

الجمهورية  
الجزائرية  
الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و  
البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر  
بلقايد - تلمس  
ان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Assemblages soudés et matériaux

**Par** :  
EMBAREK Djamal  
**Sujet**

Effets combinés des paramètres de soudage et paramètres  
géométrique des joints soudés par point

Soutenu publiquement, le 24 / 06 / 2019, devant le jury composé de :

Président :	HADJOUÏ Féthi	MCB	Université de Tlemcen
Encadreur :	BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur :	BENACHOUR Nadjia	MCB	Université de Tlemcen
Examineur :	SEBAA Féthi	MCA	Université de Tlemcen
Examineur :	KARA ALI Djamel	MCB	Université de Tlemcen

## *DEDICACE*

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

*Mes très chers parents pour leur soutien et leur aide durant toute ma période d'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissances et mon respect*

*Toute la famille EMBAREK et la famille FARES*

*A mon chère Frères Miloud et son fils Mohammed Aïssa*

*A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de près, Sid Ali, Belkheir, Mekki, Hichem, Sid Ahmed, Oussama, Mustapha, Moussabe, Mahjoub, Walid, Hanan, , Fatima, Khadidja, SalahEdin, Abdeladim, Ichraf, Youcef, moussa, Omar, Driss, Mounir .*

*Tous mes enseignants*

*A toute la promotion ASM 2019 plus particulièrement la chacun par son nom.*

*EMBAREK Djamal*

## *Remerciements*

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

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

*Je remercie le directeur de l'entreprise SOREMAP de m'avoir accepté pour faire mon travail au sein de l'entreprise.*

*Je remercie le responsable Mr. Henaoui pour son aide lors de mon travail au sein de laboratoire (RDM).*

*Mes sincères remerciements vont à Pr. BENACHOUR Mustapha et Dr. BENACHOUR Nadjia pour avoir encadré ce travail et de m'avoir apporté leur connaissances, ils sont toujours avec moi quand j'en ai besoin d'eux. Il sont de très bonne qualité humaine qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire, à qui j'exprime toute ma gratitude, mes plus profondes reconnaissances et mes sincères remerciements pour leurs précieux conseils et leur soutien.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury le Président Mr. HADJOUI Fethi qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance ainsi qu'au Mr. SBAA Fethi et Mr. KARA Ali Djamel d'avoir accepté d'examiner notre travail, Je tiens à remercier tous mes professeurs pour leurs connaissances qu'ils ont données tous les cinq ans sans ennui.*

*Je remercie infiniment Mr. LARBI CHERIF Mohammed ingénieur au sein de l'entreprise SOREMAP pour ses précieux conseils.*

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

### Résumé

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

La soudure par point est largement utilisée pour assembler les tôles entre elles, car la brièveté de l'opération et la localisation précise du point de soudure entre les électrodes sous pression limitent la déformation des tôles lors de la soudure.

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée  $t$  en fonction de l'intensité du courant contribue à la formation du noyau

Le thème abordé, intègre dans ce sens et est intitulé : «Effets combinés des paramètres de soudage et paramètres géométrique des joints soudés par point».

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

Les résultats ont montré que les paramètres, effort et temps de soudage ainsi que la longueur de recouvrement présentent un faible effet sur les caractéristiques mécaniques comparativement par rapport à l'effet de l'intensité et de l'épaisseur. Les résultats expérimentaux montrent aussi que l'intensité du courant de soudage et l'épaisseur des pièces sont des paramètres importants pour la tenue de l'assemblage et sa résistance mécanique.

En effet, l'augmentation du courant de soudage permet d'augmenter l'étendue 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 discontinuous, overlapping assembly process. It applies to sheet metal assemblies of mild steel, alloy steel, stainless steel, aluminum, etc. thicknesses generally between 0.5 and 10 mm.

Spot welding is widely used to assemble the sheets together, because the shortness of the operation and the precise location of the weld point between the electrodes under pressure limit the deformation of the sheets during welding.

The heat used to melt the steel at the sheet metal contact is created by the Joule effect during the passage of the current in the conductors. The amount of heat released during the time  $t$  as a function of the intensity of the current contributes to the formation of the nugget

The theme integrated in this sense and is entitled: "Combined effects of welding parameters and geometric parameters of resistance spot welding".

The effect of the welding parameters is studied namely the intensity of the current, the stress and the welding time with different overlap and thicknesses

The results showed that the parameters, stress and welding time as well as the lap length have a small effect on the mechanical characteristics compared to the effect of intensity and thickness. The experimental results also show that the intensity of the welding current and the thickness of the specimen are important parameters for the strength of the assembly and its mechanical strength. .

Indeed, the increase of the welding current makes it possible to increase the extent of the plastic deformation. The increase in the intensity of the current causes a significant fusion at the nugget where the geometrical aspect is strongly affected.

## ملخص

لحام البقعة هو عملية تجميع متقطعة ومتداخلة. ينطبق على مجموعات الصفائح المعدنية من الفولاذ الطري ، سبائك الصلب ، الفولاذ المقاوم للصدأ ، الألومنيوم ، إلخ. يتراوح سمك الصفائح عموماً بين 0.5 و 10 ملم. يستخدم اللحام الموضعي على نطاق واسع لتجميع الصفائح معاً، لأن قصر العملية والموقع الدقيق لنقطة اللحام بين الأقطاب تحت الضغط تحد من تشوه الصفائح أثناء اللحام.

يتم توليد الحرارة المستخدمة في إذابة الفولاذ عند ملامسة الصفائح المعدنية بواسطة تأثير جول أثناء مرور التيار في الناقل. ، تساهم كمية الحرارة المنبعثة خلال الوقت بدلالة شدة التيار في تكوين اللب.

موضوع ، متكاملة في هذا المعنى ، وعنوانه: "الآثار مجتمعة من خصائص لحام والخصائص الهندسية للمفاصل الملحومة حسب النقطة". تتم دراسة تأثير خصائص اللحام وهي كثافة التيار والضغط ووقت اللحام مع تداخل وسمك مختلفين.

أظهرت النتائج أن الخصائص، الإجهاد ووقت اللحام وطول اللفة لها تأثير بسيط على الخصائص الميكانيكية مقارنة بتأثير شدة التيار والسماكة الصفائح .

أظهرت النتائج التجريبية أيضاً أن شدة تيار اللحام وسمك الأجزاء تعد خصائص مهمة لقوة التجميع ومقاومتها الميكانيكية في الواقع، فإن زيادة التيار لحام يجعل من الممكن زيادة مدى تشوه البلاستيك. تؤدي الزيادة في شدة التيار إلى اندماج كبير عند نقطة اللحام حيث يتأثر الجانب الهندسي بشدة.

## LISTE DES SYMBOLES

**W** : Effet de joule (joule)

**R** : Résistance ( $\Omega$ )

**I** : Intensité (ampère)

**T** : Temps de soudage –cycle- (seconde)

**L** : Longueur de matériau (mm)

**A** : longueur de recouvrement (mm)

**e** : Epaisseur de l'éprouvette (mm)

**Q** : La quantité de chaleur générée

**F** : Effort en bars.

**$\Phi$**  : Diamètre du noyau (mm)

**D** : Diamètre du corps d'électrode (mm)

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

**HRB** : Essai de dureté Rockwell a bille

**HV** : Essai de Vickers

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : étude bibliographique

<b>Figure I.1:</b> Schéma représenté les procédés de soudage .....	5
<b>Figure I.2 :</b> Opération de soudage par molette.....	7
<b>Figure I.3:</b> Opération de soudage par bossage .....	8
<b>Figure I.4 :</b> Opération de soudage par étincelage .....	9
<b>Figure I.5:</b> Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point	10
<b>Figure I.6:</b> Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm: TH6 .....	13
<b>Figure I.7 :</b> a) Variation qualitative du diamètre de bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à $4t^{1/2}$ (t = épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en mm.) d'après-[ Weld Quality Test Method Manual] .....	15
<b>Figure I.8:</b> Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ( a) Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues, ( b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues.....	17
<b>Figure I.9:</b> Géométrie d'un point soudé .....	18
<b>Figure I.10</b> Microstructures générées par l'opération de soudage .....	20
<b>Figure I.11.</b> Distance entre chaque point .....	21
<b>Figure I.12 :</b> effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur le diamètre de noyau .....	22
<b>Figure I.13 :</b> effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur pénétration de la soudure. ....	23
<b>Figure I.14 :</b> effet de courant de soudage sur (a) la largeur (b) l'épaisseur de la ZAT. ....	24
<b>Figure I.15 :</b> courbe de charge-déplacement de points de soudure durant l'essai de cisaillement à la traction produite à divers courants de soudage .....	25
<b>Figure I.16 :</b> effet de (a) le courant de soudage et (b) souder le temps sur l'énergie des défauts .....	26
<b>Figure I.17 :</b> effet de diamètre de noyau sur la résistance à la traction de soudage par point .....	27
<b>Figure I.19 :</b> La variation du diamètre de noyau (a) et de la largeur de ZAT (b) avec le temps de soudure .....	27
<b>Figure I.19 :</b> Résistance au cisaillement et à la traction en fonction du temps de soudage avec une variation du courant de soudage de 7, 8 et 9 kA à une force d'électrode de 3,5 kN .....	28



## Chapitre II: étude expérimentale

Figure II.1: Dimension des éprouvettes normalisées de traction .....	30
Figure II.2: Dimension des éprouvettes soudées .....	30
Figure II.3 : Poinçonneuse (AMADA AE2510NT) .....	31
Figure II.4: les pièces non soudés .....	32
Figure II.5: les éprouvettes normalisées de traction .....	32
Figure II.6: Les différents réglages des paramètres .....	33
Figure II.7: Exemple des pièces assemblées par point .....	37
Figure II.8 : machine de soudage par point (Machine TECNA) .....	38
Figure II.9: cisaillement par traction .....	39
Figure II.10: Machine 600 KN pour d'essai de traction .....	40
Figure II.11 : Eprouvettes rompue .....	41
Figure II.12: Courbe De Traction Charge / Déplacement .....	41
Figure II.13: Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations .....	42
Figure II.14: les éprouvettes normalisées après la traction .....	43

## Chapitre III : résultats et discussion

Figure III.1. Différents modes de ruptures recensés par l'AWS, d'après .....	45
Figure III.2: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>18 cycles</b> et recouvrement de <b>20mm</b> et <b>e=2mm</b> .....	46
Figure III.3 Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=20mm et F=6 Bar, et e=2mm .....	46
Figure III.4: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>18 cycles</b> et recouvrement de <b>25mm</b> et <b>e=2mm</b> .....	47
Figure III.5 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=25mm F=6 Bars, et e=2mm.....	47
Figure III.6: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>18 cycles</b> et un recouvrement de <b>30mm</b> et <b>e=2mm</b> .....	48
Figure III.7 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=30mm F=6 Bar, et e=2mm .....	49
Figure III.8: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>25 cycles</b> et recouvrement de <b>20mm</b> et <b>e=2mm</b> .....	49
Figure III.9 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm et F=6 Bar, et e=2mm .....	50

<b>Figure III.10:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>25cycles</b> et recouvrement de <b>25mm</b> et <b>e=2mm</b> . .....	50
<b>Figure III.11 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=25mm F=6 Bar, et e=2mm. ....	51
<b>Figure III.12:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>25 cycles</b> et recouvrement de <b>30mm</b> et <b>e=2mm</b> .....	51
<b>Figure III.13 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=30mm F=6 Bar, et e=2mm.....	52
<b>Figure III.14:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>18 cycles</b> et recouvrement de <b>20mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	53
<b>Figure III.15 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=20mm F=6 Bar et e=1mm.....	53
<b>Figure III.16:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>18 cycles</b> et un recouvrement de <b>25mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	54
<b>Figure III.17 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=25mm F=6 Bar et e=1mm.....	54
<b>Figure III.18:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Bar</b> et un temps de <b>18 cycles</b> et un recouvrement de <b>30mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	55
<b>Figure III.19 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=30mm F=6 Bar et e=1mm.....	55
<b>Figure III.20:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>25 cycles</b> et un recouvrement de <b>20mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	56
<b>Figure III.21 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm F=6 Bar et e=1mm.....	57
<b>Figure III.22 :</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>25 cycles</b> et un recouvrement de <b>25mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	57
<b>Figure III.23 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm F=6 Bar et e=1mm.....	58
<b>Figure III.24:</b> Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6Baret</b> un temps de <b>25 cycles</b> et recouvrement de <b>30mm</b> et <b>e=1mm</b> .....	58

<b>Figure III.25 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm F=6 Bar et e=1mm.....	59
<b>Figure III.26:</b> Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>14 KA</b> et <b>A=20mm</b> .....	60
<b>Figure III.27 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour I=14KA, F=6 Bars et A=20mm.....	60
<b>Figure III.28:</b> Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>14 KA</b> et <b>A=25mm</b> .....	61
<b>Figure III.29 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour I=14KA, F=6 Bar et A=25mm .....	61
<b>Figure III.30 :</b> Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>14 KA</b> et <b>A=30mm</b> .....	62
<b>Figure III.31 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour I=14 KA et F=6 Bar et A=30mm.....	62
<b>Figure III.32:</b> Effet de recouvrement sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>14 KA</b> et <b>T=18cycle</b> et I=14KA Avec différent recouvrement .....	63
<b>Figure III.33 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, F=6 Bars.....	64
<b>Figure III.34:</b> Effet de recouvrement sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>14 KA</b> et <b>T=25cycle</b> .....	64
<b>Figure III.35 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bar Avec différent recouvrement .....	65
<b>Figure III.36:</b> Effet de recouvrement sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et <b>T=18cycle</b> .....	65
<b>Figure III.37:</b> Effet de recouvrement sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et <b>T=25cycle</b> .....	66
<b>Figure III.38:</b> Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>16KA</b> , <b>A=25mm</b> et <b>T=18cycle</b> ..	67
<b>Figure III.39:</b> Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de <b>6 bar</b> et une intensité de <b>16 KA</b> , <b>A=25mm</b> et <b>T=25cycle</b> .	67
<b>Figure III.40 :</b> Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bar Avec différent épaisseur .....	68

<b>Figure III.41</b> :Effet de l'intensité sur le diamètre du point de soudure pour une charge de 6 bar, A=20mm et T=18cycle .....	69
<b>Figure III.42</b> : Effet temps de maintien sur le diamètre du point de soudure pour une charge de 6 bar, A=20mm.....	70
<b>Figure III.43</b> : Effet de l'intensité sur la consommation de l'électrode .....	70

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

**Tableau I.1** :les parametres de soudage par bossage.....8

**Tableau I.2** : Paramètres de soudage pour acier doux.....14

## Chapitre II :

**Tableau.1** : Composition Chimique de l'acier.....29

**Tableau.2** : la fiche technique de l'acier .....29

**Tableau.3** : Les différents paramètres de soudage par point pour les éprouvettes en acier faiblement allié pour  $e=2\text{mm}$  ..... 34

**Tableau.4** : Les différents paramètres de soudage par point pour les éprouvettes en acier faiblement allié pour  $e=1\text{mm}$  ..... 35

**Tableau.4** : Les différentes étapes de soudage ..... 36

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SOUDAGE</b>	
1 SOUDAGE.....	3
1.1 Définition de soudage .....	3
1.2 Historique de soudage.....	3
1.3 Classification les procédés de soudage.....	4
1.4 Types de soudures.....	6
2 Soudage par résistance.....	6
2.1 Définition.....	6
2.2 Types de soudage par résistance.....	6
2.2.1 Soudage par molette.....	6
2.2.2 Soudage par bossage.....	7
2.2.3 Soudage par étincelage.....	8
2.2.4 Soudage par point.....	9
3 Etat de l'art sur les effets des paramètres de soudage.....	22
<b>CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE</b>	
1 Matériaux d'étude : tôle LAF (NF EN 10130)	
1.1 Définition de tôle LAF (NF EN 10130.....	29
1.2 Caractéristiques chimiques et physiques.....	29
2 Essais expérimental .....	30
2.1 Découpage des pièces.....	30
2.2 Réglage des paramètres de soudage et le soudage.....	32
a. Réglage des paramètres.....	32
b. Etapes de soudage.....	36
2.3 Essais de caractérisation mécanique.....	39
3 Résulta de l'essai.....	42

## CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction .....	44
1 Mécanisme de rupture.....	44
2 Mode de rupture.....	44
3 Effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique d'un joint soudé par point.....	45
3.1 Effet de courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudé.....	45
3.2 Effet de temps de maintien sur le comportement mécanique des joints soudé.....	59
3.3 Effet de recouvrement sur le comportement mécanique des joints soudé.....	63
3.4 Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique des joints soudé.....	66
3.5 Effet combines des paramètres de soudage et les paramètres géométrique.....	68
3.6 Effet de l'intensité sur la consommation de l'électrode.....	70

## CONCLUSION

## Introduction générale

Le soudage de toutes sortes a joué un rôle important dans le développement de l'industrie, en particulier l'assemblage et la maintenance, le soudage par point occupe la plus grande part dans ce domaine, en particulier l'industrie automobile, mécano soudé et assemblage métallique.

La qualité de la structure soudée est souvent évaluée par la résistance et la ductilité des structures soudées en raison de leur rôle important dans la rigidité et la résistance aux chocs de la structure. En conséquence, il est nécessaire d'évaluer le comportement à la rupture dans les assemblages soudés par résistance en comprenant le comportement mécanique et le comportement à la rupture de matériaux individuels.

Les facteurs qui influencent la formation et la croissance du noyau de soudure pour le soudage par points d'une tôle métallique ont été suffisamment discutés. Bien que la force, le courant de soudage, le temps de soudage et l'électrode sont des paramètres d'entrée de base pour la génération de chaleur, les résistances de contact statiques et dynamiques influence de fusion et la taille de le noyau Bien que la résistance de contact électrique statique (ECR) dépend en grande partie des caractéristiques des deux surfaces de contact avant l'écoulement du courant de soudage, la résistance du contact dynamique (DCR) représente l'effet combiné de la résistance interfaciale et la résistance des matériaux pendant le soudage.

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 et différents géométries des assemblages soudés, dont le mode de sollicitation classiquement utilisé dans l'industrie est la traction cisaillement.

En résumé le mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à la présentation des procédés de soudage et spécialement soudage par résistance ainsi une étude bibliographique sur le comportement mécanique d'un assemblage soudé par recouvrement.

Le deuxième chapitre décrit l'étude expérimentale conduite sur l'acier doux, les assemblages sont réalisés par recouvrement et sollicités en cisaillement par traction et soumis aussi à une rotation due au moment de flexion introduit par l'excentricité des points d'applications des forces du haut et du bas, dans le but d'évaluer les caractéristiques mécaniques afin de comprendre les mécanismes de rupture des points soudés et l'influence des différents paramètres et géométries sur le comportement mécanique du point soudé.



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

*Chapitre I Etude  
bibliographique*

# 1 SOUDAGE

## 1.1 Définition

Soudage est un opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties assemblées, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

## 1.2 Historique de soudage

Les origines du soudage moderne datent de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et le début du 20<sup>ème</sup> siècle. A cette époque on a inventé :

- ✚ -Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : Goldsmidt ; Allemagne.
- ✚ -Le soudage avec électrode de charbon : Bernardos et Olszewski ; Russie.
- ✚ -Le soudage avec électrode fusible nue : Slavianov ; Russie.
- ✚ -Le soudage avec électrode enrobée : Kjellberg ; Suède.
- ✚ -Le soudage par résistance : Thompson ; USA.
- ✚ -Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard ; France.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre). L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile. Parmi les procédés nouveaux on peut nommer [16]:

- -Le soudage avec électrode de tungstène : 1924- USA.
- -Le soudage sous flux : 1935- USA.
- -Le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- -Le soudage sous la protection gazeuse : 1950-1960.
- -Le soudage avec fils fourrés : 1950-1960.
- -Le soudage par explosion : 1950-1960.
- -Le soudage par bombardement électronique : 1956- France.
- -Le soudage au laser : 1965.

### 1.3 Classification des procédés de soudage

Il existe, l'heure actuelle, des dizaines de procédés soudage. Le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisées par exemples énergie électrique, énergie chimique etc... ensuite les procédés sont classés plus particulièrement suivant la forme de l'énergie directement utilisable pour le soudages par exemples soudage à l'arc, soudage la flamme,...et finalement suivant les modalités de réalisations par exemples soudage l'arc électrique avec électrodes enrobées, soudage par résistance à la molette, etc..

Les principaux procédés de soudage sont :

- ✚ soudage à l'arc électrique :
  - avec électrodes enrobées,
  - avec électrodes réfractaires (non fusibles) : TIG
  - avec fil électrode sous protection gazeuse : MIG, MAG,
- ✚ -soudage par résistance électrique :
  - par points
  - par étincelage,
  - à la molette,
  - par bossages,
- ✚ soudage par faisceau d'électrons,
- ✚ soudage au plasma,
- ✚ soudage par LASER
- ✚ soudage par friction
  - soudage oxyacétylénique, etc..[16].

LaFigure I.1regroupe les différents procédés de soudage

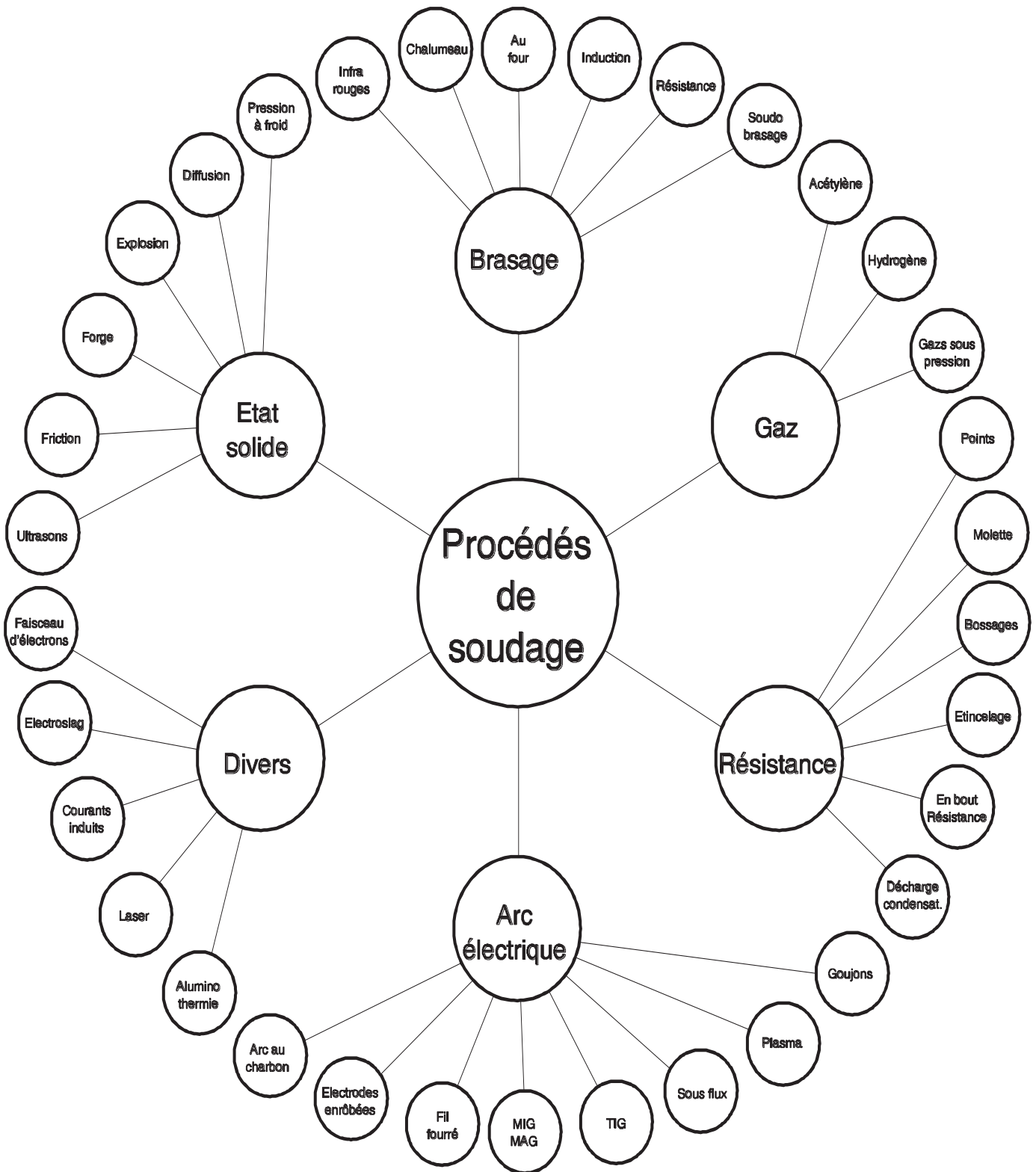


Figure I.1:Schéma représenté les procédés de soudage [16].

