

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen
Faculté de Technologie



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Construction Mécanique**

Présenté par : **TERNANE Fouad**

Intitulé du sujet

Caractérisation mécanique des assemblages soudés à matériaux hétérogènes

Soutenu publiquement le 10 Juillet 2023, devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------------------------|-----|--------------------------|
| Président : CHEIKH Abdelmadjid | Pr | Université de Tlemcen |
| Encadreur : BENACHOUR Mustapha | Pr | Université de Tlemcen |
| Co- Directeur : SEBAA Fethi | Pr | Université de Tlemcen |
| Examineur 1 : RAHOU Mohammed | Pr | ESSA-Tlemcen |
| Examineur 2 : MERGHACHE Sidi Mohammed | MCA | Université de Tissemsilt |

Année universitaire 2022-2023

DEDICACES

A mes chers parents, ma tante et ma deuxième mère Hayat, qui m'ont encouragé et aidé tout ma vie.

A ma sœur Halima et sa famille.

A ma grand-mère Halima.

A mes tantes : Samia, Yakout, Khadija et ses familles.

A l'esprits de défunts de ma grand-père Belarouci Rabeh et mon coussin Zouhir.

Au futur docteurs : Iheb, Abdelfetah, Hakim, Ahmed et Ayoub.

A mes ami(e)s qui ont partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie et qui m'ont toujours encouragé : Imad et Farid.

A tous ceux qui me connaissent.

REMERCIEMENTS

Je remercie DIEU le tout puissant de m'avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin du savoir et de la connaissance.

J'adresse mes remerciements à mon encadreur **M. Benachour Mustapha** pour la direction de notre projet.

Aussi, Nous voulons également remercier **M. Sebaa Fethi** Co-encadreur qui a participé à la direction du projet.

Je remercie vivement monsieur le président de jury de bien vouloir m'accorder d'examiner mon projet de fin d'études.

Mes plus vifs remerciements vont également aux examinateurs pour avoir accepté de participer au jury.

Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les membres de ma précieuse famille Et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements.

RESUME

Le procédé de soudage par résistance par point est l'un des procédés qui nous permet d'assembler deux types de matériaux différents, la présente étude a pour but d'estimer expérimentalement les effets des paramètres de soudage par résistance par points (courant de soudage, temps de soudage et la force d'électrode). Les paramètres de soudage sélectionnés selon une analyse factorielle sont respectivement 10 à 16 kA, 10 à 13 cycles et de 7 à 8 bars.

Les matériaux sélectionnés pour cette étude pour former des assemblages hétérogènes sont respectivement l'acier inoxydable 304L et l'acier galvanisé Z275 de même épaisseur (2 mm). Des essais de rupture en cisaillement par traction ont été faits afin de déterminer l'effet des paramètres de soudage sur la résistance à la rupture. Un plan expérimental factoriel complet suivi d'une analyse statistique et synthèse des résultats expérimentaux graphique est élaboré. L'analyse des courbes charge/déplacement a montré que l'augmentation du courant de soudage fait augmenter la contrainte de cisaillement par traction des joints hétérogènes. Une analyse de régression des résultats a montré que le paramètre COURANT présente un effet dominant par rapport aux autres paramètres ou combinaisons des différents paramètres. L'analyse des modes de rupture a révélé l'existence de trois modes de rupture à savoir le mode de rupture interfaciale, déboutonnage et déchirure du métal de base à partir de la zone affectée thermiquement. Ses modes de rupture dépendent principalement du niveau du courant de soudage.

ABSTRACT

The resistance spot welding process is one of the processes that allows us to assemble two different types of materials, the present study aims to experimentally estimate the effects of the resistance spot welding parameters (welding current, welding time and electrode force). The welding parameters selected according to a factorial analysis are respectively 10 to 16 kA, 10 to 13 cycles and 7 to 8 bars.

The materials selected for this study to form heterogeneous assemblies are respectively 304L stainless steel and Z275 galvanized steel of the same thickness (2 mm). Tensile shear failure tests were performed to determine the effect of welding parameters on the ultimate strength. A complete factorial experimental plan followed by a statistical analysis and summary of the graphical

experimental results is developed. The analysis of the load/displacement curves showed that the increase in the welding current made increased the shear stress by tension of the heterogeneous joints. A regression analysis of the results showed that the CURRENT parameter has a dominant effect compared to the other parameters or combinations of the different parameters. The failure mode analysis revealed the existence of three failure modes namely the interfacial failure mode, unbuttoning and tearing of the base metal from the heat affected zone. Its failure modes depend mainly on the level of the welding current.

