



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER

« **MAINTENANCE INDUSTRIELLE** »

Présenté par

LARBI CHERIF MOHAMMED

Thème

COMPORTEMENT MECANIQUE D'ASSEMBLAGES
SOUDES PAR POINT

Soutenu le 23 mai 2016 devant le jury composé de :

Président	: HADJOUI Féthi	Maître de Conférence	Université de Tlemcen
Encadreur	: BENACHOUR Mustapha	Maître de Conférence	Université de Tlemcen
Examineur	: SEBAA Féthi	Maître de Conférence	Université de Tlemcen
Examineur	: KARA ALI Djamel	Maître de Conférence	Université de Tlemcen

Année universitaire 2015/2016

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents qui par leur amour, leur précieux conseil, leur compréhension et leur soutien m'ont guidé vers la voie de la réussite.

Ma petite famille et grande famille.

Remerciements

Je tiens à remercier les membres de jury de mon mémoire notamment Monsieur HADJOUI Féthi le président du jury et Messieurs SEBAA Féthi et KARA ALI Djamel d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie mon encadreur Monsieur BENACHOUR Mustapha pour l'effort déployé et le temps alloué afin que je mène à bien mon mémoire de master et acquérir son expérience dans la conduite d'un projet de recherche expérimental.

Je remercie encore toutes les personnes qui ont contribué à ma formation de master.

ملخص

التلحيم بالمقاومة بالنقط طريقة لا يستخدم فيها معدن التلحيم وإنما تعتمد على التقاء الضغط الميكانيكي مع مرور التيار الكهربائي بالقطعة المراد تلحيمها.

فالقسط المصفوفة الواحدة فوق الأخرى تضغط موضعيا بين قطبين كهربائيين مصنوعين من النحاس.

يمر عبر مجموع القطعتين والقطبين، تيار التلحيم الذي وتحت شدة ضعيفة يولد ارتفاعا قويا في درجة الحرارة وذلك بفعل جول.

تعتبر هذه الطريقة ذات استعمال واسع في مجال التصنيع وبالأخص فيما يخص الصفائح الرقيقة.

الجمع بين صفيحتين رقيقتين بطريقة التلحيم بالنقط يتطلب معرفة دقيقة بالمواد المراد جمعها والاختيار الصائب للعوامل المؤثرة في التلحيم. هذا الأمر لا يمكن بلوغه إلا من خلال القيام بدراسة ميدانية.

الموضوع المطروح هاهنا يدرج في هذا الإطار وهو بعنوان: «السلوك الميكانيكي للجمع بين الصلب الغير قابل للصداء 304L بطريقة التلحيم بالنقط».

أظهرت النتائج أنه ليس لعاملا القوة والزمن تأثير كبير على الخصائص الميكانيكية بالمقارنة مع تأثير شدة تيار التلحيم. فنتائج التجربة تدل على أن شدة التيار عامل مهم لهذا النوع من التلحيم إذ أن ارتفاع شدة تيار التلحيم تؤدي الى زيادة التمدد البلاستيكي. وهذه الزيادة تؤدي إلى انصهار معتبر عند الالتحام مما يولد تأثيرا كبيرا على جانبه الهندسي عند نقطة الالتحام.

RESUME

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

L'assemblage de deux tôles minces par soudage par points requiert une connaissance du matériau à assembler et la sélection optimale des paramètres de soudage. Cela n'est évident que sur des études établies

Le thème abordé, intègre dans ce sens et est intitulé : «Comportement mécanique d'assemblages en acier inoxydable 304 L soudés par points ».

L'effet des paramètres de soudage est étudié à savoir l'intensité du courant de soudage, l'effort et le temps du soudage.

Les résultats ont montré que les paramètres, effort et temps de soudage présentent un faible effet sur les caractéristiques mécaniques comparativement par rapport à l'effet de l'intensité du courant de soudage. Les résultats expérimentaux montrent aussi que l'intensité du courant de soudage est un paramètre important pour un tel assemblage et sa résistance mécanique.

En effet, l'augmentation du courant de soudage permet d'augmenter l'étendu de la déformation plastique. L'augmentation de l'intensité du courant provoque une importante fusion au niveau du point de soudure d'où l'aspect géométrique est fortement affecté.

ABSTRACT

Resistance spot welding is a process without joining metal, which uses combined effects of a mechanical pressure and an electric current passing through pieces to join.

Work-pieces are superimposed and are locally tighten between two copper alloy electrodes. Across passed by the welding current and under a slight tensile; it delivers a great heat because of the joule effect.

This process is the most commonly used method in industry, especially for thick sheet metals.

Joining thick sheet metals using the spot welding process requires a good knowledge of materials to join and an optional choice of welding parameters.

This is not obvious unless an established study. The current theme makes one of such perspectives and has the title: “Mechanical Behavior of Stainless Steel 304L Spot Welding Joining”.

Effect of welding parameters, such as welding current tensile, applied electrode pressure and holding time of electrode are studied.

Results show that parameters pressure and time present a weak effect on the mechanical characteristics regarding the tensile effect. Welding current tensile is experimentally an important parameter that effect such joining and its mechanical resistance.

Indeed, the increase in welding current leads to the increase of plastic deformation extension. It also affects strongly the geometric aspect since an increasing current tensile causes an important fusion at the welding spot.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1: Soudage sans pression.	5
Figure 1.2 : Soudage avec pression.	6
Figure 1.3 : Procède de soudage.	7
Figure 1.4 : Principaux procédé de soudage par résistance.	9
Figure 1.5 : Transformateur du soudage par résistance.	10
Figure 1.6 : Exemple d'application soudée par point.	12

Chapitre 2

Figure 2.1 : Les Phases de soudage par point.	15
Figure 2.2 : Mécanisme de soudage soudé par point.	16
Figure 2.3 : Electrode soudé par point.	18
Figure 2.4 : Diffèrent forme des électrodes.	19
Figure 2.5 : Mécanisme de formation de point de soudure par point.	21
Figure 2.6 : Schéma des interactions entre les états électrique, thermique, métallurgique.	22
Figure 2.7 : Schéma d'un point soudé selon une coupe.	23
Figure 2.8 : Microstructure général de l'opération de soudage par point.	25
Figure 2.9 : Soudage par point des tôles revêtues.	30

Chapitre 3

Figure 3.1 : Machine 600 T Pour L'essai de traction.	35
Figure 3.2a : Dimension des éprouvettes de traction.	36
Figure 3.2b : Eprouvette de traction En 304L.	36
Figure 3.3 : Courbe de traction/déplacement.	37
Figure 3.4 : Courbe conventionnelle/déformation.	37
Figure 3.5 : Assemblage soudé par point des éprouvettes 304L.	39
Figure 3.6 : Exemple des pièces assemble par point des éprouvettes en 304L pour une intensité de 13 ka et effort de 7 et 8 bar .	39

Figure 3.7 : Machine ARO Fix Type MC.	41
Figure 3.8 : Les points les de l'essai de dureté sur l'éprouvettes 304L.	42
Figure 3.9 : Exemple des essais de dureté HRB sur l'éprouvette 304L.	43
Figure 3.10 : Traction en cisailent et en croix.	43
Figure 3.11 : L'opération de traction en cisaillement sur la machine de traction 600 kn.	45

Chapitre 4

Figure 4.1 : Géométrie du point de soudure pour une intensité de 10 ka.	49
Figure 4.2 : Effort des paramètres de soudage sur l'évolution de diamètre du P.S.	50
Figure 4.3. Effet du courant sur le diamètre moyen des points de soudure.	51
Figure 4.4 : Effet du courant du soudage sur la profondeur du point de soudure pour F=8bar, t=13 cycle.	51
Figure 4.5 : Effet de l'intensité du courant du soudage sur la profondeur au P.S.	52
Figure 4.6 : Evolution de la profondeur du point de soudure en fonction du courant de Soudage.	53
Figure 4.7 : Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du dureté HRB du point de Soudure pour un effort de 7 bar.	56
Figure 4.8 : Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du dureté HRB du point de Soudure pour un effort de 8 bar.	57
Figure 4.9 : Effet du courant sur la dureté de la position 5 de points de soudure effort7.	58
Figure 4.10 : Effet du courant sur la dureté de la position 5 de points de soudure de 8 bar.	58
Figure 4.11 : Evolution de l'endommagement d'un acier de haute résistance au cours de L'essai de traction cisaillement.	60
Figure 4.12 : Phénomène de rotation du à la flexion par excentricité.	60
Figure 4.13 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 10	62
Figure 4.14 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 10	62
Figure 4.15 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 11 cycles.	63

Figure 4.16 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 11 cycles.	63
Figure 4.17 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de L'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 13c.	64
Figure 4.18 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de L'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 13c.	64
Figure 4.19 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur la charge maximale de rupture Pour un effort de 7 bar.	65
Figure 4.20 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur la charge maximale de rupture Pour un effort de 8 bar.	65
Figure 4.21 : les éprouvettes qui subit à l'essai de traction.	67

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Paramétré de soudage par point.	20*-9
Tableau 2.2 : Les paramètres de soudage par point pour l'acier doux.	28
Tableau 2.3 : Les paramètres de soudage par point pour l'acier inoxydable 304L	32

Chapitre 3pp

Tableau 3.1 : Composition chimique de l'acier inoxydable 304L.	35
Tableau 3.2 : Propriété physique de l'acier inoxydable 304L.	35
Tableau 3.3 : Caractéristique mécanique de l'acier inoxydable 304L.	38
Tableau 3.4 : Diffèrent essai de soudage par point sur les éprouvettes de l'acier 304L.	40

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Les dimensions de point de soudure (diamètre et profondeur).	48
Tableau 4.2 : Les essais de dureté HRB dans les différents paramètres de soudage par point Des éprouvettes en acier inox 304L.	54

NOTATION UTILISEE

W : Effet de joule (joule)

R : Résistance (Ω)

I : Intensité (ampère)

t : Temps de soudage –cycle- (seconde)

ρ : Résistivité

L : Longueur de matériau

S ; Section de matériau

T : Température

∞ : Confession de température

E : Epaisseur de l'éprouvette

Q : La quantité de chaleur générée

F : Effort en bar.

Φ : Diamètre du noyau

D : Diamètre du corps d'électrode

d : Diamètre de face active de la pointe d'électrode

HRB : Essai de dureté Rockwell a bille

HRC : Essai de dureté Rockwell a cône

HV : Essai de Vickers

LISTE DES ABREVIATIONS

- OXW : Soudage oxyacétylénique
- SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée
- SAW : Soudage à l'arc submergé
- GMAW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG
- GMAW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG
- FCAW : Soudage fil fourré sans gaz
- GTAW : Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG)
- PAW : Soudage plasma
- RSW : Soudage par résistance par point
- FSW : Soudage par friction-malaxage
- EBW : Soudage par faisceau d'électrodes
- C.A.S.P.R : Coefficient d'Aptitude au Soudage par Résistance

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre1 : GENERALITES SUR LE SOUDAGE.....	3
1. Soudage	4
1.1 Généralités	4
1.2 Histoire de Soudage	4
1.3 Définition de soudage	5
1.4 Procédé de soudage	6
1.5 Principaux procédés	8
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 avantages et les Inconvénients	11
2.5 Les Contrôles de soudage par résistance	11
2.6 Domaine d'application	12
Chapitre 2 : PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINT	13
1. Le Soudage par point	14
Introduction.....	14
1.1 Définition	14
1.2 Principe du procédé	15
1.3 Constitution d'une machine soudée par point	16
1.4 Paramètre du procédé	17
1.5 Mécanisme de formation de la soudure	20
1.6 Interaction Electrique, Thermique, Métallurgique, Mécanique :	21
1.7 Le Point Soudé	23
2. Soudabilité des métaux	26
2.1 Soudages des aciers doux	27
2.2 Soudages des tôles revêtues	30
2.3 Soudage des Aciers Inoxydable	31
Chapitre 3 : ETUDE EXPERIMENTALE.....	33
Introduction.....	34

1. Matériau d'étude 304L : AISI 304L – DIN 1.4307-X2CrNi18 9 AFNOR Z3CN1909.....	34
1.1 Caractéristiques chimiques et physiques.....	35
1.2 Caractérisation mécanique.....	35
1.3 Choix du paramètre de soudage par point pour 304L.....	38
2. Fiche technique machine de soudage par point ARO Fix Type MC.....	41
3. Essais de traction en cisaillement et en croix.....	43
4. Mécanisme de rupture.....	44
Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	34
Introduction.....	47
1. Effets des paramètres de soudage sur la géométrie du point de soudure.....	47
2. Effets des paramètres de soudage sur la dureté.....	54
3. Effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique de l'assemblage soudé.....	59
Conclusion & perspectives.....	68
Bibliographie.....	69

INTRODUCTION GENERALE

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans différentes industries : automobile, mécano soudé, assemblages métalliques. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, économique et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les assemblages métalliques. Les aciers inoxydables de type 304 L et 430 sont de bons candidats pour les applications d'assemblages métalliques (Ex : élément métallique en réflectoire), 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 par points des aciers austénitiques a été largement étudiée depuis plusieurs décennies, le comportement mécanique des points soudés des aciers 304 L présente à ce jour un champ d'investigation.

Face à la complexité des ruptures pouvant être rencontrées, l'objectif de la présente mémoire est d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement des assemblages soudés par points sous l'effet de différents paramètres du procédé du soudage, 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 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 304 L. Les assemblages sont réalisés par recouvrement et sollicités en traction cisaillement, dans le but d'évaluer les caractéristiques mécaniques (dureté, charge de rupture) et géométriques afin de comprendre les mécanismes de rupture des points soudés.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus. Une discussion sur les effets des paramètres de soudage par points étudiés est menée afin de comprendre globalement la tenue mécanique des assemblages soudés par points pour l'acier inoxydables 304 L. Le mémoire est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 :

**GENERALITES SUR
LE SOUDAGE**

1. Soudage

1.1. Généralités

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

Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler.

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 trois de natures différentes. (1)

1.2. Histoire de Soudage

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

- à l'âge de bronze on soudait à la poche
- à l'âge de fer on soudait à la forge

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

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

- Fin XIX^e siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés :

Le soudage oxyacétylénique

Le soudage aluminothermique

Le soudage à l'arc électrique

Le soudage par résistance

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920

1.3 Définition de soudage

La soudure est un assemblage permanent de 2 pièces métallique, caractérisé par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler. la soudure peuvent s'effectuer :

- Sans pression extérieure, les bords étant portés à la température de fusion, et nécessitant Le plus souvent l'introduction dans le joint d'un complément de métal (métal d'apport) déposé en une ou plusieurs pièces.

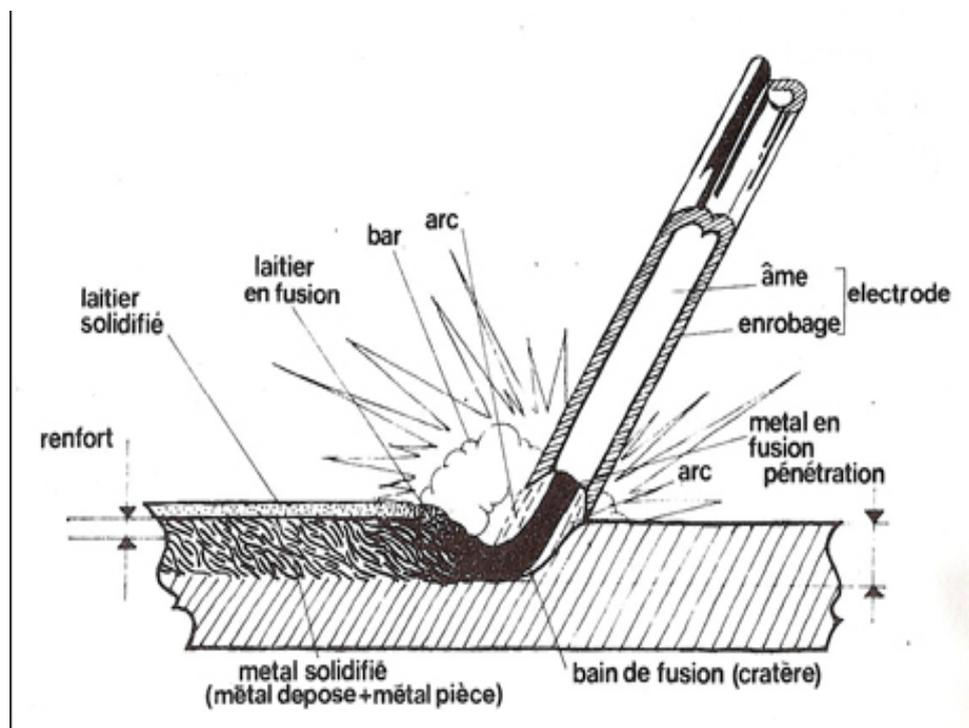


Figure 1.1 : Soudage sans pression

- Avec pression extérieure une température qui peut atteindre également la fusion.

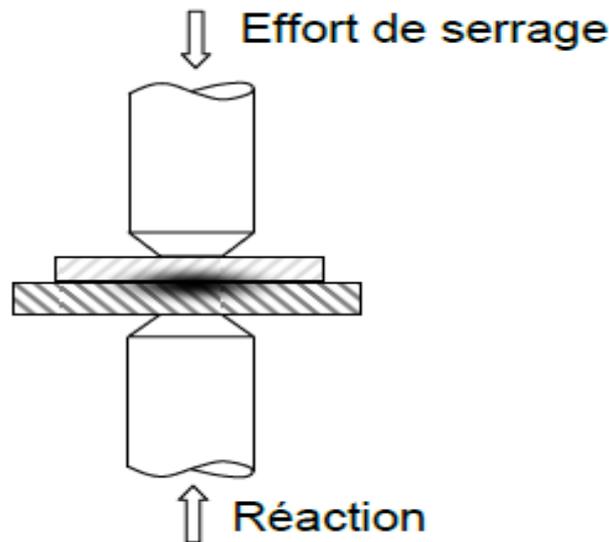


Figure 1.2 : Soudage avec pression

Le métal de base forme les parties à assembler de même nature ou de nature différentes. Le métal d'apport, identique ou différent du métal de base, peut intervenir dans l'élaboration du joint. Le métal du joint, comprenant le métal déposé et les fondus qui sont dilués ; certains éléments peuvent diffuser dans les parties. Une zone plus ou moins étendue et adjacente de plus au-delà du joint peut être thermiquement affectée et subir des modifications de structure [2]

1.4 Procédé de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenue par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie [3].

