

NOTATION UTILISEE

W : Effet de joule (joule)

R : Résistance (Ω)

I : Intensité (ampère)

t : Temps de soudage –cycle- (seconde)

ρ : Résistivité (A/m)

L : Longueur de matériau (mm)

S ; Section de matériau (mm)

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

α : Coefficient de température en K^{-1}

E : Epaisseur de l'éprouvette (mm)

Q : La quantité de chaleur généré (joule)

F : Effort en bar.

Φ : Diamètre du noyau (mm)

D : Diamètre du corps d'électrode (mm)

d : Diamètre de face active de la pointe d'électrode (mm)

LISTE DES ABREVIATIONS

OXW : **O**xyacetylene **W**elding (Soudage oxyacétylénique)

SMAW: **S**hielded **M**etal **A**rc **W**elding (Soudage à l'arc à l'électrode enrobée)

SAW: **S**ubmerged **A**rc **W**elding (Soudage à l'arc submerge)

GMAW : **G**as **M**etal **A**rc **W**elding (Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible)

GMAW : **G**as **M**etal **A**rc **W**elding (Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible)

FCAW : Soudage fil fourré sans gaz

GTAW : **G**as **T**ungsten **A**rc **W**elding (Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire)

PAW : **P**lasma **A**rc **W**elding (Soudage plasma)

RSW : **R**esistance **S**pot **W**elding (Soudage par résistance par point)

FSW : **F**riction **S**tir **W**elding (Soudage par friction-malaxage)

EBW : **E**lectron **B**eam **W**elding (Soudage par faisceau des électrons)

C.A.S.P.R : Coefficient d'Aptitude au Soudage par Résistance

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre1 : GENERALITES SUR LE SOUDAGE.....	3
1) Soudage.....	4
1.1 Généralité.....	4
1.2 Principes du soudage.....	4
1.3 Zones de la soudure.....	5
1.4 Choix du procédé de soudage.....	5
1.5 Classification des procédés de soudage.....	6
1.6 Dénominations et références.....	7
1.7 Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage.....	7
2) Soudage par résistance.....	8
2.1 Définition du procédé.....	8
2.2 Procédé de soudage par résistance.....	8
2.3 Paramètre de soudage par résistance.....	9
2.4 Les Contrôles de soudage par résistance.....	10
2.5 Les avantages et les Inconvénients.....	10
3) Domaine d'application.....	11
4) Conclusion.....	11
Chapitre 2 : PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINTS.....	12
Introduction.....	13
1) Soudage par points.....	13
1.1 Définition.....	13
1.2 Principe du Procédé.....	14
1.3 Constitution d'une machine soudée par points.....	16
2) Paramètres du Procédé.....	16
3) Mécanisme de formation de la soudure.....	20
4) Point Soudé.....	22
5) Soudabilité des métaux.....	25
6) Soudage des aciers inoxydables.....	26
7) Conclusion.....	27

Chapitre 3 : ETUDE EXPERIMENTAL.....	28
Introduction.....	29
1) Matériau d'étude 304L.....	29
1.1 <i>Historique des inox</i>	29
1.2 <i>Fabrication</i>	30
1.3 <i>Principales Familles</i>	30
1.4 <i>Caractéristiques chimiques et physiques</i>	31
1.5 <i>Caractérisation mécanique</i>	31
2) Choix du paramètre de soudage par point pour 304L.....	35
3) Différents types des assemblages réalisés	35
3.1 <i>Caractéristique de soudeuse par point TECNA CE 800XN</i>	38
3.2 <i>Description de la machine</i>	39
4) Essais de traction en cisaillement.....	39
5) Conclusion.....	39
Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	40
Introduction.....	41
1) Effets des paramètres de soudage sur la géométrie des points de soudures.....	41
2) Mécanismes de rupture	44
3) Facteurs principale qui influent sur mécanisme de la rupture.....	47
4) Répartition de la charge de la traction dans chaque type d'arrangement.....	48
5) Classification des types des arrangements sur le plan résistance a la rupture.....	50
Conclusion & perspectives	57
Bibliographie.....	58

Introduction

Le soudage par points est le procédé de soudage par résistance le plus connu dans différentes industries : automobile, mécano soudé, assemblages métalliques. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, efficace, peu polluant, ne nécessite pas de matériau d'apport et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les assemblages métalliques. Le bon matériau pour ce type de soudage est les aciers inoxydables 304L et 430 (l'industrie alimentaire) avec un compromis intéressant entre résistance et masse volumique, un coût de fabrication raisonnable et une bonne aptitude au soudage par points.

Dans cette optique, il est envisageable de réduire l'épaisseur des tôles utilisées si elles possèdent des propriétés mécaniques plus élevées, afin de garantir le comportement mécanique de la structure. Néanmoins, la tenue mécanique de l'assemblage final dépend non seulement des propriétés mécaniques intrinsèques des tôles, mais aussi de celles des liaisons soudées, par lesquelles transitent les efforts. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de prévoir la tenue mécanique des points soudés par résistance.

La soudabilité des aciers austénitiques (304 L) par points et le comportement mécanique des points soudés présente à ce jour un champ d'investigation malgré a été largement étudiée depuis plusieurs décennies.

L'objectif de ce travail est d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement des assemblages soudés par points sous l'effet de l'évolution de l'intensité de courant de soudage et la variation de la répartition des points de soudure, dont le mode de sollicitation classiquement utilisé dans l'industrie est la traction cisaillement.

En résumé le manuscrit est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à la présentation des procédés de soudage et spécialement le soudage par résistance.

Le deuxième chapitre introduit les notions générales relatives au procédé de soudage par résistance par points et aux aciers inoxydables de type 304 L.

Le troisième chapitre décrit l'étude expérimentale conduite sur l'acier inoxydable 304L. Les quatre type d'arrangement sont réalisés par recouvrement et sollicités en traction cisaillement, dans le but d'évaluer les caractéristiques géométriques et mécaniques (charge de rupture) des assemblages.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus. Une discussion sur l'augmentation de l'intensité du courant de soudage et l'arrangement des points de soudure étudiés est menée afin de comprendre globalement la tenue mécanique des assemblages soudés par points pour l'acier inoxydables 304 L.

Le mémoire est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LE SOUDAGE

1. Soudage

1.1 Généralités

La soudure est le résultat de l'opération de soudage. C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre avec ou sans emploi d'un élément d'apport.

En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature,
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes.

1.2 Principe de soudage

L'opération de soudage requiert:

Source de chaleur:

- ✓ Energie thermochimique (combustion gazeuse)
- ✓ Energie Electrothermique (arc électrique, résistance électrique)
- ✓ Energie Mécanique (friction, explosion, émission des ondes ultrasonores)
- ✓ Energie focalisée (électrique -bombardement électronique-, lumineuse -laser-)

Protection du bain (métal liquide) contre l'oxydation et les pollutions atmosphériques:

- ✓ Solide
- ✓ Gazeuse
- ✓ Vide

Apport ou non de métal extérieur. [8]

1.3 Zones de la soudure

La soudure comporte plusieurs zones :

La Zone Fondue (ZF); la Zone Affectée Thermiquement (ZAT);

La Zone de Liaison(ZL); le Métal de Base (MB) (zone non affectée).

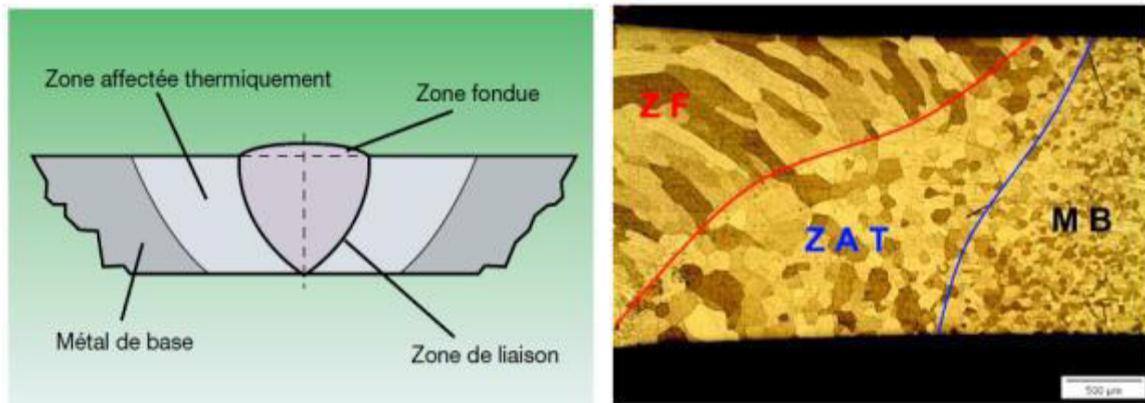


Figure1-1 : Différentes zones d'un joint soudé

1.4 Choix du procédé de soudage

Quelques facteurs pour le choix d'un procédé de soudage:

- Disponibilité de l'équipement: La capacité et l'état du matériel utilisé pour le soudage.
- La répétitivité de l'opération: Combien de soudures seront nécessaires pour terminer le travail, et sont-ils toutes les mêmes?
- La qualité de la soudure: Sur un immeuble, pour réparer une pièce d'équipement, ou d'adhérer à un pipeline?
- Lieu de travail : Dans un atelier ou sur un chantier à distance?
- Matières à souder et ses caractéristiques métallurgiques: Les parties sont fabriquées à partir d'un métal ou d'un alliage de type exotique?
- Apparence du produit fini: Une soudure seulement pour tester une idée, ou sera une structure permanente?

- Taille des pièces à assembler: Les parties sont petites, grandes, ou de tailles différentes, et peuvent-elles déplacer ou doivent-elles souder sur place?
- Compétences et l'expérience des soudeurs: Les soudeurs ont la capacité de faire le travail? [8]

1.5 Classification des procédés de soudage

La nature de l'énergie de chauffage est un moyen commode pour classer les procédés de soudage afin de faciliter leur mémorisation.

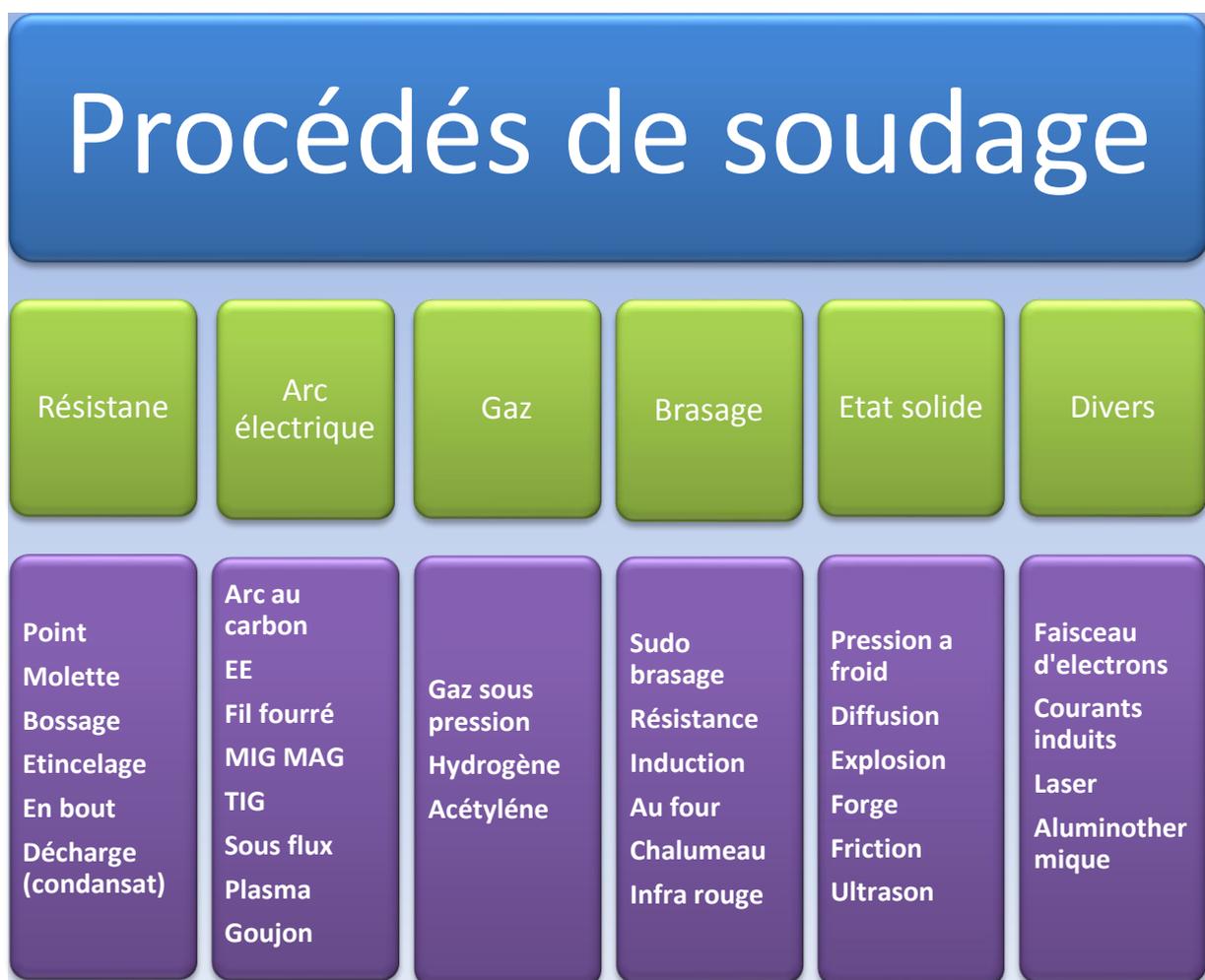


Figure 1-2 Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie utilisée. [8]

1.6 Dénominations et références

La norme ISO 857 définit les procédés de soudage. La norme ISO 4063 définit la nomenclature et la numérotation des procédés (tableau 1-1). On retrouve tous ces éléments sur les dessins (norme ISO 2553) ou les qualifications des modes opératoires de soudage (QMOS) (La norme EN 288). [13]

Procédé	ISO 4063	AWS A3-0
Soudage Oxyacétylénique	311	OXW
Soudage à l'arc à l'électrode enrobée	111	SMAW
Soudage à l'arc submergé	114	SAW
Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible (MAG)	135	GMAW
Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible (MIG)	131	GMAW
Soudage fil fourré sans gaz	114	FCAW
Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG)	141	GTAW
Soudage plasma	15	PAW
Soudage par résistance par point	21	RSW
Soudage par friction-malaxage	42	FSW
Soudage par faisceau d'électrodes	76	EBW

Tableau 1-1 : dénomination des procédés de soudage [13]

1.7 Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage :

- 2 Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...)
- 3 Il répond à des sollicitations élevées.
- 4 Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques), il garantit l'étanchéité de la pièce soudée (ex. : soudure continue de type molette). [12]

2. Soudage par résistance

2.1 Définition du procédé

Le soudage par résistance est un procédé sans métal d'apport qui utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre l'ensemble, pièces électrodes, est traversé par un courant de soudage, sous une faible tension, qui provoque une forte élévation de la température par effet de joule. Dans le cas de surfaces planes, un noyau de matière en fusion est créé à la jointure des pièces.