ملخص

عملية اللحام النقطي بالمقاومة هي إحدى العمليات التي تسمح لنا بتجميع نوعين مختلفين من المواد، وتهدف الدراسة الحالية إلى التقدير التجريبي لتأثيرات معاملات لحام البقعة المقاومة (تيار اللحام ووقت اللحام وقوة القطب). معاملات اللحام المختارة وفقاً لتحليل عاملي هي على التوالي 10 إلى 16 كيلو أمبير، و10 إلى 13 دورة و7 إلى 8 دورات..

المواد المختارة لهذه الدراسة لتشكيل مجموعات غير متجانسة هي على التوالي الفولاذ المقاوم للصدأ (304 L) والفولاذ المجلفن (275 Z) من نفس السماكة (2 مم). تم إجراء اختبارات فشل القص الشد لتحديد تأثير معاملات اللحام على القوة النهائية. تم تطوير خطة تجريبية عملية كاملة يتبعها تحليل إحصائي وملخص للنتائج التجريبية الرسومية. أظهر تحليل منحنيات الحمل / الإزاحة أن الزيادة في تيار اللحام أدت إلى زيادة إجهاد القص عن طريق شد المفاصل غير المتجانسة. أظهر تحليل الانحدار للنتائج أن المعلمة الحالية لها تأثير مهيمن مقارنة بالمعاملات الأخرى أو مجموعات من المعاملات المختلفة. كشف تحليل وضع الفشل عن وجود ثلاثة أوضاع فشل هي وضع الفشل البيني، وفك الأزرار وتمزيق المعدن الأساسي من المنطقة المتأثرة بالحرارة. تعتمد أوضاع فشلها بشكل أساسي على مستوى تيار اللحام.

Mots Clés : Soudage par résistance par point, Assemblages hétérogène, Acier inoxydable, Acier Galvanisées, Paramètres de soudage, Résistance au cisaillement par traction, Modèle de régression.

Keywords : Resistance Spot Welding, Heterogeneous Joints, Stainless Steel, Galvanized Steel, Welding Parameters, Tensile Shear Strength, Regression Model.

الكلمات المفتاحية: لحام البقعة المقاومة ، المفاصل غير المتجانسة ، الفولاذ المقاوم للصدأ ، الفولاذ المجلفن ، معاملات اللحام ، قوة القص الشد ، نموذج الانحدار.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur le soudage par Résistance

Figure 1 : Procédé de soudage à la molette.....5

Figure 2 : Procédé de soudage par bossage.....6

Figure 3 : Procédé de soudage par étincelage.....7

Figure 4 : Mécanisme de formation de point de soudure par résistance par point.....11

Figure 5 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point.....11

Figure 6 : Section d’une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm :TH6..... 14

Figure 7 : Phénomènes électrique au cours du soudage par points.....15

Figure 8 : Schéma des interactions entre les états électriques, thermiques, métallurgiques et mécaniques.....16

Figure 9 : Schéma d’un point soudé selon une coupe.....17

Figure 10 : Les différentes Tailles géométriques du point soudé..... 18

Figure 11 : Microstructures générées par l’opération de soudage.....20

Figure 12 : Définition du domaine de soudabilité.....21

Chapitre II : Etat de l’art sur le soudage par résistance par points

Figure 1 : Distribution de la micro-dureté sur le noyau de soudure.....29

Figure 2 : Corrélation entre le courant de soudage et la taille de fusion.....31

Figure 3 : Relation entre le courant de soudage et les propriétés mécaniques.....31

Figure 4 : Dépendance des propriétés mécaniques à la taille de la zone fusion.....31

Figure 5 : capacité de charge de traction-cisaillement des échantillons de points de résistance soudés à un temps de soudage constant de 4 cycles32

