

الجمهورية
الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

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 :

ZIANI Belkheir

Sujet

Comportement mécanique d'un assemblage soudé en "Peel joint"

Soutenu le 23 juin 2019 devant le jury composé de :

Président :	ACHOUI Mohammed	MAA	Université de Tlemcen
Encadreur :	RAHOU Mohammed	MCA	ESSAT
Co-encadreur :	BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Examineur :	SEBAA Féthi	MCA	Université de Tlemcen
Examineur :	MANGOUCHE Ahmed	MAA	Université de Tlemcen

Année universitaire 2018/2019

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 Allah 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 Mr. BENACHOUR Mustapha et Mr. RAHOUI Mohammed pour avoir encadré ce travail et de m'avoir apporté leur connaissances, ils sont toujours avec moi quand j'en ai besoin d'eux. Ils ont 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. ACHOUI Mohammed qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance ainsi qu'au Mr. SBAA Fethi et Mr. MANGOUCHE Ahmed d'avoir accepter 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 grande merci pour mes collègue de formation sans exception pour leurs encouragements, leur soutient 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.

DEDICACE

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

Mes très chères parents pour leur soutient et leur aide durant toute ma période 'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissances et mon respect

Toute la famille ZIANI

A mes chers Frères Bilal, Karim.

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de prés, Sid Ali, Djamel, Mekki, Moussabe, Mahjoub, Walid, Hanan, Intissar, Hicheme, Salah Eddine, Abdeladim, Ichraf, Youcef, Moussa, Omar, Badr Adin, Hossine, Driss, Mangouchi, Khadidja, Mohammed.

Tous mes enseignants

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

ZIANI Belkheir

Résumé

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.

Deux électrodes de cuivre compriment les pièces de métal à souder l'une contre l'autre puis les font traverser par un courant de très forte intensité

La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique.

Le thème abordé, intègre dans ce sens et est intitulé : «comportement mécanique d'un assemblage soudé en "Peel joints"»

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant qui joue un rôle prépondérant, car elle conditionne directement la taille de la soudure. Le domaine de soudabilité d'un produit est défini comme la plage d'intensité permettant d'obtenir une soudure de qualité satisfaisante, tous les autres paramètres (effort mécanique, durées, etc.) étant fixés préalablement.

L'effet des paramètres de soudage est étudié à savoir l'intensité du courant de soudage, l'effort et le temps du soudage avec des différentes géométries par recouvrement et en "Peel joints".

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

Abstract

Resistance spot welding (RSW) is a joining method using the principle of non-fusible electrode where the temperature rises to obtain the melting nugget which is added to a high mechanical pressure.

Two copper electrodes compress the pieces of metal to be welded against one to another and then cross them by a current of very strong intensity

The heat generated by this current at the sheet-metal interface melts the metal locally, which creates, after solidification, a weld spot.

A weld is made in one to two seconds, with an effective time of passage of the current of a few tenths of seconds. The physical phenomena involved in a welding are electrical, thermal, mechanical and metallurgical.

The theme addressed, integrates in this sense and is entitled: "mechanical behavior of a welded peel joints.

Among the various welding parameters, the intensity of the current plays a preponderant role, since it directly conditions the size of the weld. The weldability range of a product is defined as the intensity range for obtaining a weld of satisfactory quality, all the other parameters (mechanical stress, durations, etc.) being fixed beforehand.

The effect of the welding parameters is studied namely the intensity of the welding current, the effort and the time of the welding with different geometries by overlap and peel joints.

The results showed that the parameters, force, time and intensity of welding have a small effect on the mechanical characteristics compared to the geometry effect of the assembly. The experimental results also show that the geometry of the assembly is an important parameter for the holding of an assembly and its mechanical strength.

المخلص

اللحام الموضوعي هو طريقة لحام تستخدم مبدأ اللحام بمقاومة الإلكترود غير القابل للانصهار حيث تتم زيادة درجة الحرارة للحصول على نقطة انصهار المعدن إلى ضغط ميكانيكي عالي. يقوم القطبان النحاسيان بضغط على قطع المعدن ليتم لحامها ببعضها البعض و يتم ذلك بتيار القوي الذي يعبرها. الحرارة التي يولدها هذا التيار في واجهة الصفائح المعدنية تذوب المعدن محليا ، مما يشكل ، بقعة لحام يتكون اللحام في ثانية إلى ثانيتين، مع مرور التيار في وقت فعلي من بضعة أعشار الثواني. الظواهر الفيزيائية التي ينطوي عليها اللحام هي كهربائية وحرارية وميكانيكية ومعدنية.

الموضوع الذي تم تناوله يدمج بهذا المعنى وهو بعنوان: "السلوك الميكانيكي القطع ملحومة" Peel joints" من بين الخصائص المختلفة للحام ، تلعب شدة التيار دوراً مهماً، لأنه يضبط حجم اللحام مباشرة. يتم تعريف نطاق قابلية اللحام للمنتج على أنه نطاق الكثافة للحصول على لحام ذي جودة مرضية ، ويتم تثبيت جميع الخصائص الأخرى (الإجهاد الميكانيكي ، والمدد ، إلخ) مسبقاً

تتم دراسة تأثير خصائص اللحام وهي شدة تيار اللحام والجهد ووقت اللحام بهندسيات مختلفة عن طريق تداخل و " Peel joints "

أظهرت النتائج أن الخصائص والقوة والوقت وشدة اللحام لها تأثير بسيط على الخواص الميكانيكية مقارنة بالتأثير الهندسي للتجميع. تظهر النتائج التجريبية أيضاً أن هندسة التجميع هي معلمة مهمة لعقد التجميع وقوته الميكانيكية.

Liste des figures

Chapitre I: Etude bibliographique

Figure I.1 : Soudage par points.....	2
Figure I.2 : Soudage par bossage.	3
Figure I.3 : soudage a la molette.....	3
Figure I.4 : soudage en bout par étincelage.....	5
Figure I.5 : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point.....	5
Figure I.6 : Cycle de soudage.....	6
Figure I.7 Temps de maintien exprimés en milliseconde et en période.....	7
Figure I. 18: 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 tôle nues.....	9
Figure I.9 Coupe d'un point de soudure.....	9
Figure I.10 Microstructures générées par l'opération de soudage.	11
Figure I.11 : Effets du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé.....	12
Figure I.12 Effets du temps de soudage sur le diamètre du noyau.....	12
Figure I.13 Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé.	12
Figure I.14 : Evolution simultanée des diamètres des faces actives et noyaux fondus.....	16
Figure I.15 : Exemple des différents formats d'électrodes.....	17
Figure I.16 : Effet du temps de maintient.....	18
Figure I.17 : Effet de l'épaisseur de la tôle.....	18
Figure I.18 : la variation limite élastique pour différents épaisseurs.....	19
Figure I.19 : Effet de la géométrie sur le comportement mécanique.....	19
Figure I.20 : Effet du temps de soudage sur la résistance à la traction.	20
Figure I.21 : Effet de l'intensité de soudage sur la résistance à la traction.....	20

Chapitre II: Etude expérimentale

Figure II.1 : Module d'Young.	22
Figure II.2 : Dimension des éprouvettes de tractions.....	26
Figure II.3 : Dimension des éprouvettes soudées.....	26
Figure II.4 : Dimension des éprouvettes soudées.....	27
Figure II.5 : Poinçonneuse (AMADA).....	27

Figure II.6 : (A) tôle avant découpage (B) après le découpage.....	28
Figure II.7 : Eprouvettes normalisées réalisées.	28
Figure II.8 : Presse plieuse (AMADA).....	29
Figure II.9 : (A) Pièce après pliage (B) dessin de définition.	29
Figure II.10 : (A) Machine de soudage (B) tableau de commande.....	30
Figure II.11 : Opération de soudage.....	32
Figure II.12 : Opération de traction.....	32
Figure II.13 : Machine de traction avec le système d'acquisition de données.....	33
Figure II.14 : Courbe De Traction Charge / Déplacement.....	34
Figure II.15 : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations.....	34
Figure II.16 : Eprouvette normalisée après rupture.....	35

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure III.1 : Différents modes de ruptures recensés par l'AWS.....	36
Figure III.2 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle et F=6 Bar.....	37
Figure III.3 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et un temps de 18 cycles.....	37
Figure III.4 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle et F=7 Bar.....	38
Figure III.5 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bar et un temps de 18 cycles.....	38
Figure III.6 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bar.....	39
Figure III.7 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et un temps de 25 cycles.....	39
Figure III.8 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=7 Bar.....	40
Figure III.9 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bar et un temps de 25 cycles.	40
Figure III.10 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et un temps de 18 cycles.	41
Figure III.11 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle et F=6 Bar.....	42

Figure III.12 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bar et un temps de 18 cycles.	42
Figure III.13 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l'essai de traction pour T=18 Cycle et F=7 Bar.....	43
Figure III.14 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et un temps de 25 cycles.	43
Figure III.15 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bar	44
Figure III.16 : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bar et un temps de 25 cycles.	44
Figure III.17 Les éprouvettes (e=1 mm) rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=7 Bar.....	45
Figure III.18 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 12 KA.....	46
Figure III.19 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 12 KA et un temps de 18 cycles.....	46
Figure III.20 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA et 18 Cycle	47
Figure III.21 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 18 cycles.....	47
Figure III.22 Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA et 25 Cycle	48
Figure III.23 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 25 cycles.....	48
Figure III.24 Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 16 KA et 18 Cycle.....	49
Figure III.25 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 16 KA et un temps de 18 cycles.....	49
Figure III.26 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 12 KA et 18 Cycle	50
Figure III.27 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 12 KA et un temps de 18 cycles.....	50
Figure III.28 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 10 KA.....	51
Figure III.29 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA	51

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	52
Figure III.31 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 16 KA	52
Figure III.32: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 16 KA	53
Figure III.33 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 12 KA e=1 mm	53
Figure III.34 : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 12 KA e=1 mm	53
Figure III.35 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA e=1 mm	54
Figure III.36: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bar et une intensité de 14 KA e=1 mm	54
Figure III.37 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 16 KA e=1 mm	55
Figure III.38: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 16 KA e=1 mm	55
Figure III.39 : Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 12 KA et T=18cycle	56
Figure III.40: Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 14 KA et T=18cycle	57
Figure III.41: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 12 KA , et T=18 Cycle	58
Figure III.42: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 14 KA et T=18cycle	59
Figure III.43: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar et une intensité de 16 KA et T=18cycle	59

Figure III.44 : Effet de l'effort sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour T=18 cycle.	60
Figure III.45 : Effet de l'effort sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour T=25 cycle.	60
Figure III.46: Effet du temps de maintien sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bar.	61

Liste des tableaux

Chapitre I: Etude bibliographique

Tableau I.1 : Effets du temps d'accostage.	6
Tableau I.2 : Effets de l'effort.	7
Tableau I.2 : Effets du temps maintien.	7
Tableau I.3 : Effet de l'intensité.	8
Tableau I.4 : la soudabilité des métaux usuel.	13
Tableau I.5 : Les paramètres de soudage pour les aciers doux.....	14
Tableau I.6 : les caractéristiques de l'acier et du zinc.	15

Chapitre II: Etude expérimentale

Tableau II.1 : Composition Chimique de l'acier.....	25
Tableau II.2 : Caractéristique mécanique de l'acier.....	25
Tableau II.3 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°1 jusqu'à 5.....	30
Tableau II.4 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°6 jusqu'à 10.	31
Tableau II.5 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°11 jusqu'à 15.....	31
Tableau II.6 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°16 jusqu'à 20.....	31
Tableau II.7 : caractéristique mécanique.....	35

Liste des notations

W : Effet de joule (joule)

R : Résistance (Ω)

I : Intensité (ampère)

t: Temps de soudage –cycle- (seconde)

L : Longueur de matériau (mm)

S ; Section de matériau (mm²)

T : Température (°C)

A : longueur de recouvrement (mm)

e : Epaisseur de l'éprouvette (mm)

Q : La quantité de chaleur générée (joule)

F : Effort en Bars.

Φ: Diamètre du noyau (mm)

D : Diamètre du corps d'électrode (mm)

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

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre .I

I.1. Principe du soudage par résistance.....	1
I.1.1 Soudage par points.....	1
I.1.2 Soudage par bossage.....	2
I.1.3 Soudage a la molette.....	3
I.1.4 Soudage en bout par étincelage.....	4
I.2 PRINCIPE DE BASE DU PROCÉDÉ.....	5
I.2.1 Rappel de base d'électricité.....	5
I.2.2 Cycle de soudage.....	6
II.3 Mécanisme de formation de la soudure.....	8
I.4 Point de soudure et son environnement.....	9
I.4.1 Microstructures du point soudé.....	10
I.5 Soudabilité.....	11
I. 6 Compatibilité de soudage des métaux usuels.....	13
I.7 Matériaux d'étude "Aciers doux.....	13
I.8 Tôles galvanisées.....	14
I.9 Processus de l'usure des pointes d'électrodes.....	15
I.10 Préparation des surfaces de tôles dégraissage.....	16
I.11 Décapage.....	16
I.12 ELECTRODES.....	16
I.13 Etat de l'art sur les effets des paramètres de soudage.....	17

Chapitre .II

II.1. Introduction.....	21
II.2 Principe de l'essai.....	21
II.3 Exploitations de l'essai.....	21
II.3.a Définitions.....	22
II.3.b Constantes d'élasticité.....	23
II.3.b.1 Définitions.....	23
II.3.c. Le Processus thermomécanique.....	23
II.4 Courbe rationnelle de traction.....	24
II.4.1 Contrainte vraie.....	24

II.4.2 Déformation rationnelle.....	24
II.5 Matériaux d'étude	24
II.5.1 Caractéristiques chimiques et physiques.....	24
II.6 Etapes de la réalisation des éprouvettes.....	25
II.6.1 Eprouvettes.....	25
II.6.2 Machines utilisées.....	27
II.6.2.1 Poinçonneuse (AMADA)	27
II.6.2.2 Plieuse (AMADA).....	28
II.6.2.3 Machine de soudage (TECNA)	29
II.6.2.4 Essai de traction	32
II.7 Description de l'essai.....	32
Chapitre .III	
III.1 Mécanisme de rupture.....	35
III.1.1 Mode de rupture.....	36
III.2 Effet de l'intensité du courant sur le comportement mécanique.....	36
III.2.1 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 2mm.....	44
III.2.2 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 1 mm	45
III.3 Effet de l'effort sur le comportement mécanique des joints soudés.....	45
III.3.1 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 2mm	49
III.3.2 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 1 mm.....	49
III.4 Effet du temps de maintien sur le comportement mécanique des joints soudé...50	
III.4.1 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 2mm.....	51
III.4.2 Analyse des Essais de rupture pour une épaisseur de 1 mm	56
III.6 Effet de la géométrie sur le comportement mécanique des joints soudé.....	58
III.7 Effet de la charge maximale sur le comportement mécanique	60
Conclusion & perspectives.....	61
Références bibliographique.....	63

INTRODUCTION GENERALE

Les assemblages soudés dans l'industrie sont effectués manuellement ou par robot en grande majorité par procédés de soudage à l'arc TIG, MIG/MAG et par point.

Des évolutions, variantes et innovantes sur ces procédés apparaissent depuis quelques années elles sont réputées performantes pour le soudage des tôles notamment dans le cadre de la robotisation ou de l'automatisation.

Aujourd'hui, la recherche des nouveaux designs permettant, soit d'assurer une fonction non atteinte, soit d'alléger une structure est de la plus haute importance et conduit assez souvent à l'association des matériaux avec différentes géométries surtout dans le côté automobile qui est de nos jours un domaine très crucial car une moindre erreur entraînera des dégâts catastrophiques.

L'étude théorique du soudage par points est un problème complexe qui fait intervenir plusieurs phénomènes physiques. Pour cette étude de modélisation, nous ne considérons que les phénomènes mécaniques liés à la phase d'accostage ainsi que l'interaction étroite entre les phénomènes électrique et thermique.

Face à la complexité des ruptures pouvant être rencontrées, le premier objectif de la mémoire est d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement des points soudés de l'effet de la géométrie de l'assemblage, dans les modes de sollicitation classiquement utilisés dans l'industrie : la traction, cisaillement par traction. Le deuxième objectif est d'identifier les paramètres qui influent sur le comportement mécanique.

Le chapitre 1 introduit les notions générales relatives au procédé de soudage par résistance où sont décrits les différents mécanismes de formation de la soudure pour différents aciers.

Le chapitre 2 décrit l'étude expérimentale conduite sur l'acier doux, on utilise des éprouvettes soudées par recouvrement et en peel joint qui ont été sollicités à un effort cisaillement par traction, dans le but d'évaluer les caractéristiques mécaniques afin de comprendre les mécanismes de rupture des points soudés et l'effet des différents paramètres sur le comportement mécanique d'un joint soudé.

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

*Chapitre I Etude
bibliographique*

I.1. Principe du soudage par résistance

Le procédé de soudage est un procédé à chaud, sous pression et sans métal d'apport. Il consiste à échauffer localement les pièces par passage d'un courant électrique.

La technique la plus utilisée est le soudage par résistance par points. Dans ce cas, les pièces à souder sont superposées et serrées localement entre deux électrodes et l'ensemble est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température. L'échauffement provoque la fusion localisée des deux pièces dans la zone située entre les deux électrodes, suivi de la formation d'un noyau de métal recristallisé. Il existe plusieurs procédés dérivés, on peut citer le soudage à la molette, le soudage par bossage ou le soudage en bout, procédés qui seront également abordés dans cet article. Le point commun de ces procédés est qu'ils utilisent l'effet Joule, c'est-à-dire qu'ils exploitent le phénomène de l'échauffement d'un conducteur parcouru par un courant électrique. Pour rappel, dans un circuit électrique, la chaleur dégagée par chaque élément est proportionnelle à $R.I^2.t$ où R est la résistance de l'élément, I , l'intensité efficace du courant et t , la durée de son passage [2].

I.1.1 Soudage par points

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu (Figure I.1), 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.

Lors de l'opération de soudage les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L'action d'une pédale déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes :

- l'accostage : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné ;
- le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance ;
- le forgeage ou maintien d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement.

Au coup par coup, la machine ne réalise qu'un cycle et il faut appuyer de nouveau sur la pédale pour en réaliser un autre.

À la volée, la machine fonctionne d'une manière répétitive, chaque cycle étant séparé du précédent par un intervalle de temps ou temps mort qui permet à l'opérateur de déplacer la pièce à souder. Sa durée détermine ainsi la cadence de travail.

L'ensemble de ces phases est appelé cycle de soudage, dont la figure 2d donne la forme graphique conventionnelle. Il existe de nombreuses formes de cycles appropriés aux matériaux à souder ou au niveau de qualité recherchée [9].

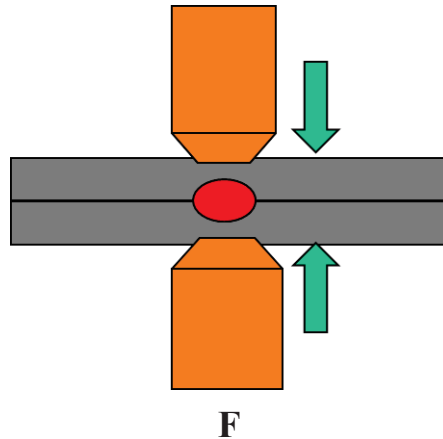


Figure I.1 : Soudage par points [9].

I.1.2 Soudage par bossage

Le procédé de soudage par bossage (Figure I.2) est une méthode d'assemblage directement dérivée du procédé classique de soudage par résistance par points. Dans le cas de ce dernier, la surface de passage du courant est déterminée par la forme des électrodes et de l'effort de compression qui doit vaincre la raideur des tôles. La surface de contact peut donc être variable et elle est relativement mal contrôlée. Dans le cas du soudage par bossage, l'effort de compression et l'endroit du passage du courant sont localisés à un ou des points déterminés par des bossages préexistants sur une des deux pièces à assembler. En effet, les bossages, grâce à leur effet de concentration délimitent parfaitement la surface de passage du courant de soudage. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser.

Le soudage par bossage est souvent utilisé dans le cas d'assemblage des tôles ayant une certaine courbure, car sans le bossage, il est difficile de garantir un contact correct des deux tôles à l'endroit de la soudure comme illustré sur la figure 3.

Le soudage de barres et de fils en croix, utilisé par exemple pour la fabrication de chariots de supermarché, est également assimilé au soudage par bossage, car il présente de nombreuses similitudes dans sa mise en œuvre [7].

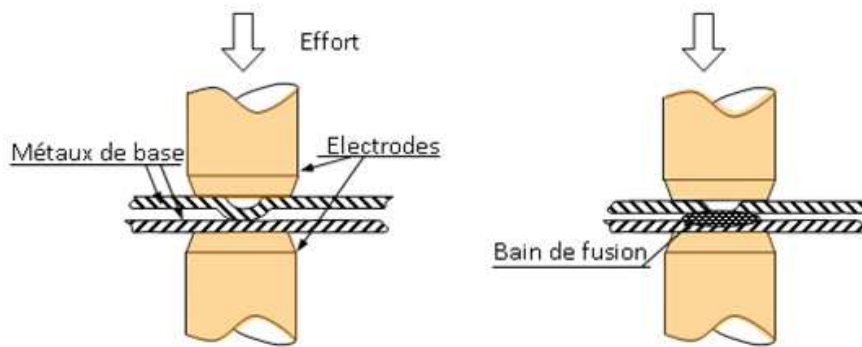


Figure I.2 : Soudage par bossage.

I.1.3 SOUDAGE A LA MOLETTE

Le soudage à la molette (Figure I.3) diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des rotations permettant de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du

Un cycle de soudage comporte donc les phases suivantes, similaires à celles du soudage par points :

- l'accostage : les deux molettes viennent serrer, pour les accoster et localiser le courant, les deux pièces à souder au point de départ
- le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue
- l'arrêt qui commande l'écartement des molettes en fin de cordon.

Le cycle de soudage est celui de la machine typique et les différentes phases opératoires [4].

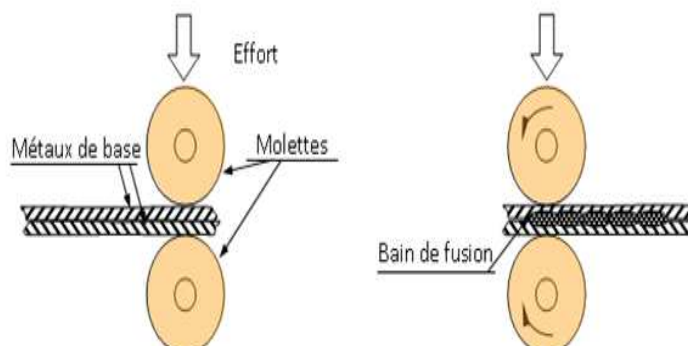


Figure I.3 : soudage a la molette [4].

I.1.4 Soudage en bout par étincelage

Le procédé de soudage en bout, première forme du soudage par résistance, permet, comme son nom l'indique, de souder bout à bout des barres ou des profilés de même section droite ou des pièces ayant reçu une préparation les ramenant à ce cas. Sur la figure I.4 est représentée une opération de soudage en bout. Les pièces sont placées dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage.