2.2 Procédé de soudage par résistance

Les procédés de soudage par résistance sont les suivants :

- Le soudage **par bossages** ou protubérances, le soudage de composants annulaires entre dans ce procédé, dans ce cas il est étanche.
- Le soudage **à la molette** est une soudure par recouvrement continue et étanche.
- Le soudage **par points** donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue [9].

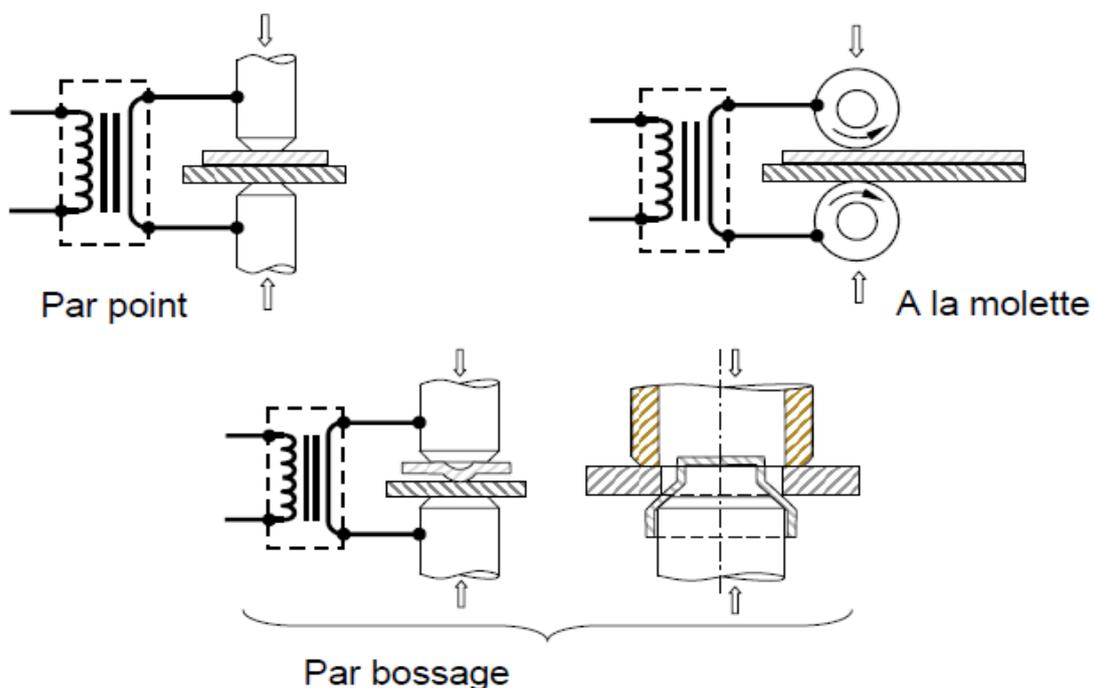


Figure 1.3 : Principaux procédés de soudage par résistance

2.3 Paramètre de soudage par résistance

Les paramètres sont unis entre les procédés de la soudure par résistance mentionnés d'entre eux ou plus particulièrement :

- L'intensité de soudage
- Diamètre de la face active de l'électrode
- Diamètre de l'électrode
- L'effort sur électrodes.
- Le temps de soudage
- Forme de l'électrode
- Course entre les électrodes
- Le temps de forgeage

Transformateur :

- Le raccordement au réseau des machines à souder se fait en général par l'intermédiaire d'un transformateur qui :
- Abaisse la tension
- Augmente l'intensité.
- I pouvant être Grand (milliers d'ampères)
- N : nombre de spires faible pour éviter apparition arc électrique (quelques volts)

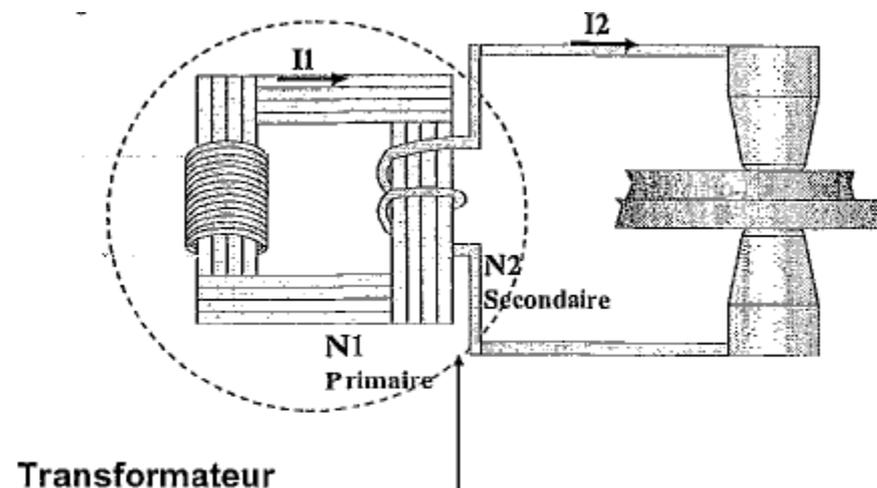


Figure 1.4 : Transformateur de la machine de soudage par résistance

L'intensité est fonction de :

- Epaisseurs et surfaces de contacts
- Nature des matériaux
- Effort de serrage

L'effort est essentiellement fonction :

- Nature des matériaux (épaisseur)
- Caractéristiques mécaniques
- Tolérance d'emboutissage [10]

2.4 Les Contrôles de soudage par résistance**a) Contrôles non destructifs (Non-Exhaustif)**

Les contrôles visuels :

- Etat du composant : bourrelet de soudure, zone affectée thermiquement, projections
autre contrôles non-destructif :

- Dimensionnel
- Contrôles par ressuage (étanchéité)
- Contrôle par chute de pression
- Contrôle d'étanchéité à l'hélium
- Diélectrique pour les connecteurs de puissance.

b) Les contrôles destructifs (Non-Exhaustif)

- Coupe macrographique
- Test d'arrachement (déboutonnage) ou de cisaillement
- Test de résistance mécanique par d'éclatement à l'eau
- Filiation de dureté [11].

2.5 Les inconvénients du procédé de soudage par résistance

- Assemblage par recouvrement uniquement.
- Epaisseur soudée limitée a la puissance de la machine.
- Difficulté de contrôle de la qualité des points soudés.

3. Domaine d'application de soudage

Le soudage est un élément clé dans le domaine industriel. En raison de l'importance de l'industrialisme, il existe dans tous les aspects de la vie. La figure 1-5 porte les différentes industries qui utilisent le soudage comme un facteur principal pour la production.



Figure 1-5 : Exemples d'application de soudage. (a) industrie automobiles, (b) industrie aéronautiques, (c) transport terrestre, (d) industries alimentaire, (e) soudage des pipelines et canalisations, (f) domaine de nucléaire.

Conclusion

La raison de la prédominance du soudage en termes d'assemblage dans diverses industries dû à sa diversité en termes de procédé de soudage.

CHAPITRE 2

PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINTS

Introduction

La première technique du soudage par résistance électrique était le soudage par points inventée par Pr. Elihu Thomson en 1877. Puis, la première machine de soudage a été construite et brevetée en 1885-[MES99]. Les raisons pour lesquelles le soudage par points est largement répandu dans l'industriel automobile sont le faible coût de fabrication par rapport à la qualité de l'assemblage obtenu, et l'automatisation du procédé. Environ 3000- 4000 points soudés par ce procédé se trouvent dans une structure caisse en blanc-(NAT92) [4].

Le soudage par points est le procédé le plus connu. On l'utilise pour souder des joints de recouvrement des tôles minces à l'aide de l'effet de Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

1. Le Soudage par points

1.1. Définition

Dans le cas du soudage par points, les électrodes (en cuivre) ne peuvent effectuer qu'un mouvement vertical (pas de déplacement horizontal) sans métal d'apport ou protection (atmosphérique ou solide) dit autogène. Les pièces à souder sont superposées, l'ensemble pièce/électrode est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes. Le résultat du soudage est donc un point de soudure circulaire.

Désignation

- **Française** : SP (Soudage par Points)
- **American**: RSW (Resistance Spot Welding)
- **Numérique** : 21 [13]

Loi de joule :

Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W = R \times I^2 \times t \quad (1)$$

W : (joule), R : (Ohm), I : (ampère), t : (seconde).

La résistivité(ρ) :

C'est la caractérisation d'un matériau donné à s'opposer au passage du courant électrique. Elle permet de calculer la résistance des matériaux.

$$R = \rho \left(\frac{L}{S} \right) \quad (2)$$

R: (Ohm), ρ : (A/m), L: (m), S: (m²)

La résistance d'un métal augmente avec sa température :

$$R(T_2) = R(T_1) \times [1 + \alpha (T_2 - T_1)] \quad (3)$$

1.2 Principe du Procédé :

Le principe du soudage par points schématisé sur la Fig. 2-1 illustre les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est en suite traversé par un courant de forte intensité qui va créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles.

Un cycle de soudage schématisé sur la Fig.2.1 se décompose en trois phases principales :

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

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

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

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

Le maintien : cette phase a pour but de solidifier le noyau et la ZAT. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. Les pièces sont maintenues par un effort, qui a généralement la même magnitude que celui de soudage. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. La durée du temps de maintien est normalement la même que celle du soudage. En fin d'un cycle, c'est la remontée de l'électrode supérieure. L'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à un nouveau soudage par point [4].

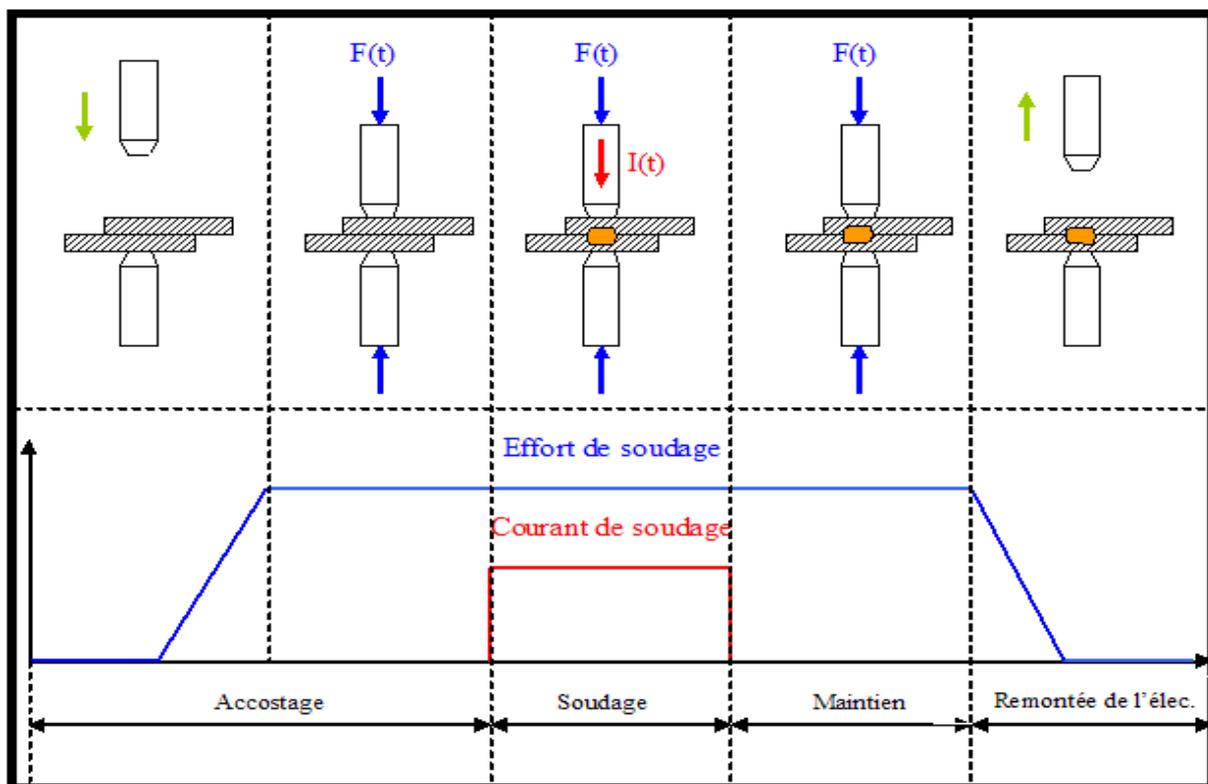


Fig.2-1 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point

1.3 Constitution d'une machine de soudage par points

- Un transformateur de courant de soudage (il abaisse la tension, il augmente le courant).
- Un dispositif de pression des électrodes (manuel, pneumatique ou électrique).
- Un dispositif de commande du cycle de soudage (séquenceurs).
- Un circuit de refroidissement. [5]

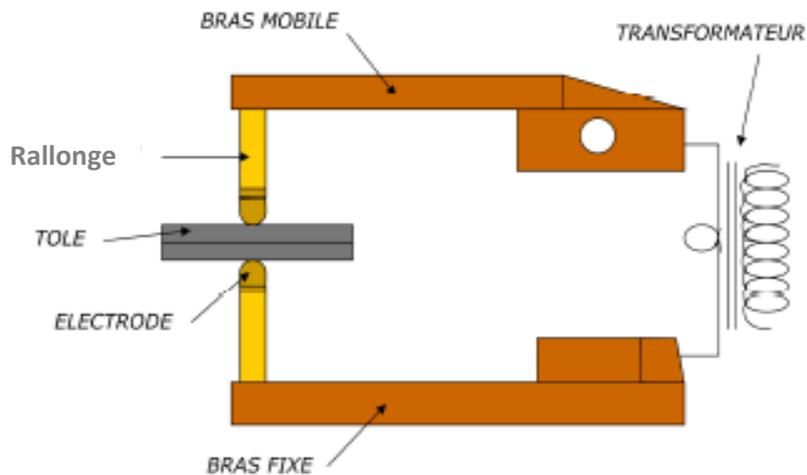


Figure 2.2 : Mécanisme du soudage par point

2. Paramètres du Procédé

Les paramètres de soudage pour le procédé par points sont considérés comme variable adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Les paramètres principaux décrits dans l'ordre de chronologie du procédé sont l'effort de soudage, l'intensité, le temps de soudage, et le temps de maintien.

Effort de soudage : l'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, (Fig. 2-1), mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse.

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

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

Temps de maintien : le temps de maintien est nécessaire à la solidification par l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit d'eau de refroidissement.

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

- Intensité de soudage en kA, sous quelques V, (environ 7 à 10 kA)
- Effort de serrage en daN, (comprise entre 230-600 daN et dépend du comportement mécanique de l'acier)
- Durée d'un cycle, environ 1 seconde. (Sans modification particulière des conditions de soudage, ni pré-, ni post-chauffage)

La détermination de ces paramètres se base préalablement sur la norme française ; [NFA 87-001]/ISO No. 18278/2.

Électrode : Les électrodes sont des éléments essentiels pour ce procédé. Un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la Fig. 1.3. C'est un paramètre externe, qui influe directement sur le domaine de soudabilité car il gouverne la taille du contact aux interfaces par son profil de face active. L'électrode joue trois rôles principaux :

- Mécanique : c'est d'abord pendant la phase de serrage pour assurer le contact électrique entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur définie pour le soudage. Pendant le soudage et le maintien, l'électrode sert comme une stabilisatrice pour maintenir la zone fondue pendant le chauffage et le refroidissement. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit avoir une bonne tenue mécanique à chaud.
- Thermique : l'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue

n'atteigne cette interface. Le matériau de l'électrode doit avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique.