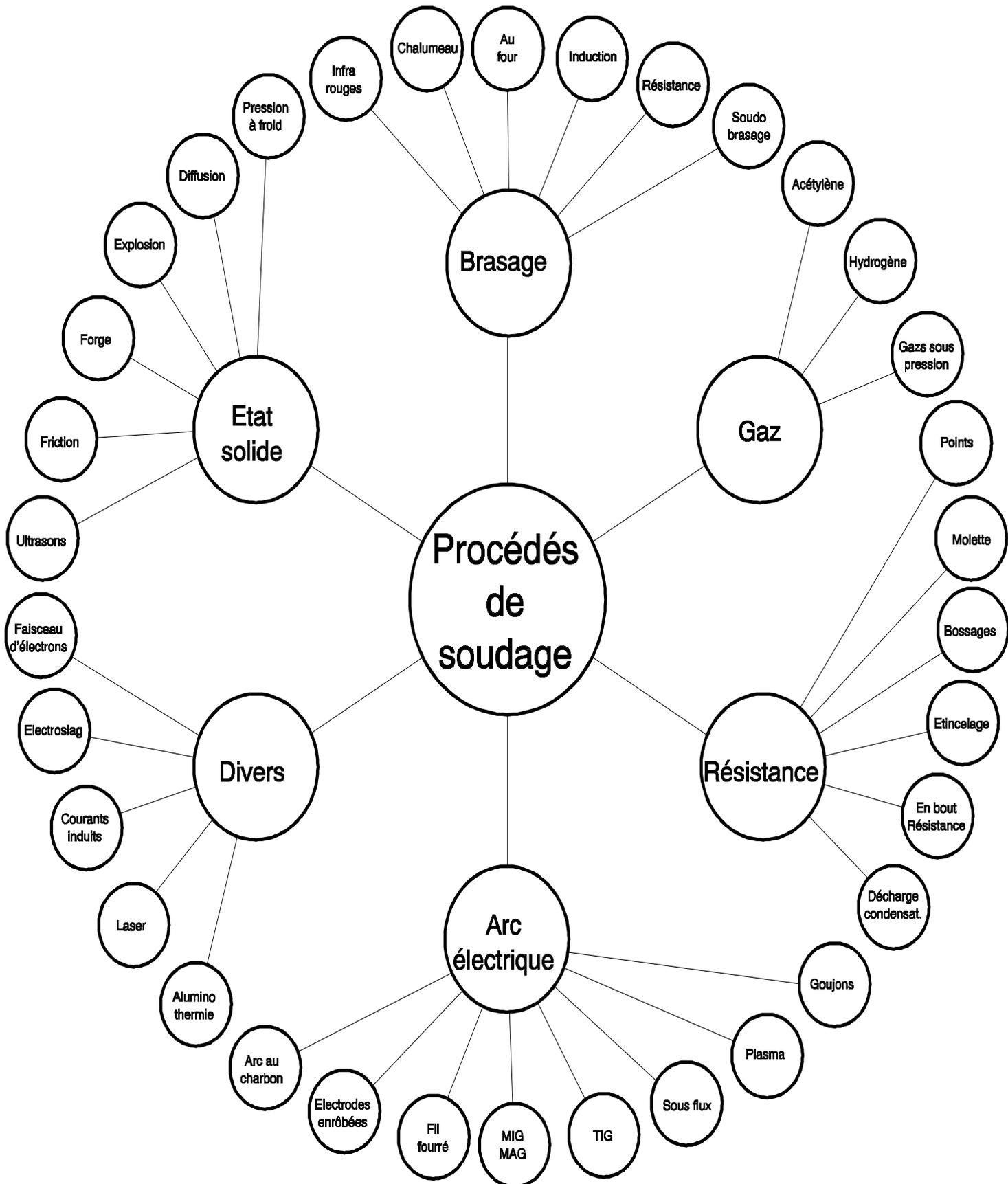


Figure 1.3 : Procédé de soudage

1.5. Principaux procédés

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

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

[4].

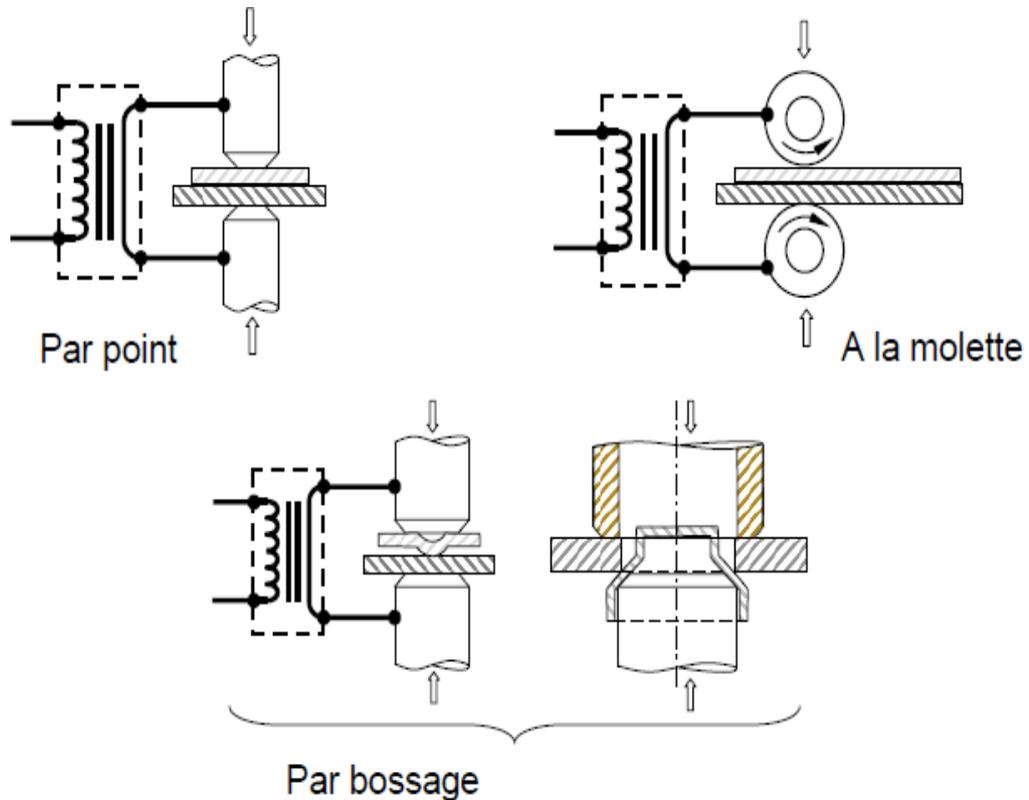


Figure 1.4 : Principaux procédés de soudage par résistance

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

- 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 faible = sécurité – éviter apparition arc électrique (quelque volts)

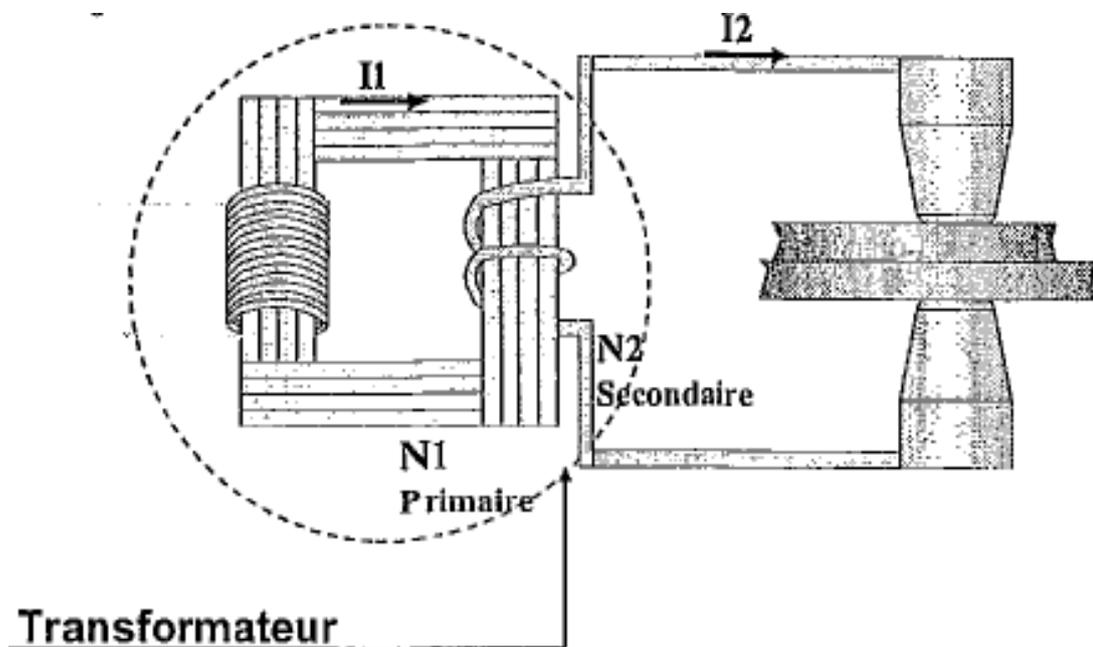


Figure 1.5 : Transformateur de la soudure par résistance

- 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 (5)

2.4. Les avantages et les Inconvénients

Avantages

- Soudure propre et de très haute qualité (face d'aspect)
- Pas de déformation des pièces soudées
- Assure la continuité métallique et étanchéité
- Rapide (5ms à 3 secondes), efficace, peu polluant
- Autogène nécessite pas de produits d'apports
- Positionnement géométrique, avec serrage des éléments à assembler
- Délimitation des zones thermique affectées.
- Pertes énergétiques plus faibles.
- Tenue mécanique du point améliorée et répétitive.

Inconvénients

- Assemblage par recouvrement
- Epaisseur limitée à la capacité machine
- Vu le coût élevé, les applications sont limitées, en principe, un poste à souder ne peut réaliser qu'un seul type de soudage
- Soudure collée
- Projection en métal en fusion
- Usure anormale des fusions

2.5. 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 (2)

2.6. Domaine d'application

Les assemblages par résistances sont très répandus dans différentes industries et vu l'évolution industrielle, le besoin de ce type d'assemblage est nécessaire. Les applications du procédé par résistance sont très répandus dans l'industrie automobile, l'électronique, l'industrie ménagère (radiateur, armoire métallique, grille, etc.). A titre d'exemple on trouve plus de 3000 points de soudure (soudage par point) dans un véhicule.



Figure 1.6 : Exemple d'applications du soudage par point

Chapitre 2 :
PROCEDE DE
SOUDAGE PAR
POINT

1. Le Soudage par point

Introduction

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

1.1. Définition

Le soudage par point est un procédé de soudage sans métal D'apport dit autogène. La fusion du métal localisé entre les tôles à assembler, est obtenue par effet joule (courant électrique de Quelques kilo ampère) .Les pièces à souder sont superposée et sont serrée localement entre deux électrodes en alliage de cuivre, 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.(6)

Désignation

Française : SP (Soudage par Point)

Américaine: RSW (Resistance Spot Welding)

Numérique : 21

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(p) : 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 :

$$R(T_2) = R(T_1) \cdot (1 + \alpha (T_2 - T_1)) \quad (3)$$

R : résistance (Ohm) , T: température (k) , α coefficient de température : (K⁻¹)

1.2. Principe du procédé

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

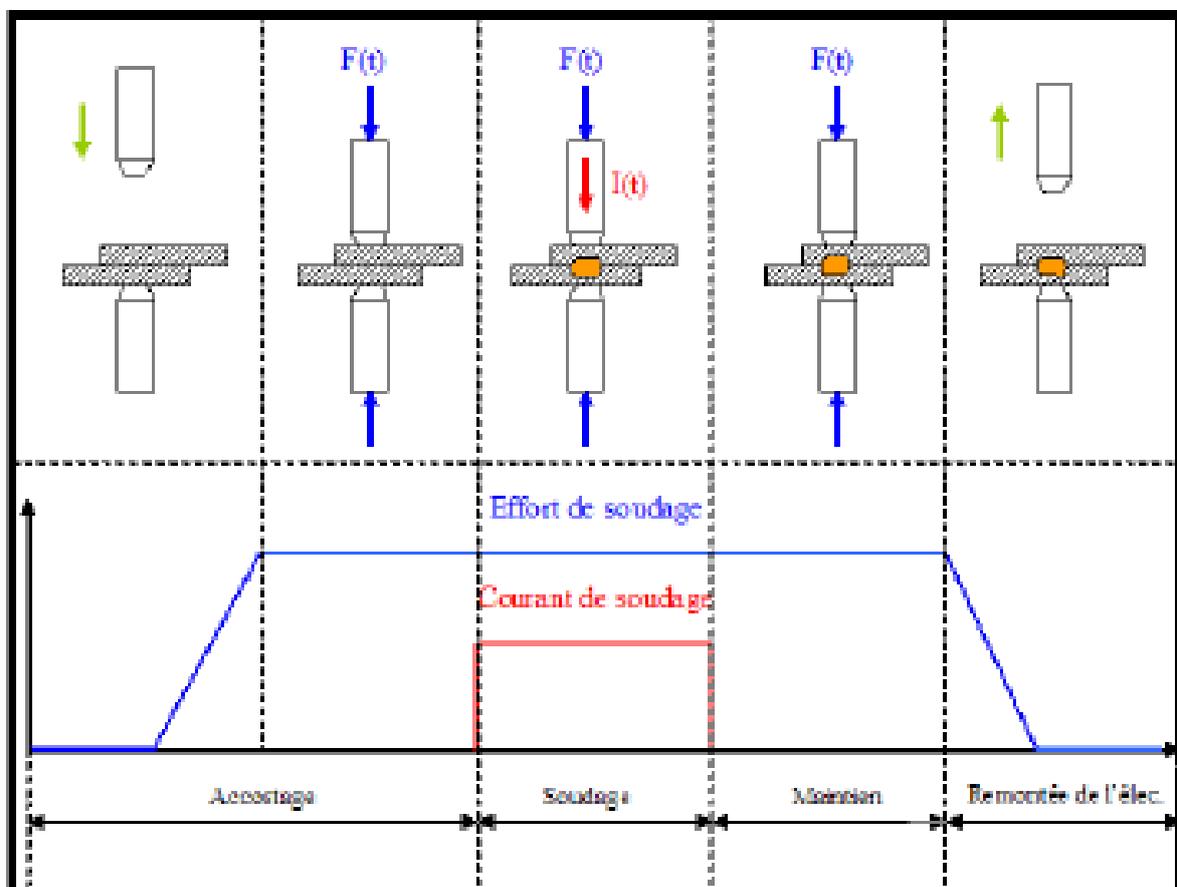


Figure 2.1 : Les phases de soudage par point

Un cycle de soudage schématisé sur la figure : 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 terme de variation de la résistance électrique, il Ya deux étapes consécutives pour l'apparition de la soudure. Au début du soudage, la résistance de contact entre deux tôle est plus importante que celle de la tôle a base température. Par conséquent, 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 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 métallurgique 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 remonté de l'électrode supérieure, l'ensemble des tôles peut alors translater afin de procéder a un nouveau soudage par point.[7]

1.3. Constitution d'une machine soudée par point

- 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. [8]

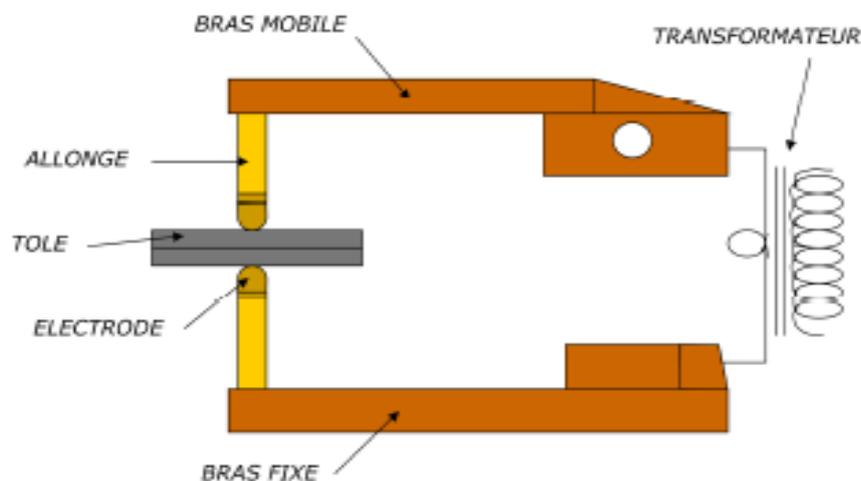


Figure 2.2 : Mécanisme du soudage par point

1.4. Paramètre du procédé

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

- **Effort de soudage** : l'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder dans la pratique. L'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire. Mais dépend des systèmes de mise en charge de soudeuse. (fig2.2)
- **Intensité de soudure** : l'intensité de soudage est considérée comme un paramètre important pour engendrer l'énergie dissipé. 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. (MFD-1000HZ)
- **Temps de soudure** : intervient pendant la phase de chauffage .l'ordre de grandeur typique est de quelque dixièmes de secondes, le temps de soudage dépend de la nuance d'acier et son épaisseur. Dans certain cas de soudage de tôle epaisse.et haute résistance mécanique .le courant pulsé est souvent à appliquer afin de stabiliser le développement du noyau .cette pulsation comporte le temps de chaude séparé par le temps de maintien ou le temps de froids .le nombre de cycles supplémentaire pour le poste traitement thermique est souvent adapté à l'assemblage de tôle haute 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 Détermination de ces paramètre se base probablement sur la norme française (NFA 87-001) ISO-18278/2
- **Electrode** : Les éléments sont des éléments essentiels pour ce procédé .un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la Fig 2.3 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 électrode 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.

