

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE 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

Présenté par : Mlle **GUEN Fethia**

Intitulé de Sujet

**CARACTERISATION MECANIQUE D'UN ASSEMBLAGE
ACIER GALVANISE SOUDE PAR POINT**

Soutenu publiquement, le Juin 2018 , devant le jury composé de :

Président : HADJOUI Fethi	MCB	Université de Tlemcen
Encadreur : BENACHOUR Mustapha	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur : LARBI Cherif Mohammed	Ingénieur	SOREMEP-Tlemcen
Examineur : SEBAA Fethi	MCA	Université de Tlemcen
Examineur : KARA Ali Djamel	MCB	Université de Tlemcen

Remerciements

Le remerciement infini avant tous est à dieu le plus puissant qui m'a comblé des bienfaits de l'Islam et de la Science.

*Je remercie vivement mon encadreur Monsieur **BENACHOUR Mustapha** qui m'a toujours soutenu dans mon mémoire et la conduite d'un projet de recherche expérimentale.*

*Je désire exprimer toute ma gratitude à mes enseignants qui ont acceptants d'être membres dans le jury de soutenance de mon mémoire monsieur: **HADJOUI Fethi** le président du jury et monsieurs **SEBAA Féthi** et **KARA ALI Djamel** d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je ne pourrais pas oublier de remercier chaleureusement les monsieur **LARBI Cherif Mohammed**, et chef directeur de Soremep pour avoir m'accepté dans leur entreprise pour le stage et surtout pour sa bonne humeur et sa sympathie.*

Je veux particulièrement remercier mes amis intimes : Amel, Zahia et tous amis de la classe bilingue.

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail en guise de reconnaissances a :

♥ *Mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leur soutien durant toutes mes années d'études leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon instruction et pour me voir réussir un jour.*

..... Que DIEU me les garde.....

♥ *Mes frères Mohammed, Abbas, Mustapha et mes sœurs Noria, Ghania pour leurs aides et leurs soutien morale pendant toute l'année.*

♥ *Une pensée particulière à mes très chers amis : Zozo, Amel qui n'a pas cessés de me rapporter un quelconque soutien dans la vie de tous les jours, je demande DIEU de les bénir car ils sont précieux pour moi.*

♥ *Sans oublier tous mes camarades de classe : M2 ASM.*

GUEN FETHIA

Résumé

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité.

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

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 : «caractérisation mécanique d'assemblage en acier galvanisé soudé par point »

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant de soudage 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.

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

En effet, l'augmentation du courant de soudage permet d'augmenter l'étendue de la déformation plastique.

La déformation de l'assemblage soudé est affectée par la présence des appuis aux extrémités des éprouvettes (réduction des déformations par flexion).

ملخص

يُستخدم لحم البقعة لتجميع لوحين محليًا باستخدام تأثير جول. لهذا الغرض ، يتم ضغط هذه الألواح باستخدام زوج من الأقطاب الكهربائية ، مصنوعة بشكل عام من سبيكة النحاس ، ويتم تمرير تيار كهربائي عالي الكثافة من خلال هذه الأقطاب نفسها.

الحرارة التي يولدها هذا التيار في واجهة الصفائح المعدنية يذوب المعدن محليًا ، مما يخلق ، بعد التصلب ، بقعة لحم.

يتم إجراء اللحام في ثانية إلى ثانيتين ، مع مرور الوقت الفعلي لتيار بضعة أعشار من الثواني. الظواهر الفيزيائية أثناء اللحام هي نفس الوقت الكهربائية والحرارية والميكانيكية والتعدينية

الموضوع المعنون ، يدمج في هذا المعنى وهو بعنوان: "التوصيف الميكانيكي للصلب المجلفن الملحوم بالنقطة"

من بين العديد من معاملات اللحام ، تلعب شدة تيار اللحام دورًا رئيسيًا ، حيث إنها تؤثر بشكل مباشر على حجم اللحام. يتم تعريف مدى قابلية اللحام لمنتج ما على أنه نطاق الكثافة للحصول على لحم ذي جودة مرضية ، كل المعالم الأخرى (الإجهاد الميكانيكي ، الفترات ، إلخ) يتم تحديدها مسبقًا.

تمت دراسة تأثير معاملات اللحام ، وهي شدة تيار اللحام والتوتر ووقت التلحيم.

تظهر النتائج أن المعلمات، وقوة ولحام الوقت لها تأثير صغير على الخصائص الميكانيكية مقارنة مع تأثير كثافة التيار اللحام. كما تظهر النتائج التجريبية أن شدة تيار اللحام تعد معلمة مهمة لمثل هذا التجمع وقوته الميكانيكية.

في الواقع، فإن زيادة تيار اللحام يجعل من الممكن زيادة مدى تشوه البلاستيك.

يتأثر تشوه التجميع الملحوم بوجود الدعامات في نهايات قطع الاختبار (تقليل التشوهات عن طريق الانحناء).

Abstract

Spot welding is used to assemble two sheets locally, using the Joule effect. For this purpose, these sheets are compressed using a pair of electrodes, generally made of copper alloy, and a high intensity electric current is passed through these same electrodes. 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 during welding are at the same time electrical, thermal, mechanical and metallurgical.

The theme addressed, integrates in this sense and is entitled: "mechanical characterization of galvanized steel welded by point"

Among the various welding parameters, the intensity of the welding current plays a major role, since it directly affects the size of the weld. The weld ability 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 stress and the welding time.

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

Indeed, the increase of the welding current makes it possible to increase the extent of the plastic deformation.

The deformation of the welded assembly is affected by the presence of the supports at the ends of the test pieces (reduction of deformations by bending)

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

ملخص

Abstract

Sommaire

Liste des tableauxI

Liste des figuresII

Introduction générale1

Chapitre I : généralité

Introduction3

I. Soudage par point5

1. Définition5

2. principe de soudage par point.....5

3. Paramètre de procédé.....7

4. Mécanisme de formation de la soudure.....10

5. Le point soudé.....11

5.1. Géométrie.....11

5.2. Microstructures.....12

II. Les aciers galvanisés.....13

1. La galvanisation.....13

1.1. Définition13

1.1.1. Procédé de Galvanisation à Chaud.....14

1.1.2. Electrodeposition (ou galvanoplastie).....15

2. Aciers galvanisés15

2.1. Domaine de soudabilité15

2.2. Domaine d'activités	15
2.3. Paramètres de soudage sur tôles d'acier galvanise.....	16
III. Etat de l'art sur les effets des paramètres de soudage.....	17
Chapitre II : Etude expérimentale	
1. Matériau d'étude : acier doux galvanisé Z275.....	20
1.1. Définition de Z275	20
1.2. Caractéristiques chimiques et physiques.....	20
1.3. Caractérisation mécanique	20
1.4. Choix du paramètre de soudage par point pour Z275.....	24
2. Fiche technique machine de soudage par point TECNA.....	27
3. Essais de traction en cisaillement	28
Chapitre III : Résultat et discussion	
Introduction	29
1. Mécanisme de rupture.....	29
2. Facteurs principale qui influent sur le mécanisme de la rupture	30
3. Effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique de l'assemblage soudé.....	30
4. Effet des paramètres de soudage par point sur le comportement mécanique des joints soudés.....	32
4.1. Effet de l'effort sur le comportement mécanique des joints soudés	32
4.2. Effet de l'intensité de courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudé	37
4.3. Effet de temps sur le comportement mécanique des joints soudé.....	41
4.4. Effet des appuis sur le comportement mécanique des joints soudé	45
Conclusion	47
Références bibliographie	48

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableaux I.1 : Paramètres de soudage sur tôles d'acier galvanise.....16

Chapitre II

Tableau II.1 : Composition Chimique de l'acier doux revêtus Z275.....18

Tableau II.2 : Propriété Physique de l'acier doux revêtus Z275.....18

Tableau II.3 : Caractéristique mécanique de l'acier Z275.....24

Tableau II.4 : Les différents essais de soudage par point pour les éprouvettes en aciers revêtus Z275.....26

Liste des Abréviations

Cu : cuivre

Zn : zirconium

Cr : Chrome

Ep : éprouvette

MB : métal de base

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure .I.1: Procédés de soudage par résistance électrique.....	4
Figure I.2 : Procédé de soudage par point.....	6
Figure 1.3 : Principe se soudage par point.....	7
Figure 1.4: Electrode de la soudure par point.....	8
Figure 1.5 : Différents formes des électrodes de la soudure par point.....	9
Figure1.6: Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points.....	10
Figure1.7 : Soudage par points : coupe d'un point de soudure.....	11
Figure 1.8. Microstructures générées par l'opération de soudage.....	13
Figure 1.9 : effet de courant de soudage par point sur la taille de zone de fusion de l'acier.	17
Figure 1.10 : effet du courant de soudage par point sur le diamètre du noyau de l'acier.....	17
Figure 1.11 : effet de diamètre de noyau sur la résistance a la traction de soudage par point	18
Figure 1.12 : effet de courant de soudage par point sur le temps de soudage.....	18
Figure 1.13 : Effet de courant de soudage par point sur la charge maximal.....	19
Figure 1.14 : effet du temps de soudage par point sur le diamètre du noyau de l'acier.....	19

CHAPITRE II

Figure II.1 : Machine 600 KN pour d'essai de traction.....	21
Figure II.2 : Dimension des éprouvettes de traction.....	21
Figure 2.3 : Eprouvettes de traction réalisées en acier revêtus.....	20
Figure II.4 : Courbe De Traction Charge / Déplacement.....	23
Figure II.5 : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations.....	23
Figure II.6 : Assemblage soudé par point des éprouvettes Z275	25
Figure II.7 : Exemple des pièces assemblées par point des éprouvettes enZ275 pour une intensité de 10 KA et un effort de 6.5 bars.....	25
Figure II.8 : machine de soudage par point (Machine TECNA).....	27
Figure II.9 : cisaillement par traction	28

CHAPIRE III

Figure III.1 : les mode de (a) par rupture du noyau fondu du point soudé dans sa section droite minimale, (b) rupture par déboutonnage.....	29
Figure III.2 : Evolution de l'endommagement d'un acier de haute résistance au cours de l'essai de traction cisaillement.....	31
Figure III.3.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité 15 KA et un temps de 35 cycles.....	33
Figure III.3.b : effet de l'effort de soudage de l'assemblage soudé pour I=15KA,T=35 Cycles et F=6 ET 6.5 bars.....	34
Figure III.4. a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité 14 KA et un temps de 30 cycles.....	34
Figure III.4.b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour I= 14 KA, T= 30 cycles et F=6 et 6.5 bars.....	35
Figure III.5.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité 12 KA et un temps de 35 cycles.....	35
Figure III.5.b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour I= 12 KA, T= 35cycles et F=6 et 6.5 bars.....	36
Figure III.6.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité 10 KA et un temps de 35 cycles.....	36
Figure III.6. b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour I= 10 KA, T= 35 cycles et F=6 et 6.5 bars.....	37
Figure III.7.a: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et un temps de 25 cycles.....	38

Liste des figures

Figure III.7.b: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5 bars et un temps de 25 cycles.....	38
Figure III.8.a. Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et un temps de 35 cycles.....	39
Figure III.8.b. Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et un temps de 35 cycles.....	39
Figure III.9.a : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 bars et un temps de 35 cycles.	40
Figure III.9.b : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6 bars et un temps de 35 cycles.....	40
Figure III.10.a: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et une intensité de 12 KA.....	41
Figure III.10.b: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et une intensité de 12 KA.....	42
Figure III.11.a: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6bars et une intensité de 12 KA.....	42
Figure III.11.b: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6.5bars et une intensité de 12 KA.....	43
Figure III.12.a : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6bars et une intensité de 15 KA.....	44
Figure III.12.b : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6bars et une intensité de 15 KA.....	44
Figure III.14.a : Effet des appuis sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6bars et une intensité de 14 KA et un temps de 30 cycles.....	45
Figure III.14.b : Effet des appuis sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de 6bars et une intensité de 14 KA et un temps de 30 cycles.....	46

*Introduction
générale*

Introduction générale

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans différentes industries : automobile, mécano soudé, assemblages métalliques. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide et économique.

Le récent développement des tôles revêtues électro zinguées nécessitent l'optimisation des techniques classiques d'assemblage, particulièrement en ce qui concerne le soudage par résistance par points. Cette nouvelle génération de tôles, largement utilisées dans l'industrie automobile, augmente de façon significative la durée de vie des carrosseries des véhicules en limitant la corrosion. Cependant, avec l'arrivée de ces tôles de faibles épaisseurs (0.7 mm) revêtues, est survenu un nouveau problème: celui de la durée de vie des électrodes de cuivre destinées à assurer le soudage.

L'étude théorique du soudage par résistance 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, 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.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

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

Le chapitre 2 décrit l'étude expérimentale conduite sur l'acier galvanisé, on utilise des éprouvettes avec et sans talon. Les assemblages sont réalisés par recouvrement et sollicités en cisaillement par traction et soumis aussi à une rotation due au moment de flexion introduit par l'excentricité des points d'applications des forces du haut et du bas, dans le but d'évaluer les caractéristiques mécaniques afin de comprendre les mécanismes de rupture des points soudés.

Introduction générale

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

Chapitre I

Généralités

Introduction

Le soudage par résistance est un procédé thermoélectrique de génération de chaleur au point de liaison des pièces à assembler. La chaleur résulte du courant électrique conduit à travers les pièces pendant un laps de temps déterminé avec précision, à une pression contrôlée - également appelée effort. La notion de « soudage par résistance » s'explique par le fait que la résistance des pièces à usiner et des électrodes est combinée ou opposée pour générer de la chaleur au point de liaison.

En soudage par résistance, la chaleur nécessaire pour créer la cohérence est générée en appliquant un courant électrique à travers l'empilement de feuilles entre les électrodes. Par conséquent, la formation d'un joint soudé, y compris la pépite et la zone affectée par la chaleur (HAZ), dépend fortement des propriétés électriques et thermiques de la feuille et des matériaux de revêtement. Avec la connaissance des phases et de leurs transformations, la formation d'une soudure peut être liée aux processus électriques et thermiques de soudage.

La première technique du soudage par résistance électrique était le soudage par points inventée par Pr. Elihu Thomson en 1877. Puis, la première machine de soudage a été construite et brevetée en 1885. [1]

Le contrôle des paramètres électriques et thermiques est une pratique courante en soudage par résistance. L'expression générale de la chaleur générée dans un circuit électrique peut être exprimée par $Q = I^2Rt$ où Q est la chaleur, I est le courant, R est la résistance électrique du circuit, et t est le temps où le courant circule dans le circuit.