➤ Électrique : la forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique. L'alliage de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr, et Cu-Cr-Zr) est très répandu pour le matériau de l'électrode grâce à ses performances en tenue mécanique à chaud et la bonne conductivité électrique et thermique.

L'électrode en alliage de cuivre à dispersoïde-(Cu-Al₂O₃) avec une meilleure tenue mécanique à chaud est également commercialisée, mais avec un prix plus élevé.

La géométrie de l'électrode est variable selon les applications. Le profil de face active et le diamètre de l'électrode influent directement sur le procédé. En ce qui concerne les paramètres du domaine de soudabilité, on peut constater que plus le diamètre de la face active est grand, plus le courant et l'effet Joule sont répartis en surface à cause de l'augmentation de la taille du contact. Au contraire, l'utilisation de diamètre d'électrode trop petit ne permet d'obtenir la taille du noyau suffisamment large, et par conséquent entraîne un faible tenu mécanique du point.

En effet, pour établir un domaine de soudabilité, la sélection du diamètre d'électrode, à priori, conseillée par la norme est cohérence avec l'épaisseur des tôles à souder. [5]

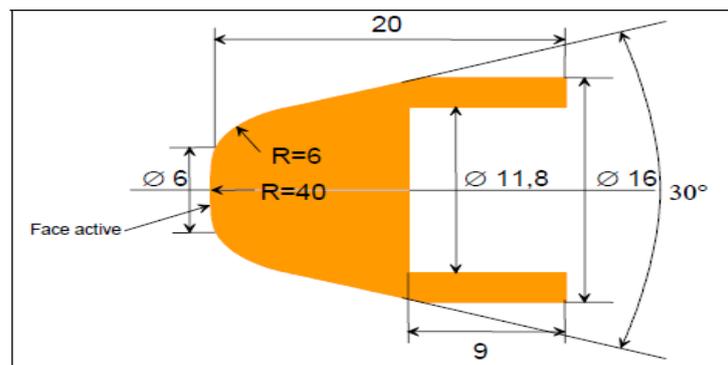


Fig. 2.3: exemple d'électrode de forme tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm.

Le choix de diamètre de la face active d'électrode dépend directement à l'épaisseur de tôle qui sert à assembler par la formule suivant :

$$d : \star = 2 e + 3 \text{ (mm)} \quad (5)$$

La géométrie de l'électrode est variable selon l'application. Le profil de face active et le diamètre de l'électrode influent directement sur le procédé. Les opérations de soudage dans ce travail sont effectués par l'électrode double courbure grain déporté comme illustre la figure 2-4.

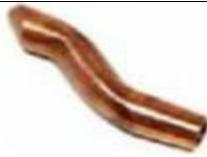
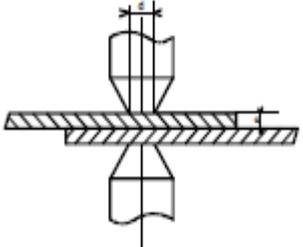
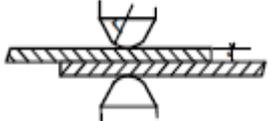
			
Electrode droit plate	droit, grain centré	droit, grain déporté	Electrode a rotule
			
Electrode déporté Grain déporté	Electrode double courbure plate	Double courbure grain centré	Double courbure grain déporté

Figure 2.4 : Différents formes des électrodes de la soudure par points

Tableau 2.1 : Paramètres de soudage par point [3]

Epaisseur e la plus faible (mm)	Diamètre électrode d (mm)	Intensité de soudage (A)	Temps de soudage (s)	Effort de forgeage (daN)	
0,5	5	7700	0,10		 Soudage d'aciers doux
1	6	8800	0,15		
1,5	6,5	9800	0,23		
2	8	11800	0,31		
3	11	14900	0,80	700	
4	13	18000	0,90	1350	
5	15	20800	1,37	2000	
6	16	24000	1,82	3100	
7	18	27800	2,50	3400	
8	19	31800	3,15	4200	
9	20	36000	4	5000	Soudage d'aciers inoxydables
10	21	40000	5	5900	
0,5	4	4000	0,06		
1	5	7800	0,10		
1,5	6,5	10700	0,16		
2	8	14000	0,24		
3	9,5	16500	0,34		 Soudage d'alliages d'aluminium
0,5	r = 50	18000	0,08		
1	75	30700	0,14		
1,5	75	35000	0,27		
2	100	42000	0,28		
3	100	63000	0,30		

3. Mécanisme de formation de la soudure

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

$$Q = \int R I^2 dt$$

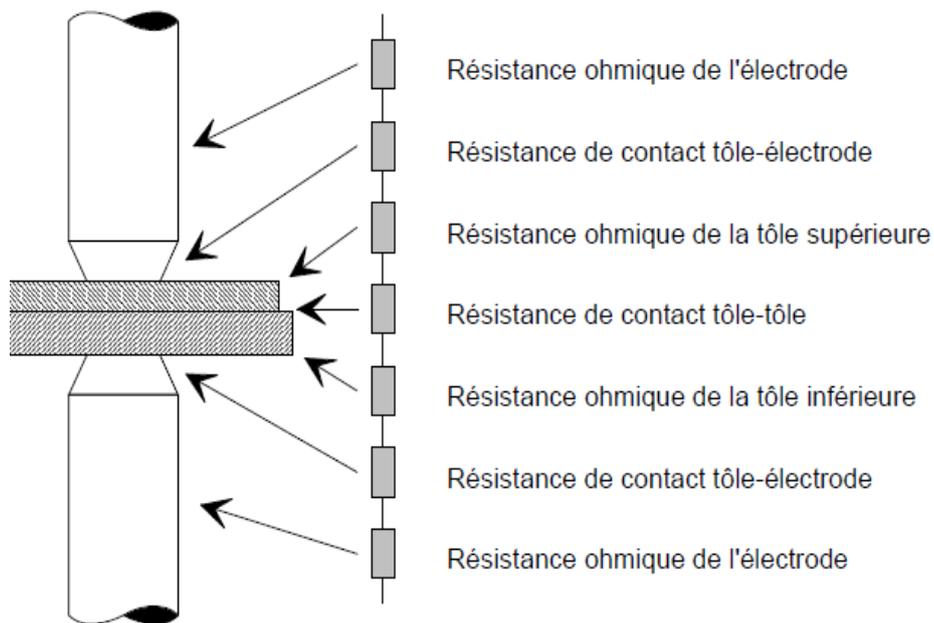


Figure2-5 : Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles [6]

Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée. Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes. Dans le cas de produits revêtus, il est possible d'utiliser le même modèle que celui de la figure 2-6. (les résistances des revêtements étant alors incluses dans les résistances de contact), ou de compléter le modèle en ajoutant quatre résistances ohmiques du revêtement.

Ces diverses résistances, qui ont une influence directe sur les dégagements de chaleur, donc sur la constitution du noyau fondu, ne sont pas constantes au cours d'un cycle de soudage.

Elles dépendent en effet fortement de la température :

- les résistances ohmiques augmentent en fonction de la température,
- les résistances de contact diminuent lorsque la température augmente. En effet, les contacts étant initialement "ponctuels" plutôt que surfaciques, ces résistances dépendent directement, à pression donnée, des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact et de leur état de surface : la dureté des matériaux diminuant avec l'échauffement, les surfaces de contact augmentent. Il y a donc une diminution des résistances de contact avec la température.

En début de soudage, les dégagements de chaleur les plus importants sont situés au niveau des différentes discontinuités de l'assemblage :

- à l'interface tôle-tôle, cette chaleur sert à faire fondre le revêtement et l'acier afin de former le noyau fondu,
- aux interfaces électrode - tôle, cette chaleur - qui ne contribue pas à la formation de la soudure - est en partie évacuée par les électrodes, qui, outre une bonne conductivité électrique, doit par conséquent avoir une conductivité thermique élevée.

La figure 2-6 représente les évolutions des différentes résistances au cours d'un cycle de soudage dans le cas de tôles non revêtues. [6]

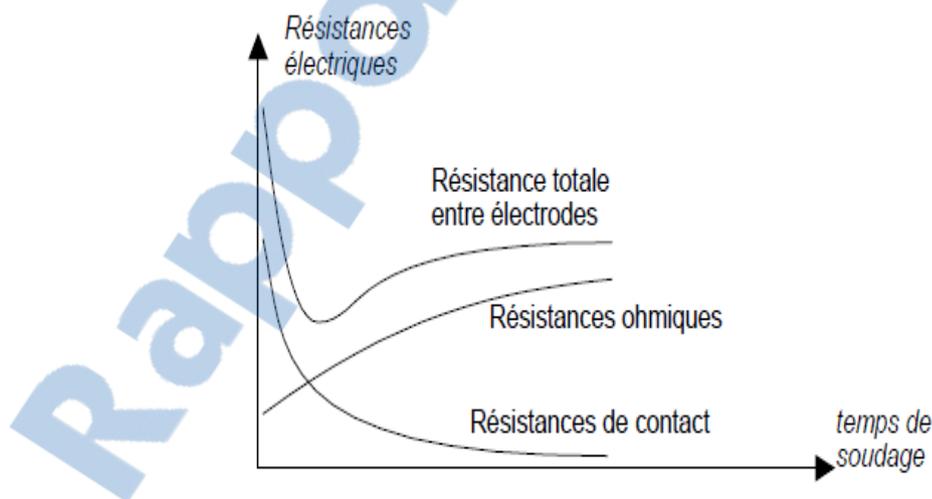


Figure 2.6 : Évolution des résistances en cours de soudage sur tôles nues

L'analyse des évolutions de ces résistances permet de mieux comprendre la cinétique de formation du point : l'échauffement est réalisé en premier lieu au niveau des interfaces, et l'électrode évacue les calories créées à l'interface tôle-électrode. Le noyau fondu s'initie à l'interface tôle-tôle et ne progresse que grâce aux résistances ohmiques des tôles. [6]

4. Point Soudé

a) Géométrie

La figure 2-7 présente la géométrie d'un point soudé :

- 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.

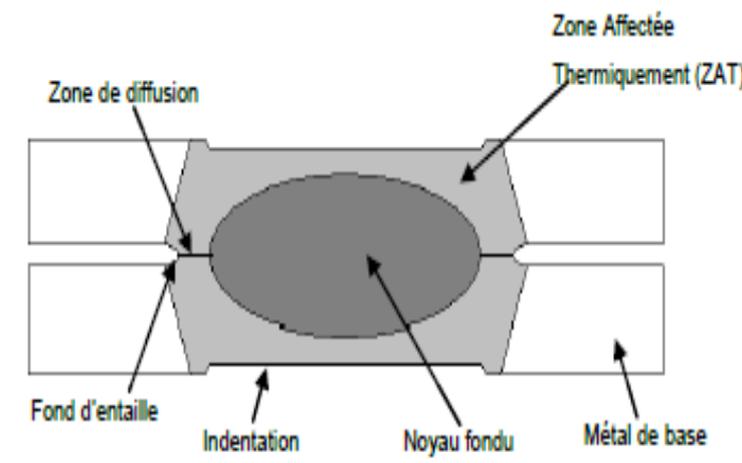


Figure 2.7 : Schéma d'un point soudé selon une coupe. [12]

Globalement, trois zones principales peuvent être distinguées. La première est le **noyau fondu**, zone où l'acier est passé à l'état liquide puis s'est refroidi très rapidement jusqu'à la température ambiante. La deuxième est la zone dite **affectée thermiquement (ZAT)**, c.à.d. la zone où la microstructure du métal de base a été modifiée par le cycle thermique imposé par le procédé de soudage, on considère en général que cette zone est celle où l'acier a vu des température allant jusqu'à 600 C^0 . Enfin la dernière zone est celle du **métal de base (MB)** proprement dit où la microstructure est inchangée. [3]

b) Microstructures

L'opération de soudage par point se caractérise par un cycle thermique très modifié profondément la microstructure du métal de base au voisinage du point soudé. Le métal subit un chauffage à des vitesses de l'ordre du millier de degrés Celsius par seconde jusqu'à une température pouvant aller au-delà de la température de fusion. Il s'en suit immédiatement un refroidissement très rapide dont la vitesse dépend des paramètres de soudage. Un cycle de soudage par point complet est typiquement effectué en moins d'une seconde. Au niveau microstructural, on distingue plusieurs zones, illustré schématiquement à la figure 2.8

- La zone associée au métal de base MB : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600°C environ si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.
- La zone subcritique SCZAT : zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600°C ET 720°C (A_{c1}), on n'observera globalement aucun effet sur la taille des grains mais certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial au chauffage, une partie du carbone peut être remis en solution. Au refroidissement, on peut observer de la précipitation-coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, des phénomènes de revenu (de la martensite du métal de base en fonction de la vitesse de refroidissement).
- La zone intercritique ICZAT : zone où la température est arrivée entre A_{c1} et A_{c3} l'austénitisation partielle (coexistence de la ferrite α et de l'austénite γ) conduit à des modifications importantes de la microstructure.
- La zone à grain fins CFZAT : zone de température entre 906°C (A_{c3}) et 1100°C environ d'après le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est totale dans cette zone. Dans le cas du soudage, A_{c3} peut être décalé par la rapidité du cycle thermique au chauffage. La nouvelle structure austénitique, non homogène et globalement fine, remplace la microstructure initiale, suite au refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainitomartensitique fine avec éventuellement quelques hétérogénéités.