| | |
|---|----|
| Figure 6 : Variations du diamètre du noyau de soudure en fonction de courant de soudage | 32 |
| Figure 7 : Le mode de rupture de la résistance à la traction-cisaillement | 33 |
| Figure 8 : Effet du courant de soudage sur la taille du noyau | 33 |
| Figure 9 : Effet des paramètres de soudage sur la résistance à la traction..... | 34 |
| Figure 10 : Lobes de soudage des trois aciers à une force d'électrode de 3,6 kN..... | 35 |
| Figure 11 : Courbes contrainte-déformation des aciers H1000, DP590 et GMW2..... | 35 |
| Figure 12 : Effet du courant de soudage sur la capacité de l'effort maximal F_m des assemblages par points..... | 36 |
| Figure 13 : Effet des paramètres de processus sur le diamètre de la pépite : (a) Durée du courant de soudage est de 12 cycles, (b) Force de l'électrode est de 0,3 MPa, (c) Courant de soudage est de 12 000 A et (d) Force de l'électrode est de 0,3 MPa..... | 38 |
| Figure 14 : Effet des paramètres du processus sur la résistance à la traction et au cisaillement de la soudure :(a) Durée du courant de soudage est de 12 cycles, (b) Force de l'électrode est de 0,3 MPa, (c) Courant de soudage est de 12 000 A et (d) Force de l'électrode est de 0,3 MPa..... | 39 |
| Figure 15 : Effet des paramètres de soudage sur : (a) et (b) : Diamètre du noyau de soudure (c) et (d) : Hauteur du noyau de soudure..... | 40 |
| Figure 16 : Effet des paramètres de soudage sur la largeur de la ZAT : (a) sans revêtement ; (b) galvanisé..... | 40 |
| Figure 17 : Force de cisaillement pour éprouvettes galvanisées..... | 41 |
| Figure 18 : Taille du noyau de soudure (à gauche) et de la macrostructure d'une soudure par points de résistance dissemblable sélectionnée ($I = 7,5$ kA)..... | 43 |
| Figure 19 : Micro-dureté au niveau du point de soudure à matériaux hétérogènes..... | 43 |
| Figure 20 : Dureté au niveau d'un point de soudure à joint hétérogène | |

| | |
|---|----|
| (acier inoxydable/acierdoux)..... | 44 |
| Figure 21 : Effort de cisaillement maximal par traction en fonction des paramètres de soudage..... | 45 |
| Figure 22 : Résultats des essais de fatigue sous corrosion et fatigue du joint hétérogène (dissemblable) soudé par points à différence significative en épaisseur..... | 45 |
| Figure 23 : Effets des paramètres de soudage sur la résistance cisaillement par traction..... | 46 |
| Figure 24 : Contour des effets d'interaction du courant de soudage et du temps de soudage..... | 47 |
| Figure 25 : Contour des effets d'interaction du courant de soudage et du temps de refroidissement..... | 48 |
| Figure 26 : Contour des effets d'interaction de la force de l'électrode et le temps de refroidissement..... | 48 |
| Figure 27 : Effet du courant de soudage sur la taille du noyau..... | 49 |
| Figure 28 : Modes de rupture pour des joints hétérogènes (a) Interfacial, (b) déboutonnage, (c) déchirure du métal de base..... | 49 |
| Figure 29 : Macro structure d'un joint hétérogène (Acier inoxydable/Acier galvanisé) | 50 |
| Figure 30 : Diagramme de Schaeffler, prédiction de la microstructure de la zone de fusion (Un noyau à 60 % d'acier galvanisé) | 50 |
| Figure 31 : Effet du courant de soudage sur la dilution, la dureté moyenne de la zone de fusion, la microstructure, et le mode de rupture du joint hétérogène..... | 50 |
| Figure 32 : Effet du courant de soudage sur la charge maximale et l'énergie de rupture..... | 52 |
| Figure 33 : Effet du temps de soudage sur la capacité portante de charge de traction (TLBC) des joints de soudure..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figure 34 : Contribution des paramètres de soudage dans l'optimisation des processus..... | 52 |
|--|----|

Chapitre III : Etude expérimentale

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Eprouvettes avant l'opération de soudage | 58 |
| Figure 2 : Dimensions d'éprouvettes | 59 |
| Figure 3 : machine de soudage par point (TECNA) | 59 |
| Figure 4 : Réglage des paramètres de soudage sur la machine à souder | 60 |
| Figure 5 : Les électrodes de soudage utilisées | 61 |
| Figure 6 : (a) Essai de cisaillement par traction des points de soudure (b) Machine de traction 600 KN avec le système d'acquisition de données | 63 |