L'opérateur actionne la commande du cycle qui se déroule automatiquement de la façon suivante :

- avance et accostage : le chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces qui viennent en contact sous un effort déterminé
- soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire du circuit de puissance, et porte les parties en contact à la température de soudage ;
- forgeage ou maintien : exercé par l'effort du chariot mobile et à la fin duquel les mâchoires s'ouvrent en permettant le retour au repos du chariot.

Comme dans le cas général, ces différentes opérations sont temporisées. Il n'existe pas, dans les machines en bout, de marche soudage par points. Cependant, avec un dispositif de chargement et déchargement automatiques des pièces, on peut obtenir un fonctionnement similaire.

La description précédente concerne un mode opératoire qui se limite en pratique au soudage de pièces de très petites sections, ne dépassant pas quelques dizaines de millimètres carrés.

Lorsqu'il s'agit de pièces massives, pour lesquelles il n'est pas possible d'obtenir une portée parfaite des surfaces en regard, la répartition du courant très imparfaite ne permet pas d'engager directement un processus d'échauffement régulier et utilisable ; aussi a-t-on recours à un artifice, consistant à produire des étincelles de contact, dont l'intérêt est de créer un échauffement parfaitement réparti sans exiger de densité de courant exagérée. Le procédé est alors appelé, pour cette raison, soudage en bout par étincelage ou plus simplement soudage par étincelage et c'est sous cette forme qu'il est généralisé. Il permet de souder des sections de 10 000 mm² [9].

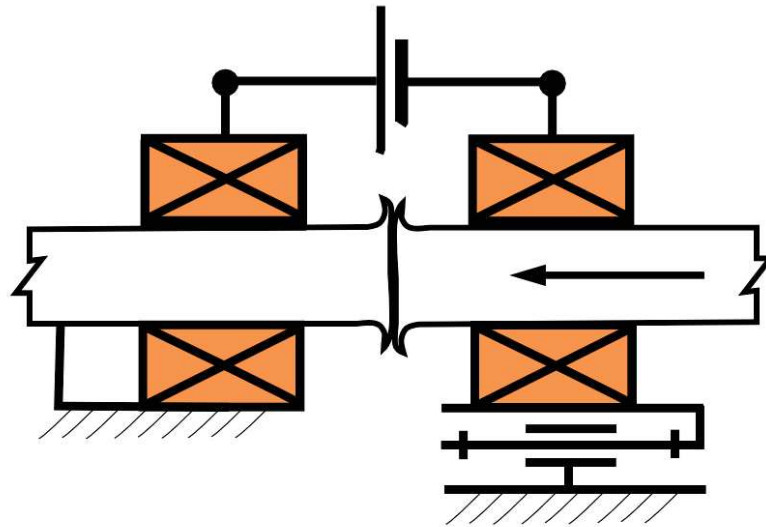


Figure I.4 : soudage en bout par étincelage [9].

I.2 PRINCIPE DE BASE DU PROCÉDÉ

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes [1].

I.2.1 Rappel de base d'électricité

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

W (en joules) = R (Ohm) x I² (Ampères) x t (secondes)

La résistivité est l'opposition (Figure I.5) d'un matériau au passage du courant électrique. Les électrodes en cuivre présentent une résistivité faible (1,7micro-ohm/cm/cm² contre 8 pour une tôle standard de 1mm).

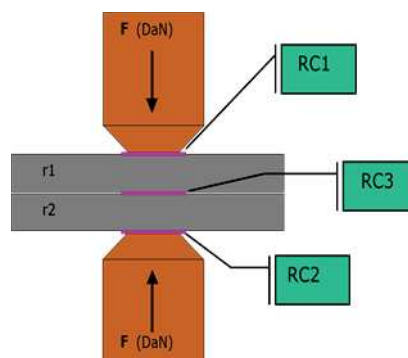


Figure I.5 : Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point [1].

Définition de R dans $R = R_c + r$ $R_c =$ Résistance de contact $r =$ Résistance interne

$$R = R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} + r_1 + r_2 \quad R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} > r_1 + r_2$$

Les résistances de contacts R_{c1} , R_{c2} et R_{c3} dépendent de :

- L'état de surface des tôles, la nature des tôles, la nature et forme des électrodes

I.2.2 Cycle de soudage

Le cycle simple de soudage (Figure I.6) le plus fréquemment utilisé est le cycle 4 fonctions :

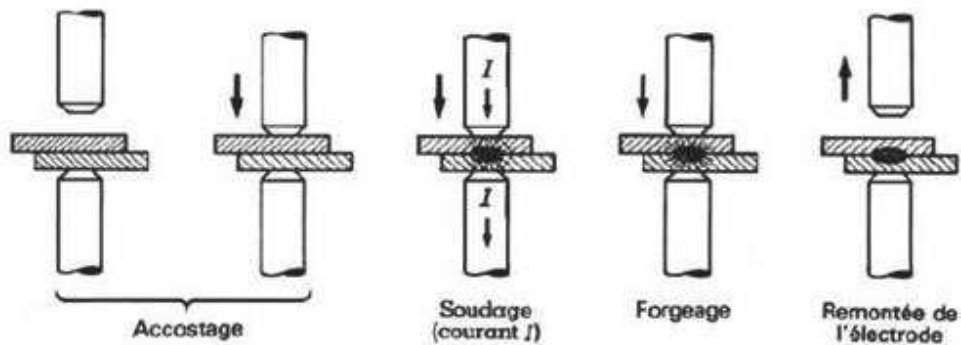


Figure I.6 : Cycle de soudage [9].

a. Accostage

L'accostage (Tableau I.1) est le temps nécessaire à la fermeture de la pince ou de la machine. Lors de cette phase de la séquence on assure la mise en serrage des pointes d'électrodes sur les tôles à assembler et l'on détermine donc la valeur de résistance sur laquelle va s'appliquer l'effet Joule.

Tableau I.1 : Effets du temps d'accostage [9].

Un temps d'accostage trop court provoque :	Un temps d'accostage trop long provoque :
points brûlés, des projections de métal en fusion	Un ralentissement de la cadence
Des éclatements aux électrodes	
Des points sans résistance mécanique	
Une usure anormale des électrodes	

b. Effort

Pendant le passage du courant, l'effort maintient (Tableau I.2) le bon accostage et s'oppose à la destruction, sous l'influence de la dilatation du creuset contenant le noyau de métal en fusion.

Tableau I.2 : Effets de l'effort [9].

Un effort trop important provoque :	Un effort insuffisant provoque :
Une réduction des résistances	Une augmentation des résistances
Des points trop petits ou collés	Des projections de métal en fusion / points brûlés
Un écrasement ou emboutissage des bossages	Une usure anormale des électrodes

c. Soudage

Le soudage est un chauffage obtenu par l'effet Joule d'un courant électrique traversant les pièces à assembler.

L'intensité et le temps de soudage exigent la plus grande précision

Une fluctuation de plus ou moins 5% peut différencier un point bon d'un point mauvais [9].

d. Temps de soudage

Les temps en soudage par résistance (Tableau I.2) sont exprimés soit en milliseconde, soit en période :

La période (Figure I.7) correspond à 20ms pour une fréquence réseau de 50Hz (ou 16,66ms pour 60Hz) [9].

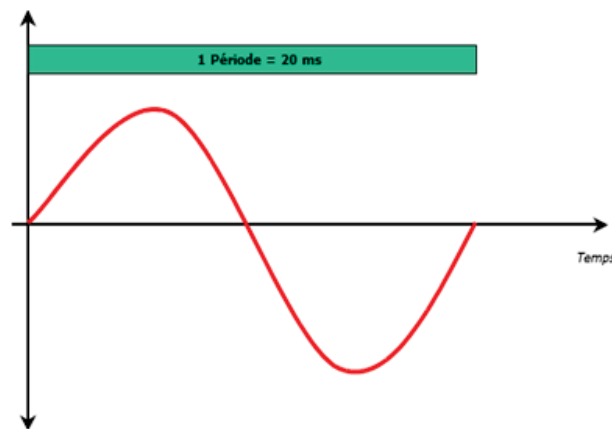


Figure I.7 Temps de maintien exprimés en milliseconde et en période [9].

Tableau I.2 : Effets du temps maintien [9].

Un temps trop long provoque :	Un temps trop court provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion, une indentation trop importante	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	
Un collage des électrodes sur la tôle	

e. Intensité

L'intensité du courant de soudage par résistance (Tableau I.3) exprimé en kilo Ampère (KA) est le facteur majeur pour la formation d'un point de soudure [9].

Tableau I.3 : Effet de l'intensité [9].

Une intensité trop forte provoque :	Une intensité insuffisante provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion, une indentation trop importante	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	

f. Maintien

Il permet de contenir l'expansion du point de soudure, favorise son refroidissement et donc limite le soulèvement entre les 2 tôles [9].

g. Forgeage

Le forgeage est utilisé **en lieu et place du maintien**, le but de son application est [9] :

- Diminuer le volume de retassure Affiner le grain du métal
- Augmenter les caractéristiques mécaniques Limiter les défauts internes

II.3 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle (**Figure I. 18**) 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 de la cour en seconde

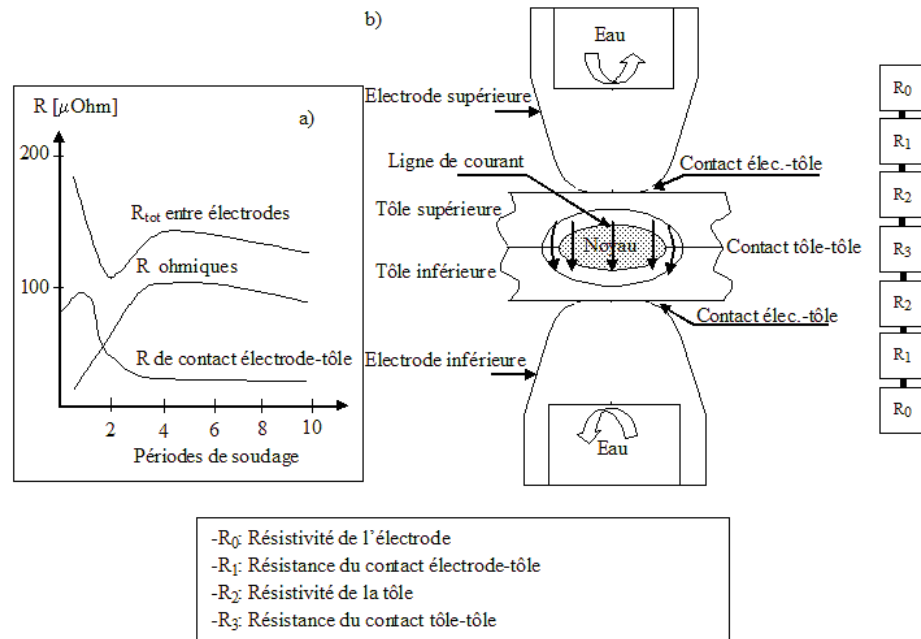


Figure I.8: Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ;
 (a) Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues,
 (b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [2]

I.4 Point de soudure et son environnement

Si l'on effectue une coupe transversale d'un point assurant la soudure entre deux tôles, par des moyens métallographiques (Figure I.9) (sciage, polissage et attaque chimique) il devient possible d'observer la section du point et de son environnement [7].

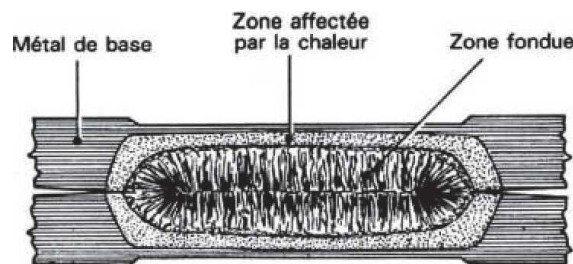


Figure I.9 Coupe d'un point de soudure [7].

Les dimensions du noyau soudé sont déterminées en fonction de la résistance mécanique recherchée. Par analogie à d'autres procédés d'assemblage discontinus, tels que le vissage ou le rivetage on conçoit bien que les caractéristiques de résistance du point soudé, devront tendre vers la résistance de base, du matériau assemblé (en fonction de la position, de l'espacement et du nombre de points, de vis ou de rivets...).

En fait, la résistance au « cisaillement » des points soudés est dans la majorité des cas presque

équivalente à celle d'une section identique de la tôle de base, voire même supérieure, pour des tôles dont l'épaisseur est inférieure à 1,5mm [7].

I.4.1 Microstructures du point soudé

L'opération de soudage par points se caractérise par un cycle thermique très rapide (Figure I.10) qui modifie profondément la microstructure du métal de base au voisinage du point soudé.

Le métal subit un chauffage à des vitesses de l'ordre du millier de degrés Celsius par seconde jusqu'à une température pouvant aller au-delà de la température de fusion. Il s'en suit immédiatement un refroidissement très rapide dont la vitesse dépend des paramètres de soudage. Un cycle de soudage par point complet est typiquement effectué en moins d'une seconde.

Au niveau microstructural, on distingue plusieurs zones, illustrées schématiquement à la Figure I.9 :

- La zone associée au métal de base **MB** : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600°C environ si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.
- La zone subcritique **SCZAT** : zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600°C et Ac1. On n'observera globalement aucun effet sur la taille des grains mais certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial. Au chauffage, une partie du carbone peut être remis en solution. Au refroidissement, on peut observer de la précipitation-coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, des phénomènes de revenu (de la martensite du métal de base par exemple) en fonction de la vitesse de refroidissement.
- La zone inter critique **ICZAT** (Inter-Critical HeatAffected Zone) : zone où la température est arrivée entre Ac1 et Ac3.

L'austénitisation partielle (coexistence de la ferrite α et de l'austénite γ) conduit à des modifications importantes de la microstructure.

- La zone à grains fins **GFZAT** : (Fine Grained Heat Affected Zone) zone de température entre Ac3 et 1100°C environ. D'après le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est totale dans cette zone. Dans le cas du soudage, Ac3 peut être décalé par la rapidité du cycle thermique. Au chauffage, la nouvelle structure austénitique, non homogène et globalement fine, remplace la microstructure initiale. Suite au refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainito-martensitique fine avec éventuellement quelques hétérogénéités.
- La zone à gros grains **GGZAT** : zone entre 1100°C environ et la température de fusion. Au chauffage, on assiste à une forte croissance du grain austénitique qui confère à cette zone une forte trempabilité. La microstructure obtenue après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.

- Zone fondue **ZF** : outre une fine zone de liaison (difficilement observable) constituée par la zone semi-solide, la dernière zone est la zone fondue, où la température a dépassé la température de liquidus. La microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau. On peut observer de la ségrégation inter dendritique [9].

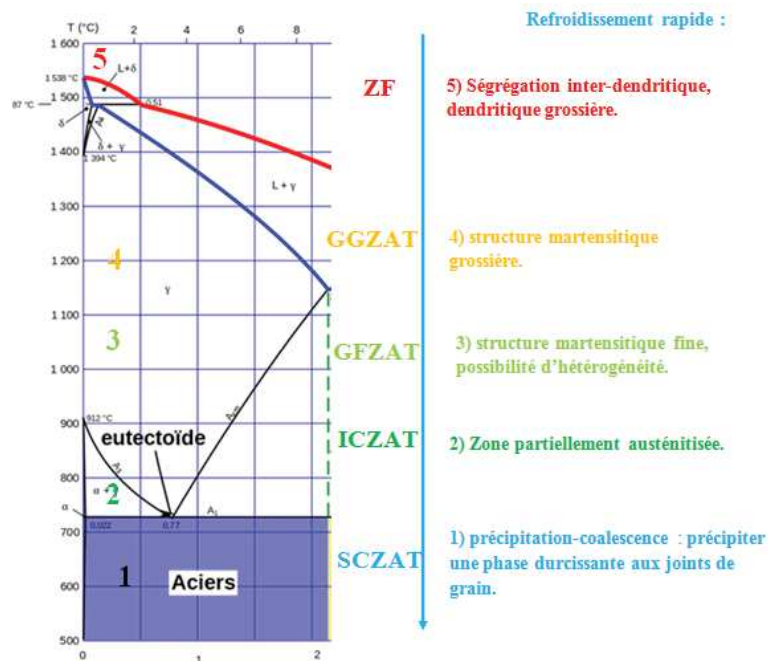


Figure I.10 Microstructures générées par l'opération de soudage [9].

I.5 Soudabilité

Il présente une excellente soudabilité par points, aussi bien pour des assemblages homogènes qu'hétérogènes, tant à 50 Hz qu'à 1000 Hz.

Les domaines de soudabilité sont larges et les tenues mécaniques des assemblages (traction, cisaillement) sont conformes aux exigences des constructeurs automobiles et aux normes.

Grace a la nature de la couche alliée obtenue après emboutissage a chaud, la durée de vie des électrodes de soudage est considérée comme très bonne (plusieurs milliers de points sans dégradation) par rapport aux revêtements métalliques conventionnels.

En raison d'une très haute résistance mécanique et d'une faible ductilité, on observe avec l'utilisation de paramètres de soudage standards des projections de soudure qui peuvent conduire à des défauts de type fissuration et une dégradation de la surface du point soudé.

Afin de limiter ces défauts, on préconise une intensité (Figure I.11) de soudage relativement basse avec un temps de soudage plus conséquent (Figure I.12) et enfin un effort

de serrage plus élevé (Figure I.13). On pourra également augmenter le diamètre de la face active de l'électrode de manière à réduire la densité de courant par rapport à la surface [9].

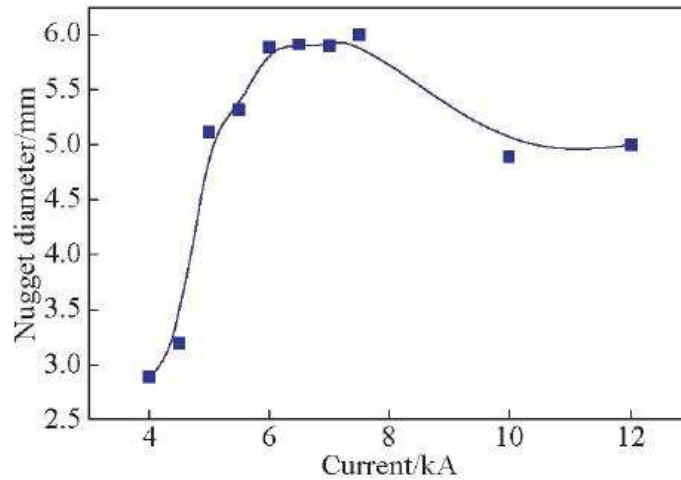


Figure I.11 : Effets du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé [9].

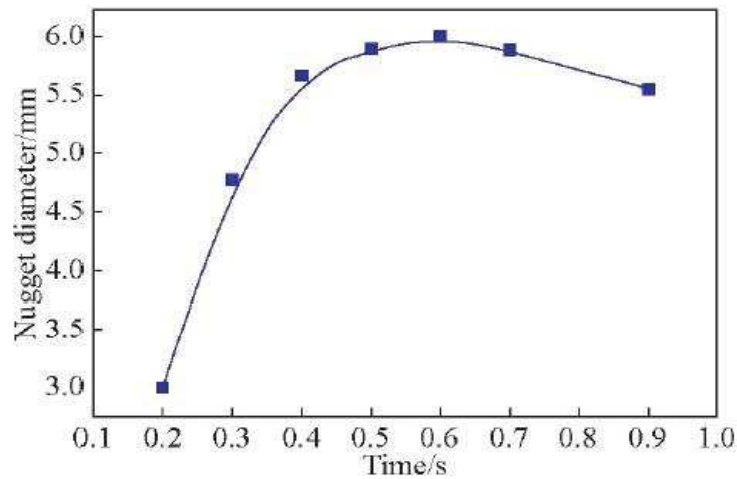


Figure I.12 Effets du temps de soudage sur le diamètre du noyau [9].

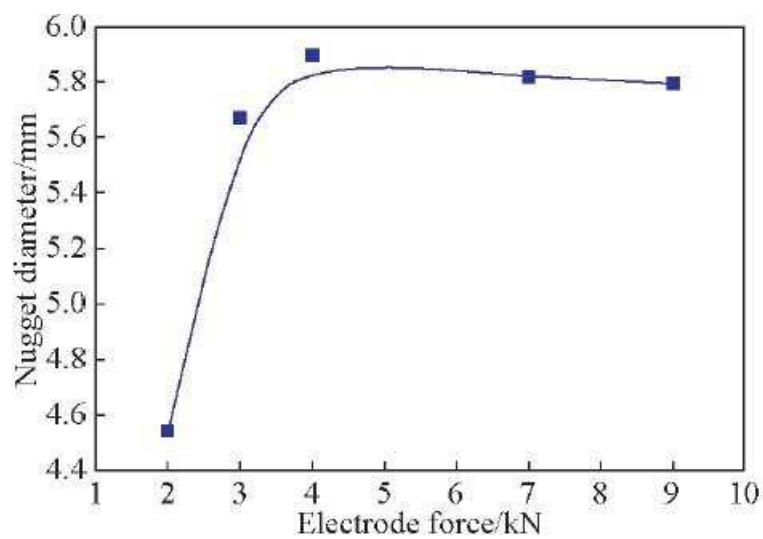


Figure I.13 Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé [9].

I. 6 Compatibilité de soudage des métaux usuels

Le soudage par point est capable de souder des métaux de matière différente ce qu'on appelle le soudage hétérogène (Tableau I.4) [9].

Tableau I.4 : la soudabilité des métaux usuel [9].

METAUX	ALU	INOX.	ZINC	GALVA.	ACIER	LAI- TON	UIVRE	LOMB	NICK- EL	FER BLANC	BRONZE PHOSP.
ALU	2	6	3	3	4	4	5	5	4	3	3
INOX	6	1	6	2	1	5	5	6	3	2	4
ZINC	3	6	3	3	6	5	5	3	6	3	4
GALVA.	3	2	3	2	2	4	5	4	3	2	4
ACIER	4	1	6	2	1	4	5	5	3	2	3
LAITON	4	5	5	4	4	3	4	6	3	4	3
CUIVRE	5	5	5	5	5	4	6	5	4	5	3
PLOMB	5	6	3	4	5	6	5	3	5	6	5
NICKEL	4	3	6	3	3	3	4	5	1	3	3
FER BLANC	3	2	3	2	2	4	5	6	3	3	4
BRONZE PHOSP.	3	4	4	4	3	3	3	5	3	4	2

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

I.7 Matériaux d'étude "Aciers doux "

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

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

Une opération de soudage par résistance (Tableau I.5), 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 α Fer γ Fer δ) [9].

Tableau I.5 : Les paramètres de soudage pour les aciers doux [9].

ep. (mm)	Ø Élect.	Ø Face active	Pas	Recouv.	Tps soudure (~)	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

I.8 Tôles galvanisées

C'est la forme la plus utilisée de tôle revêtue (Tableau I.6), dans l'industrie en général (plus de 1,6 million de tonnes/an pour la France).

Ce matériau est défini par le poids de zinc (déposé à chaud par trempage) à l'unité de surface, soit au mètre carré, et non par l'épaisseur de la couche déposée. C'est ce qui permet de différencier celui-ci de l'électro-zingué qui lui, se définit par l'épaisseur de Zn déposé (procédé électrolytique).