- **Electrique** : la force intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité thermique
- **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'électricité donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique. L'alliage de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr et Cu-Cr-Zr) est très répand pour le matériau de l'électrode grâce à ses performances en tenus mécanique à chaud et la bonne conductivité électrique et thermique [6]

Diamètre de la face active d'électrode $d = 2 e + 3$ (mm) (5)

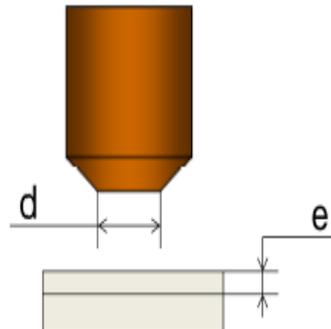


Figure 2.3 : Electrode de la soudure par point

La géométrie de l'électrode est variable selon l'application. Le profil de face active et le diamètre l'électrode influence directement sur le procédé

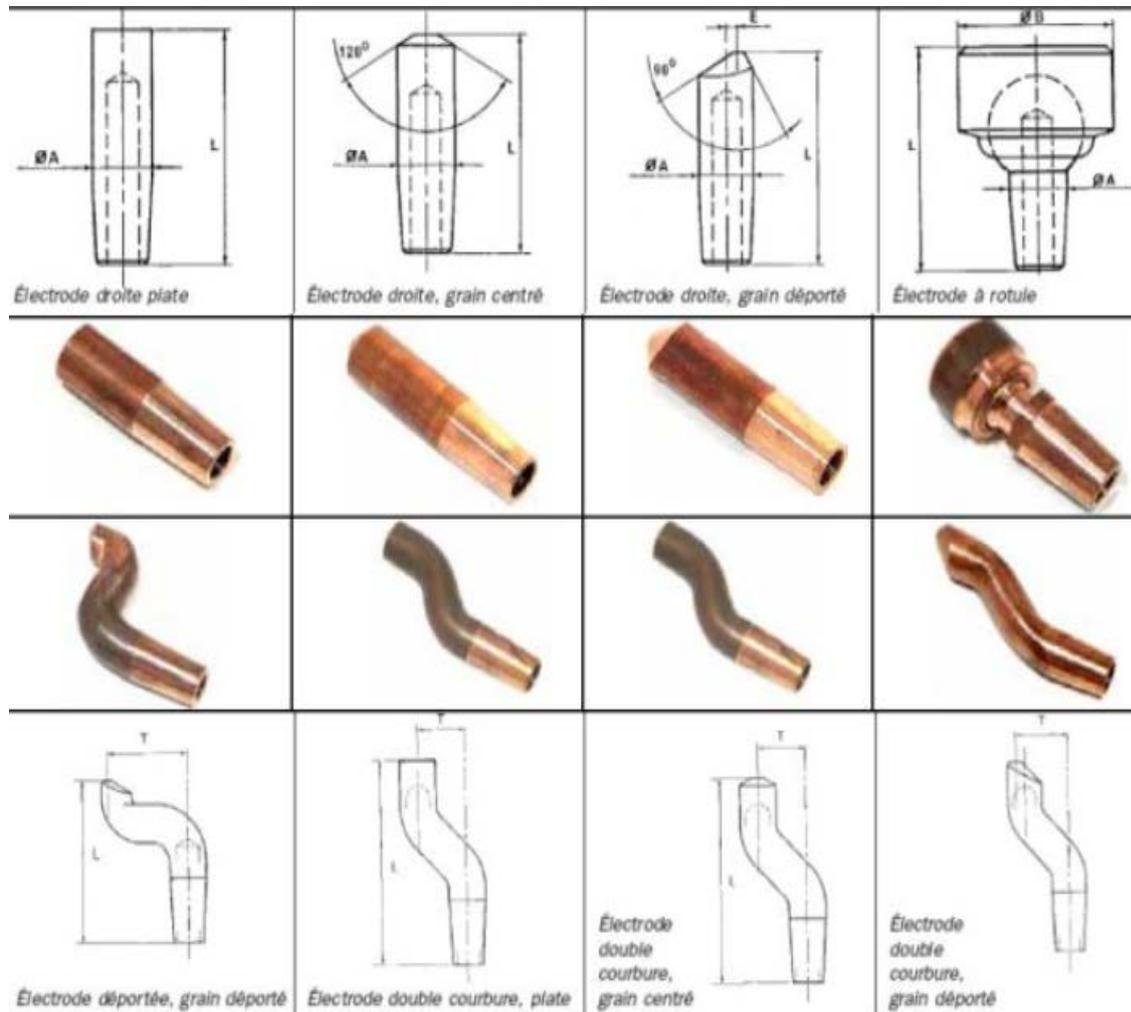
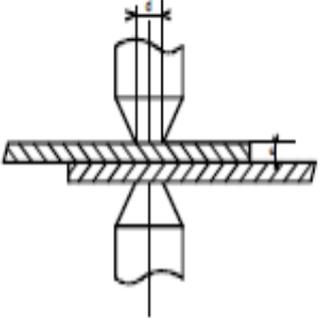
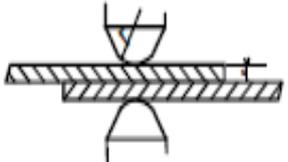


Figure 2.4 : Différents formes des électrodes de la soudure par point

Tableau 2.1 : Paramètres de soudage par point

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		 <p>Soudage d'aciers doux</p>
1	6	8800	0,15		
1,5	6,5	9800	0,23		
2	8	11800	0,31		
3	11	14900	0,60	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	
10	21	40000	5	5900	
0,5	4	4000	0,06		<p>Soudage d'aciers inoxydables</p>
1	5	7800	0,10		
1,5	6,5	10700	0,16		
2	8	14000	0,24		
3	9,5	16500	0,34		
0,5	r = 50	18000	0,08		 <p>Soudage d'alliages d'aluminium</p>
1	75	30700	0,14		
1,5	75	35000	0,27		
2	100	42000	0,28		
3	100	63000	0,30		

1.5. Mécanisme de formation de la soudure

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

$$Q = \int R.I^2 dt \tag{6}$$

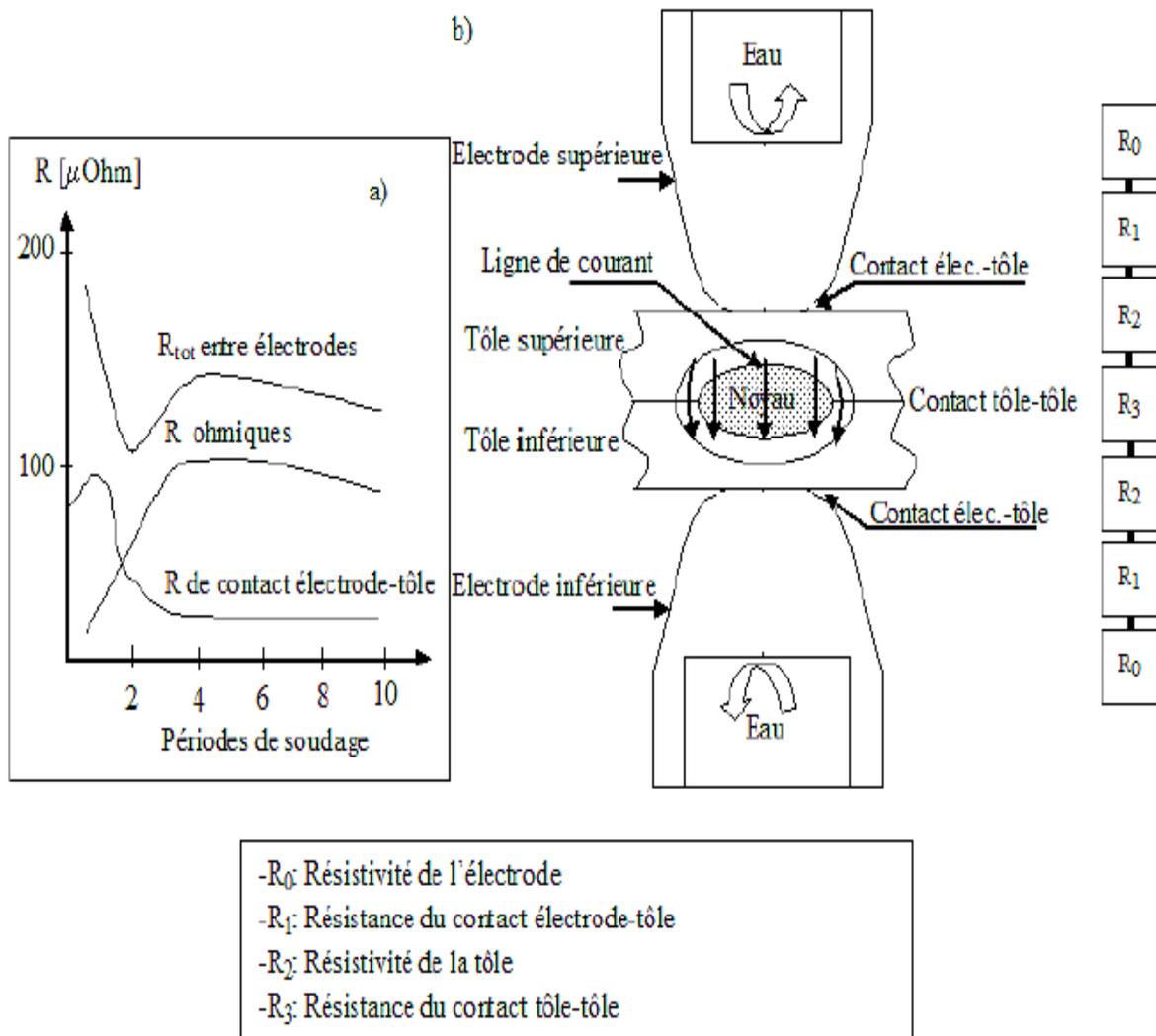


Figure 2.5 : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point

1.6. Interaction Electrique, Thermique, Métallurgique, Mécanique :

La difficulté de la compréhension du mécanisme de la formation de la soudure en soudage par résistance par point consiste, en la connaissance des différents états électriques, thermiques, métallurgiques et mécaniques et leurs interactions [6]

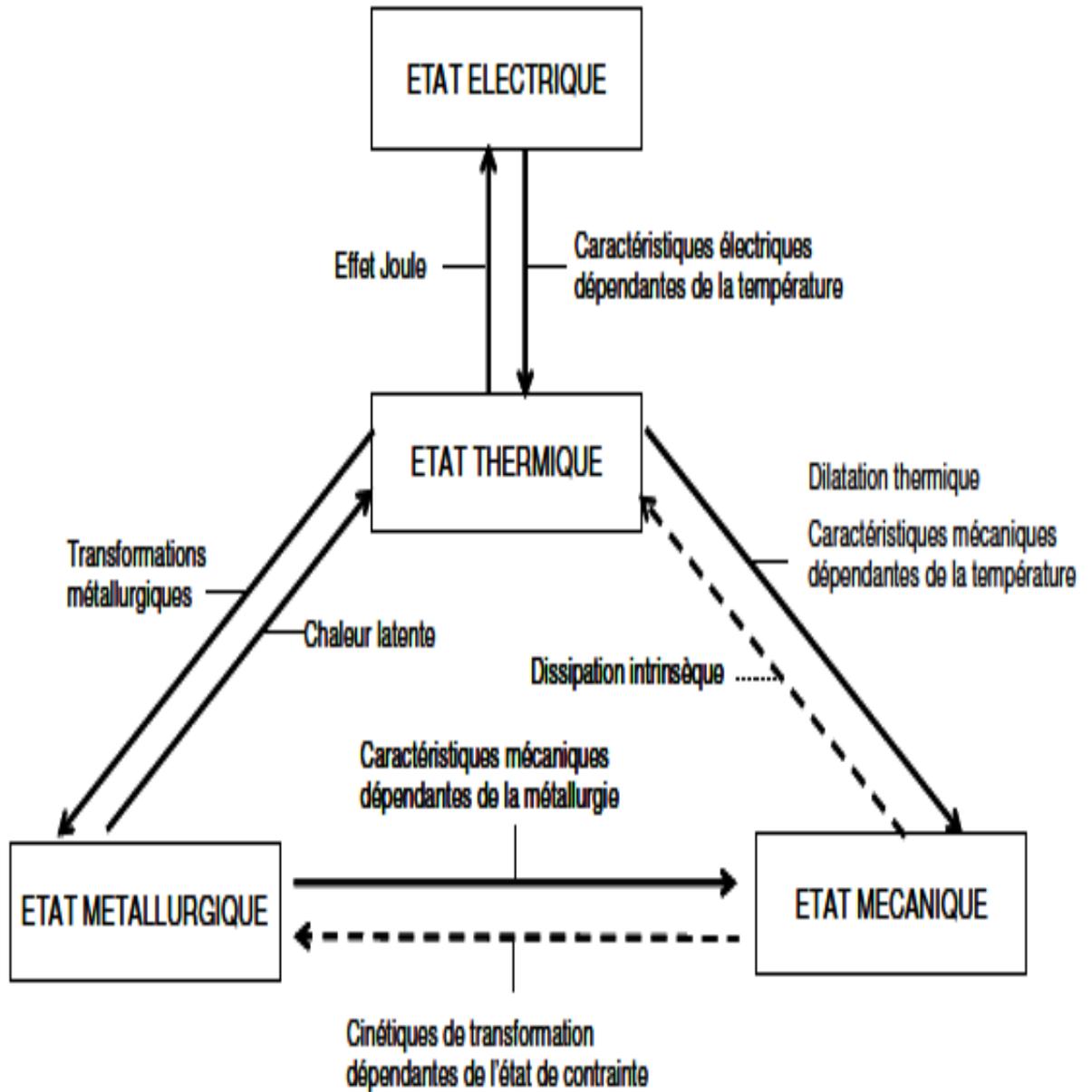


Figure 2.6 : Schéma des interactions entre les états électrique, thermique, métallurgique, mécanique

1.7. Le Point Soudé

a) Géométrie

La figure 2.7 présente le schéma d'un point soudé selon une coupe. La géométrie d'un point soudé présente trois particularités :

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

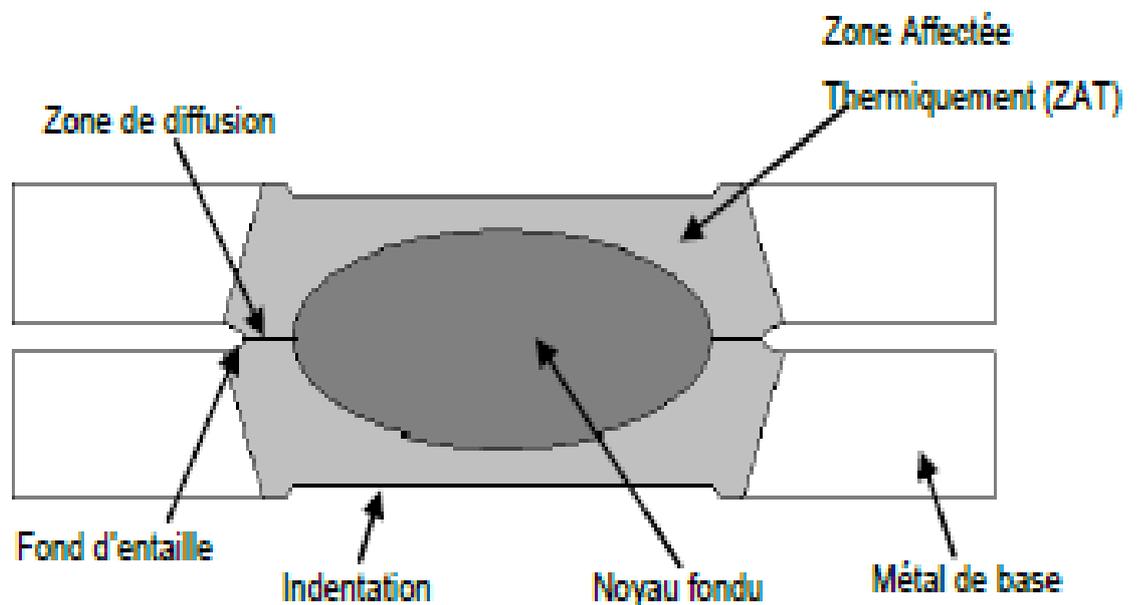


Figure 2.7 : Schéma d'un point soudé selon une coupe.

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

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, illustrées 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 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 remise 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 ∞ et de l'austénite ¥) conduit à des modifications importantes de la microstructure.
- La zone à grain fins **CFZAT** : zone de température entre 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 bainite-martensitique 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 obtenu après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.
- Zone fondu **ZF** : outre une fine zone de liaison (difficilement observable) constitué par la zone semi-solide.la dernière zone est la zone fondue, ou la température a dépassé la température de liquidus.la microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau. On peut observer de la ségrégation inter dendritique.
- Il apparait clairement que les profondes modifications de la microstructure du métal de base autour du point soudé peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la tenue mécanique du point.[9]

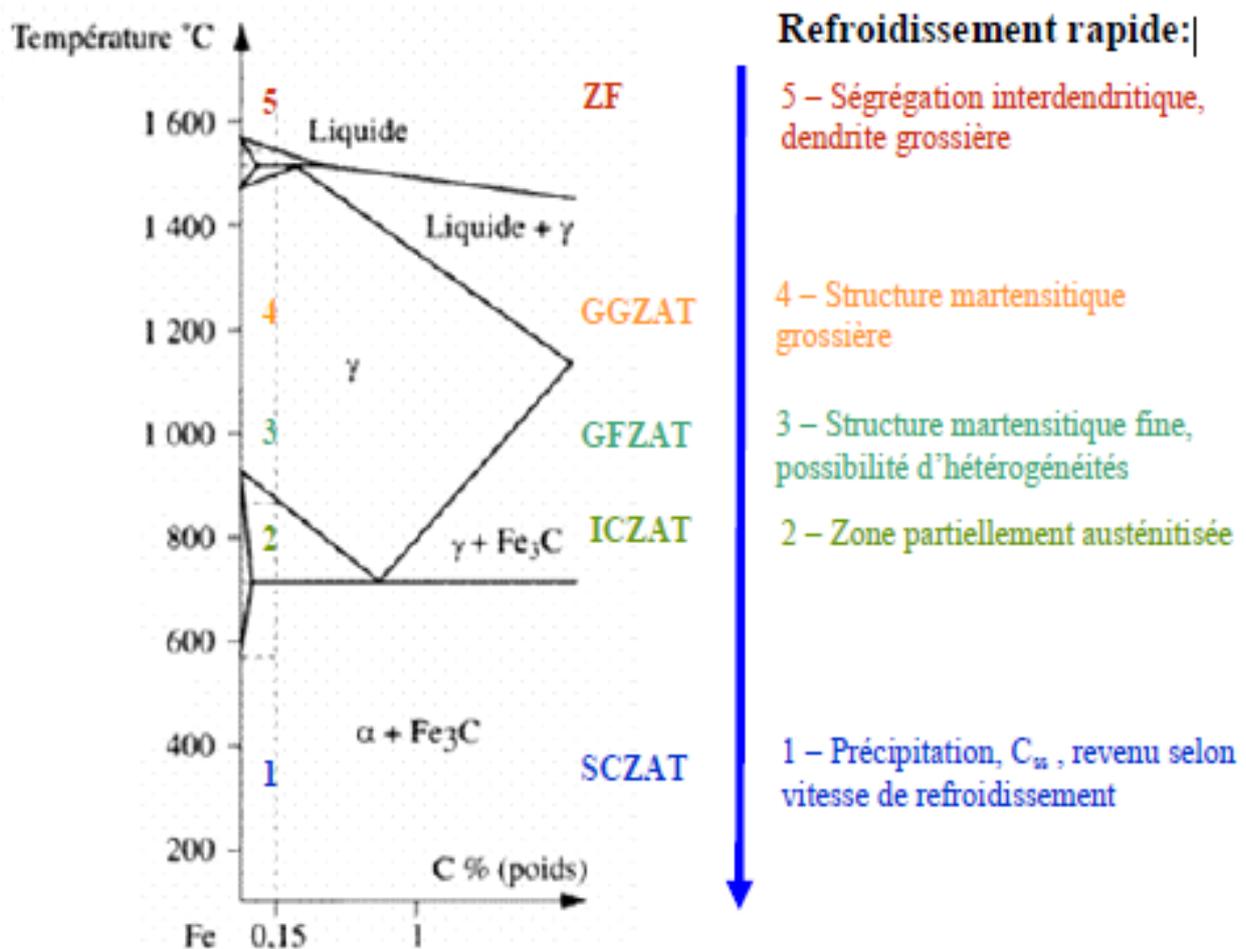


Figure 2.8 : Microstructures générées par l'opération de soudage

2. 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 identique).elle peut être éventuellement hétérogène (soudobrasage ou soudage de métaux différents).