## 1.4 Types de soudure

Le soudage est un moyen d'assemblage des pièces de manière permanente. Une technique qui permet la continuité métallique entre les pièces soudées. Il existe 3 types de soudures :

- La soudure homogène : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- La soudure hétérogène de type A : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type B : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes.

Selon les caractéristiques des matériaux à souder, l'énergie du soudage sera différente. Ce guide pratique se propose de passer en revue les principaux procédés de soudage ainsi que le matériel requis et les équipements individuels de protections propres aux soudeurs[13].

## 2 SOUDAGE PAR RESISTANCE

### 2.1 Définition

Un moyen d'assemblage indémontable de tôles, entre elles, mais aussi d'écrous, vis, gougeons, sur une tôle, celles-ci peuvent être indifféremment d'acier, d'acier galvanisé ou électrozingué, d'aluminium mais aussi de cuivre (faible épaisseur), laiton, zinc, nickel, or, argent, plomb. Ce mode d'assemblage est très répandu dans l'industrie automobile et aéronautique par exemple, pour sa rapidité d'exécution (grande partie robotisé) sa qualité mécanique et son faible coût.

### 2.2 Types de soudage par résistance

#### 2.2.1 Le soudage à la molette

Dans le cas du soudage à la molette, les électrodes sont constituées par deux disques mobiles (galets) permettant le déplacement des pièces pendant le soudage . Les points soudés sont réalisés sans relâcher la pression de serrage. Chaque point résulte d'une impulsion de courant qui a lieu pendant la rotation des galets, c'est-à-dire, pendant l'avance des pièces à souder. Si les points sont jointifs ou se recouvrent, l'assemblage est étanche. Si les points sont espacés, on réalise simplement une jonction mécanique par un cordon de soudage discontinu (voir figure I.2).

Des vitesses de soudage de 2 à 4 m/minutes sont typiques, cependant il est possible d'atteindre des vitesses beaucoup plus élevées, le maximum se situant aux environs de 15 m/min. L'utilisation des machines spécifiques à très haute fréquence permet d'arriver à 50 m/min dans le cas particulier du soudage longitudinal des boîtes de conserve qui est une application phare du soudage à la molette. Une autre application très répandue est le soudage

des filtres. En effet, le fait de ne pas utiliser un arc électrique pour le soudage permet de souder facilement des fins treillis sans risque de les brûler [4].

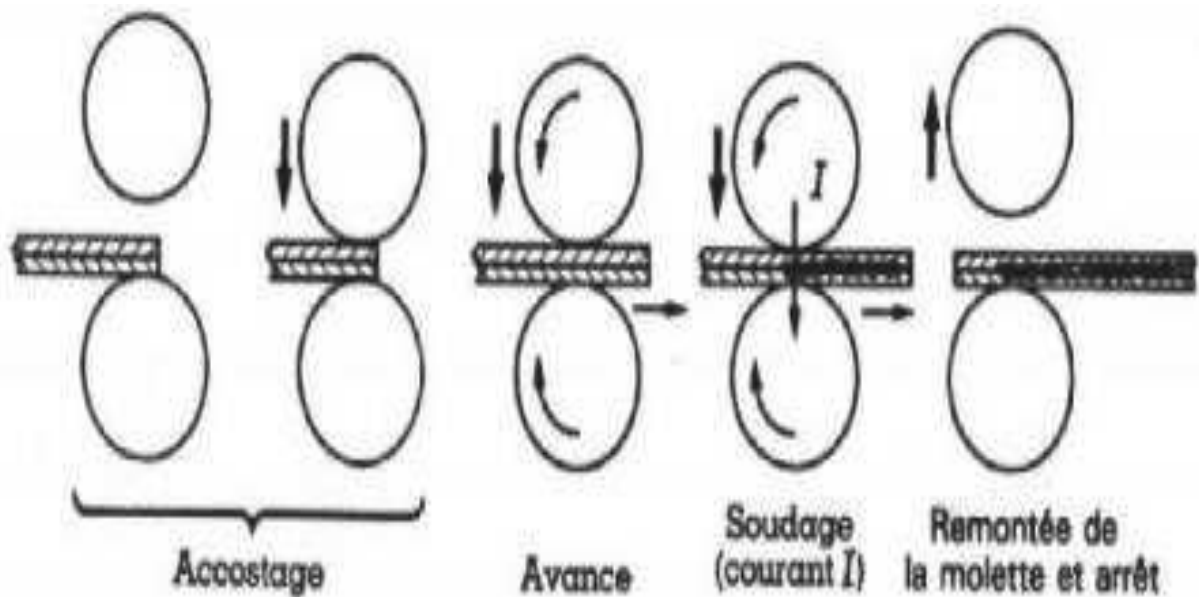


Figure I.2 : l'opération de soudage par molette [4].

### 2.2.2 Soudage par bossage

Le procédé de soudage par bossage est une méthode d'assemblage directement dérivée du soudage par résistance par points. Les électrodes du soudage par points étant dans ce cas remplacées par des plateaux avec saillies appelées « Bossages » préparés sur une des pièces à assembler, en réalisant ainsi une concentration de courant nécessaire à leur fusion. **Figure I.3** L'échauffement ayant toujours lieu par effet moment de la fusion et disparaissent pour former le joint. Ils peuvent être semi-sphériques, oblongs, annulaires. Ils peuvent être naturels, le courant étant normalement canalisé par la géométrie de la pièce à souder (fils en croix, vis, bouchons et tubes) ou peuvent être artificiels par emboutissage ou par matriçage, crevés (tôles peintes, plastifiées, etc...) **tableau I.1**.

Ce procédé est souvent utilisé dans le cas d'assemblage de tôle ayant une certaine courbure afin de garantir un contact correct entre les deux tôles. C'est un procédé permettant de souder plusieurs bossages en un cycle, de localiser exactement les points soudés, de souder sans déformation et d'éliminer l'indentation sur une des tôles [15].

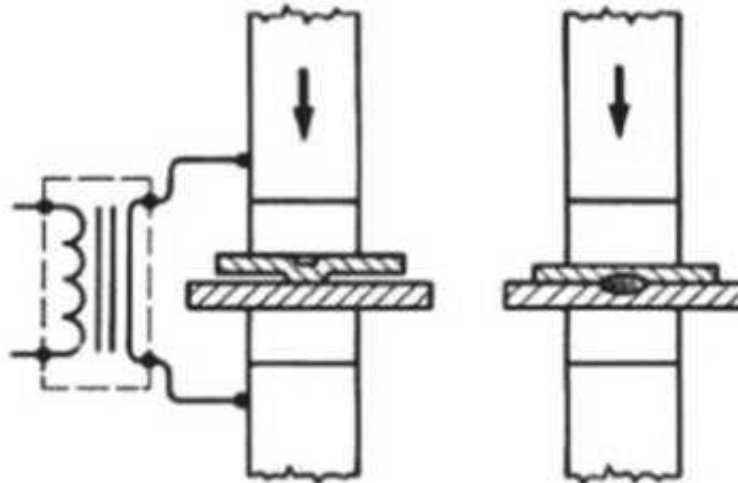
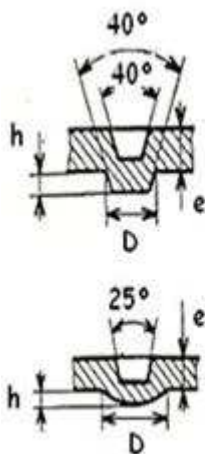


Figure I.3:l'opération de soudage par bossage [15].

Tableau I.1 :les parametres de soudage par bossage



Épaisseur de la pièce e (mm)	Hauteur du bossage h (mm)	Diamètre du bossage D (mm)	Diamètre du point de soudure (mm)	Intensité du courant de soudage (A)	Effort de soudage (daN)	Effort de forgeage (daN)
0,3	0,5	2,4	3,4	6 500	70	150
0,5	0,55	2,9	4,1	6 700	80	160
0,8	0,70	3,4	4,8	7 000	90	200
1	0,75	3,7	5,2	7 500	100	220
1,5	1	4,3	6	8 400	140	280
2	1,20	4,6	6,5	9 500	200	370
2,5	1,45	4,7	6,6	10 800	280	470
3	1,50	6,6	9,3	13 400	360	800
3,5	1,58	6,9	9,7	13 700	440	730
4	1,65	7,2	10,1	14 200	550	870
4,5	1,72	7,5	10,5	15 400	650	1050
5	1,80	7,8	11	16 700	800	1250

### 2.2.3 Soudage par étincelage

La méthode de soudage en bout par étincelage est utilisée dans de nombreuses applications de par sa productivité et sa fiabilité pour obtenir un résultat de soudage solide et cohérent.

Le soudage en bout par étincelage est un des procédés de soudage par résistance, où l'énergie transférée aux pièces à joindre est principalement fournie par la chaleur de la résistance des pièces elles-mêmes **Figure I.4**.

Les pièces à souder sont placées bout à bout. En règle générale, le procédé de soudage en bout par étincelage est sous-divisé en pré-étincelage, pré-chauffage, étincelage et refoulement. Le pré-étincelage est utilisé pour gérer les problèmes lorsque les deux surfaces à joindre ne sont



pas parallèles. Le pré-chauffage est effectué à une basse pression de soudage. Lorsque le joint de soudage a été chauffé à une certaine température, l'étincelage démarre et le matériau de surface est brûlé pour l'obtention d'une surface de joint plane et propre. L'étincelage se compose de matériel fondu et oxydé. Après l'étincelage, le refoulement commence en exerçant une forte pression sur les deux surfaces pour produire un bon joint [14].

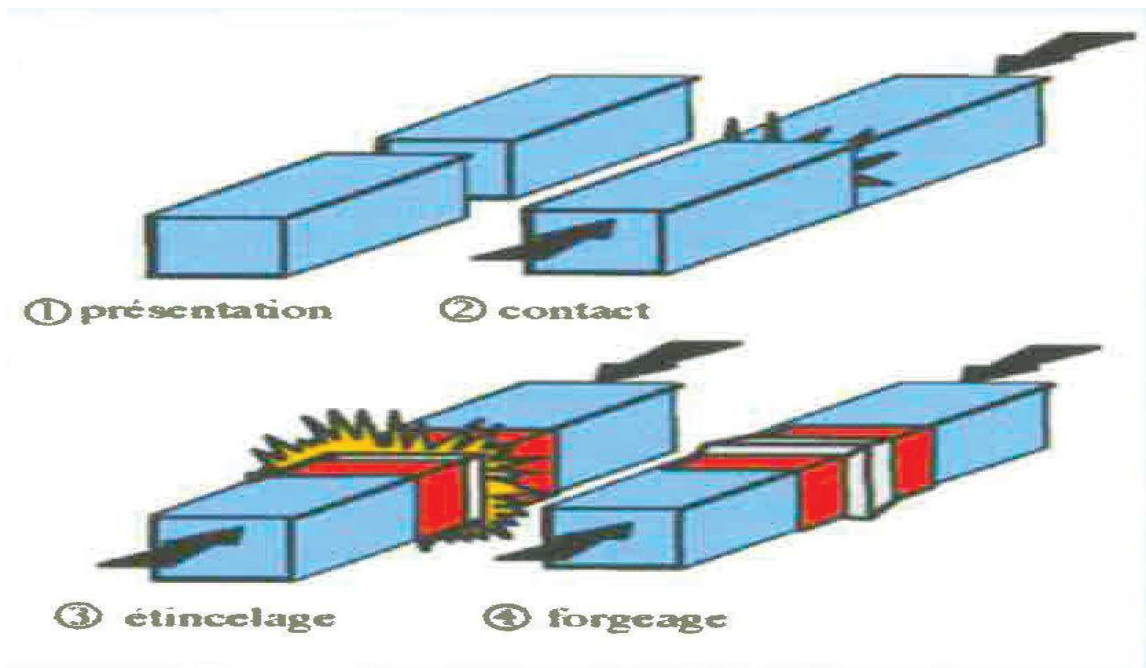


Figure I.4 : l'opération de soudage par étincelage [14].

## 2.2.4 Soudage par Résistance par Points

### 2.2.4.1 Principe du Procédé

Le principe du soudage par points schématisé sur la Figure I.5 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 maintient localement les deux tôles entre elles.

Un cycle de soudage schématisé sur la Figure I.5 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 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.

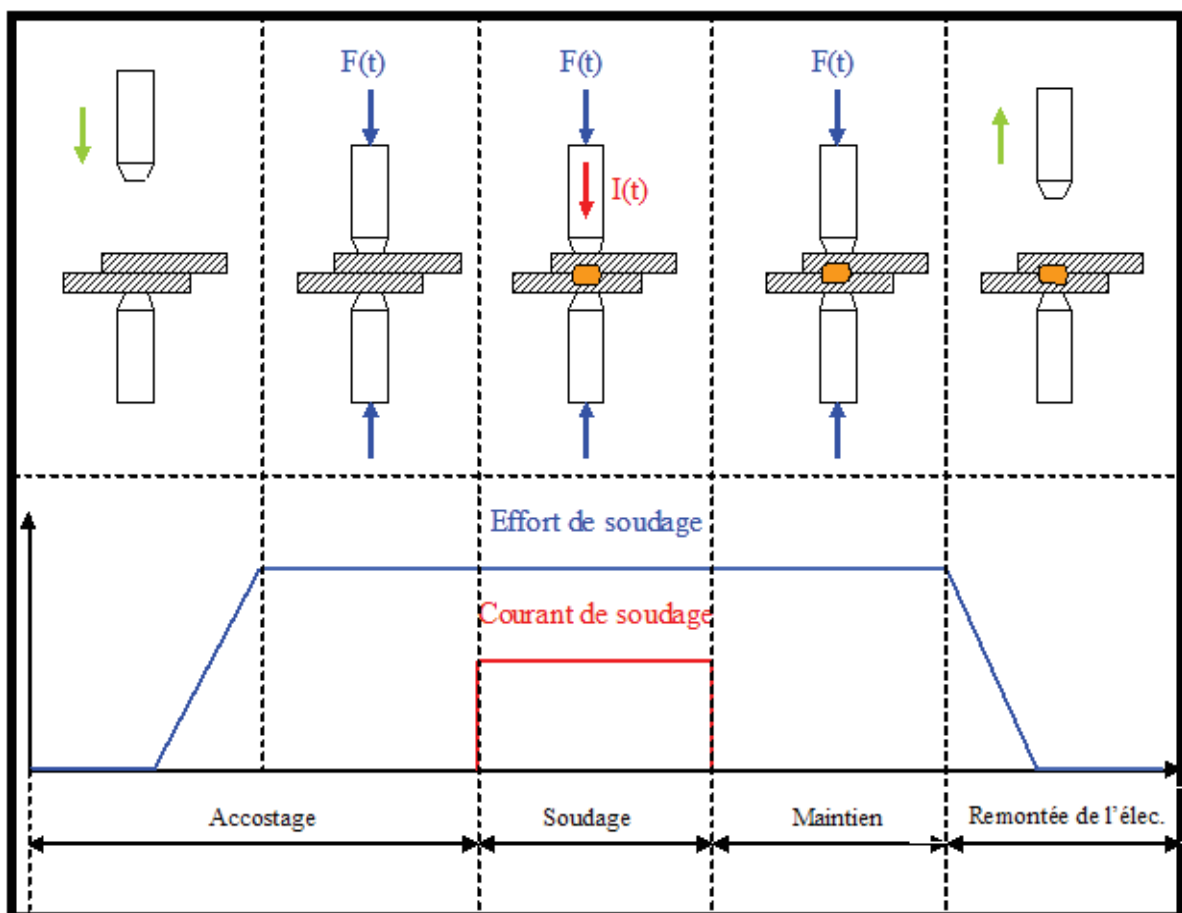


Figure I.5: Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point

### 2.2.4.2 Paramètres du Procédé :

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

✚ **Effort de soudage** : l'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, (Figure I.5), 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 derefroidissement.

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

Intensité de soudage en kA, sous quelques V, (environ 7 à 10 kA)

Effort de serrage en daN, (comprise entre 230-600 daN et dépend du comportement mécanique de l'acier)

Durée d'un cycle, environ 1 seconde. (Sans modification particulière des conditions de soudage, ni pré-, ni post-chauffage)

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

♦ **Électrode** : Les électrodes sont des éléments essentiels pour ce procédé. Un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la Figure I.6. 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.

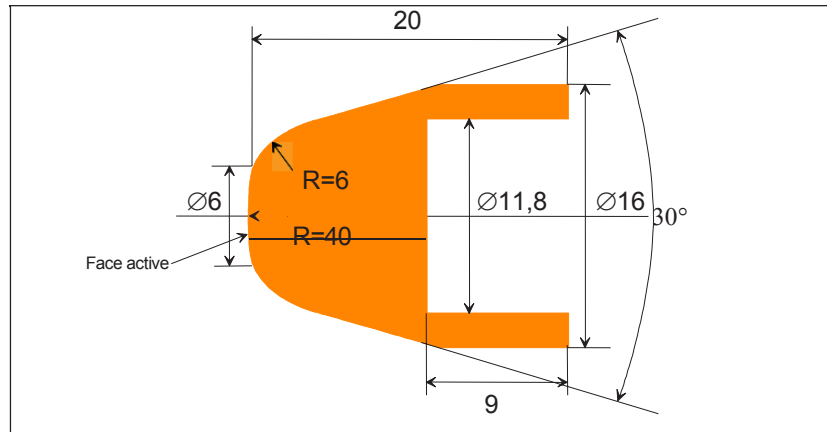
- électrique : la forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique.

- thermique : l'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface. Le matériau de l'électrode donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique.

Pour réponse à ce cahier des charges, l'alliage de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr, et Cu-Cr-Zr) est très répandu pour le matériau de l'électrode grâce à ses performances en tenue mécanique à chaud et la bonne conductivité électrique et thermique. L'électrode en alliage de cuivre à dispersoïde-(Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 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 moine tenu mécanique du point.

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



**Figure I.6:** Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm: TH6

Après un certain nombre de points soudés, la face de l'électrode est détériorée et agrandie par la déformation thermique répétée en compression à chaud. Cet agrandissement de face active réduit notamment le diamètre du noyau souhaité. En premier lieu, le recalage de l'intensité s'effectue en augmentant sa magnitude pour maintenir la taille de diamètre du noyau défini. Avec un certain nombre de points soudés après recalage, il est inévitable de remplacer les électrodes à cause du mauvais état de la face active. Le nombre maximum des points soudés avant le remplacement définit la durée de vie des électrodes. Elle dépend principalement du type de revêtement ainsi que la qualité de surface pour une nuance donnée. Elle pourrait être de plusieurs dizaines de milliers pour l'assemblage de tôles nues et de quelques centaines de points pour l'assemblage de tôles à revêtement organique[5].

### 2.2.4.3 Paramètres de soudage pour acier 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 redilution de celui-ci ne s'effectue pas harmonieusement dans les différentes phases allotropiques parcourues (Fer  $\alpha$  Fer  $\gamma$  Fer  $\delta$ ).

**Tableau I.2:** Paramètres de soudage pour acier doux[10]

ep. (mm)	Ø Élect.	Ø Face active	Pas	Recouv.	Tpsoudure (~)	Effort (daN)	Intensité (A)	Ø Débout.	R (kgf)
0,25	9,5	3,5	6,5	9,5	3	90	4600	3,3	100
0,5	9,5	4	9,5	11	4	130	6100	4,3	240
0,75	9,5	4,5	12,5	11	6	180	8000	5	440
1	12,7	5	19	12	8	230	9500	5,8	610
1,25	12,7	5,5	22	14	10	290	10500	6,3	825
1,5	12,7	6	27	15	11	320	11000	6,7	900
1,75	12,7	6,5	31	16	14	380	12000	7,5	1250
2	16	7	35	18	17	500	13300	7,9	1460
2,5	16	8	40	20	21	590	14700	8,6	1850
3	16	9	50	22	25	815	17500	10,2	3120
3,5	20	10	57	27	34	925	18200	11,2	3880
4	20	11	66	32	41	1030	18900	11,9	4750
4,5	20	12	80	38	55	1200	19800	13	6000
5	20	13	88	44	70	1320	20900	14,7	6700
6	25	15	110	47	79	1600	22700	17	8250
7	25	17	133	66	116	2000	24400	19	9850
8	30	19	146	73	135	2400	25700	20,8	10800

#### 2.2.4.4 Domaine de Soudabilité :

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

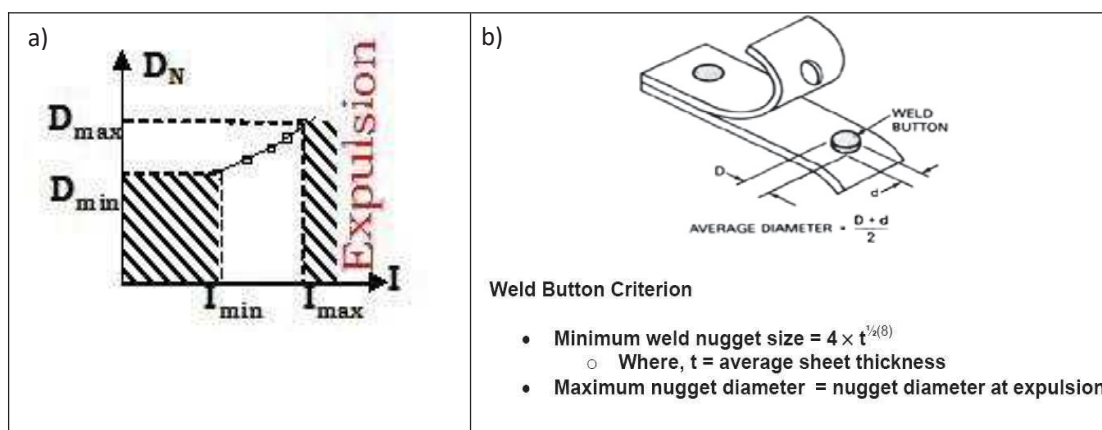
Dans la pratique, on parle de diamètre du bouton déboutonné et donc la tenue mécanique varie avec l'intensité efficace. Le critère prédéfini correspondant à la norme est la taille de diamètre du noyau acceptable avec une intensité efficace minimale.

Par « domaine de soudabilité », Figure I.7, on entend ainsi l'intervalle de  $[I_{min}, I_{max}]$ , où  $I_{min}$  est l'intensité minimale donnant un diamètre acceptable et  $I_{max}$  est l'intensité maximale ne provoquant pas d'expulsion. L'expulsion s'interprète par une chute de signal d'effort en cours de soudage.

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

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

Compte tenu des types d'électrodes, l'intensité de soudage est variée en cas de différent type d'électrode utilisé. Car l'électrode joue un rôle sur la taille du contact pendant le soudage Il est donc à noter que le type de profil de l'électrode est considéré comme un des paramètres importants autant que l'intensité, le temps de soudage, le temps de maintien.