Chapitre IV : Résultats & Discussions

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Courbe de charge de déplacement pour T= 10 cycles (a) F = 7 Bar | 69 |
| Figure 2 : Courbe de charge de déplacement pour T= 10 cycles (a) F = 8 bar | 69 |
| Figure 3 : Courbe de charge de déplacement pour T= 11 cycles (a) F = 7 bar | 70 |
| Figure 4 : Courbe de charge de déplacement pour T = 11 cycles (a) F = 8 bar | 70 |
| Figure 5 : Courbe de charge de déplacement pour T= 13 cycles (a) F = 7 bar | 71 |
| Figure 6 : Courbe de charge de déplacement pour T= 13 cycles (a) F = 8 bar | 71 |
| Figure 7 : Effet du courant de soudage sur la charge maximale pour F=7Bar | 72 |
| Figure 8 : Courbe de charge - déplacement pour I= 10 kA | 73 |
| Figure 9 : Courbe de charge - déplacement pour I= 12 kA | 74 |
| Figure 10 : Courbe de charge - déplacement pour I= 14 kA | 74 |
| Figure 11 : Courbe de charge - déplacement pour I= 15 kA | 75 |

| | |
|---|----|
| Figure 12 : Courbe de charge - déplacement pour $I= 16 \text{ kA}$ | 75 |
| Figure 13 : Effet du temps de soudage sur la charge maximale pour $F=7\text{Bar}$ | 76 |
| Figure 14 : Effet de la force de soudage sur la charge maximale avec $I=10 \text{ kA}$ | 77 |
| Figure 15 : Effet du courant de soudage sur le mode de défaillances des joints hétérogènes pour $F=7 \text{ bar}$ | 78 |
| Figure 16 : Modes de défaillance (a) Interfacial (b) Déboutonnage (c) Déchirure du métal de base | 78 |
| Figure 17 : Contrainte de traction prévue par rapport aux valeurs expérimentales | 80 |
| Figure 18 : Diagramme de Pareto des effets normalisés | 81 |
| Figure 19 : Diagramme de probabilité normale des résidus | 84 |
| Figure 20 : Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation | 84 |
| Figure 21 : Graphique des résidus par rapport aux ajustements | 85 |
| Figure 22 : Histogramme des résidus | 85 |
| Figure 23 : Diagramme de Pareto des effets normalisés | 86 |
| Figure 24 : Diagramme des effets principaux pour la contrainte de traction en cisaillement (MPa) | 87 |
| Figure 25 : Diagramme d'interaction pour la contrainte de cisaillement par traction | 88 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur le soudage par Résistance

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Compatibilité de soudage des métaux usuels..... | 22 |
| Tableau 2 : Compositions et les propriétés des aciers inoxydables..... | 24 |
| Tableau 3 : Paramètres de soudage par point de l'acier inoxydable 304L..... | 25 |
| Tableau 4 : Paramètres de soudage d'acier galvanisé pour différents épaisseur..... | 25 |

Chapitre II : Etat de l'art sur le soudage par résistance par points

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Diamètres des pépites produites par chaque courant de soudage appliqué | 29 |
|---|----|

Chapitre III : Etude expérimentale

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Nominations de l'acier inoxydable selon les normes | 56 |
| Tableau 2 : Composition chimique des matériaux utilisés | 57 |
| Tableau 3 : Propriétés physiques de l'acier inoxydable 304L | 58 |
| Tableau 4 : Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 304 L et de l'acier galvanisé Z275 ... | 58 |
| Tableau 5 : Paramètres de soudage | 61 |
| Tableau 6 : Plan factoriel de la répartition des paramètres de soudage | 62 |
| Tableau 7 : Résumé des étapes de la partie expérimentale | 64 |

Chapitre IV : Résultats & Discussions

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Données expérimentales pour la contrainte de cisaillement par traction | 79 |
| Tableau 2 : Tableau d'analyse des variances | 81 |
| Tableau 3 : Résultats d'analyse de variance | 83 |

ABRÉVIATIONS ET NOMENCLATURE

RSW: resistance spot welding

SP: Soudage par Point

GS: Galvanized steel

SS : stainless steel

ZAT : zone affectée thermiquement

MB : métal de base

ZF : La zone fondu

I : courant de soudage

T : Temps de soudage

F : force de soudage

P : Pression.

kA : kilo ampère

W : la quantité de chaleur générée (joule)

R : la résistance électrique dynamique globale des pièces (Ohm)

R : La résistivité de la pièce (Ohm)

ρ : la résistivité du matériau (micro ohm/m/m²)

L : longueur de la pièce (m)

S : section de la pièce (m²)

CRDM: Control Rod Drive Mechanism

Hz: Hertz

D_{ACTIF} : Diamètre de la partie actif de l'électrode

D_N : Diamètre du noyau fondu

D_{HAZ} : Diamètre de la ZAT

D_{ENTI} : Diamètre de l'entaille entre tôle 1 et 2

D_{ENT2} : Diamètre de l'entaille entre tôle 2 et 3

e₁ : Jeu aux bords entre tôle 1 et 2

e₂ : Jeu aux bords entre tôle 2 et 3

H_N : Epaisseur du noyau fondu

H_A : Epaisseur de l'assemblage

I_{inf} : Indentation de l'électrode sur la tôle inférieure

I_{sup} : Indentation de l'électrode sur la tôle supérieure

SCZAT : La zone subcritique

ICZAT : La zone intercritique

GFZAT : La zone à grains fins

GGZAT : La zone à gros grains

C.A.S.P.R : Coefficient d'aptitude au soudage par résistance.

