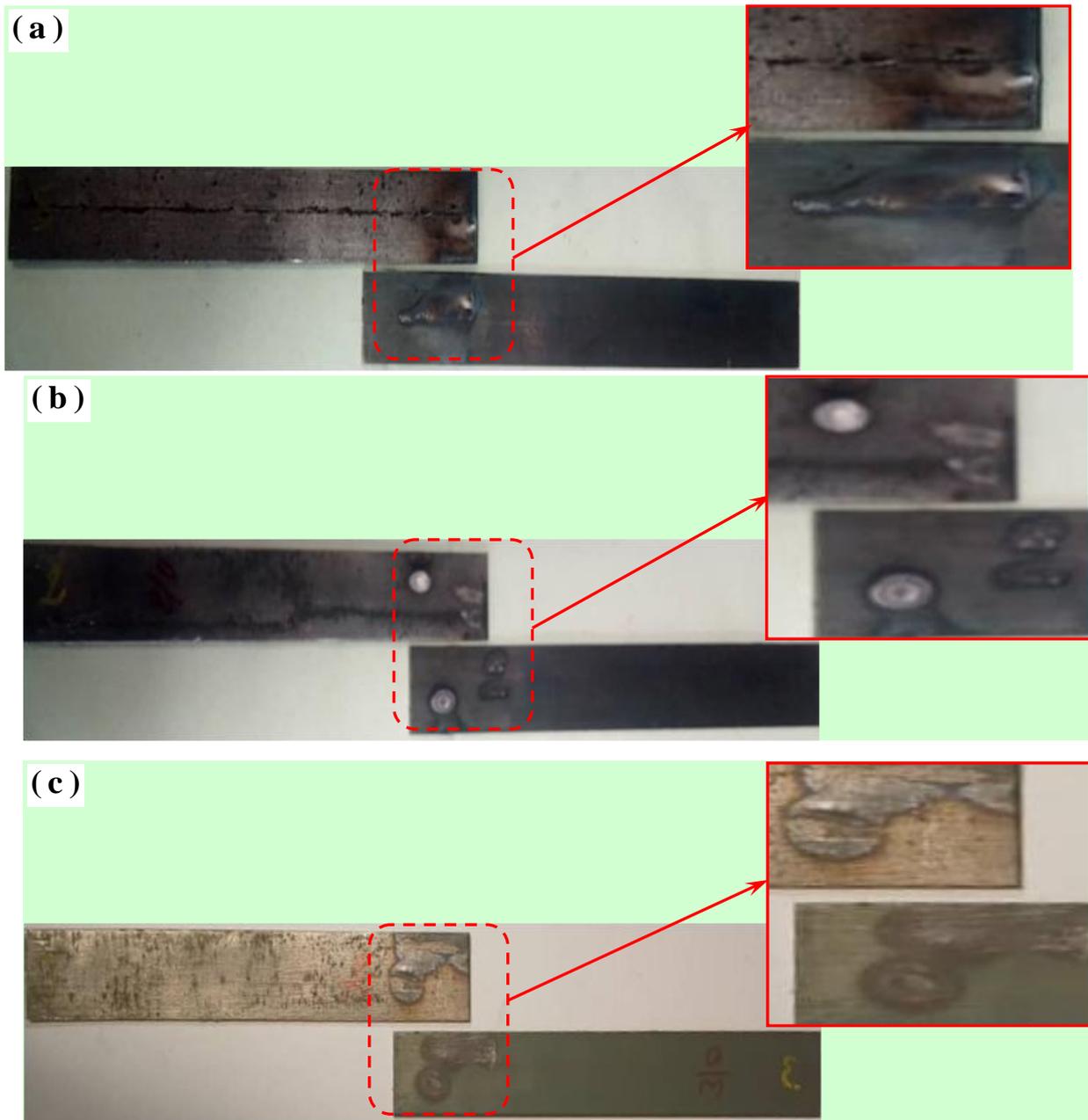


Figure IV-7 : Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 40 Ampère**.