Pour fixer les idées, le plus régularisé des dépôts galvanisés, soit le SKIN PASSE en faible charge ($< 200\text{g/m}^2$) double face présente une couche de Zn, 4 fois plus forte en surface que l'électro-zingué de qualité courante [9].

Tableau I.6 : les caractéristiques de l'acier et du zinc [9].

Matière	Point de Fusion (°C)	Densité	Coefficient de dilatation	Conductivité thermique	Résistivité (p : $\mu\Omega/\text{cm}^2$)
Zn	418	7,14	$39,7 \times 10^{-6}$	0,27	$5,9 \mu\Omega$
Acier	1450	7,85	12×10^{-6}	0,11	$11 \mu\Omega$

I.9 Processus de l'usure des pointes d'électrodes

En surface, c'est-à-dire au contact des faces actives des pointes d'électrodes (Figure I.14), le point de fusion du zinc est dépassé de façon fugitive, mais indiscutable ($0^\circ\text{C} > 418^\circ\text{C}$). La pollution intervient alors de deux manières. Lors des premiers points (de 30 à 50), il subsiste une adhérence de zinc et d'oxyde de zinc sur la face active de l'électrode.

Cette couche initiale modifie bien sûr les conditions de « résistance » électrique. Très souvent, cette pollution entraîne des problèmes de « collages d'électrodes » sur les surfaces soudées.

Ces premiers points sont effectués avec des paramètres minimisés en intensité et des temps faiblement accrus. On les considère parfois comme des points de pré conditionnement de l'électrode avant ré ajustage des paramètres de départ d'une campagne.

On accroît donc ensuite, la tension du courant de soudage de manière à compenser l'accroissement de résistance. Ce faisant, la pollution ne va pas se limiter à un simple dépôt, mais le zinc va peu à peu s'allier au cuivre de l'électrode en profondeur. Il va donc se former un alliage cuivre/zinc à la pointe de l'électrode et cette solution d'alliage (laiton) va s'étendre en profondeur, entraînant une diminution de la dureté du métal d'électrode [9].

Sous l'effet des chocs d'accostages et des efforts de compression, la pointe d'électrode va « s'émousser » et le diamètre de sa face active va s'accroître, entraînant une chute de la densité du courant (A/mm^2), le diamètre du noyau fondu va décroître dans les mêmes proportions jusqu'à l'apparition des premiers points collés.

Ayant constaté qu'il suffit de maintenir une densité de courant constante, en fonction du diamètre de face active, on a tenté de palier à ce problème par l'utilisation de systèmes d'incrémentement automatique de l'intensité. Et une nouvelle architecture d'électrode en est issue.

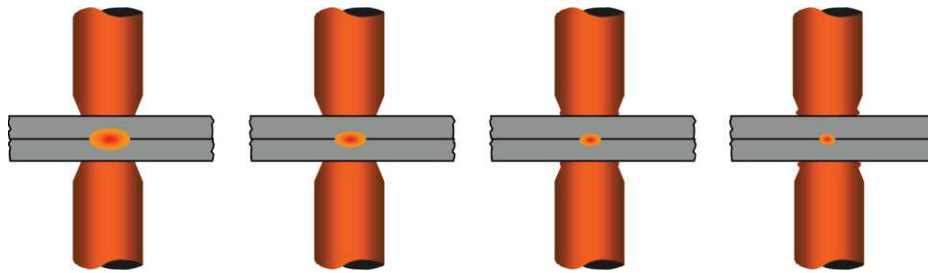


Figure I.14 : Evolution simultanée des diamètres des faces actives et noyaux fondus [9].

I.10 Préparation des surfaces de tôles

I.10.1 Dégraissage

La préparation des surfaces se fait :

- à froid, par application de solvants classiques,
- à chaud, également par les procédés à base de solvant habituels, toutefois une réserve sera faite en ce qui concerne certains solvants chlorés qui sont susceptibles, à chaud, exposés aux ultraviolets, d'entraîner la formation de phosgène toxique. [9]

I.10.2 Décapage

L'aluminium et ses alliages s'oxydent à l'air et se recouvrent d'une mince pellicule d'alumine (quelques microns). L'alumine étant réfractaire au passage du courant, doit être éliminée avant soudage, afin de maîtriser une fourchette de valeur constante des résistances de contact et, pour éviter par ailleurs, l'incorporation de cette alumine dans le noyau fondu, à l'interface des tôles à assembler. C'est pour cette raison que l'on procède à un décapage des tôles d'alliage léger avant soudage. Ce décapage sera mécanique ou mieux chimique [9].

I.10.2.1 Décapage mécanique

Le décapage mécanique s'effectue localement, en utilisant des abrasifs classiques, toiles ou papiers, il présente l'inconvénient majeur de laisser subsister des stries en relief, susceptibles de retenir des particules abrasives et d'alumine, même après soufflage.

I.10.2.2 Décapage chimique

Le Décapage chimique est préférable, il n'altère pas les surfaces et ses effets restent valables de 12 à 24 heures. Il s'effectue dans une succession de bains à chaud (soude caustique, acide nitrique, rinçage à l'eau). Aujourd'hui il est préférable d'utiliser les produits de synthèse spécialisés qu'offre l'industrie chimique, (le plus souvent à base d'acide phosphorique).

I.12 ELECTRODES

Le métal employé pour la fabrication des électrodes doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Une très bonne conductivité afin d'opposer la résistance au courant la plus faible possible
- Une bonne conductibilité thermique pour une dissipation rapide de la chaleur.

- Des propriétés mécaniques afin d'éviter la fissuration sous l'effet du martelage.

Il est nécessaire que le métal possède une dureté optimale à chaud, ce qui ne signifie pas dureté maximale que l'on pourrait lui conférer par écrouissage.

Le métal doit être suffisamment dur pour ne pas s'écraser sous l'effort de compression, et conserver cette dureté optimale en cours de service pour que l'électrode ne soit pas sujette à un adoucissement qui la rendrait rapidement inutilisable.

Parmi ces métaux, le plus intéressant par l'étendue de ses possibilités d'utilisation est le cuivre au chrome à faible teneur en zirconium (0,02 à 0,10% Zr). De par sa composition, cet alliage possède les qualités fondamentales précitées. En outre, ses propriétés mécaniques sont encore nettement renforcées du fait que son élaboration particulière lui confère une structure à cristaux orientés en longues fibres.

Par exemple, sa dureté à chaud et sa résistance à l'adoucissement sont sensiblement plus favorables que celles des alliages cuivre-zirconium courants, cuivre-chrome.

On utilise parfois aussi des formats de pointes d'électrode (Figure II.15) à face active sphérique. Cette pratique est particulièrement préconisée dans le soudage d'alliages légers ou pour le soudage des tôles d'acier de fortes épaisseurs [9].



Figure I.15 : Exemple des différents formats d'électrodes [9].

I.13 Etat de l'art sur les effets des paramètres de soudage

Effet du temps de maintien suivant l'épaisseur (Figure II.16) a été étudié par Huiru Shi et al, ils ont montré que l'augmentation de l'épaisseur de la tôle nécessite un temps de maintien en encore plus important pour donnée le temps au noyau de se formé car la taille de dernier augmente avec l'augmentation de l'épaisseur[5].

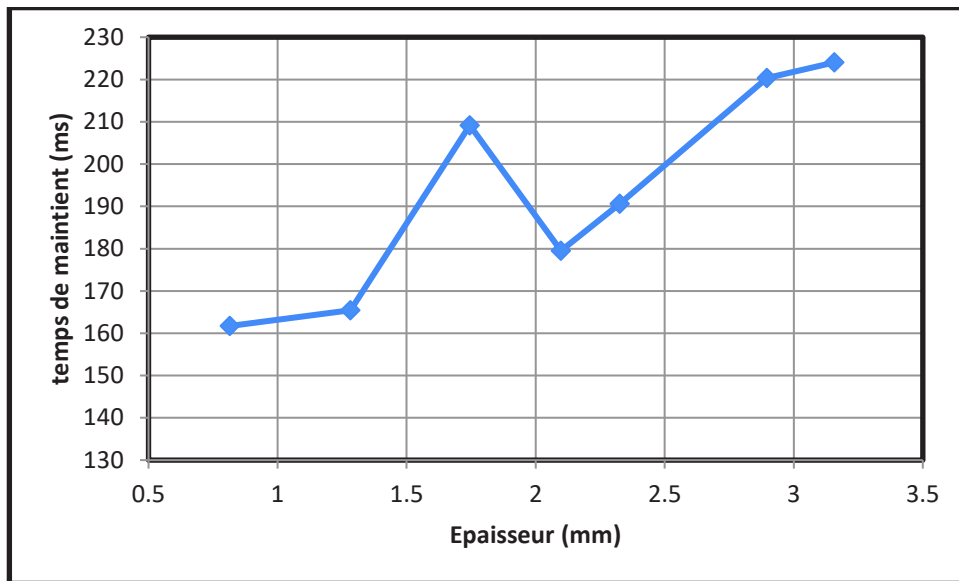


Figure II.16 : Effet du temps de maintien [5].

Effet de l'épaisseur de la tôle (Figure II.17) a été étudié par Huiru Shi et al, ils ont montré que l'augmentation de l'épaisseur de la tôle fait augmenter la charge maximale que peut l'éprouvette supportée [5].

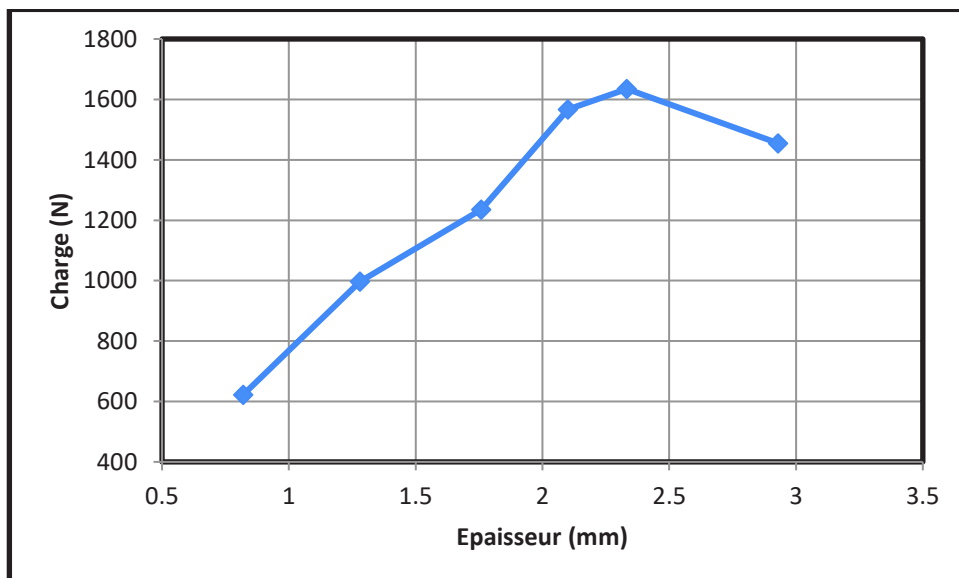


Figure II.17 : Effet de l'épaisseur de la tôle [5].

Effet l'épaisseur sur la limite élastique (Figure II.16) a été étudié par Huiru Shi et al, qui ont montré que l'augmentation de l'épaisseur de la tôle augmente la limite élastique cela est due la vitesse de dissipation de la chaleur [5].

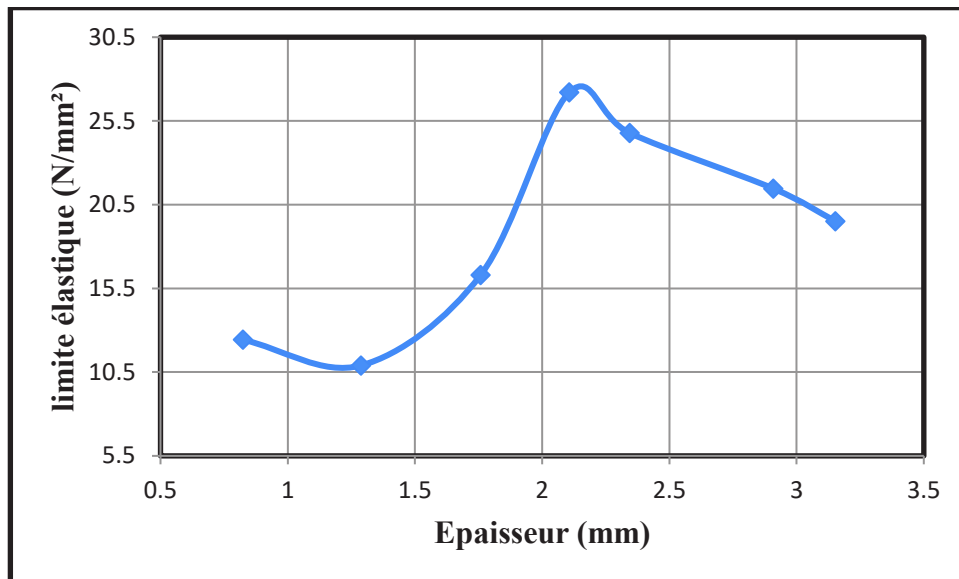


Figure II.18 : la variation limite élastique pour différents épaisseurs [5].

Effet de la géométrie sur le comportement mécanique des joints soudés (Figure II.19) a été étudié par L. Haner al, leur étude a montré que le soudage par recouvrement est le plus résistant que le Peel joint et le soudage en croix[4].

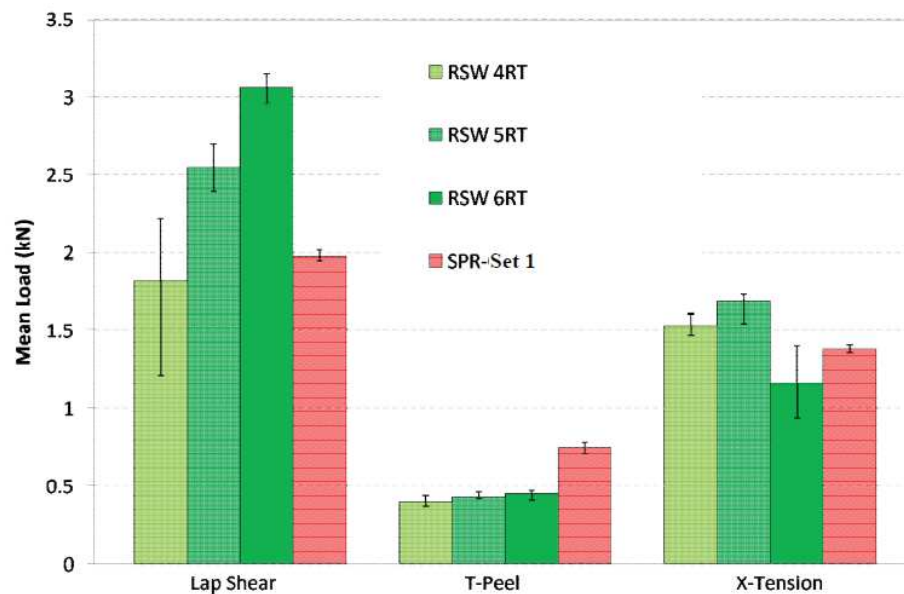


Figure II.19 : Effet de la géométrie sur le comportement mécanique [4].

Effet du temps de maintien et de l'intensité (Figure II.20) sur le comportement mécanique d'un Peel joint a été étudié par N. Akkas, il a conclu que l'augmentation du courant et du temps de maintien apporte une énergie de soudage encore plus importante à la zone de soudure et noyau ce qui sont extension, alors la résistance à la traction noyau augmente [10].

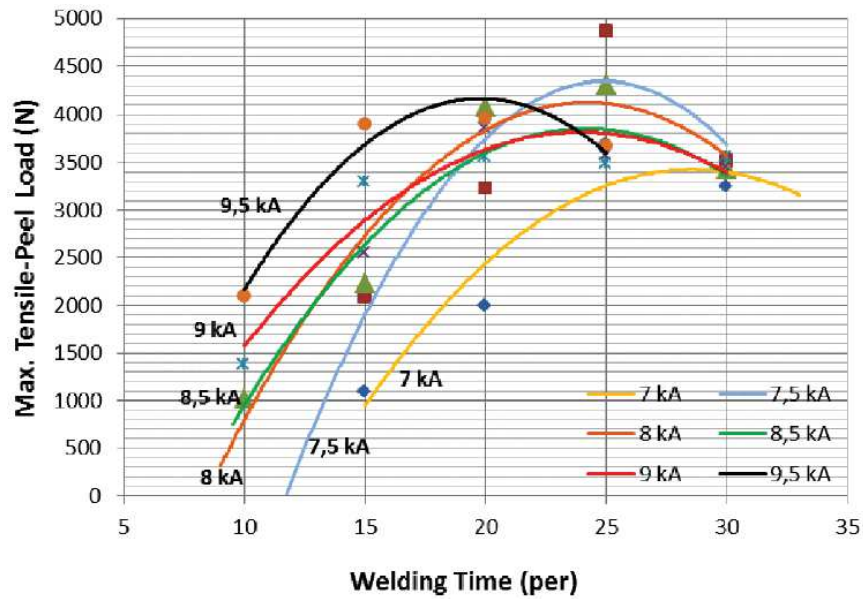


Figure II.20 : Effet du temps de soudage sur la résistance à la traction [10].

Lorsque la qualité de surface est plus importante que résistance, courant de soudage de 7 kA pour un temps de maintien 30 cycles ou 8 kA de courant de soudage pendant 20 cycle sont assez (Figure II.21). La profondeur de pénétration de l'électrode dans le matériau n'a pas dépassé la limite de 30% d'épaisseur de feuille, ce qui est accepté pour une bonne qualité de surface.

L'augmentation du courant et du temps de soudage provoque une chaleur intense au niveau de la zone de soudure et du noyau de soudure qui les mettent en extensions, ce qui causera ainsi une meilleure résistance à la traction [10].

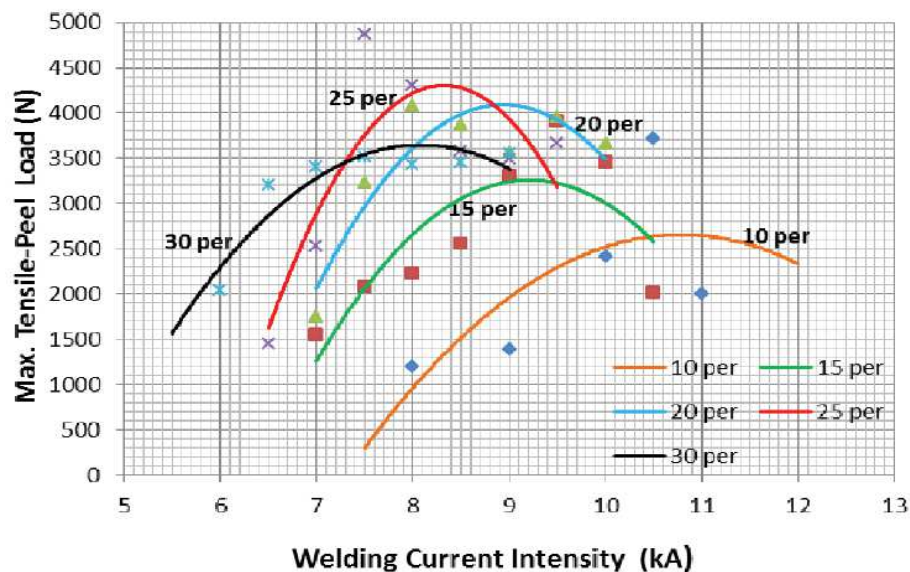


Figure II.21 : Effet de l'intensité de soudage sur la résistance à la traction [10].

Chapitre II
Etude
expérimentale

1. Introduction

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux. La loi de comportement établit une relation entre les contraintes et les déformations. Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée ;
- comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.

II.2 Principe de l'essai

Cet essai destructif, pratiqué à température ambiante 20°C, consiste à imposer une déformation croissante à vitesse constante et à mesurer l'effort nécessaire pour imposer cette déformation [11].

La vitesse de l'essai est limitée et dépend du matériau :

- Acier $V_{MAX} \leq 0,15.L_0$ (mm/mn) ou ≤ 30 N/mm²/sec
- Aluminium $V_{MAX} \leq 0,009.L_0$ (mm/mn) ou ≤ 10 N/mm²/sec
- Cuivre $V_{MAX} \leq 0,006.L_0$ (mm/mn) ou ≤ 10 N/mm²/sec

II.3 Exploitations de l'essai

II.3.a Définitions

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

La limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction) [11]:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

La charge maximale ; elle est appelée **résistance à la traction** ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou A pour cent de l'éprouvette est l'allongement de rupture

$$A\% = 100 \times \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

Cet allongement est la somme de l'allongement réparti A_r jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction A_z :

$$A = A_r + A_z$$

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture . Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \times \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

II.3.b Constantes d'élasticité

II.3.b.1 Définitions

Dans la première portion de la courbe (Figure II.1), il y a proportionnalité entre charge unitaire et déformation, au moins en première approximation : c'est la loi de Hooke.

La caractéristique d'élasticité est la pente de cette droite qui est le module d'élasticité E (Coefficient d'élasticité longitudinal ou module d'Young) ; il exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette [11].

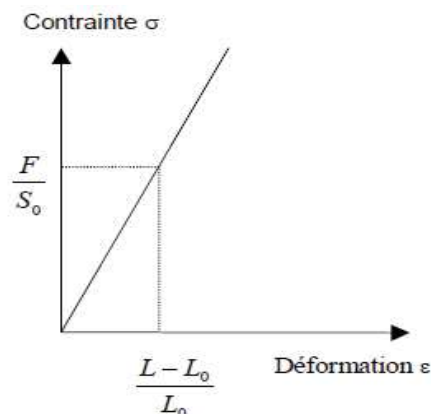


Figure II.1 : Module d'Young [10].

Bien que l'essai de traction permette difficilement de les mesurer, il est intéressant de rappeler les définitions des constantes élastiques et leurs relations.

Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par $\tan\theta$.

$$E = \frac{F \times L_0}{S_0 \times \Delta L}$$

Remarque : L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité, car même si l'on amplifie suffisamment, et les techniques électroniques le permettent, de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

ν le coefficient de Poisson,

G le module d'élasticité transversal ou de cisaillement.

Le coefficient de Poisson exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale. Pour les Aciers on a environ : $\nu = 0,3$.

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

Ces trois grandeurs sont liées par la relation suivante

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Quelques valeurs usuelles de E :

Tungstène -----	420 000 MPa
Aciers -----	200 000 à 220 000 MPa
Aciers inox -----	198 000 MPa
Fontes graphite sphéroïdal -----	160 000 à 190 000 MPa
Cuivre -----	126 000 MPa
Fontes graphite lamellaire -----	120 000 MPa
Laitons -----	105 000 MPa
Alliages d'aluminium -----	70 000 à 75 000 MPa
Plomb -----	17 000 MPa

II.3.c. Le Processus thermomécanique

L'acier possède une structure granulaire. Elle influence le comportement mécanique des aciers à deux niveaux :

- A l'échelle microscopique, par les irrégularités d'alignement (les dislocations) et les éléments d'alliage en insertion ou en substitution que comporte chaque grain, qui est lui-même un mono-cristal de fer.
- A une échelle plus macroscopique, par la forme des grains (allongés ou bien massifs) ainsi que par leur taille. Pour une composition chimique donnée, ces

caractéristiques de l'acier sont en relation avec les cycles thermo-mécaniques subis tout au long de la filière de fabrication :

- la solidification sous forme de brame,
- le laminage à chaud
- le laminage à froid
- le recuit.
- Le skin-pass.