**Figure I.7** :a) Variation qualitative du diamètre de bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à  $4t^{1/2}$

( $t$  = épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en mm.) d'après-[Weld Quality Test Method Manual]

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

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

#### 2.2.4.5 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée  $t$  en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation :  $Q = \int RI^2 dt$

Où 'Q' est la quantité de chaleur générée en joules

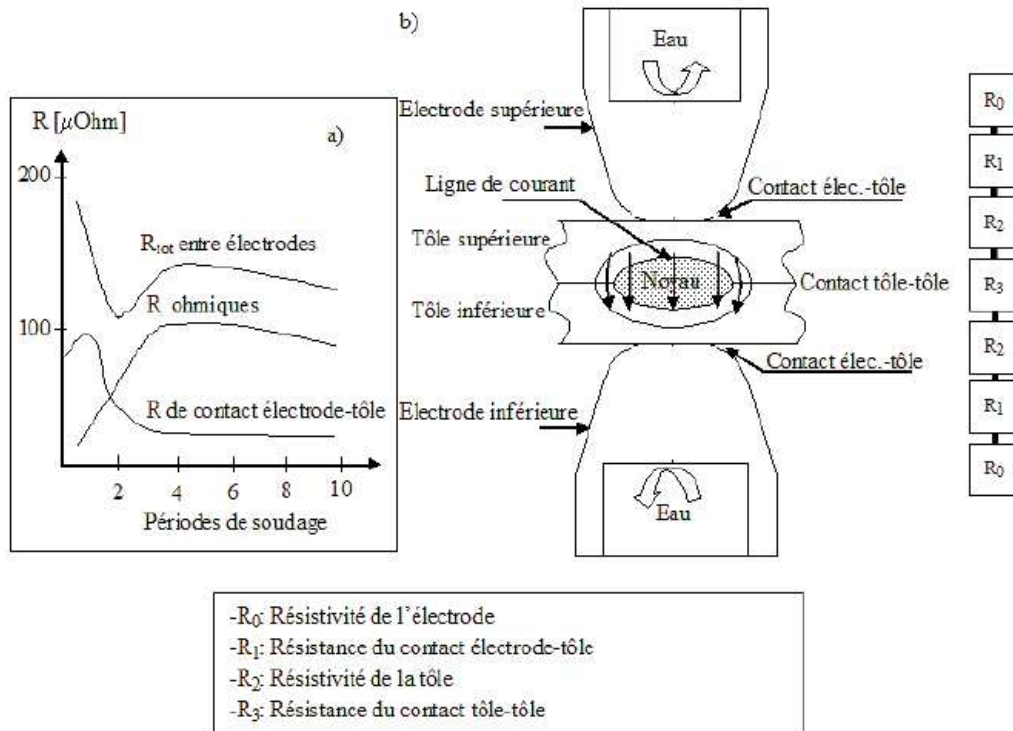
'R' est la résistance électrique dynamique globale des pièces, en ohm

'I' est l'intensité de courant de soudage en ampère

't' est le temps de passage du courant en seconde

**Figure I.8:** Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ;





**Figure I.8:** Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ( a) Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues, ( b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [1]

## 2.2.4.6 Point soudé

✚ Géométrie d'un point soudé

La géométrie d'un point soudé présente dans la figure I.9

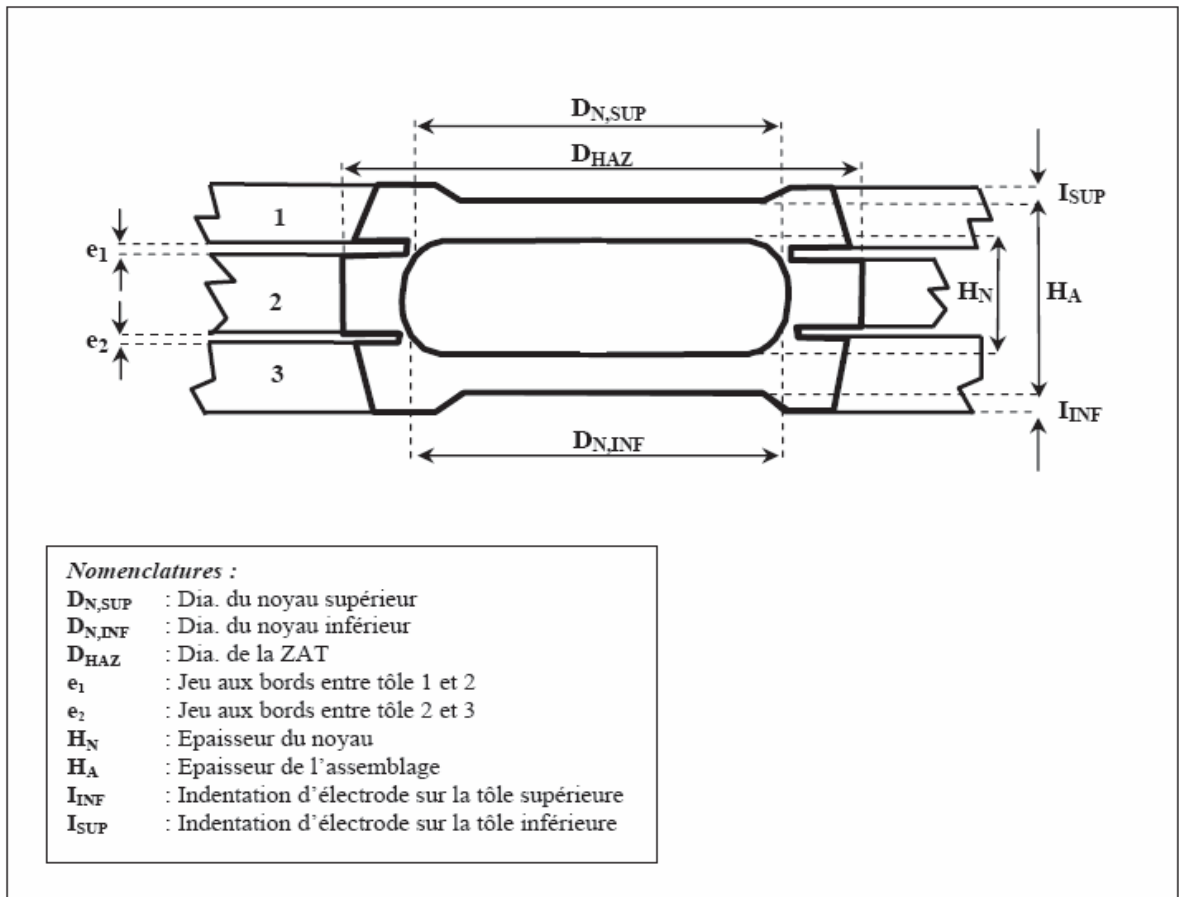


Figure I.9. : Géométrie d'un point soudé

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

Si la puissance électrique fournie est trop faible, le noyau fondu est trop petit, voire inexistant, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus on augmente la puissance fournie, plus la zone fondue est étendue et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques. Cependant, passé un certain seuil, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille soit une des faces extérieures de la tôle : sous l'effet de la pression mécanique exercée par les électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu (phénomène dit "d'expulsion") : la qualité du point soudé s'en trouve dégradée.

Ainsi, pour un type de tôle, une durée de soudage et un effort donnés, il existe une intensité minimale, en dessous de laquelle la tenue mécanique minimale définie par le cahier des

charges de l'utilisateur du procédé n'est pas assurée, et une intensité maximale, au-dessus de laquelle il y a expulsion. Nous allons revenir dans le paragraphe suivant sur cette plage d'intensités acceptables, appelée "**domaine de soudabilité**" du produit.

### Métallurgie du point soudé

L'opération de soudage est caractérisée par la rapidité des cycles thermomécaniques appliqués. En effet, les vitesses de refroidissement et de chauffage sont de l'ordre de  $1000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , et le temps total de l'opération ne dépasse pas quelques dixièmes de seconde. Cette rapidité explique la complexité des transformations métallurgiques

Subies par le métal lors de l'opération de soudage par résistance. On distingue alors, trois zones principales (Figure I.10) :

**a) Zone Fondue (ZF)** C'est une petite zone située au cœur du point soudé qu'on peut aussi l'appeler « Noyau ». En effet, dans cette zone, l'acier passe à l'état liquide puis il se refroidi jusqu'à la température ambiante. La composition chimique ainsi que la dureté de cette zone dépendent principalement de la vitesse de refroidissement. Suite au refroidissement rapide, une microstructure grossière est obtenue. Cette zone est caractérisée par la présence des phases martensitiques et bainitiques résiduelles qui expliquent alors la dureté importante dans la zone fondue [8].

**b) Zone Affectée Thermiquement (ZAT)** Cette zone en tourne le Noyau du point soudé.

Dans cette zone l'acier atteint de hautes températures mais sans atteindre le point de fusion. Le cycle thermique engendré lors de l'opération de soudage cause des modifications métallurgiques remarquables dans la composition de cette zone. La ZAT est à son tour peut être décomposée en quatre zones en fonction de la température de chauffage maximale  $T$  atteinte lors de l'opération de soudage (Figure I.10) [8].:

— La zone subcritique SCZAT : la température maximale est supérieure à  $600^{\circ}\text{C}$ , sans dépasser la température de début d'austénitisation  $A_{c1}$  ( $600^{\circ}\text{C} < T < A_{c1}$ ). Lors du refroidissement, des phénomènes de revenu ou de précipitation peuvent être décelés en fonction des propriétés du métal de base. Cependant, aucun effet sur la taille des grains n'est observé.

— la zone intercritique ICZAT : la température maximale est comprise entre la température de début d'austénitisation et la température de fin d'austénitisation  $A_{c3}$

( $A_{c1} < T < A_{c3}$ ). C'est la zone d'austénitisation partielle, caractérisée par la coexistence de la ferrite et de l'austénite. Des modifications importantes de la microstructure sont observées dans cette zone.

— la zone à grains fins GFZAT : la température maximale est entre  $A_{c3}$  et  $1100^{\circ}\text{C}$  ( $A_{c3} < T < 1100^{\circ}\text{C}$ ). C'est la zone d'auténitisation totale, caractérisée par une structure bainito-martensitique fine.

— la zone à gros grains GGZAT : la température maximale est entre  $1100^{\circ}\text{C}$  et la température de fusion  $T_f$  ( $1100^{\circ}\text{C} < T < T_f$ ). Cette zone est caractérisée par le grossissement des grains austénitiques et par conséquent une forte trempabilité. Après refroidissement une microstructure martensitique homogène est généralement obtenue.

c) **Métal de base (MB)** Dans cette zone la température atteinte lors de soudage ne dépasse pas  $600^{\circ}\text{C}$ , ce qui garantit le maintien des propriétés microstructurales initiales des matériaux assemblés [8].

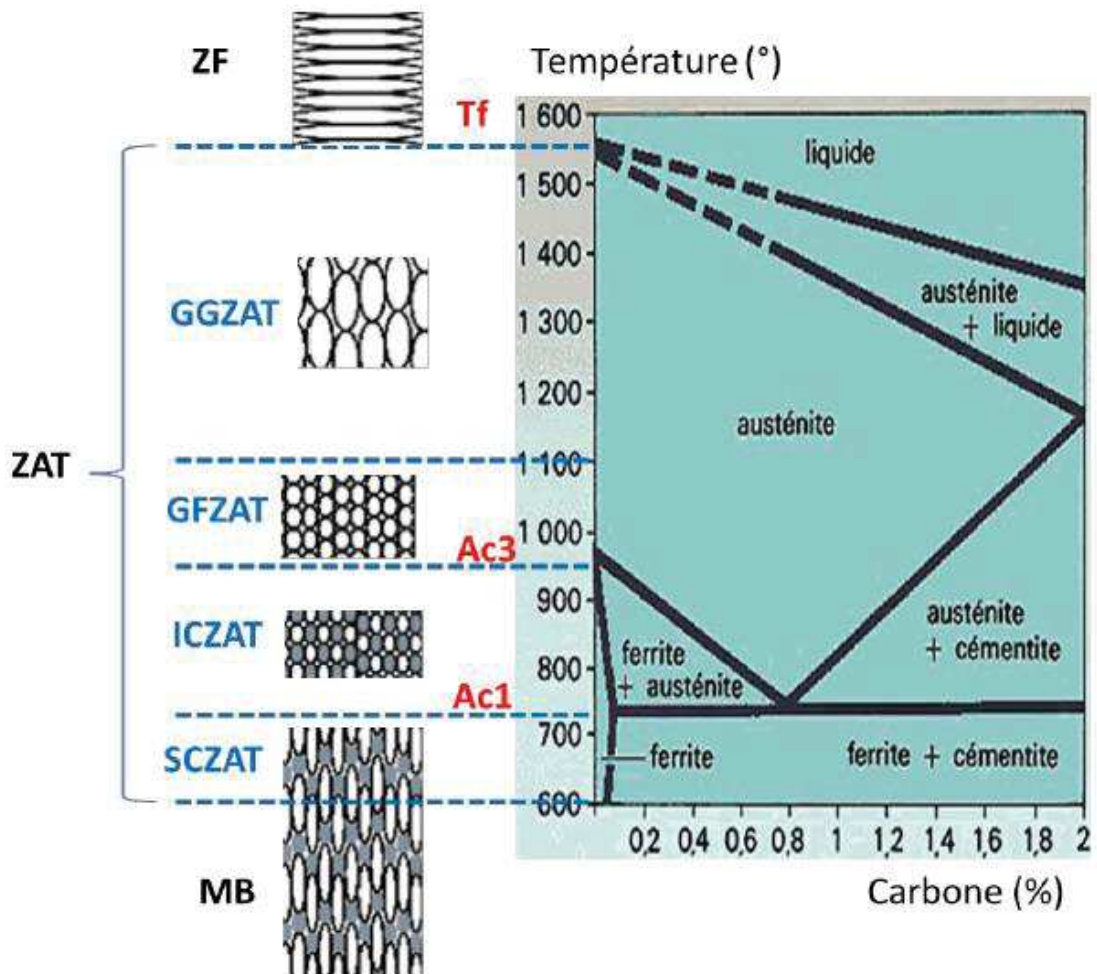


Figure I.10. Microstructures générées par l'opération de soudage [8].

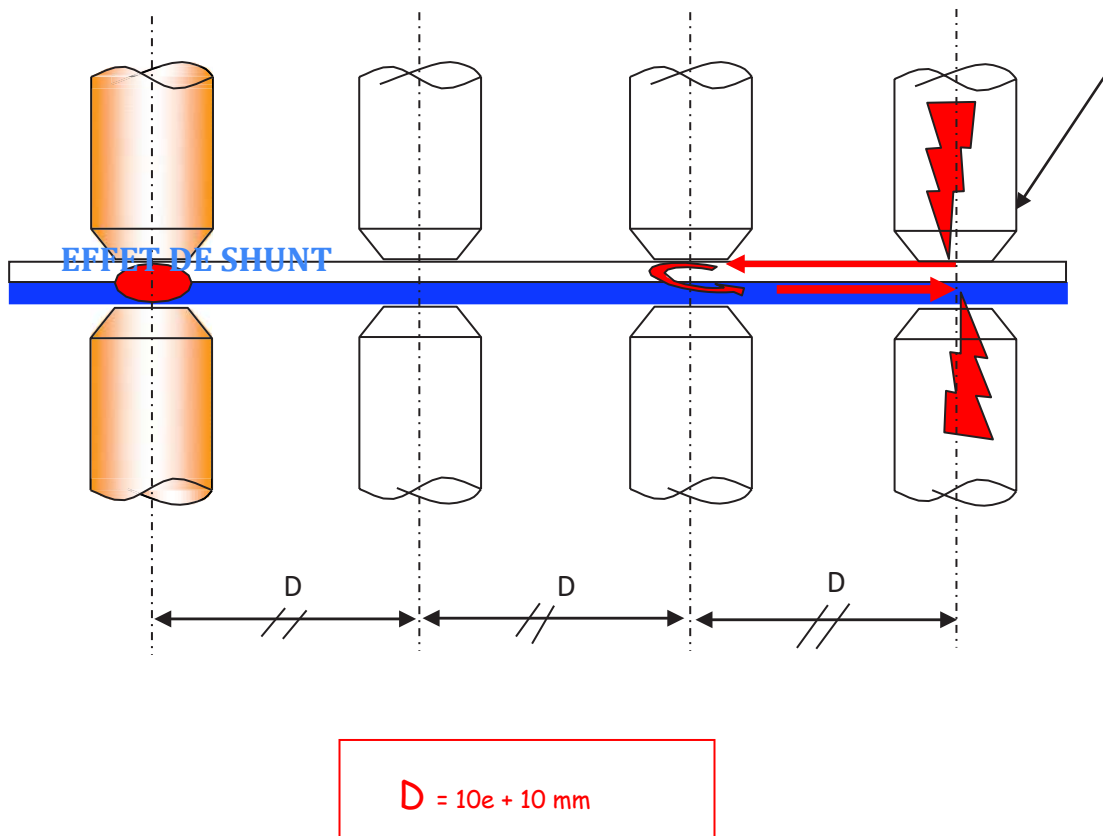
**✚ Distance entre chaque point :**

La distance entre deux points de soudure doit être  $10 \times \text{épaisseur} + 10\text{mm}$  pour éviter « l'effet de shunt » du courant de soudage.

C'est quoi « l'effet de SHUNT » ?

L'effet de shunt c'est lorsque la distance entre points de soudure n'est pas respectée et le courant au lieu de passer d'une électrode à l'autre au travers d'une pièce à assembler le courant passe par le précédent point déjà existant sans réaliser un point de soudure.

La conséquence : Aucun point de soudure ne se réalise.



**Figure I.11 :** Distance entre chaque point

### 3. Etat de l'art sur les effets des paramètres de soudage

#### a) Effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la taille du noyau

L'effet du temps de maintien et le courant de soudage a été étudié par Kianersi et al[7], ils ont montré que la taille du noyau augmente avec l'augmentation du temps de soudage et l'intensité. La raison principale est attribuable à l'apport de chaleur plus élevé, ce qui conduit à la formation d'un noyau plus grande.

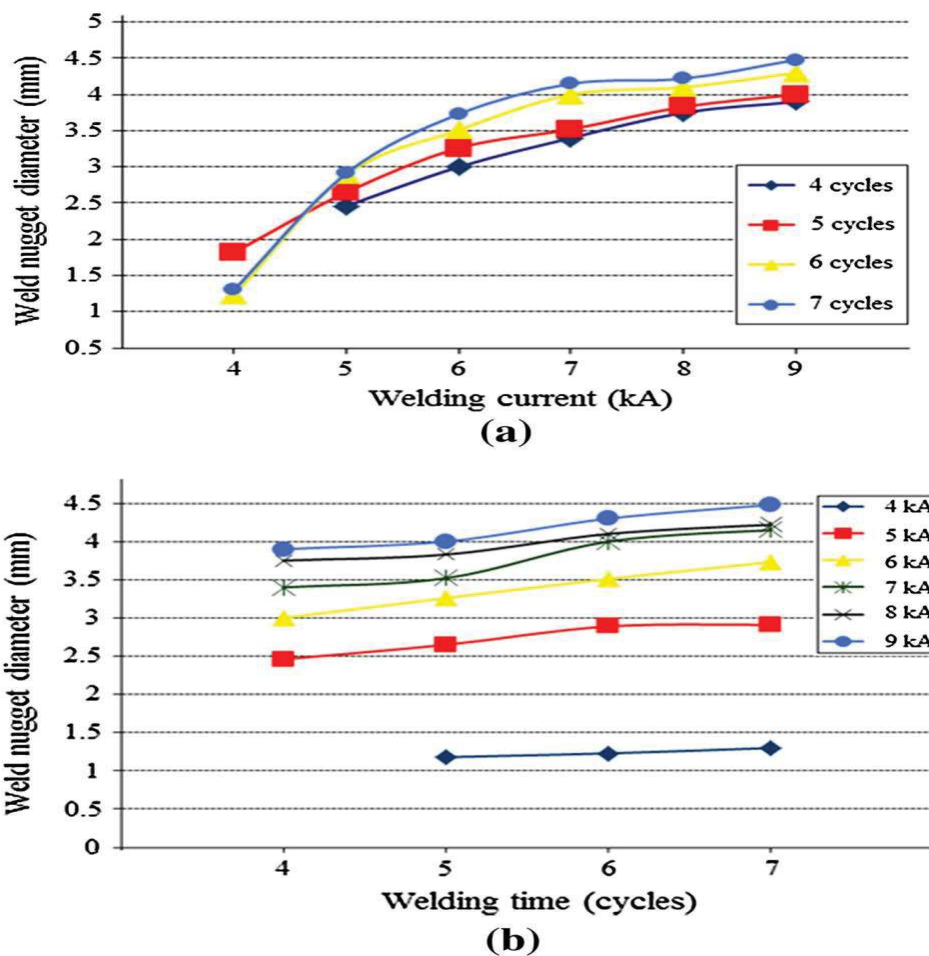
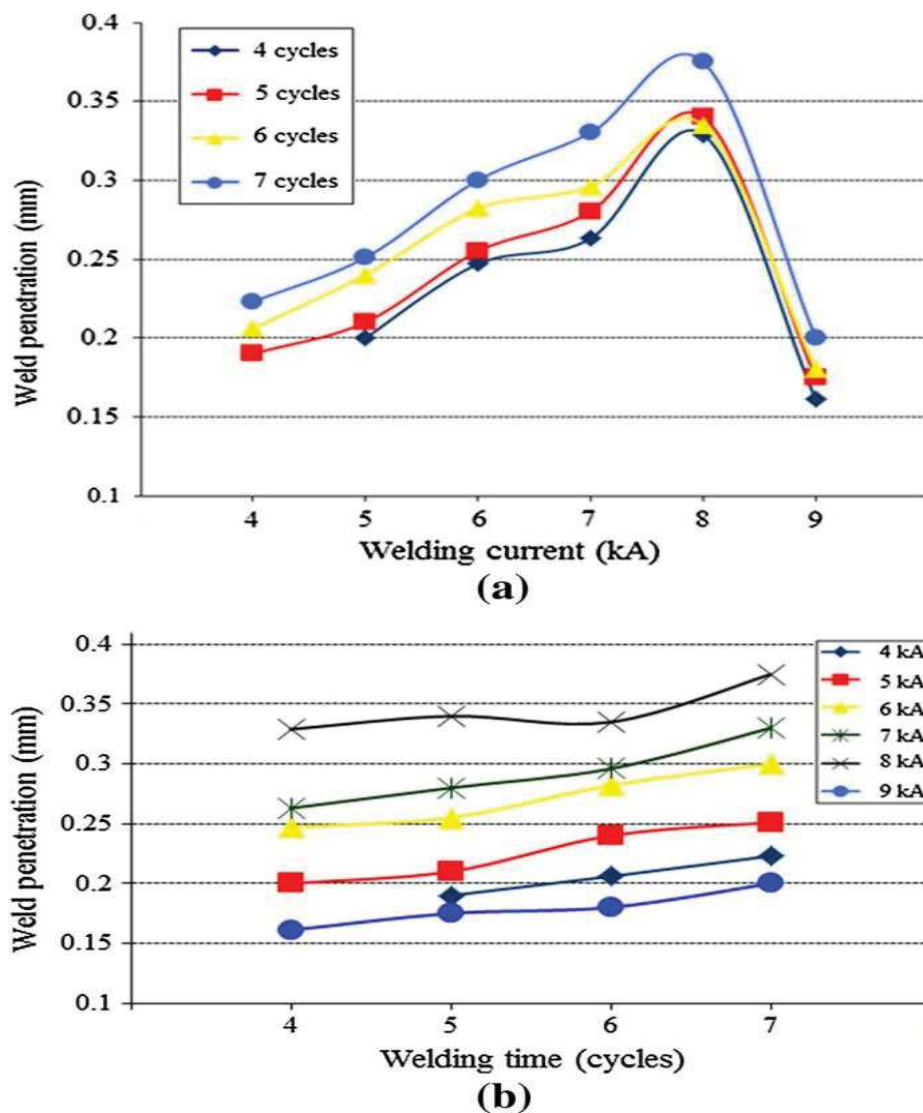


Figure I.12 : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur le diamètre de noyau [7].

#### b) Effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la pénétration

L'effet du temps de maintien et le courant de soudage sur la pénétration a été étudié par Kianersi et al[7], ils ont montré que la pénétration augmente avec augmentation du courant de soudage jusqu'à 8 kA puis diminue pour un courant de soudage de 9 kA. Le même comportement a été détecté dans tous les échantillons.