Les plus gros écueils 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 priori la soudabilité opératoire des matériaux

$$C.A.S.P.R. = \frac{\text{Resistivité}}{\text{temps de fusion} \times \text{conductivité thermique}} \quad (7)$$

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

L'aluminium = 0.76 Nickel = 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.

2.1. Soudages des aciers doux

L'acier est un alliage de fer et de carbone (à dosage de carbone variable).

Le fer est un métal à structure cristalline changeante en fonction de la température. Le carbone est un semi-conducteur réfractaire à solubilité variable dans le fer, en fonction de la température.

Une opération de soudage par résistance libère intégralement le carbone, mais suivant la quantité et compte tenu de la brièveté du refroidissement, la dilution de celui-ci ne s'effectue pas harmonieusement dans les différentes phases allotropiques parcourues. Voir le Tableau 2.2

Tableau 2.2 : Paramètre recommande pour le soudage de l'acier doux

Valeurs communes à toutes les catégories de soudure par points		Réglage pour obtenir des soudures de catégorie A				Points de fatigue				Points peu sollicités				Tôlerie industrielle courante				E													
e : mm	D :	d :	P : mm	L : mm	Points très sollicités*				Soudage rapide				Soudage rapide				Moblier - Ventilation														
					T _≡	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T _≡	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T _≡	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T _≡	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf							
0,25	9,5	3,2	6,4	9,5	3/4	91	4600	3,3	106	4	59	3700	3,2	91	12	29	3000	2,8	73	18	30	3600	2,5	60	20	30	3400	2,5	50		
0,5	9,5	4	9,5	11	5	130	6100	4,3	240	8	91	5100	4,1	208	18	48	3000	3,5	177	35	30	4000	2,5	110	60	30	3500	2	80		
0,8	9,5	4,8	12,7	11	6	180	8000	5	440	12	125	6300	5,1	385	24	61	4700	4,6	358	40	40	4300	3,5	195	65	35	3900	2,5	160		
1	12,7	5	19	12	8	230	9500	5,8	610	17	163	7500	5,6	556	31	81	5600	5,3	536	47	60	4800	4	360	75	40	4000	3	250		
1,3	12,7	6	22	14	10	295	10500	6,3	825	20	186	8000	5,8	770	35	93	6100	5,6	725	53	75	5200	4,5	400	80	50	4200	3,5	300		
1,6	12,7	6,4	27	16	11	362	11600	6,9	1060	24	227	9000	6,6	975	40	113	6800	6,4	929	60	90	5600	5	670	90	60	4500	4	480		
2	16	7	35	17,5	17	498	13300	7,9	1463	30	293	10400	7,6	1370	48	147	7900	7,1	1314	75	110	6400	6	1000	110	80	5000	5	740		
2,5	16	8	40	19	21	590	14700	8,6	1865	36	358	11400	8,4	1766	55	177	8800	7,9	1696	87	140	7200	7	1400	130	110	5500	6	1100		
2,8	16	9,5	46	20	24	725	16100	9,4	2406	41	435	12200	9,1	2293	60	217	9500	8,9	2197	92	165	7600	7	1650	140	120	5800	6	1200		
3	16	9,5	50	22	25	815	17500	10,2	3128	50	516	12900	9,9	2944	65	259	10000	9,4	2786	100	170	8000	8	2200	150	120	6000	7	1700		
3,5	20	10,3	57	28	34	925	18200	11,2	3880	60	635	14100	11,4	4200	85	280	10600	10,2	3380											3,5	
4	20	11	66	32	41	1030	18900	11,9	4750	70	635	14100	11,4	4200	104	317	11000	10,7	3900	4											
4,3	20	11,1	76	38	50	1120	19500	12,9	5200	89	715	14700	12,2	4870	126	358	11400	11,4	4420	4,3											
4,7	20	11,9	82	41	60	1255	20200	13,7	6050	106	800	15300	13	5450	152	400	11750	11,9	5040	4,7											
5	20	12,7	88	44	70	1320	20900	14,7	6700	122	890	15900	13,7	6100	175	440	12200	12,7	5600	5											
5,5	25	13,3	98	47	79	1450	21600	15,5	7300	138	970	16450	14,5	6680	197	485	12500	13,2	6120	5,5											
5,8	25	13,5	108	54	88	1560	22300	16,5	8090	155	1040	17000	15,2	7350	221	520	12900	13,2	6120	5,8											
6,3	25	14,3	115	57	96	1750	23000	17,3	8550	170	1140	17600	16	7950	241	570	13200	14,5	7230	6,3											
6,6	25	15	121	60	106	1850	23600	18	9300	185	1230	18100	16,8	8500	265	617	13600	15	7770	6,6											
7	25	15	133	66	116	2000	24400	19	9850	205	1310	18700	17,5	9000	291	650	14000	15,7	8370	7											
8	30	16	146	73	135	2400	25700	20,8	10600	235	1480	19600	18,8	10000	337	740	14800	17	9000	8											
Pénétration du noyau (p) %						70 - 75		70 - 78		55 - 65																					
Indentation (a) % de e						3 à 4,5		5 à 7		8 à 10																					
Soulèvement (S) % de e						2,5 à 5		4 à 8		7 à 10																					

T temps de soudage en périodes
 E effort net sur la pointe d'électrode
 I intensité du courant d'effet Joule nécessaire
 d' diamètre du noyau de point obtenu
 R résistance du point à l'effort de traction cisaillement

Au niveau élémentaire du soudage et sans entrer dans la normalisation des aciers :

- A- Pour des aciers dont la teneur en carbone est inférieure ou égale à 0.2 %, c'est-à-dire pour les aciers doux ou bas carbone le soudage par résistance perturbe peu la métallurgie de ces aciers .
- B- Pour des aciers dont la teneur en carbone est limitée de 0.2 % à 0.3 % au plus c'est-à-dire, pour acier de constructions, ancienne appellation :mi dure, le soudage par résistance peut perturber la structure métallurgique et générer des concentrations de carbone, surtout en processus rapide.

On peut s'affranchir de ces perturbations métallurgiques par l'application sur les machines de traitements thermiques appropriés.

a- Préchauffage :

Outre l'amélioration de ductilité facilitant le préchauffage constitue une réserve calorifique qui peut, dans certains cas ,ralentir le refroidissement et atténuer les effets de trempe

b- Postchauffage :(suite à une trempe)

Le forgeage après fusion est alors appelé :temps de trempe et sans relaxation de l'effort aux électrodes ,on applique,avec dosage de temps et d'intensité :

- Un cycle de recuit si la remontée de température dépasse le premier palier de transformation $500^{\circ} < T < 750^{\circ}$.

c- **Les aciers dont la teneur en carbone est supérieure à 0.3 %** c'est-à-dire les aciers dit naturellement durs sont perturbés par l'application du soudage par point les structures trempées ne peuvent être régénérées par traitement thermique sur machine.ils sont à considérer comme non soudables

d- **Les aciers faiblement alliés :** Aciers à caractéristique mécanique relevées ou propriétés particulières,par l'adjonction d'un autre métal pour moins de 5 % de l'analyse. Elements d'addition :cuivre-vanadium-titane-manganèse..... Certains sont soudables avec ou sans traitement d'autre ne sont pas soudables.

e- **Les aciers écrouis à froids :** La déformation à froid d'un réseau cristallin laisse subsister parfois des tensions internes qui renforcent les propriétés mécaniques de l'acier cette amélioration par écrouissage disparaît en cas d'échauffement prolongé (cas de l'acier TOR)

- f- Les aciers fortement alliés : un des éléments d'alliage a été ajouté pour plus de 5 % de l'analyse

Ex : acier inoxydable et réfractaire au nickel chrome

2.2. Soudages des tôles revêtues

Revêtement le plus courant :

- **Zinc** : - Acier galvanisé chaud
- Acier électro-zingué à froid
- **Etain** : Fer blanc
- **Aluminium** : Tôle aluminée

A- ZINC

Tôle galvanisée à chaud : procédé ZINZIMIR

Trempe : charge en zinc au m^2 (couche de liaison Fe /Zn)

IDENTIFICATION :

- Galvanisé à fleurage : 200 à 500 g/m^2
- Galva skinpassé : 200 à 250 g/m^2
- Galva régularité par soufflage : charge < 200 g/m^2
- Soudage par point possible et préconisé en mode rapide pour fiabilité des points et durée de vie des électrodes

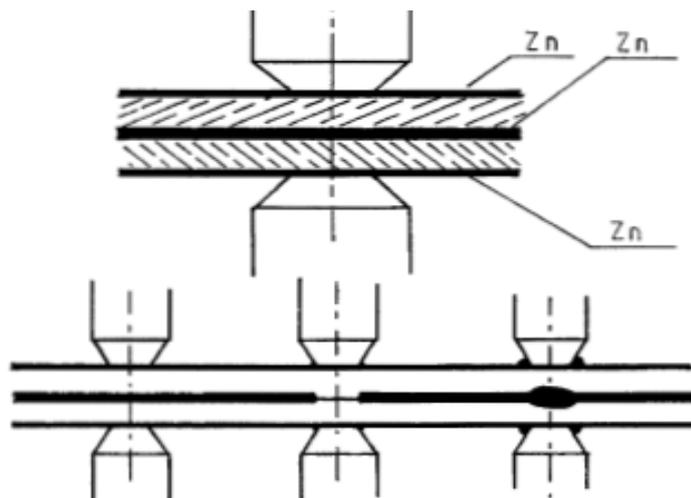


Figure 2.9 : Soudage par point des tôles revêtues

La dégradation de la qualité du soudage diamètre de noyau par rapport à la pollution de l'électrode implique un soudage en mode rapide

B- Origine de la dégradation du soudage dans le temps :

- a- Régime thermique et cadence de soudage.
- b- Conception géométrique des électrodes.
- c- Nature du fluide de refroidissement utilisé.
- d- Débit du fluide de refroidissement.
- e- Température du fluide de refroidissement et de la pointe d'électrode.
- f- Nature de l'alliage utilisé pour la confection de pointes d'électrodes.
- g- Mises rapportées.

2.3 Soudage des aciers inoxydable

A- Les structures ferriques :

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

B- Les structurés austénitique :

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.

Remarque :

- 1) La surface active des électrodes sera polie aussi que possible.
- 2) L'arête vive de la section tronconique d'électrode sera supprimée, rayon de 0.5mm.
- 3) 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.
- 4) Pour des épaisseurs de 3mm et plus on préconise le soudage par impulsions. [10]

Tableau 2.3 : Paramètre de soudage par points de l'acier inoxydable 304L

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

Chapitre 3 :
**ETUDE
EXPERIMENTALE**

Introduction

Le procédé de soudage est réalisé par une machine ARO FIX - MC-. Des tôles de 2 mm d'épaisseur, l'acier inoxydable 304L étudié (Tableau 1.2.3) sont soudées avec des électrodes de 7 mm de diamètre face active et un effort aux électrodes de 7 bar et 8 bar . Dans un circuit changeable en trois cycles 10, 11, 13 (s) et une intensité variable entre 10-11-12-13-14-15 (ka).

1. Matériau d'étude 304L : AISI 304L – DIN 1.4307-X2CrNi189 AFNOR Z3CN1909

Un acier inoxydable est d'après la définition de la norme NF EN 10020 c'est un acier contenant aux minimum 10,5% de chrome et aux maximum 1,2 de carbone, il existe 5 famille selon la classification des structures cristalline

- Acier inoxydable martensitique.
- Acier inoxydable a durcissement par précipitation.
- Acier inoxydable ferritique.
- Acier inoxydable austéno -ferritique .
- Acier inoxydable austénitique.

De cette dernière famille (austénitique) appartient notre métal à étudier 304L, il a plusieurs spécifications, une résistance à la corrosion moyenne, intermédiaire entre celle du 302 et 316 se forme facilement à froid (pliage, étampage, emboutissage.) Cependant son taux d'écrouissage très important nécessite des équipements adaptés. L'écrouissage a pour conséquence de rendre cet acier légèrement magnétisable. Lorsque cet acier est maintenu à des températures entre 500 °C et 900 °C, il y a risque de formation de phase, aux conséquence nocives pour l'aptitude à la corrosion .un recuit consécutif sera alors nécessaire pour dissoudre cette phase suivi d'un refroidissement rapide pour éviter toute nouvelle précipitations .une trempe n'est nécessaire que pour les pièces de grande dimension, il aisément soudable par tous les procédés et aucun traitement thermique n'est nécessaire après soudage. Les soudures devront être décapées mécaniquement ou chimiquement puis passivées il est utilisé pour un grand nombre d'application, industrie chimique et alimentaire, visserie, matériel de transporte [11].

1.1 Caractéristiques chimiques et physiques

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	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Module Elastique (GPa)	Coefficient dilatation				
					100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
7,90	0,73	500	15	200 à 20°C	16	16.5	17	17.5	18

1.2 Caractérisation mécanique

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de ce matériau, des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction 600 KN (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 2a. Trois éprouvettes ont été réalisées pour ce type d'essai.

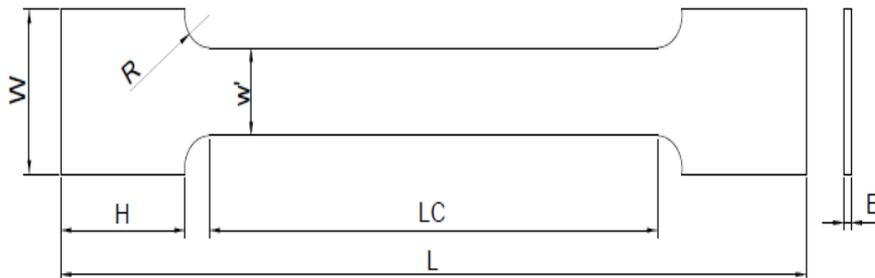


Figure 3.2a : Dimension des éprouvettes de traction

Avec :

- W = 30 mm** (largeur des têtes)
- w' = 16 mm** (largeur de la section réduit)
- L = 180 mm** (longueur total)
- Lc = 108 mm** (longueur calibrée)
- E = 2 mm** (épaisseur de l'éprouvette)
- H = 30 mm** (longueur des têtes)
- R = 6 mm** (rayon)



Figure 3.2b : Eprouvettes de traction réalisées en 304 L

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements montrés sur la figure 3.3 Les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure 3.4