Les températures de laminage, les vitesses de refroidissement, les températures de bobinage (pour les feuilles), les taux de réduction d'épaisseur au laminoir à froid, les cycles de recuit, les taux de skin-pass sont autant de paramètres permettant d'ajuster la structure cristalline et granulaire de l'acier et donc les propriétés finales du produit .

II.4 Courbe rationnelle de traction

II.4.1 Contrainte vraie

Comme le montre la définition, la charge de rupture est une grandeur conventionnelle puisque l'on rapporte la charge maximale à la section initiale.

La contrainte vraie correspond à la charge rapportée à la section instantanée, soit [11]:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

F charge appliquée, S section instantanée.

II.4.2 Déformation rationnelle

L'allongement ordinaire n'est pas additif, ce qui est gênant pour les calculs de plasticité ; on le remplace par la déformation rationnelle [10].

$$\varepsilon^* = \ln \frac{L}{L_0}$$

La déformation rationnelle s'introduit de la façon suivante.

Soit L la longueur entre repères de l'éprouvette à un instant donné si on l'allonge d'une

quantité ΔL , l'allongement relatif sera $\frac{\Delta L}{L}$ et, depuis le début de l'essai, l'allongement relatif

total sera égal à :

$$\varepsilon^* = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L}$$

II.5 Matériaux d'étude :

II.5.1 Caractéristiques chimiques et physiques

Les aciers pour formage à froid et emboutissage sont des aciers doux non alliés (Tableau II.1) 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) (Tableau II.2).

Les qualités proposées sont conformes à la norme EN 10130-2007 [12].

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.

Tableau II.1 : Composition Chimique de l'acier [12].

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

Tableau II.2 : Caractéristique mécanique de l'acier [12].

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

II.6 Etapes de la réalisation des éprouvettes

La réalisation des éprouvettes normalisées et en Peel joint c'est déroulé suivant différentes étapes et avec différentes machines.

II.6.1 Eprouvettes

L'éprouvette est tenue en deux points (par une pince ou un crochet), reliés à des filins.

L'éprouvette est alors étirée à vitesse constante, et on relève la force de traction nécessaire en fonction de l'allongement. Ces essais permettent de tracer une courbe dite de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :

- la déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire, connaissant les dimensions de l'éprouvette, le module d'Young ;
- la limite d'élasticité conventionnelle souvent notée R_e , ou bien la limite d'élasticité à 0,2 %, $R_{e0,2}$;
- la déformation plastique ;
- la résistance à la traction ou *tension de rupture* souvent notée R_m , qui est la contrainte maximale atteinte en cours d'essais. Voir Résistance à la rupture ;
- l'allongement à la rupture noté A et exprimé en % qui correspond à la déformation de la zone utile atteinte lors de la rupture ;

- la striction à la rupture notée Z et exprimée en % qui correspond à la réduction de section de la zone de localisation de la déformation (striction) lors de la rupture.

Les dimensions de l'éprouvette de traction normalisées utilisé (Figure II.2) :

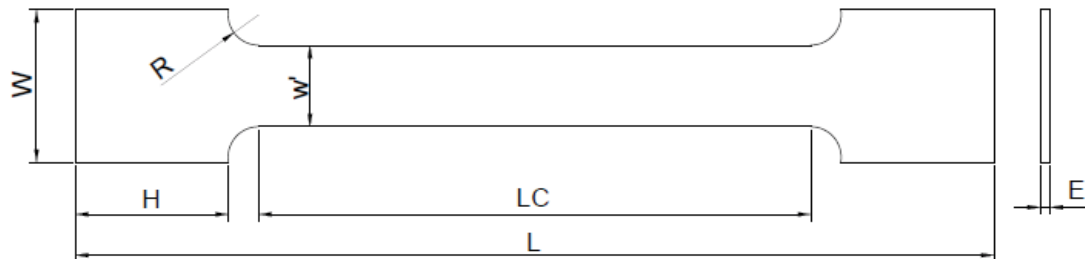


Figure II.2 : Dimension des éprouvettes de tractions.

Avec :

$W=30$ mm (largeur des têtes)

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

$L=180$ mm (longueur total)

$Lc=108$ mm (longueur calibrée)

$E=2$ mm (épaisseur de l'éprouvette)

$H=30$ mm (longueur des têtes)

$R=6$ mm (rayon)

Les dimensions de l'éprouvette soudée par recouvrement (Figure II.3)

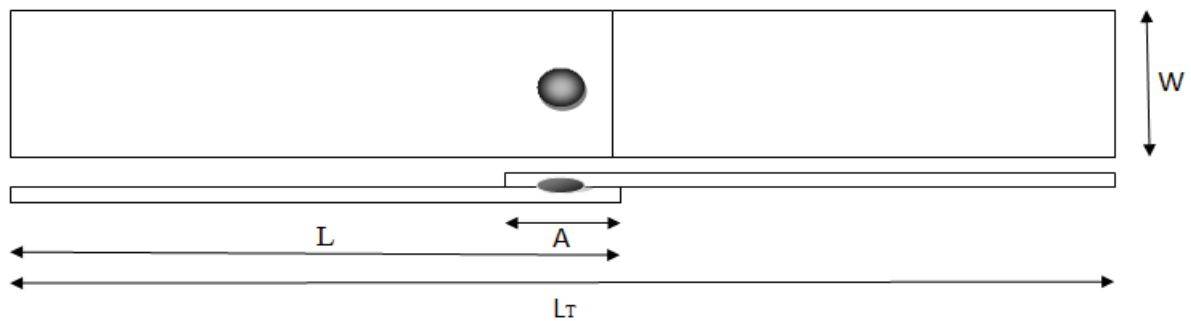


Figure II.3 : Dimension des éprouvettes soudées.

Avec :

$L=105$ mm

$L_T=180$ mm

$W=30$ mm

$A=30$ mm

Les dimensions de l'éprouvette soudée en Peel Joint (Figure II.4)

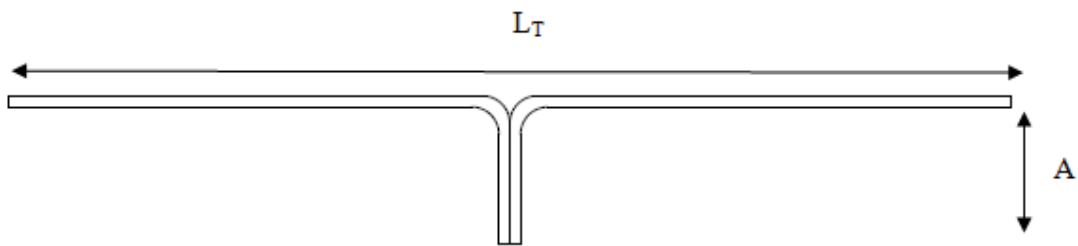


Figure II.4 : Dimension des éprouvettes soudées.

Avec :

$L_T = 180 \text{ mm}$

$A = 30 \text{ mm}$

II.6.2 Machines utilisées

II.6.2.1 Poinçonneuse (AMADA)

Une poinçonneuse (Figure II.5) est un outil ou une machine-outil destiné à réaliser un poinçonnage dans diverses matières par l'intermédiaire d'un poinçon.

La poinçonneuse permet le marquage, le découpage ou la perforation d'un objet.



Figure II.5 : Poinçonneuse (AMADA).

A. Opération de découpage

Les tôles ont été découpées avec la poinçonneuse AMADA pour leur donner la forme voulue (Figure II.6 et figure II.7)

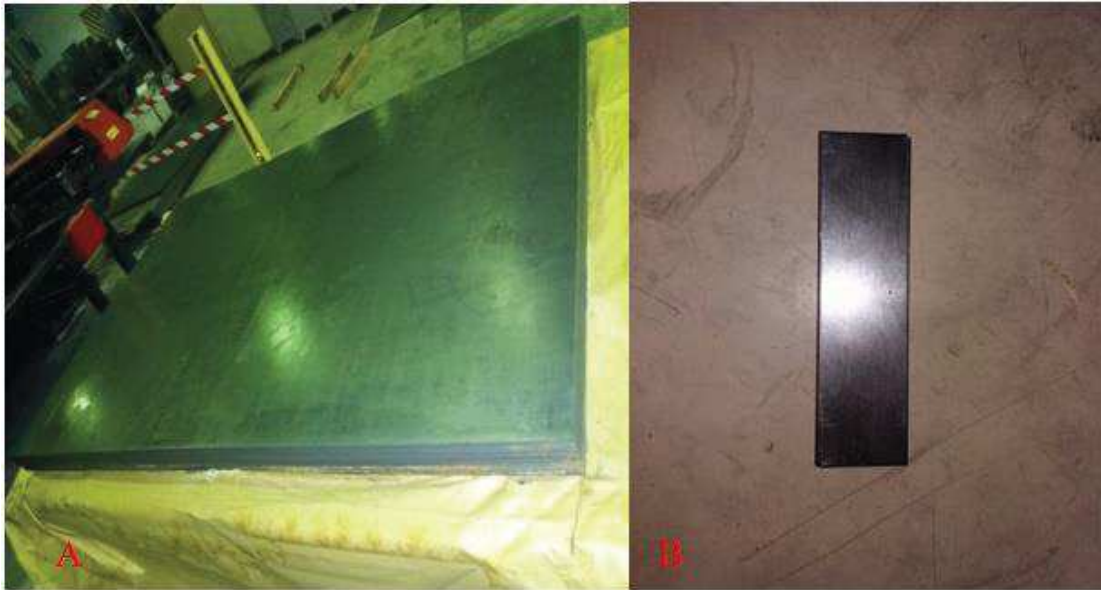


Figure II.6 : (A) tôle avant découpage (B) après le découpage.



Figure II.7 : Eprouvettes normalisées réalisées.

II.6.2.2 Plieuse (AMADA)

Une presse plieuse (Figure II.8) est une machine-outil utilisée en chaudronnerie et en métallerie pour plier la tôle ; elle est constituée d'un poinçon(contre-vé) et d'une matrice en forme de V (vé), de U, ou de tout autres forme en fonction du profil recherché ; la tôle est entre le vé et le contre-vé (on parle de pénétration lorsque la tôle rencontre le poinçon) ; le contre-vé descend formant alors le pli.



Figure II.8 : Presse plieuse (AMADA).

A. Opération de pliage

Les pièces découpées sont après pliées (Figure II.9) avec la plieuse AMADA.

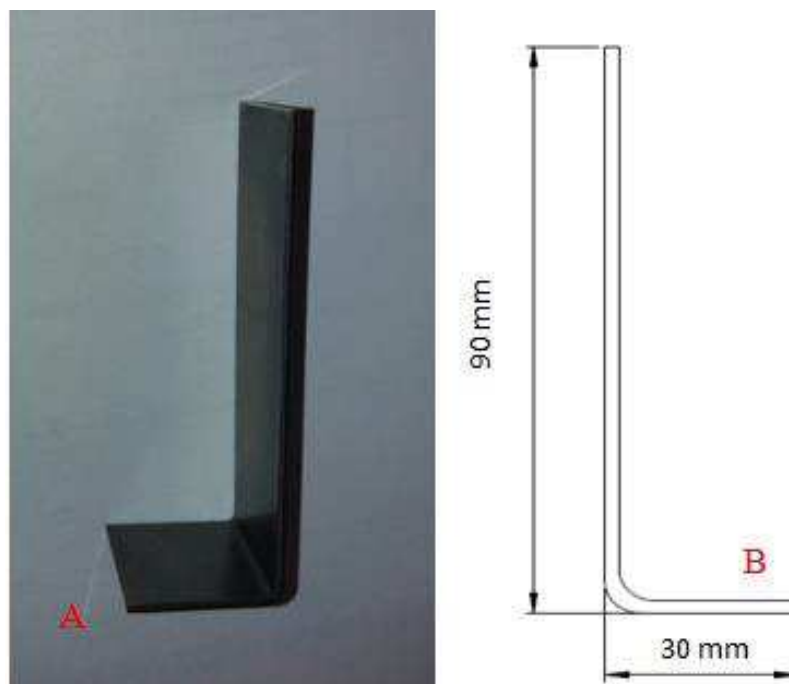


Figure II.9 : (A) Pièce après pliage (B) dessin de définition.

II.6.2.3 Machine de soudage (TECNA)

La machine de soudage par résistance (TECNA) un moyen d'assemblage indémontable de tôles associée à un tableau de commande pour le réglage de différent paramètre (Figure.10)



Figure II.10: (A) Machine de soudage (B) tableau de commande

A. Opération de soudage

A.1 Réglage des Paramètres de soudures

Trois paramètres principaux doivent être pris en compte pour une épaisseur de tôle (Tableau II.3 Jusqu'au tableau II.6) ($e=2$ et $e=1$ mm):

- l'intensité du courant (en Ampères)
- le temps de soudage (en périodes ou millisecondes)
- l'effort sur électrodes (en Bar)

Tableau II.3 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°1 jusqu'à 5.

N°	I (KA)	T (Cycle)	F (Bar)
1	8	18	6
2	10	18	6
3	12	18	6
4	14	18	6
5	16	18	6

Tableau II.4 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°6 jusqu'à 10.

N°	I (KA)	T (Cycle)	F (Bar)
6	8	18	7
7	10	18	7
8	12	18	7
9	14	18	7
10	16	18	7

Tableau II.5 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°11 jusqu'à 15.

N°	I (KA)	T (Cycle)	F (Bar)
11	8	25	6
12	10	25	6
13	12	25	6
14	14	25	6
15	16	25	6

Tableau II.6 Paramètre de soudage pour les éprouvettes N°16 jusqu'à 20.

N°	I (KA)	T (Cycle)	F (Bar)
16	8	25	7
17	10	25	7
18	12	25	7
19	14	25	7
20	16	25	7

A.2 Opération de soudage

Les pièces pliées sont soudées avec le soudage par point (Figure II.10).



Figure II.11 Opération de soudage.

II.6.2.4 Essai de traction

L'application d'une charge de traction jusqu'à la rupture (Figure II.12).



Figure II.12 : Opération de traction.

II.7 Description de l'essai

A. Machine

Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données (Figure II.13).

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de ce matériau, des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction 600 KN



Figure II.13 : Machine de traction avec le système d'acquisition de données.

B. Essai Caractérisation mécanique

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge croissant jusqu'à provoquer la rupture (Figure II.16). On détermine ainsi une limite élastique, et une charge de rupture,

Ces charges sont rapportées à la section initiale de l'éprouvette, on mesure aussi l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, et la striction, qui est le rapport entre la section de l'éprouvette au niveau de la rupture et sa section initiale

La limite élastique et la charge de rupture expriment la ténacité de l'acier, tandis que l'allongement et la striction sont des mesures de la ductilité.

Les essais de traction menés (trois essais) ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements montrés sur la figure II.14 Les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure II.15

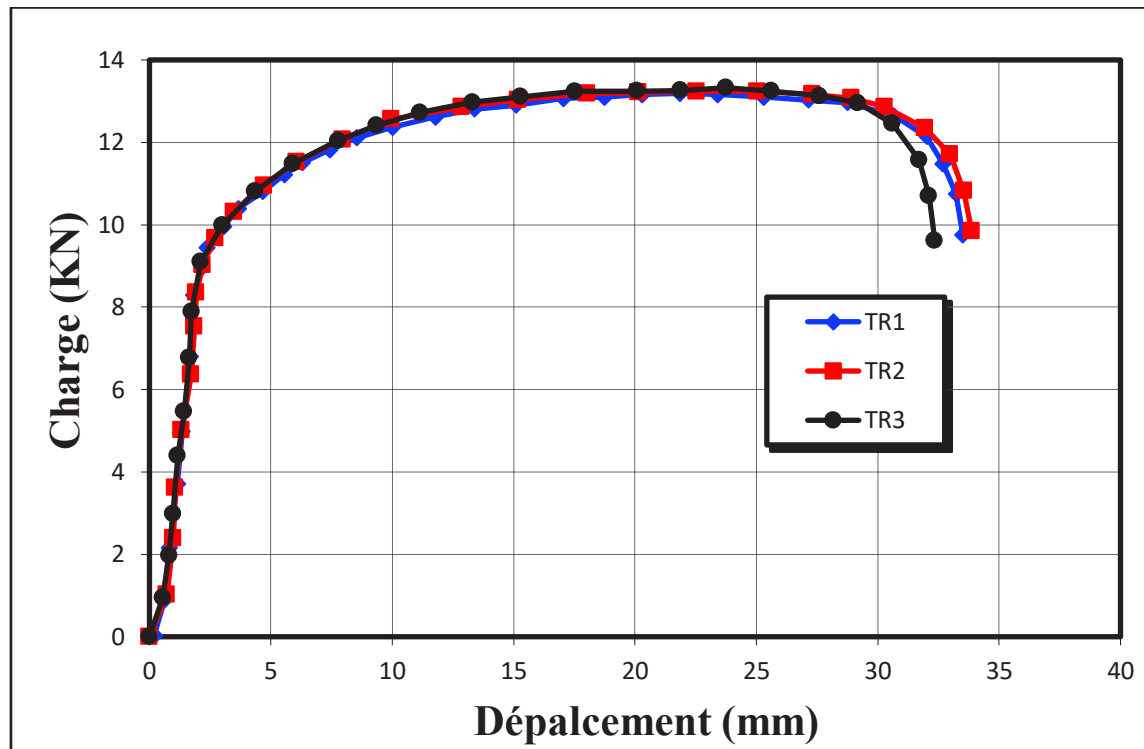


Figure II.14 : Courbe De Traction Charge / Déplacement.

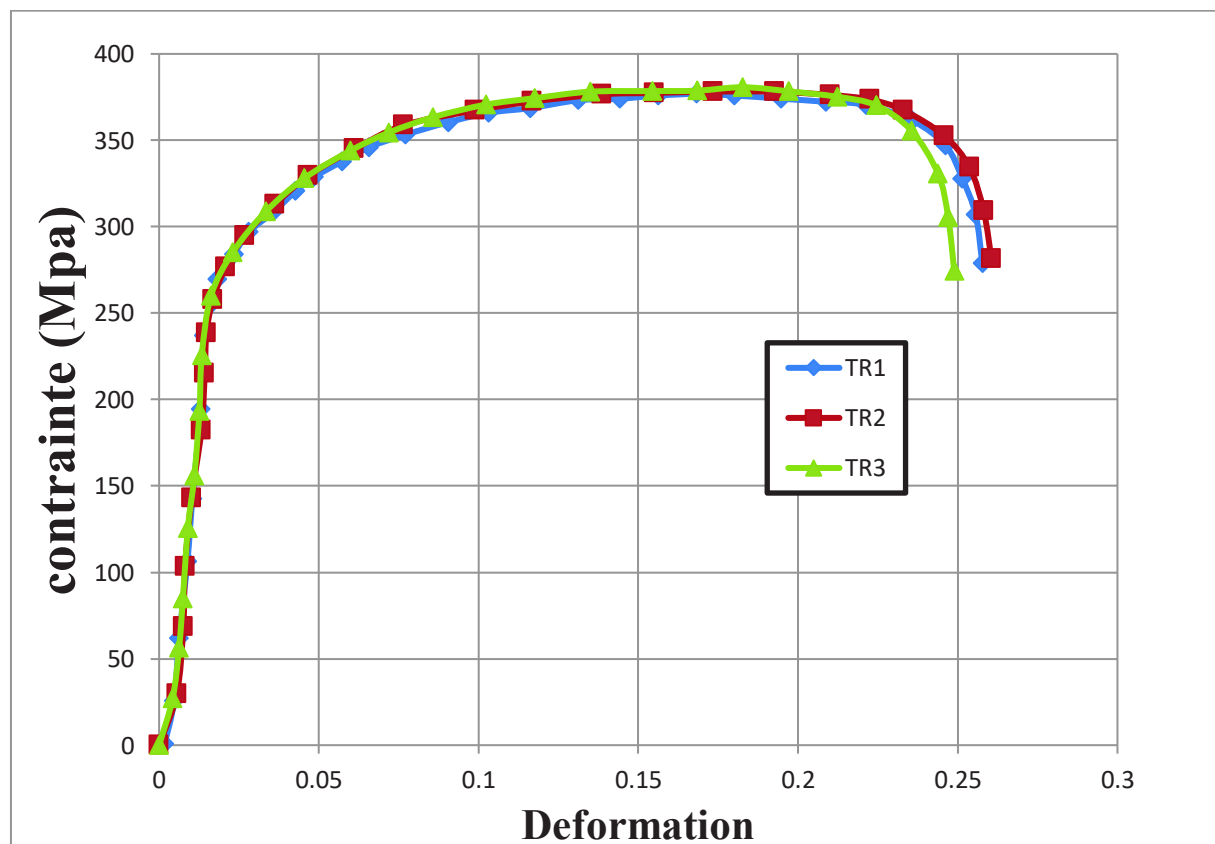


Figure II.15 : Courbes Conventiennelles Contraintes / Déformations.

C. Résultat de l'essai

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes (Tableau II.7) :

- ✚ 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 , σ_e , σ_y ou f_y (yield stress), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- ✚ La résistance à la traction R_m , σ_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 ν , 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.7 : caractéristique mécanique.

	E (MPa)	R_m (MPa)	R_e(MPa)	A%
Données fournisseur	210	270-410	≤280	28
Résultats Expérimentaux	200	377,804	253	23.077



Figure II.16 : Eprouvette normalisée après rupture.

Chapitre III
Résultats et
discussion

III.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).

III.1.1 Mode de rupture

l'American Welding Society (AWS) a recensé un total de 8 modes de rupture différents (Figure III.1), dont le déboutonnage total et la rupture interfaciale totale sont les deux cas extrêmes,

- (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 [9] .



Figure III.1 : Différents modes de ruptures recensés par l'AWS [9]

III.2 Effet de l'intensité du courant sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes (Figure III.3, 5, 7, 9, 10 et 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 et 7 Bars à $T=18$ et $T=25$ cycle et pour $I=8, 10, 12, 14$ et 16 KA.

L'intensité du soudage influe sur le comportement mécanique d'un point de soudure, car d'après les résultats de traction nous avons pu déduire que la charge maximale que peut supporter un point augmente avec l'augmentation de l'intensité.

III.2.1 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 2mm

Les essais de traction nous ont permis de distinguer différents modes de rupture pour les éprouvettes N°1, jusqu'à 10 (figure III.2 et .4).

- Le mode 8 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec $I=8$ KA qui s'est rompue à une très faible résistance à la rupture $R_m=6.734$ N/mm² et cela est due à la faible intensité de soudage et l'absence du noyau fondu.
- Le mode 1 a été remarqué pour les éprouvettes soudées avec $I=10, 12, 14$ et 16 KA, la résistance maximale à la rupture atteinte est $R_m=28.773$ N/mm² pour $I=16$ KA car nous avons un noyau fondu plus large de une meilleure résistance.

Ces résultats ont été remarqués pour un temps de maintien de 18 Cycle.

Les essais de traction avec un temps de maintien de $T=25$ cycle ont montré de meilleurs résultats pour les éprouvettes N°11, jusqu'à 20 (figure III.6 et .8).