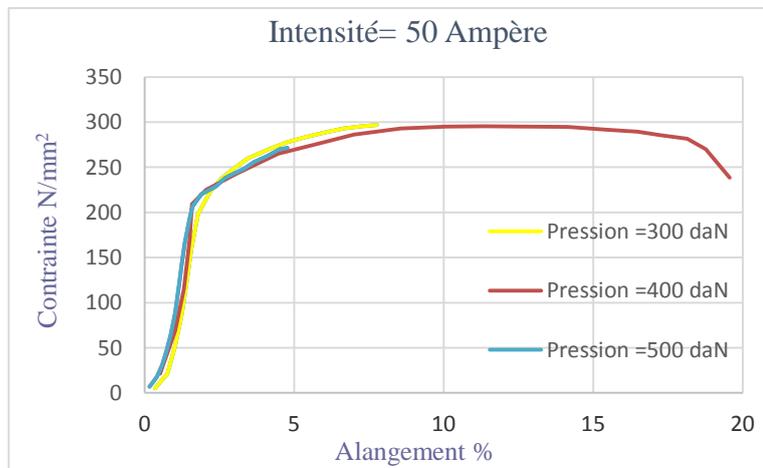
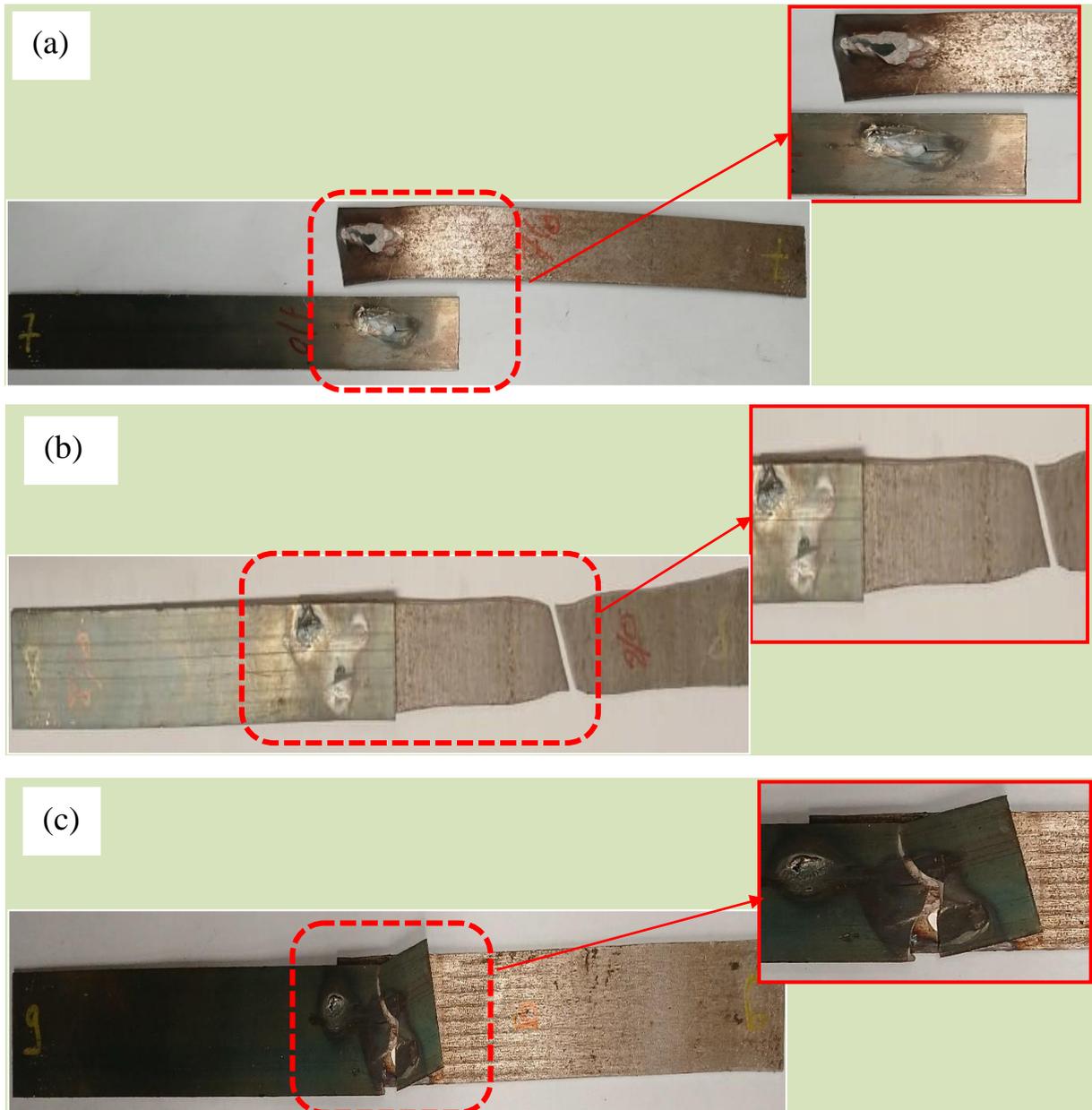