Lorsque le courant ou la résistance n'est pas constant, l'intégration de l'expression ci-dessus se traduira par la chaleur générée dans un intervalle de temps τ . Pour le soudage par résistance, la production de chaleur à tous les emplacements dans une soudure, plutôt que la chaleur totale générée, est plus pertinent, car le chauffage n'est pas et ne devrait pas être uniforme dans la soudure.

En outre, la vitesse de chauffage est plus importante que la chaleur totale, car la vitesse à laquelle la chaleur est appliquée pendant le soudage détermine l'historique de la température et, à son tour, la microstructure. Cela peut être facilement compris en considérant une soudure en aluminium. Si le courant de soudage est faible, la fusion peut ne pas être possible, quelle que soit la durée du chauffage, en raison de la faible résistivité électrique de l'aluminium et du fait que la chaleur générée est rapidement évacuée par les électrodes

refroidies à l'eau et les feuilles. à la haute conductivité thermique de l'aluminium. En général, les processus électriques et thermiques doivent être considérés ensemble dans le soudage. [2]

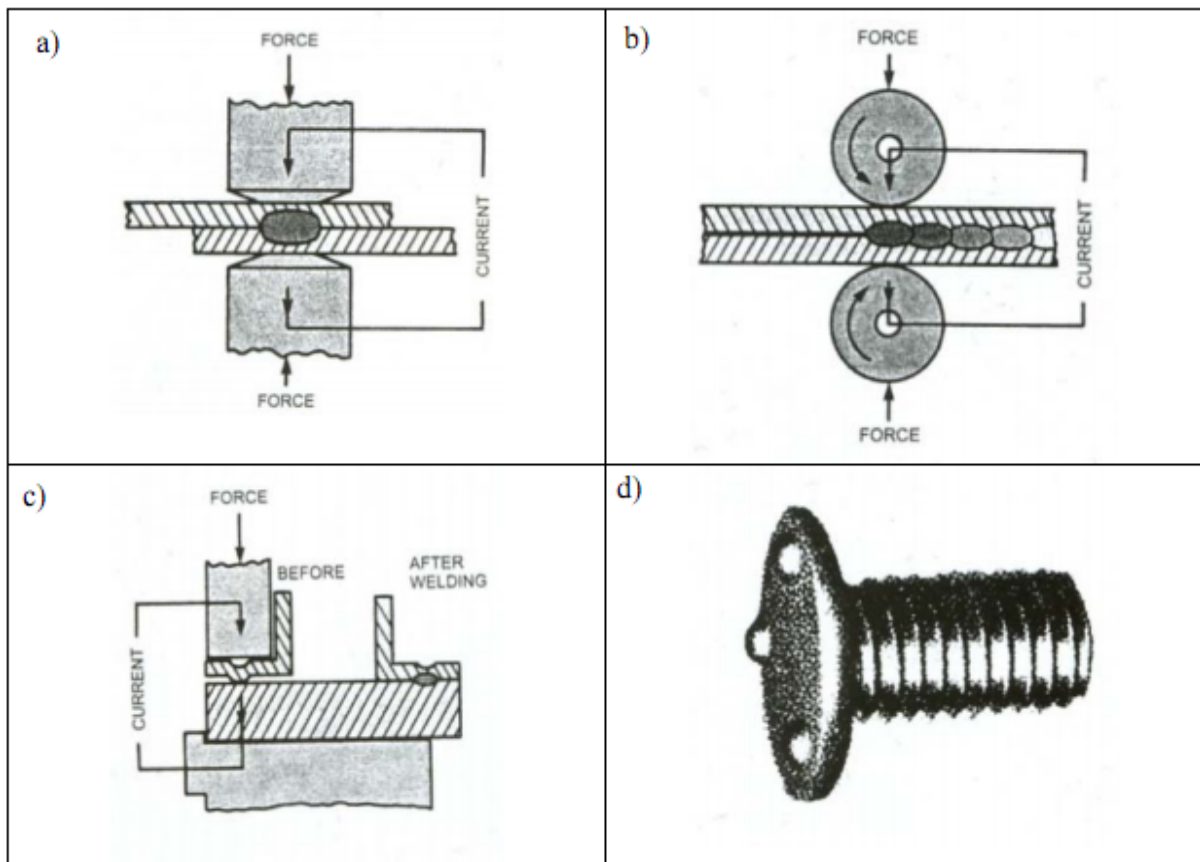


Figure J.1: Procédés de soudage par résistance électrique, a) soudage par point, b) soudage à la molette, c) soudage par bossage, et d) soudage par bossage pour un goujon-(Threaded stud with projection welding).

Le procédé de soudage par résistance électrique inclut le soudage par point, le soudage à la molette, et le soudage par bossage. Typiquement pour ces procédés, des électrodes en cuivre sont utilisées pour passer le courant et pour appliquer l'effort de serrage.

Pour le soudage à la molette, les molettes sont en cuivre et fonctionnent comme des électrodes, qui sont un passage d'intensité en serrant des pièces. Les pièces des tôles sont mises bout à bout et la soudure continue se fait par le mouvement de rotation des électrodes (Fig. 1-b). Ce procédé est commode dans l'industrie automobile, ex. la fabrication de réservoir de carburant.

Le soudage par bossage illustré sur la (Fig. 1-c) nécessite que des pièces soient préalablement forgées pour préparer des points de concentration de courant entre des pièces. Les électrodes utilisées dans ce procédé sont usinées avec une dimension précise, qui permet

de localiser précisément les points de bossage. Le noyau se produit lorsque l'intensité passe avec l'effort de serrage.

Un procédé dérivé du soudage par bossage est le « resistance stud welding », (Fig. 1-d). Dans ce cas, le goujon doit être usiné pour créer, typiquement, deux ou trois points de contact. La hauteur des points de bossage doit être précise afin d'obtenir une pression uniforme lorsqu'un effort est appliqué.

I. Soudage par point

1. Définition

C'est en 1877 que Thomson découvre le principe du soudage par résistance. Il utilise l'effet Joule comme source de chaleur pour porter les pièces à souder à leur température de fusion. Il s'agit d'une soudure sans apport de matière (soudure autogène). D'autres procédés utilisent ce mode de chauffage, tels que le soudage à la molette ou encore le soudage par bossage. Le soudage par point commence à être industrialisé par l'industrie automobile dès les années 1930. Aujourd'hui, c'est encore dans ce secteur qu'il est le plus utilisé pour assembler plusieurs tôles minces en acier. Il permet aussi de souder des tôles en aluminium. Cette méthode d'assemblage présente plusieurs avantages comme son faible coût, sa fiabilité et la possibilité d'être automatisée (robot de soudage). Néanmoins le soudage par point, mettant en jeu de nombreux phénomènes physiques qui rendent ce procédé complexe à analyser, fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches. [3]

Désignation

Française : SP (Soudage par Point)

Américaine : RSW (Resistance Spot Welding)

Numérique : 21

2. principe de soudage par point

Le principe du soudage par points schématisé sur la Fig. 1.2. Illustre les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui va créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles.

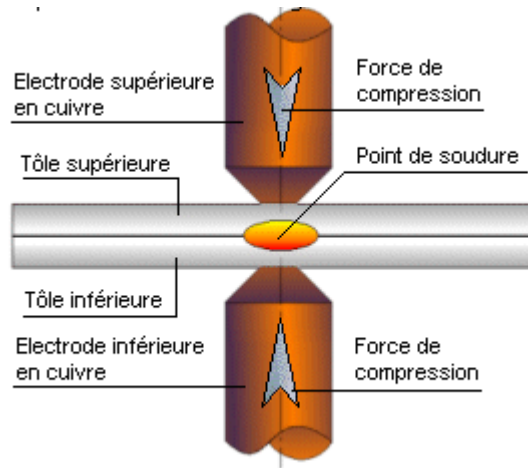


Figure I.2 : Procédé de soudage par point [4]

L'opération de soudage peut être décomposée en quatre phases principales schématisées dans la Figure 1.3

- ✓ **La phase d'accostage** : le rôle de cette phase est principalement mécanique. Elle consiste à assurer le contact parfait entre les surfaces à assembler et atteindre le niveau d'effort nécessaire,
- ✓ **La phase de soudage** : cette phase constitue la phase la plus importante. En effet, un courant électrique (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'Ampère) est établi dans le circuit et passe par les tôles à assembler, d'où la naissance d'un effet Joule au niveau de la surface de contact,
- ✓ **La phase de forgeage** : au cours de cette phase l'effort de pression des électrodes sur les tôles est maintenu. Cependant, le courant électrique n'est plus appliqué. Les électrodes assurent également le refroidissement dès que l'effet Joule est interrompu. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. Le maintien de l'effort lors du refroidissement assure une bonne solidification et la formation d'un noyau homogène, et par conséquent une bonne tenue mécanique de l'assemblage. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase.
- ✓ **La séparation** : pendant que les électrodes s'écartent, le noyau continue de se refroidir. Les électrodes sont opérationnelles pour réaliser le point suivant. [5]

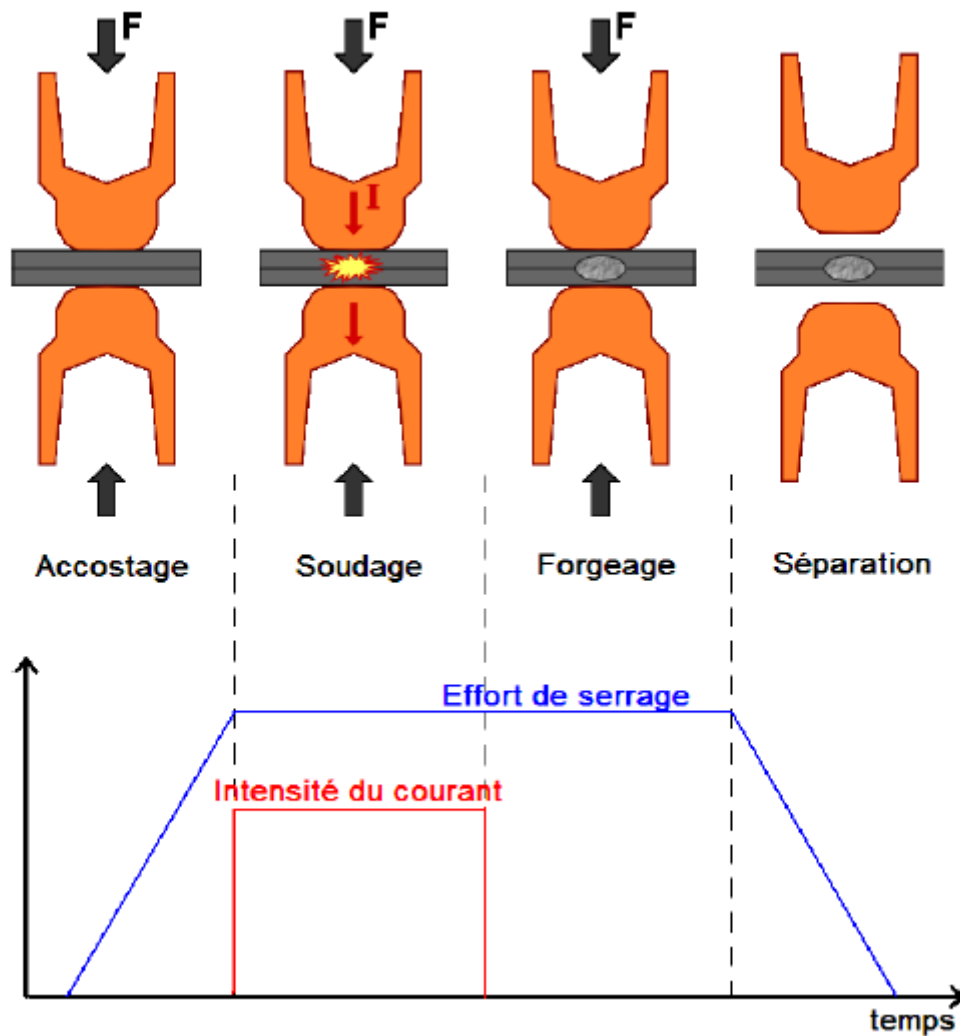


Figure I.3 : Principe se soudage par point [3]

3. Paramètre de procédé

Les paramètres de soudage doivent être adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Par exemple, on conçoit bien que des tôles plus épaisses nécessitent un apport d'énergie plus important, permettant de fondre plus de métal, donc de former un noyau plus gros.

✓ **L'effort de soudage** : est la première variable entrant en jeu puisqu'elle intervient dès la phase d'accostage. La valeur à appliquer (de l'ordre de quelques centaines de daN pour des produits d'épaisseur inférieure à 1 mm) dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder.

- ✓ **Le courant de soudage** est évidemment un paramètre décisif, car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. L'intensité efficace à délivrer (typiquement entre 5 et 20 kA) dépend, là encore, des propriétés mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder ainsi que de la présence ou non de revêtement. On utilise généralement un courant alternatif monophasé à 50 Hz, dont la valeur moyenne efficace sur une soudure peut être réglée par rapport à la valeur de consigne, par un dispositif électronique adapté. Même si nous ne l'avons pas considéré dans ce travail, il est possible d'utiliser d'autres types de courants, notamment le courant continu, obtenu par redressement et filtrage, à partir d'un générateur 1000 Hz.
- ✓ **Le temps de soudage** intervient au premier ordre dans l'énergie électrique dissipée. Ce paramètre, d'une valeur typique de quelques dixièmes de seconde, est donc, lui aussi, adapté aux propriétés des tôles à souder. Lorsque le temps de soudage désiré est particulièrement long, on le découpe en "pulsations" - ou "temps chauds" - séparés par des "temps froids".
- ✓ **Le temps de forgeage** nécessaire à la solidification de la soudure est généralement du même ordre de grandeur que le temps de soudage.
- ✓ **Electrode** : Les éléments sont des éléments essentiels pour ce procédé .un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique c'est un paramètre externe qui influe directement sur le domaine de soudabilité car il gouverne la taille du contact aux interfaces par son profil de face active. L'électrode joue trois rôles principaux :

Mécanique : c'est d'abord pendant la phase de serrage pour assurer le contact électrode entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur définie pour le soudage. Pendant le soudage et le maintien .l'électrode sert comme une stabilisatrice pour maintenir la zone fondue pendant le chauffage et le refroidissement par conséquent. Le matériau de l'électrode doit avoir une bonne tenue mécanique à chaud.