TLBC: tensile shear load bearing capacity

DL : Degré de liberté

Som Car ajust : sommes des carrés ajustés

CM ajust : carrés moyens ajustées

σ_{ct} : Contrainte de cisaillement par traction

SOMMAIRE

| | |
|--|----------|
| RESUME | III |
| ABSTRACT | III |
| ملخص..... | IV |
| LISTE DES FIGURES | V |
| LISTE DES TABLEAUX | X |
| ABREVIATIONS ET NOMENCLATURES | XI |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 2 |
| Chapitre I : Généralités sur le soudage par Résistance | 4 |
| INTRODUCTION | 5 |
| I. PROCÉDES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE | 5 |
| I.1. Soudage par résistance par points : | 5 |
| I.2. Soudage à la molette : | 5 |
| I.3. Soudage par bossage : | 6 |
| I.4. Soudage par étincelage : | 6 |
| II. PARAMETRES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE | 7 |
| III. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR RESISTANCE | 8 |
| III.1. Avantages du procédé de soudage par résistance | 8 |
| III.2. Inconvénients de la soudure par résistance..... | 8 |
| IV. CONTROLE DES ASSEMBLAGES SOUDES PAR RESISTANCE..... | 9 |
| IV.1. Différents types de contrôles non destructifs | 9 |
| IV.2. Types de contrôles destructifs | 9 |
| V. PROCÉDE DE SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINTS..... | 9 |
| V.1. Définition..... | 9 |
| V.2. Principe du procédé de soudage par point | 11 |
| V.3. Paramètres du procédé..... | 12 |
| V.4. Mécanisme de formation de la soudure : | 15 |

| | |
|--|-----------|
| V.5. Interaction électrique, thermique, métallurgique et mécanique..... | 16 |
| VI. POINT DE SOUDURE ET SON ENVIRONNEMENT..... | 17 |
| VI.1. Géométrie du point de soudure | 17 |
| VI.2. Microstructures du point soudé..... | 19 |
| VI.3. Domaine de soudabilité..... | 20 |
| VI.4. Soudabilité des métaux..... | 21 |
| VI.4.1. Aciers inoxydables | 22 |
| VI.4.2. Aciers galvanisés..... | 23 |
| POINTS A RETENIR/ CONCLUSION | 26 |
| REFERENCES | 26 |
| Chapitre II : Etat de l'art sur le soudage par résistance par points..... | 28 |
| INTRODUCTION..... | 29 |
| I. SOUDAGE PAR RSW DES MATERIAUX HOMOGENES | 29 |
| I.1. Soudage par résistance par point de l'acier inoxydable..... | 29 |
| I.2. Soudage par résistance par point des aciers galvanisés..... | 36 |
| II. SOUDAGE PAR RSW DES MATERIAUX HETEROGENES | 42 |
| II.1 soudage de l'acier doux et l'acier inoxydable..... | 42 |
| POINTS A RETENIR/ CONCLUSION | 52 |
| REFERENCES | 52 |
| Chapitre III : Etude expérimentale | 55 |
| INTRODUCTION | 56 |
| I. MATERIAUX D'ETUDES..... | 56 |
| I.1. Acier Inoxydable 304L..... | 56 |
| I.2. Acier galvanisé Z275 | 57 |
| I.3. Caractéristiques chimiques et physiques..... | 57 |
| I.4. Caractérisation mécanique | 58 |
| II. REALISATION DES EPROUVETTES | 58 |