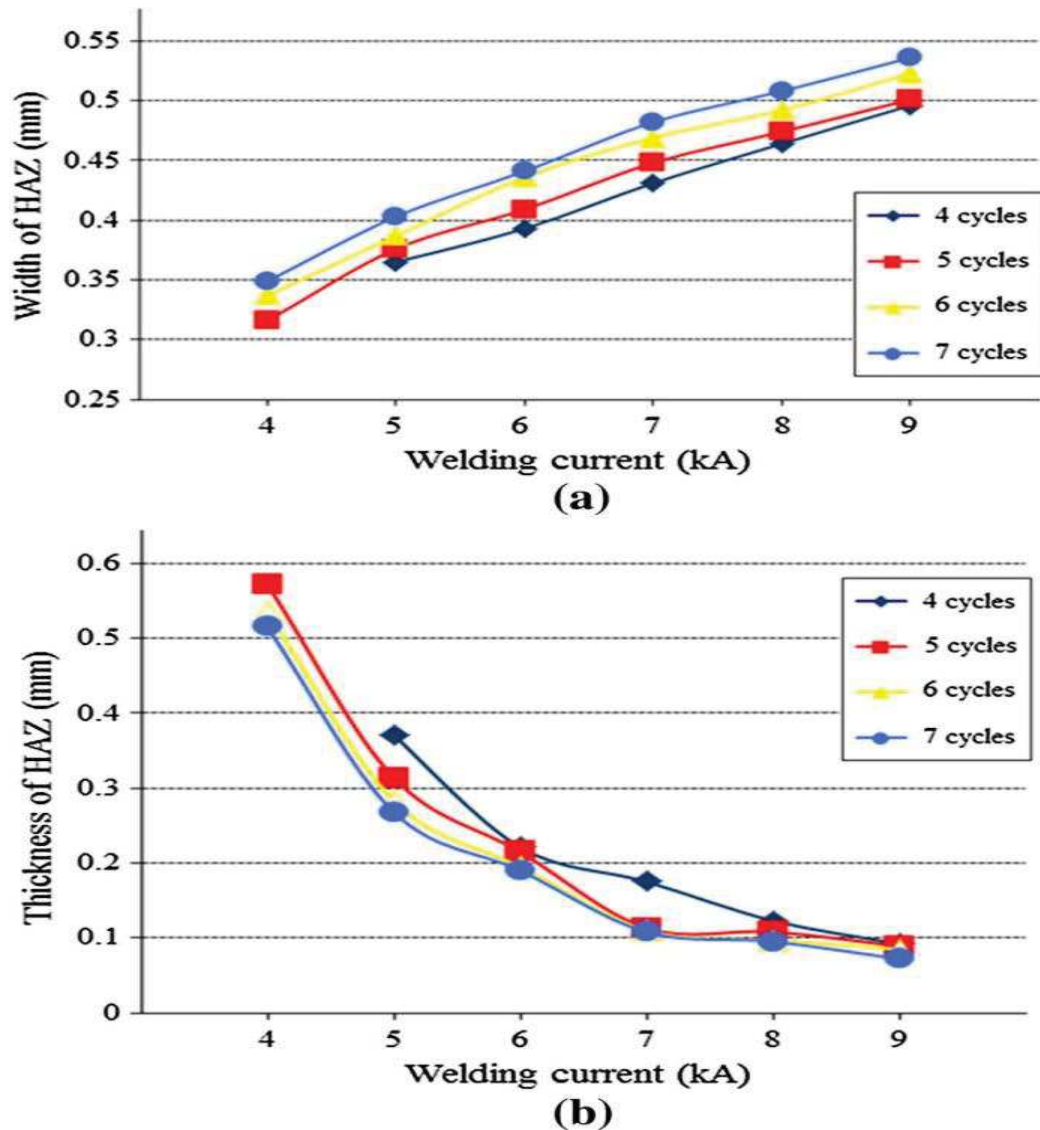


**Figure I.13** : effet (a) de courant de soudage et (b) souder le temps sur pénétration de la soudure [7].

### c) Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur le ZAT

L'effet du temps de maintien et le courant sur la ZAT a été étudié par Kianersi et al[7], ils ont montré que

La ZAT est la zone affectée par la quantité de chaleur perdu dans les échantillons soudés. La figure 4 illustre l'effet du courant de soudage sur la largeur et l'épaisseur de la ZAT. Au fur et à mesure que la quantité de chaleur générée augmente avec l'augmentation du courant de soudage à un temps de maintien constant, la quantité de dissipation de chaleur qui aura lieu dans l'échantillon soudé devient plus grande

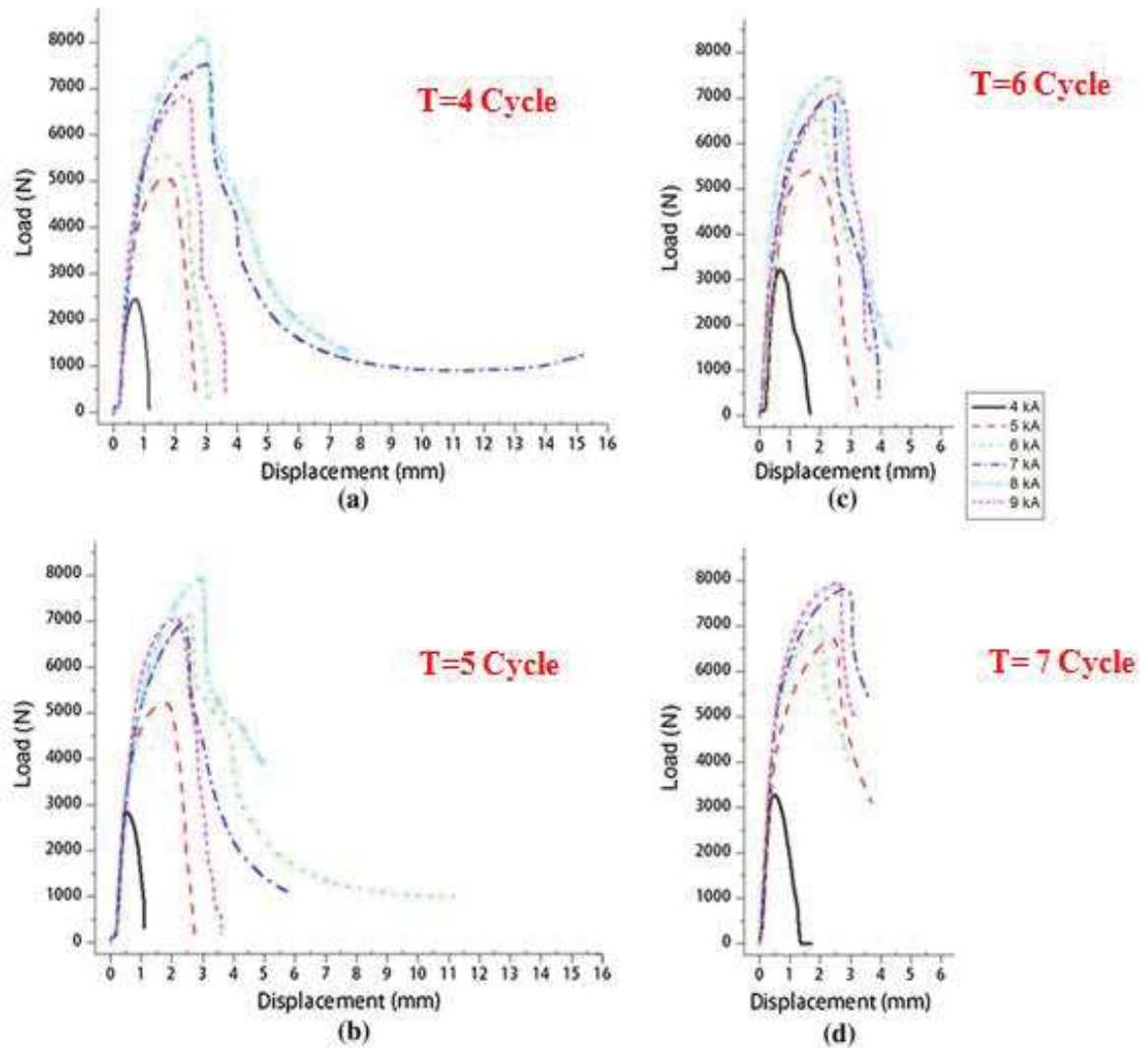


**Figure I.14** : effet de courant de soudage sur (a) la largeur (b) l'épaisseur de la ZAT [7].

**d) Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur les performances mécaniques**

Il y a plusieurs facteurs qui influencent les propriétés physique et mécanique de la structure soudée, Kianersi et al [7] ont étudié l'effet de l'intensité pour différents temps de maintien ils ont remarqué que la charge augmente avec augmentation du courant de soudage jusqu'à 8 kA puis diminue pour un courant de soudage de 9 kA.





**Figure I.15** : courbe de charge-déplacement de points de soudure durant l'essai de cisaillement à la traction produite à divers courants de soudage [7].

#### e) Influence le courant de soudage sur la charge à la rupture

Influence de courant de soudage sur la charge à la rupture a été étudié par Kianersi et al[7], ils ont montré que la charge à la rupture augmente avec augmentation du courant de soudage.

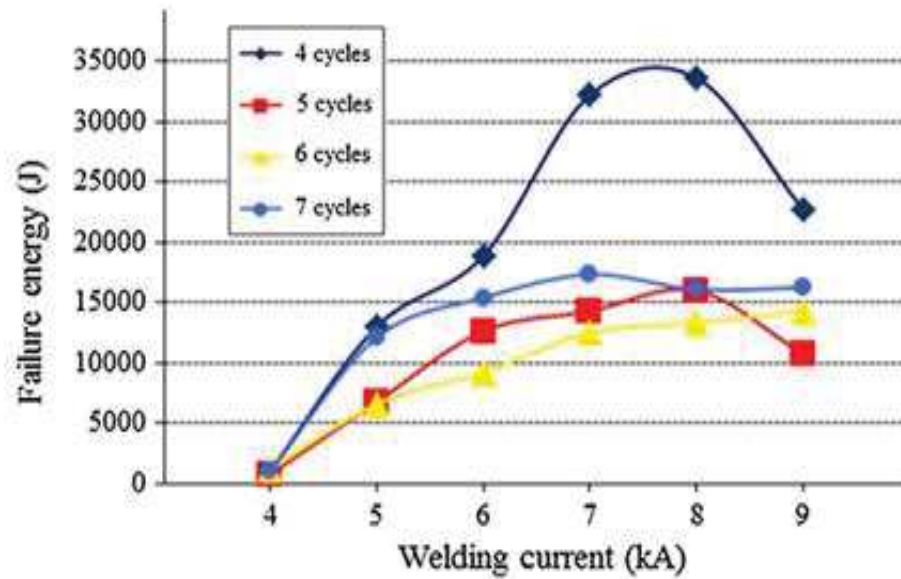


Figure I.16 : effet de (a) le courant de soudage et (b) souder le temps sur l'énergie des défauts [7].

#### f) Influence de diamètre de noyau sur la résistance à la traction

Boriwal, et al [3] étudier l'évolution de diamètre de noyau en fonction de la résistance à la traction il montre que l'augmentation de diamètre de noyau fait augmenter la résistance à la traction (figure 1.11)

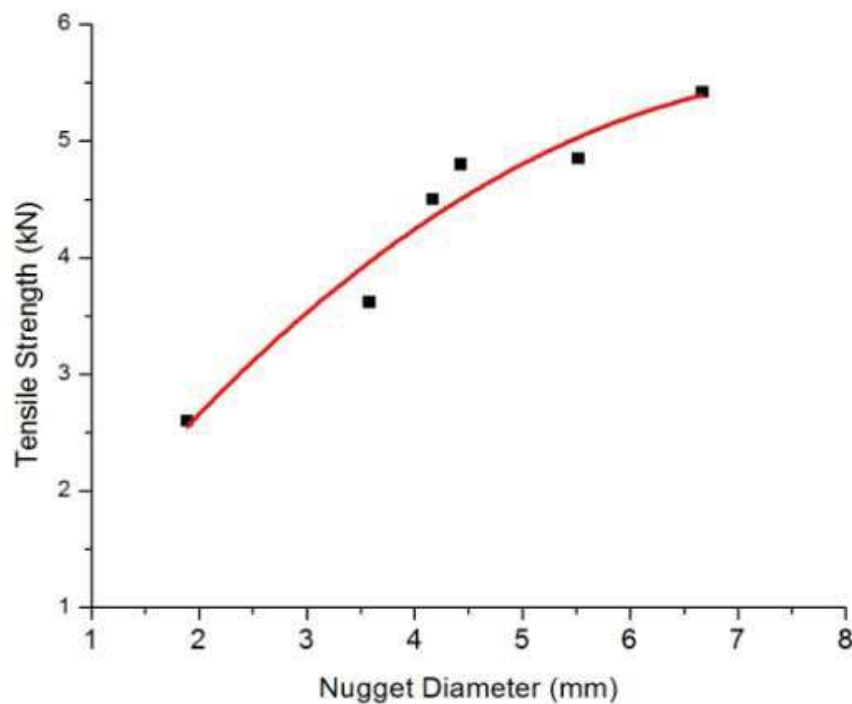


Figure I.17 : effet de diamètre de noyau sur la résistance à la traction de soudage par point [3]

L'effet du diamètre du noyau sur la charge de cisaillement en traction (Figure I.18) a été étudié par Tian et al [9], ils ont montré que la charge de cisaillement en traction augmente avec l'augmentation du diamètre de noyau.

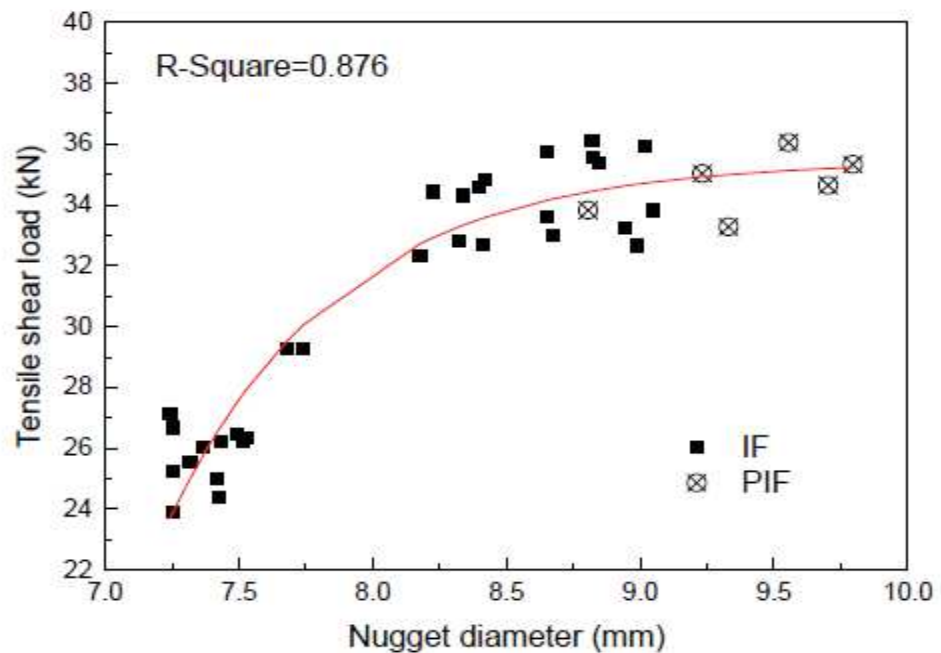


Figure I.18 : Effet du diamètre de noyau sur la charge de cisaillement en traction et le mode de défaillance [9].

g) L'effet du temps de soudure sur le diamètre du noyau et la ZAT

L'effet du temps de soudure sur le diamètre du noyau et la ZAT (Figure I.19) a été étudié par Hayat et al [6], ils ont montré que la largeur du diamètre et de la ZAT augmente avec l'augmentation du temps de soudure.

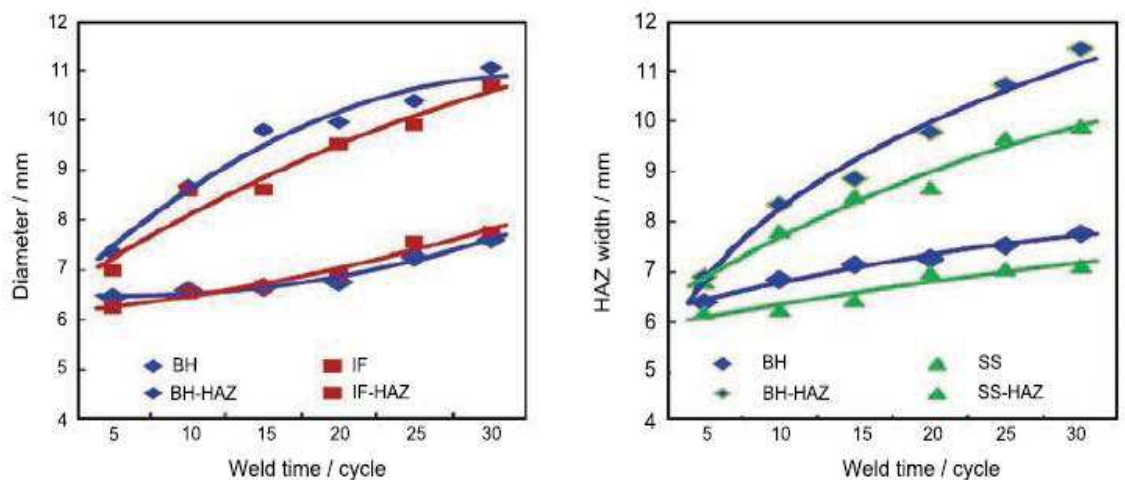
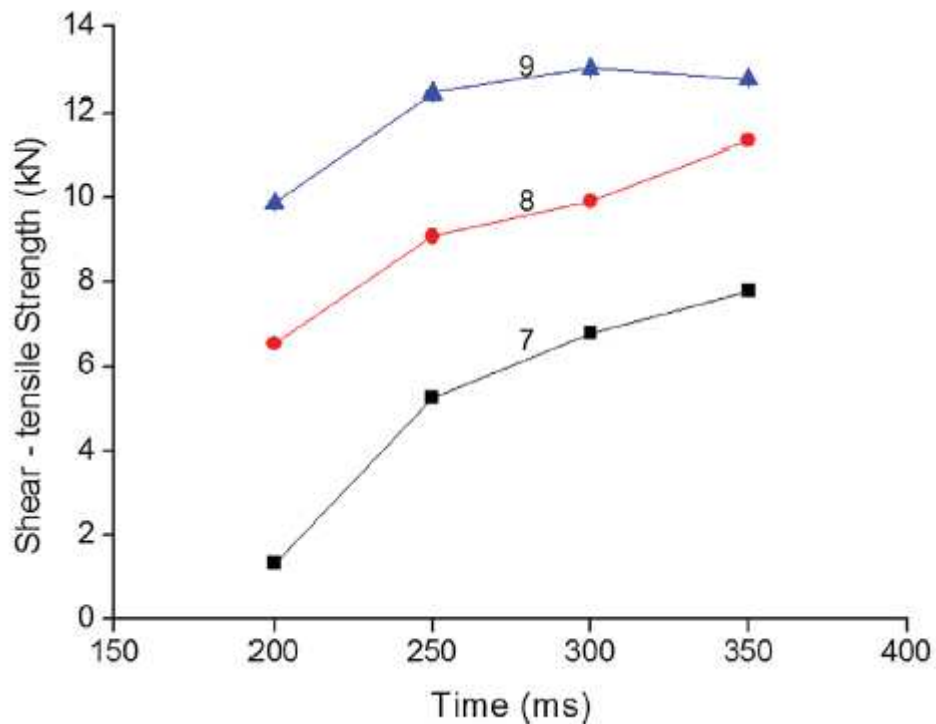


Figure I.19 : La variation du diamètre de noyau (a) et de la largeur de ZAT (b) avec le temps de soudure [6]

**h) L'effet du temps de soudure sur la charge de cisaillement en traction**

L'effet du temps de soudure sur la charge de cisaillement en traction (Figure I.20) a été étudié par **Chhibber et al [2]**, ils ont montré que la charge de cisaillement en traction augmente avec l'augmentation du temps de soudure pour différents intensités.



**Figure I.19** : Résistance au cisaillement et à la traction en fonction du temps de soudage avec une variation du courant de soudage de 7, 8 et 9 kA à une force d'électrode de 3,5 kN [2]

*Chapitre II*  
*Etude*  
*expérimentale*

## 1. Matériaux d'étude : tôle LAF (NF EN 10130)

### 1.1. Définition de tôle LAF (NF EN 10130)

Les aciers pour formage à froid et emboutissage sont des aciers doux non alliés laminés à froid puis recuit en atmosphère contrôlée.

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

Les qualités proposées sont conformes à la norme EN 10130-2007

Utilisation :

Ces aciers sont utilisés pour une mise en forme par pliage ou emboutissage. Les principaux domaines d'application sont l'industrie automobile, l'électroménager, le mobilier métallique, la fabrication de fûts, d'appareils de chauffage et de ventilation, les tubes et les profilés étroits[12].

### 1.2. Caractéristiques chimiques et physiques

**Tableau II.1** : Composition Chimique de l'acier

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

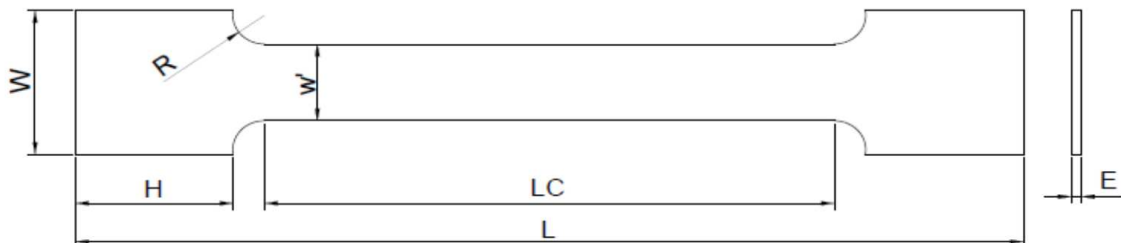
**Tableau II.2** : Caractéristiques mécaniques de l'acier.

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

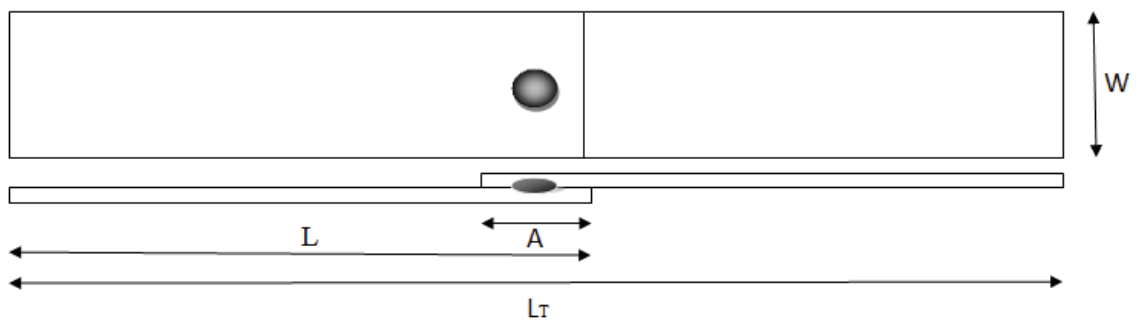
## 2 Essais expérimentaux

### 2.1 Découpage des pièces

Le découpage des éprouvettes plates avec la Poinçonneuse (AMADA) d'épaisseur «  $e=2\text{ mm}$  et  $e=1\text{ mm}$  » dont les dimensions sont données par figure II.1. et figure II.2.



**Figure II.1:** Dimension des éprouvettes normalisées de traction



**Figure II.2:** Dimension des éprouvettes soudées

**W=30 mm** (largeur des têtes)

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

**L<sub>T</sub> = 180 mm** (longueur total)

**L<sub>c</sub> =108 mm** (longueur calibrée)

**L<sub>c</sub>=100,102.5, 105 mm**

**A=20, 25, 30 mm**

**e= 2 mm** (épaisseur de l'éprouvette)

**H = 30 mm** (longueur des têtes)

**R= 6 mm** (rayon)

### Machine utilisé

#### **Poinçonneuse:**

Les tôles ont été découpées avec la poinçonneuse AMADA pour leur donner la forme voulue (**Figure II.4** et **Figure II.5**).

Poinçonneuse (AMADA) (**figure II.3**) est une machine automatique à commandes numériques qui sert à réaliser différentes formes sur les tôles de différents types (acier- aluminium....) et de différentes épaisseurs entre (0.8 mm-6 mm)

La Poinçonneuse (AMADA AE 2510 NT) contient 51 outils et chaque outil a sa propre fonction.



**Figure II.3:** Poinçonneuse (AMADA AE2510NT)





**Figure II.4:** Pièces non soudés



**Figure II.5:** Eprouvettes normalisées de traction

## 2.2 Réglage des paramètres et le soudage

### a) réglage des paramètres

Il existe pour une même application plusieurs réglage possible (tableau 1 et tableau 2) 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 (Bars)
- L'intensité du courant KA
- Le temps de maintien T (cycle)

La géométrie de l'éprouvette définie pour la réalisation des essais de cisaillement par traction est représentée sur la **Figure II.6**.