- Le mode 7 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec $I=8$ KA qui s'est rompue à une meilleure résistance à la rupture $R_m=9.489$ N/mm² contrairement à celle soudée avec un temps de maintien $T=18$ cycle.

- Le mode 1 a été remarqué pour les éprouvettes soudées avec $I=10, 12, 14$ et 16 KA, la résistance maximale à la rupture atteinte est $R_m=41.935$ N/mm² pour $I=14$ KA car le temps de maintien $T=25$ cycle et la charge $F=7$ Bars a permis la formation d'un noyau plus résistant.



Figure III.2 Les éprouvettes ($e=2$ mm) rompues après l'essai de traction pour $T=18$ Cycle et $F=6$ Bars

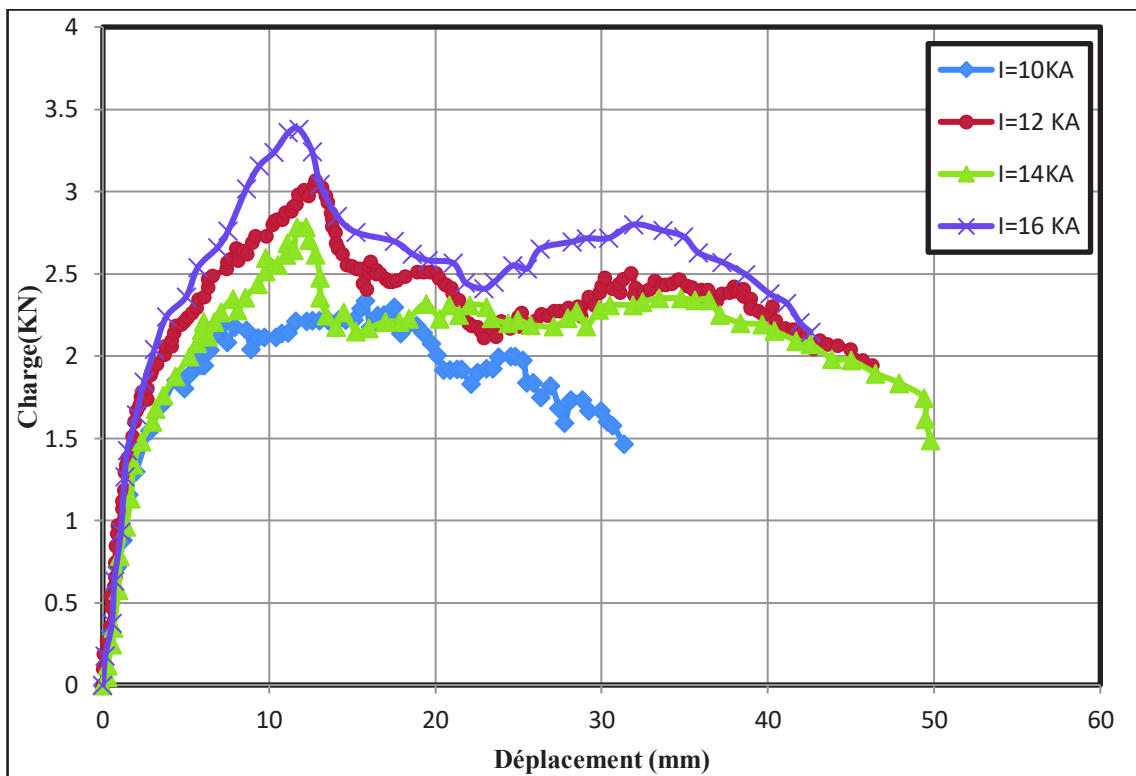


Figure III.3: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles.



Figure III.4 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l’essai de traction pour T=18 Cycle et F=7 Bars

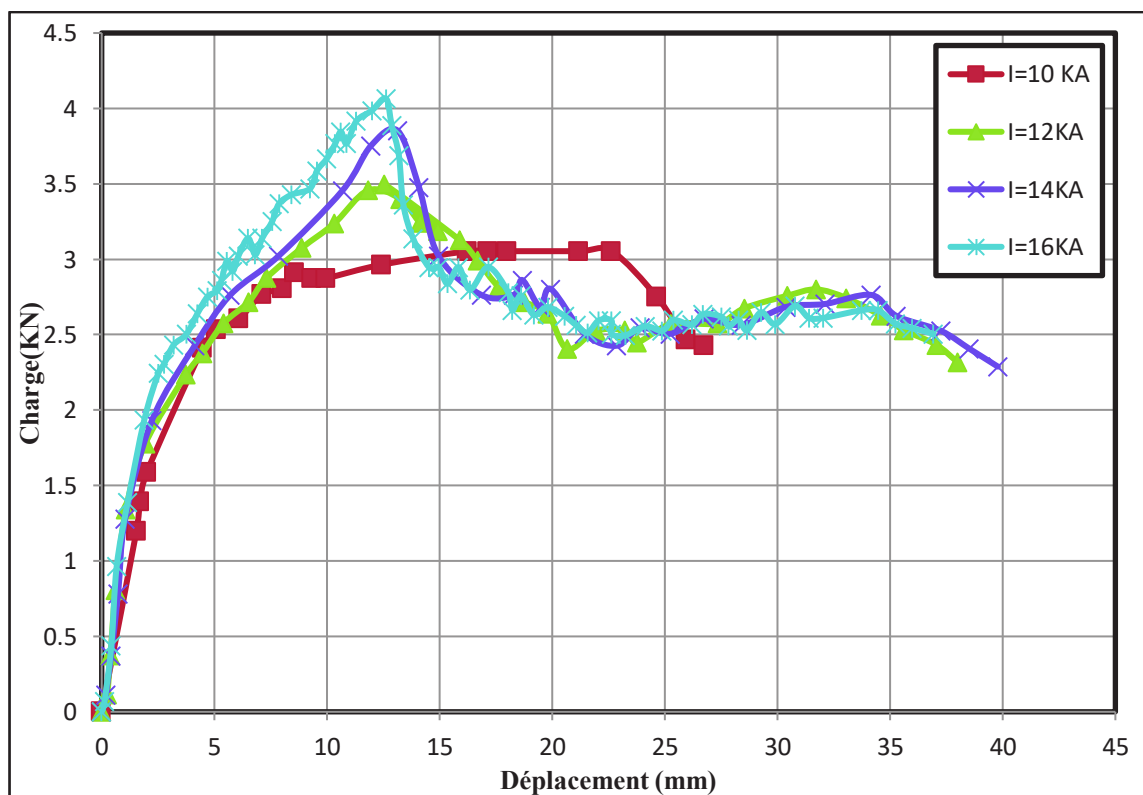


Figure III.5: Effet de l’intensité de soudage sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 7 Bars et un temps de 18 cycles.



Figure III.6 Les éprouvettes (e=2mm) rompues après l'essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bars

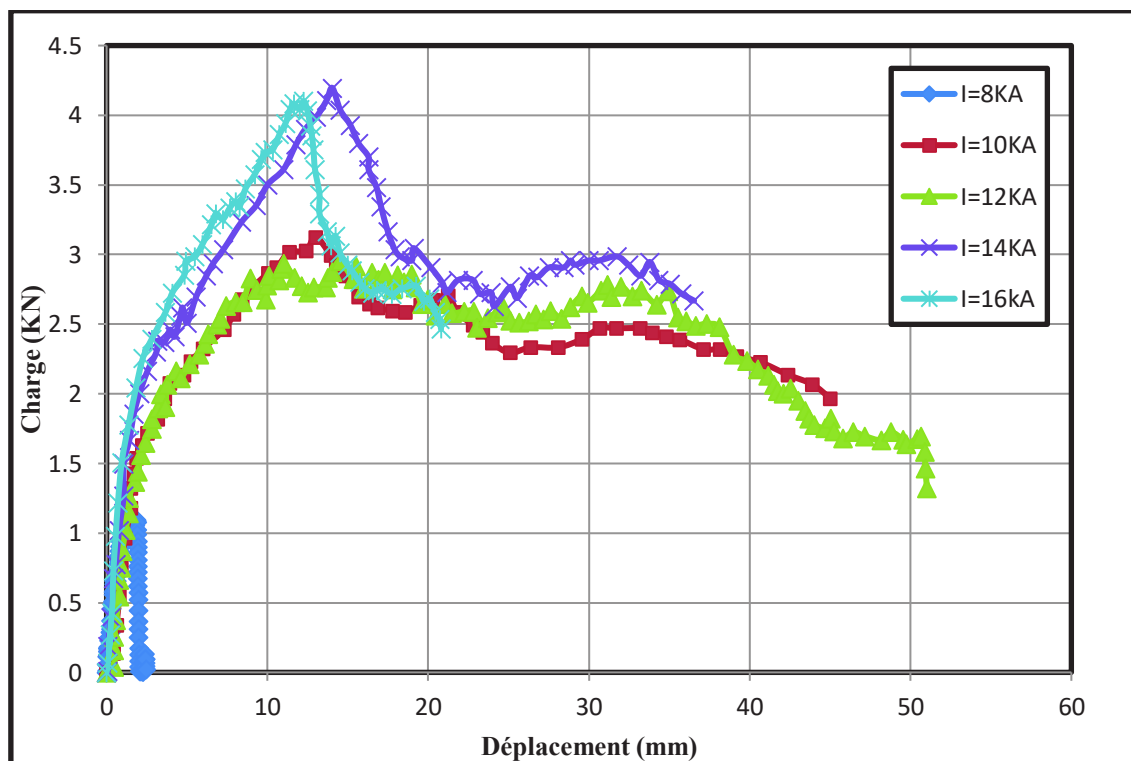


Figure III.7: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 25 cycles.



Figure III.8 Les éprouvettes ($e=2\text{mm}$) rompues après l'essai de traction pour $T=25$ Cycle et $F=7\text{Bars}$

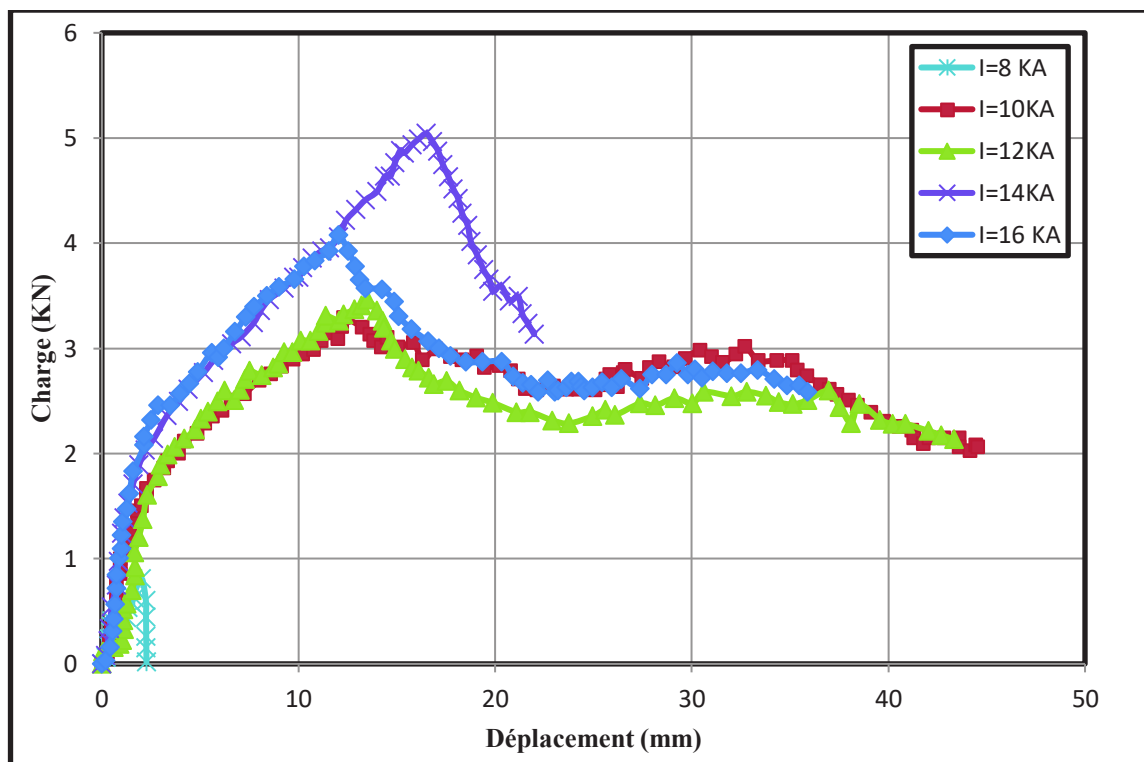


Figure III.9 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bars et un temps de 25 cycles.

III.2.2 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 1 mm

Les essais de traction nous ont permis de distinguer différents modes de rupture pour les éprouvettes N°1, jusqu'à 20 (figure III.11 et 13).

- Le mode 8 a été remarqué pour l'éprouvette soudée avec $I=8$ KA qui c'est rompue à une très faible résistance à la rupture $R_m=1.224$ N/mm² et cela est due à la faible intensité de soudage et l'absence du noyau fondu.
- Le mode 1 a été remarqué pour les éprouvettes soudées avec $I=10$ la résistance maximale à la rupture atteinte est $R_m= 14.692$ N/mm².
- Le mode 5 a été remarqué pour les éprouvettes soudées avec $I=12, 14$ et 16 KA, la résistance maximale à la rupture atteinte est $R_m= 17.753$ N/mm² pour $I=12$ KA car la chaleur dégagé pour $I=14, 16$ KA et très importante et la vitesse de dissipation de la chaleur est plus importante à cause de la faible épaisseur par rapport aux éprouvettes de $e=2$ mm.

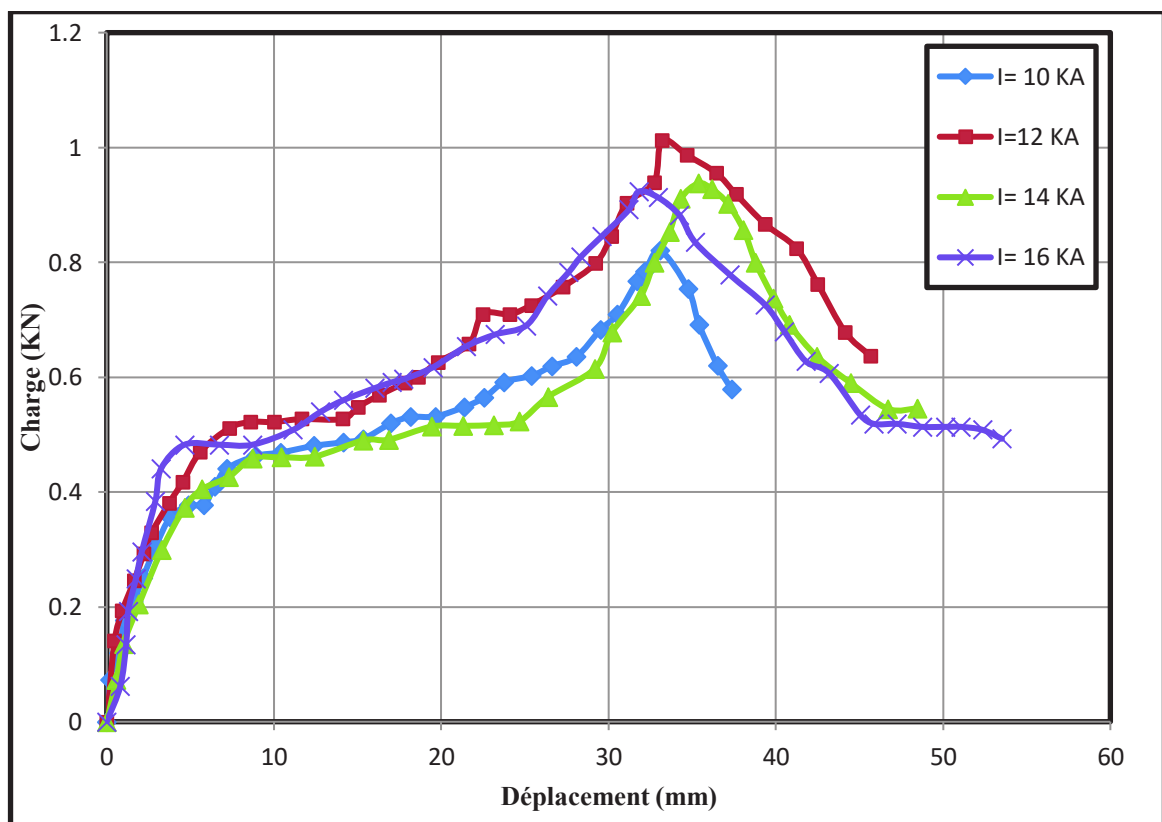


Figure III.10 Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 18 cycles.



Figure III.11 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l’essai de traction pour T=18 Cycle et F=6 Bars

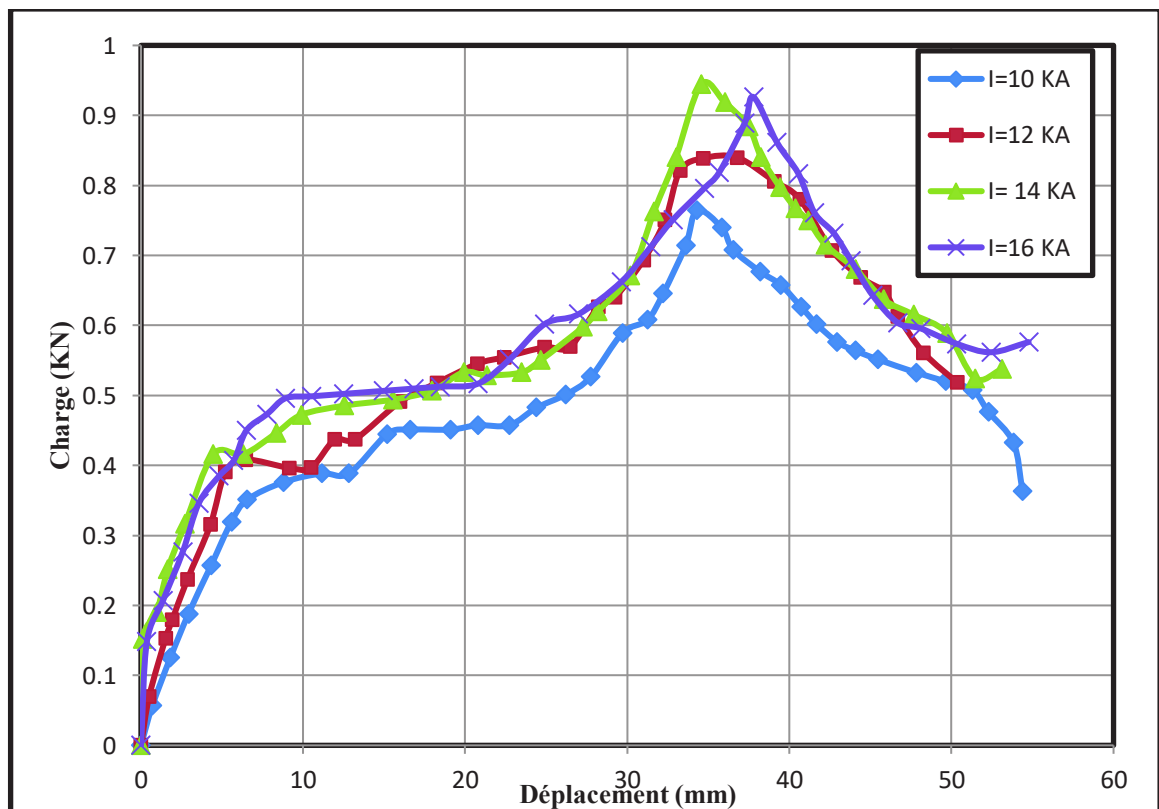


Figure III.12 : Effet de l’intensité de soudage sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 7 Bars et un temps de 18 cycles.



Figure III.13 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l’essai de traction pour T=18 Cycle et F=7 Bars

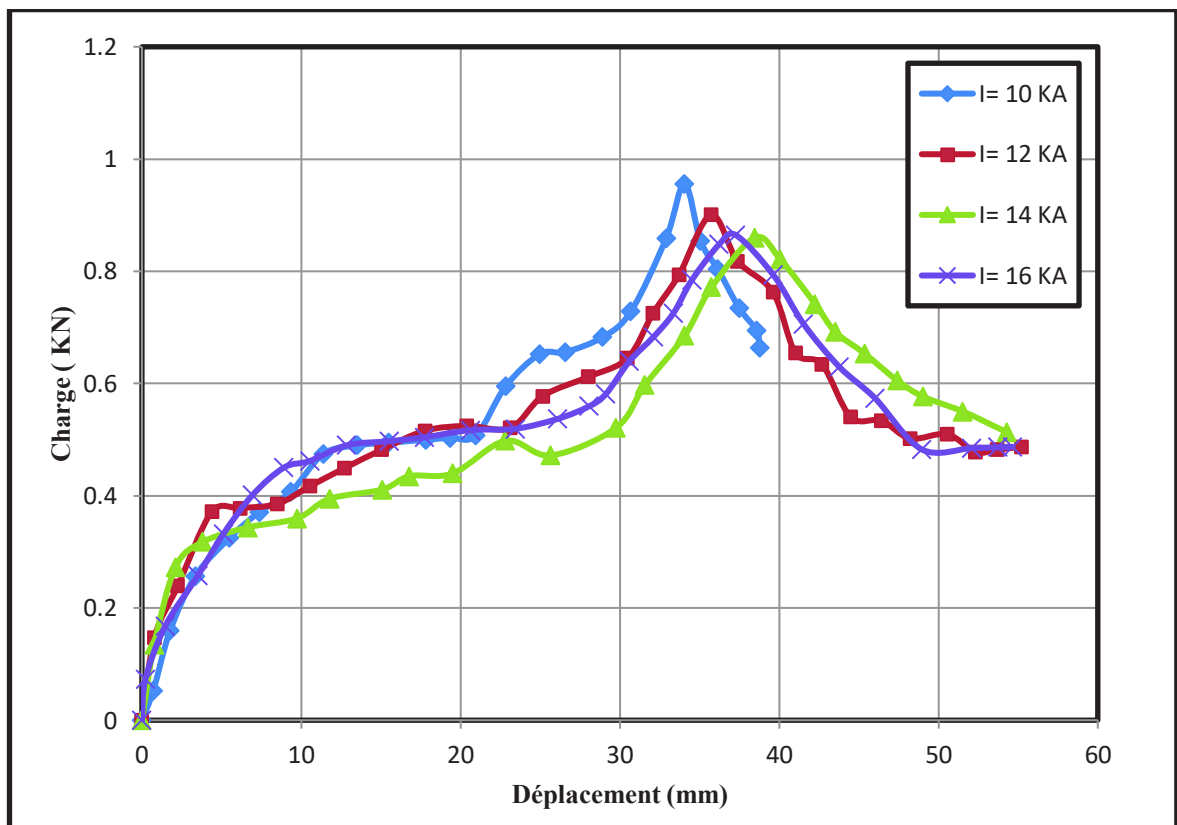


Figure III.14 : Effet de l’intensité de soudage sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et un temps de 25 cycles.