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

Thermique : l'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface .le matériau de l'électricité donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique. L'alliage de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr et Cu-Cr-Zr) est très répand pour le matériau de l'électrode grâce à ses performances en tenus mécanique à chaud et la bonne conductivité électrique et thermique. [6]

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

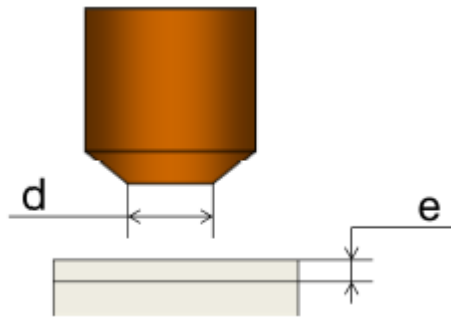


Figure I.4: Electrode de la soudure par point [7]

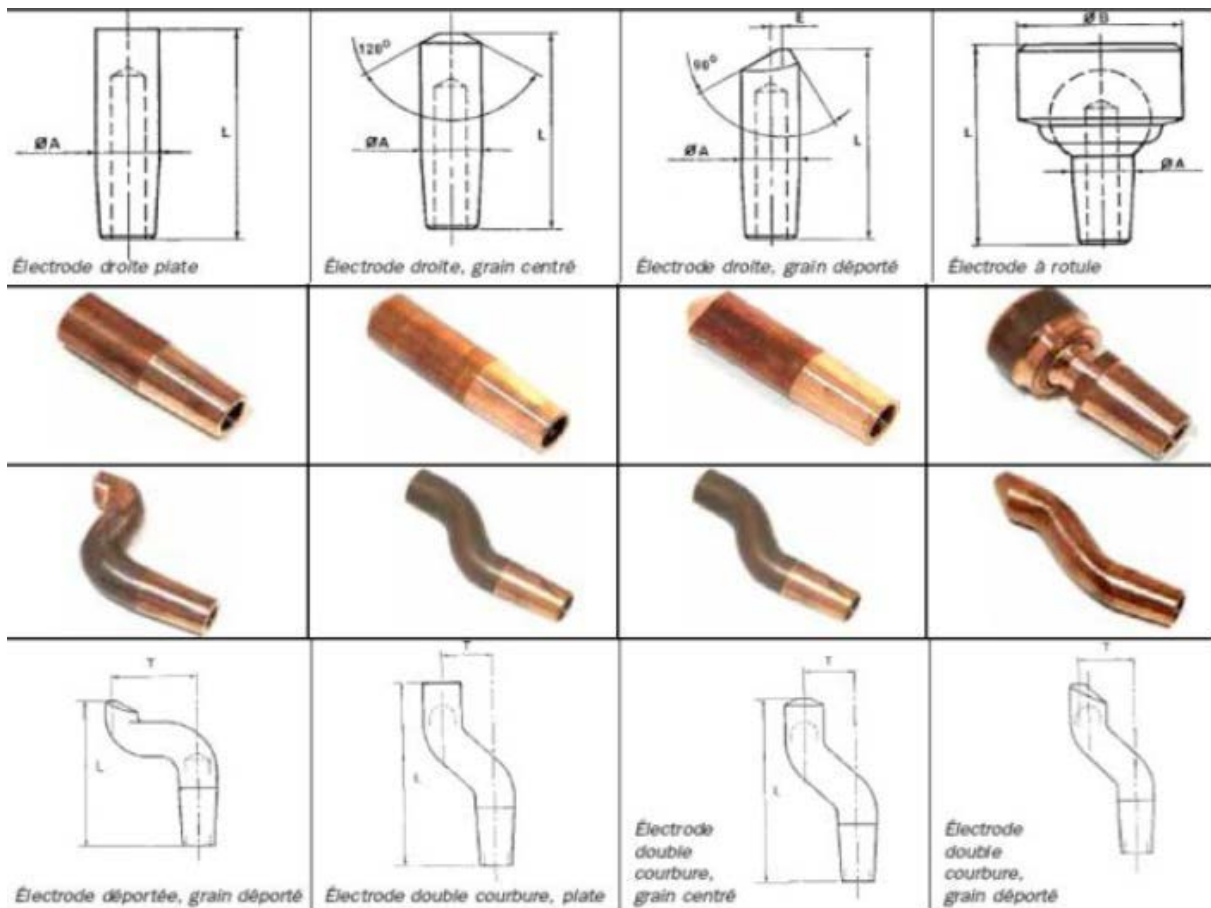


Figure I.5 : Différents formes des électrodes de la soudure par point

4. Mécanisme de formation de la soudure

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

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_0+t} RI^2 dt \quad [\text{Eq 1}]$$

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

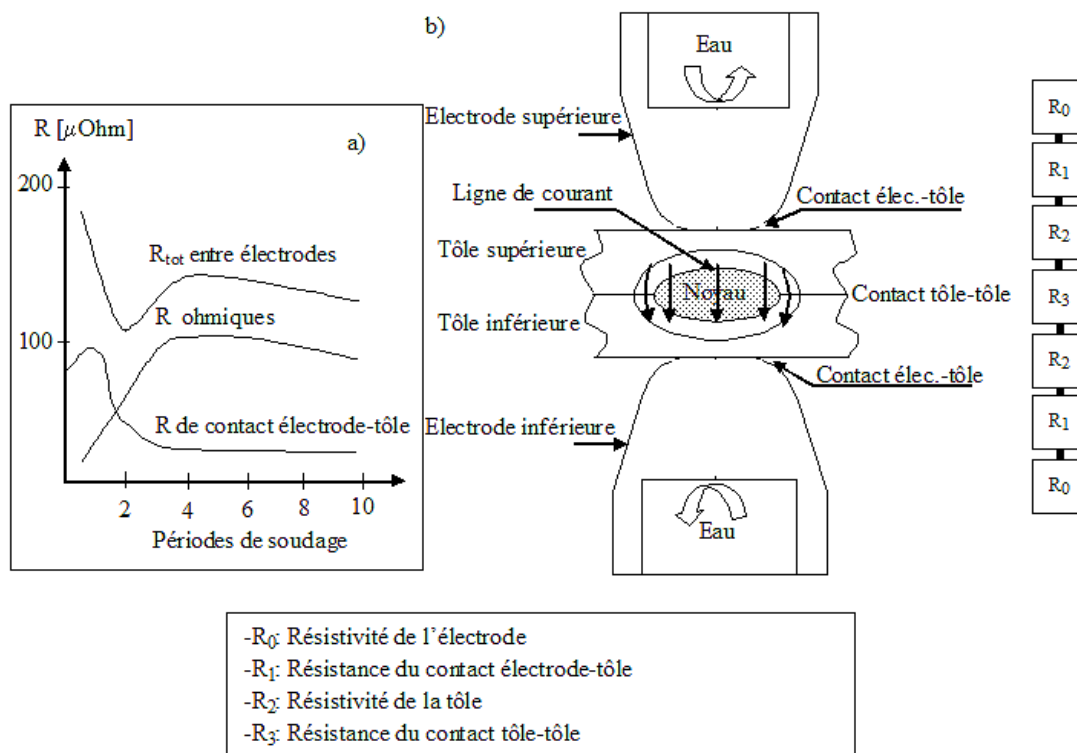


Fig. 1.6: Illustration des phénomènes électriques dans le procédé de soudage par points ;

(a) Evolution des résistances en cours de soudage d'un assemblage de tôles nues,

(b) Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [1]

5. Le point soudé

5.1. Géométrie

La Figure 1.7 présente le schéma d'un point soudé selon une coupe dans un plan contenant l'axe des électrodes. La géométrie d'un point soudé présente trois particularités :

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

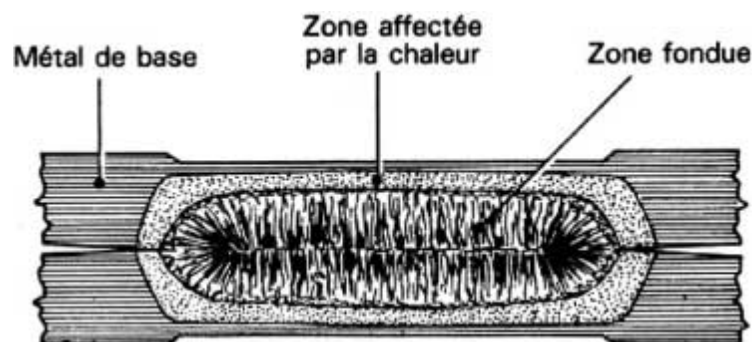


Figure1.7 : Soudage par points : coupe d'un point de soudure [8]

Globalement, trois zones principales peuvent être distinguées :

La première est le noyau fondu, zone où l'acier est passé à l'état liquide puis s'est refroidi très rapidement jusqu'à la température ambiante.

La deuxième est la zone dite "affectée thermiquement" (ZAT), c'est-à-dire la zone où la microstructure du métal de base a été modifiée par le cycle thermique imposé par le procédé de soudage. On considère en général que cette zone est celle où l'acier a vu des températures allant de 600°C environ jusqu'à la température de liquidus.

Enfin, la dernière zone est celle du métal de base proprement dit, où la microstructure est inchangée.

5.2. Microstructures

L'opération de soudage par points se caractérise par un cycle thermique très rapide 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 1.8 :

- ✓ La zone associée au métal de base **MB** : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600°C environ si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.
- ✓ La zone subcritique **SCZAT** : zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600°C et 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.

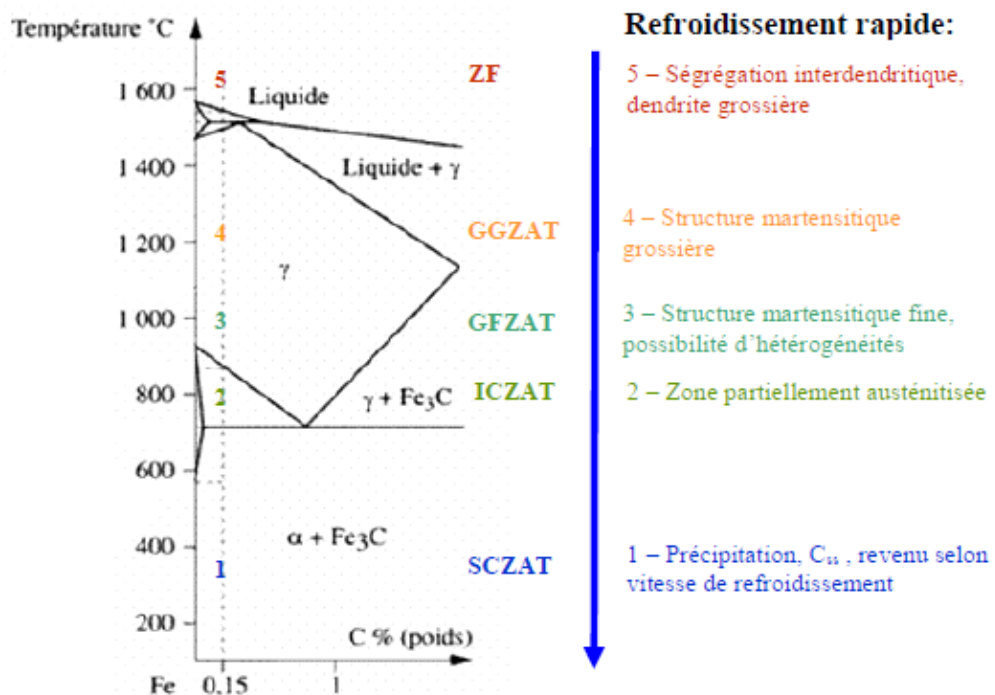


Figure 1.8. Microstructures générées par l'opération de soudage [9]

II. Les aciers galvanisés

1. La galvanisation

1.1. Définition

La galvanisation de l'acier est le processus de dépôt d'une couche de zinc à la surface d'un objet en acier. Plusieurs procédés de galvanisation de l'acier sont utilisés. Les plus connus sont les procédés de galvanisation à chaud et d'électrodéposition (ou galvanoplastie).

1.1.1. Procédé de Galvanisation à Chaud

La galvanisation correspond à la pratique d'immerger le fer ou l'acier dans un bain de zinc en fusion à une température de 450 degrés Celsius. L'immersion à chaud vient former une couche de zinc recelant un lien métallurgique à la surface du matériel, protégeant ainsi le fer et l'acier contre la corrosion de deux façons:

1. Le zinc agit à titre d'écran protecteur entre l'acier et l'atmosphère afin d'empêcher la corrosion de s'attaquer au métal de base.
2. Comme il est plus électronégatif que le fer ou l'acier, le zinc assure une protection cathodique par anodes sacrificielles. En d'autres mots, le zinc, qui s'oxyde 25 fois plus lentement que l'acier, va agir à titre de bouclier en protégeant l'acier des effets atmosphériques indésirables.

Le procédé de galvanisation comporte trois grandes étapes:

- A. Préparation de la surface
- B. Galvanisation
- C. Finition

A. Préparation de la surface

La première étape consiste à nettoyer et décaper l'acier afin d'enlever tout oxyde / couche de zinc ou agent contaminant tel que la graisse, la saleté, la rouille ou le tartre et à immerger le matériel dans un bain de flux visant à arrêter le processus d'oxydation du fer ou de l'acier. Nous avons 9 bassins différents pour la préparation des matériaux:

- Un(01) bassin de dégraissage
- Deux (02) bassins de rinçage à l'eau.
- Quatre (04) bassins d'acide à différents niveaux d'acidité.
- une (01) solution de flux d'eau saline pour réduire l'oxydation du matériel avant le bain de zinc.
 - un (01) bassin de dégraissage.
- Cellules de séchoir.

B. Galvanisation;

En deuxième étape, le matériel est prêt pour la galvanisation à chaud. Durant son immersion dans le bain de zinc, on laisse le matériel rejeter ses évaporats, puis on le retire lentement, enfin on le place dans le bassin de refroidissement.

C. Finition.

À l'étape finale, nous devons enlever le zinc excédentaire, inspecter le matériel puis le retoucher s'il y a lieu afin de correspondre aux plus hauts standards de qualité.