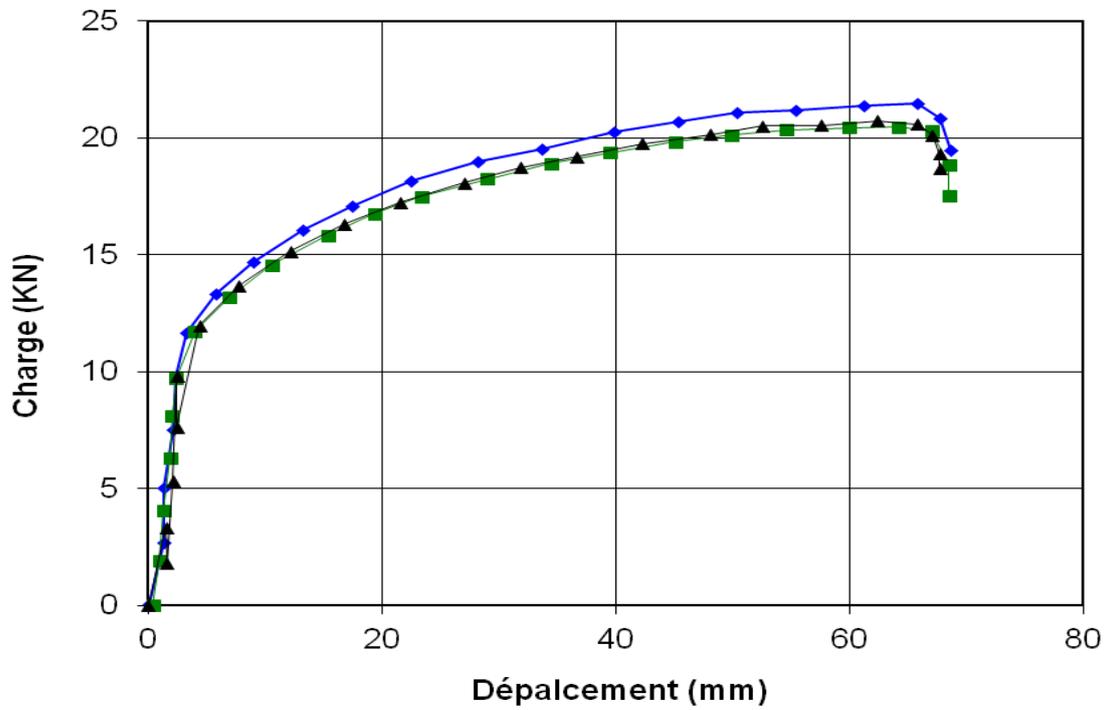


Figure 3.3 : Courbe De Traction Charge / Déplacement

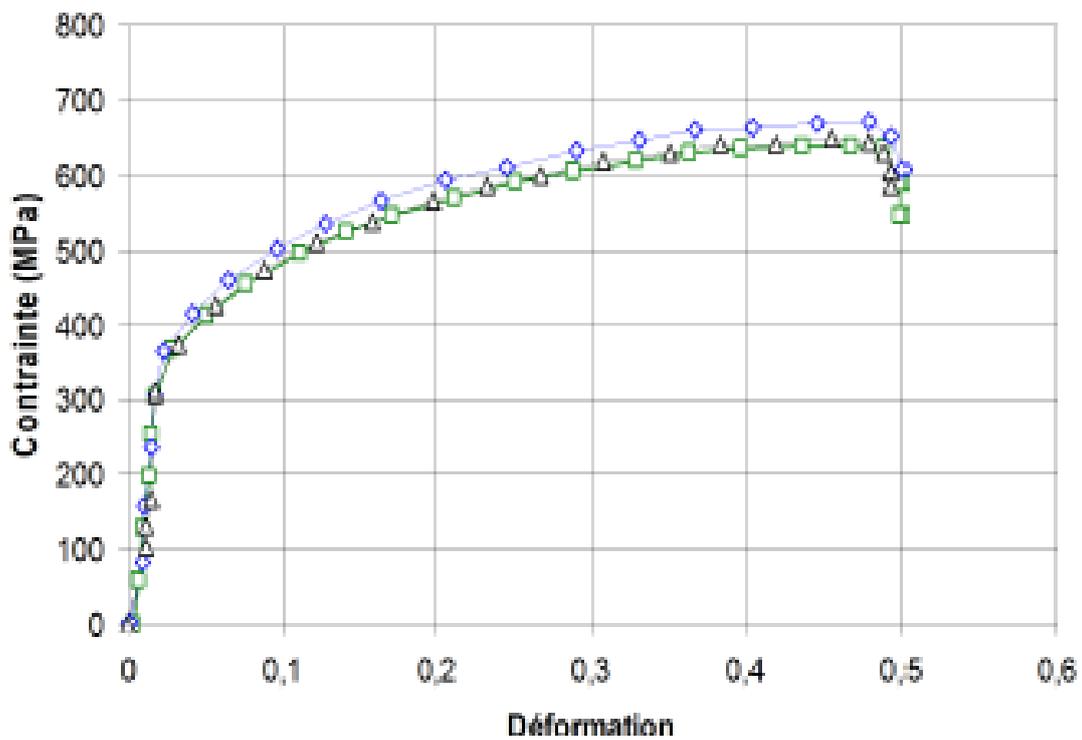


Figure 3.4 : Courbes Conventiennelles Contraintes / Déformations

Tableau 3.3 : Caractéristique mécanique de l'acier 304L

	E (GPa)	σ_e (MPa)	UTS (MPa)	A %	Dureté HRB
Données fournisseur	200	310	520-670	45	80 max
Résultats Expérimentaux	190	336	655	43.2	60

1.3 Choix du paramètre de soudage par point pour 304L

Il est difficile de donner un tableau de réglage précis des paramètres. Les réglages de pendents 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.

Les paramètres du soudage par point est essentiellement :

- L'effort de serrage F (bar)
- L'intensité du courant KA
- Le temps de maintien T (cycle)

L'assemblage réalisé par soudage par point entre deux plaque en acier 304L est montré par la Figure 3.5 la dimension 'A' représente la longueur de superposition par recouvrement (à clin) la Machine utilisé pour le soudage par point est de type "*ARO FIX TYPE MC*" (Figure 3.7).

Les paramètres de soudage de l'acier 304L sélectionné pour le plan expérimental selon la longueur de recouvrement sont présentés sur le tableau 3.4.

Les essais de dureté ROCKWELL HRB sont effectués sur les éprouvettes assemblées selon la procédure montrée sur la figure 3.8 et 3.9.

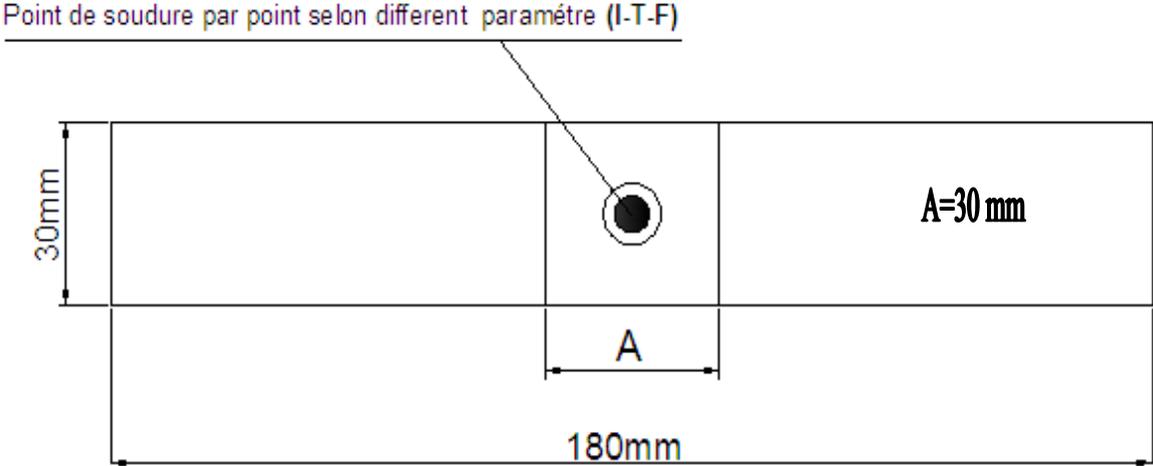


Figure 3.5 : Asemblage soudé par point des éprouvettes 304L



Figure 3.6 : Exemple des pièces assemblées par point des éprouvettes en 304L pour une intensité de 13 Ka et un effort de 7 et 8 bar

Tableau 3.4 : Les différents essais de soudage par point pour les éprouvettes en acier inoxydable 304L

N°	EP (mm)	Superposition (mm)	Ø électrode (mm)	Intensité (KA)	Temps Cycle (S)	Effort (bar)
01	2	30	7	10	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8
02	2	30	7	11	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8
03	2	30	7	12	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8
04	2	30	7	13	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8
05	2	30	7	14	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8
06	2	30	7	15	10	7
					11	7
					13	7
					10	8
					11	8
					13	8

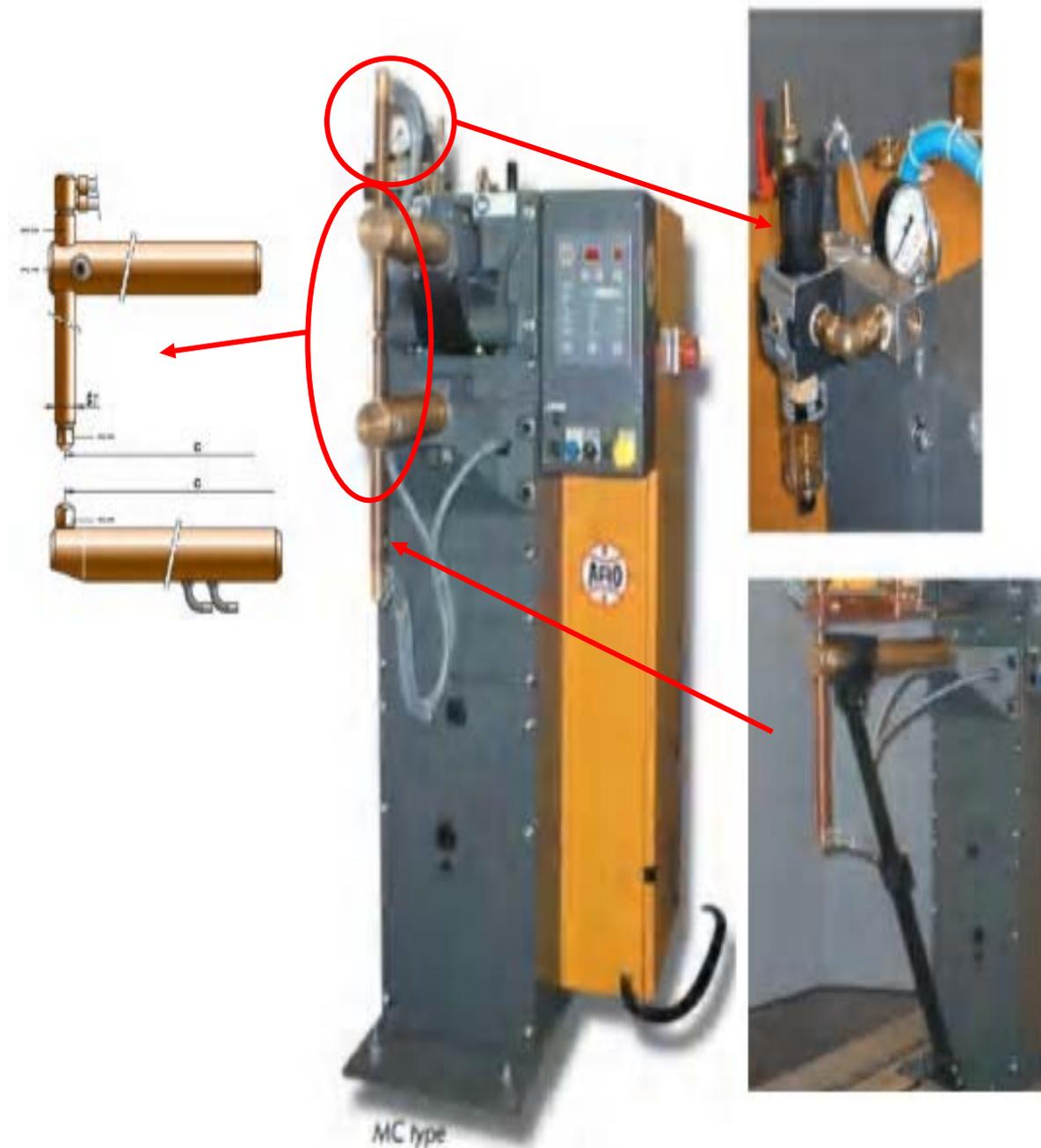


Figure 3.7 : Machine de soudage par point ARO FIX type - MC

2. Fiche technique machine de soudage par point ARO Fix type MC

- 2 puissances de transformateur de 30 et 50 kVa en version monophasé alternatif 50 Hz
- Machine équipée de porte électrode standards et d'un sectionneur électrique.
- Machine intégralement refroidie par eau (transformateur, jonctions des secondaires, porte électrode et électrode)
- Vérin simple cours de 110 mm

- Ouverture entre électrode réglable de 0 à 75mm pour PU (profondeur utile)
- Effort de serrage du vérin à l'électrode à 10 bars
- Machine fonctionnant au coup par coup ou à la volée
- Réglage de l'intensité du courant de soudage par déphasage constant ou en régulation adaptative selon de la CPS (commande programmable de soudage)
- Porte électrode standard, porte-grains standard droits, inclinés, ou pour soudage en bout.
- Capteur analogique de pression
- Programme de pression à régulation manuelle
- PE (porte électrode) inférieure sur colonne permettant le réglage continu de sa Hauteur.
- Pédale de commande double fonctions : accostage / soudage.
- Déclenchement automatique du cycle de soudage lorsque l'effort pré réglé est atteint [12].

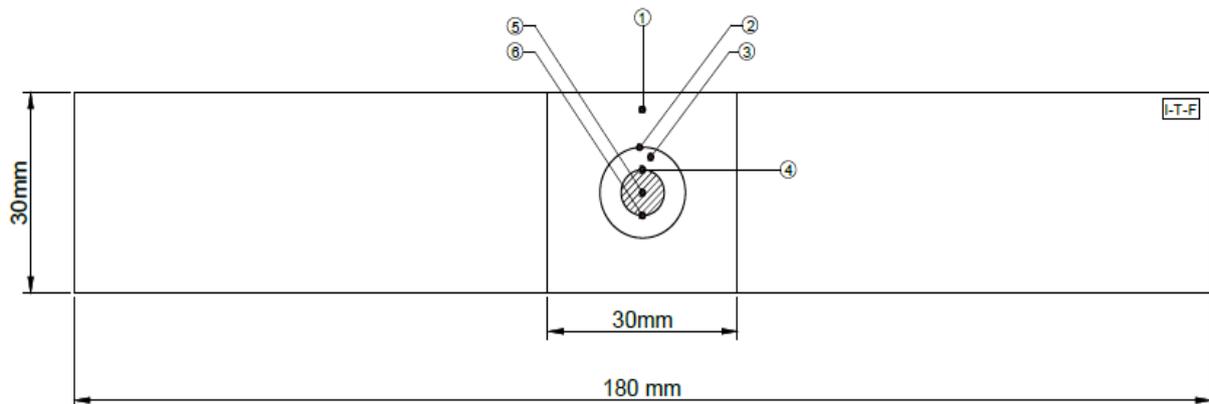


Figure 3.8 : Les points de l'essai de dureté sur le point de soudure de l'éprouvette



Figure 3.9 : Exemple des essais de dureté HRB sur l'éprouvette

3. Essais de traction en cisaillement et en croix

L'essai de traction en cisaillement ou en croix sont couramment utilisés pour caractériser le comportement d'un assemblage soudé par point. C'est un essai qui permet de mesurer l'effort nécessaire pour rompre le point soudé dans le mode de sollicitation concerné ainsi que son mode de rupture. L'effort à la rupture est communément appelé TTS en traction cisaillement (tensile shear strength)

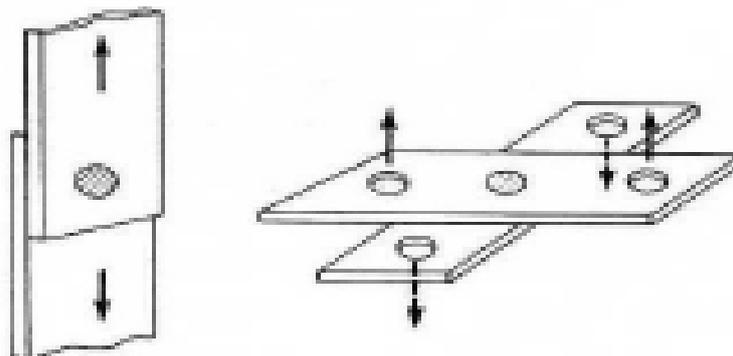


Figure 3.10 : tractions en cisaille et en croix

4. Mécanisme 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. Illustré observant néanmoins aussi des cas de 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. 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.(7)



Figure 3.11 : L'opération de traction en cisaillement sur la machine de traction 600 KN

Chapitre 4 :
**RESULTATS ET
DISCUSSION**

Introduction

La compréhension des modes de rupture des points soudés d'aciers à haute résistance est un enjeu industriel important. Des essais de caractérisation ont été effectués, ainsi que l'observation de la rupture d'un point soudé. 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.

Dans cette partie l'effet des paramètres de soudage ont été étudiés sur :

- La géométrie du point de soudure
- L'évolution de la dureté au niveau du point d'assemblage
- La résistance mécanique à la rupture de l'assemblage soudé

1. Effets des paramètres de soudage sur la géométrie du point de soudure

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 (figure 4.1). L'effet des paramètres de soudage a été mis en évidence. La variation du temps de soudage et l'effort de soudage présentent un faible effet pour une même intensité de soudage (figures 4.2). Les figures 4.2 présentent la variation du diamètre du point de soudure pour différentes intensités du courant de soudage. On constate que le diamètre du point de soudure augmente avec l'augmentation du courant de soudage. Cela montre qu'il 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 moyennes du diamètre en négligeant l'effet du temps et de l'effort 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 (figure 4.4). Quantitativement, la variation de la profondeur en fonction des paramètres de soudage est donnée par la figure 4.5. Une faible différence en profondeur est constatée sous la variation du temps et de l'effort de soudage. Cette différence ne dépasse pas les 2 mm pour une même intensité. Contrairement à ces deux derniers paramètres, l'augmentation du courant de soudage appliqué, augmente considérablement. Pour un courant de 10 KA, la profondeur moyenne est de 0.38 et pour un courant maximal de 15 KA, la valeur

moyenne est de l'ordre de 1.43. La figure 4.6 représente l'évolution de la profondeur moyenne 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)

N°	EP mm	Superpo- sition (mm)	Ø Electrode (mm)	Intensité (KA)	Temps Cycle (S)	Effort bar	diamètre (mm)	Profondeur (mm)
01	2	30	7	10	10	7	11.2	0.4
					11	7	11	0.3
					13	7	11.3	0.4
					10	8	11.2	0.4
					11	8	11.2	0.4
					13	8	11.5	0.4
02	2	30	7	11	10	7	10.8	0.7
					11	7	10.9	0.7
					13	7	11	0.8
					10	8	11	0.8
					11	8	10.9	0.8
					13	8	11	0.9
03	2	30	7	12	10	7	11.9	1
					11	7	12.5	0.9
					13	7	12.4	0.9
					10	8	12.4	1.1
					11	8	12.2	1
					13	8	12.5	1.1
04	2	30	7	13	10	7	12.5	1.1
					11	7	12.5	1.2
					13	7	12.6	1.1
					10	8	12.5	1.1
					11	8	12.5	1.2
					13	8	12.5	1.2
05	2	30	7	14	10	7	13	1.4
					11	7	13	1.3
					13	7	13	1.4
					10	8	12.9	1.4
					11	8	13	1.4
					13	8	13	1.2
06	2	30	7	15	10	7	14	1.5
					11	7	14	1.4
					13	7	13.8	1.4
					10	8	13	1.5
					11	8	13.5	1.3
					13	8	14	1.5