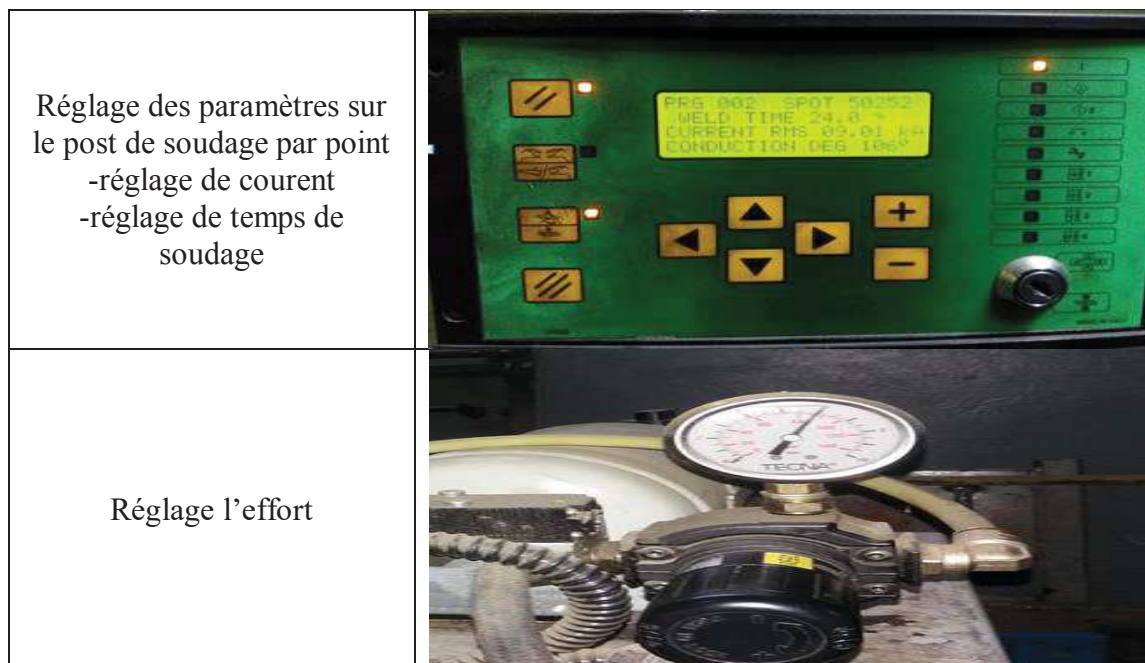
L'éprouvette en acier doux est constituée de deux tôles minces de dimensions ( $L_e$  varia 100, 102.5, 105 mm avec in recouvrement de 20, 25, 30 mm).

Les deux tôles sont liées par un point soudé réalisé au moyen du procédé de soudage par résistance. Les deux tôles assemblées sont identiques (même matériau, mêmes dimensions). A l'épaisseur  $e$  près, toutes les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont analogues.

La Machine utilisé pour le soudage par point est de type "**TECNA**" (**Figure II.8**).

Les paramètres de soudage de l'acier doux sélectionné pour le plan expérimental selon la longueur de recouvrement sont présentés sur le **tableau II.3** et **tableau II.4** .

Le réglage des paramètres (**Figure II.6**) se fait sur le tableau de commande car Chaque éprouvette a été soudée avec une intensité, un effort et un temps de maintien bien définie



**Figure II.6** : Différents réglages des paramètres.

**Tableau II.3** : Les différents paramètres de soudage par point pour les éprouvettes en acier faiblement allié pour  $e=2\text{mm}$

N°	I (KA)	T (cycle)	A (mm)	F (Bar)
01	10	18	20	06
02	12			
03	14			
04	16			
05	10	25		
06	12			
07	14			
08	16			
09	10	18	25	
10	12			
11	14			
12	16			
13	10	25		
14	12			
15	14			
16	16			
17	10	18	30	
18	12			
19	14			
20	16			
21	10	25		
22	12			
23	14			
24	16			



**Tableau II.4** : Différents paramètres de soudage par point pour les éprouvettes en acier faiblement allié pour  $e=1\text{mm}$ 

N°	I (KA)	T (cycle)	A (mm)	F (Bar)
25	08	18	20	06
26	10			
27	13			
28	16			
29	08	25		
30	10			
31	13			
32	16			
33	08	18	25	
34	10			
35	13			
36	16			
37	08	25		
38	10			
39	13			
40	16			
41	08	18	30	
42	10			
43	13			
44	16			
45	08	25		
46	10			
47	13			
48	16			

### b) Etapes de soudage

La soudure par point est une méthode de soudage utilisant le principe de la soudure par résistance à électrode non fusible où l'élévation de température pour obtenir le point de fusion du métal s'ajoute à une forte pression mécanique

**Tableau II.5** : Les différentes étapes de soudage.

<p><b>Etape 1</b> <b>Nettoyer les</b> <b>échantillons</b></p>	<p>Avant le soudage les échantillons ont été nettoyés pour garantir une meilleure soudure et éviter les défauts</p> 
<p><b>Etape 2</b> <b>Repérer le point de</b> <b>soudure.</b></p>	<p>Le traçage des pièces dans la surface de soudure pour faciliter l'accostage exact de l'électrode</p> 

<p><b>Etape3</b> <b>Réaliser le point de soudure</b></p>	<p>Briquer les deux pièces à l'aide d'une pince étaux. - Réaliser le point de soudure sur l'éprouvette.</p> 
--	--

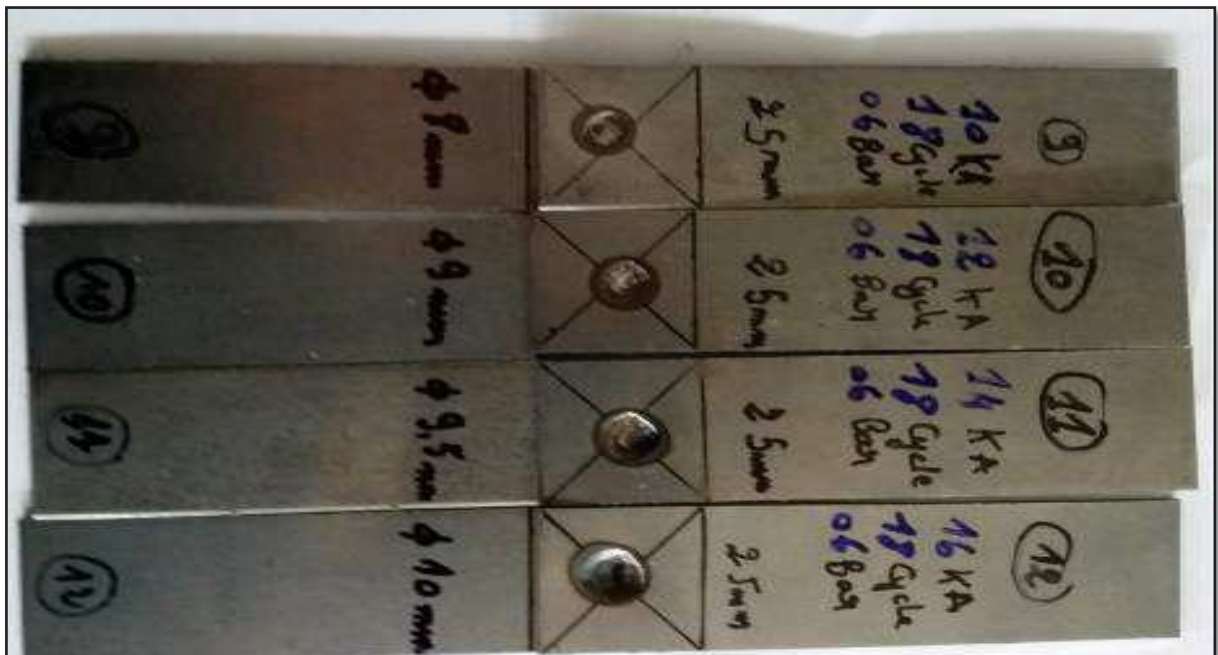


Figure II.7: Exemple des pièces assemblées par point

**Machineutilisé**

**Machine de soudage par point :**

Machine de soudage par point (Machine TECNA) (Figure II.8) est une machine à souder par résistance qui est une machine à pince hydraulique ou mécanique pour assurer la pression associée à un générateur électrique de forte puissance



**Figure II.8** : machine de soudage par point (Machine TECNA)

**Fiche technique machine de soudage par point TECNA**

- ❖ Vérin et tige en acier chromé en fonte épaisseur pour des utilisations de longue durée et sujets à fortes sollicitations.
- ❖ Composants pneumatiques qui n'ont pas besoin de lubrification
- ❖ Descente des électrodes sans pression pour entretien et réglage
- ❖ Vérin avec double course avec commande à clef
- ❖ Groupe filtre pour l'air comprimé et réservoir inclus dans la machine
- ❖ Silencieux pour l'évacuation de l'air comprimé
- ❖ Pédale électrique à deux positions qui permet de serrer les pièces et de les souder uniquement si elles sont correctement positionnées.
- ❖ Bouton d'urgence pour l'arrêt immédiat de la machine.
- ❖ Unité de contrôle à courant constant

### 2.3 Essais de caractérisation mécanique

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

L'éprouvette mono point utilisée le plus fréquemment est l'éprouvette de Traction-Cisaillement, sont couramment utilisé pour caractérisé le comportement d'un assemblage soudée par point. C'est essai permettent de mesurer l'effort nécessaire pour rompre le point soudé dans le mode de sollicitation concerné ainsi que son mode de rupture (Figure 9).



Figure II.9 : cisaillement par traction



**Machine utilisé****Machine de traction :**

La machine de traction, comme on le sait, constitue une machine classique de détermination de la résistance à la traction d'un matériau. Dans le but de caractériser le comportement mécanique et chimique des matériaux placés dans un environnement donné (figure 10).

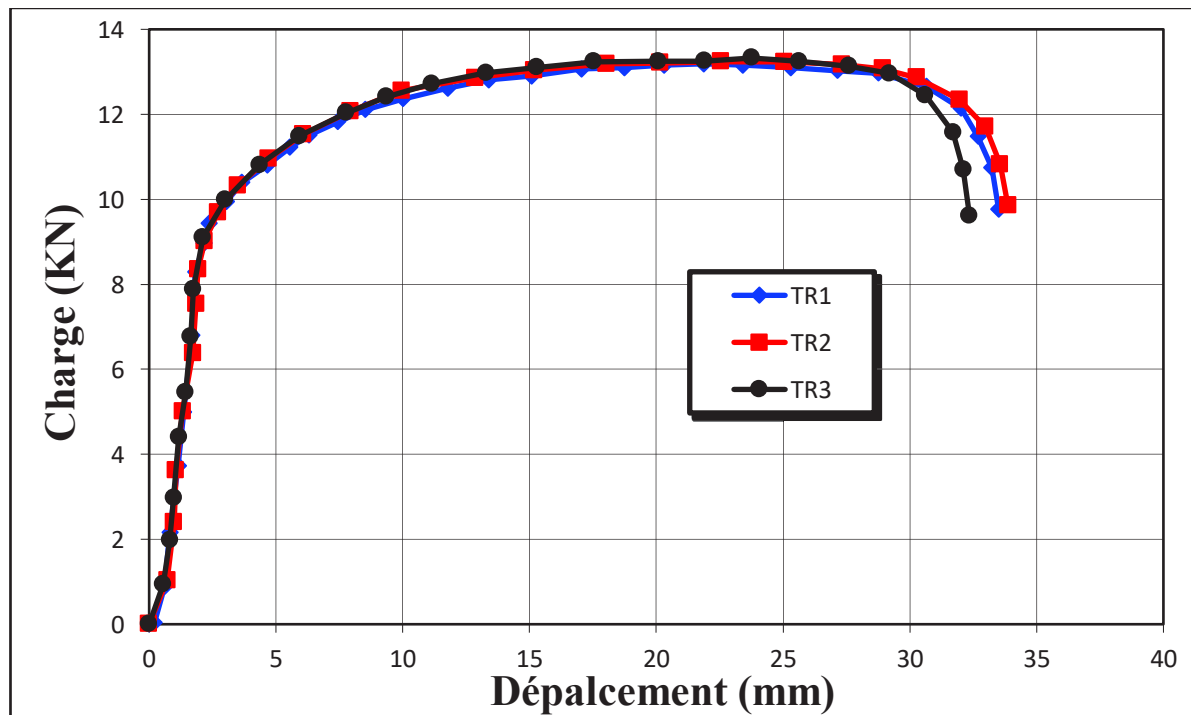


Figure II.10 : Machine 600 KN pour d'essai de traction.



**Figure II.11** : Eprouvettes rompue après essai de cisaillement par traction.

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements montrés sur la figure II.12 Les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure II.13



**Figure II.12**: Courbe De Traction Charge / Déplacement

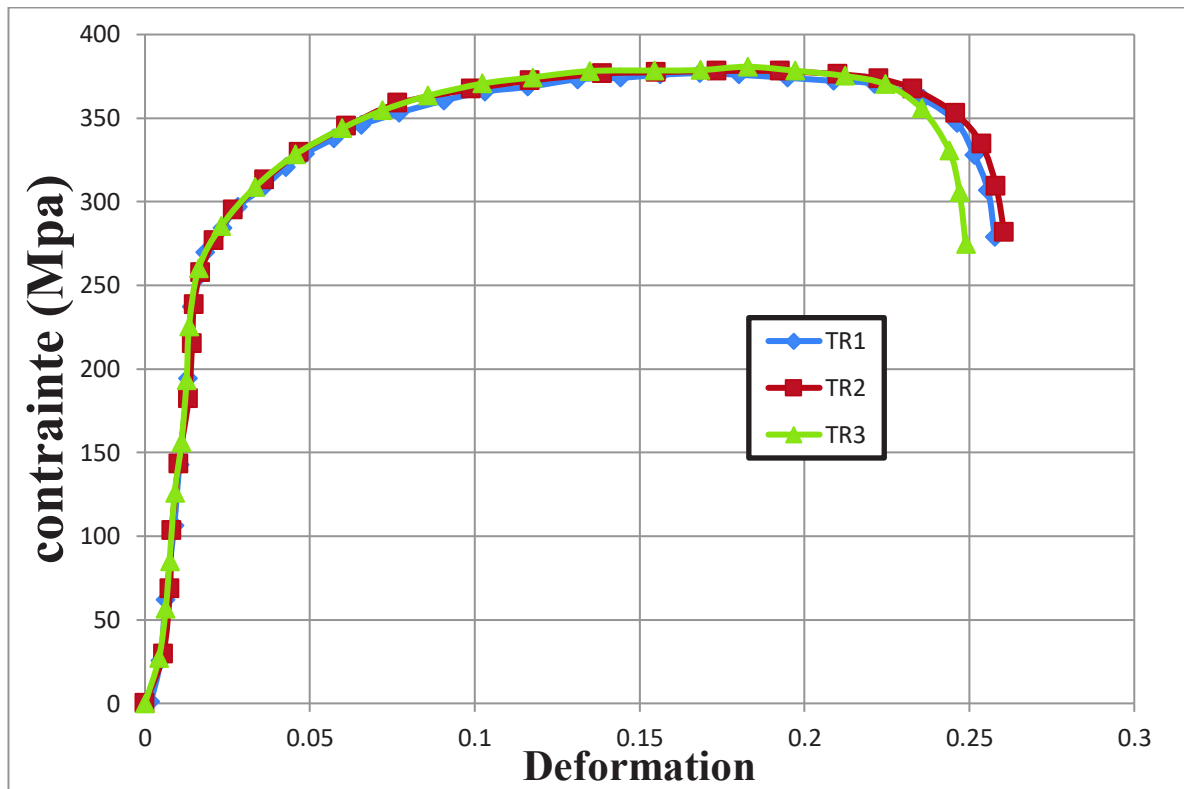


Figure II.13 : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations

### Résultat de l'essai

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- ✚ Le module de Young,  $E$ , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa) ;
- ✚ La limite d'élasticité (lorsqu'elle existe),  $R_e$ ,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_y$  ou  $f_y$  (yield stress), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- ✚ La résistance à la traction  $R_m$ ,  $\sigma_m$  ou  $f_u$  (limite ultime), qui définit la limite à la rupture ;
- ✚ L'allongement à la rupture  $A\%$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- ✚ Le coefficient de Poisson  $\nu$ , qui correspond à la proportion entre la déformation transversale (diminution de section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique.

Tableau II.6 : caractéristique mécanique

	<b>E (GPa)</b>	<b>Rm (MPa)</b>	<b>Re(MPa)</b>	<b>A%</b>
Données fournisseur	200	270-410	$\leq 280$	28
Résultats Expérimentaux	190	377,804	253	23.077



Figure II.14 : Eprouvettes rompus après essai de traction.

*Chapitre III*  
*Résultats 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.

### 1. Mécanisme de rupture

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps.

On distingue deux types de rupture :

- rupture fragile : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).

Rupture ductile : la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande).

### 2. Mode de rupture

L'American Welding Society (AWS) a recensé un total de 8 modes de rupture différents, dont le déboutonnage total et la rupture interfaciale totale sont les deux cas extrêmes (voir Figure 1-8, d'après [GOU 05]) :

- (1) rupture en mode 1 : déboutonnage total (mode de rupture habituellement accepté pour les aciers ferritiques).
- (2) rupture en mode 2 : la rupture se fait en partie par un bouton (au moins 20% de la surface) et en partie par une rupture à mi- épaisseur (au moins 20% de l'épaisseur).
- (3) rupture en mode 3 : rupture à mi- épaisseur, c'est-à-dire que le bouton ne débouche pas à travers l'épaisseur, mais au moins 20% de l'épaisseur est enlevée. La rupture a lieu dans la ZAT et autour du noyau, mais pas dans le noyau lui-même.
- (4) rupture en mode 4 : on observe à la fois une zone arrachée à l'interface, une zone arrachée à mi- épaisseur et une partie déboutonnée. Le noyau s'est partiellement séparé.
- (5) rupture en mode 5 : rupture en partie à l'interface, en partie en formant un petit bouton. Le noyau fondu est partiellement séparé.
- (6) rupture en mode 6 : la rupture se fait à la fois à mi- épaisseur et dans l'interface.
- (7) rupture en mode 7 : c'est le mode de rupture totalement dans le plan de joint.
- (8) rupture en mode 8 : collage, il n'y a pas eu de noyau fondu formé.



Figure III.1. Différents modes de ruptures recensés par l'AWS, d'après[17]

### 3. Effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique d'un joint soudé par point

#### 3.1 Effet de courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudés

Pour épaisseur de 2mm et T=18cycle ::

Les courbes dans les **figure III.2**, **figure III.4** et **figure III.6** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bar à T=18 cycle et pour I=10, 12, 14 et 16 KA avec les recouvrements A=20, 25, 30mm.

L'essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de l'intensité sur le comportement mécanique pour différent recouvrement nous remarquons que avec l'augmentation de l'intensité la charge maximale à la rupture augmente mais d'une façon différente selon chaque recouvrement

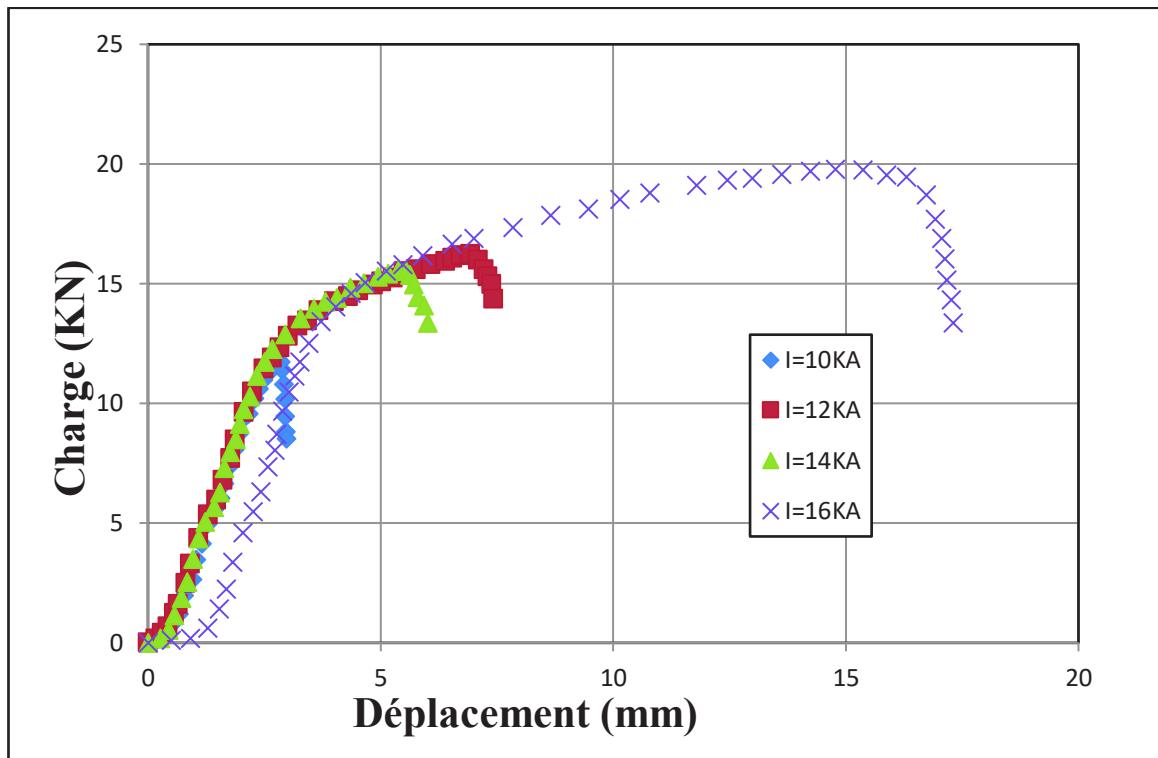
Figure III.2: on observe une corrélation directe entre l'augmentation du courant de **10 à 12KA** et l'augmentation de la force, Mais il y a une diminution de la force à 15.5 KN pour un courant de **14KA** puis un retour en augmentation du force jusqu'à 19.75KN pour **I=16 KA**.

Figure III.4 : on observe une corrélation directe entre l'augmentation du courant de **10 à 12KA** et l'augmentation de la force, Mais il y a une diminution de la force à 14.2 KN pour un courant de **14KA** puis un retour en augmentation du force jusqu'à 17.50KN pour **I=16 KA**.

Figure III.6 : Pour les éprouvettes soudées avec un recouvrement de 30mm la charge quel peut supporter a augmenté pour I=10 ,14 KA et a diminué pour 12 KA

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes **figure III.3/figure III.5/figure III.7**

- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec I=10,12et14 KA
- Le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec I=16 KA.