1.1.2. Electrodéposition (ou galvanoplastie)

Dans ce procédé, on plonge une pièce en acier dans un bain électrolytique composé d'une solution aqueuse de zinc et parcouru par un courant continu. Une couche de zinc se dépose alors par électrolyse à la surface de la pièce en acier.

2. Aciers galvanisés

Acier recouvert d'une couche de zinc (par un procédé de trempage à chaud ou de dépôt électrolytique) dans le but de le rendre plus résistant à la corrosion. L'**acier galvanisé** est notamment utilisé dans l'industrie automobile, la construction d'édifices et de structures telles que les pylônes.

2.1. Domaine de soudabilité

Tôles revêtus : sont généralement soudables, mais sous certaines conditions paramétriques particulières.

2.2. Domaine d'activités

- ✓ Pylône haute, moyenne et basse tension 400KV, 220KV, 60KV, 30KV pour lignes de transport d'énergie.
- ✓ Mats et tours de télécommunication avec supports d'antennes
- ✓ Mats de signalisation routière.
- ✓ Citernes, cuves, ballons d'eaux chaudes

2.3.Paramètres de soudage sur tôles d'acier galvanisé

Le tableau I.1 regroupe les paramètres de soudage de l'acier galvanisé pour différentes épaisseur [16]

Ep. (mm)	Partie active tronconique (mm)	Effort de soudage daN	Temps de soudage (périodes)	Courant de Soudage (A)	Ø du noyau fondu (mm)	Pas minimal des points (mm)
0.5	3.5 à 4	130 à 200	7 à 5	8500 à 9500	3.6	10
0.6	4 à 4.3	150 à 230	7 à 6	9000 à 10000	4	10
0.8	4.5 à 5	200 à 280	10 à 8	9500 à 11500	4.5	12
1	5 à 5.5	250 à 350	12 à 8	11000 à 13000	5	14
1.2	5.5 à 6	300 à 400	14 à 10	11000 à 14000	5.5	15
1.5	6 à 6.5	350 à 450	18 à 14	12000 à 15500	6	16
2	7 à 7.5	500 à 700	28 à 20	14000 à 19000	7	18
2.5	8 à 8.5	650 à 900	40 à 30	17000 à 25000	8	24
3	9.5 à 10	900 à 1200	50 à 40	22000 à 28000	9.5	30
4	12 à 13	1250 à 1400	80 à 60	24000 à 30000	12	45
5	13 à 14	1500 à 1800	120 à 80	26000 à 32000	14	50

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

Effet de courant de soudage a été étudié par Goodarzi et al. [10] ont montré que l'augmentation de courant de soudage fait augmenter la taille de la zone de fusion (figure 1.9) (Soudage sans appuis)

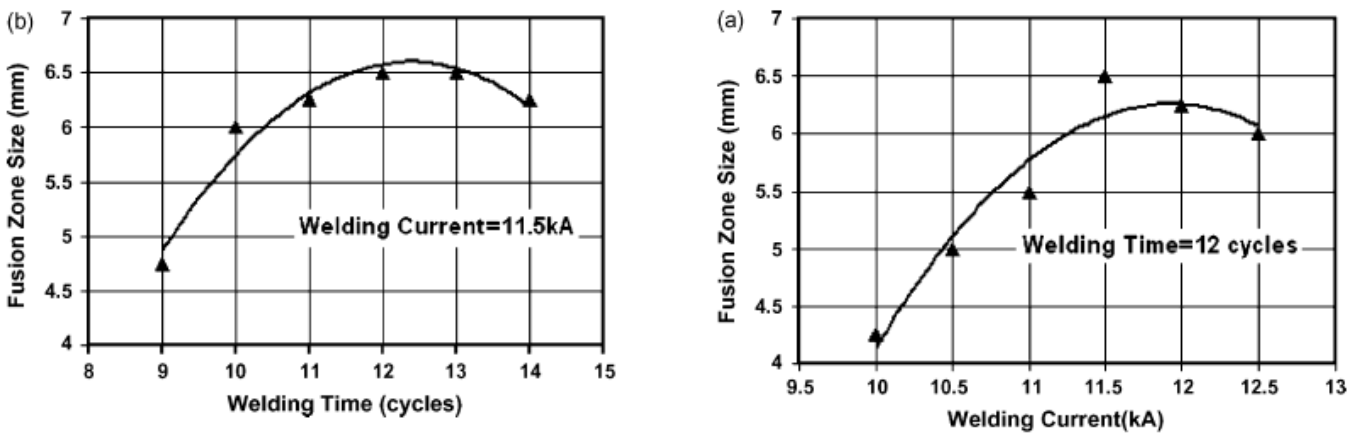


Figure I.9 : effet de courant de soudage par point sur la taille de zone de fusion de l'acier

2. Effet de courant de soudage a été montré par Lin, et al [11]. Ils n'ont montré que l'augmentation du courant de soudage fait augmenter le diamètre du noyau (figure 1.10) d'un côté. De l'autre coté ils ont montré que le courant de soudage fait augmenter aussi la charge de tension transversale.(soudage sans appuis)

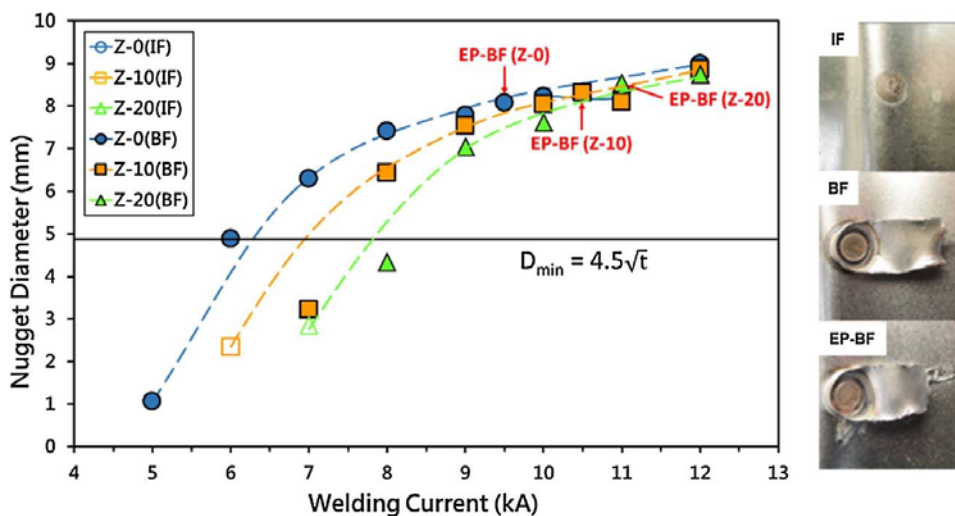


Figure I.10 : effet du courant de soudage par point sur le diamètre du noyau de l'acier

Boriwal, et al [12] étudier l'évolution de diamètre de noyau en fonction de la résistance à la traction.ils montre que l'augmentation de diamètre de noyau fait augmenter la résistance a la traction (figure 1.11) (sans appuis)

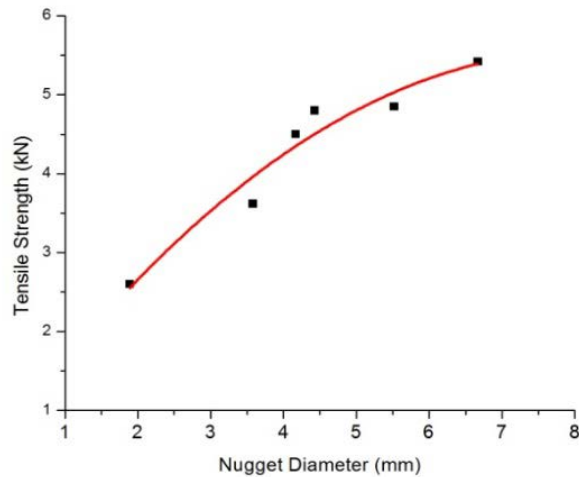


Figure I.11 : effet de diamètre de noyau sur la résistance a la traction de soudage par point

3. Effet de courant de soudage a été étudié par **Ma,et al. [13]** ils ont montré que l'augmentation de courant de soudage fait diminué le temps de soudage (figure1.12) d'un coté. D'autre coté ils ont montrent aussi que l'augmentation de courant augment la charge maximale (figure 1.13).

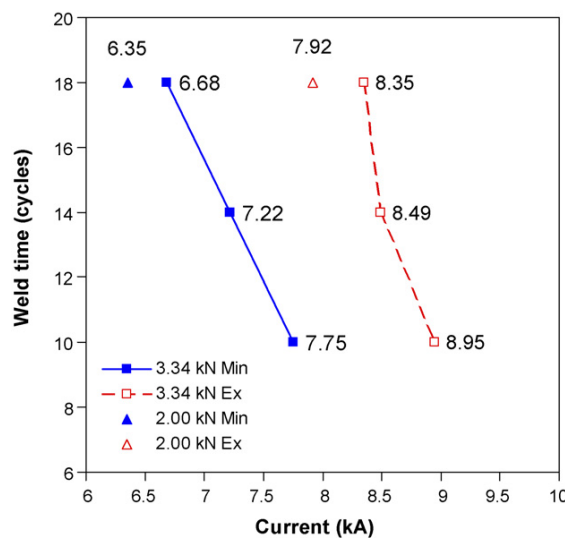


Figure I.12 : effet de courant de soudage par point sur le temps de soudage

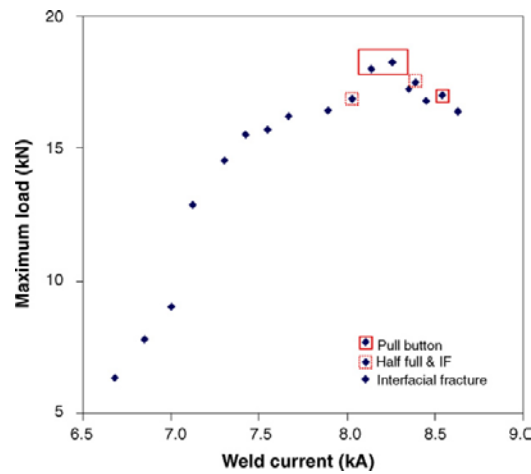


Figure I.13 : Effet de courant de soudage par point sur la charge maximal

4. Effet du temps de soudage a été étudié par **Rao et al [14]** .Ils ont montré que l'augmentation du temps de soudage fait augmenter le diamètre du noyau.

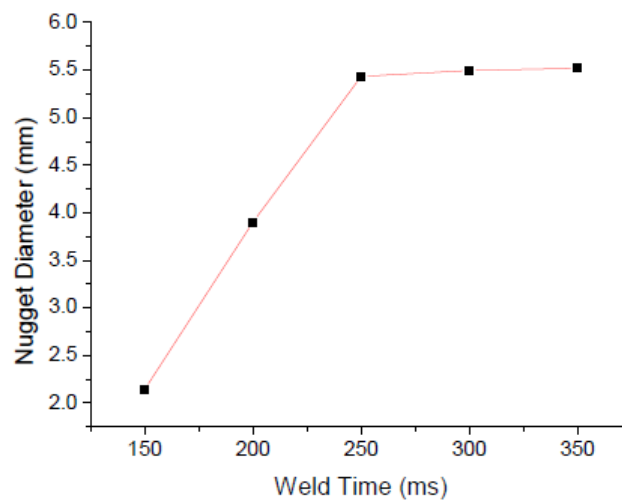


Figure I.14 : effet du temps de soudage par point sur le diamètre du noyau de l'acier

Chapitre II

Etude expérimentale

Introduction

Le procédé de soudage est réalisé par une machine TECNA (ITALI). Des tôles de 2 mm d'épaisseur, l'acier galvanisée Z275 étudié (Tableau 1.2.3) sont soudées avec des électrodes de 7 mm de diamètre face active et un effort aux électrodes de 6 bar et 6.5 bars, dans un circuit changeable en trois cycles 25, 30, 35, (cycles) et une intensité variable entre 10 -12 -14 - 15 (KA).

1. Matériau d'étude : acier doux galvanisé Z275

1.1. Définition de Z275

Acier recouvert d'une couche de zinc (par un procédé de trempage à chaud ou de dépôt électrolytique) dans le but de le rendre plus résistant à la corrosion. L'**acier galvanisé** est notamment utilisé dans l'industrie automobile, la construction d'édifices et de structures telles que les pylônes.

1.2. Caractéristiques chimiques et physiques

Tableau II.1 : Composition Chimique de l'acier doux revêtus Z275

Elément	C	P	S	Mn	Si
Composition en coulée	<0.12%	<0.045%	<0.045%	<0.060%	<0.50%

Tableau II.2 : caractérisations mécanique de l'acier doux revêtus Z275

Re(N/mm ²)	Rm(N/mm ²)	A ₈₀ (%)
=<280	270<Rm < 410	>=28

1.3. Caractérisation mécanique

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



Figure II.1 : Machine 600 KN pour d'essai de traction

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

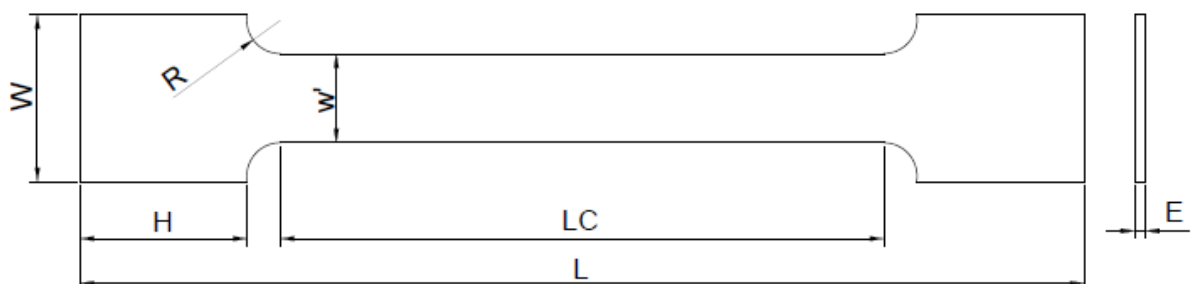


Figure II.2 : Dimension des éprouvettes de traction

Avec :

$W=30 \text{ mm}$ (largeur des têtes)

$w' = 16 \text{ mm}$ (largeur de la section réduit)

L = 180 mm (longueur total)

L_c = 120 mm (longueur calibrée)

E = 2 mm (épaisseur de l'éprouvette)

H = 30 mm (longueur des têtes)

R = 6 mm (rayon)

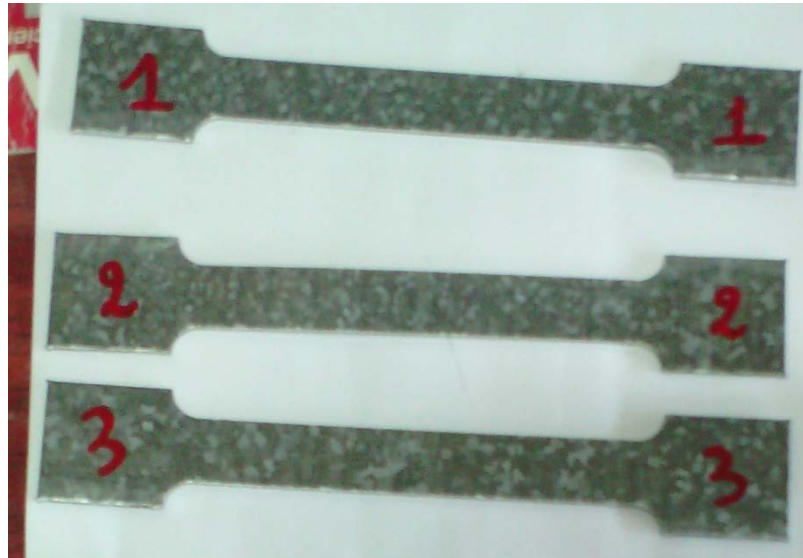


Figure II.3 : Epreuves de traction réalisées en acier revêtus

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge croissant jusqu'à provoquer la rupture. On détermine ainsi une limite élastique, qui est la charge maximale que peut subir le métal sans subir une déformation permanente, et une charge de rupture, qui est la charge maximale que peut supporter l'éprouvette sans rompre.