F = 7 bar, t=10 cycle



F = 7 bar, t=11 cycle



F = 7 bar, t=13 cycle



F = 8 bar, t=10 cycle

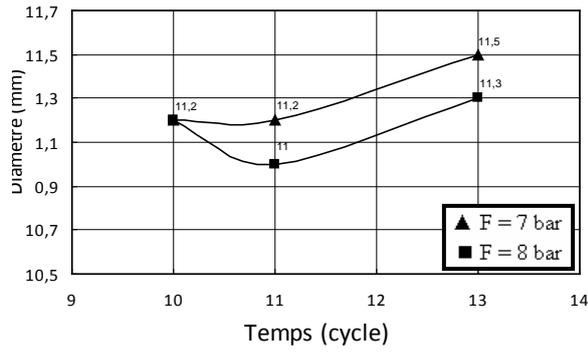


F = 8 bar, t=11 cycle

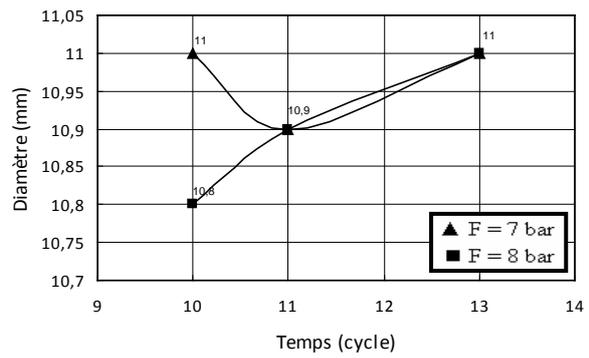


F = 8 bar, t=13 cycle

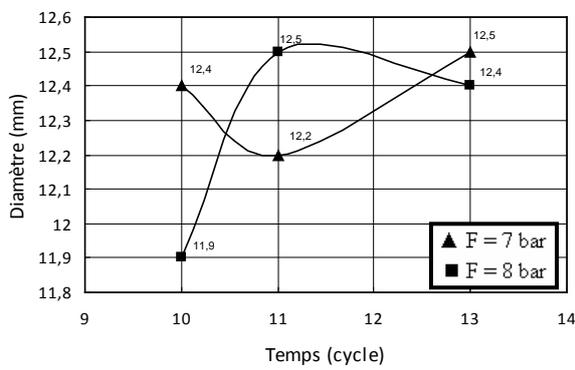
Figure 4.1. Géométrie du point de soudure pour une intensité de 10 KA



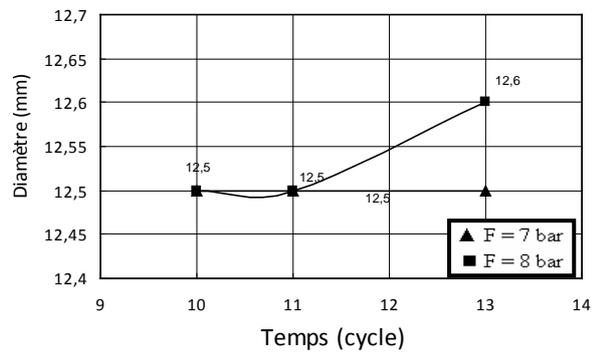
I =10 KA



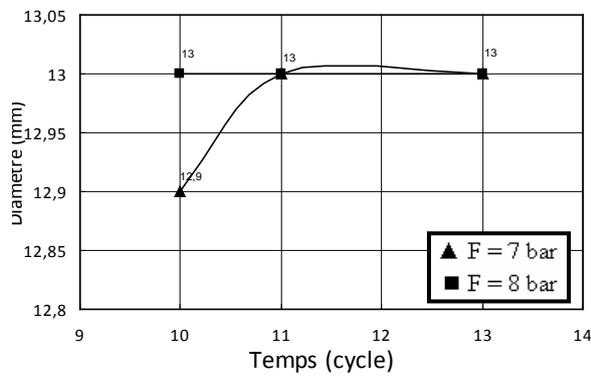
I=11 KA



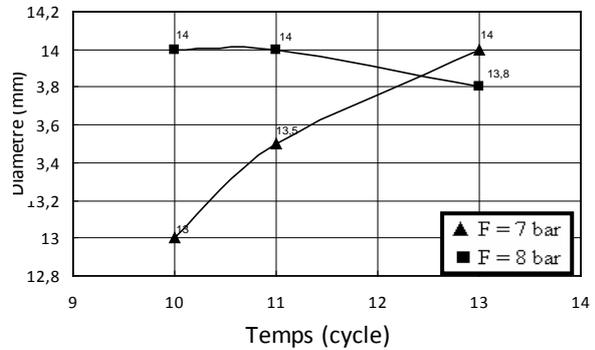
I =12 KA



I=13 KA



I =14 KA



I=15 KA

Figure 4.2. Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du diamètre du point de soudure

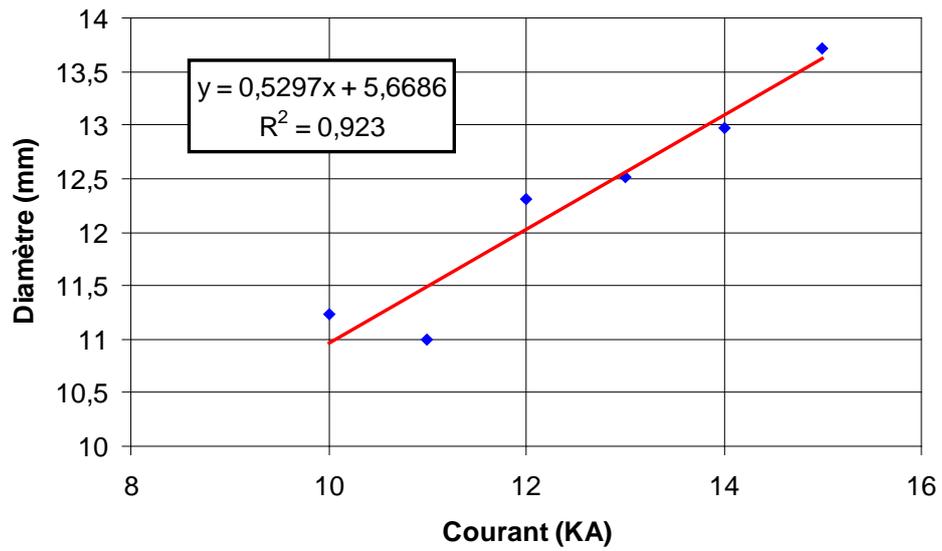


Figure 4.3. Effet du courant sur le diamètre moyen des points de soudure



I= 10 KA



I= 11 KA



I= 12 KA



I= 13 KA



I= 14 KA



I= 15 KA

Figure 4.4: Effet du courant du soudage sur la profondeur du point de soudure pour F= 8 bar, t=13 cycle

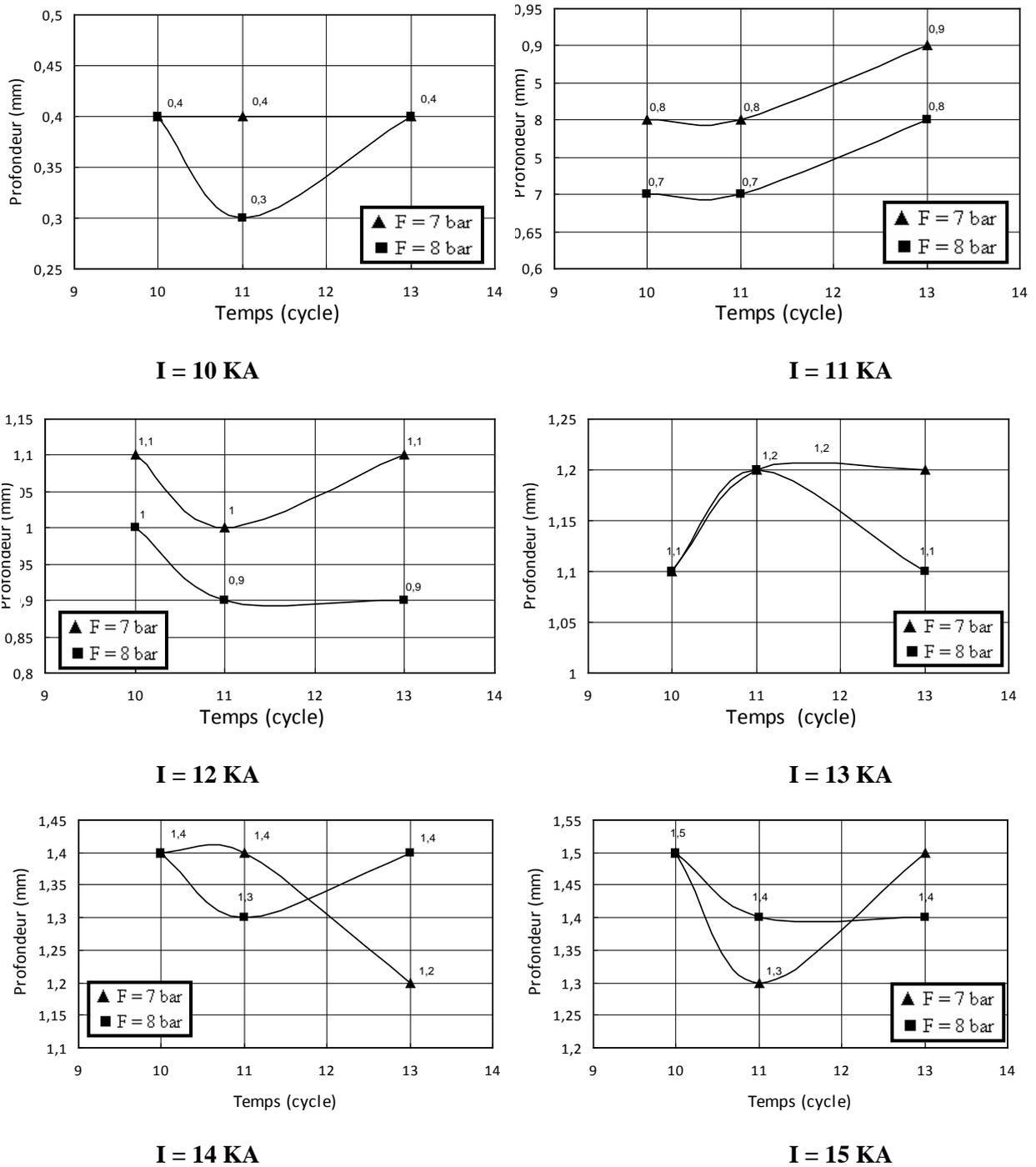


Figure 4.5: Effet de l'intensité du courant du soudage sur la profondeur au point de soudure

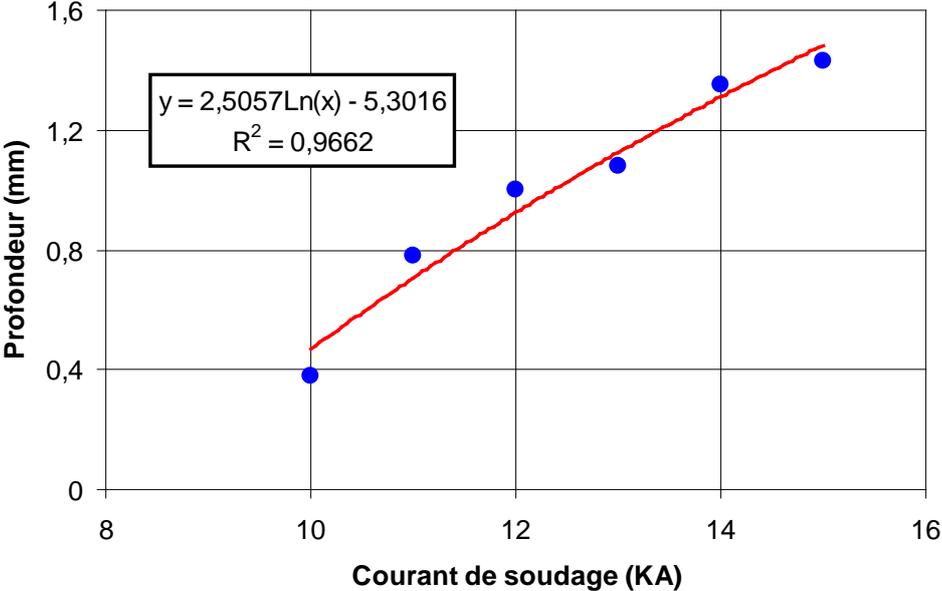


Figure 4.6: Evolution de la profondeur du point de soudure en fonction du courant de soudage

2. Effets des paramètres de soudage sur la dureté

Les mesures des duretés ont été effectuées selon les positions définies par la figure 3.8. L'évolution de la dureté le long de l'axe verticale de la zone de soudure jusqu'au côté libre est montré par les figures 4.7 et 4.8. Comme montré par ces figures, une différence significative est observé sur la distribution des duretés dans le métal de base comparativement par rapport à la dureté au niveau de la zoné soudé. La dureté est maximale au niveau du point de soudure, cela justifié la présence de contraintes résiduelles d'origine thermique.

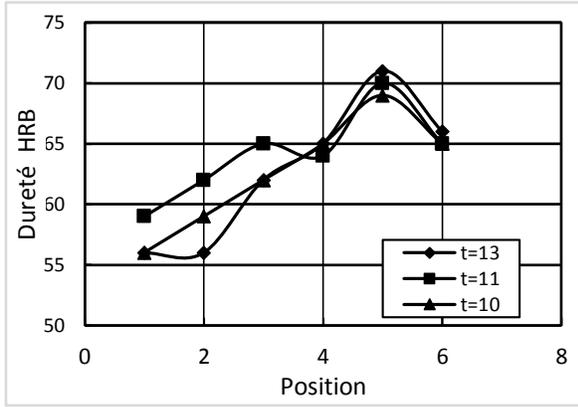
Un faible effet de l'effort et du temps de soudage est observé aux différentes positions. Loin du point de soudure (position 1 et 2), l'effet de temps est significatif comparativement par rapport à la position centrale du point de soudure.

Au niveau du point de soudure (position5), l'effet de l'intensité du courant de soudage en présence des effets du temps et de l'effort sont données par les figures 4.9 et 4.10. L'effet du temps et de l'effort de soudage reste très faible comparativement par rapport à l'effet de l'intensité du courant de soudage.

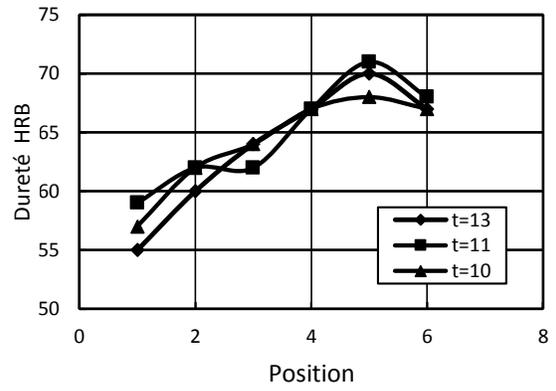
Tableau 4.2 : Les essais de dureté HRB dans les différents paramètres
De soudage par point des éprouvettes en acier inox 304l

N°	DESCRIPTION I - T - F	HRB					
		1	2	3	4	5	6
01	10-13-8	56	56	62	65	71	66
02	10-10-7	56	56.5	66	66.5	67	65
03	10-11-7	57	59	62	66	68	67
04	10-13-7	59	55	63	66	65	67
05	10-10-8	56	59	62	65	69	65
06	10-11-8	59	62	65	64	70	65
07	11-11-8	59	62	62	67	71	68
08	11-11-7	58	62	67	66	71	67
09	11-10-8	57	62	64	67	68	67
10	11-10-7	55	63	63	67	70	67
11	11-13-7	56	63	64	67	70	67
12	11-13-8	55	60	64	67	70	67

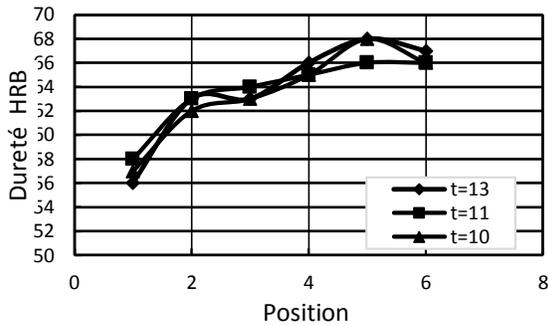
13	12-10-7	59	63	63	66	66	65
14	12-11-8	58	63	64	65	66	66
15	12-11-7	58	63	65	66	67	66
16	12-13-8	56	63	63	66	68	67
17	12-10-8	57	62	63	65	68	66
18	12-13-7	59	63	64	66	68	65
19	13-11-8	58	58	63	65	68	64
20	13-13-7	59	58	62	64	67	65
21	13-10-8	56	58	64	66	69	66
22	13-11-7	58	57	63	65	68	66
23	13-10-7	57	58	64	66	69	66
24	13-13-8	56	56	63	64	67	65
25	14-11-7	58	63	64	67	68	66
26	14-13-7	59	63	64	66	67	67
27	14-10-8	59	63	64	67	68	66
28	14-10-7	56	63	63	65	66	67
29	14-11-8	58	63	65	65	66	66
30	14-13-8	59	63	65	67	68	67
31	15-13-8	57	58	62	64	66	65
32	15-10-8	58	58	63	64	66	66
33	15-11-7	57	58	62	65	68	66
34	15-11-8	59	57	62	64	69	66
35	15-10-7	56	58	63	65	66	66
36	15-13-7	59	56	63	65	66	65