Figure III.15 Les éprouvettes (e=1mm) rompues après l’essai de traction pour T=25 Cycle et F=6 Bars

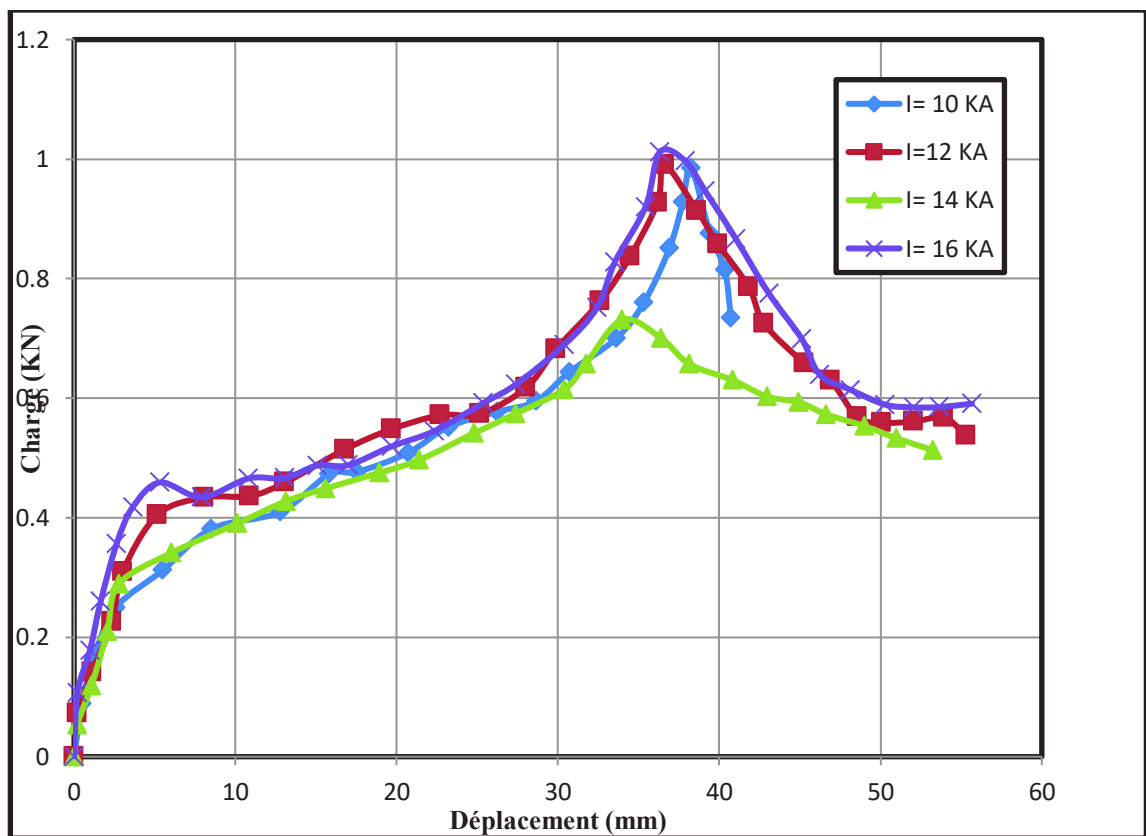


Figure III.16 : Effet de l’intensité de soudage sur le comportement mécanique de l’assemblage soudé pour une charge de 7 Bars et un temps de 25 cycles.



Figure III.17 Les éprouvettes ($e=1\text{ mm}$) rompues après l'essai de traction pour $T=25\text{ Cycle}$ et $F=7\text{ Bars}$

III.3 Effet de l'effort sur le comportement mécanique des joints soudés

Les courbes (Figure III.19, 21, 23 et 25) 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 et 7 Bars à $T=18$ et $T=25$ cycle et pour $I=8, 10, 12, 14$ et 16 KA .

L'effort appliqué lors du soudage influe sur les caractéristiques mécaniques d'un point de soudure, car d'après l'observation des graphes (figure.) on peut conclure que pour un effort $F=6\text{ Bars}$ la charge max que peut le point de soudure supporté est inférieur à celle soudé avec un effort de $F=7\text{ Bars}$.

III.3.1 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 2mm

La Courbe (Figure III.19) représente les résultats des éprouvettes Soudées avec 12 KA dont il nous a permis de distinguer les effets de l'effort sur les modes de ruptures nous remarquons que nous avons une déchirure partiel pour les deux éprouvettes ainsi qu'une différence de la taille du noyau pour les éprouvettes soudés car la taille pour 7 Bars est supérieur à celle soudée avec 6 Bars .



Figure III.18 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 12 KA

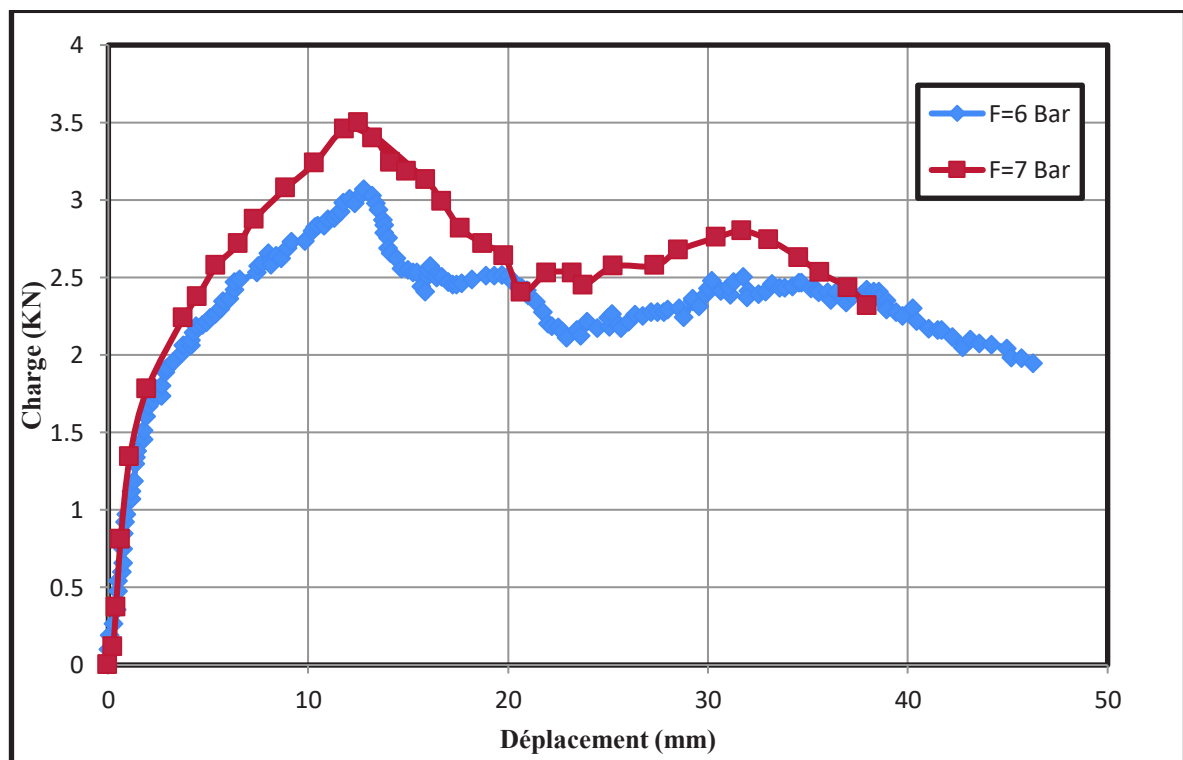


Figure III.19 : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 12 KA et un temps de 18 cycles

La Courbe (Figure III.21) nous a permis de distinguer l'effort sur les modes de ruptures nous remarquons que pour 6 Bars nous avons une déchirure total tandis que pour 7 Bars nous avons une rupture par déchirure partiel ainsi qu'une différence dans la taille du noyau pour les éprouvettes soudées avec 14 KA et 18 Cycle.



Figure III.20 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA et 18 Cycle

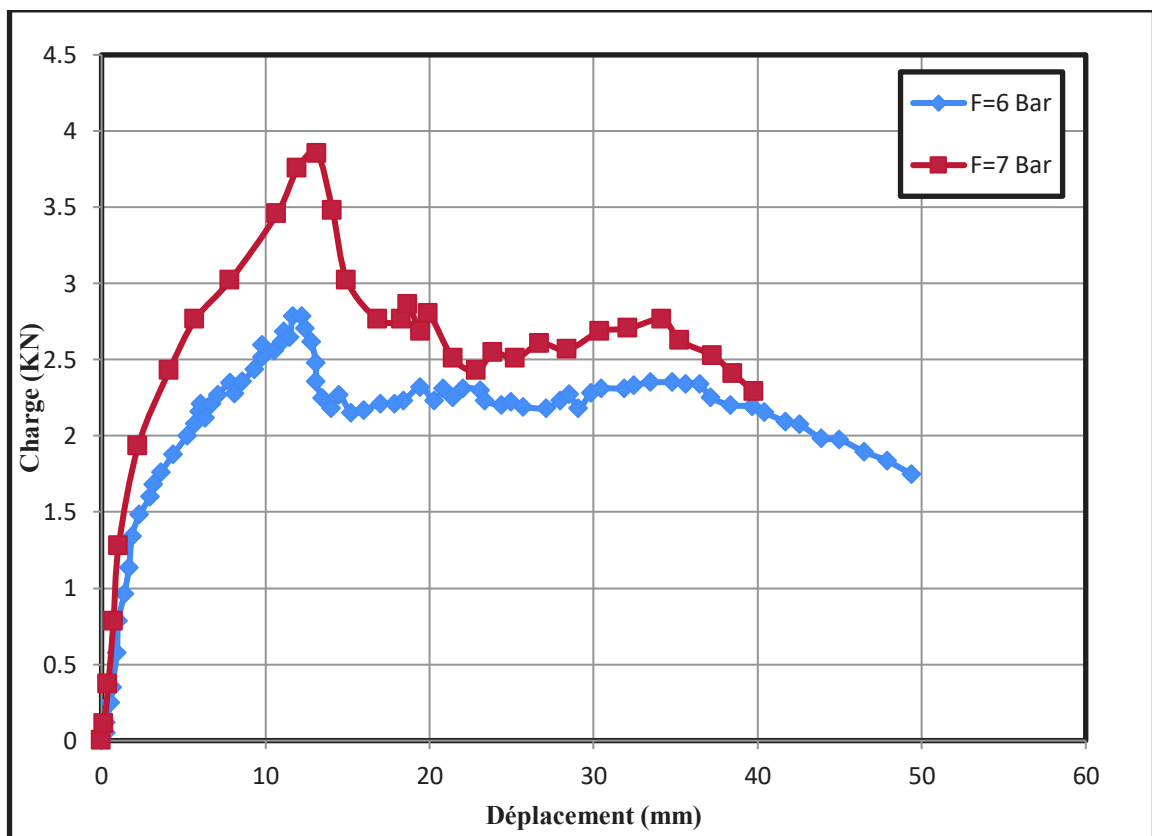


Figure III.21: Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 18 cycles

La Courbe (Figure III.23) nous a permis de distinguer l'effort sur les modes de ruptures nous remarquons que nous avons une rupture par déchirure partiel pour les deux éprouvettes ainsi qu'une différence dans la taille du noyau pour les éprouvettes soudés avec 14 KA et 25 Cycle ce qui implique qu'une éprouvette avec une taille de noyau plus importante résistera mieux au effort appliqué ce qui a été démontré par les courbes



Figure III.22 Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 14 KA et 25 Cycle

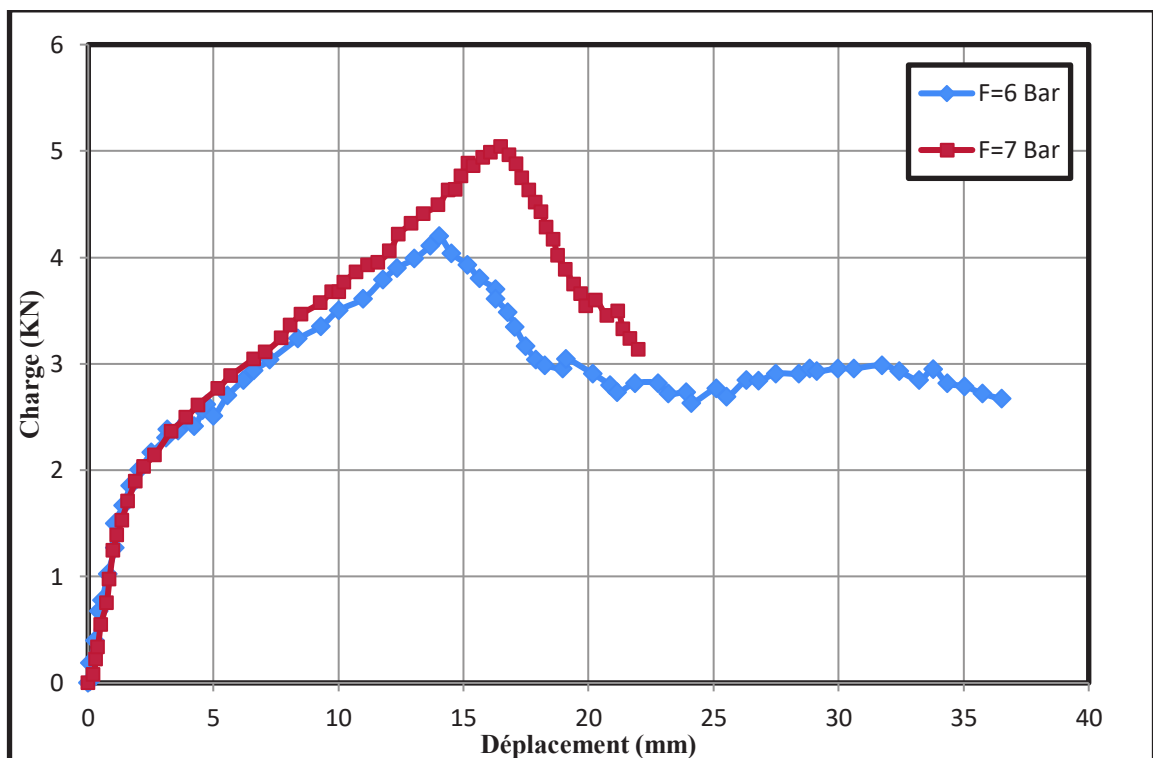


Figure III.23: Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 14 KA et un temps de 25 cycles

La Courbe (Figure III.25) nous a permis de distinguer l'effort sur les modes de ruptures nous remarquons que nous avons une rupture par déchirure partiel pour les deux éprouvettes ainsi qu'une différence dans la taille du noyau pour les éprouvettes soudées avec 16 KA et 18 Cycle mais la résistance à la rupture a diminué par rapport aux éprouvettes soudées avec 14 KA Car la forte intensité a généré davantage de chaleur se qui agrandis la ZAT.



Figure III.24 Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 16 KA et 18 Cycle

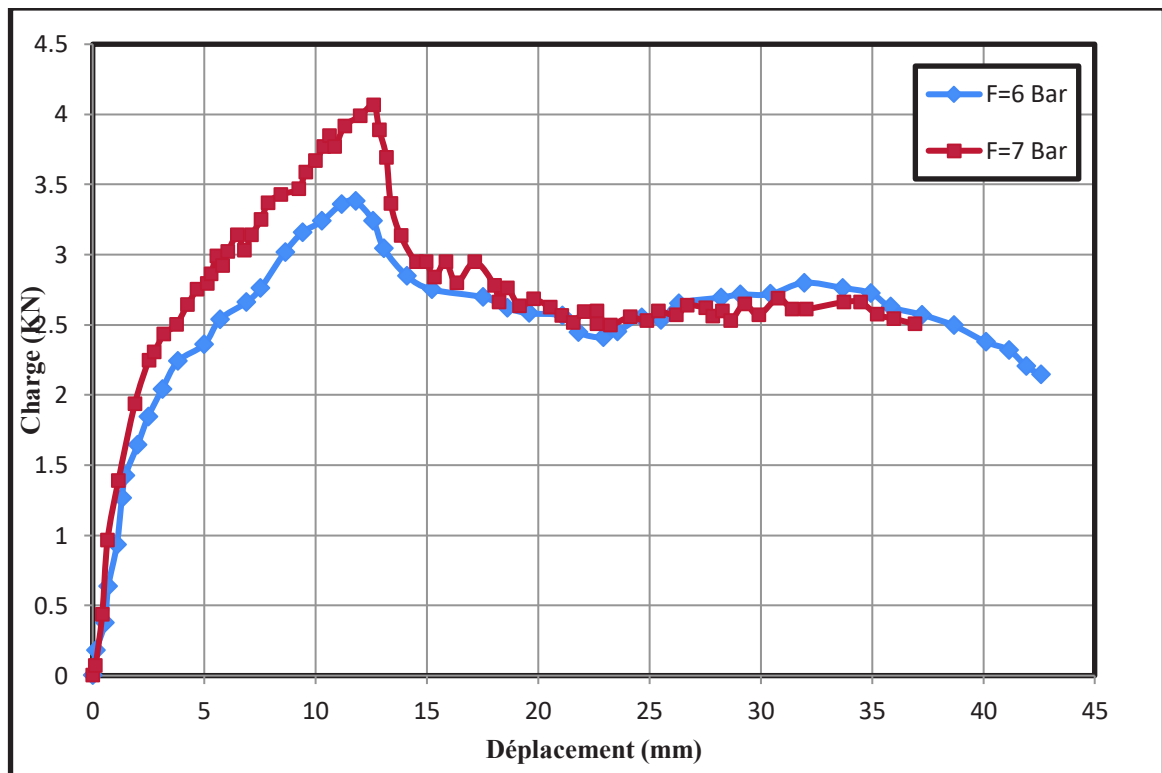


Figure III.25: Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 16 KA et un temps de 18 cycles

III.3.2 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 1 mm

La Courbe (Figure III.27) nous a permis de distinguer l'effort sur les modes de ruptures pour l'épaisseur $e=1$ mm, nous remarquons que nous avons une rupture par déchirure partiel pour les deux éprouvettes mais l'augmentation de l'effort de soudage a diminué la charge à la rupture que peut l'éprouvette supporté.

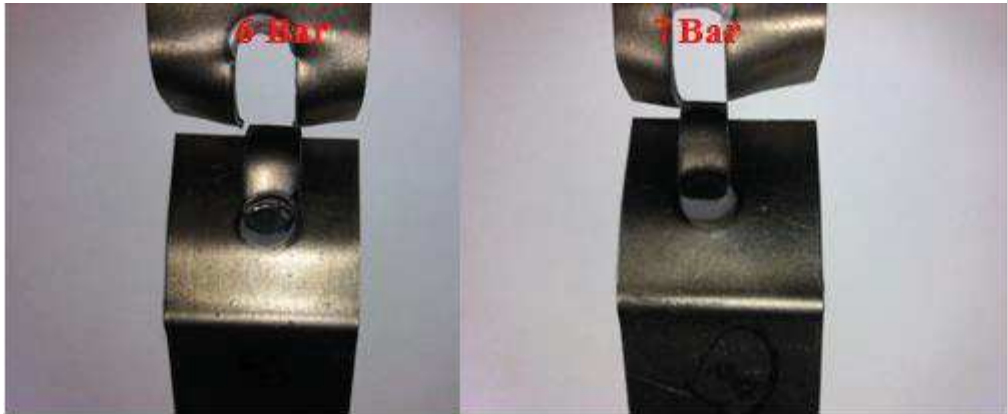


Figure III.26 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 12 KA et 18 Cycle

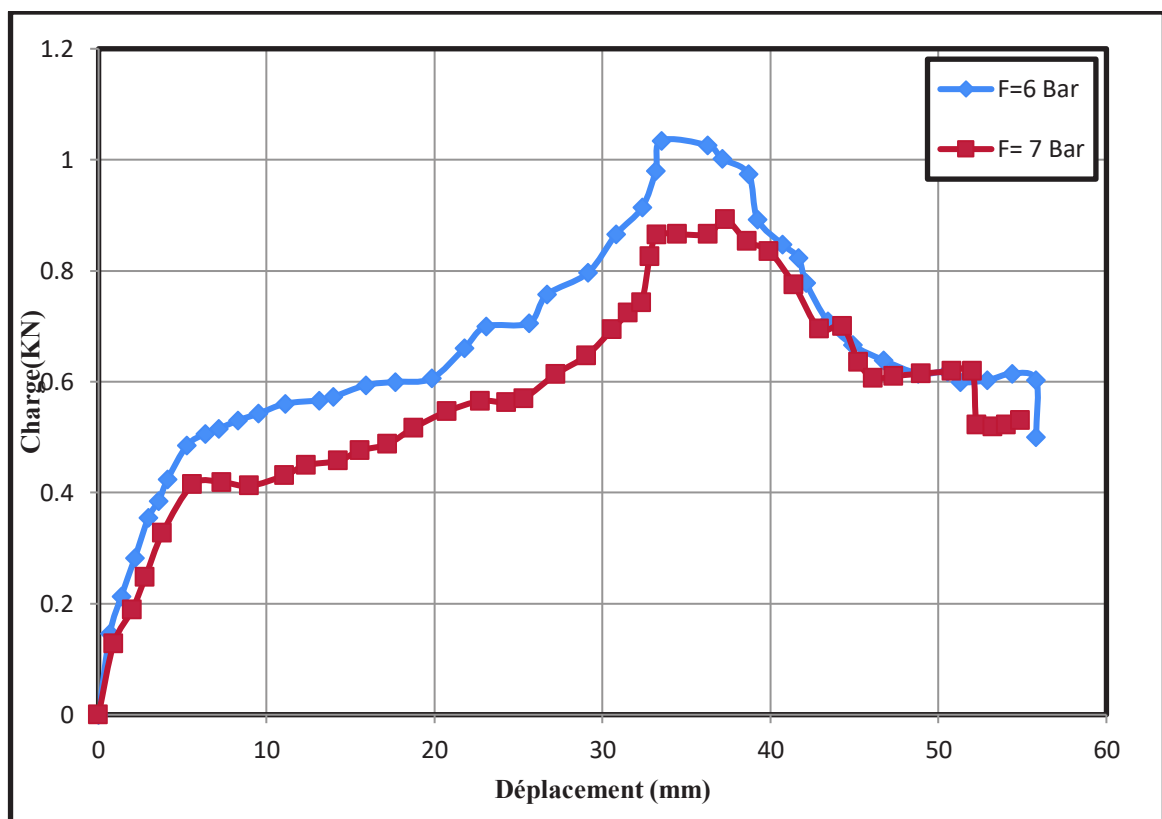


Figure III.27: Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité de 12 KA et un temps de 18 cycles

III.4 Effet du temps de maintien sur le comportement mécanique des joints soudés

Les courbes (Figure III.30, 32, 34, 36 et 38) 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 et 7 Bars à T=18 et T=25 cycle et pour I=8,10 12, 14 et 16 KA.

Le temps de maintien est parmi les paramètres de soudage qui influe sur les caractéristiques mécaniques d'un point de soudure, car nous avons remarqués que pour T=18 Cycle l'éprouvette a résisté moins que celle soudé avec T=25 Cycle.

III.4.1 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 2mm

Les essais nous ont permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons que pour 18 Cycle nous avons un déboutonnage total tandis que pour 25 Cycle nous avons une rupture par déchirure pour les éprouvettes soudés avec 10 KA (Figure III.28).