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.4 Les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes contraintes/déformations données par la figure II.5

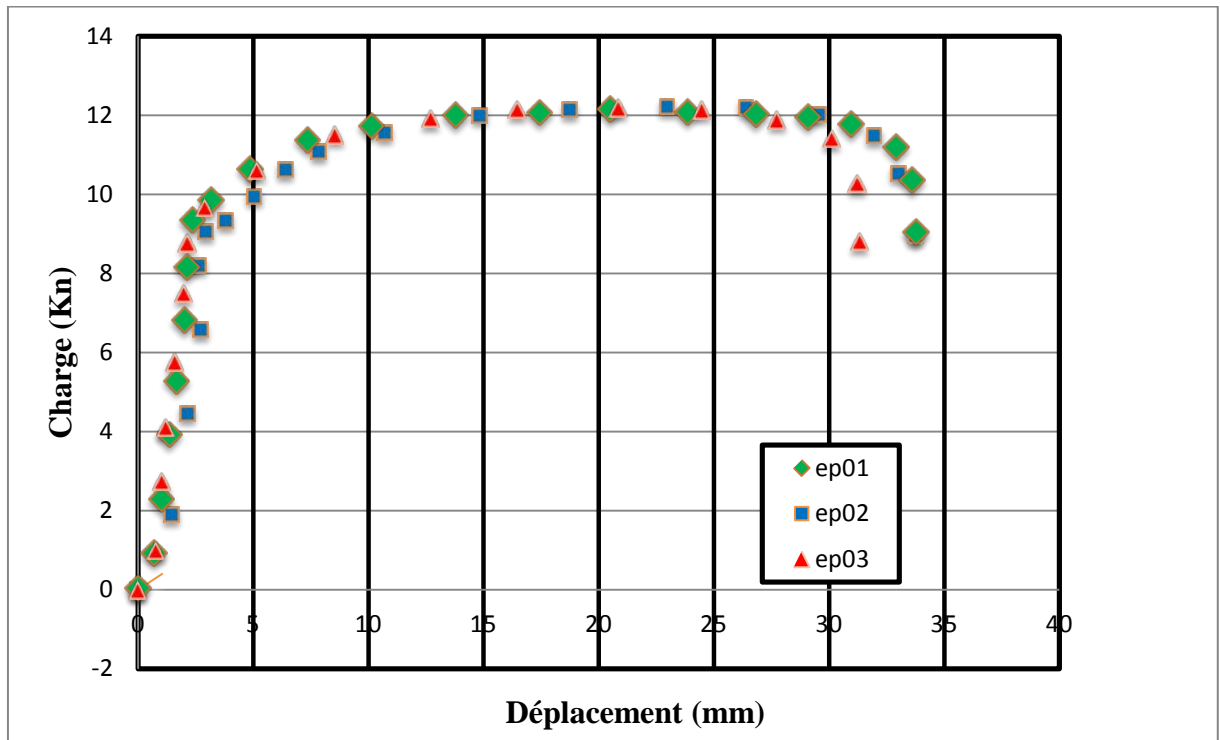


Figure II.4 : Courbe De Traction Charge / Déplacement

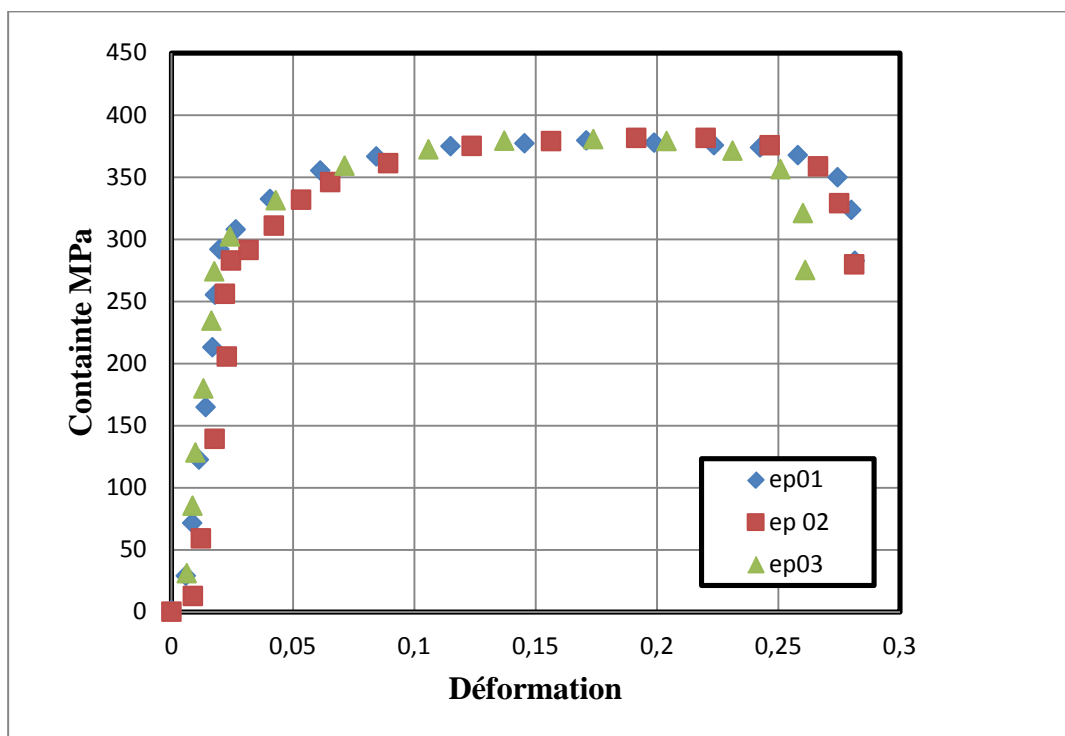


Figure II.5 : Courbes Conventionnelles Contraintes / Déformations**Tableau II.3 :** Caractéristique mécanique de l'acier z275

	E (MPa)	Rm (MPa)	Re(MPa)	A%
Données fournisseur	200000	270	280	28
Résultats Expérimentaux	200000	382.232	298.439	28.33

1.4. Choix du paramètre de soudage par point pour Z275

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

Les paramètres du soudage par point est essentiellement : -

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

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

L'éprouvette en acier galvanisée est constituée de deux tôles minces de dimensions 100 x 30 (en mm) avec une surface de recouvrement de 30 x 30 (en mm). Les deux tôles sont liées par un point soudé réalisé au moyen du procédé de soudage par résistance. Les deux tôles assemblées sont identiques (même matériau, mêmes dimensions). A l'épaisseur e près, toutes les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont analogues.

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

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

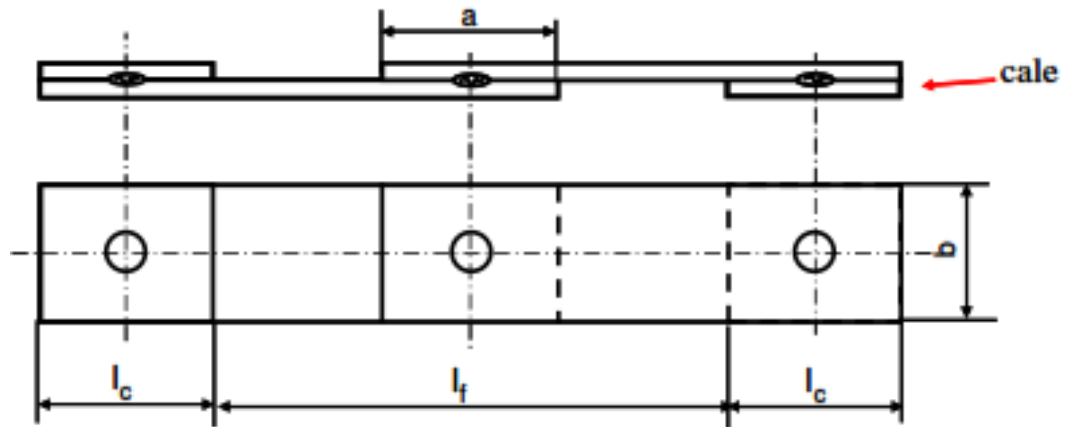


Figure II.6 : Assemblage soudé par point des éprouvettes Z275

Avec $a=30\text{mm}$

$b= 30\text{mm}$

$l_c=30\text{mm}$

$l_f=120\text{mm}$

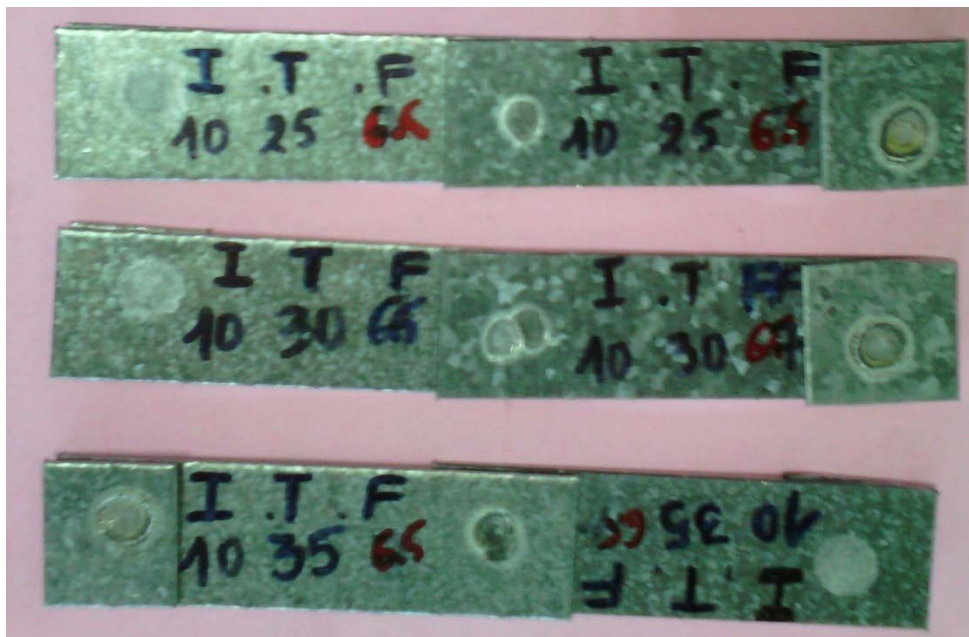


Figure II.7 : Exemple des pièces assemblées par point des éprouvettes enZ275 pour une intensité de 10 Ka et un effort de 6.5 bars

Tableau II.4 : Les différents essais de soudage par point pour les éprouvettes en aciers revêtus Z275

N° des éprouvettes	EP (mm)	Ø électrode (mm)	Intensité (KA)	Temps Cycles	Effort (bar)
1	2	7	10	25	6
2				20	6
3				35	6
4				25	6.5
5				30	6.5
6				35	6.5
7	2	7	12	25	6
8				30	6
9				35	6
10				25	6.5
11				30	6.5
12				35	6.5
13	2	7	14	25	6
14				30	6
15				35	6
16				25	6.5
17				30	6.5
18				35	6.5
19	2	7	15	25	6
20				30	6
21				35	6
22				25	6.5
23				30	6.5
24				35	6.5



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

2. Fiche technique machine de soudage par point TECNA

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

3. Essais de cisaillement par traction

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

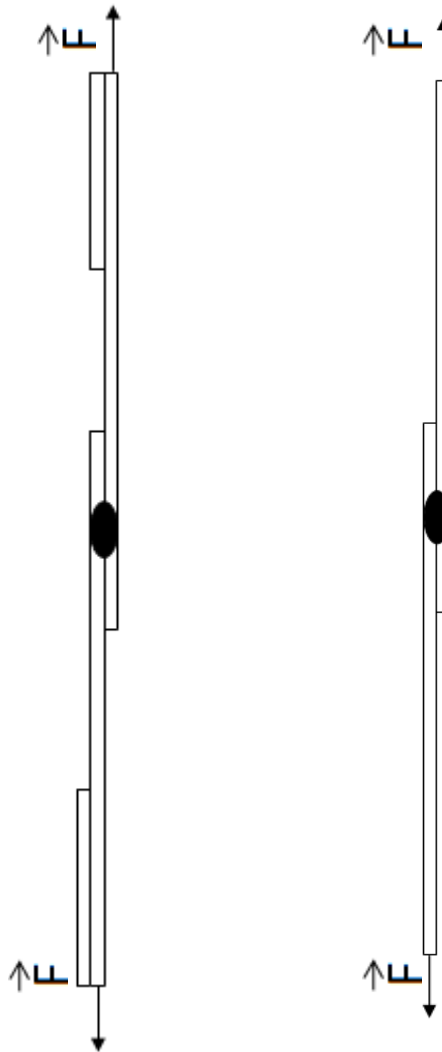


Figure II.9 : cisaillement par traction

Chapitre III
Résultats et
discussions

Introduction

Des essais de caractérisation ont été effectués, ainsi que l'observation de la rupture d'un point soudé. La quantification du comportement et de la Rupture des différentes zones d'un point soudé devra permettre une meilleure compréhension De la soudabilité des aciers galvanisés. Dans cette partie on a étudié le mécanisme de rupture et l'effet des paramètres de soudage ont été étudiés sur : - La comportement mécaniques des joints soudés- La résistance mécanique à la rupture de l'assemblage soudé.