- La zone à grande grains **GGZAT** : zone entre 1100°C environ et la température de fusion, on assiste à une forte croissance du grain austénitique qui confère à cette zone une forte trempabilité. La microstructure obtenue après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.
- Zone fondu **ZF** : outre une fine zone de liaison (difficilement observable) constitué par la zone semi-solide. La dernière zone est la zone fondue, ou la température a dépassé la température de liquidus, la microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau. On peut observer de la ségrégation inter dendritique.
- Il apparait clairement que les profondes modifications de la microstructure du métal de base autour du point soudé peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la tenue mécanique du point. [6]

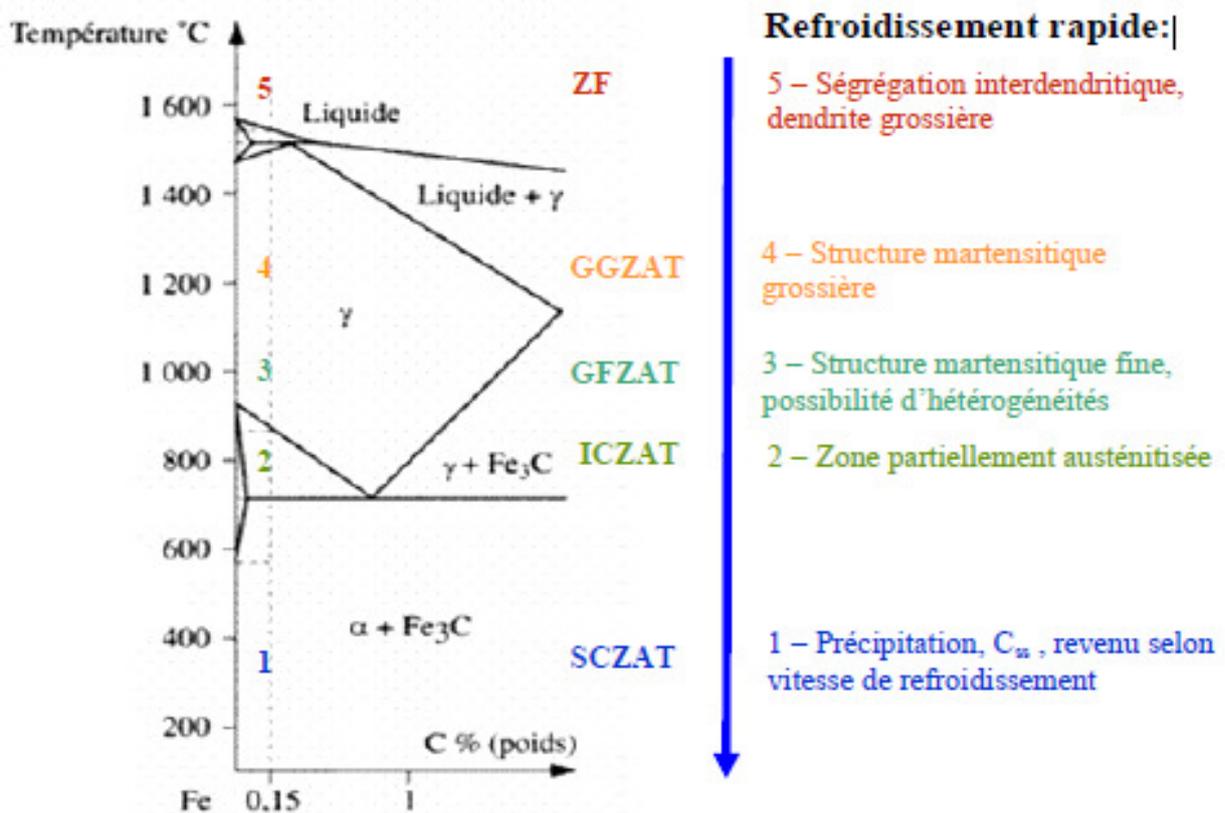


Figure 2.8 : Microstructures générées par l'opération de soudage.

5. Soudabilité des métaux

Tous les métaux sont théoriquement soudable, mais avec des difficultés plus ou moins surmontables pour la mise en œuvre de leur soudage par résistance. La soudabilité peut s'envisager en autogène (soudage entre eux, de deux métaux identiques). Elle peut être éventuellement hétérogène (soudobrasage ou soudage de métaux différents).

Les grandes difficultés à surmonter peuvent être :

- Des constructions cristallines incompatibles ou thermiquement fragiles
- Des points de fusion trop éloignés
- Des intervalles de changement d'écart trop brefs
- Une sensibilité trop grande à l'oxydation

Pour assurer la qualité ne pas négliger de vérifier si les conditions de soudabilité sont respectées.

- **Soudabilité opératoire** : Elle s'appuie sur un ensemble de condition qui permet d'assurer Sans Problème l'opération de soudage : Fiabilité : mécanique, électrique, thermique des machines. Matériau de qualité suivie : résistivité, conductivité. Aspect de surface (calamine, rouille)

La notion de **COEFFICIENT D'APTITUDE AU SOUDAGE PAR RESISTANCE** aide à définir a priori la soudabilité opératoire des matériaux

$$\text{C. A. S. P. R} = \frac{\text{Resistivité}}{\text{temps de fusion} \times \text{conductivité thermique}} \quad [3]$$

L'aptitude au soudage par résistance croit avec la valeur du C.A.S.P.R

L'aluminium = 0.76 Nikel = 4.66 Acier doux = 6.35 Inox = 144

-**Soudabilité métallurgique** : Malgré l'obtention de la liaison, l'assemblage peut ne pas donner satisfaction pour des raisons métallurgique .Compte tenu des matériaux en présence et du cycle thermique »assemblage peut être faible.

6. Soudage des aciers inoxydables

A- Les structures ferritiques :

Identification par leurs propriétés magnétiques, sont thermiquement fragile donc difficilement soudables.

B- Les structurés austénitiques :

Sont amagnétique et très stables en régime thermique varié. Les inoxydables de cette catégorie sont considérés comme bien soudable.

C- Les réfractaires :

Magnétiques ou amagnétique, certains sont soudables précautions particulières, d'autres exigent des traitements thermiques plus ou moins applicables sur machine.

Le tableau 2-2 contient les paramètres de soudage par points de l'acier inoxydable 304L. Le tableau 2-3 contient l'évaluation de l'assemblage de l'inox avec d'autres métaux et l'évaluation de chaque assemblage [D'après W. Stanley]. [2]

Tableau 2.2 : Paramètres de soudage par points de l'acier inoxydable 304L [12]
(Le temps de soudage en cycle)

Ep (mm)	Ø Face active Electrode (mm)	Effort daN	Temps de soudage	Courant de Soudage (kA)	Ø du noyau (mm)	Temps de forgeage
0.5	3.2 à 4	180 à 230	2 à 3	4 à 5	3 à 4	8
0.6	4 à 4.2	190 à 240	4 à 5	4.5 à 5.2	3.5 à 4	10
0.8	4.5 à 4.8	250 à 300	5 à 6	5.5 à 6	4	10
1	5	300 à 400	7	6.8 à 7	4.8	16
1.2	5.4	450 à 500	8 à 9	8	5	20
1.5	6 à 6.2	500 à 600	10	9 à 10	6	22
1.8	6.7 à 6.9	850	11	12	7	24
2	7 à 7.2	900	12	14	8	25
2.4	7.2 à 7.5	1000	13	15	9	25
2.5	7.5 à 8	1200	14	16	6	30
3	9	1500	16	17.5 à 18	7	40

Tableau 2.3 compatibilité de soudage des métaux usuels [2]

METAUX	ALU.	INOX.	ZINC	GALVA.	ACIER	LAITON	CUIVRE	PLOMB	NICKEL	FER BLANC	BRONZE PHOSP.
ALU.	2	5	3	3	4	4	5	5	4	3	3
INOX	6	1	6	2	1	5	5	6	3	2	4
ZINC	3	6	3	3	6	5	5	3	6	3	4
GALVA.	3	2	3	2	2	4	5	4	3	2	4
ACIER	4	1	6	2	1	4	5	5	3	2	3
LAITON	4	5	5	4	4	3	4	6	3	4	3
CUIVRE	5	5	5	5	5	4	6	5	4	5	3
PLOMB	5	6	3	4	5	6	5	3	5	6	5
NICKEL	4	3	6	3	3	3	4	5	1	3	3
FER BLANC	3	2	3	2	2	4	5	6	3	3	4
BRONZE PHOSP.	3	4	4	4	3	3	3	5	3	4	2

1 : Excellent - 2 : Bon - 3 : Passable - 4 : Pauvre - 5 : Très pauvre - 6 : Impraticable

Remarque :

- La surface active des électrodes sera polie aussi que possible.
- L'arête vive de la section tronconique d'électrode sera supprimée, rayon de 0.5mm.
- Ces réglages sont compatibles pour des pointes d'électrodes en cuivre chrome Zirconium : mais pour des efforts supérieurs à 500 daN on utilisera au mieux des pointes d'électrodes en alliage cuivre tungstène.
- Pour des épaisseurs de 3mm et plus on préconise le soudage par impulsions. [7]

Conclusion

Le procédé de soudage par points est le procédé le plus connu parmi aux autre procédés de soudage par résistance dans les industries légères et lourdes. Ceci est dû à sa facilité d'utilisation et les caractéristique mécanique qui peu obtenue par ce dernier.

CHAPITRE 3

ETUDE

EXPERIMENTALE

Introduction

Les opérations de soudage s'effectuent par une machine TECNA FIX- CE- .Des tôles de 2 mm d'épaisseur, l'acier inoxydable 304L (les informations de l'acier est donnée dans tableaux 1, 2 et 3). Sont soudées avec des électrodes de 7 mm de diamètre face active et un effort aux électrodes de 6 bars. Dans un circuit constant qui égale a 11cycles et une intensité variable entre 10-12-15 (kA).

1. Matériau d'étude 304L :

Ce type d'acier connu par trois nominations selon trois normes mondiales comme suit :

EN 10027 (européenne)	Afnor NF A 35573 (France)	AISI (États-Unis)
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18-10	304L

1.1 Historique des inox

L'acier inoxydable, «découvert» entre 1900 et 1915, est donc un acier qui ne rouille pas. Cette propriété est due à la présence d'un film de surface «passif» qui confère à l'acier sa résistance à la corrosion. Ce film, essentiellement composé d'oxyde de chrome est le produit de la réaction entre l'oxygène de l'air et le chrome contenu dans l'acier. Le chrome (Cr) est donc l'élément d'alliage le plus important dans la production d'aciers inoxydables.

Un minimum de 10,5% de teneur en chrome (en poids) est nécessaire pour fiabiliser la formation de la couche superficielle d'oxyde de chrome de protection et d'auto réparation. Plus la teneur en chrome est importante, plus la couche passive résiste.

Si la surface de l'acier inoxydable est travaillée mécaniquement ou endommagée par accident, la couche passive se reforme automatiquement en présence d'air ou d'eau. A noter que la résistance à la corrosion peut encore être améliorée par l'apport de 2 à 3% de molybdène. D'autres éléments chimiques comme le titane, le niobium et l'azote peuvent également être ajoutés en fonction de l'application [1].

1.2 Fabrication

L'acier inoxydable est obtenu par fusion des différents métaux qui le composent dans un four électrique à 1500°C. On peut également très aisément refondre des ferrailles d'acier inox, ce qui en fait un matériau complètement recyclable. Les blocs coulés sont ensuite laminés sous forme de tôles, de poutres ou de fils.

Des traitements thermiques à haute température (>1000°C) doivent être appliqués pour obtenir des propriétés mécaniques optimales et un aspect de surface impeccable. De nombreux finis de surface sont proposés : mat, brillant, satiné, poli, brossé, suivant l'aspect esthétique souhaité par le client [1].

1.3 Principales Familles :

Austhénique : fer-chrome-nickel, carbone < 0,1%, amagnétique a l'état de livraison. Représente > 65% de l'utilisation d'acier inoxydable, notamment dans les Luminaires (304 et 304L)

Ferritique : fer-chrome, carbone < 0,1%, magnétique.

Martinique : fer-chrome, carbone > 0,1%, magnétique et apte a la trempe.

Duplex : fer-chrome-nickel, structure mixte austhénique-ferritique, magnétique [2].

➤ Application

INOX 304L : Possède les mêmes propriétés que le 304, mais plus faible en carbone (Low carbon).

Non recommandé pour les sites industriels fortement pollués et les zones côtières. Cette nuance est nécessaire uniquement dans le cas de risques de corrosion inter-granulaire a la soudure (p. ex : acides)

➤ Mise en œuvre

Toutes les techniques de mise en forme telles que le pliage, le profilage et l'emboutissage peuvent être utilisées.

De nombreuses techniques d'assemblage sont applicables à l'acier inoxydable: soudage, brasage, assemblage mécanique, collage.

Avec l'acier inox, il est assez aisé d'obtenir des finitions impeccables pour les assemblages (soudures invisibles par exemple).

1.4 Caractéristiques chimiques et physiques

Ces propriétés sont tirées du fiche technique de ce métal

Tableau 3.1 : Composition Chimique de l'acier 304 L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Autre
< 0.03	< 1.00	< 2.00	< 0.045	< 0.015	17.5-19.5	-	8-10	N<0.11

Tableau 3.2 : Propriété Physique de l'acier 304 L

Densité (Kg.m ⁻³)	Résistivité électrique (A/mm)	Chaleur spécifique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Module Elastique (GPa)	Coefficient dilatation				
					100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
7,90	0,73	500	15	200 à 200 °C	16	16.5	17	17.5	18

1.5 Caractérisation mécanique

Des essais de traction réservés pour déterminer les caractéristiques mécaniques de ce matériau, ont été conduits sur une machine de traction 600 KN qui se trouve au niveau de laboratoire de génie civil de l'université Abou Bekr Belkaid (figure 3.1).



Figure 3.1 : Machine 600 KN pour d'essai de traction

L'essai de traction est exécuté sur des éprouvettes plates d'épaisseur « $E = 2 \text{ mm}$ » dont les dimensions sont données par figure 3-2. Trois éprouvettes ont été réalisées pour ce type d'essai comme illustre la figure 3-3.

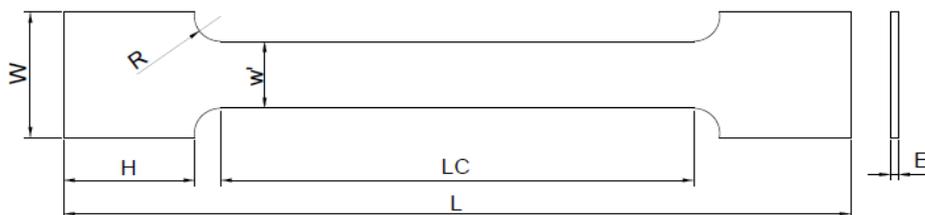


Figure 3.2 : Dimension des éprouvettes de traction



Figure 3.3 : éprouvette pour l'essai de traction en 304 L.

Avec :

W=30 mm (largeur des têtes)

w' = 16 mm (largeur de la section réduit)

L = 180 mm (longueur totale)

Lc =108 mm (longueur calibrée)

E = 2 mm (épaisseur de l'éprouvette)

H = 30 mm (longueur des têtes)

R= 6 mm (rayon)

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements montrés sur la figure 3.4 Les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure 3.5 [3]

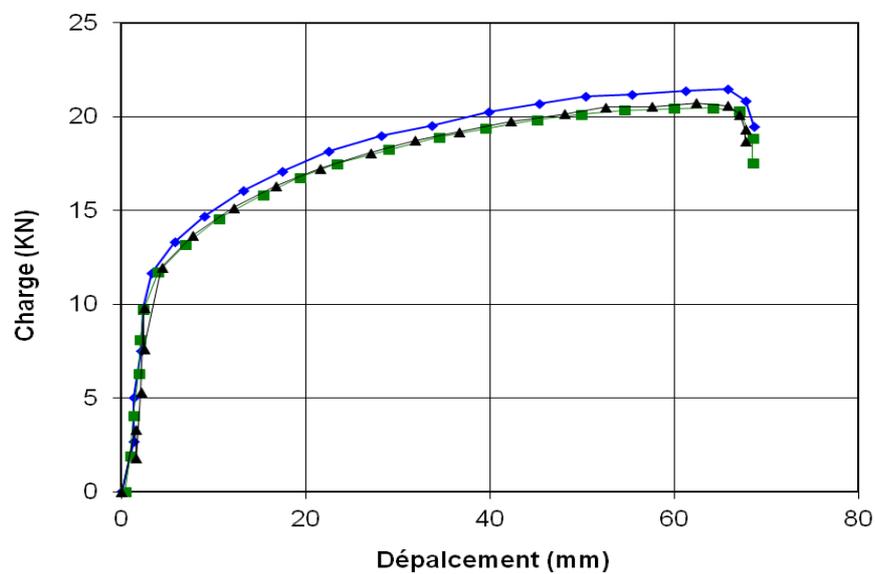


Figure 3.4 : Courbe De Traction Charge / Déplacement

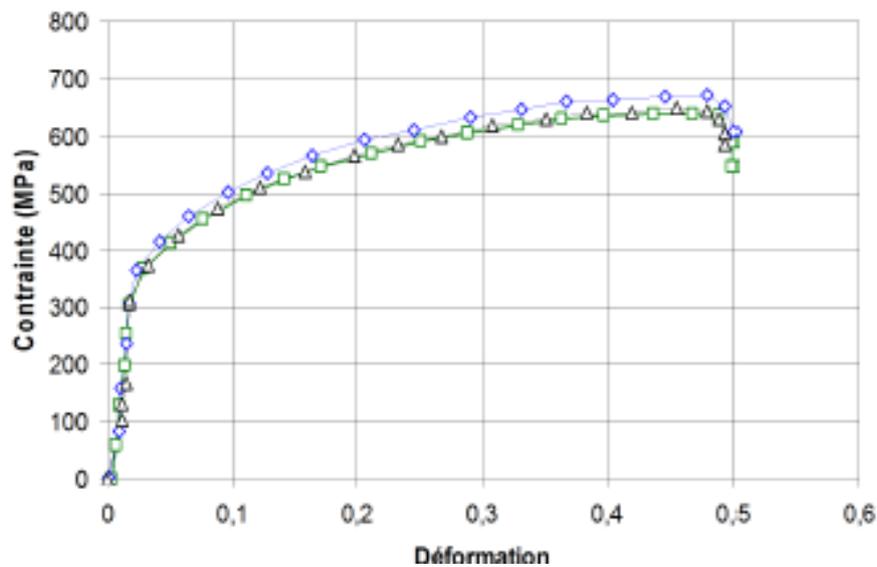


Figure 3.5 : Courbes Conventiennelles Contraintes / Déformations

Le tableau suivant résume les résultats obtenus après les essais de traction pour caractériser le comportement mécanique de cet acier. On remarque que la différence entre les résultats expérimentaux et les résultats du producteur est négligeable.