| | |
|--|------------|
| II.1. Équipements de soudage - Opérations de soudage | 59 |
| II.2. Choix des paramètres de soudage | 61 |
| III. ESSAI DE CASAILLEMENT PAR TRACTION | 63 |
| POINTS A RETENIR / CONCLUSION | 65 |
| REFERENCES | 66 |
| Chapitre IV : Résultats & Discussions | 67 |
| INTRODUCTION | 68 |
| I. EFFET DES PARAMETRES DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS SOUDES | 68 |
| I.1. Effet du courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudé | 68 |
| I.2 Effet du temps de soudage et de la force de l'électrode sur le comportement mécanique de joints soudés hétérogènes | 72 |
| I.3 Analyse des modes de défaillances | 77 |
| II. ANALYSE FACTORIELLE DE CONCEPTION | 79 |
| III. MODELISATION DE REGRESSION ET ANALYSE DE PROCESSUS DES PARAMETRES DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS HETEROGENES | 82 |
| POINTS A RETENIR / CONCLUSION | 89 |
| REFERENCES | 90 |
| Conclusion Générale et Perspectives..... | .91 |
| I. CONCLUSION GENERALE | 92 |
| II. PERSPECTIVES | 93 |

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage couramment utilisé dans différentes industries : automobile, mécano soudé, aéronautique, électroménagers. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, économique et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les assemblages métalliques. Les aciers inoxydables sont de bons candidats pour les applications d'assemblages métalliques, avec un compromis intéressant entre résistance et masse volumique, un coût de fabrication raisonnable et une bonne aptitude au soudage par points.

L'objectif de ce travail de recherche expérimentale est d'évaluer les paramètres optimaux à travers une analyse expérimentale factorielle dans le but d'obtenir des joints de qualité. Les assemblages réalisés sont formés de matériaux hétérogènes (Acier inoxydable/Acier galvanisé). La soudabilité par résistance par points des matériaux hétérogènes présente actuellement un champ d'investigations en industries. La résistance mécanique de points de soudure liée à la taille du noyau du point de soudure présente un point de qualité d'un assemblage soudé. Face à la complexité des ruptures pouvant être rencontrées, le but global d'apporter aussi des éléments de compréhension sur le comportement des assemblages soudés par points sous l'effet de différents paramètres du procédé du soudage, dont le mode de sollicitation classiquement utilisé dans l'industrie est le cisaillement par traction.

L'objectif général se résume aux points suivants :

- Comprendre les relations entre les paramètres du procédé (et les caractéristiques mécanique et la morphologie du point de soudure)
- Evaluer les effets des paramètres de la soudure pour joint hétérogène à travers une étude expérimentale
- Optimisation des paramètres de soudage par une analyse statistique (ANOVA).

Le travail présenté dans cette thèse est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à une étude bibliographique sur les procédés de soudage par résistance et spécialement le soudage par résistance par points et des notions générales relatives au soudage des aciers inoxydables 304L et aciers galvanisés Z275.

Le deuxième chapitre permet de faire le point sur les études de recherche menées antérieurement à travers un état d'art détaillé des assemblages soudés par points des aciers homogènes et hétérogènes.

Le troisième chapitre fait l'objet d'une présentation de l'approche expérimentale qui commence par la préparation des éprouvettes des matériaux hétérogènes utilisés et suivi par l'étape de soudage des éprouvettes avec les paramètres sélectionnés. Des essais de rupture par cisaillement par traction sont conduits afin de déterminer la résistance à la rupture, le comportement mécanique et les modes de ruptures.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentations et discussion des résultats du comportement mécanique et la résistance maximale. Les effets des paramètres de soudage sélectionnées (Courant de soudage I, Temps de soudage T et la force d'électrode F) sur le comportement mécanique des joints hétérogènes sont étudiés. Une modélisation par régression et analyse de processus des paramètres de soudage et leurs interactions sont évalués.

Une conclusion générale présente le bilan de la présente contribution.

Chapitre I : Généralités sur le soudage par Résistance

INTRODUCTION

Le soudage par résistance est un processus thermoélectrique simple qui génère de la chaleur par résistance sur une surface en appliquant une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. C'est un procédé de soudage sans métal d'apport et sans environnement protecteur. Les pièces à souder sont empilées les unes sur les autres et prises en sandwich entre deux électrodes fabriquées en alliage de cuivre, toute la pièce est traversée par le courant de soudage, sous une tension provoquant un fort effet Joule de température. La première technique de soudage par résistance est le soudage par points grâce au Pr. Elihu Thomson en 1877. Ensuite, la première machine à souder construite a été brevetée en 1885 [1].

I. PROCÉDES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

Le soudage par résistance contient plusieurs procédés :

I.1. Soudage par résistance par points :

Ce procédé fait l'objet de notre étude et est détaillé à la section 6.

I.2. Soudage à la molette :

Le soudage à la molette (figure1) fait partie de la famille des procédés de soudage par résistance et utilise le même principe que le soudage par points où les électrodes sont sous formes de disques à mouvement rotatifs.