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.

Deux modes de ruine des éprouvettes sont observés au cours des essais conduits jusqu'à rupture. Le premier mode est un cisaillement du noyau fondu dans le plan commun aux deux tôles. Le deuxième mode c'est une rupture par déboutonnage. La rupture se produit autour du noyau dans la ZAT ou dans le MB, aboutissant au déboutonnage total du noyau à travers l'épaisseur d'une des deux tôles assemblées.

La figure 3.1 présente deux éprouvettes rompues suivant les deux modes de ruine distincts : (a) par rupture du noyau fondu du point soudé dans sa section droite minimale, (b) rupture par déboutonnage.



Figure III.1 : les mode de (a) par rupture du noyau fondu du point soudé dans sa section droite minimale, (b) rupture par déboutonnage.

2. Facteurs principale qui influent sur le mécanisme de la rupture

- ✓ Facteur géométrique influant sur la sollicitation mécanique :
 - Dimensions relatives du noyau fondu vis-à-vis de l'épaisseur de tôle et de la largeur de l'éprouvette.
 - Espacements entre mors de la machine de traction.
 - Acuité du fond d'entaille
- ✓ Facteurs métallurgiques liés au cycle thermique vécu localement et à la composition chimique de l'acier
 - Trempabilité de l'acier et fragilité des phases dures pouvant être formées au cours du soudage.
 - Propriété mécaniques relatives du métal de base et des différentes zones du point soudé.
 - Inclusion ou porosité pouvant influencer le chemin de fissuration.

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

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

La procédure expérimentale retenue pour l'étude de l'endommagement des points soudés repose sur des essais de traction continus. Les mêmes paramètres retenus plus haut ont été appliqués sur le comportement à la résistance mécanique. La sollicitation de l'interface en traction cisaillement est principalement tangentielle où elle est à dominante normale. En conséquence, les modes dominants à l'interface devraient être le mode II dans le plan de symétrie de l'éprouvette et le mode III à 90° sur la périphérie du point. En revanche, la tôle autour du point est soumise globalement à une traction.

Un certain nombre d'auteurs ont rapporté des cas de déboutonnage dans le Métal de Base en traction cisaillement pour des aciers galvanisés. La rupture se produit par localisation de la déformation en SCZAT / MB dont la limite d'élasticité est faible par rapport à celles des zones du point soudé. La façon de l'évolution de l'endommagement pour l'assemblage en traction

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

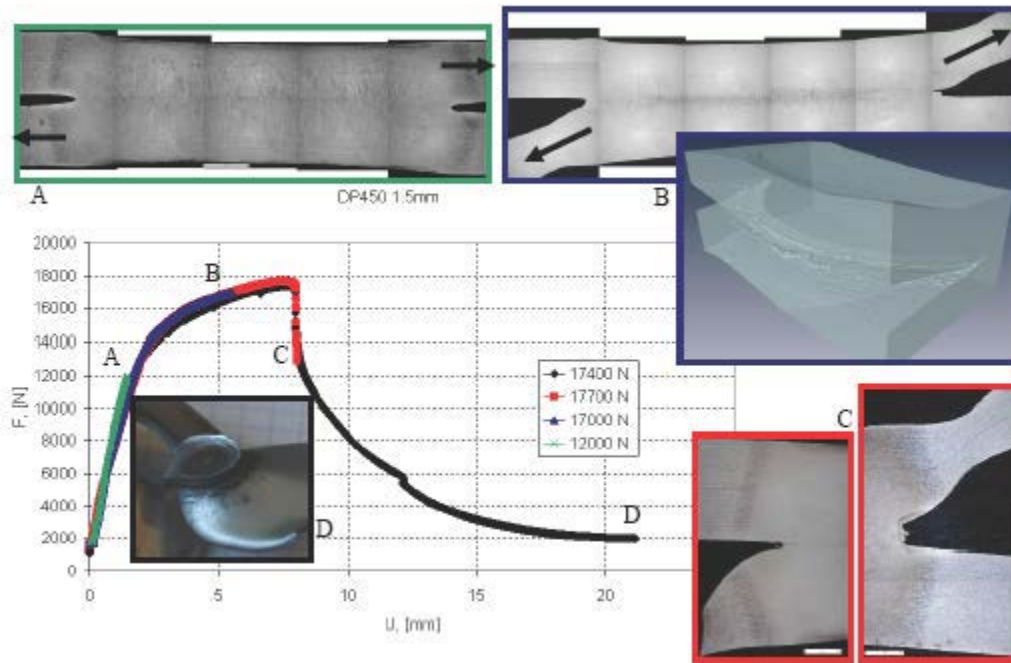


Figure III.2 : Evolution de l'endommagement d'un acier de haute résistance au cours de l'essai de traction cisaillement [15]

4. Effet des paramètres de soudage par point sur le comportement mécanique des joints soudés

Les figures 3.1 à 3.10 montrent les effets des paramètres de soudage (intensité du courant, effort et le temps du soudage) sur le comportement mécanique des assemblages soudés par points pour des essais de traction/cisaillement.

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

Les courbes 3.1 à 3.4 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 6.5 bars à $t=30$ et $t=35$ cycles et pour $I=12, 14, 15$ et $10KA$.

Les courbes illustrent l'effet de l'effort sur le comportement mécanique des joints soudés, elles présentent plusieurs zones : au début on observe une petite déformation suivie directement par une rotation du point pour aligner les tôles dans la direction de chargement, un point donne les charges maximales de rupture, puis la représentation des efforts maximums atteints lorsque la rupture s'est propagée dans l'épaisseur dans la zone de striction de l'une des tôles et propagation de la rupture dans le métal de base MB autour du point et déchirement de l'éprouvette jusqu'à la rupture finale.

Une augmentation de l'effort de soudage a pour effet de diminuer la taille de la zone fondue et accroît l'acuité d'entaille, ce qui semble avoir une influence défavorable.

Pour $I=15 KA$ et $T=35 Cycles$: on observe que les limites d'élasticité sont égales pour les deux efforts 6 et 6.5 bars, la même remarque pour la limite de rupture. Elles montrent une rupture par déboutonnage

Pour $I=14KA$ et $T=30 Cycles$: la limite d'élasticité et la limite de rupture pour 6 bars est plus grande que pour 6.5 bars. Elles montrent une rupture par déboutonnage avec un noyau plus profond

Pour $I=12 KA$ et $T=35 Cycles$: une limite d'élasticité égale, la même observation pour la limite de rupture pour les deux efforts. Elles illustrent une rupture inter faciale.

Pour $I=10 KA$ et $T=35 Cycles$: pour les deux efforts on a aucune limite d'élasticité et aucune limite de rupture. Elles montrent une rupture inter faciale

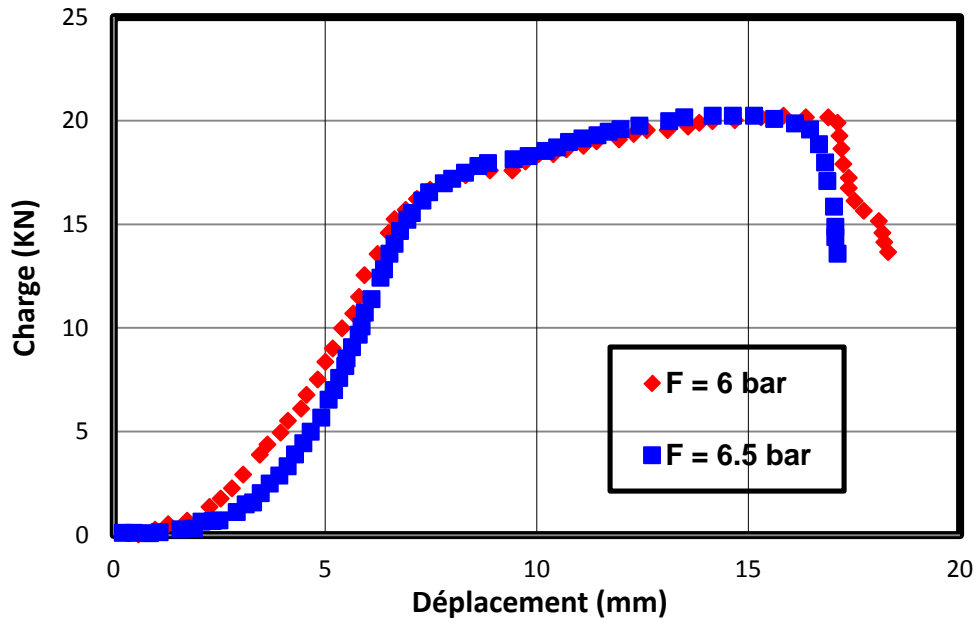


Figure III.3.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité **15 KA** et un temps de **35 Cycles**



F=6 bars



F=6.5 bars

Figure III.3.b : effet de l'effort de soudage de l'assemblage soudé pour **I=15 KA, T=35 Cycles** et **F=6 ET 6.5 bars**

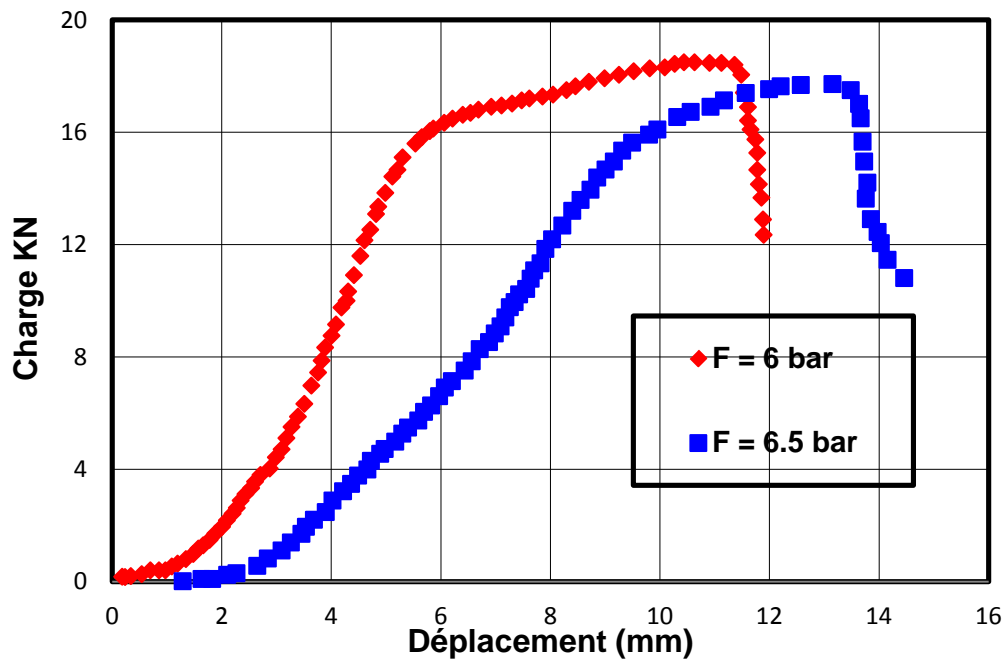


Figure III.4. a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité 14 KA et un temps de 30 Cycles.



F=6 bars



F=6.5 bars

Figure III.4.b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour I= 14 KA, T= 30 cycles et F=6 et 6.5 bars

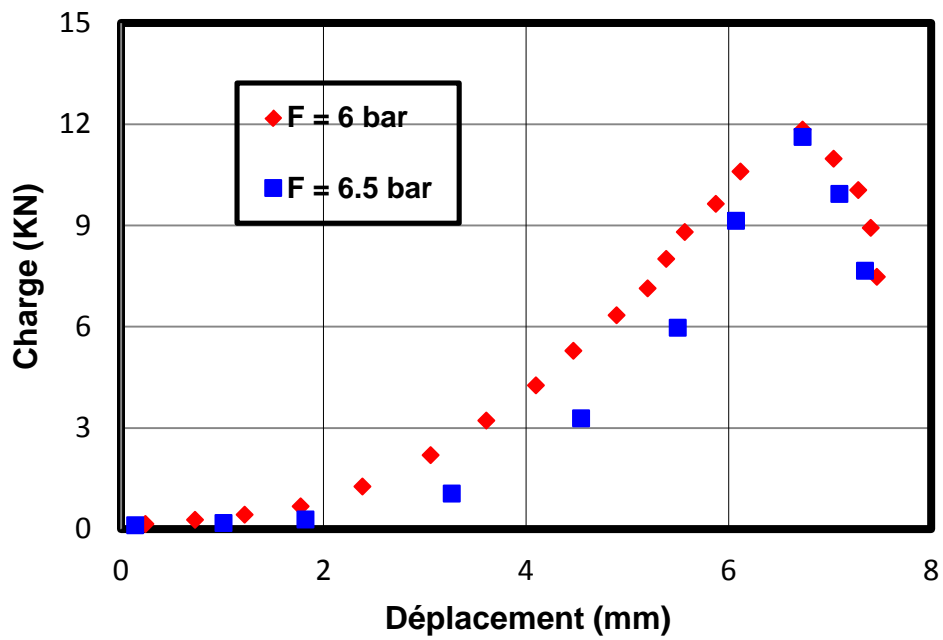


Figure III.5.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité **12 KA** et un temps de **35 Cycles**



F=6 bars



F=6.5 bars

Figure III.5.b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour **I= 12 KA**,
T= 35 Cycles et **F=6 et 6.5 bars**

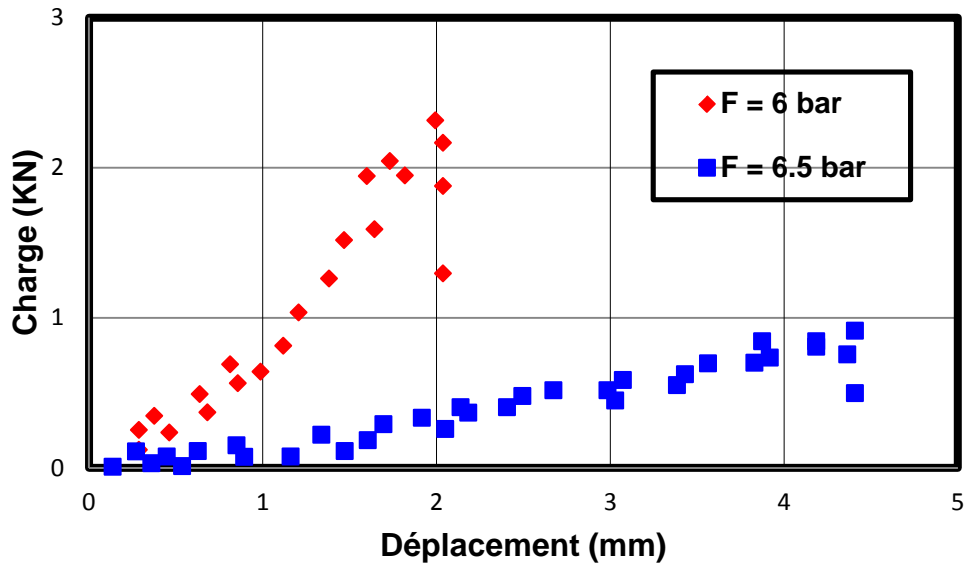


Figure III.6.a : Effet de l'effort de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une intensité **10 KA** et un temps de **35 Cycles**.