	E (GPa)	σ_e (MPa)	Rm (MPa)	A %	Dureté HRB
Donnés (producteur)	200	310	520-670	45	80 Max
Résultats Expérimentaux	190	336	655	43.2	60

2. **Choix du paramètre de soudage par point pour 304L**

Les paramètres essentiels du soudage par point est L'effort de serrage F (bar), l'intensité du courant KA et le temps de maintien T (cycle). Il est difficile de donner un tableau de réglage précis des paramètres. Les réglages dépendent directement de l'application est sont généralement déterminée par des essais.

Il existe pour une même application plusieurs réglage possible en fonction de la classe de (point standard, point de haute qualité point pour tenus à la fatigue) il est notamment possible de souder avec une très forte intensité et un temps court soudage rapide ou avec une intensité plus faible et un temps long soudage long.

3. **Différent types des assemblages réalisés :**

Ces résultats ont été obtenus à l'aide de l'assemblage du trois éprouvettes pour chaque valeur de l'intensité du courant, avec un total de neuf éprouvettes pour chaque type d'arrangement. Le nombre total des éprouvettes réalisé est donc trente-six éprouvettes.

Les assemblages réalisés par soudage par point entre les plaques en acier 304L est montré par les Figures 3-6 à 3-9. Ce travail basé sur l'étude de quatre types d'assemblages (**A**, **B**, **C** et **D**) :

- **Type A** : assemblage par quatre points de soudure entre deux tôles par recouvrement arrangé dans le sens parallèle à la charge de traction.
- **Type B** : assemblage par quatre points de soudure entre deux tôles par recouvrement arrangé dans le sens perpendiculaire à la charge de traction.
- **Type C** : assemblage par quatre points de soudure entre deux tôles par recouvrement sous la forme carré.
- **Type D** : assemblage par un seul point de soudure au centre de la surface de contact.

La machine utilisée pour le soudage par point est de type **TECNA CE 800XN SERIES** qui se trouve au niveau de l'entreprise **SOREMEP** dans la zone industriel de willaya de Tlemcen (Figure 3-10). L'effort de serrage et le temps de soudage reste constant pendant le processus expérimentale pour étudier l'effet de l'intensité sur la résistance des arrangements réalisés.

- L'effort de serrage $F = 6$ (bar)
- L'intensité du courant $I = 10, 12$ et 15 KA
- Le temps de maintien $T = 11$ (cycles)

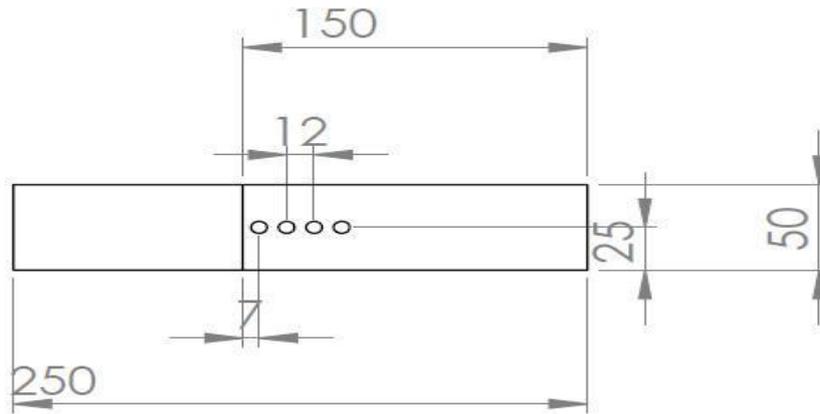


Figure 3-6: assemblage de type A

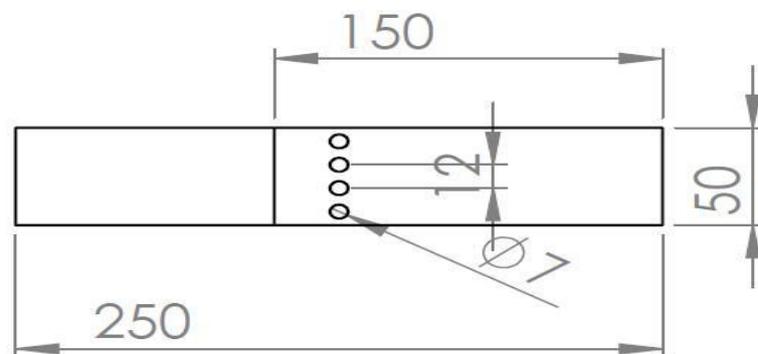


Figure 3-7: assemblage de type B

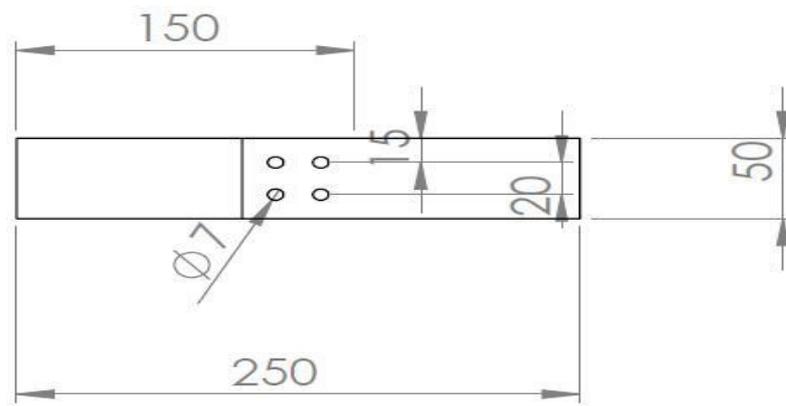


Figure 3-8: assemblage de type C

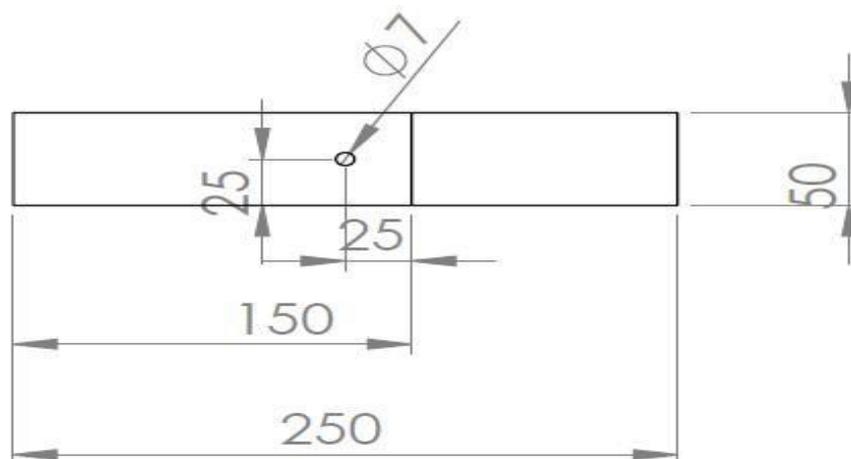


Figure 3-9: assemblage de type D



Figure 3.10 : la machine de soudage par points *TECNA CE 800XN*

3.1 Caractéristique de soudeuse par point *TECNA CE 800XN* :

Technique : par point.

Mode de fonctionnement : Manuelle.

Puissance : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Max : 160000 W} \\ \text{Min : 63000 W} \end{array} \right.$

3.2 Description de la machine :

Dispositif réglable d'anti-rotation. Cylindre de Double-course avec la commande principale. Unité de filtrage comprimée intégrée d'air. Air comprimé débranchant le dispositif. Transformateur, plats, électrode-supports et électrodes refroidis à l'eau. Transformateur avec des enroulements enduits de résine époxyde. Les électrodes expédient les soupapes de commande, l'amortisseur pour l'extrémité de la course et les silencieux de décharge d'air assurant le bruit minimum. Commande électrique à deux étages de pied pour les morceaux de retenue et de soudure seulement si correctement placé. Pré réglementation pour le raccordement électrique de pied de double étape additionnelle pour rappel direct le programme de soudure. Conjoncteur synchrone de thyristor isolé du circuit de l'eau de refroidissement avec le thermostat de protection.

4. Essais de traction en cisaillement

L'essai de traction en cisaillement couramment utilisé pour caractériser le comportement d'un assemblage soudé par points. Cet essai permet de mesurer l'effort nécessaire pour rompre le point soudé dans le mode de sollicitation concerné ainsi que son mode de rupture.

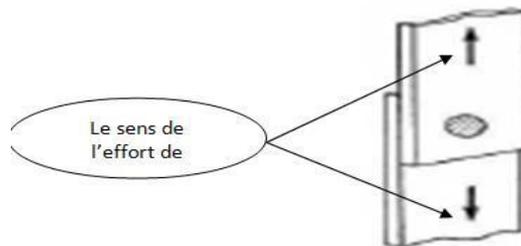


Figure 3.11 : tractions en cisaillement.

Conclusion

Les assemblages réalisés par recouvrement en utilisant le procédé RSW sont destinés aux essais de caractérisation mécanique de cisaillement par traction.

Les éprouvettes à tester sont assemblées subissent des variations de courants, celles-ci influent sur la résistance à la rupture.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 4

RESULTATS

ET

DISCUSSION

Introduction

Parmi les facteurs importants dans le domaine industriel, la compréhension des modes de rupture des points de soudures d'acier à haute résistance. La quantification du comportement et de la Rupture des différentes zones d'un point soudé devra permettre une meilleure compréhension de la soudabilité des aciers inoxydables de haute résistance. Cela est arrivé après des expériences qui ont aidé.

Cette partie, réservée pour étudier:

- Effets des paramètres de soudage sur la géométrie des points de soudures.
- Mécanismes de rupture.
- Facteurs principale qui influent sur mécanisme de la rupture.
- Répartition de la charge de la traction dans chaque type d'arrangement.
- Effets de l'intensité de courant sur le comportement mécanique des assemblages.
- Classification des types des arrangements sur le plan résistance a la rupture.

1) Effets des paramètres de soudage sur la géométrie des points de soudures.

Après la réalisation des différents assemblages par recouvrement par le procédé de soudage par point, des mesures ont été effectuées sur la profondeur et le diamètre du point de soudure (figures 4-1). L'effet des paramètres de soudage a été mis en évidence. La variation de l'intensité de courant de soudage accompagné par la variation de diamètre et profondeur de point de soudure. La figure 4-2 présente la variation de diamètre du point de soudage en fonction de l'élévation de courant (la force et temps de soudage, constants). On constate que le diamètre et la profondeur du point de soudure augmente avec l'augmentation du courant de soudure. Cela montre qu'il y'a plus d'énergie de fusion au niveau de l'électrode et en conséquence du niveau du point de soudure. L'effet du courant pour des valeurs du diamètre est montré par la figure 4-3. La variation du diamètre en fonction de l'intensité est corrélée par une fonction linéaire inscrite sur le graphe.

L'effet des paramètres de soudage sur la profondeur au point de soudure causé par l'électrode a été investigué. Sur le point morphologie du point de soudure on remarque visuellement une large différence des profondeurs au niveau des points de soudure pour les différentes intensités appliquées (tableau 4.1).

Quantitativement, la variation de la profondeur en fonction des paramètres de soudage est donnée par la figure 4-1. La figure 4-2 et 4-3 représente l'évolution de diamètre et la profondeur en fonction du courant de soudage. Une augmentation du courant de soudage permet d'augmenter l'énergie de fusion et en conséquence la profondeur de pénétration du point de soudure.