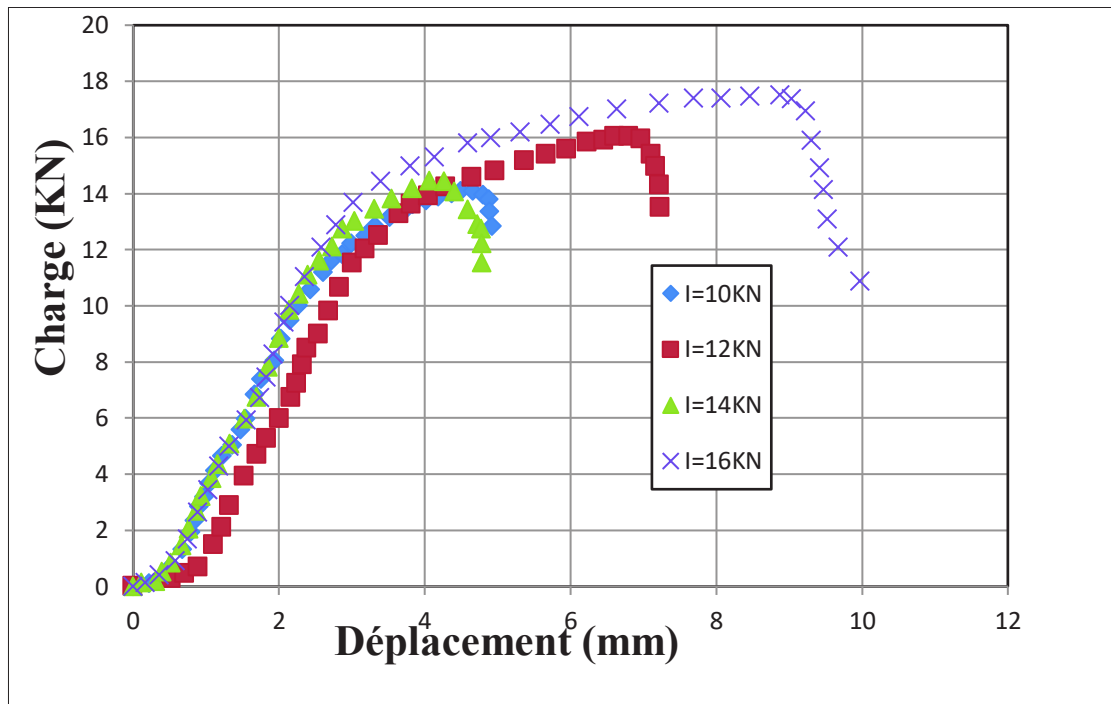


**Figure III.2:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles et recouvrement de 20mm et  $e=2\text{mm}$



**Figure III.3** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=20mm et F=6 Bars, et  $e=2\text{mm}$

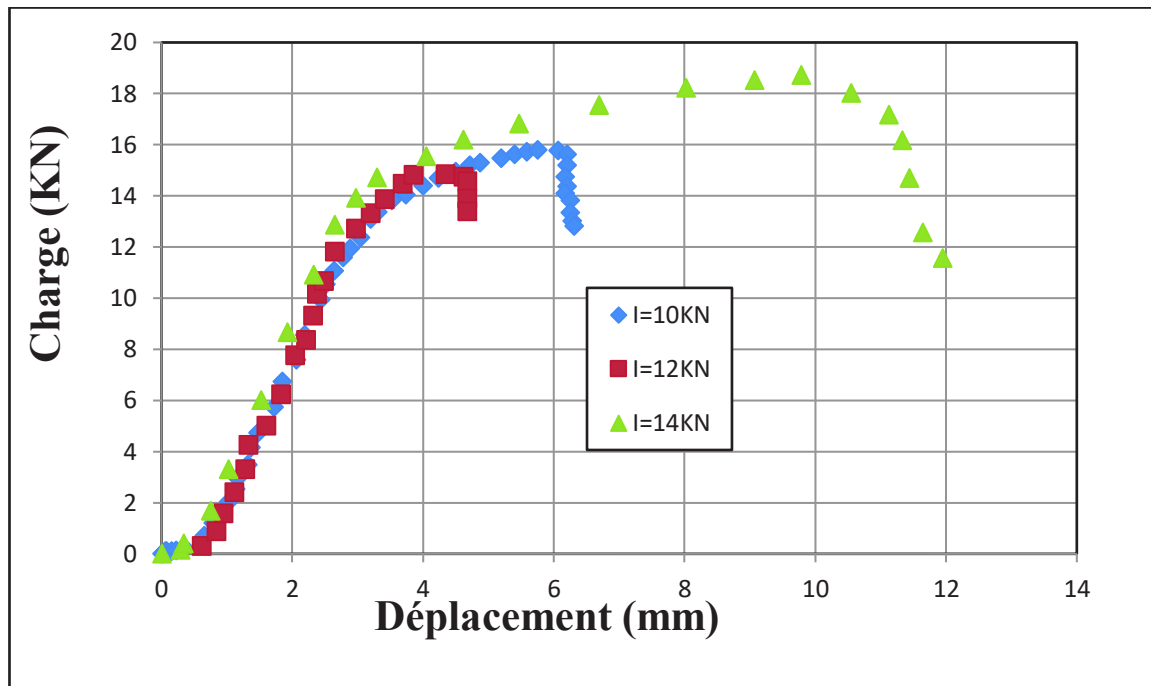




**Figure III.4:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles et recouvrement de 25mm et  $e=2\text{mm}$ .



**Figure III.5 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=18$  Cycle,  $A=25\text{mm}$   $F=6$  Bars, et  $e=2\text{mm}$



**Figure III.6:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6Bars et un temps de 18 cycles et un recouvrement de 30mm et  $e=2mm$



**Figure III.7 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=18$  Cycle,  $A=30mm$   $F=6$  Bars, et  $e=2mm$

Pour épaisseur de 2mm et T=25cycle :

Les courbes dans les **Figure III.8**, **Figure III.10** et **Figure III.12** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à T=25 et pour I=10, 12, 14 et 16 KA avec recouvrement A=20, 25, 30mm

Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de l'intensité sur le comportement mécanique d'un point soudé.

En augmente l'intensité de **10KA** jusqu'à **16KA** on a observé que la charge maximal a la rupture augmente avec l'augmentation de l'intensité mais commence a diminué après avoir dépassé les **14KA**

On conclue pour cet essai que la meilleur intensité est **I=14KA** car l'éprouvette a résisté jusqu'à un effort de **19.8KN**.

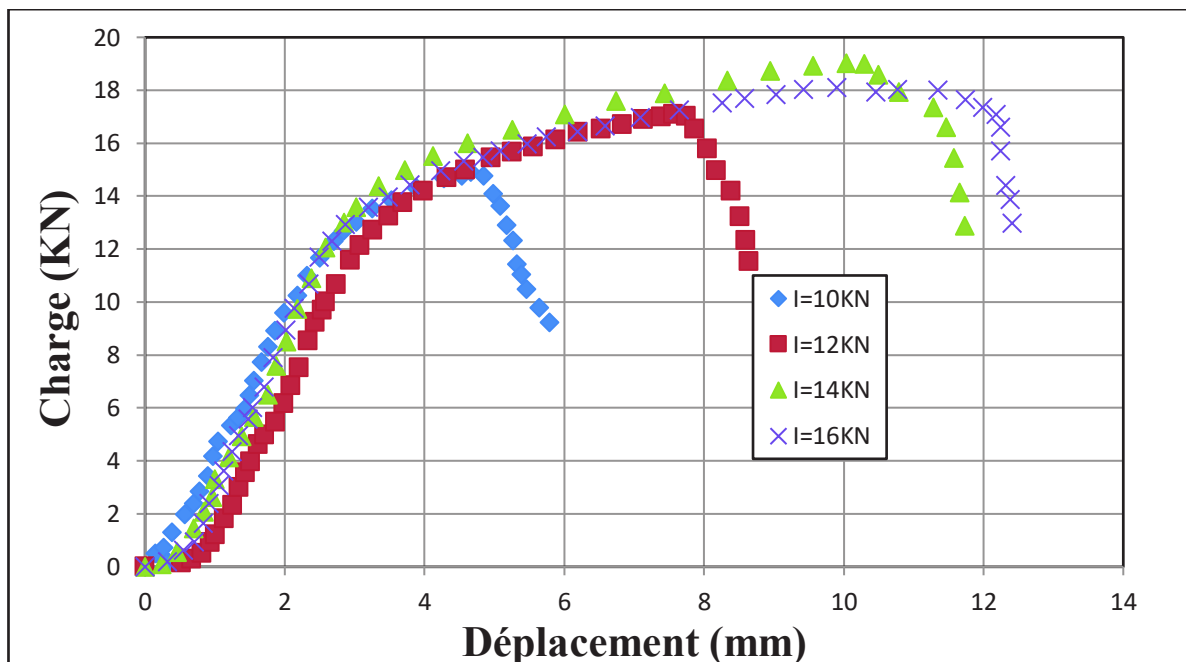
- Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes **Figure III.9**
- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec I=12 KA
- Le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec I=10,14 et 16 KA.

#### Figure III.11

- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec I=10,12,14et 16KA .

#### Figure III.13

- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec I=12 KA
- Le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec I=10,14 et 16 KA.



**Figure III.8:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et un temps de **25 cycles** et recouvrement de **20mm** et **e=2mm**



Figure III.9 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm et F=6 Bars, et e=2mm

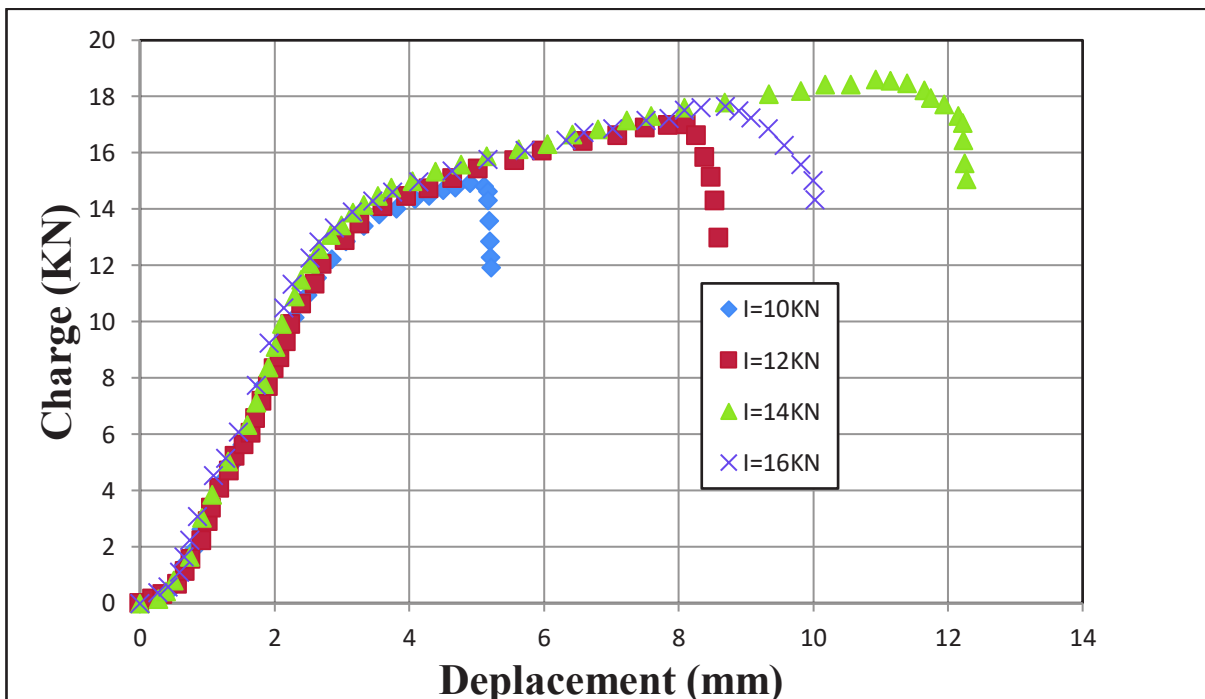


Figure III.10: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 25 cycles et recouvrement de 25mm et e=2mm



Figure III.11 : Eprouvettes rompues après l’essai de traction pour T=25 Cycle, A=25mm F=6 Bars, et e=2mm.

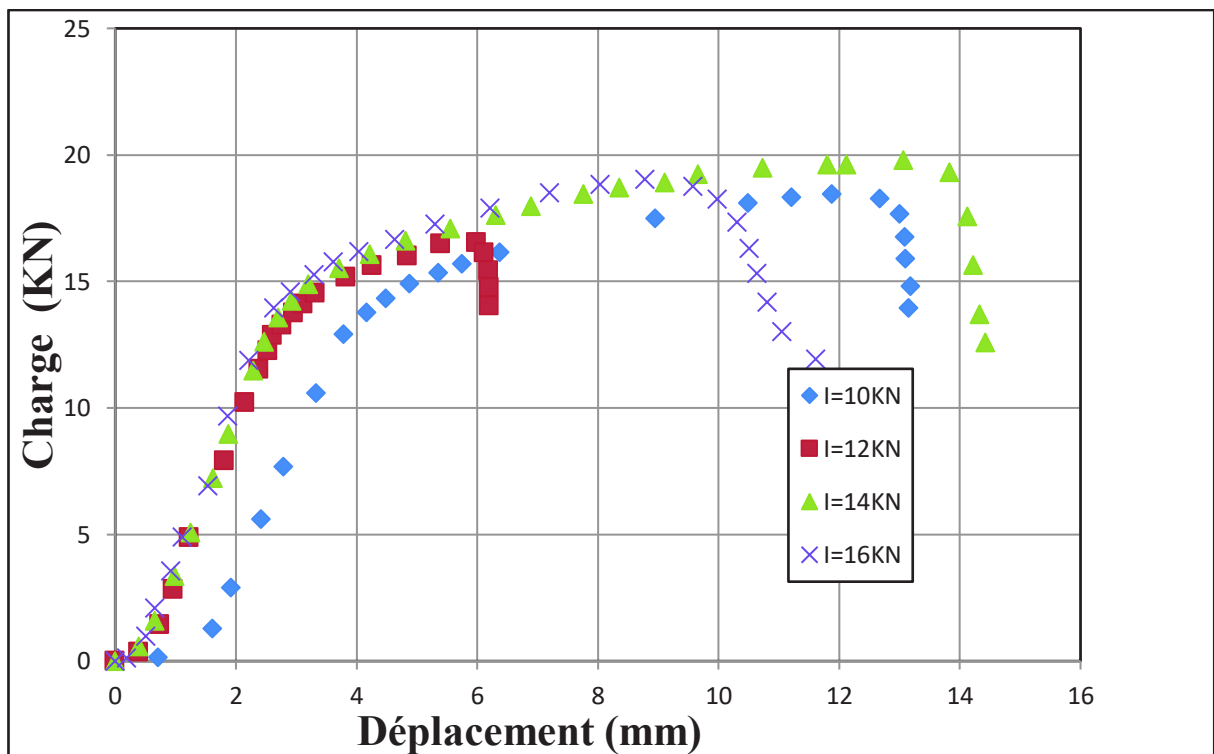


Figure III.12: Effet de l’intensité de soudage sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 6Bars et un temps de 25 cycles et recouvrement de 30mm et e=2mm



**Figure III.13** : Epreuves rompues après l'essai de traction pour  $T=25$  Cycle,  $A=30$ mm  
 $F=6$  Bars, et  $e=2$ mm.

Pour épaisseur de 1mm et  $T=18$ cycle :

Les courbes dans les **figure III.14**, **figure III.16** et **figure III.17** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à  $T=25$  et pour  $I=10, 12, 14$  et  $16$  KA avec recouvrement  $A=20, 25, 30$ mm.

Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de l'intensité sur le comportement mécanique d'un point soudé.

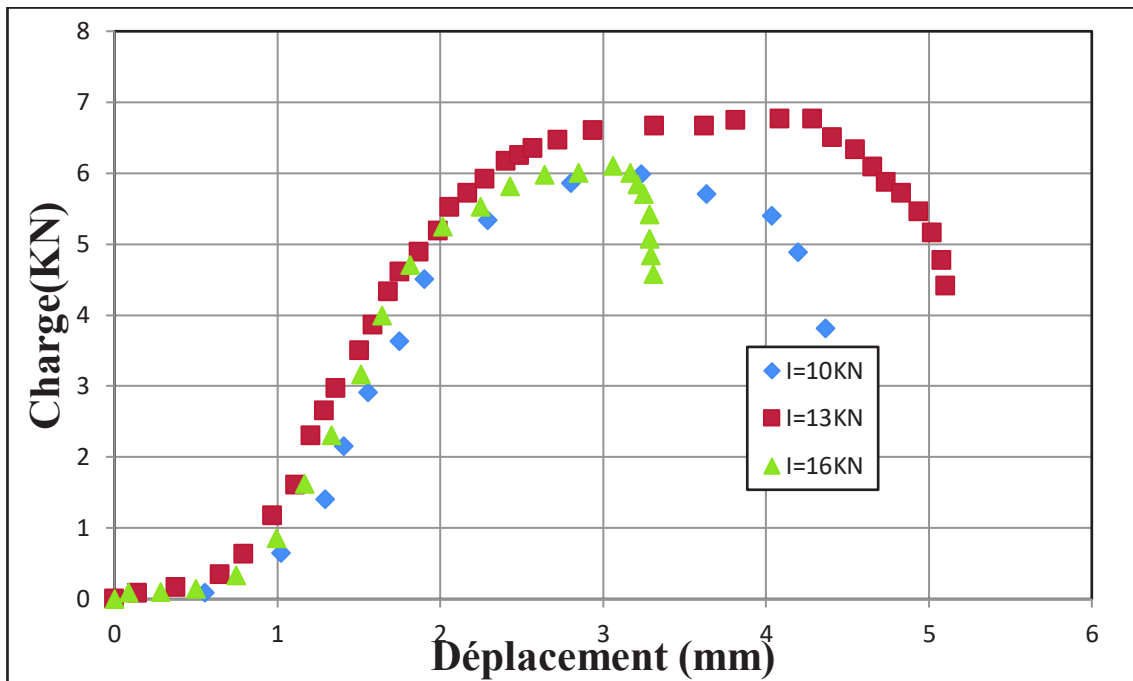
**Figure III.14** : on observe une corrélation directe entre l'augmentation du courant de **08** à **13KA** et l'augmentation de la force, Mais il y a une diminution de la force à **15.5 KN** pour un courant de **16KA**

**Figure III.16** : on observe une corrélation directe entre l'augmentation du courant de **08** à **13KA** et l'augmentation de la force, mais après d'avoir dépassé le seuil **13KA** la charge que peut l'éprouvette supporté c'est stabilisé à une valeur **7.72KN**

**Figure III.18** : En augmente l'intensité de **08KA** jusqu'à **16KA** on a observé que la charge maximal a la rupture augmente avec l'augmentation de l'intensité

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes **Figure III.15**, **Figure III.17** et **Figure III.19**

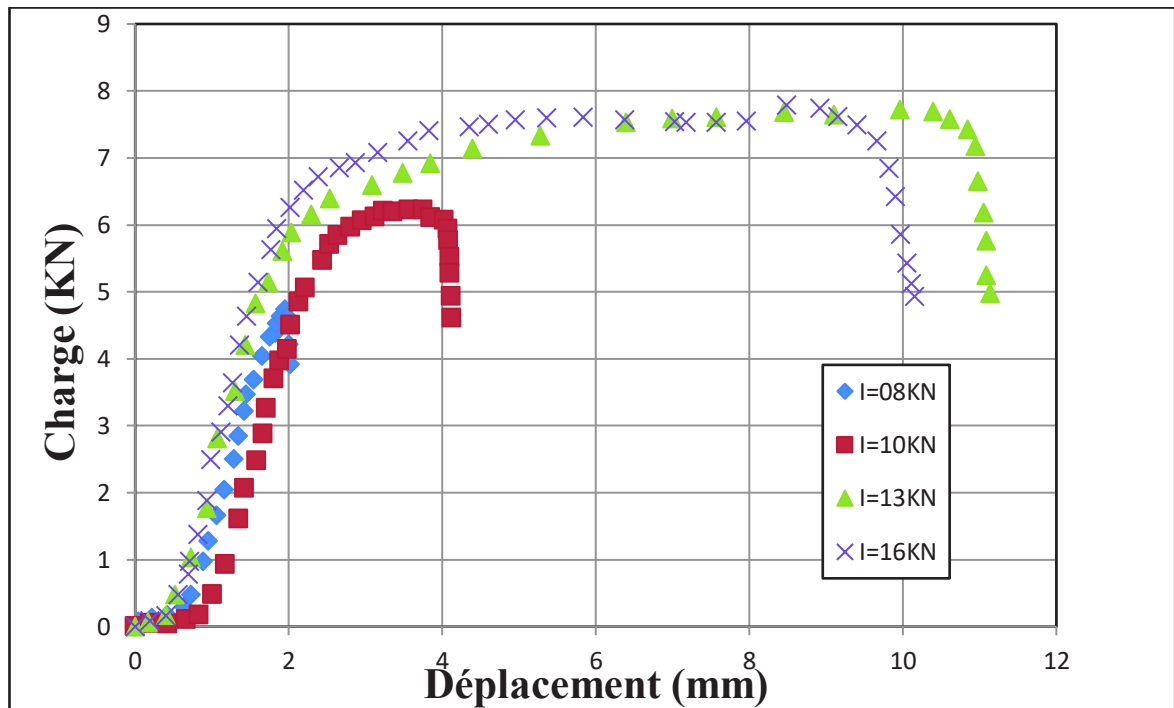
- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec  $I=08$  KA
- Le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec  $I=10, 13$  et  $16$  KA.



**Figure III.14:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles et recouvrement de 20mm e=1mm



**Figure III.15 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle, A=20mm F=6 Bars et e=1mm

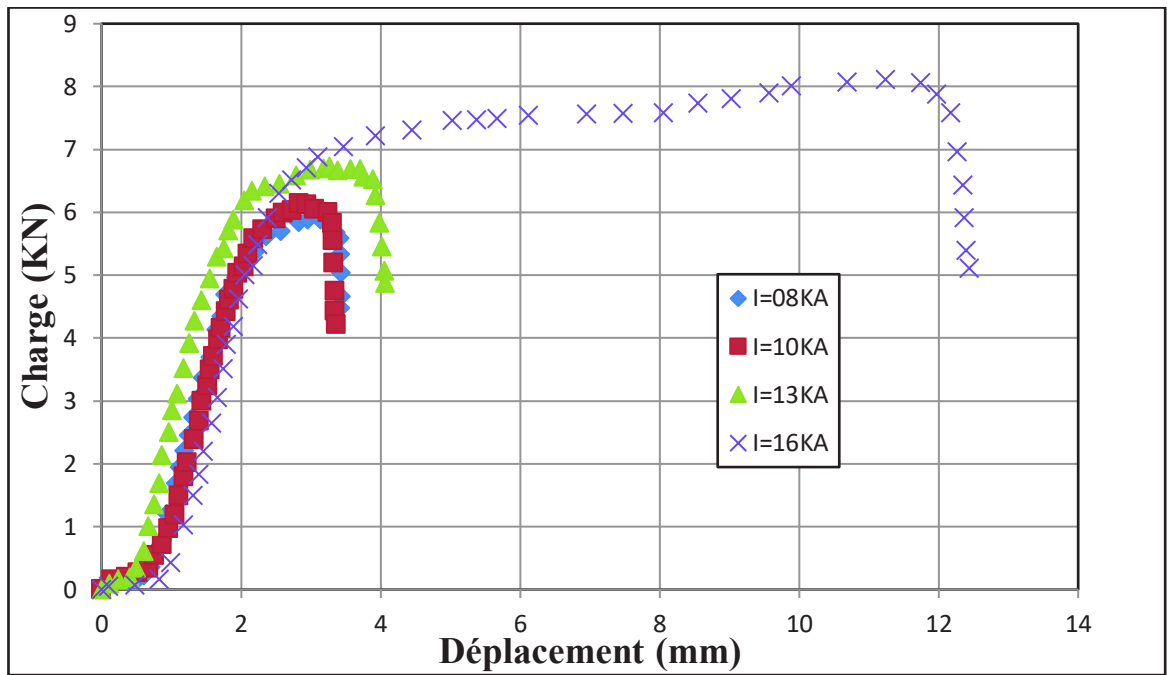


**Figure III.16:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles et un recouvrement de 25mm et  $e=1\text{mm}$



**Figure III.17 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=18$  Cycle,  $A=25\text{mm}$   $F=6$  Bars et  $e=1\text{mm}$ .





**Figure III.18:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et un temps de **18 cycles** et un recouvrement de **30mm** et  $e=1\text{mm}$



**Figure III.19 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=18$  Cycle,  $A=30\text{mm}$   $F=6$  Bars et  $e=1\text{mm}$

Pour épaisseur de 2mm et T=25cycle :

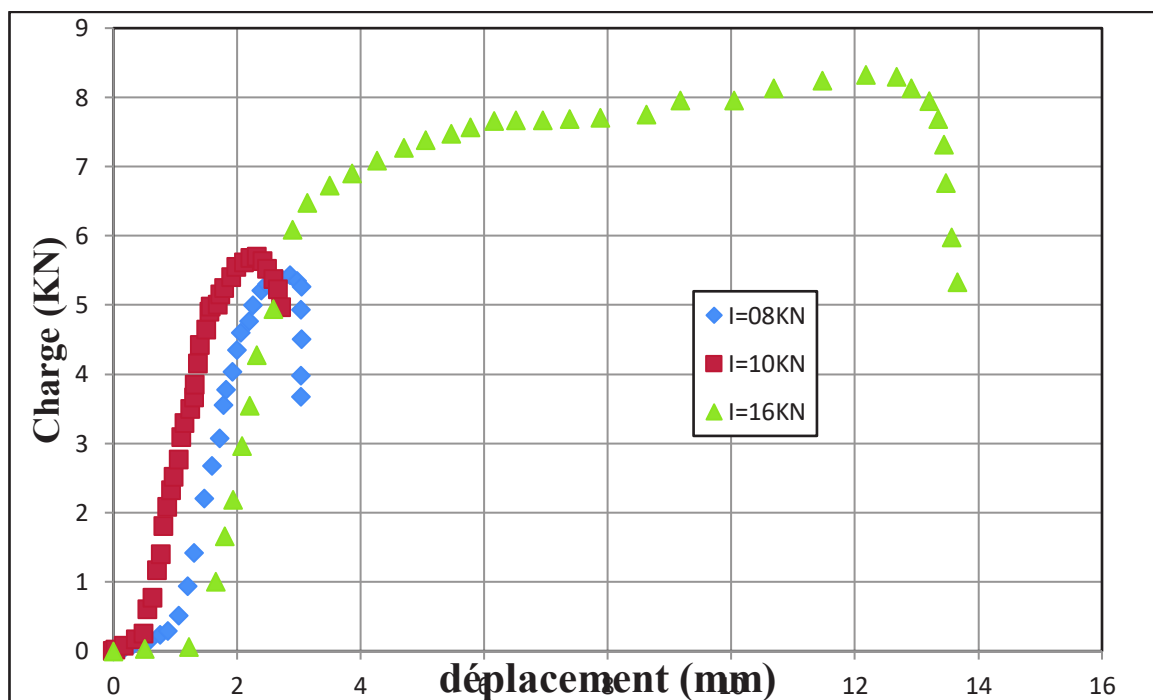
Les courbes dans les **Figure III.20**, **Figure III.22** et **Figure III.24** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à T=25 et pour I=8,10 et 16 KA avec recouvrement A=20, 25, 30mm

Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de l'intensité sur le comportement mécanique d'un point soudé.