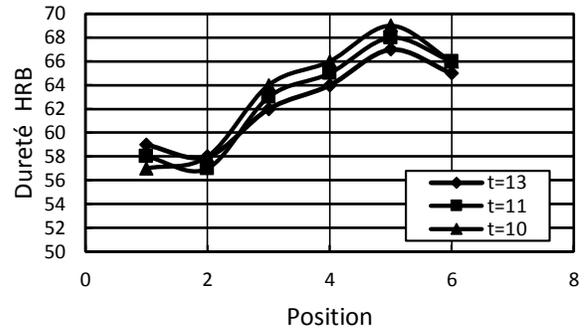
I=10 KA



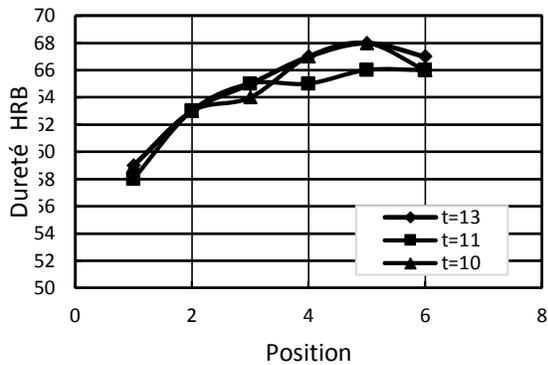
I=11 KA



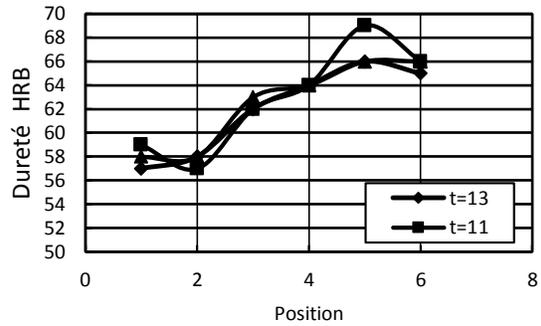
I=12 KA



I=13 KA

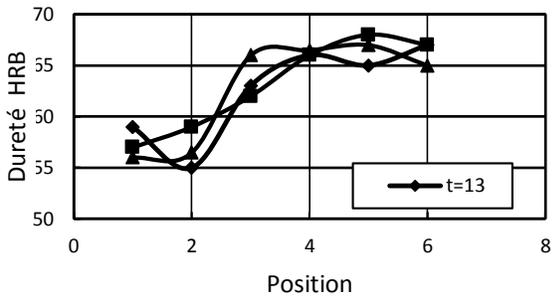


I=14 KA

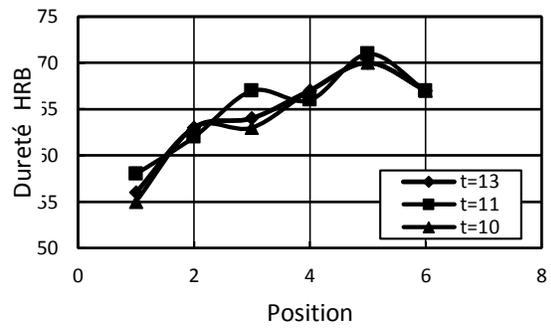


I=15 KA

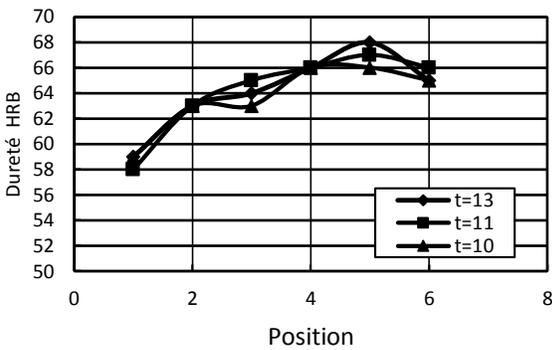
Figure 4.7. Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du dureté HRB du point de soudure pour un effort de 7 bar



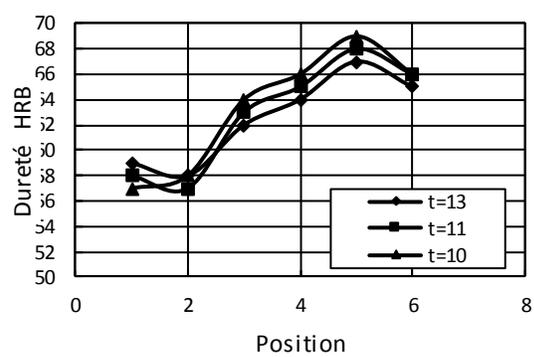
I=10 KA



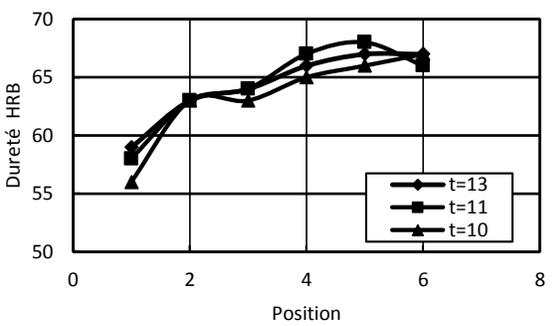
I=11 KA



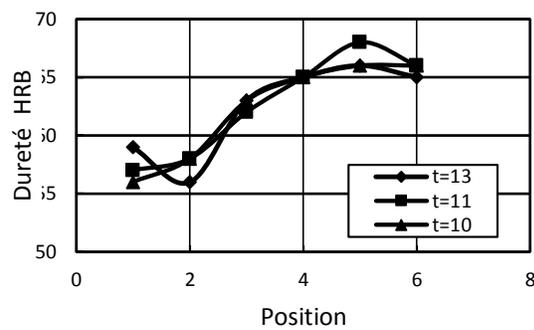
I=12 KA



I=13 KA



I=14 KA



I=15 KA

Figure 4.8. Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du dreté HRB du point de soudure pour un effort de 8 bar

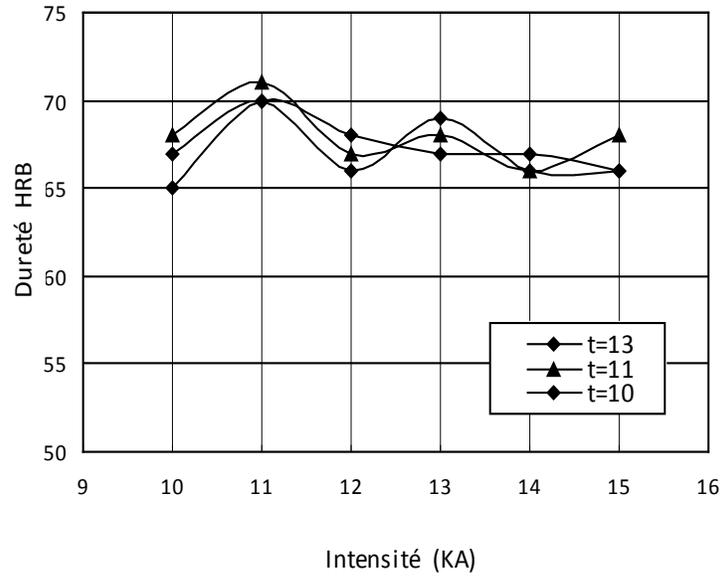


Figure 4.9. Effet du courant sur la dureté de la position 5
De points de soudure pour un effort de 7 bar

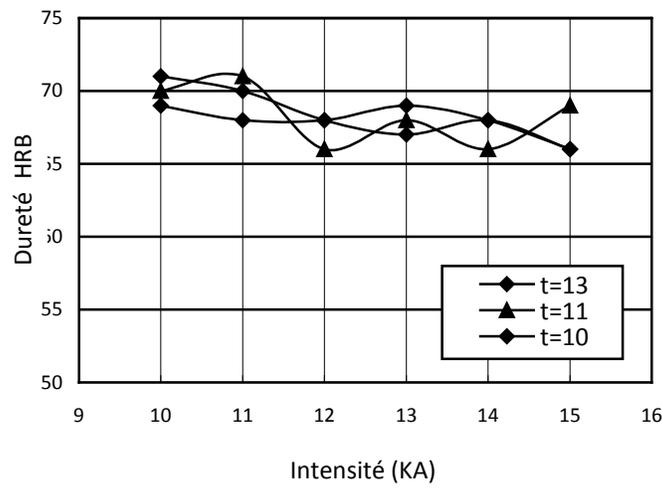


Figure 4.10. Effet du courant sur la dureté de la position 5
De points de soudure de 8 bar

3. Effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique de l'assemblage soudé

Les effets de paramètres de soudage sur la géométrie et la dureté au niveau du point de soudage étudié montrent la nécessité d'investiguer ses effets sur le comportement en cisaillement par traction de l'assemblage par recouvrement.

La procédure expérimentale retenue pour l'étude de l'endommagement des points soudés repose sur des essais de traction continus. Les mêmes paramètres retenus plus haut ont été appliqués sur le comportement à la résistance mécanique.

La sollicitation de l'interface en traction cisaillement est principalement tangentielle par opposition à la traction en croix où elle est à dominante normale. En conséquence, les modes dominants à l'interface devraient être le mode II dans le plan de symétrie de l'éprouvette et le mode III à 90° sur la périphérie du point. En revanche, la tôle autour du point est soumise globalement à une traction [9].

Un certain nombre d'auteurs ont rapporté des cas de déboutonnage dans le Métal de Base en traction cisaillement pour des aciers à (très) haute résistance [9]. La rupture se produit par localisation de la déformation en SCZAT / MB dont la limite d'élasticité est faible par rapport à celles des zones du point soudé.

La façon de l'évolution de l'endommagement pour l'assemblage en traction cisaillement est présentée par la figure 4.11. A partir du point B, l'assemblage est soumis à une rotation due au moment de flexion introduit par l'excentricité des points d'applications des forces du haut et du bas. Pour nos effectués le phénomène de rotation est montré par la figure 4.12.

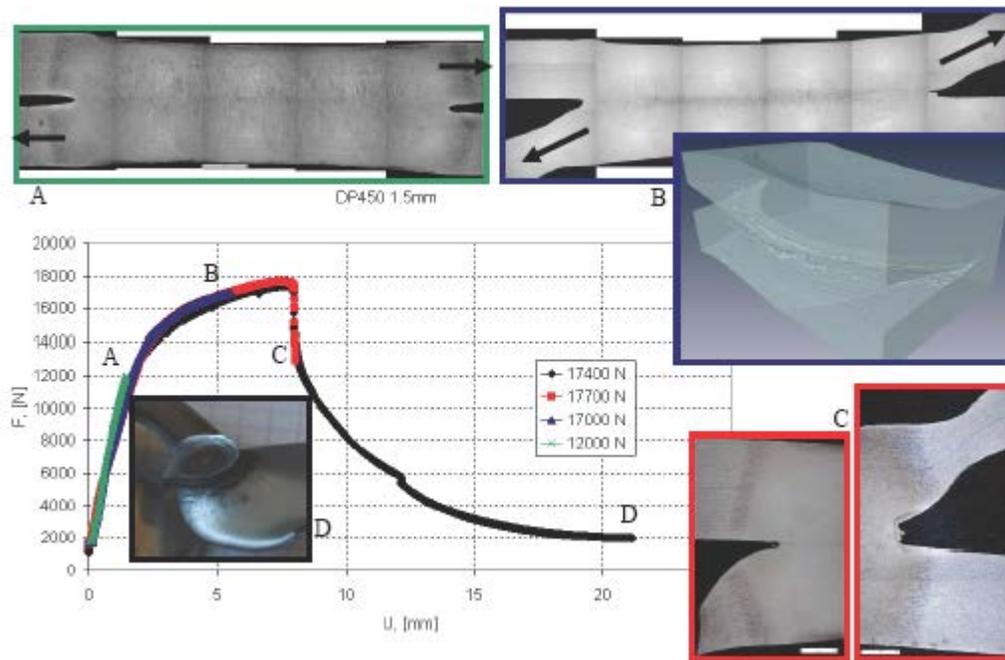


Figure 4.11 : Evolution de l'endommagement d'un acier de haute résistance au cours de l'essai de traction cisaillement [9]

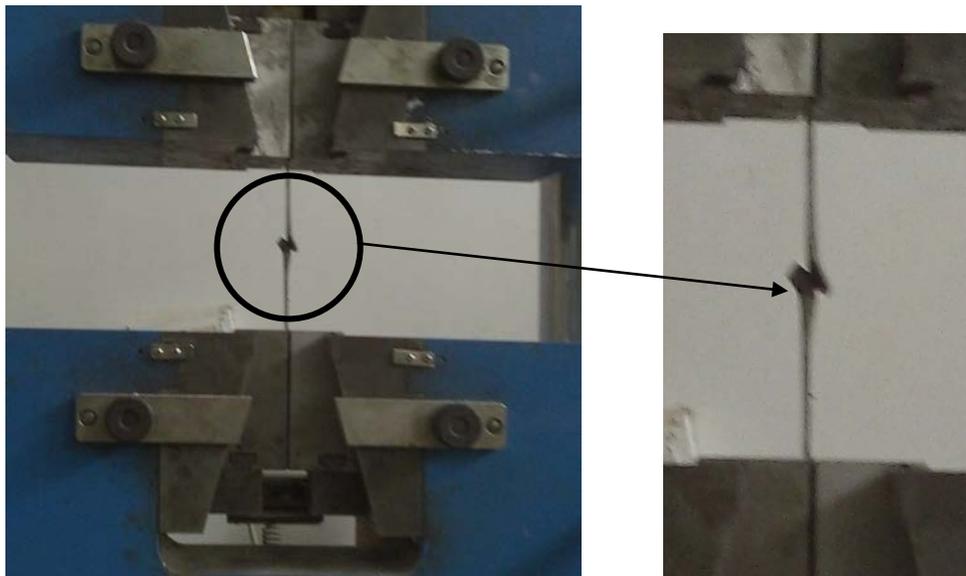


Figure 4.12 : Phénomène de rotation du à la flexion par excentricité

Les figures 4.13 à 4.18 illustrent les effets des paramètres de soudage (intensité du courant, effort et le temps du soudage) sur le comportement mécanique des assemblages soudés par points pour des essais de traction/cisaillement.

Les courbes 4.13 et 4.14 représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point respectivement pour des efforts de 8 et 7 bar à $t = 10$ cycles. L'augmentation de l'intensité de courant augmente la zone de la déformation plastique mais aléatoire. Les courbes charges/déplacement présentent plusieurs zones. Aux points A, points peu déformés. Aux points B, rotation du point pour aligner les tôles dans la direction de chargement et amorce de striction. Les points C donnent les charges maximales de rupture et les points D représentent les efforts maximums atteints lorsque la rupture s'est propagée dans l'épaisseur dans la zone de striction de l'une des tôles et propagation de la rupture dans le métal de base MB autour du point et déchirement de l'éprouvette jusqu'à la rupture finale.

Le phénomène aléatoire se répète sur l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les différents temps ($t = 11$ et 13 cycles) (figures 4.15 à 4.18). On constate toujours que la zone de la déformation plastique est plus large pour les intensités de 12 à 15 KA. De plus on remarque généralement, que l'augmentation de courant de soudage augmente la zone de déformation plastique (figures 4.13 à 4.18).

L'effet du courant de soudage sur la charge maximale de rupture (points C) pour les deux efforts de soudage est représenté par les figures 4.19 et 4.20. L'allure générale montre une augmentation de la charge de rupture avec l'augmentation du courant de soudage. Afin de mieux comprendre certaines interactions des paramètres de soudage et leurs phénomènes aléatoires, des essais statistiques sont nécessaires et accompagnés par des analyses des surfaces de ruptures au niveau des interfaces.

Les images des assemblages rompus par traction/cisaillement sont données par la figure 4.21. La rupture se fait au niveau de la zone affectée thermiquement et se propage dans le métal de base. Cette propagation se fait suivant le mode I de rupture.[9]