Tableau 4.1 : Les dimensions de point de soudure (diamètre et profondeur)

EP (mm)	Superpo- -sition (mm)	Electrode ϕ (mm)	Intensité (KA)	Temps Cycle	Effort (Bar)	Diamètre (mm)	Profondeur (mm)
2	50	7	10	11	6	10.5	0.3
			12	11	6	12	0.8
			15	11	6	14	1.4



(a) $I=10$ kA, $T= 11$, $F= 6$

(b) $I=12$ kA, $T= 11$, $F=$

(c) $I=15$ kA, $T= 11$, $F= 6$

Figure 4.1 : Effet du courant du soudage sur la profondeur et le diamètre du point de soudure

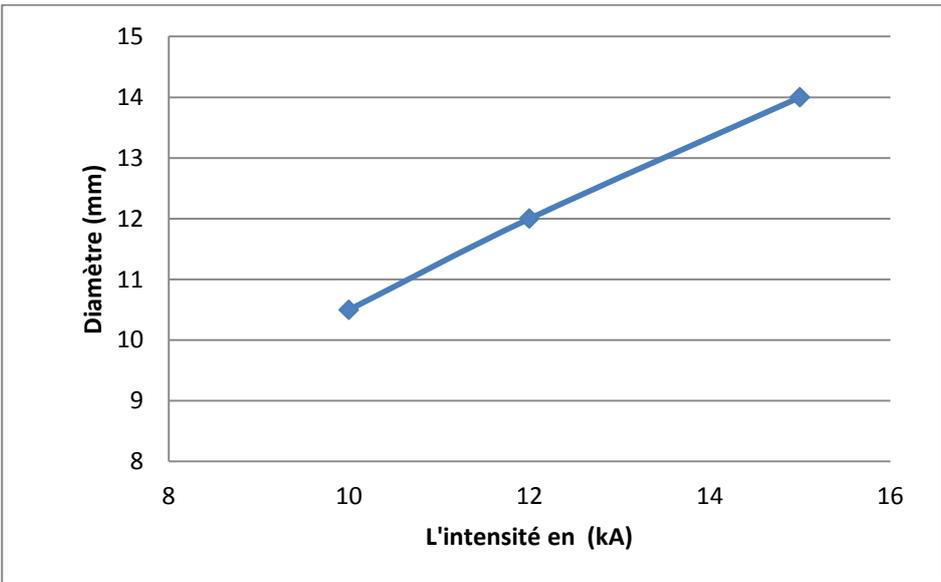


Figure 4.2 : la variation de diamètre de point de soudage en fonction de l'élévation de courant

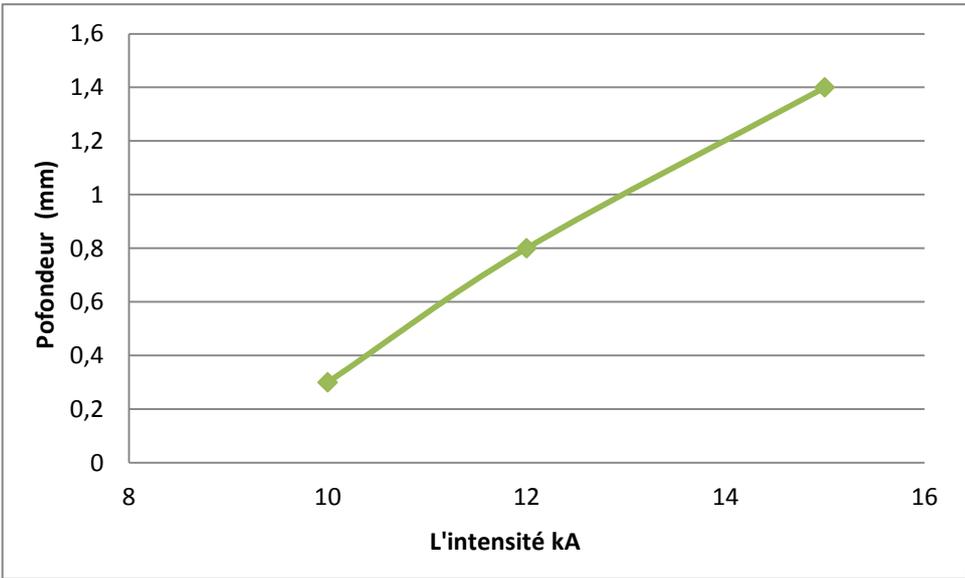


Figure 4.3 : la variation de la profondeur de point de soudage en fonction de l'élévation de courant

2. Mécanismes de rupture :

Les mécanismes de rupture (traction cisaillement). Ils impliquent un cisaillement ductile de l'interface en compétition avec une localisation de la déformation dans le métal de base proche du point ou dans la zone subcritique revenu [6].

La façon de l'évolution de l'endommagement pour les trois types d'assemblages (A, B et C) est le même en traction cisaillement (la figure 4-4). Car ils ont la même façon de l'évolution de la rupture (la figure 4-5) que se soit le type d'arrangement et les valeurs de l'intensité mais, a des charge de rupture différent (la figure 4-6).

La figure 4-5 [Sylvain DANCETTE (6)] présent les différentes étapes de la propagation de fissure en vue micro-tomographie à partir de l'état initial (a) jusqu'à la rupture finale (f) pour les arrangements.

L'état initial du point est présenté par la figure 4-5 (a). On peut y déceler quelques défauts de solidification. La figure (b) (charge initiale), le fond d'entaille n'est pas encore endommagé. On décèle en revanche à la figure (c) un début de propagation inter-faciale depuis le fond d'entaille dans la zone de diffusion. La vue en (d) illustre que la fissure se propage de façon non uniforme dans le noyau fondu et qu'elle peut avoir dévié en certains points alors qu'elle est encore en cours de propagation à l'interface ailleurs. On remarque en (e) à un stade de fissuration plus avancé que la fissure dévie vers le haut dans la tôle, en concordance avec l'effet attendu du moment de flexion dans chacune des tôles. L'effort maximum est atteint lorsque la fissure débouché dans l'épaisseur dans l'une des tôles. Il est néanmoins possible qu'elles débouchent dans les tôles telles qu'illustré par l'image (f) de la même figure.



Type A

Type B

Type C

La figure 4.4: l'endommagement final des assemblages A, B et C.

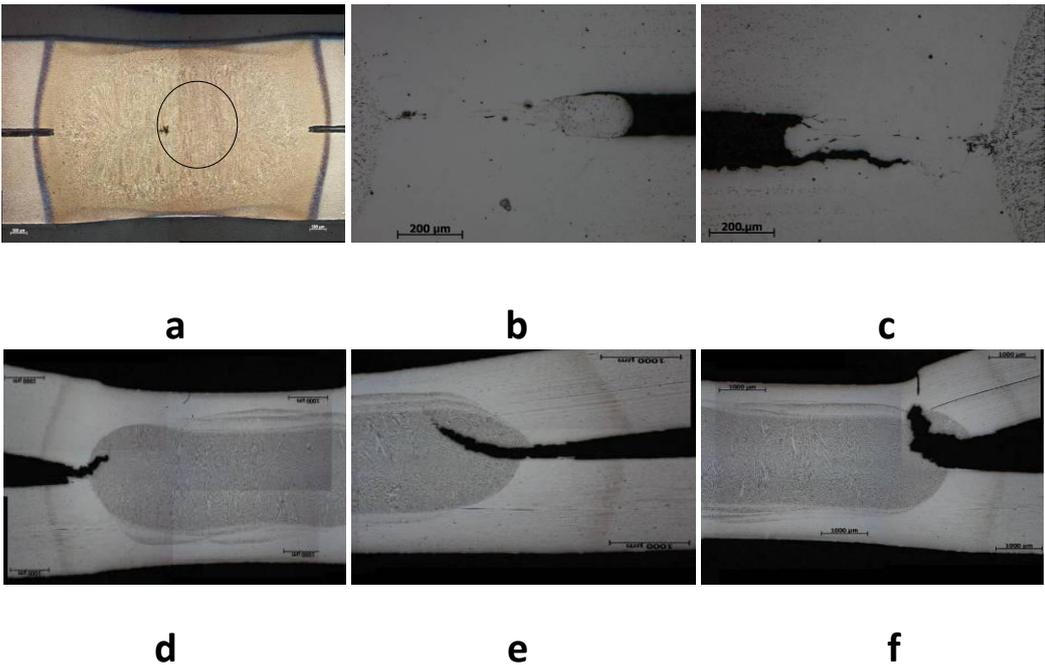


Figure 4.5: Evolution de l'endommagement d'un point soudé au cours de l'essai de traction.

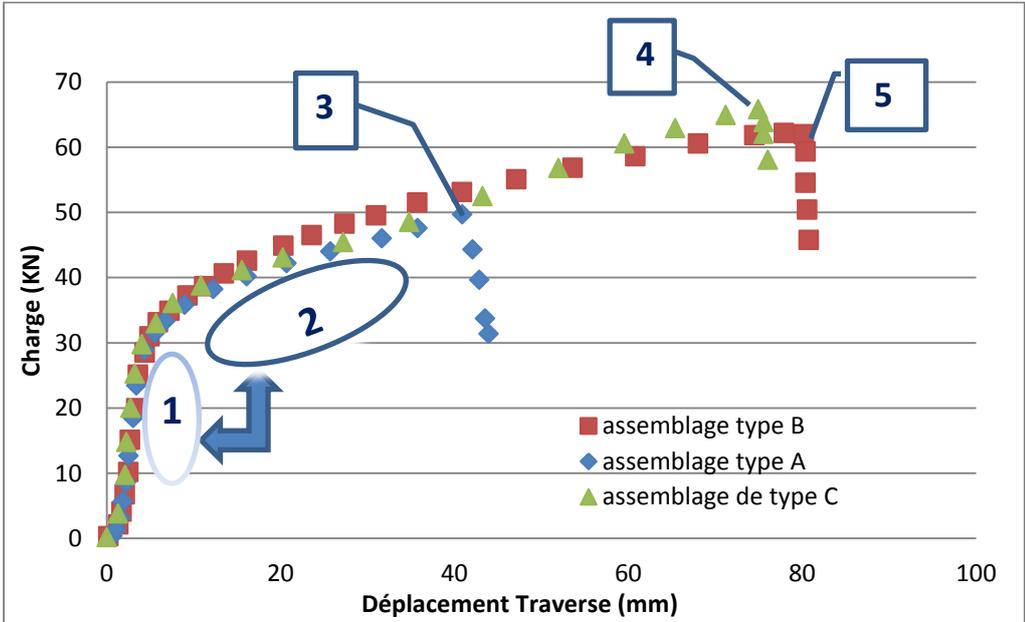
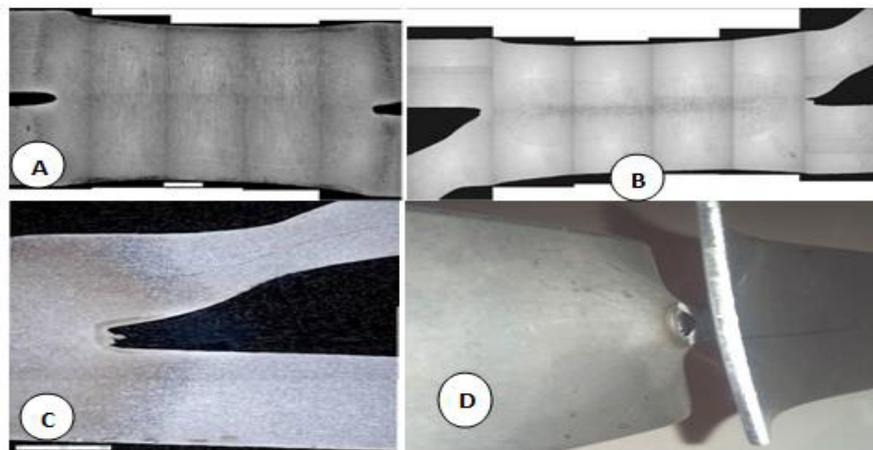


Figure 4.6 : L'évolution de l'endommagement des assemblages avec les différentes parties importantes : (1) la zone élastique, (2) la zone plastique, (3), (4) et (5) présentes les points de la rupture pour chaque type d'assemblage.

Le mécanisme de rupture (traction cisaillement) dans l'assemblage de type D (assemblage par un seul point), ils impliquent un déboutonnage partiel dans le noyau fondu. L'augmentation de la taille fondu à courant de soudage croissant s'accompagne d'une augmentation de la tenue mécanique des et d'une transition dans le mode de rupture entre rupture inter faciale et déboutonnage [6].

La rupture se produit par localisation de la déformation en SCZAT / MB dont la limite d'élasticité est faible par rapport à celles du point soudé. L'évolution de l'endommagement est détaillée sur les figures 4-7 et 4-8. [6]

La courbe de traction (figure 4-8) présente un domaine quasi-élastique jusqu'à 10 (KN) environ et la figure 4-7 A illustre que la déformation rémanente du point est très faible. La déformation plastique de la tôle autour du point augmente ensuite et la figure 4-7 B présente une déformation importante associée à la rotation du point pour permettre l'alignement des tôles dans la direction de chargement. La rotation comme illustre par la figure 4.7 D est due au moment de flexion introduit par l'excentricité des points d'application des forces dans la tôle du haut et celle du bas. On note déjà sur la coupe Figure 4.7-B un début de localisation de la déformation dans le métal de base. La vue en micro-tomographie confirme qu'il n'y a pas eu de fissuration à l'interface. L'effort maximum (F_{max}) est atteint lorsque la rupture s'est propagée dans l'épaisseur dans la zone de striction de l'une des tôles (Figure 4-7-C). La chute de l'effort au-delà de (F_{max}) correspond au déchirement du Métal de Base autour du point et dans l'éprouvette ensuite. La déformation étant déjà très avancée dans la deuxième tôle à (F_{max}), sa rupture ne tarde pas à se produire et elle permet un déchirement complet du point tel qu'illustré Figure 4-7-D.



La figure 4-7 : la façon de l'évolution de l'endommagement, (A), (B) et (C) vue en macro-tomographie de la rupture [6]. La figure (D) la rupture finale de point

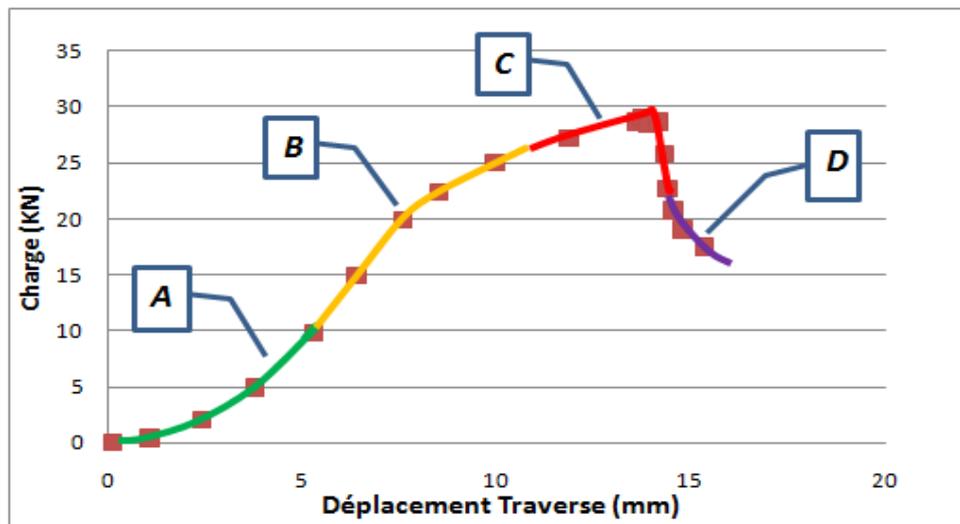


Figure 4.8 : Evolution de l'endommagement au cours de l'essai de traction cisaillement : **A)** point peu déformé à 10 KN, **B)** rotation du point pour aligner les tôles dans la direction de chargement et amorce de striction **C)** Effort maximum atteint lorsque la rupture s'est propagée, **D)** Propagation de la rupture dans le MB autour du point et déchirement de l'éprouvette jusqu'à la rupture finale.

3. Facteurs principale qui influent sur le mécanisme de rupture :

Le mécanisme de l'endommagement illustré par un certain nombre de facteur :

1- Facteur géométrique influant sur la sollicitation mécanique :

- ✓ Dimensions relatives du noyau fondu vis-à-vis de l'épaisseur de tôle et de la largeur de l'éprouvette.
- ✓ Espacements entre mors de la machine de traction.
- ✓ Acuité du fond d'entaille

2- Facteurs métallurgiques liés au cycle thermique vécu localement et à la composition chimique de l'acier :

- ✓ Trempabilité de l'acier et fragilité des phases dures pouvant être formées au cours du soudage.
- ✓ Propriété mécaniques relatives du métal de base et des différentes zones du point soudé.
- ✓ Microstructure en fond d'entaille. Les phases fragiles favorisant la rupture interfaciale en mode d'ouverture.
- ✓ Inclusion ou porosité pouvant influencer le chemin de fissuration.