Figure IV-8 : Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 50 Ampère**.

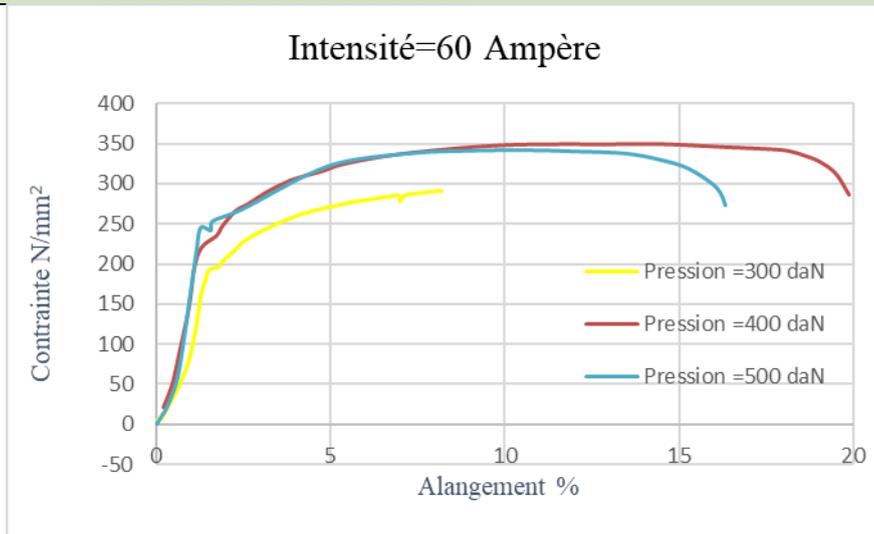
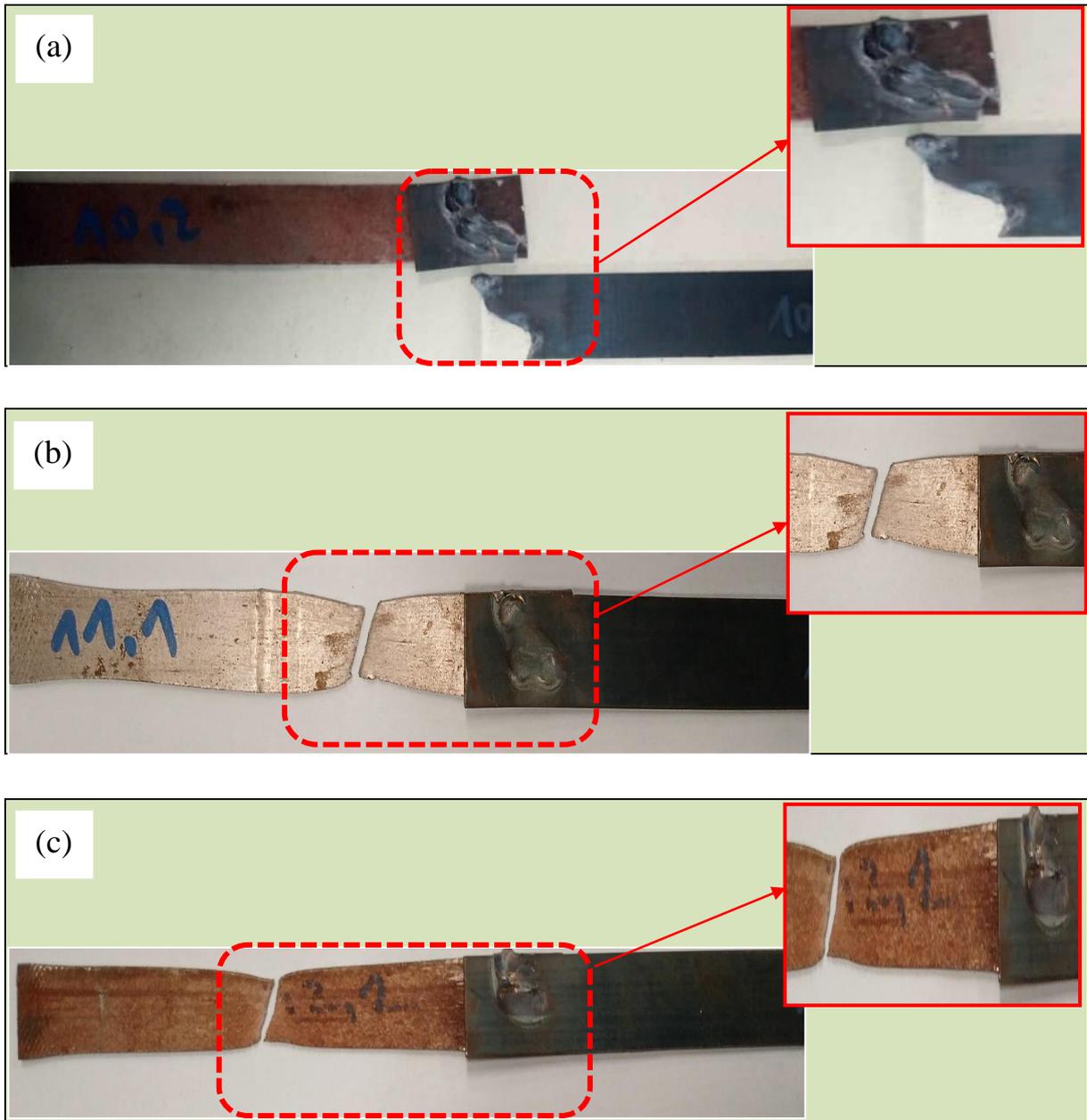