F=6 bars



F=6.5 bars

Figure III.6. b : Effet de l'effort de soudage sur de l'assemblage soudé pour **I= 10 KA**,
T= 35 cycles et **F=6 et 6.5 bars**

4.2. Effet de l'intensité de courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudé

Les courbes de 7 à 9 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 6.5 bars à $T=25$ et $T=35$ cycles et pour $I=12, 15$ et KA .

Les courbes illustrent l'effet de l'intensité du courant de soudage en présence de des effets du temps et de l'effort. L'effet du temps et de l'effort de soudage reste très faible comparativement par rapport à l'effet de l'intensité du courant de soudage.

Le type de rupture a été observé comme séparation ($I=12KA$, $T=25$ et 35 cycles, $F=6$ et 6.5 bars) et comme rupture de déboutonnage pour ($I=15$ Ka, $T=25$ et 35 cycles, $F=6$ et 6.5 bars).

On observe aussi que l'augmentation de l'intensité du courant de soudage fait augmenter la zone de déformation plastique et la charge de rupture, et accroît la taille de la zone fondue et entraîne une légère augmentation de la résistance à la fatigue.

La résistance au cisaillement à la traction augmente avec l'augmentation du courant de soudage

Lors de l'assemblage de tôles d'acier galvanisé, une résistance maximale à la traction et au cisaillement est obtenue avec un courant de soudage de 15 kA en 35 cycles.

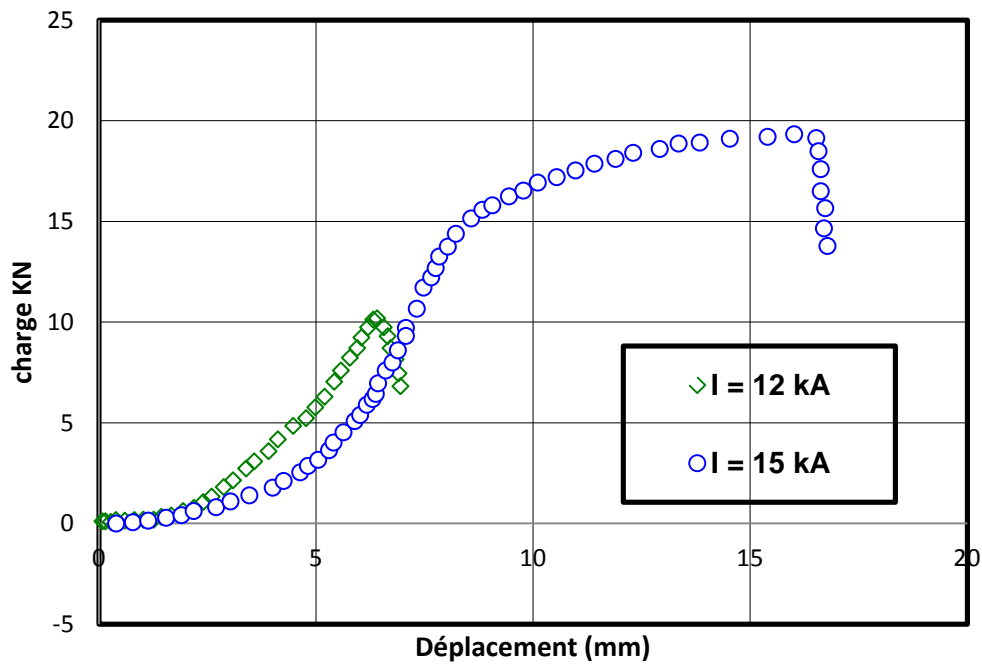


Figure III.7.a: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 KA** et un temps de **25 cycles**.



I=12 KA



I=15KA

Figure III.7.b: Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 KA** et un temps de **25 cycles**.

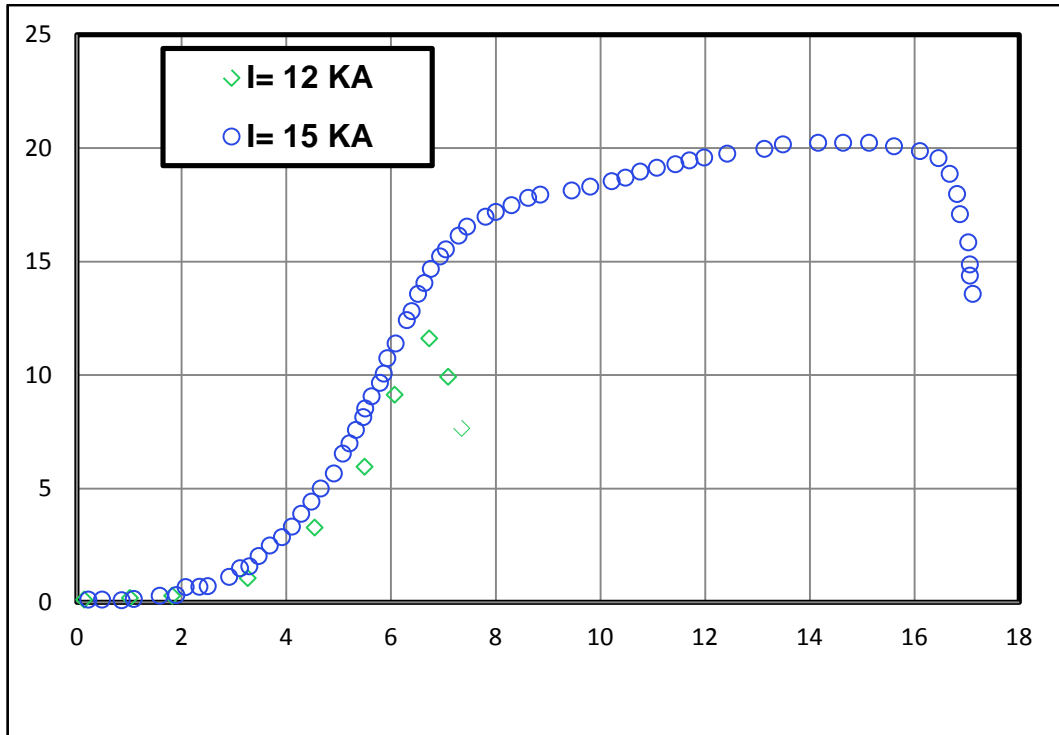


Figure III.8.a. Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 KA** et un temps de **35 cycles**.



I=12 KA



I=15 KA

Figure III.8.b. Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 KA** et un temps de **35 cycles**.

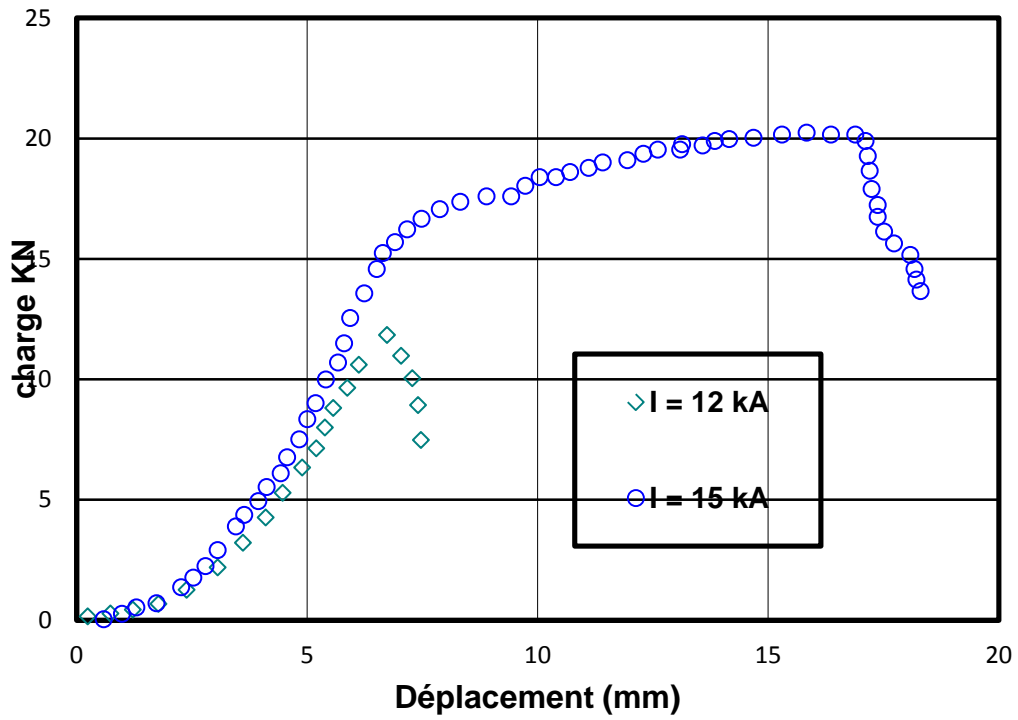


Figure III.9.a : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et un temps de **35 cycles**.



I=12KA



I=15KA

Figure III.9.b : Effet de l'intensité de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et un temps de **35 Cycles**.

4.3. Effet de temps sur le comportement mécanique des joints soudé

L'influence de l'effort de maintien sur le comportement mécanique est étudiée. Cette étude a montré que l'augmentation du temps de soudage entraîne une transition entre le mode de rupture inter faciale et le mode de rupture par déboutonnage. En effet, pour un faible temps de maintien, et par conséquent un petit noyau soudé formé, une rupture inter faciale est obtenue.

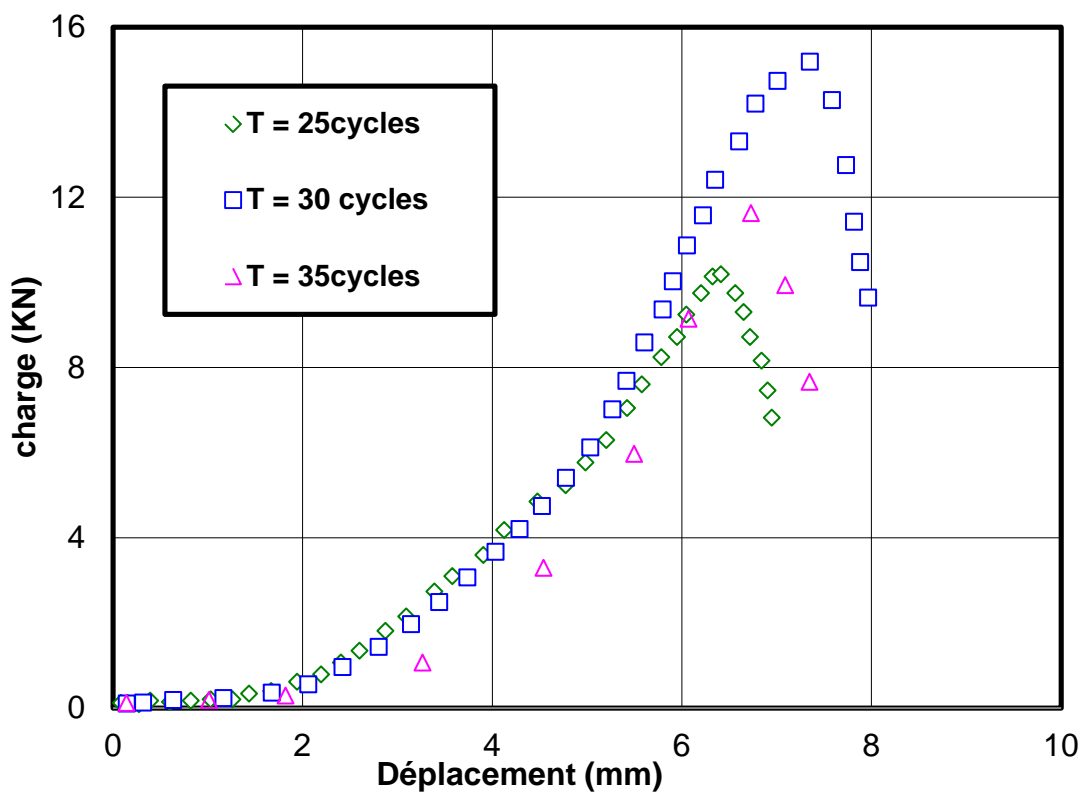


Figure III.10.a: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 bars** et une intensité de **12 KA**.