Il est noté que le diamètre de noyau fondu est lui-même sensible aux propriétés physiques de l'acier et aux conditions de soudage. Les points de faible taille par rapport à la surface active des électrodes présentes en général un fond d'entaille très aigu. Alors qu'il prend une forme plus émoussée lorsque noyau se rapproche du diamètre des électrodes. [6]

4. Répartition de la charge de la traction dans chaque type d'arrangement

Le décalage entre les plans du contact des pièces assemblées par le procédé par points, influe négativement sur la déformation des éprouvettes.

Les figures 4-9 a 4-12 présentes l'état de l'endommagement des éprouvettes et la répartition de la charge appliquée sur elles.

Pour l'assemblage type A on observe une mauvaise déformation (la figure 4-9 b) a cause d'un moment de flexion qui est répartie sur la longueur et a la largeur de l'éprouvette. Ce moment est le résultat de l'excentricité de la charge appliqué sur le milieu de l'assemblage (la ligne rouge sur la figure 4-9 a), car les points de soudures est sur la même direction de la répartition de la charge et c'est pour cela la rupture survenue a le premier point de l'arrangement.

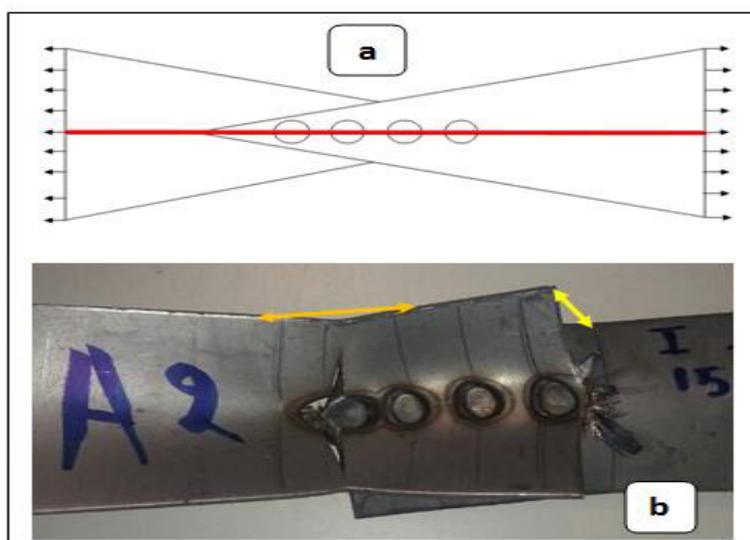
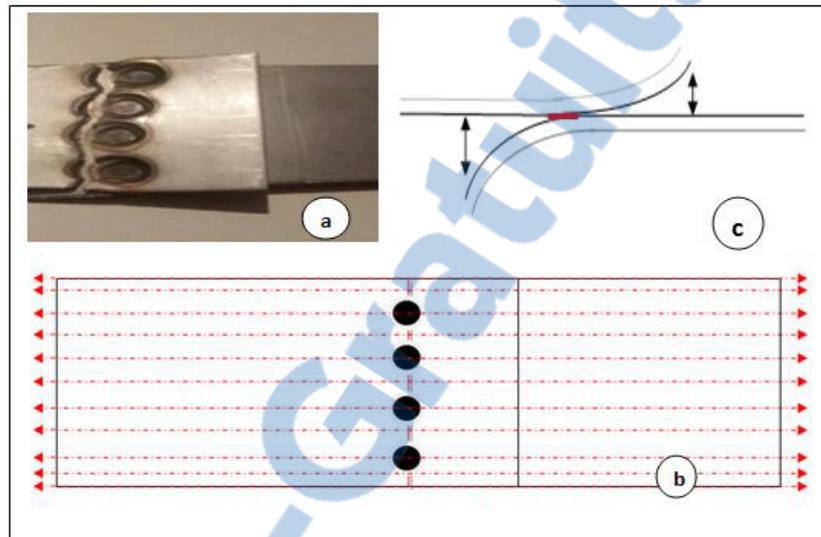


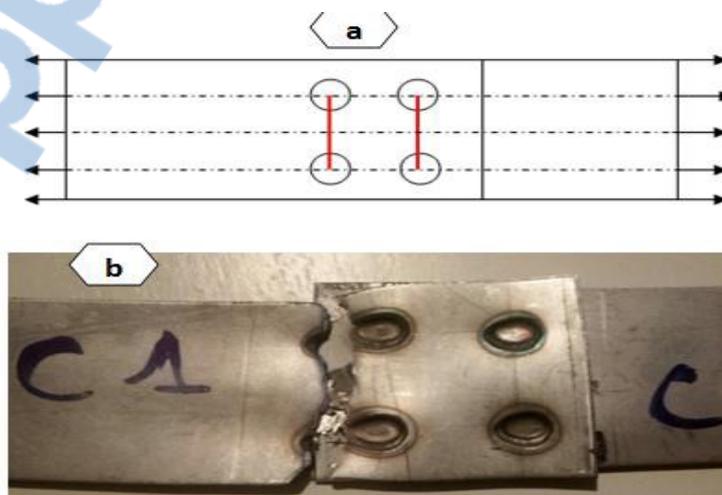
Figure 4-9 : la répartition de la charge appliquée et leur effet sur l'assemblage de type A

La figure 4-10 présente l'assemblage de type B par quatre points dans le sens vertical sur la charge appliquée. L'image (a) montre que ce type d'arrangement il a une déformation par un moment de flexion (l'image a et c) moins que le type A. Cela est dû à la bonne répartition des points de soudures comme illustre l'image (b) sur la même figure. Ces observations signifient que ce type d'arrangement a un effet positif sur la déformation finale de l'éprouvette.



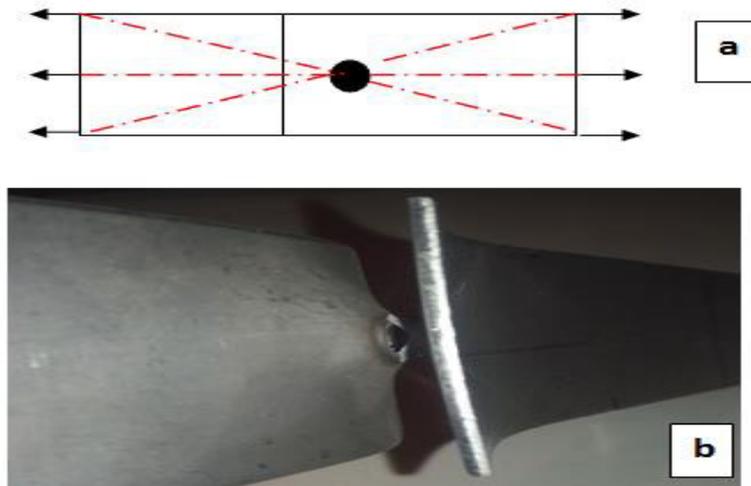
La figure 4-10 : effet de la répartition de la charge sur l'assemblage de Type B

Le troisième type d'assemblage (type C : la forme carré) elle a une bonne déformation. Car la réparation des points de soudures réduit le moment de flexion comme il montre la figure 4-11.



La figure 4-11 : la répartition de la charge appliquée et leur effet sur l'assemblage de Type C

Le type D (assemblage par un seul point) est le mauvais assemblage par rapport aux autres car la répartition de la charge appliquée est concentrée directement sur le point de la soudure (la figure 4-12 a) ce qui augmente le moment de flexion autour du point de soudure. Cela provoque un déboutonnage partiel ou total.



La figure 4-12 : la répartition de la charge appliquée et leur effet sur l'assemblage de Type D

A travers les figures précédentes et les observations obtenues, on remarque que l'effet de l'arrangement des points de soudure sur la déformation finale des spécimens est remarquable à l'aide de moment de flexion qui est causé par la mauvaise répartition de la charge appliquée.

Il reste à voir les effets des arrangements des points de soudure sur la résistance à la rupture des éprouvettes à l'aide de l'augmentation de l'intensité du courant de soudage.

5. Effets de l'intensité de courant sur le comportement mécanique des assemblages.

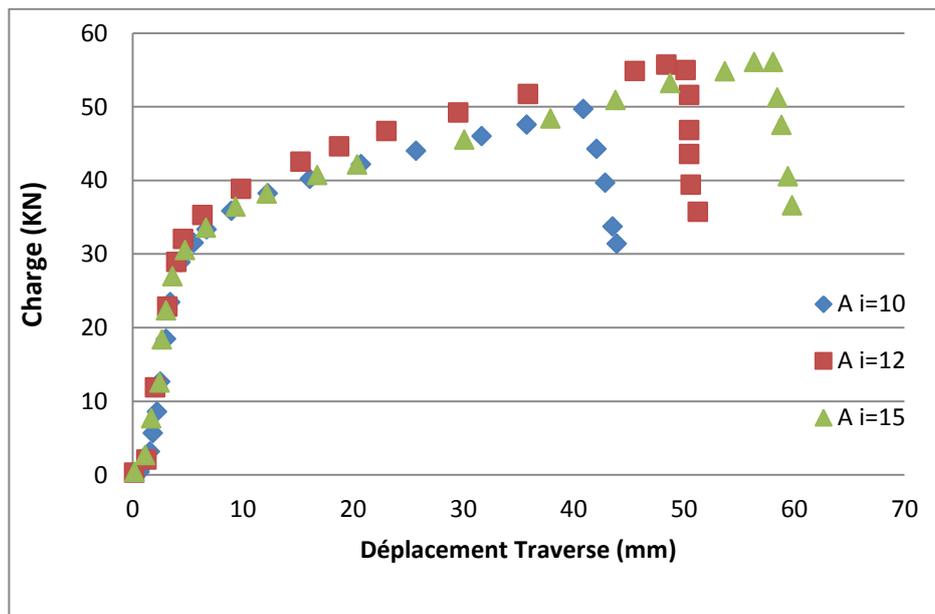
Les effets des paramètres de soudage sur la géométrie au niveau du point de soudage étudié montrent la nécessité d'investiguer ses effets sur le comportement en cisaillement par traction sur les différents types d'arrangement des assemblages par recouvrement.

La procédure expérimentale retenue pour l'étude de l'endommagement des points soudés repose sur des essais de traction continus. Le seul paramètre qui varie c'est le courant de l'intensité, entre 10, 12 et 15 kilo Ampère avec un temps de soudage qui égale à 11 Cycles et un effort de serrage qui égale à 6 bars (le temps et la force de soudage reste constante pendant les essais).

Les figures à partir de 4-13 jusqu'à 4-20 présentent d'une part, la rupture finale des éprouvettes et d'autre part, l'évolution de l'endommagement des éprouvettes au cours de l'essai de traction. Ces figures sont réservées pour étudier deux facteurs importants, la charge de rupture et le déplacement.

Les paragraphes suivants interprètent les figures mentionnées précédemment pour étudier l'effet de l'évolution de l'intensité sur la charge de rupture et la résistance plastique des assemblages pour chaque type :

➤ Dans le cas de type d'assemblage A on remarque le mode de l'endommagement presque le même avec une différence négligeable dans les trois valeurs du courant comme illustre la figure 4-14 par contre la différence dans le déplacement et la charge de rupture est remarquable comme il montre la figure 4-13. Donc l'évolution de la charge de rupture accompagnée par l'augmentation de l'intensité à partir de 10kA jusqu'à 15 kA pour ce type d'assemblage.



La figure 4-13 : Evolution des courbes charge-déplacement pour les assemblages de type (A) au cours de la variation de l'intensité (F et T constant : F=6 bar, T=11)

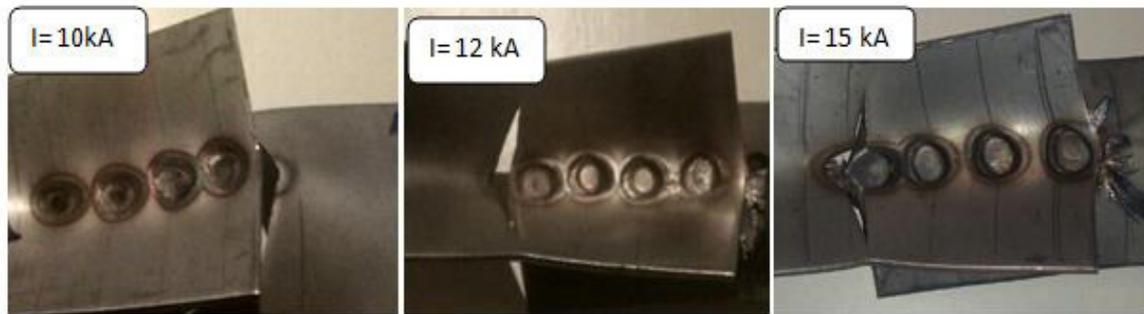


Figure 4-14 : la rupture finale de l'éprouvette de type (A)

➤ Pour l'assemblage de type (B), l'endommagement des éprouvettes est le même dans le cas du courant de 10 kA et 15 kA. Le courant de 12 kA ont une rupture dans le métal de base loin du l'arrangement comme il montre la figure 4-16. Cette exception signifie que la résistance de l'arrangement des points de soudure est bonne. La figure 4-15 présente Evolution des courbes charge-déplacement pour les assemblages de type B au cours de la variation de l'intensité, on remarque que l'augmentation de la charge de la rupture est aléatoire. Donc il confirme que l'augmentation de l'intensité n'a pas toujours positif sur le comportement mécanique de l'assemblage. Dans ce type d'arrangement la bonne valeur du courant c'est le courant de 12 kA car il donne la meilleur résistance a la rupture.