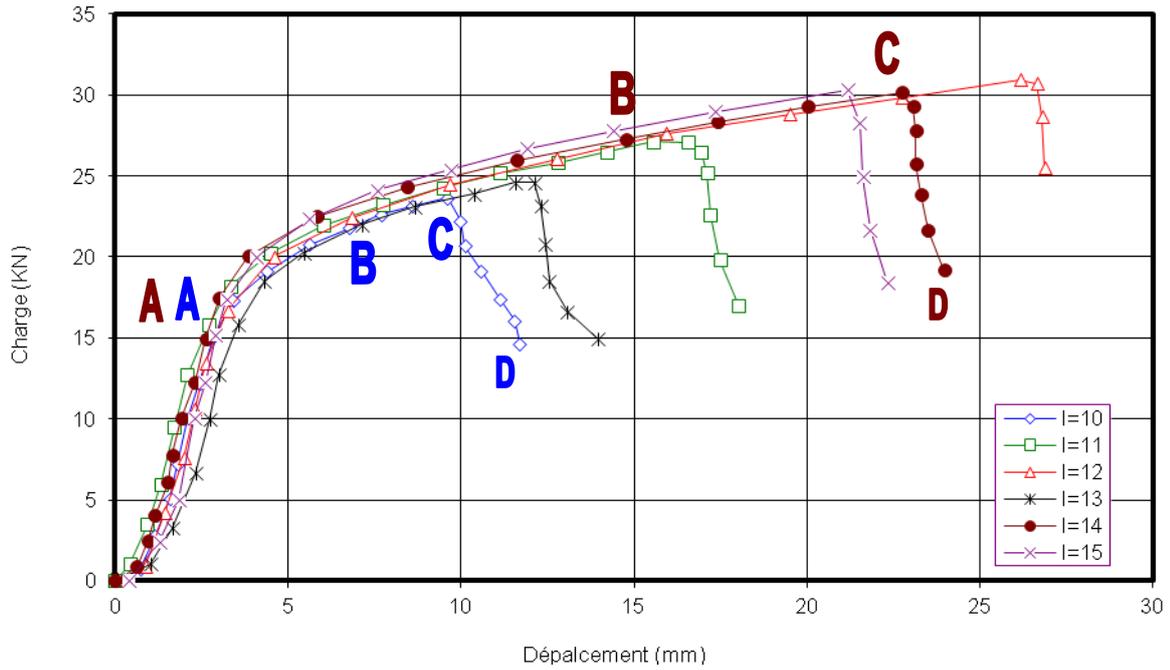


Figure 4.13 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 10 cycles

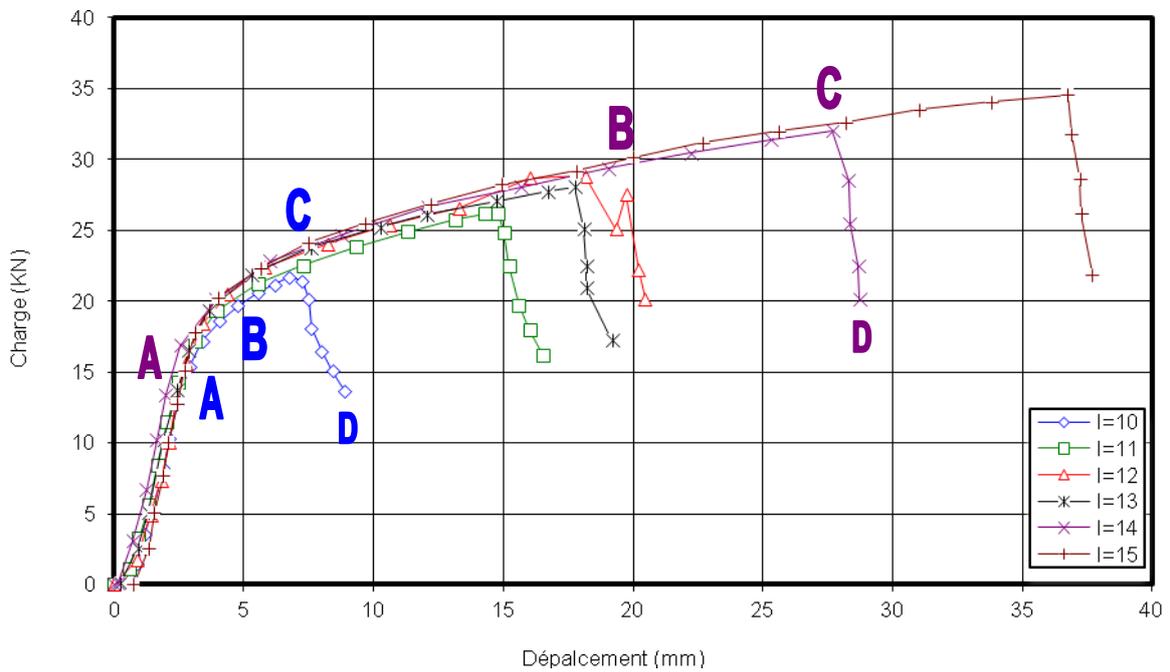


Figure 4.14 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 10 cycles

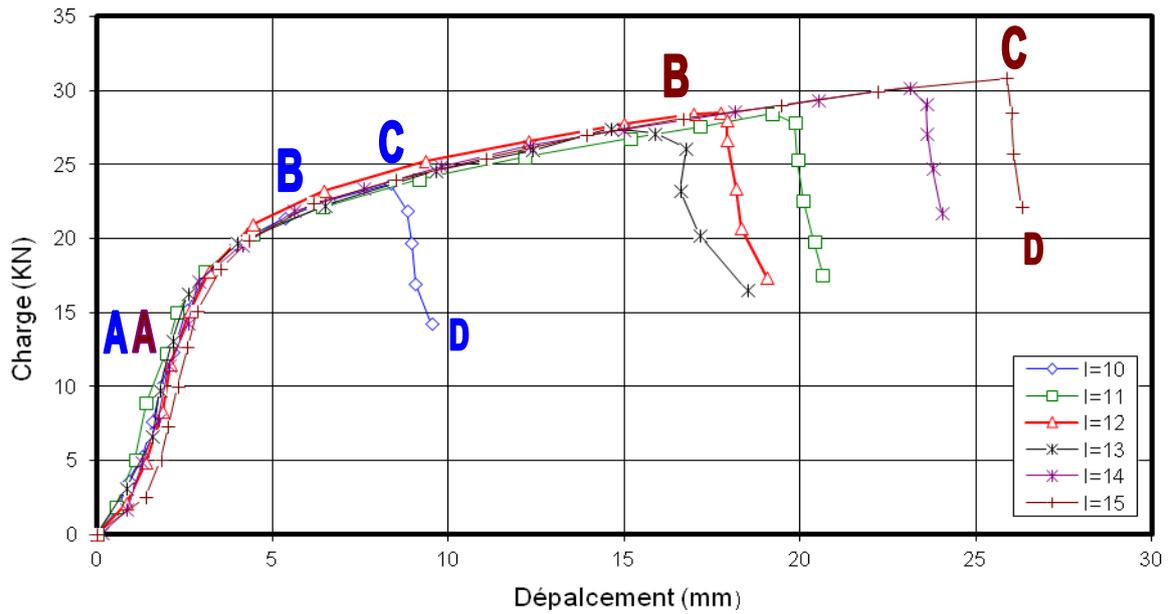


Figure 4.15 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 11 cycles.

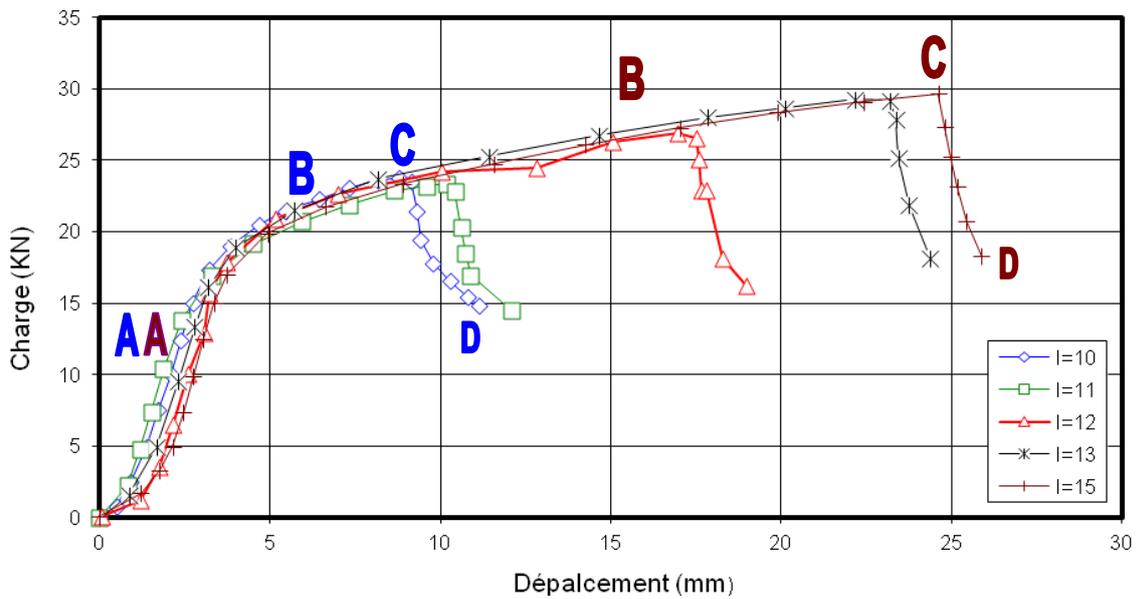


Figure 4.16 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 11 cycles.

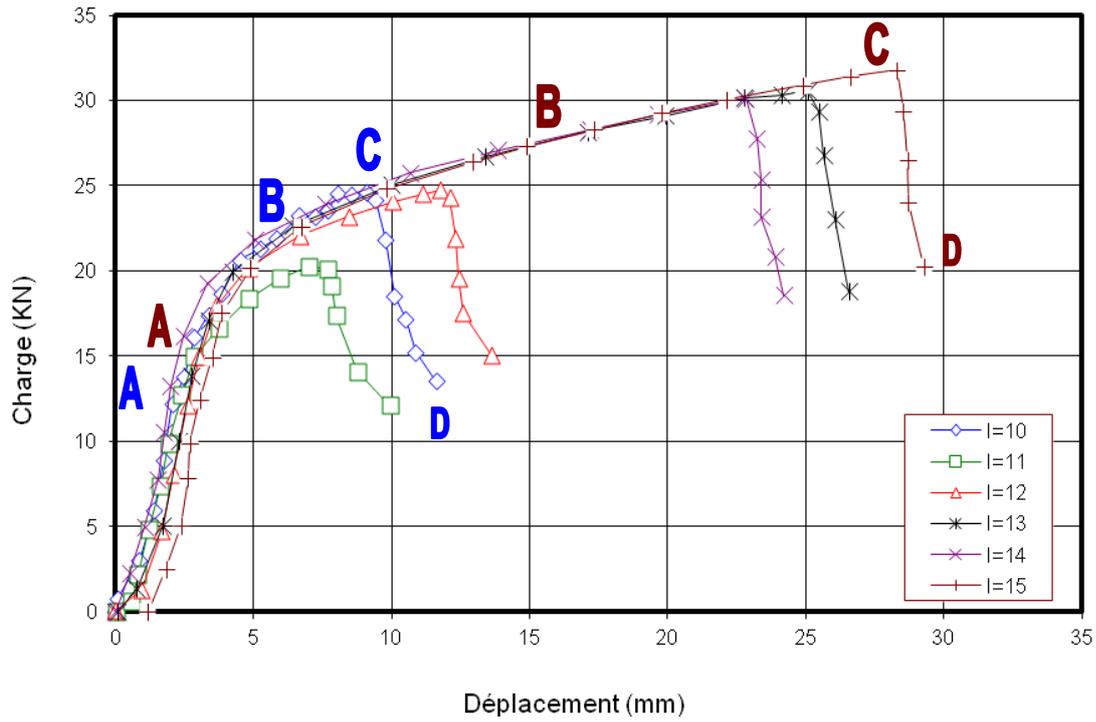


Figure 4.17 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 8 bar et un temps de soudage de 13 cycles.

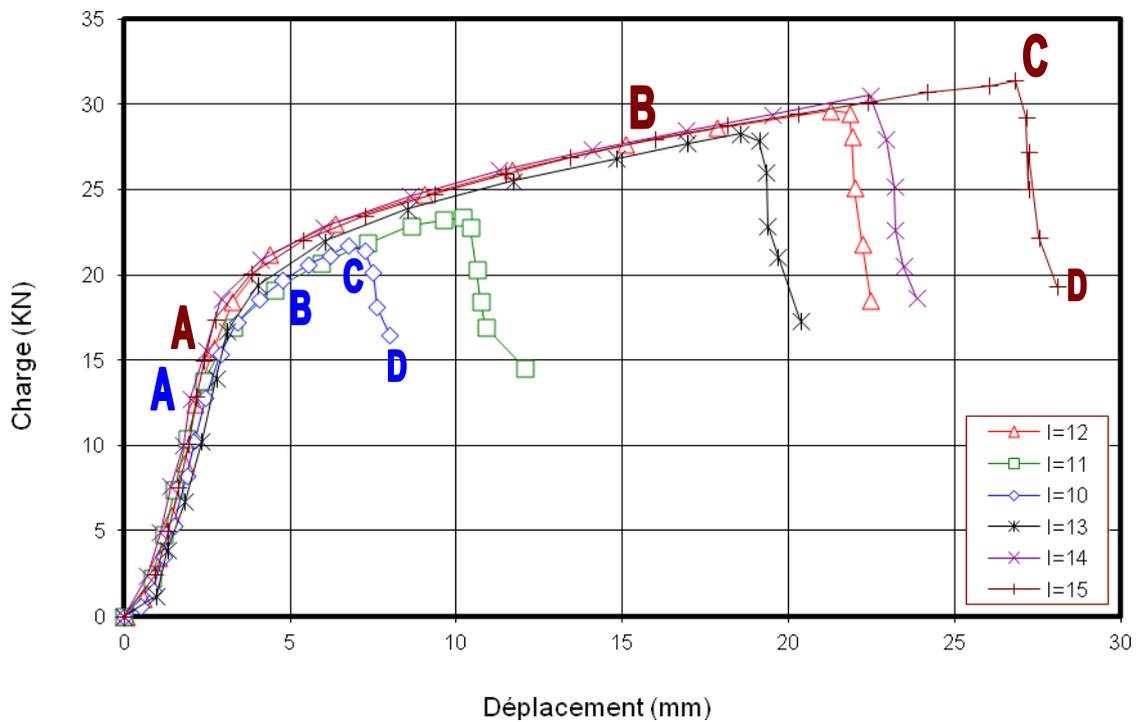


Figure 4.18 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 bar et un temps de soudage de 13 cycles.

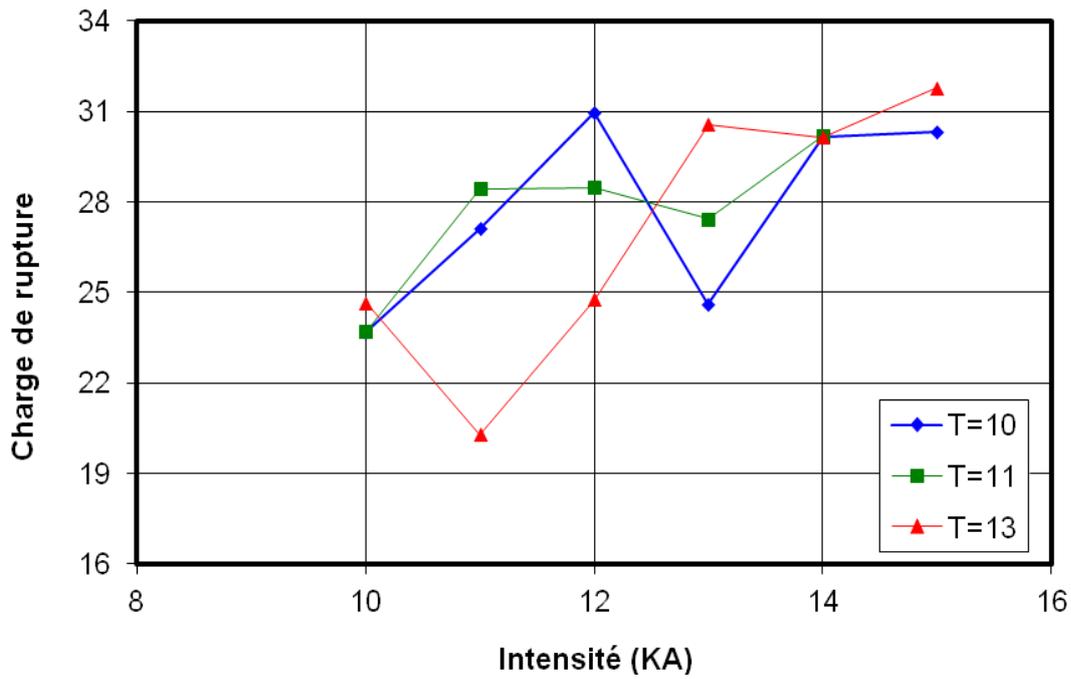


Figure 4.19 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur la charge maximale de rupture pour un effort de 7 bar.

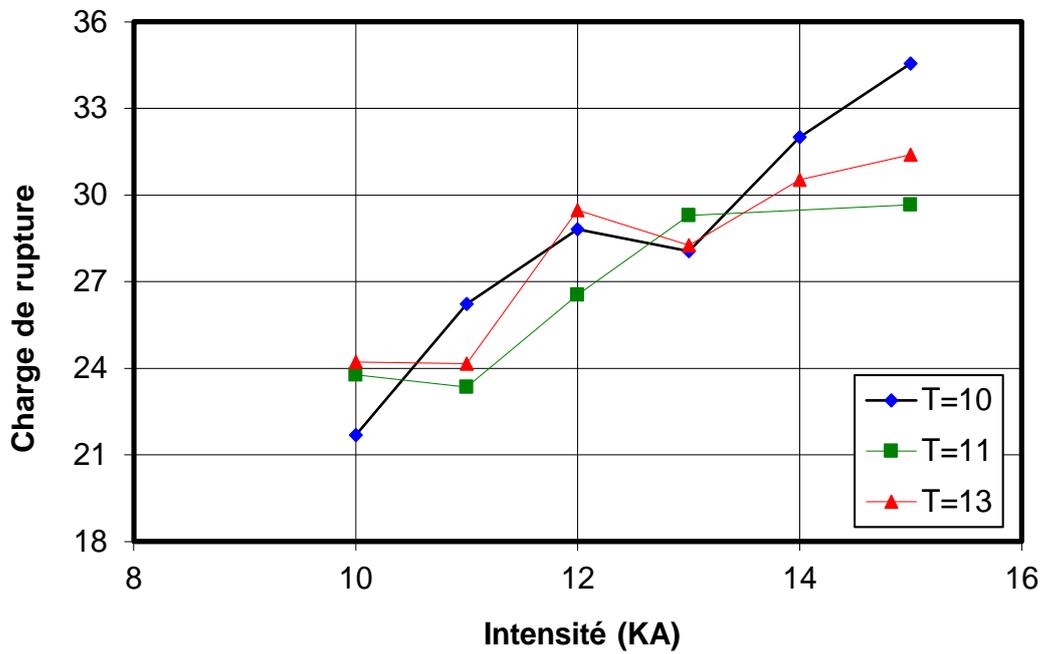


Figure 4.20 : Effet de l'intensité du courant de soudage sur la charge maximale de rupture pour un effort de 8 bar



I=10 KA, T=10 cycles, F=7bar



I=10 KA, T=11 cycles, F=7bar



I=10 KA, T=11 cycles, F=7bar



I=10 KA, T=10 cycles, F=8bar



I=10 KA, T=11 cycles, F=8bar



I=10 KA, T=11 cycles, F=8bar



I=11 KA, T=10 cycles, F=7bar



I=11 KA, T=11 cycles, F=7bar



I=11 KA, T=13 cycles, F=7bar



I=11 KA, T=10 cycles, F=8 bar



I=11 KA, T=11 cycles, F=8bar



I=11 KA, T=13 cycles, F=8bar



I=14 KA, T=10 cycles, F=7bar



I=14 KA, T=11 cycles, F=7bar



I=14 KA, T=13 cycles, F=7bar



I=14 KA, T=10 cycles, F= 8bar



I=14 KA, T=11 cycles, F= 8 bar



I=14 KA, T=13 cycles, F= 8 bar

Figure 4.21 : les éprouvettes qui subit à l'essai de traction

Conclusion & perspectives

L'objectif de ce travail est d'estimer expérimentalement la tenue mécanique des assemblages par recouvrement et 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 :

- La géométrie du point de soudure caractérisé par le diamètre et la profondeur est affecté par l'intensité du courant de soudage.
- Le temps et l'effort de soudage présente une faible différence sur la profondeur et le diamètre du point de soudure contenant la ZAT.
- De même le temps et l'effort de soudage ont un faible effet sur la variation de la dureté
- L'augmentation de l'intensité du courant permet d'augmenter la dureté et spécialement au niveau du noyau dont la dureté est toujours maximale.
- Les essais de traction/cisaillement effectués montrent que le paramètre intensité du courant est dominant par rapport au temps et à l'effort de soudage sur l'évolution de la courbe charge/déplacement.
- L'augmentation de l'intensité du courant de soudage augmente la zone de déformation plastique et la charge de rupture.

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

- La simulation numérique du procédé de soudage par points.
- Etude statistique s'avère nécessaire afin d'évaluer en détail les interactions des différents paramètres et accompagné d'une étude métallurgique.

Bibliographie

- [1] Benddeb Mostapha. "Etude les défauts de soudage des pipelines". Mémoire de Master, Université de Biskra.2012
- [2] MEKA–H- 201 Chapitre assemblage et soudage.
- [3] Luc Fairon. "Introduction au soudage" (Ingénieur souder ESSA EWER FR 0466).
- [4] Module de formation de soudage par résistance : Article ADEL
- [5] Procédé de soudage par résistance : Ph.roguim
- [6] Ferederique 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] Chainarong Srikunwong. "Modélisation du procède de soudage par point". Thèse de Doctorat, Ecole National des Mines de Paris, 2005
- [8] soudage par résistance : SD SERVICE 2012
- [9] 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 Appliqué, Lyon, 2009
- [10] Catalogue ARO : Soudage par résistance (DOCL80FR9201)
- [11] PX PRECIMET SA : Sélection des fiches techniques
- [12] www.aronet.com, ARO S.A.A :