Figure III.28 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 10 KA

La Courbe (Figure III.30) nous a permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons que pour 18 Cycle nous avons une déchirure total tandis que pour 25 Cycle nous avons une rupture par déchirure partiel ainsi qu'une différence dans la taille du noyau pour les éprouvettes soudés avec 14 KA (Figure III.29).



Figure III.29 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 14 KA

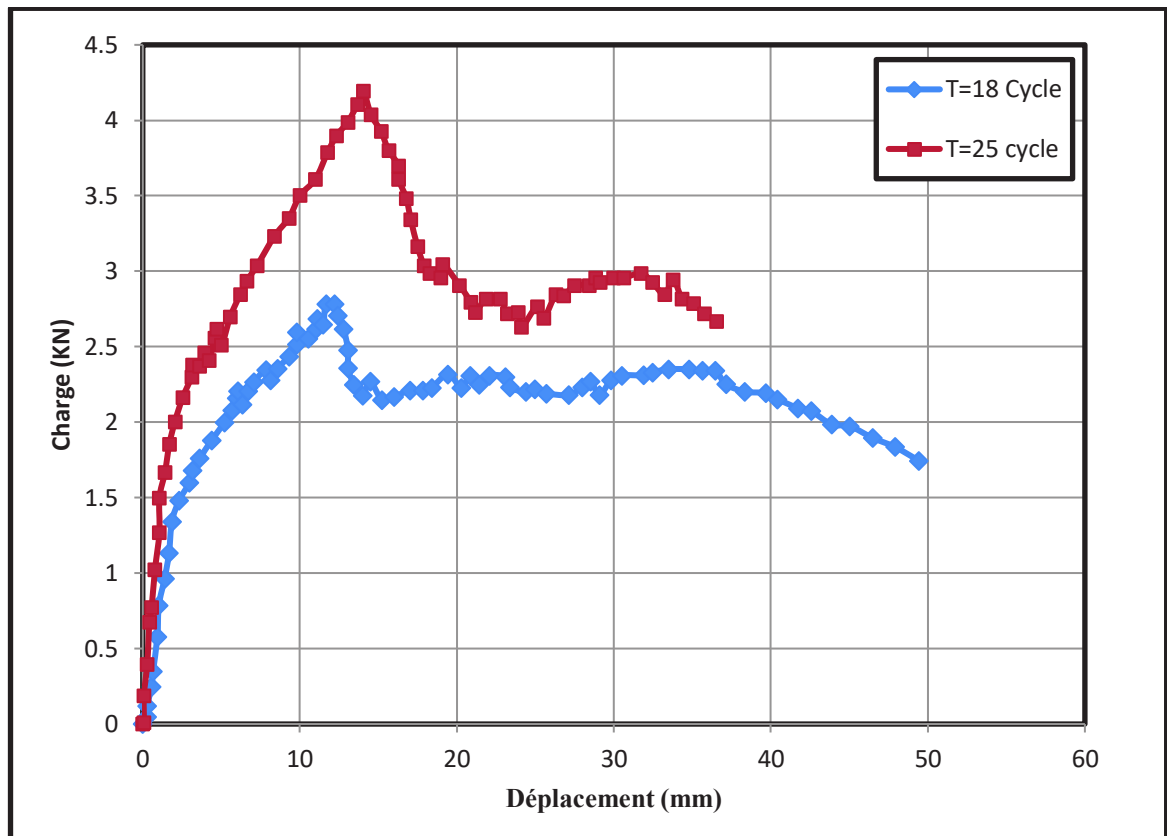


Figure III.30: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et une intensité de **14 KA**

La Courbe (Figure III.32) nous a permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons similarité entre les deux faciès mais l'éprouvette soudée avec 25 Cycle a résisté mieux que celle du 18 Cycle soudés avec 16 KA (Figure III.31).



Figure III.31 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 16 KA

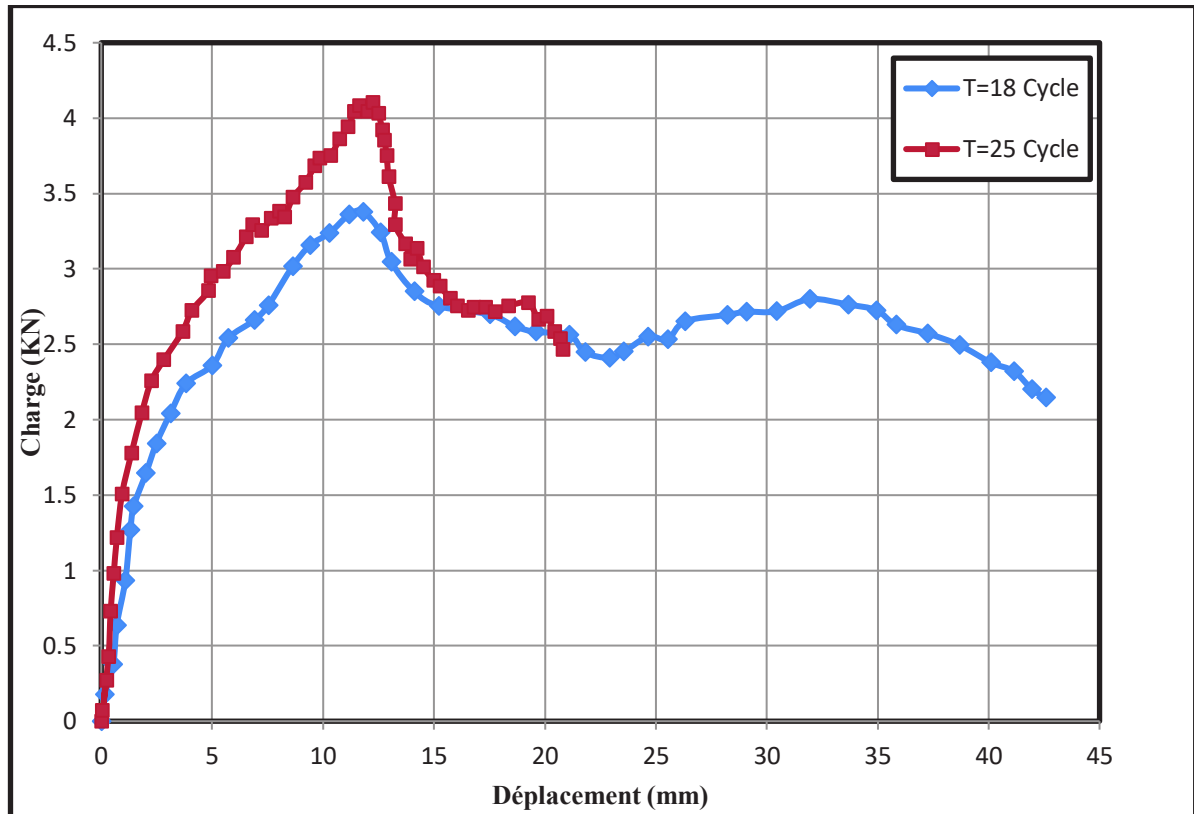


Figure III.32: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et une intensité de **16 KA**

III.4.2 Analyse des essais de rupture pour une épaisseur de 1mm

La Courbe (Figure III.34) nous a permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons que pour les deux éprouvettes nous avons une déchirure total tandis ainsi qu'une différence dans la taille du noyau pour les éprouvettes soudés avec 12 KA (Figure III.33).



Figure III.33 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudés avec 12 KA $e=1$ mm

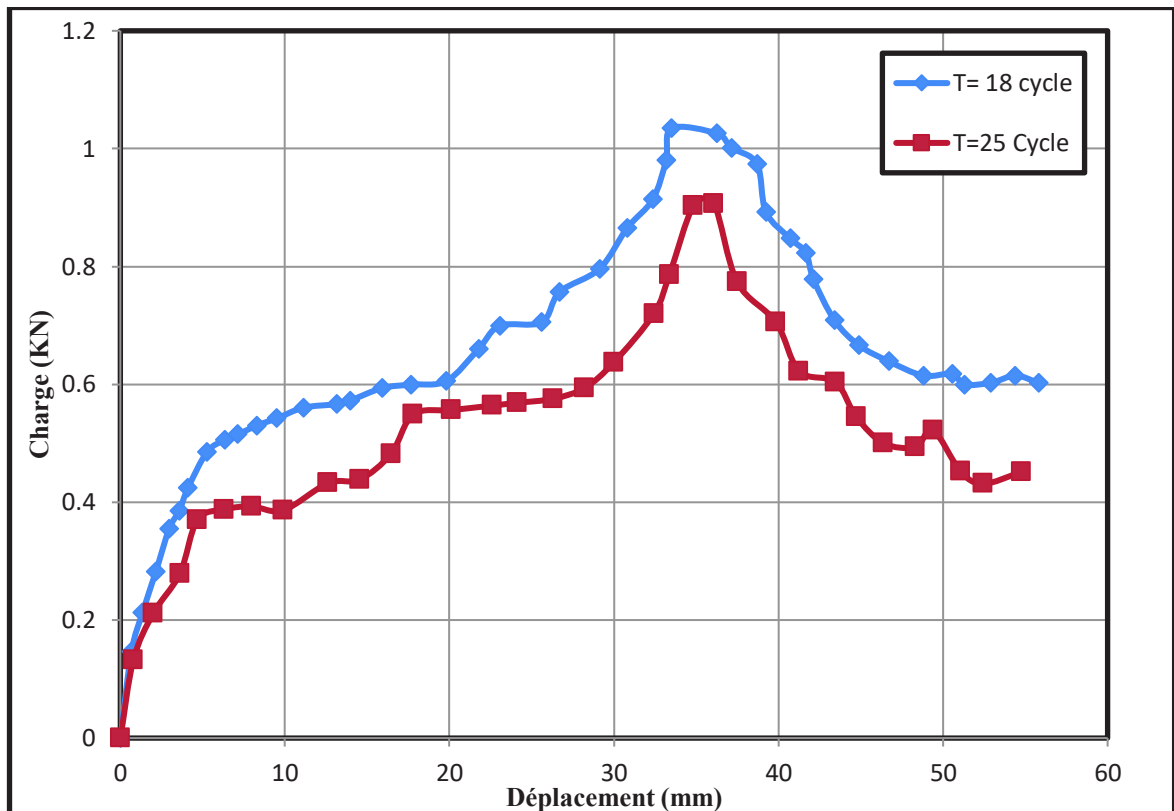


Figure III.34 : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 12 KA $e=1$ mm.

La Courbe (Figure III.36) nous a permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons que pour les deux éprouvettes nous avons une déchirure total pour une intensité de courant de 14 KA et une meilleur résistance par rapport aux éprouvettes Soudés avec 25 Cycle (Figure III.35).



Figure III.35 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 14 KA $e=1$ mm

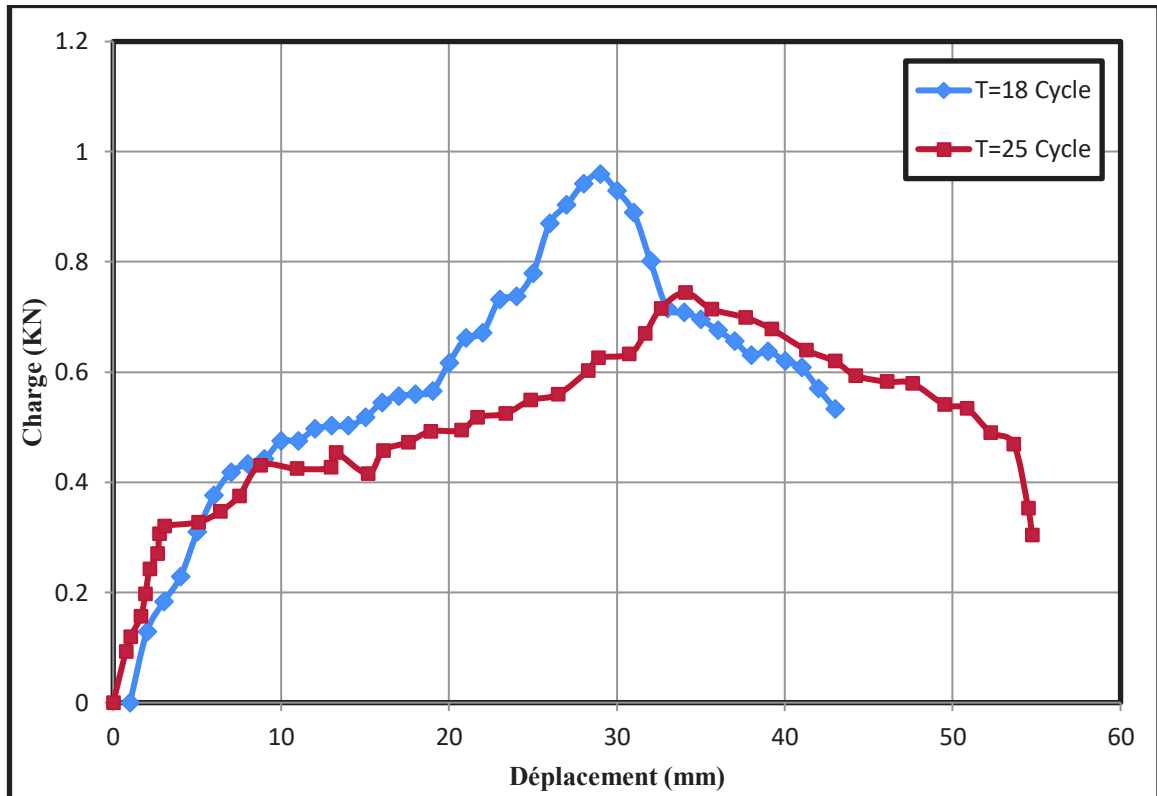


Figure III.36: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 7 Bars et une intensité de 14 KA $e=1$ mm

La Courbe (Figure III.38) nous a permis de distinguer les effets du temps de maintien sur les modes de ruptures nous remarquons que pour les deux éprouvettes nous avons une déchirure total pour une intensité de courant de 16 KA et une meilleur résistance par rapport aux éprouvettes Soudés avec 25 Cycle mais un allongement inférieur par rapport aux éprouvettes soudés avec 14 KA et 12 KA (Figure III.37).

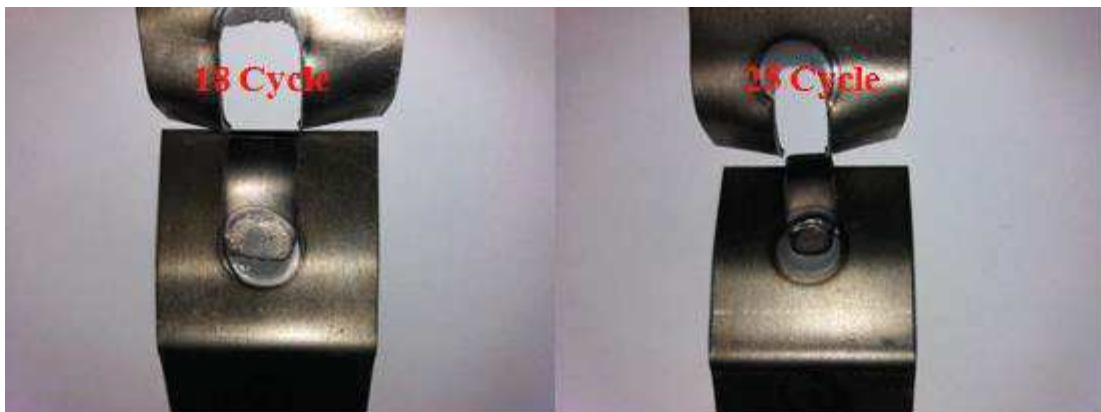


Figure III.37 : Faciès de rupture pour les éprouvettes soudées avec 16 KA $e=1$ mm

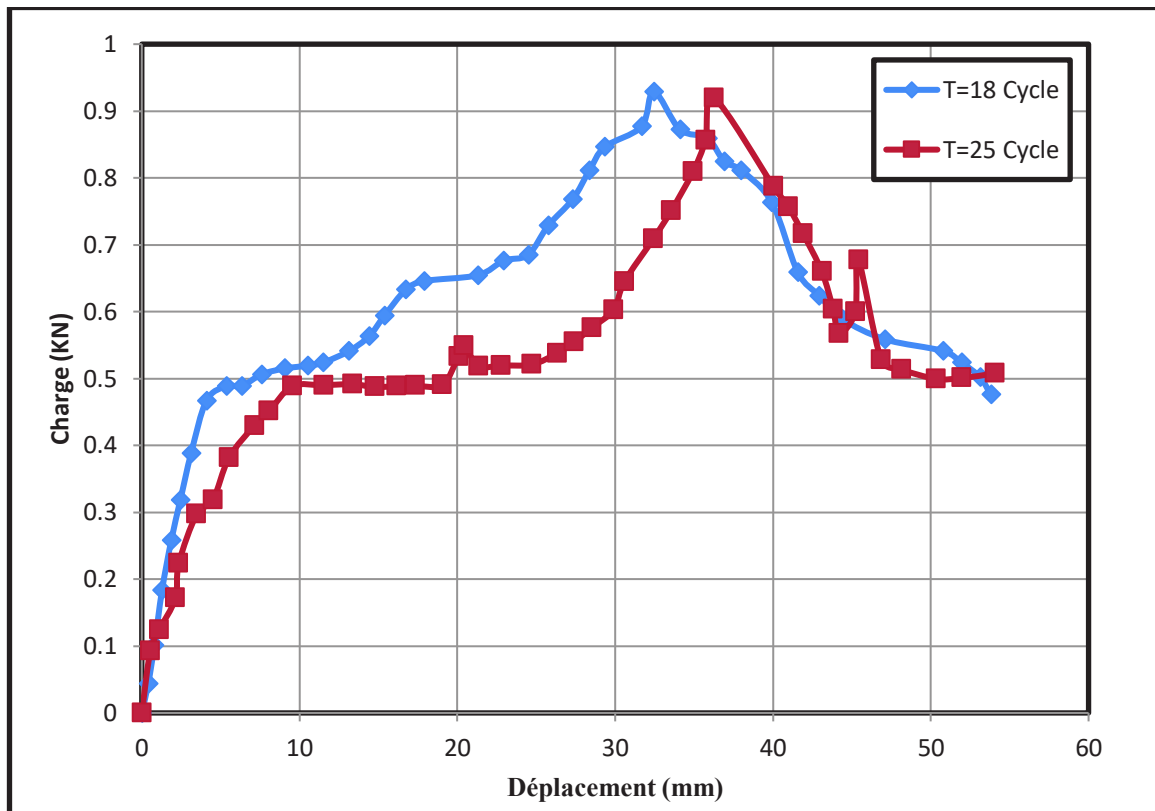


Figure III.38: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 16 KA $e=1$ mm

III.5 Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes (Figure III.39 et 40) 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 et 7 Bars à T=18 et T=25 cycle et pour I=8,10 12, 14 et 16 KA.

L'épaisseur des pièces soudées influx sur la charge maximal que peut le point de soudure supporté, car le noyau obtenue pour des pièces de $e=2$ mm est plus large et plus résistant que celui d'une pièce d'épaisseur $e=1$ mm, car cela est due en premier lieu a la taille du noyau puis la vitesse de dissipation de la chaleur car les éprouvettes d'une faible épaisseur dissipe plus rapidement la chaleur se qui leur faits subir une trempe tandis que pour des épaisseurs $e=2$ mm les éprouvettes résistent mieux car leur vitesse de dissipation de la chaleur est faible ce qui laisse le temps à la structure de retourné a son état initial.

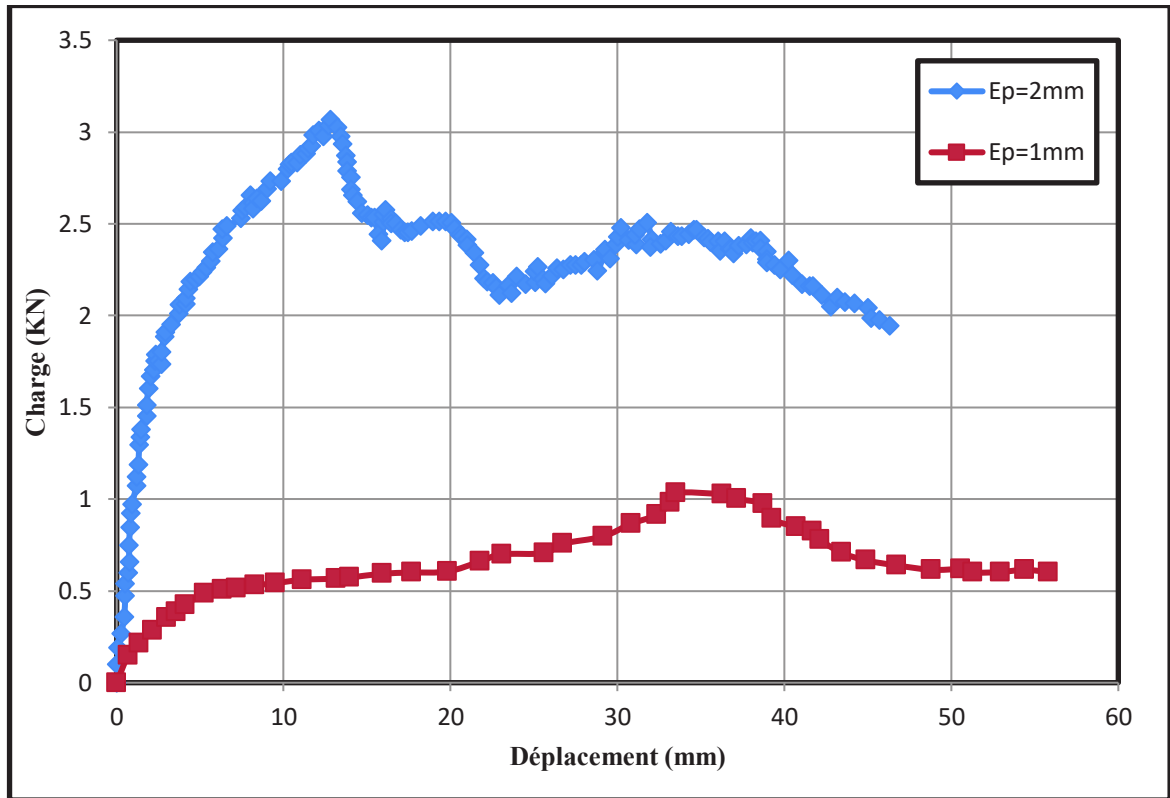


Figure III.39 : Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 12 KA et T=18cycle

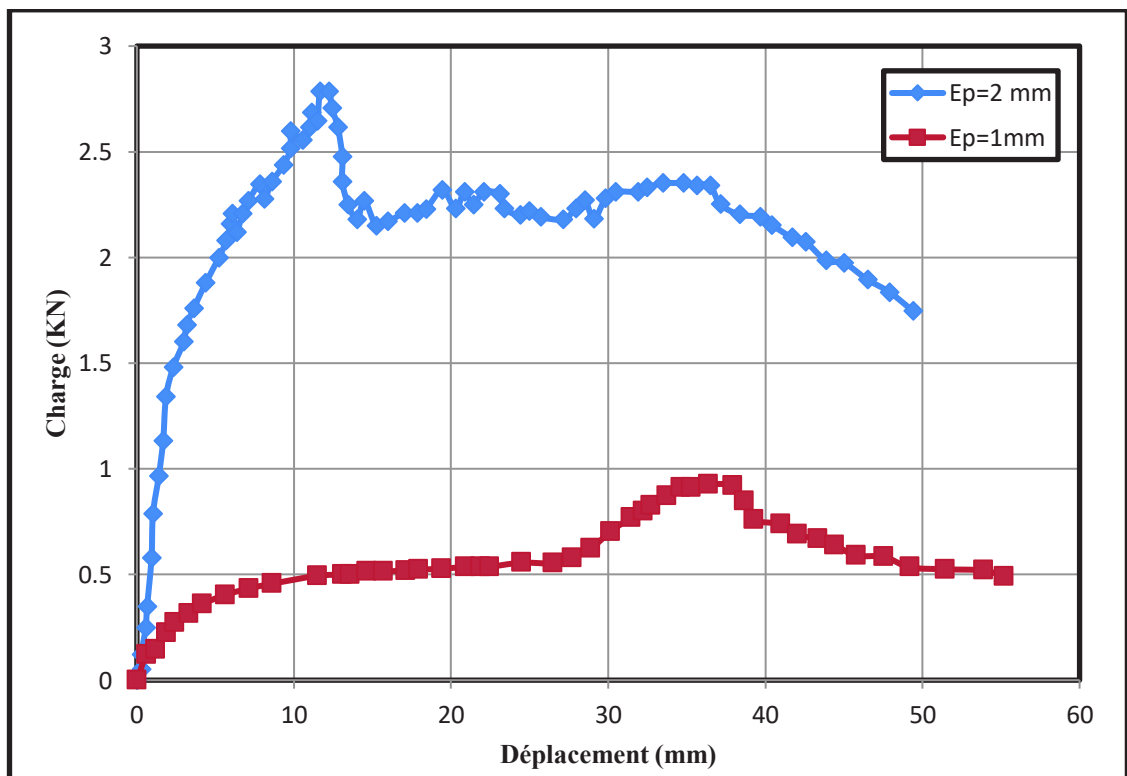


Figure III.40: Effet de l'épaisseur sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 Bars et une intensité de 14 KA et T=18cycle

III.6 Effet de la géométrie sur le comportement mécanique des joints soudés

Les courbes (Figure III.41, 42 et 43) 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 et 7 Bars à $T=18$ et $T=25$ cycle et pour $I=8,10,12,14$ et 16 KA.