Figure IV-9: Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 60 Ampère**.

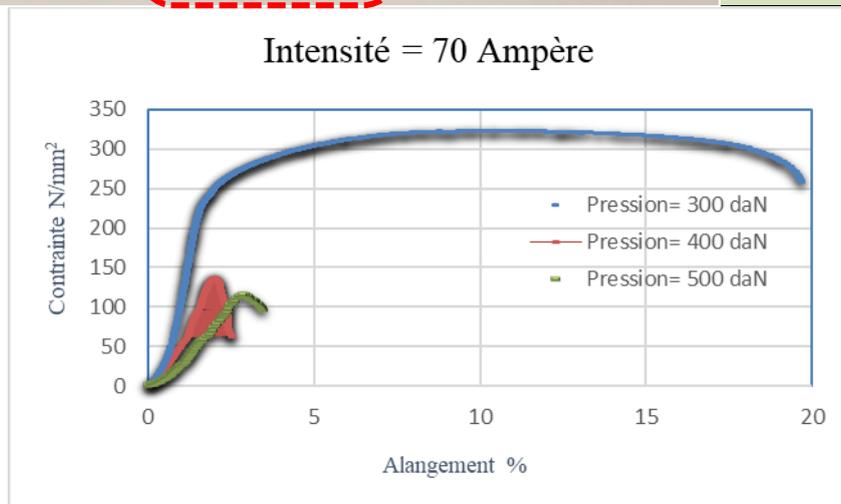
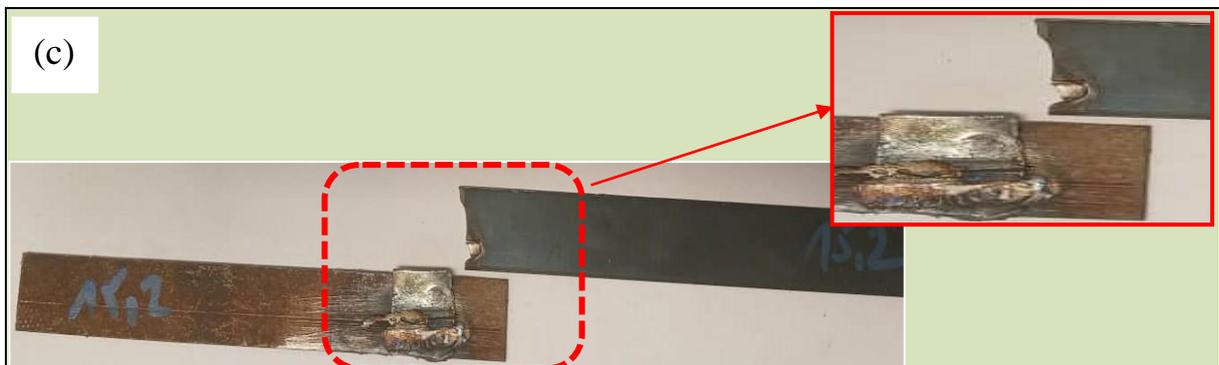
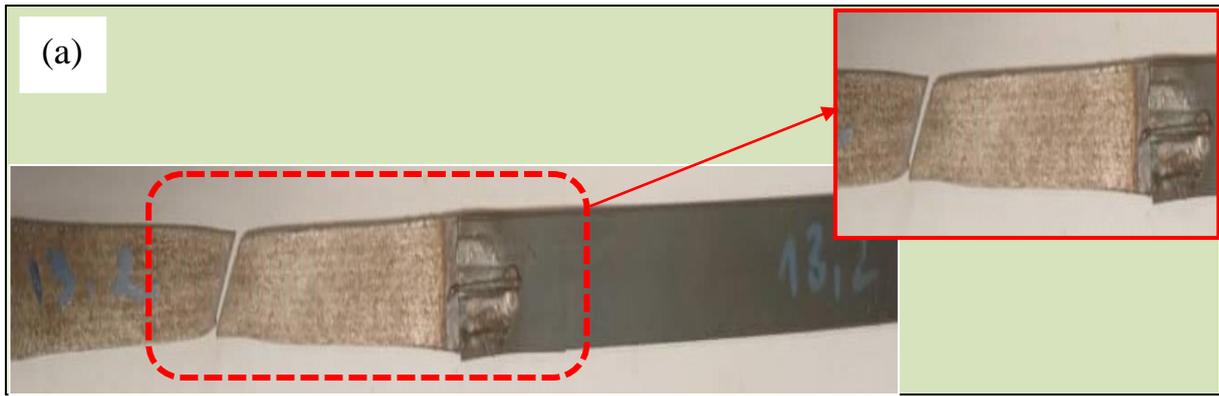