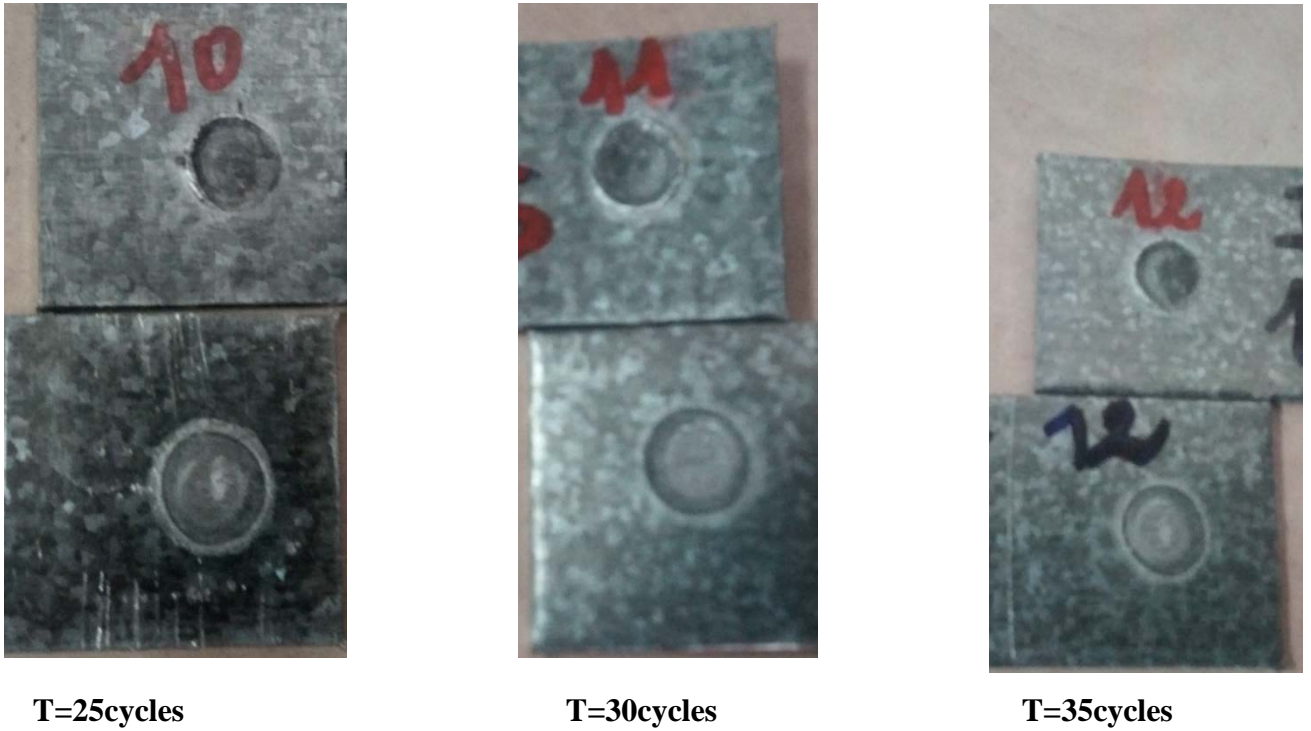


Figure III.10.b: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 bars** et une intensité de **12 KA**.

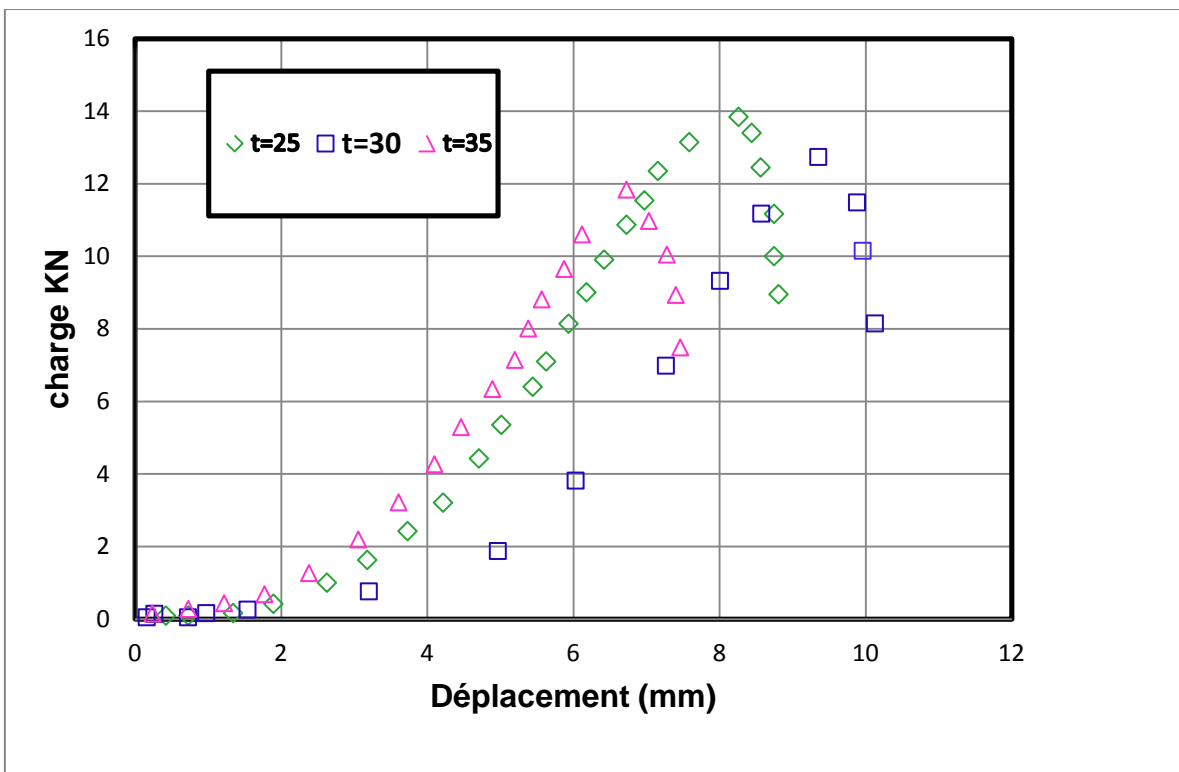


Figure III.11.a: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et une intensité de **12 KA**.



T=25 cycles

T=30 cycles

T=35cycles

Figure III.11.b: Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6.5 bars** et une intensité de **12 KA**.

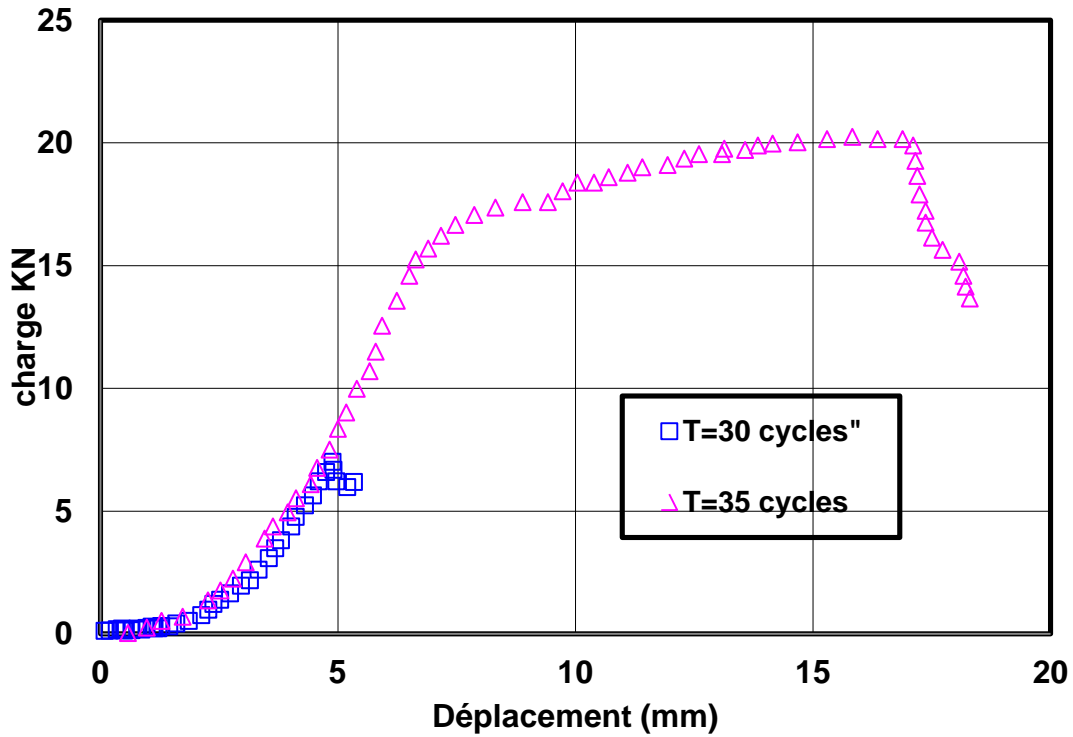


Figure III.12.a : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et une intensité de **15 KA**.



T=35 cycles



T=30cycles

Figure III.12.b : Effet de temps de soudage sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et une intensité de **15 KA**.

4.4. Effet des appuis sur le comportement mécanique des joints soudé

La courbe charge /déplacement montre l'effet des appuis sur le comportement mécanique des joints soudé. On observe que la limite d'élasticité est la même pour les deux efforts, est un petit décalage pour la limite à la rupture.

Présence des talons d'équilibrage des efforts permet le décalage de la courbe charge déplacement et augmente la partie de la déformation élastique

Le niveau de la charge maximale n'est pas affecté par la présence des appuis.

L'analyse visuel des l'éprouvettes rompues montre la présence de déformations par flexion dans le cas des éprouvettes sans appuis.

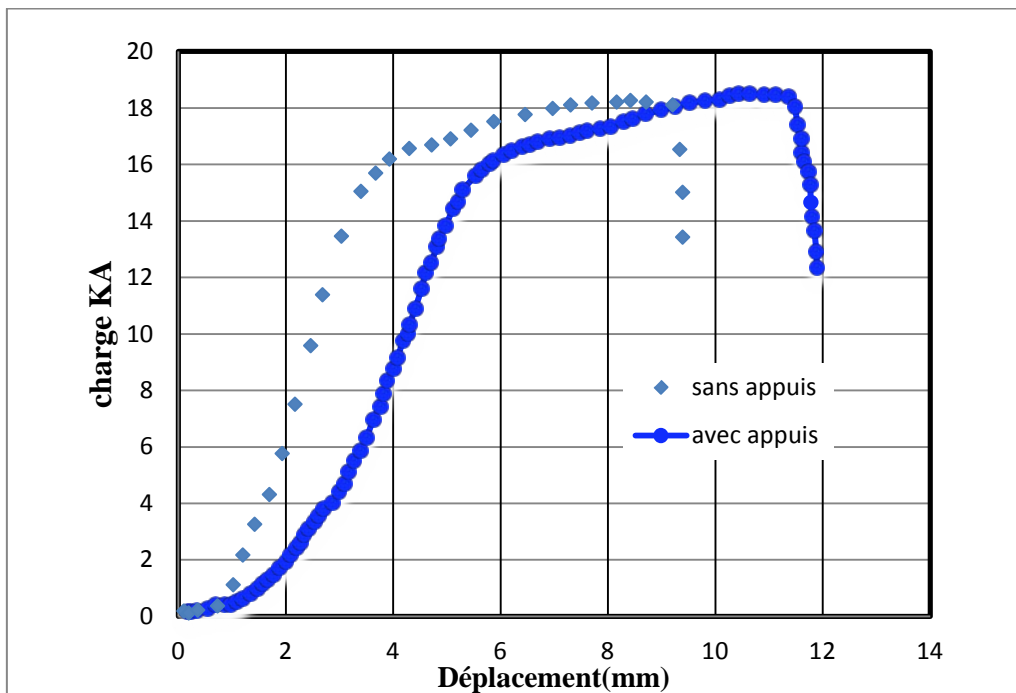


Figure III.14.a : Effet des appuis sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et une intensité de **14 KA** et un temps de **30 cycles**.



Soudage avec appuis



soudage sans appuis

Figure III.14.b : Effet des appuis sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé pour une charge de **6 bars** et une intensité de **14 KA** et un temps de **30 cycles**.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail présente une étude expérimentale de l'effet des paramètres de soudage sur le comportement mécaniques des joints soudés par points de l'acier galvanisé Z275 avec équilibrage des efforts.

L'étude expérimentale conduit les conclusions suivantes :

- Les essais de traction/cisaillement effectués montrent que le paramètre intensité du courant est dominant par rapport au temps et à l'effort de soudage sur l'évolution de la courbe charge/déplacement.
- L'augmentation de l'intensité du courant de soudage augmente la zone de déformation plastique et la charge de rupture.
- Résistance à la rupture augmente avec l'augmentation du courant de soudage.
- Présence des talons d'équilibrage des efforts permet le décalage de la courbes charge/déplacement, et augmente la partie de la déformation élastiques
- Le niveau de la charge maximale n'est pas affecté par la présence des appuis

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

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

***Références
bibliographiques***

Références bibliographique

- [1] Chainarong Srikunwong « **Modélisation du procédé de soudage par points** » 4 Jun 2007
- [2] Hongyan Zhang, Jacek Senkara « resistance welding fundamentals and applications » Published in 2006 by CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487–2742
- [3] Elise Gauthier « Etude expérimentale et numérique de la dégradation cyclique des électrodes en CuCr1Zr lors du soudage par résistance par point » 24 Jul 2014
- [4] www.chez.com/soudage 2000
- [5] Rim Chtourou « Tenue mécanique des assemblages soudés par point multi-tôles et acier multigrades : étude expérimentale, modélisation macroscopique et procédure d'identification » 16 Feb 2018.
- [6] Gaétan MONARI « Sélection de modèles non linéaires par leave-one-out Etude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points » thèse de doctorat de l'université paris 6 3 novembre 1999
- [7] service SD : soudage par résistance édition 2016
- [8] Roland CAZES « Soudage par résistance » Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité ex-Directeur des Recherches. Société Sciaky
- [9] Sylvain DANCETTE (ingénieur) « Comportement mécanique des soudures par points : mécanismes et stratégies de prédiction dans le cas des tôles en acier pour automobile » Année 2009
- [10] Goodarzia et al « Dependence of overload performance on weld attributes for resistance spot welded galvanized low carbon steel » Journal of Materials Processing Technology 209 (2009)
- [11] Lin et al « Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel » Journal of Materials Processing Tech. 251 (2018)
- [12] Boriwal et al « Failure modes of spot welds in quasi – static tensile – shear loading of coated steel sheets »

Références bibliographique

- [13] **Ma et al** «Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel»
Materials Science and Engineering A 485 (2008) 334–346
- [14] **Rio et al** « Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel
» Journal of Materials Processing Technology 2017.03.027
- [15] **Syvain Dancette** : Comportement mécanique des soudures par point : mécanisme et
Stratégie de prédiction dans le cas des tôles en aciers pour automobile. Thèse de Doctorat,
Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2009
- [16] **Claude DROUArt** « soudage par résistance» ingénieur- responsable de société ARO.
Novembre 1993