La géométrie d'un assemblage soudé est parmi les facteurs qui influent sur le comportement mécanique et la charge maximal que pourras supporter le point de soudure.

Les résultats des essais de traction on montre que pour l'assemblage soudé en Peel joints (T) est moins résistant qu'un assemblage soudé par recouvrement (R) et cela est due au contrainte au quel chaque assemblage est soumis.

Lors de l'essai de traction l'éprouvette soudée par recouvrement est soumise à des contraintes de cisaillement tandis que pour l'éprouvette en Peel joint nous avons concentration de contrainte au niveau de la zone affecté thermique ce la rends plus faible que celle soudée par recouvrement.

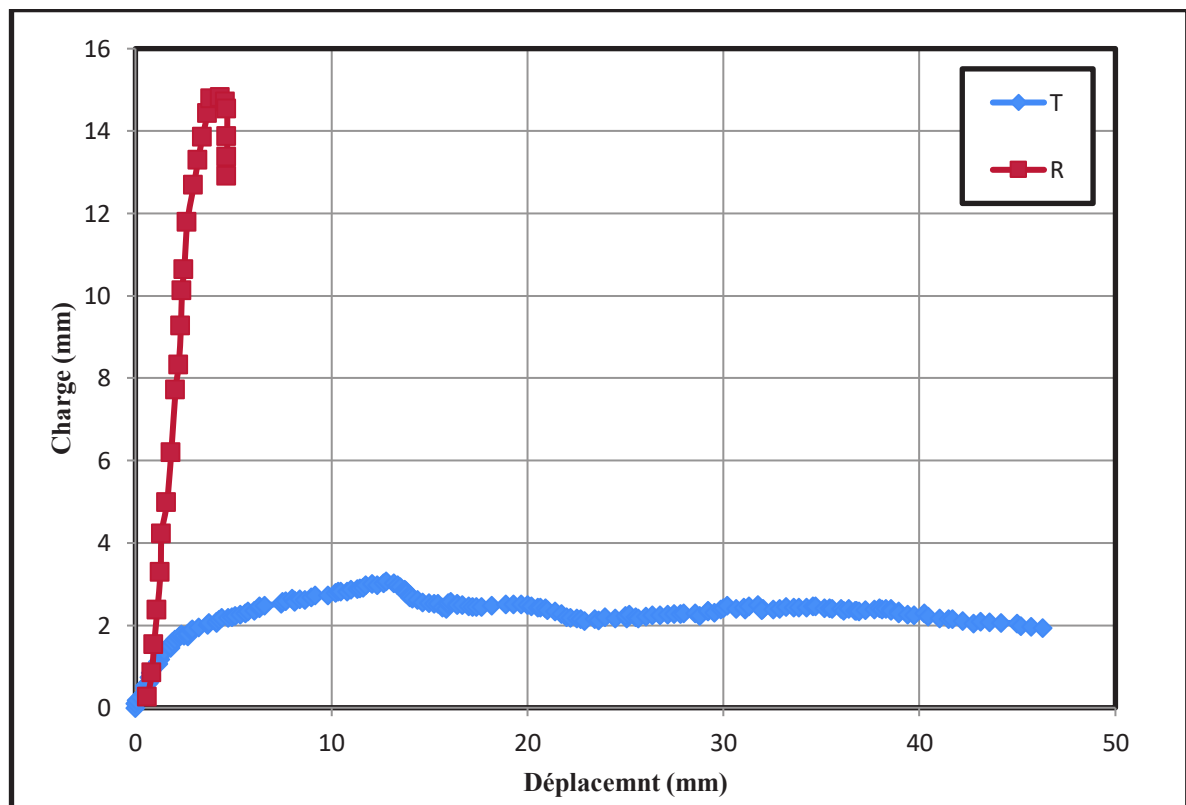


Figure III.41: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et une intensité de **12 KA**, et $T=18$ cycle

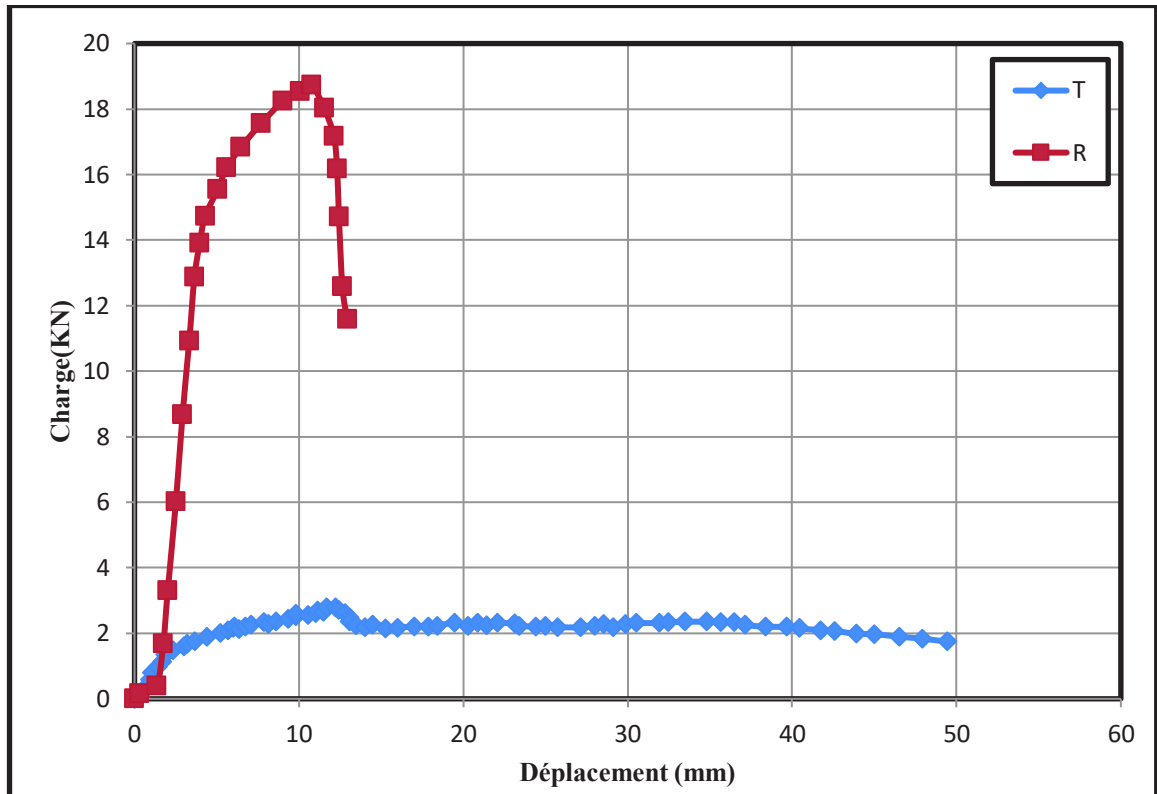


Figure III.42: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et une intensité de **14 KA** et **T=18cycle**

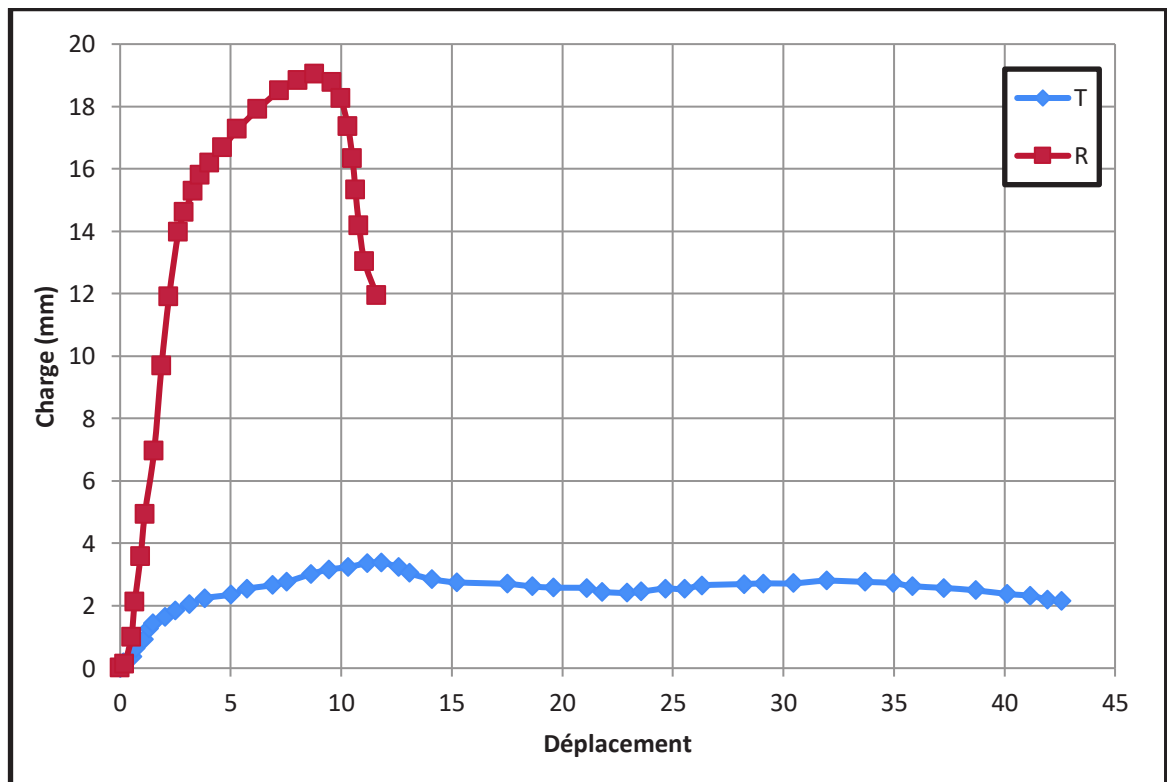


Figure III.43: Effet de la géométrie sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars** et une intensité de **16 KA** et **T=18cycle**

III.7 Effet de la charge maximale sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes de (Figure III.44 et 45) représentent l'évolution de la charge maximale en fonction de l'intensité pour des efforts de 6 et 7 Bars à T=18 et T=25 cycle et pour I=12, 14 et 16 KA dont ils ont montrés que la charge max que peut l'éprouvette supporté est meilleure pour un effort F= 7 Bars

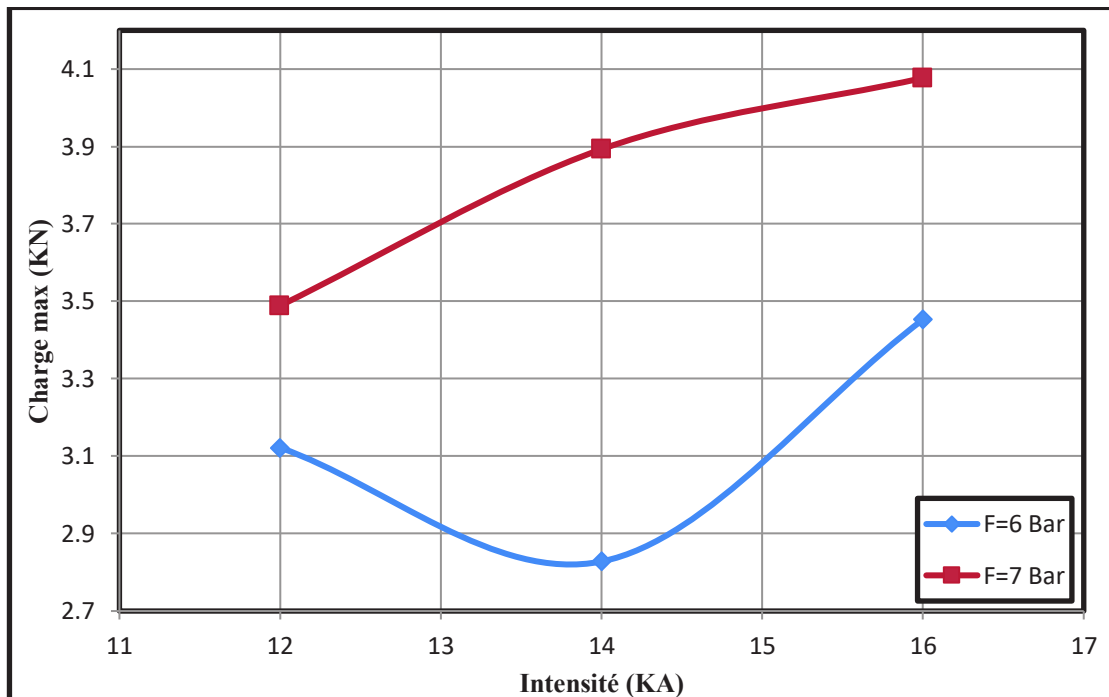


Figure III.44 : Effet de l'effort sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour T=18 cycle

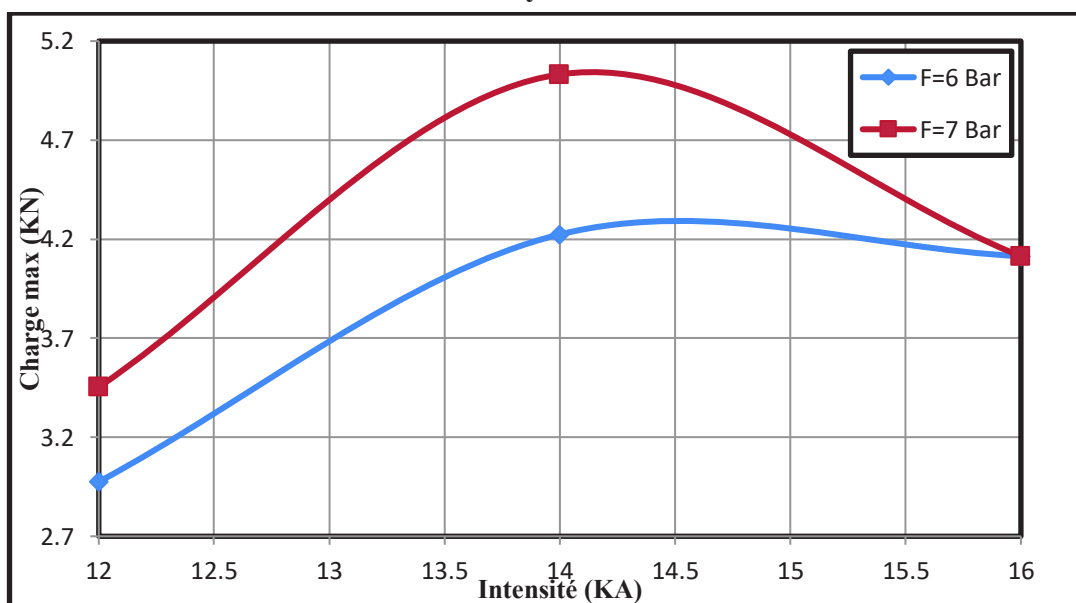


Figure III.45 : Effet de l'effort sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour T=25 cycle

On observe aussi que l'augmentation du temps de maintien influe sur le comportement mécanique et sur la charge max (Figure III.46) que peut l'éprouvette car nous avons remarqué que pour $T=25$ cycle la charge max a atteinte $F_m=4.3$ KN tandis que pour $T=18$ cycle la charge atteinte était de $F_m=3.5$ KN.

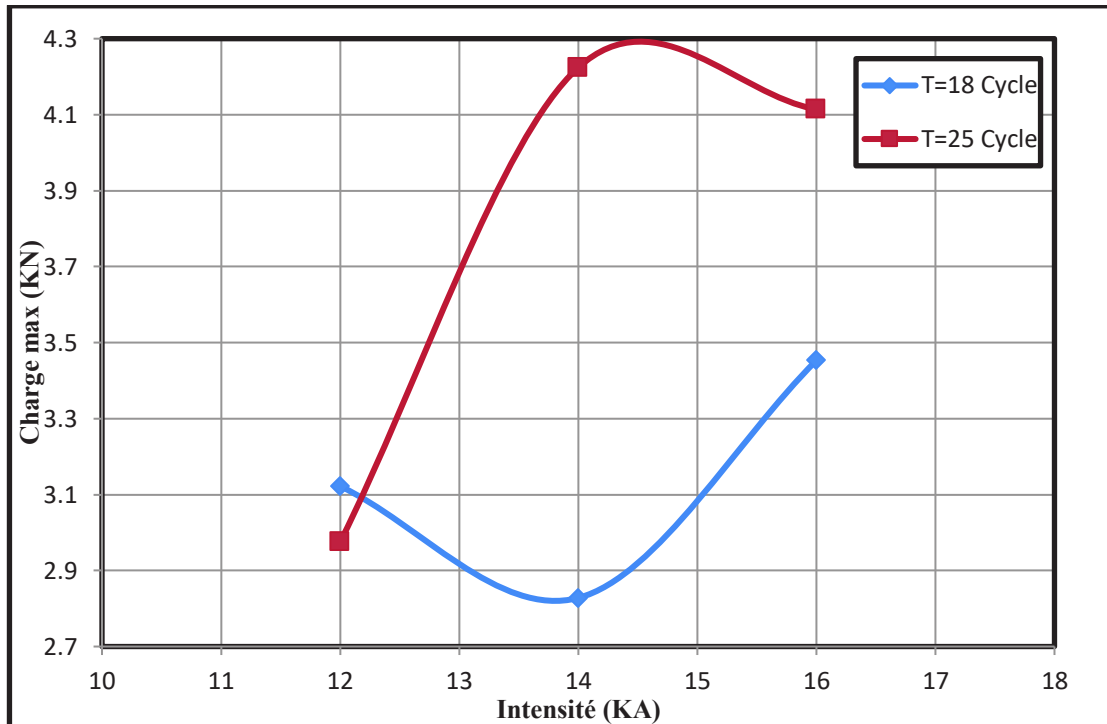


Figure III.46: Effet du temps de maintien sur la charge maximal de l'assemblage soudé pour une charge de **6 Bars**.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail est d'estimer expérimentalement la tenue mécanique de l'acier doux pour un assemblage en "Peel joint" qui a été soudé par points. La première partie regroupe la description des procédés de soudage par résistance et spécialement le soudage par point. La deuxième partie décrit la procédure expérimentale et les essais effectués. La dernière partie regroupe les différents résultats obtenus. Elle fait ressortir les points suivants

- La géométrie de l'assemblage influe sur le comportement mécanique ainsi la charge maximale que peut supporter un assemblage par recouvrement est supérieure à celle du Peel joints.
- L'augmentation de l'épaisseur augmente la tenue de l'assemblage cela est due à la vitesse de dissipation de la chaleur.
- La géométrie du point de soudure caractérisé par le diamètre et la profondeur est affecté par l'intensité du courant de soudage.
- Le temps et l'effort de soudage présente une faible différence sur la profondeur et le diamètre du point de soudure contenant la ZAT.
- Les essais de traction/cisaillement effectués montrent que le paramètre intensité du courant est dominant par rapport au temps et à l'effort de soudage sur l'évolution de la courbe charge/déplacement.
- L'augmentation de l'intensité du courant de soudage augmente la zone de déformation plastique et la charge de rupture.

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

- La simulation numérique du procédé de soudage par points.

La simulation par élément fini du point de soudure.

- Etude statistique s'avère nécessaire afin d'évaluer en détail les interactions des différents paramètres et accompagné d'une étude métallurgique.

Références bibliographique et webographique

- [1] ChainarongSrikunwong « Modélisation du procédé de soudage par points »
These de doctora, l'Ecole des Mines de Paris, octobre 2005
- [2] « Assemblage et contrôles destructifs » du CEWAC, JAN 2019
<http://www.formation-soudure.com/Livret%20Soudage%20par%20Resistance%20-%20SDs%202016.pdf> Consulter le 18/2/2019.
- [3] Élias Sarkis, Machine de soudage à la molette pour les gaines circulaires Juin 2012.
- [4] L. Han1, M. Thornton, M. Shergold , « comparative study between self-piercing riveting and resistance spot welding of aluminium sheets for the automotive industry »
- [5] N A Mat Din, H Zuhailawati1 and A S Anasyida « Resistance Spot Welding of AA5052 Sheet Metal of Dissimilar Thickness», Materials Science and Engineering **114** (2016)
- [6] N. Akkas «Effect of Welding Current and Time on Tensile-Peel Loading in Resistance Spot Welding» 2017
- [7] Roland CAZES « Soudage par résistance » Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité ex-Directeur des Recherches. Société Sciaky
- [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] « Livret Soudage par Resistance» SD sevice édition 2016 ; 85
- [10] V. Onar, S. Aslanlar and N. Akkas «Effect of Welding Current and Time on Tensile-Peel Loading in Resistance Spot Welding» ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 132 ; (2017)
- [11] «Essai de Traction.pdf » Sep 2010 <https://meefi.pedagogie.ec-nantes.fr/MEF/MIAS/treillis/doc/Essai-de-Traction.pdf> Consulter le 28/3/2019
- [12].wikibooks.org/wiki/Technologie/Matériaux/Généralités/Désignation_normalisée_des_aciers Consulter le 28/3/2019