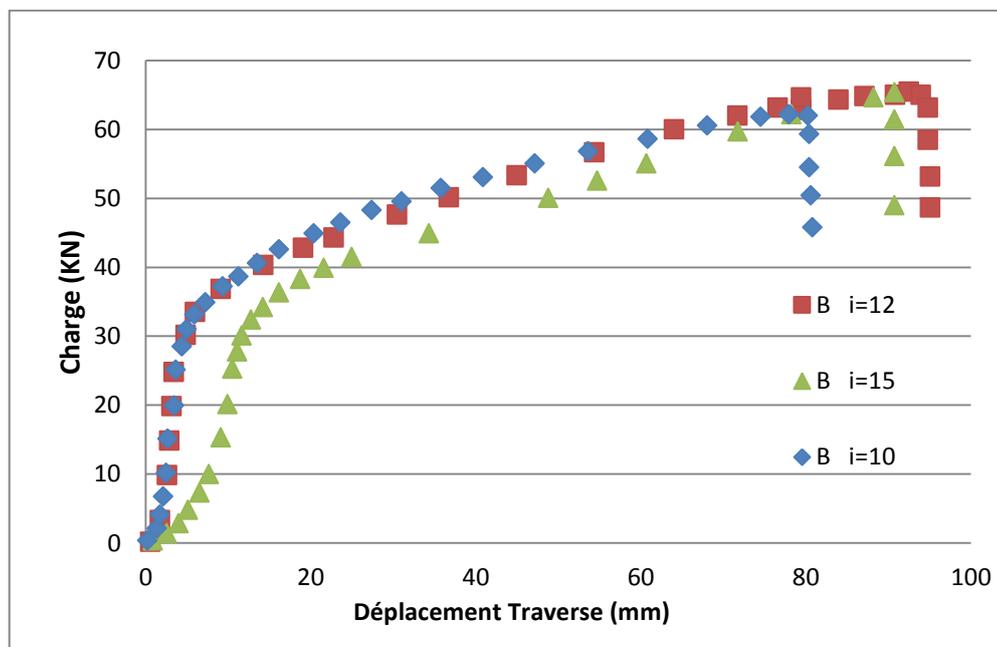
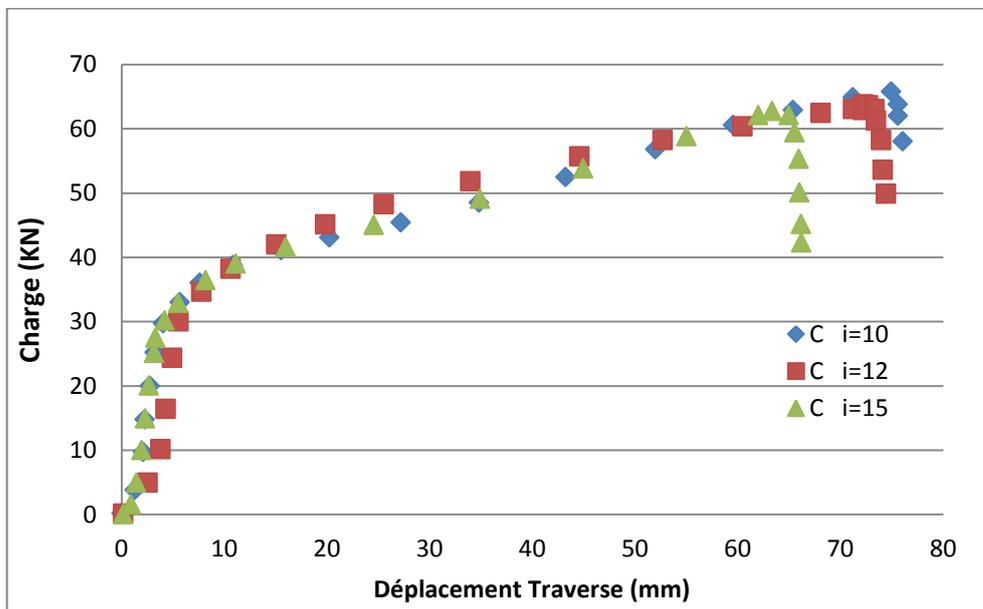


Figure 4-15 : Evolution des courbes charge-déplacement pour les assemblages de type B au cours de la variation de l'intensité (F et T constant : F=6 bar, T=11)



Figure 4-16 : la rupture finale l'éprouvette de type (B)

➤ La figure 4-18 présente l'endommagement des éprouvettes de type (C). L'endommagement dans ce type d'assemblage est le même, que se soit la valeur de l'intensité mais les courbes de traction montre qu'il y a une différence entre eux sur le plan résistance à la rupture comme illustre la figure 4-17. On observe une proximité entre les courbes qui caractérisent l'intensité de 10 et de 12 kA et prends la valeur maximale de la charge environ de 65 KN. Tandis que le courbe de l'intensité 15 kA pris une charge faible par rapport aux deux premiers.



La figure 4-17 : Evolution des courbes charge-déplacement pour les assemblages de type C au cours de la variation de l'intensité (F et T constant : F=6 bar, T=11).



Figure 4-18 : la rupture finale l'éprouvette de type C

➤ Dans le quatrième type d'assemblage (le type D), on remarque le phénomène de déboutonnage partiel répète dans les trois cas (La figure 4-20). La figure 4-19 montre l'évolution des courbes charge déplacement pour les trois valeurs du courant. On remarque que les trois courbes ont la même valeur de la charge à la rupture mais le déplacement de chaque cas différent que l'autre.

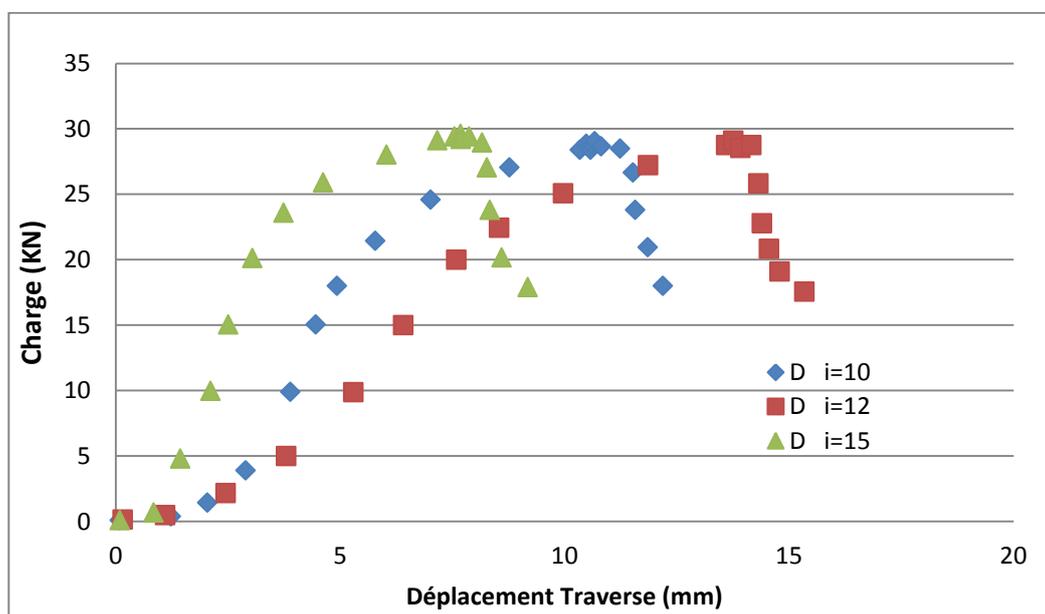


Figure 4-19 : Evolution des courbes charge-déplacement pour les assemblages de type D au cours de la variation de l'intensité (F et T constant : F=6 bar, T=11).

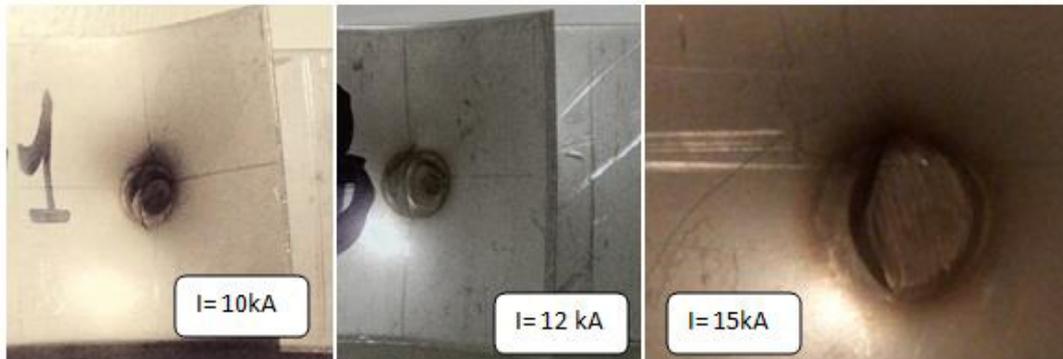


Figure 4-20 : la rupture finale l'éprouvette de type (D)

Dans les paragraphes précédents on a interprété les effets de l'évolution de l'intensité du courant de soudage sur chaque type d'arrangement. Donc il reste de faire une comparaison entre les assemblages sur le plan résistance pour tiré le bon arrangement et la meilleure intensité du courant pour ce dernier.

La figure 4-21 présent les charges de la rupture pour les quatre types d'assemblage pour les trois valeurs de l'intensité du courant (10, 12 et 15 kilo Ampère). La ligne verticale de 10 kA traverse les charges de rupture de chaque type d'assemblage. On remarque que le type C (assemblage par quatre points sous la forme carré) prend la valeur la plus grande mais pas loin de l'assemblage B qui est suivi par le type A et D. Le classement sera vu un changement léger pour les valeurs de 12 et 15 kA où on observe que le type B est le dominant.

La figure 4-22 illustre les déplacements (qui caractérisent les points de la charge de la rupture) en fonction de l'augmentation de l'intensité. On observe d'après les lignes de 10, 12 et 15 kA que le type B reste dominant pendant les trois cas, suivi par le type C, le type A et le type D.

Ces observations montrent que l'assemblage par quatre points de soudure (type B) dans le sens verticale à la charge de traction donne des bons résultats sur le plan résistance a la rupture.

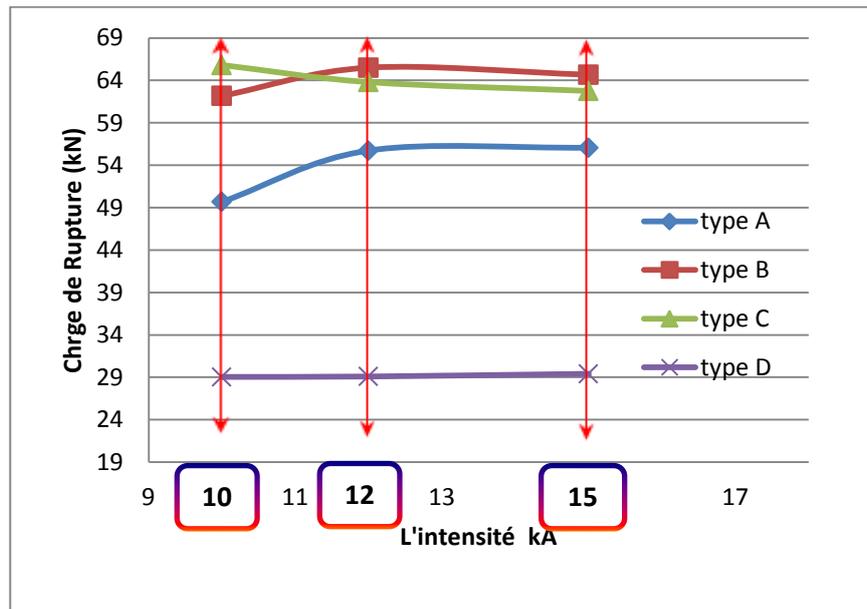


Figure 4-21 : l'évolution de la charge de rupture avec l'augmentation de l'intensité du courant pour chaque type d'assemblage.

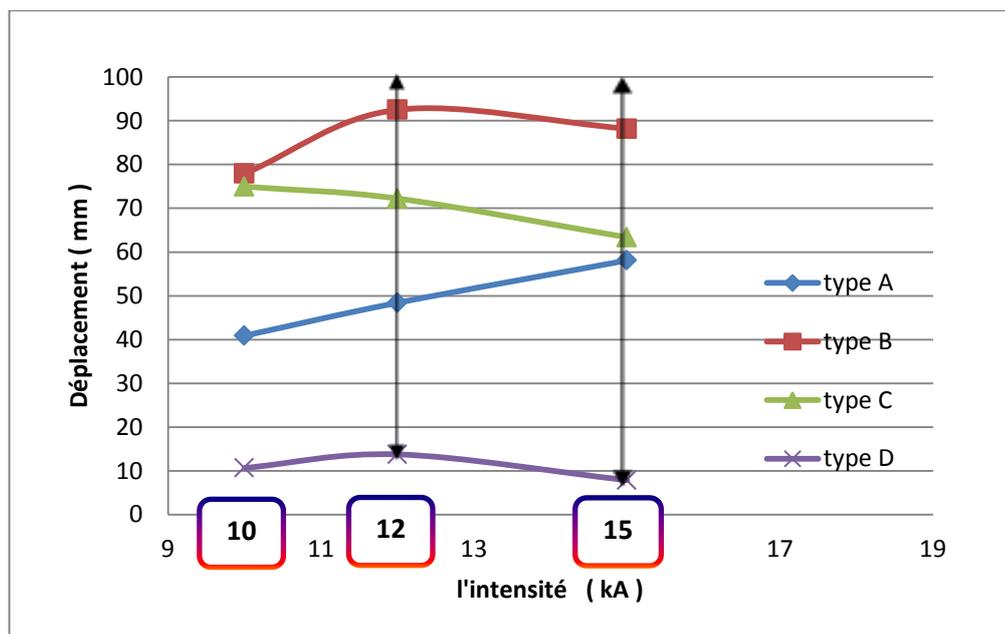


Figure 4-22 : les déplacements qui caractérisent les points de rupture à l'aide de l'augmentation de l'intensité pour chaque type d'assemblage.

Conclusion & perspectives

L'objectif de ce travail est d'estimer expérimentalement la tenue mécanique des assemblages par recouvrement soudés par points de l'acier inoxydable 304L.

La première partie regroupe la description des procédés de soudage par résistance et spécialement le soudage par point.

La deuxième partie décrit la procédure expérimentale et les essais effectués.

La dernière partie regroupe les différents résultats obtenus. Elle fait ressortir les points suivants :

- Le diamètre et la profondeur du point de soudure est affecté par l'intensité du courant de soudage.
- L'évolution des caractéristiques mécaniques des assemblages est affectée par l'augmentation de l'intensité du courant de soudage.
- De même les caractéristiques mécaniques des assemblages sont affectées aussi par le nombre et la position des points de soudure (le bon assemblage est le type (B)).
- Dans certaines situations, on constate un comportement aléatoire des caractéristiques mécanique sous l'augmentation du courant de soudage.
- Le moment de flexion diminue si l'arrangement des points de soudure est dans le sens vertical à la charge de traction comme le type (B).
- De même le moment de flexion est négligeable s'il n'y a pas d'espace libre dans la surface de contact entre les pièces assemblés comme l'assemblage de type (C).

Les points suivants peuvent faire l'objet d'études futures :

- Effet de l'appui sur les caractéristiques géométriques et mécaniques des assemblages pour les différents types d'arrangement.
- Effet de l'effort et le temps de soudage sur l'arrangement de type B.

Bibliographie

- [3]. **LARBI CHERIF MOHAMMED** « Comportement mécanique d'assemblages soudés par points ». Magister en maintenance industrielle 23 Mai 2016 – Université de Tlemcen.
- [4] **CHAINARONG SRIKUNWONG** « Modélisation du procédé de soudage par points ». Thèse de Doctorat, Ecole National des Mines de Paris, 2005
- [5] soudage par résistance : SD SERVICE 2012
<https://fr.scribd.com/document/190147425/Le-Soudage-Par-Resistance-Sd-Service-2012>
- [6] **SYVAIN DANCETTE** « Comportement mécanique des soudures par point : mécanisme et Stratégie de prédiction dans le cas des tôles en aciers pour automobile » Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2009
- [8] **MEZRAG Bachir** cours « procédés et matériels de soudage ». 2016
- [9] Module de formation de soudage par résistance : Article ADEL
- [10] Procédé de soudage par résistance : **Ph. ROGUIM**
- [11] **MEKA-H- 201** Chapitre assemblage et soudage.
- [13] Klas Weman « Aide-Mémoire : Procédés de soudage ». Edition DUNOD 2005.

Webographie

- [1] <https://fr.scribd.com/document/359583490/Fiche-Materiaux-Acier-Inox>.
12.04.2018
- [2] <https://fr.scribd.com/document/216217095/Inox-304-316-Ft-Final>. 12.04.2018
- [7] <http://www.arotechnologies.com/fr-FR> 02.03.2018
- [12] <https://fr.scribd.com/document/190147425/Le-Soudage-Par-Resistance-Sd-Service> 21.03.2018