En augmente l'intensité de **8KA** jusqu'à **16KA** on a observé que la charge maximal a la rupture augmente avec l'augmentation de l'intensité

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes dans les **Figure III.21**, **Figure III.23** et **Figure III.25**

- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec I=08 KA
- Le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec I=10,13et16 KA.



**Figure III.20:** Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et un temps de **25 cycles** et un recouvrement de **20mm**  $e=1mm$



Figure III.21 : Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle, A=20mm  
F=6 Bars et e=1mm

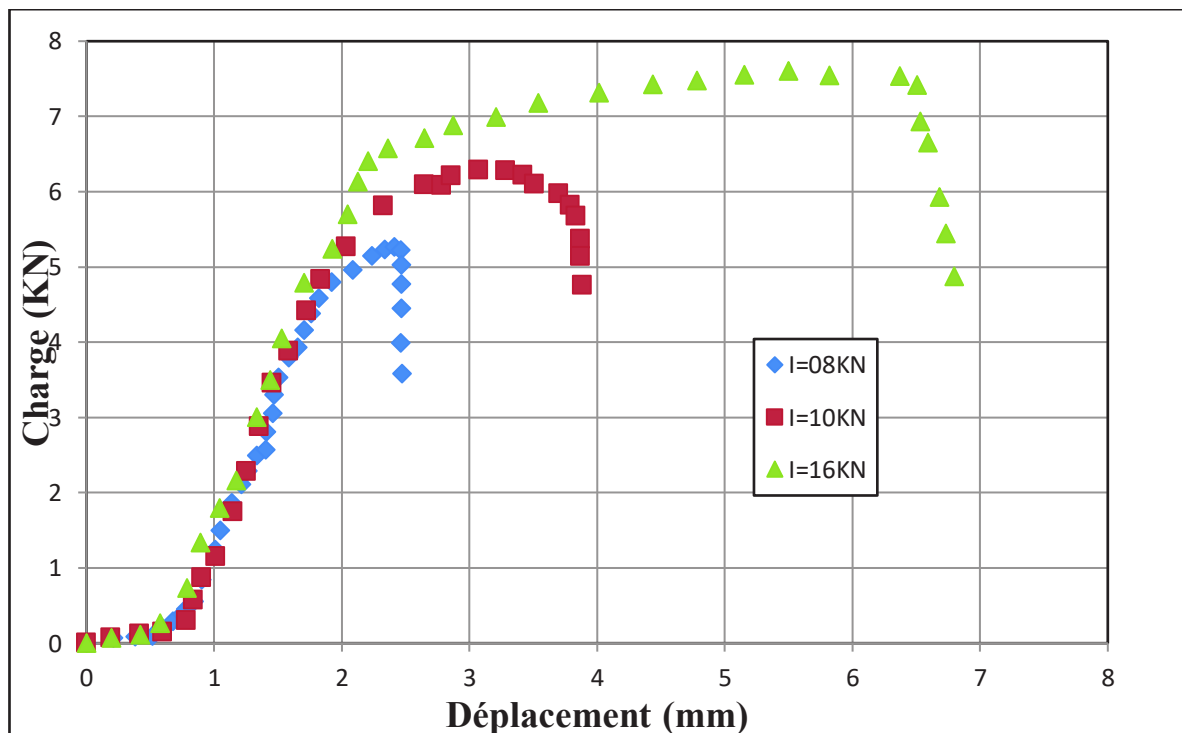


Figure III.22 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 25 cycles et un recouvrement de 25mm et e=1mm



Figure III.23 : Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=25$  Cycle,  $A=20$ mm  
 $F=6$  Bars et  $e=1$ mm

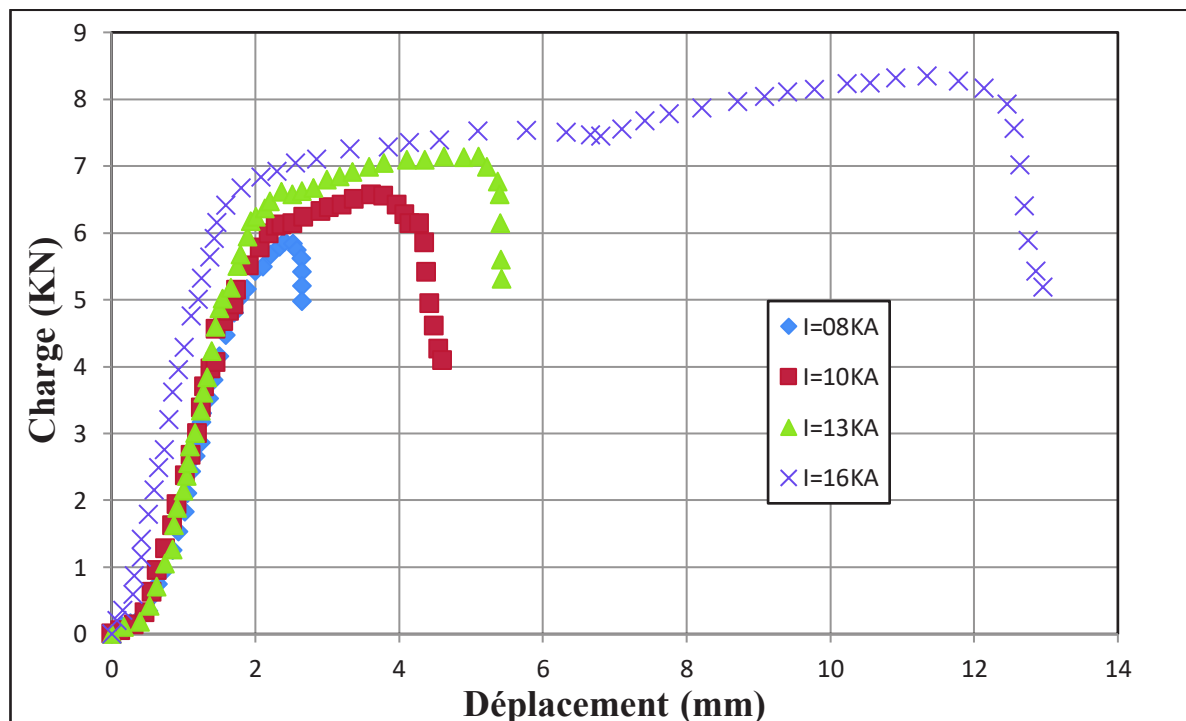


Figure III.24: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et un temps de **25 cycles** et recouvrement de **30mm** et  $e=1$ mm



**Figure III.25 :** Les éprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=25$  Cycle,  $A=20$ mm  
 $F=6$  Bars et  $e=1$ mm

### 3.2 Effet de temps de maintien sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes dans les **Figure III.26**, **Figure III.28** et **Figure III.30** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à  $T=18$  et 25cycle et pour  $I=14$  KA avec recouvrement  $A=20, 25, 30$ mm

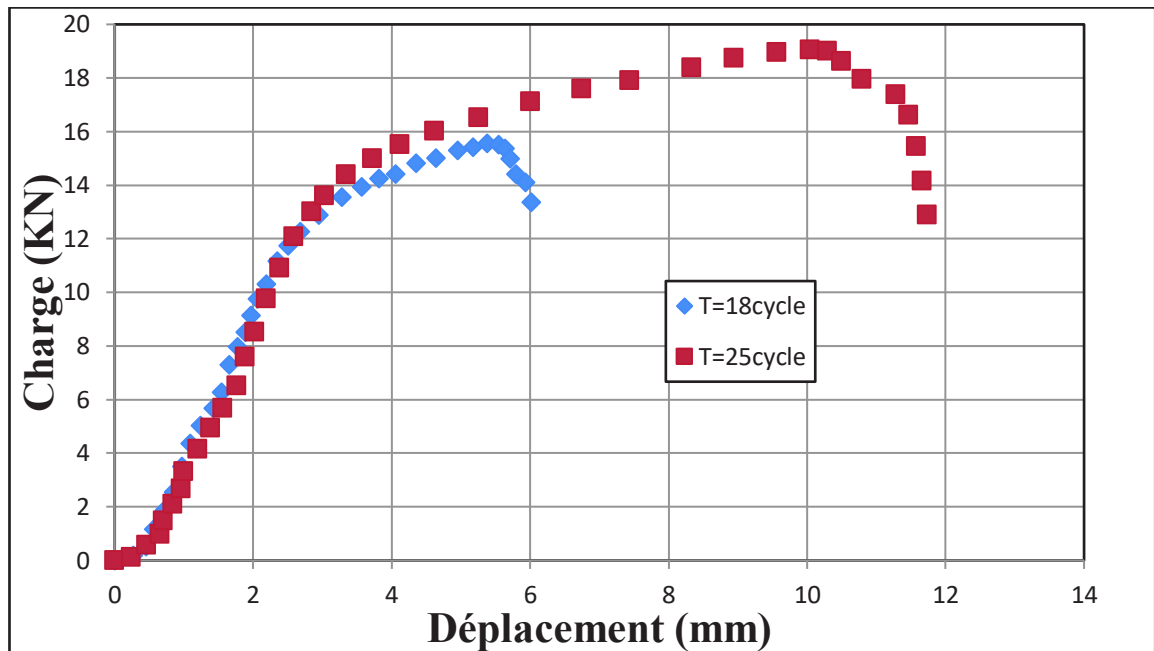
Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de temps de maintien sur le comportement mécanique d'un point soudé.

Le temps de maintien est parmi les paramètres qui influent sur le comportement mécanique d'un point de soudure. Car nous avons remarqué que les éprouvettes soudés avec temps de maintien qui **25cycle** ont une meilleure résistance par rapport au éprouvettes soudés avec un temps de maintien **18cycle**

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes

- **Figure III.27** pour  $A=20$  mm le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec  $T=18$ cycle et le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec  $T=25$  cycle
- **Figure III.29** pour  $A=25$ mmle mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec  $T=18$  et 25 cycle

- **Figure III.31** pour  $A=30\text{mm}$  mode 1 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec  $T=18$  et 25 cycle



**Figure III.26:** Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et  $A=20\text{mm}$



**Figure III.27 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $I=14\text{KA}$ ,  $F=6$  Bars et  $A=20\text{mm}$

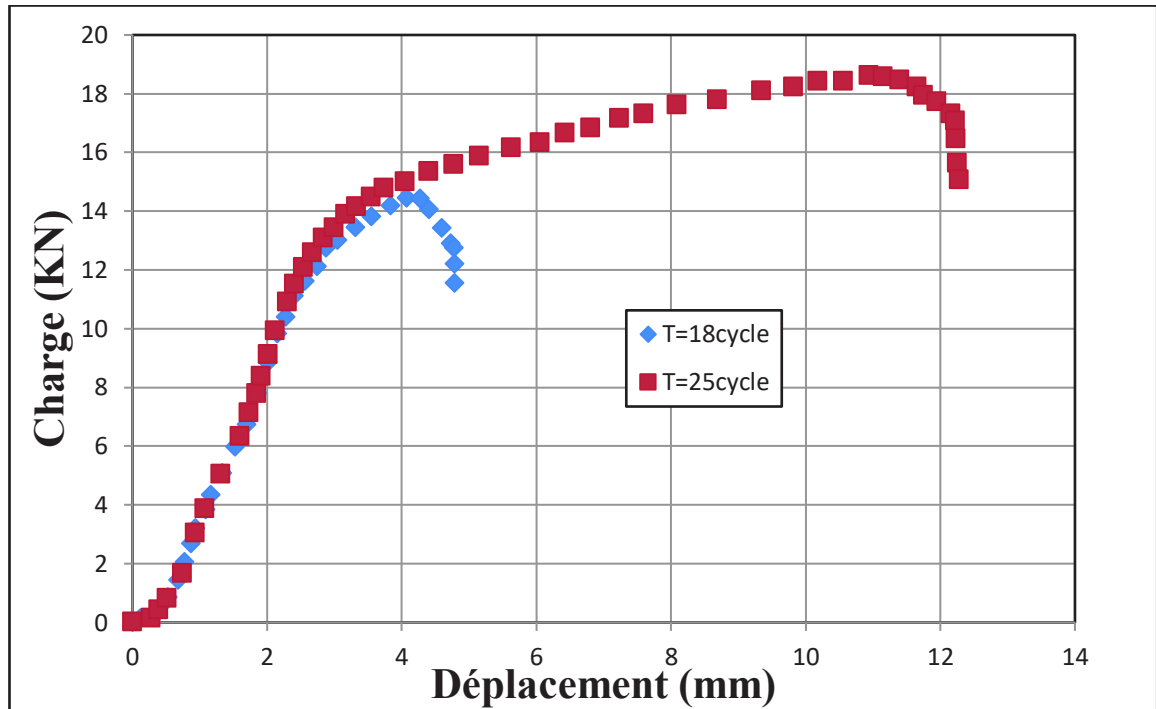
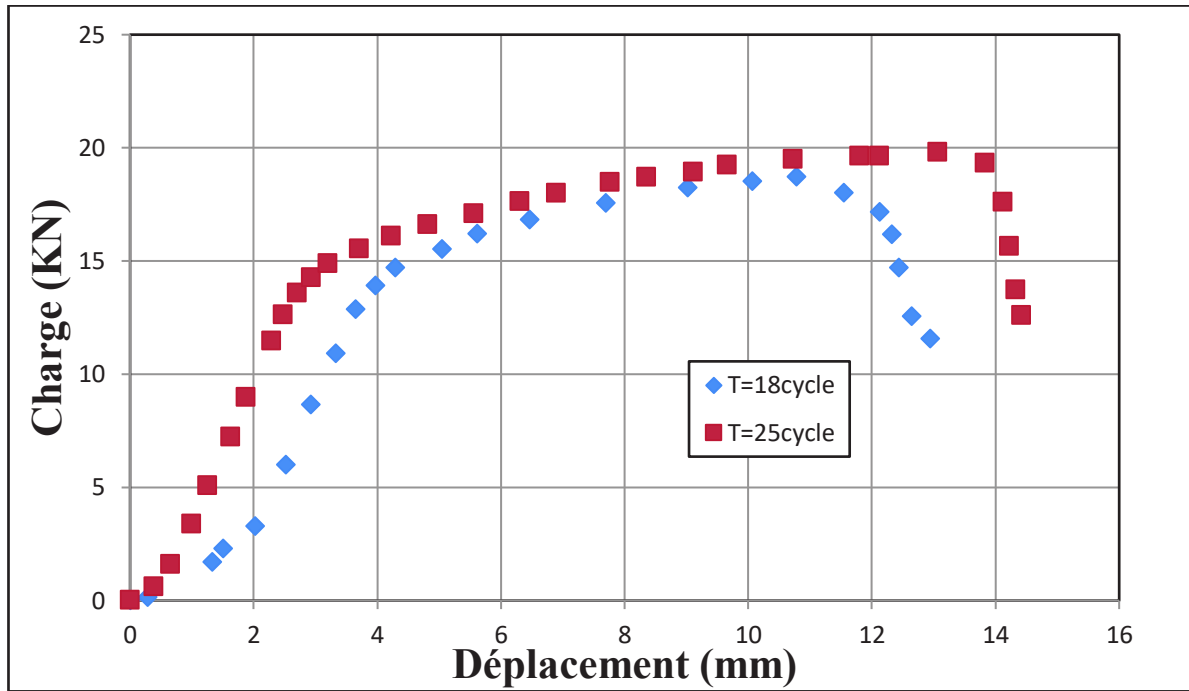


Figure III.28: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et A=25mm



Figure III.29 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour I=14KA, F=6 Bars et A=25mm



**Figure III.30 :** Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et A=30mm



**Figure III.31 :** Les échantillons rompus après l'essai de traction pour I=14 KA et F=6 Bar A=30mm



### 3.3 Effet de recouvrement sur le comportement mécanique des joints soudé

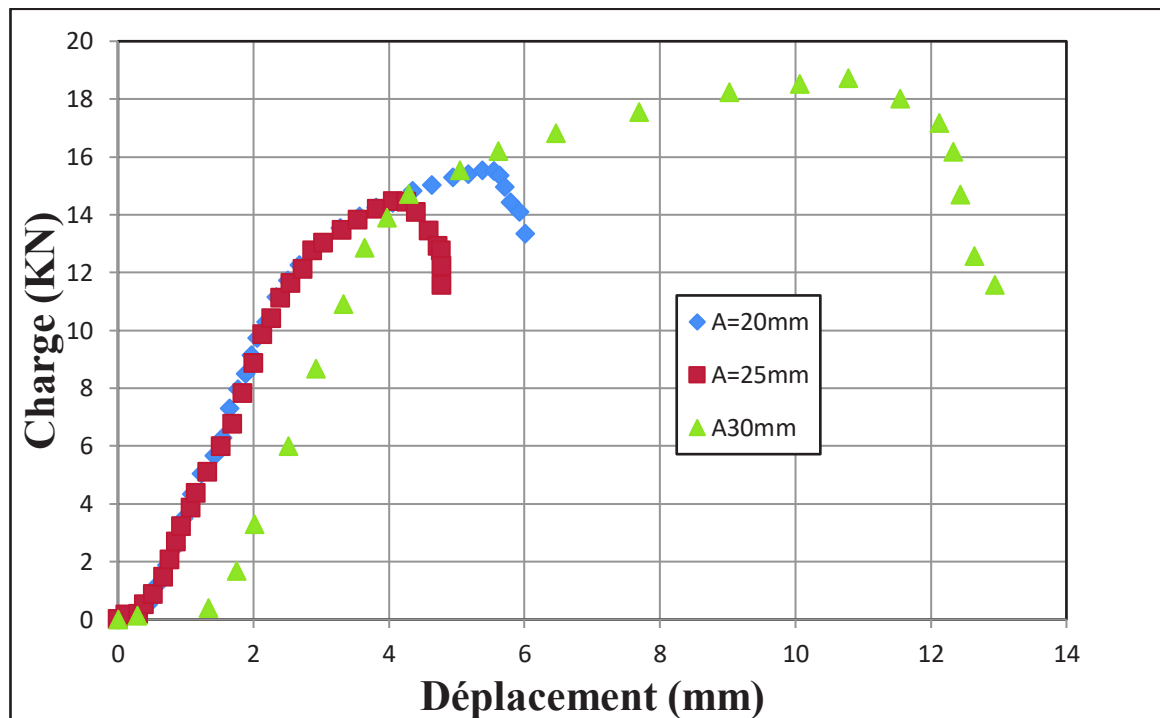
Les courbes dans les **Figure III.32** et **Figure III.34** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à T=18 et 25cycle et pour I=14 KA avec recouvrement A=20, 25, 30mm

Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de recouvrement sur le comportement mécanique d'un point soudé.

Dans cet essai nous avons varié la longueur de recouvrement et nous avons remarqué que son augmentation influx sur la charge maximal de la rupture que l'éprouvette peut s apporté

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes **Figure III.33** et **Figure III.35**

- le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec A=20 et 25mm et le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes soudées avec A=30mm



**Figure III.32:** Effet de recouvrement sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et T=18cycle



Figure III.33 : Eprouvettes rompues après l’essai de traction pour T=18 Cycle, F=6 Bars et I=14KA Avec différent recouvrement

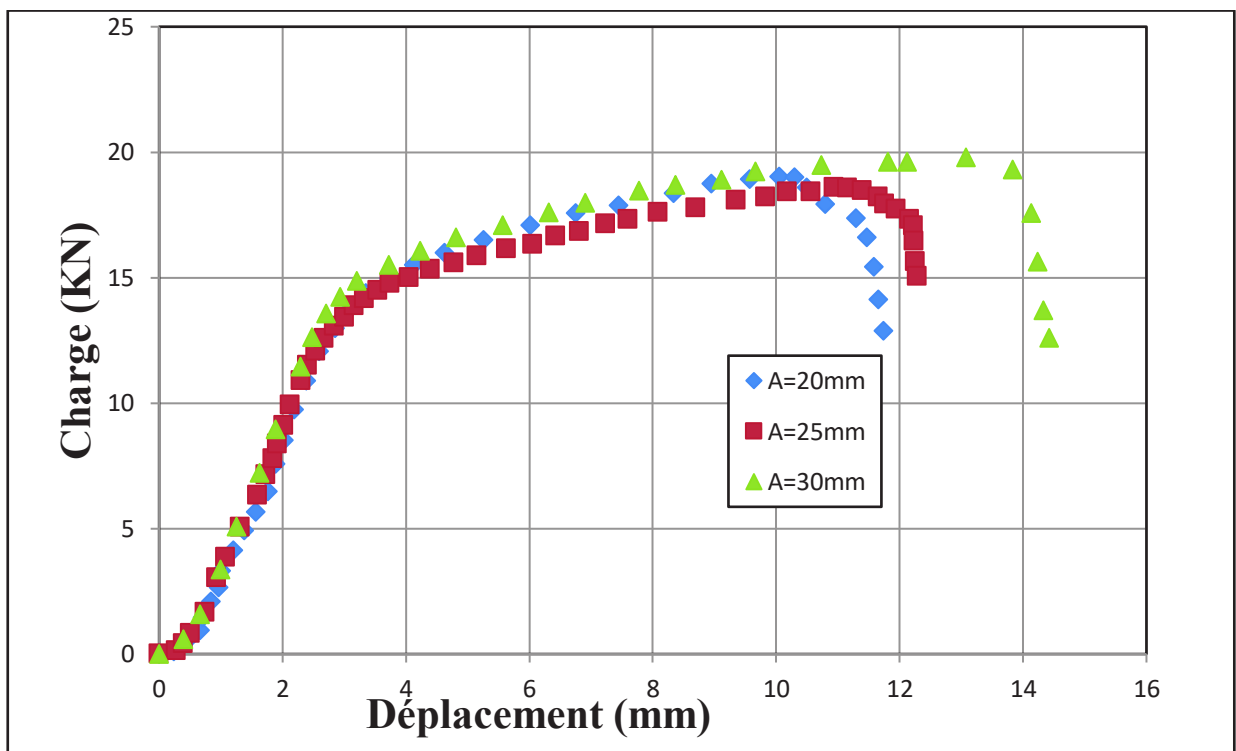
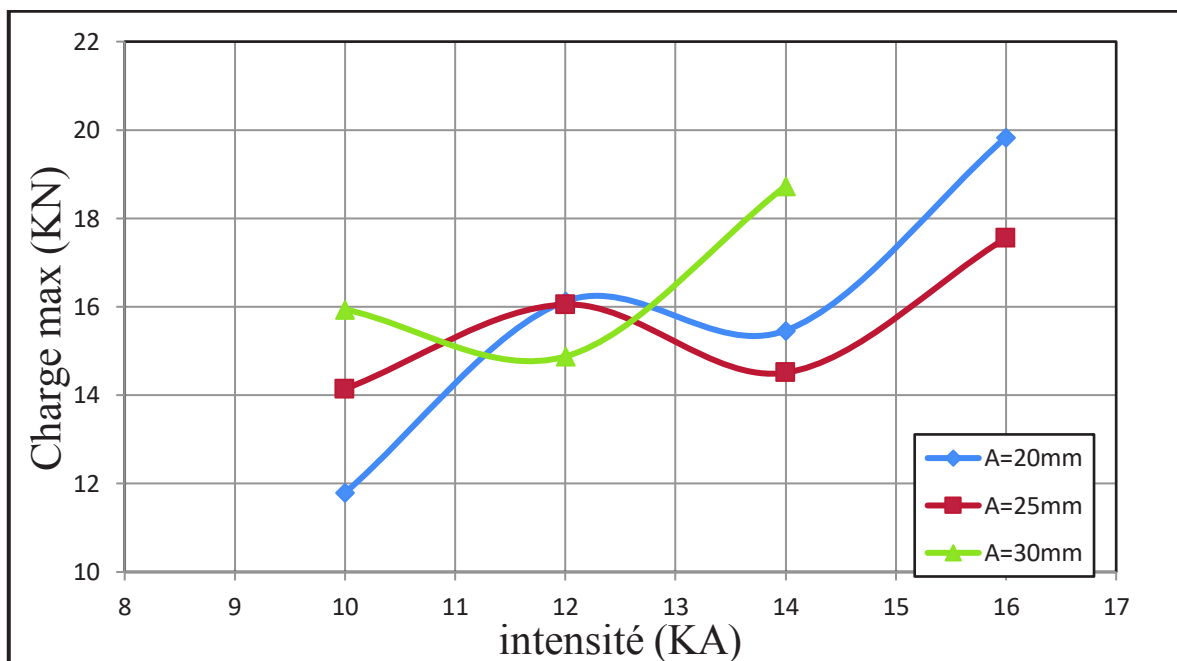


Figure III.34: Effet de recouvrement sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et T=25cycle

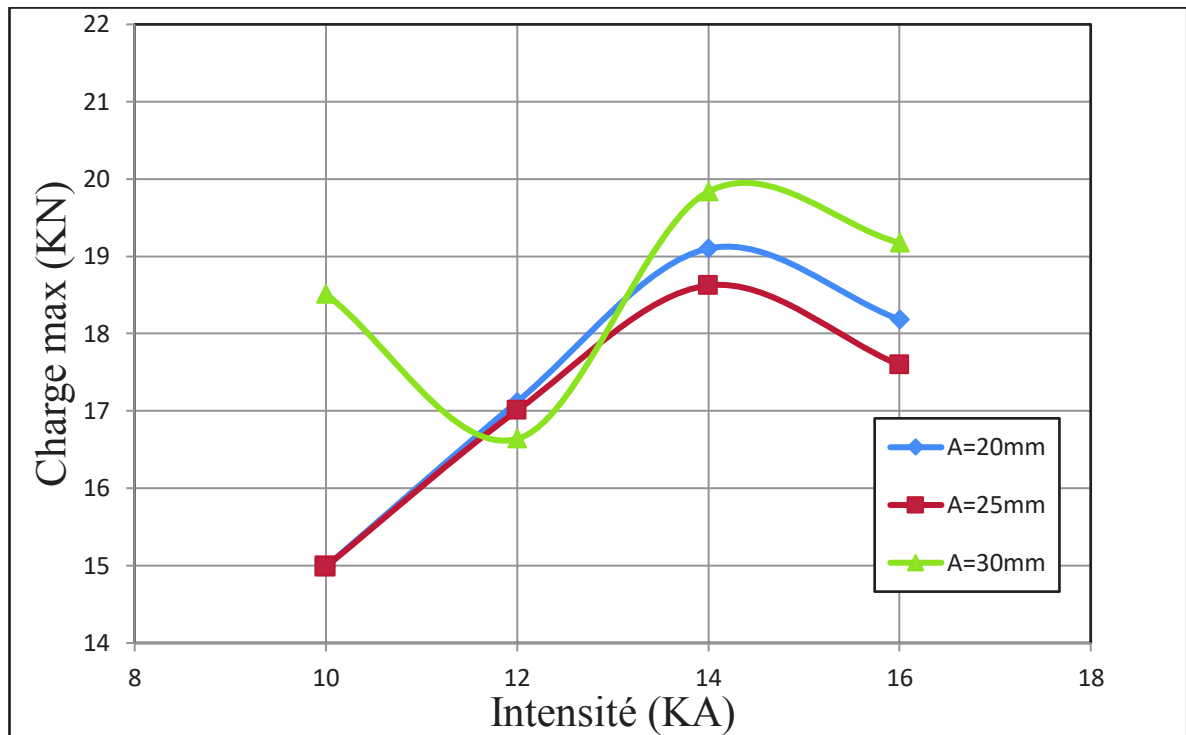


**Figure III.35** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=25$  Cycle et  $F=6$  Bars Avec différent recouvrement

Les courbes (**Figure III.36 et 37**) représentent l'effet du recouvrement sur la charge max, on remarque que la charge max pour un recouvrement 20 mm est supérieure à celle de 25, tandis que pour le recouvrement 30 mm la charge max est supérieure à celle du recouvrement de 20 et 25 mm.