Figure IV-10: Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 70 Ampère**.

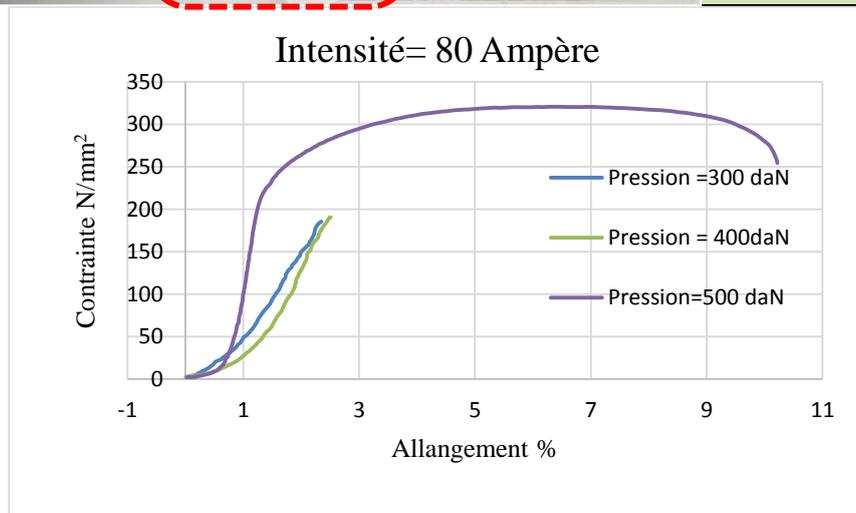
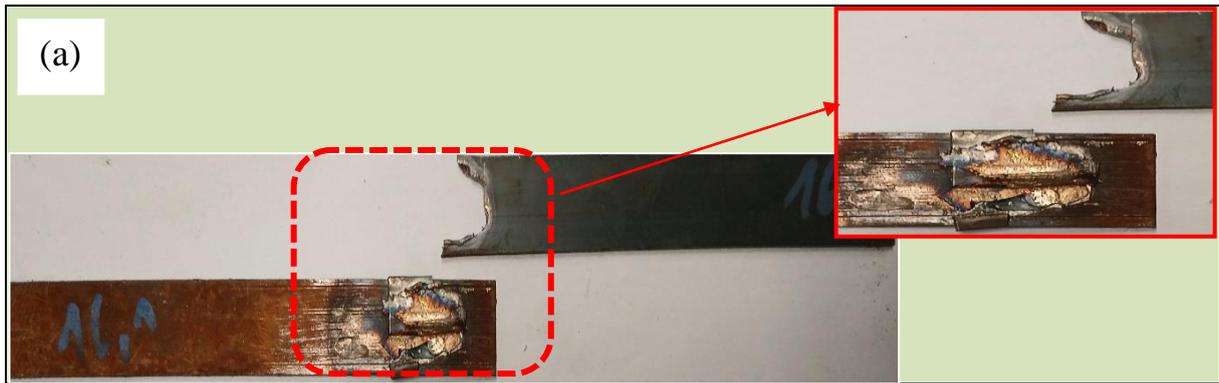


Figure IV-11: Courbe après l'essai de traction avec **Intensité = 80 Ampère**.

IV-4 Résultats des résistances maximales :

La présentation des résultats des résistances maximales de chaque éprouvette sur le tableau suivant :

| N° d'éprouvette | Intensité (Ampères) | Pression (daN) | Rm(N/mm ²) |
|-----------------|---------------------|----------------|------------------------|
| S1 | | 300 | 32 |
| S2 | 30 | 400 | 100 |
| S3 | | 500 | 119 |
| S4 | | 300 | 207 |
| S5 | 40 | 400 | 91 |
| S6 | | 500 | 151,22 |
| S7 | | 300 | 315,73 |
| S8 | 50 | 400 | 316,37 |
| S9 | | 500 | 275,69 |
| S10 | | 300 | 299,17 |
| S11 | 60 | 400 | 307,92 |
| S12 | | 500 | 309,17 |
| S13 | | 300 | 338,37 |
| S14 | 70 | 400 | 138,6 |
| S15 | | 500 | 117,1 |
| S16 | | 300 | 197,38 |
| S17 | 80 | 400 | 164,71 |
| S18 | | 500 | 334,51 |

Tableau IV-1. Les différent Résistance Maximal après l'essai de traction.

Dans la Figure IV-7 le paramètre (P= 300 daN et I=40 A) la résistance maximale observée est de $R_m = 207 \text{ N/mm}^2$, en remarque que la rupture ou niveau de point de soudage .

Dans la Figure IV-8 le paramètre (P= 400 daN et I=50 A), la résistance maximale observée est de $R_m = 316,37 \text{ N/mm}^2$, en remarque que la rupture ou niveau du le métal de base E 24.

Dans la Figure IV-9 le paramètre (P= 400 et 500daN et I=60 A), la résistance maximale observée est de proche de la résistance maximale de métal de base E24.

Dans la Figure IV-10 le paramètre (P= 300daN et I=70 A), la résistance maximale observée est de $R_m = 338,37 \text{ N/mm}^2$, en remarque que la rupture ou niveau du le métal de base E 24.

Dans la Figure IV-11 le paramètre (P= 500daN et I=80 A), montre que la résistance maximale (R_m) du point de soudage atteint $334,51 \text{ N/mm}^2$, indiquant que le rupture se situe également au niveau du point de soudage.