**Figure III.36:** Effet de recouvrement sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et  $T=18$  cycle



**Figure III.37:** Effet de recouvrement sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et T=25cycle

### 3.4 Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes dedans les **Figure III.38** et **Figure III.39** représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 bars à T=18 et 25cycle et pour I=14 KA avec recouvrement A=20, 25, 30mm

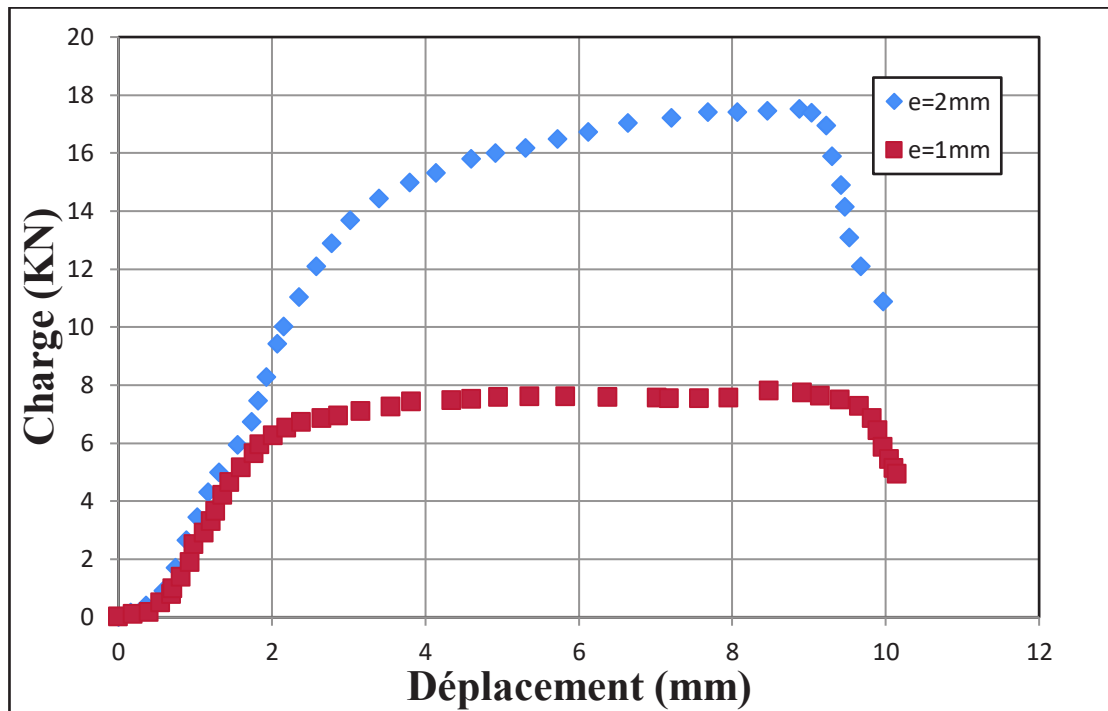
Cet essai de traction nous a permis de comprendre l'effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique d'un point soudé.

L'épaisseur de l'éprouvettes influx sur la charge maximale de la rupture que peut l'éprouvette supportée.

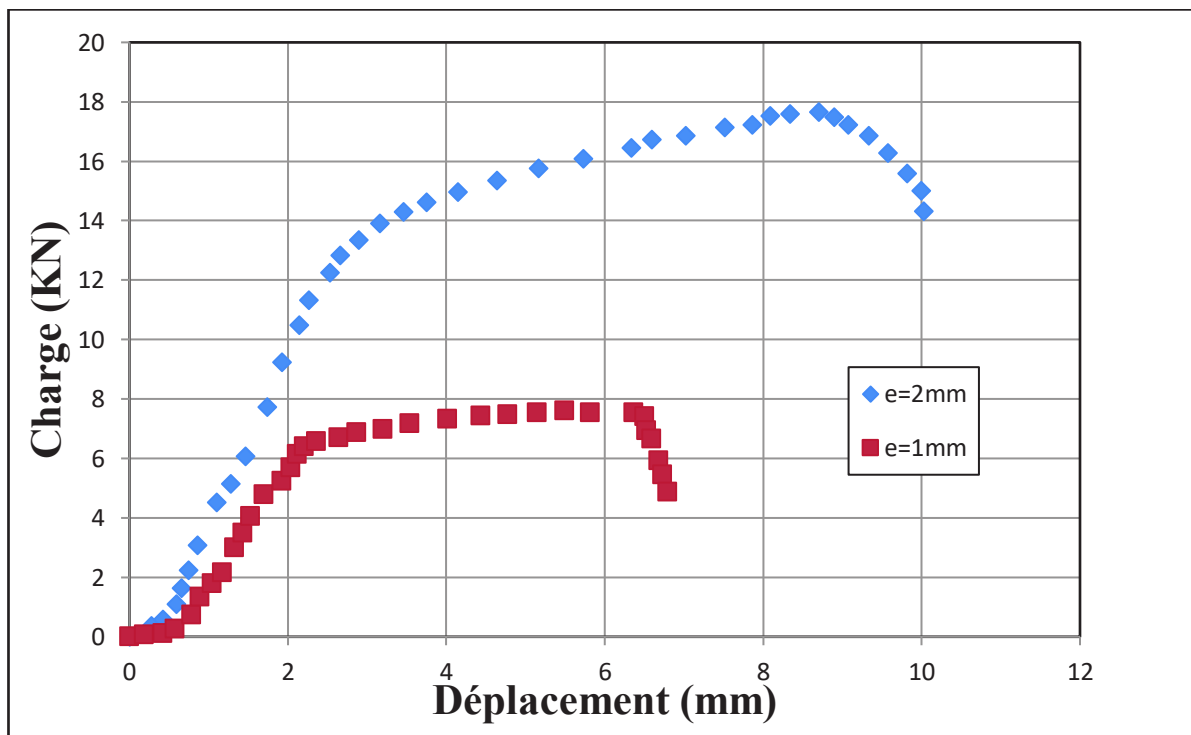
Nous avons remarqué l'éprouvette de l'épaisseur e=2mm résisté mieux que les éprouvettes du e=1mm

Les essais de traction nous ont permis de distingué différent mode de rupture pour les éprouvettes **Figure III.40**

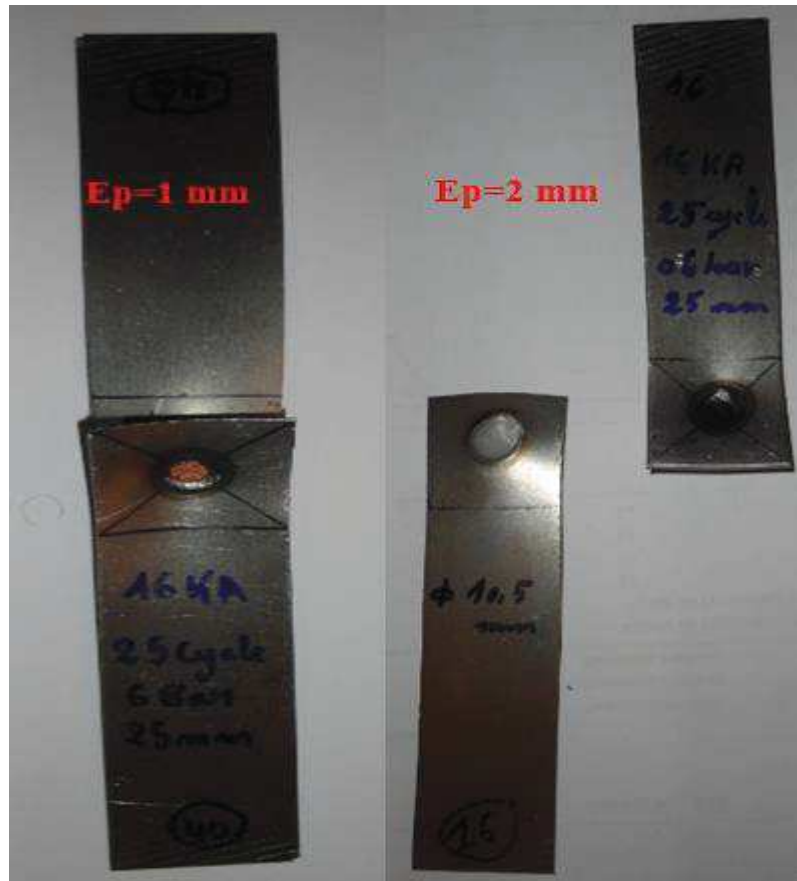
- le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette de e=2mm et le mode 1 a été remarqué pour les' éprouvettes de 1mm



**Figure III.38:** Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 16KA, A=25mm et T=18cycle



**Figure III.39:** Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 16 KA, A=25mm et T=25cycle



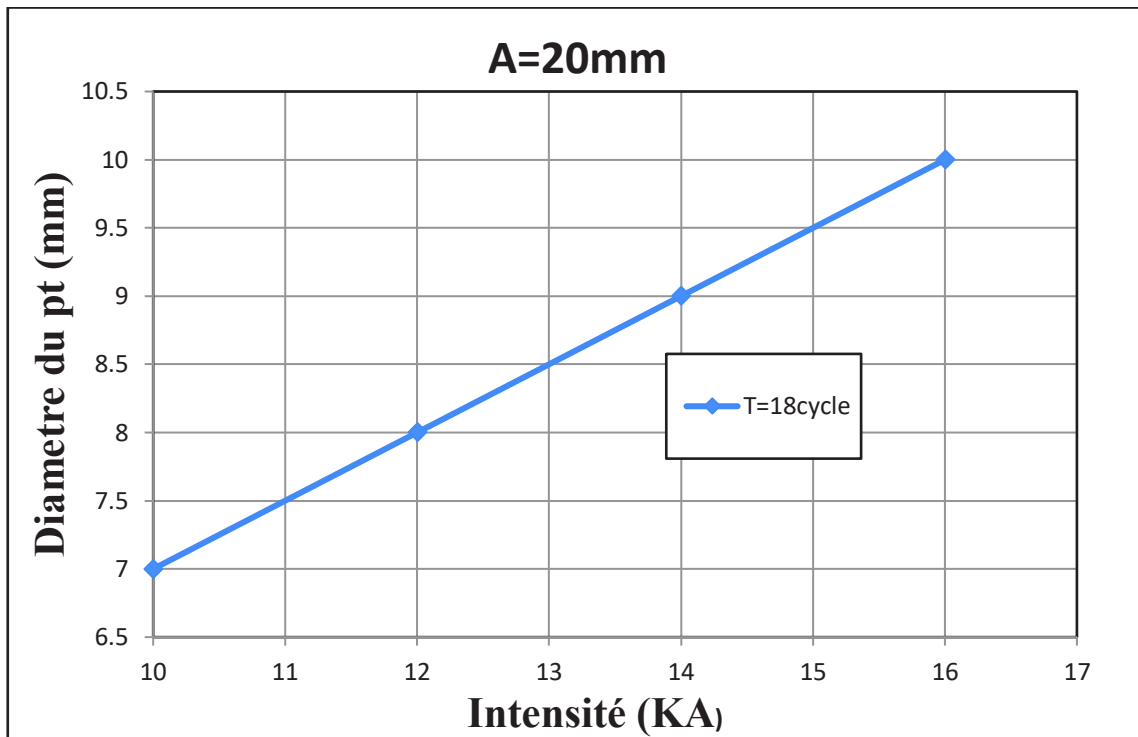
**Figure III.40 :** Eprouvettes rompues après l'essai de traction pour  $T=25$  Cycle et  $F=6$  Bar  
Avec différent épaisseur

### 3.5 Effet combinés des paramètres de soudage et les paramètres géométrique

#### a) Effet de l'intensité sur le diamètre du point de soudure

La courbe dans la **Figure III.41** représente l'évolution de la largeur du point de soudure en fonction de l'intensité de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 Bars à  $T=18$  cycle et pour  $I=10, 12, 14$  et  $14$  KA avec un recouvrement  $A=20$ mm

L'intensité influe sur le diamètre du point de soudure car elle augmente la largeur du point, donc on peut conclure que l'augmentation de l'intensité entraîne une augmentation du diamètre du point de la soudure.



**Figure III.41** : Effet de l'intensité sur le diamètre du point de soudure pour une charge de 6 Bars, A=20mm et T=18cycle

#### **b) Effet de temps de maintien sur le diamètre du point de soudure**

La courbe dans la **Figure III.42** représente l'évolution de la largeur du point de soudure en fonction de l'intensité de l'assemblage soudé par point pour des efforts de 6 Bars à T=18 et 25cycle et pour I=10, 12, 14 et 14 KA avec un recouvrement A=20mm

Le temps de maintien influe sur le diamètre du point de soudure et sont augmentation cause l'élargissement du diamètre du point.

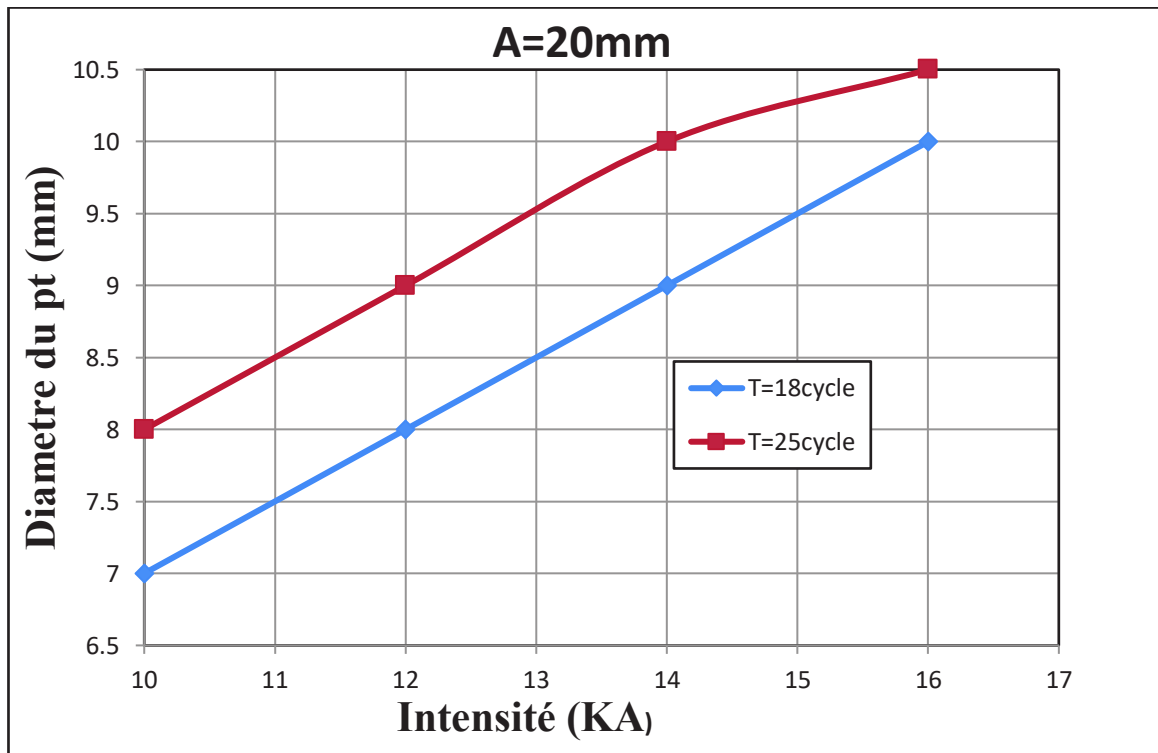


Figure III.42 : Effet temps de maintien sur le diamètre du point de soudure pour une charge de 6 Bars, A=20mm

### 3.6 Effet de l'intensité sur la consommation de l'électrode

On remarque que l'augmentation de l'intensité accélère la consommation de l'électrode et cela apparaît sur la surface du point de soudure (Figure III.43)

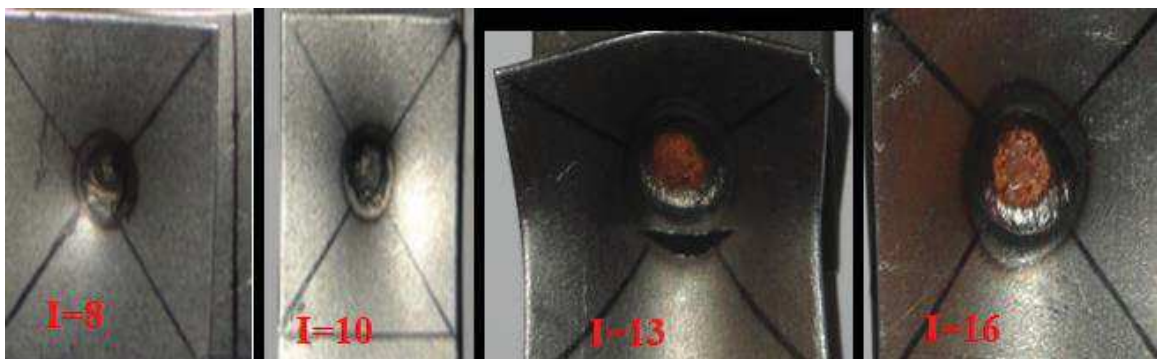


Figure III.43 : Effet de l'intensité sur la consommation de l'électrode



### Conclusion générale

Ce travail présente une étude expérimentale de l'effet des paramètres de soudages et la géométrie sur le comportement mécaniques des joints soudés par points de l'acier doux (tôle LAF (NF EN 10130))

Les conclusions tirées par la présente étude se résument aux points suivants :

- La géométrie de l'assemblage influe sur le comportement mécanique ainsi la charge maximale que peut supporter un assemblage par recouvrement
- L'augmentation de l'épaisseur des plaques augmente la charge maximale que peut supporter l'éprouvette.
- 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.
- Résistance à la rupture augmente avec l'augmentation du courant de soudage.
- L'augmentation de l'intensité du courant de soudage augmente le diamètre de noyau

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

- La simulation numérique du procédé de soudage par points.

La simulation par élément fini du point de soudure.

- Etude sur influence des paramètres de soudage sur la consommation de l'électrode

## Référence

- [1] Chainarong SRikunwong « Modélisation du procédé de soudage par points »  
These de doctora, l'Ecole des Mines de Paris, octobre 2005
- [2] Chhibber ,Shravan Singh Rao, Kanewer Singh Arora, MohadavShome «Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial freesteelShravan»Elsevier2017
- [3] Boriwal ,R.M.Sarviya, M.M. Mahapatra« Failure modes of spot welds in quasi – static tensile – shear loading of coated steel sheets» Elsevier 2017
- [4]Equipe « Assemblage et contrôles destructifs » du CEWAC,Jan 2019
- [5] **Gaétan MONARI** « Sélection de modèles non linéaires par leave-one-out Etude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points » thèse de doctorat de l'université paris 6 3 novembre 1999
- [6]**Hayat.**«Resistance Spot Weldability of Dissimilar Materials: BH180-AISI304L Steels and BH180-IF7123 Steels»J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(11), 1047{1058
- [7] KIANERSI DANIAL, AMIR MOSTAFAEI, and JAVAD MOHAMMADI«Effect of Welding Current and Time on the Microstructure,Mechanical Characterizations, and Fracture Studies of Resistance Spot Welding Joints of AISI 316L Austenitic Stainless Steel»METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A,VOLUME 45A, SEPTEMBER 2014
- [8] **Sylvain DANCETTE** (ingenieur) « Comportement mécanique des soudures par points : mécanismes et stratégies de prédiction dans le cas des tôles en acier pour automobile » Année 2009
- [9] TianZhiling, QiangJia 1, Lei Liu 1, Wei Guo , Yun Peng, GuishengZou ,and Y. Norman Zhou «Microstructure and Tensile-Shear Properties of Resistance Spot-Welded Medium Mn Steel»Metals 2018, 8, 48
- [10]Formation, Expertise et Qualification en soudage«SOUDAGE PAR RESISTANCE SD SERVICE -2012»Jan 2019
- [11]Jurandir Primo«Weld Quality Test Method Manual»2012

[12] [fr.wikibooks.org/wiki/Technologie/Matériaux/Généralités/Désignation\\_normalisé  
e\\_des\\_aciers](http://fr.wikibooks.org/wiki/Technologie/Mat%C3%A9riaux/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s/D%C3%A9signation_normalis%C3%A9e_des_aciers)

[13] Soudage de métaux-les principaux procédés [www.usinenouvelle.com/expo/guides-  
d-achat/machines-de-soudage-87](http://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87) avril 2019

[14] Le soudage par résistance par bossage [www.rocdacier.com/soudage-resistance-  
bossage/](http://www.rocdacier.com/soudage-resistance-bossage/) avril 2019

[15] [www.esab.fr/france-benelux/fr/automation/process-solutions/flash-butt-  
welding.cfm](http://www.esab.fr/france-benelux/fr/automation/process-solutions/flash-butt-welding.cfm) avril 2019

[16] **BENISSAAD** « LE SOUDAGE TEC 340 » office des publications universitaires  
1, place centrale de Ben-Aknoun (Alger)

[17] SD sevice « Livre Soudage par Resistance » édition 2016