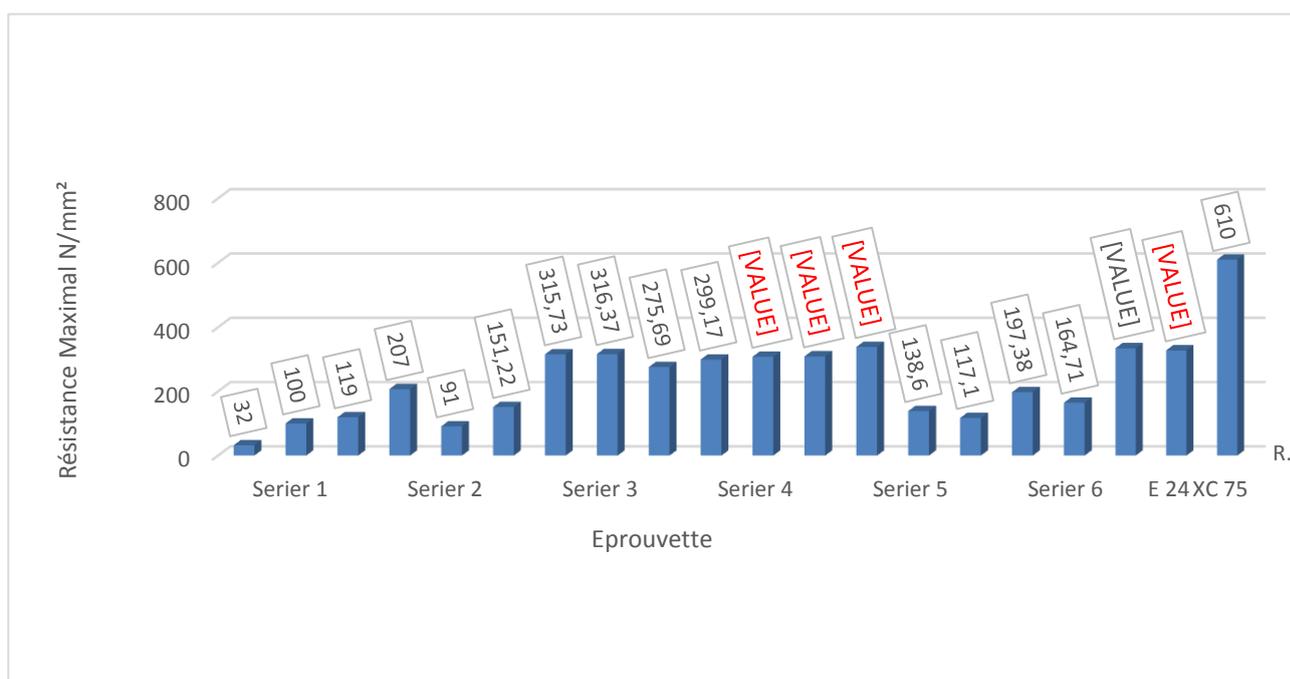


Figure IV-12 : Courbe de Résistances maximal des éprouvettes.

On observe que les paramètres optimaux dans les Eprouvettes de soudage par point les plus performantes sont S 12 et S 13(sériier 4), car la rupture se produit au niveau de l'acier E 24 avec une Résistance maximale d'environ de la résistance maximale de métal de base E 24 .

L'éprouvette S 18 présente une Résistance maximale de $334,51 \text{ N/mm}^2$ sensiblement équivalente à la Résistance maximale de l'acier E 24 toutefois le point de fusion était faible parce que les paramètres utiliser élever intensité = 80 Ampère et Pression= 500 daN . Cela implique la zone où l'acier XC 75 est passé à l'état liquide plus que l'acier E 24.

Le soudage par résistance par point est un procédé qui ne nécessite pas l'ajout de métal et qui utilise à la fois la pression et le courant électrique pour souder les pièces. Les pièces à souder sont superposées et serrées localement entre deux électrodes en cuivre. L'ensemble, comprenant les pièces et les électrodes, est traversé par un courant de soudage à faible tension, provoque une élévation importante de la température.

L'objectif de cette étude est de déterminer comment les paramètres de soudage par point influencent les caractéristiques mécaniques des structures et quels sont les meilleurs paramètres pour obtenir une soudure de qualité. L'étude expérimentale a été réalisée au niveau de la société EPE ANABIB .

IV-5 Conclusion :

Cette étude nous a permis de mettre en évidence les points suivants :

- La résistance du point de soudure est plus élevée dans le cas de l'acier XC 75 n'est pas fusionner, l'acier E 24 peut contenir des impuretés ou une couche corrosive qui affaiblit la résistance du point de soudure contrairement à l'acier ordinaire pour traitement thermique.
- L'augmentation de l'intensité correspondant un faible résultat de point de soudage.
- Les trois variétés de pression entre les électrodes augmentent la résistance de l'assemblage selon la valeur de la puissance car la période est constante.
- La meilleure pièce souder et de valeur de l'intensité = 60 Ampères. La Résistance maximale et enivrant de la Résistance maximale de l'acier ordinaire.

Conclusion générale

Notre mémoire a examiné en détail les différentes facettes du soudage par points des aciers différents, en mettant l'accent sur l'amélioration des paramètres essentiels tels que l'intensité et la pression appliquées. Une fois que les objectifs et les motivations de notre étude ont été présentés, nous avons réalisé une revue approfondie de la littérature afin de situer notre recherche dans le cadre des travaux précédents, ce qui nous permet de mieux appréhender les bases théoriques et les progrès récents dans le domaine.

Les matériaux étudiés, notamment l'acier E 24 et l'acier XC 75, ont été décrits en détail, mettant en évidence leurs caractéristiques particulières et leur pertinence pour notre étude.

Nos résultats ont été soigneusement choisis et expliqués avec soin afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité de nos méthodes expérimentales. Nos résultats expérimentaux ont démontré que l'acier XC 75 présente une meilleure résistance et une qualité de soudure supérieure par rapport à l'acier E 24, principalement en raison de sa composition chimique et de sa structure microcristalline plus favorable.

L'analyse a révélé que l'équilibre optimal entre l'intensité et pression est crucial pour maximiser la performance des soudures, et une pression et une intensité inappropriées peuvent entraîner des défauts et une diminution de la qualité des soudures.

Une étude de cas approfondie a permis de comparer directement les performances des deux aciers, mettant en lumière les avantages distincts de l'acier XC 75 dans les applications de soudage par points. Enfin, nous avons formulé des recommandations pratiques pour l'optimisation des paramètres de soudage, basées sur nos observations et analyses, et proposé des perspectives pour des recherches futures afin d'explorer d'autres matériaux et techniques de soudage.

En conclusion, notre recherche fournit des directives essentielles pour améliorer la qualité des soudures par points, offrant ainsi des avantages significatifs pour l'industrie et posant les bases pour des avancées futures dans le domaine du soudage par points.

الملخص

اللحام النقطي بالمقاومة الكهربائية هو عملية لا تتطلب إضافة معدن وتستخدم كلا من الضغط و التيار الكهربائي في عملية اللحام، يتم تركيب الأجزاء المراد لحامها وتثبيتها محليا بين قطبين كهربائيين من سبائك النحاس . يتم عبور جميع الأجزاء والأقطاب الكهربائية بواسطة تيار كهربائي منخفض الجهد مما يتسبب في ارتفاع كبير في درجة الحرارة .

الهدف من الدراسة هو تحديد كيفية تأثير مقاييس اللحام النقطي على الخصائص الميكانيكية للهياكل واختيار أفضل المقاييس للحصول على لحام عالي الجودة بتكلفة اقل . أجريت هذه الدراسة على مستوى وحدة أنابيب برج بوعريريج.

Résumé

Le soudage par points par résistance électrique est un procédé qui ne nécessite pas d'ajout de métal et utilise à la fois de la pression et du courant électrique dans le processus de soudage. Les pièces à souder sont montées et fixées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble des pièces et des électrodes est traversé par un courant électrique basse tension, ce qui provoque une élévation de température importante. Le but de l'étude est de déterminer comment les normes de soudage par points affectent les propriétés mécaniques des structures et quelles sont leurs caractéristiques, et de choisir les meilleures normes pour obtenir un soudage de haute qualité à moindre coût.

Cette étude a été réalisée au niveau de l'unité l'IRRGRIS EPE ANABIB.

Abstract

Point welding electric resistance is a process that does not require the addition of metal and uses both pressure and power in the welding process, the parts to be welded and installed locally are installed between two copper alloy electrodes.

The assembly of parts and electrodes is crossed by a low voltage electric current causing a high temperature.

The aim of the study is to determine how dot welding scales affect the mechanical properties of structures and choose the best scales for higher quality welding at a lower cost.

This study was conducted at the level of the IRRGRIS EPE ANABIB unit.