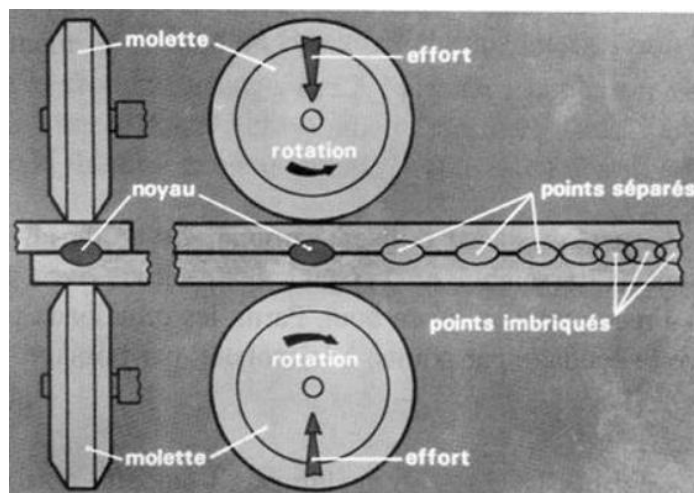


Figure 1 : Procédé de soudage à la molette [1].

I.3. Soudage par bossage :

Le procédé de soudage par bossage (Figure 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 d'éliminer l'indentation sur une des tôles [2].

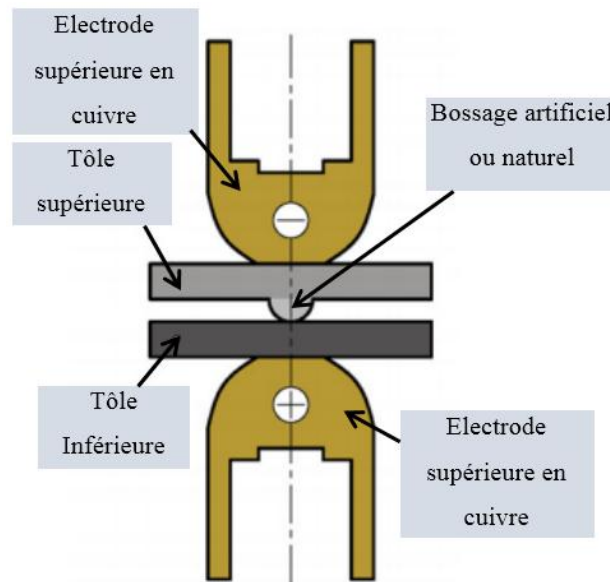


Figure 2 : Procédé de soudage par bossage [3].

I.4. Soudage par étincelage :

Le procédé de soudage bout à bout, d'abord formé par résistance, permet, comme son nom l'indique, d'assembler des tiges ou profilés soudés avec le même droit ou des pièces qui ont reçu une préparation pour ce cas. La Figure 3 montre une opération de bout en bout. Les pièces sont placées dans des mâchoires en cuivre, les mâchoires placées sur le chariot qui peut faire un déplacement vers l'arbre de soudage. L'opérateur active la commande de cycle par l'avancement et accostage du chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces que l'on veut assembler qui viennent en contact sous un effort déterminé, après il va fermer du contacteur primaire du circuit de puissance pour que le courant passe entre nos pièces et porte les parties en contact avec la température de soudage. En fin il vient l'opération de maintien qui est exercé par l'effort du chariot mobile qui va retourner au repos après l'ouverture des mâchoires. Ce type de procédé est largement utilisé dans la fabrication du fer à béton, raccordement de fils...etc [4].



Figure 3 : Procédé de soudage par étincelage [4].

II. PARAMETRES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

Chacun des procédés de soudage par résistance cités ci-dessus est défini par ses propres paramètres. D'une façon générale ils dépendent des paramètres suivants :

- ◆ L'intensité de soudage (kA)
- ◆ Le temps de soudage (s)
- ◆ L'effort sur électrodes (Bar)
- ◆ Le temps de forgeage (s)
- ◆ Forme de l'électrode
- ◆ Diamètre de la face active de l'électrode (s)
- ◆ Diamètre de l'électrode (s)
- ◆ Course entre les électrodes
- ❖ Transformateur : La connexion au réseau du poste à souder se fait généralement via un transformateur :
 - Réduire la tension
 - Augmentez l'intensité.
 - Le courant pouvant être grand
 - Faible N = plus sécurité- éviter un arc.
- ❖ L'intensité de courant de soudage est en fonction de :

- Epaisseurs des tôles et surfaces de contacts
 - Type des matériaux
 - Force de serrage
- ❖ L'effort est essentiellement en fonction de :
- Épaisseur des tôles.
 - Les Caractéristiques mécaniques de chacune des matériaux.
 - La tolérance de l'emboutissage [1].

III. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

III.1. Avantages du procédé de soudage par résistance

- ◆ Qualité de soudage propre et très élevée
- ◆ Aucune déformation des pièces soudées
- ◆ Assurer la continuité et l'étanchéité du métal
- ◆ Rapide, efficace, moins polluant
- ◆ Ne nécessite pas de matériau d'apport
- ◆ Positionnement géométrique, avec fixation des éléments assemblés
- ◆ Délimitation des zones affectées par la chaleur.
- ◆ Réduire les pertes d'énergie.

III.2. Inconvénients de la soudure par résistance

- ◆ Assemblage par recouvrement
- ◆ L'épaisseur limite la capacité de la machine
- ◆ Le coût de ce procédé très élevé, les applications sont limitées, en principe une machine à souder ne peut effectuer qu'un seul type de soudage
- ◆ Projection de métal en fusion
- ◆ Usure inhabituelle des fusions
- ◆ Durée de vie des électrodes courte

IV. CONTROLE DES ASSEMBLAGES SOUDES PAR RESISTANCE

IV.1. Différents types de contrôles non destructifs [5]

- ◆ Les contrôles visuels pour l'État du composant du point de soudage, zone affectée thermiquement (ZAT)
- ◆ Contrôles par le technique de ressuage
- ◆ Contrôle d'étanchéité à l'eau savonneuse et la pression
- ◆ Contrôle avec chute de pression
- ◆ Contrôle d'étanchéité à l'hélium

IV.2. Types de contrôles destructifs [5]

- ◆ Contrôle macrographique
- ◆ Contrôle avec essai de traction ou de cisaillement
- ◆ Contrôle avec Test de résistance mécanique par éclatement de l'eau
- ◆ Contrôle avec filiation de durezza

V. PROCEDE DE SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINTS

Le soudage par points est utilisé pour assembler deux pièces par effet Joule. A cet effet, les plaques sont comprimées à l'aide des deux électrodes, généralement en alliage de cuivre, et un courant électrique de forte intensité va passer à travers les mêmes électrodes. La chaleur produite par ce courant à l'interface des deux tôles fait fondre localement le métal des deux tôles, ce qui nous donne, après solidification, un point de soudure [5, 6]

V.1. Définition

Le procédé de soudage par point est un procédé qui ne nécessite pas un métal d'apport ou ce qu'on appelle autogène. La fusion des métaux entre les plaques est obtenue par effet Joule. Les pièces à souder sont empilées et serrées localement l'une sur l'autre entre deux électrodes fabriquées en alliage de cuivre. Un courant électrique traversé les électrodes et les tôles. Ce courant va augmenter la température par effet joule ce qui fusionne localement les deux tôles dans la partie de frottement des deux électrodes avec les tôles [7]. La désignation prend plusieurs formes selon la norme appliquée :

- ◆ Désignation Française : SP (Soudage par Point)

- ◆ Désignation Américaine : RSW (Resistance Spot Welding)
- ◆ Désignation Numérique : 21.

Effet de joule : Si un courant électrique traverse un conducteur, une quantité de chaleur va dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

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

W : la quantité de chaleur générée (joule).

R : la résistance électrique dynamique globale des pièces (Ohm).

I : l'intensité de courant de soudage (Ampère).

t : le temps de passage du courant (Seconde).

Résistivité : c'est la propriété d'un certain matériau de résister au passage d'un courant électrique. Il est utilisé pour calculer la résistance des matériaux. Les électrodes fabriquées en cuivre ont une faible résistivité.

$$R = \rho (L / s) \quad (2)$$

R : La résistivité de la pièce (Ohm)

ρ : la résistivité du matériau (micro ohm/m/m²)

L : longueur de la pièce (m)

S : section de la pièce (m²)

❖ Définition de R dans $W = R I^2 t$

RC = Résistance de contact

r = Résistance interne

$$R = RC1 + RC2 + RC3 + r1 + r2 \quad (3)$$

Avec $RC1 + RC2 + RC3 > r1 + r2$

Les résistances de contacts RC1, RC2 et RC3 ayant une relation avec l'état surface des tôles, la nature des tôles, la nature et la forme des électrodes.

La figure 4 illustre le mécanisme de formation du point de soudure par résistance [8, 9].

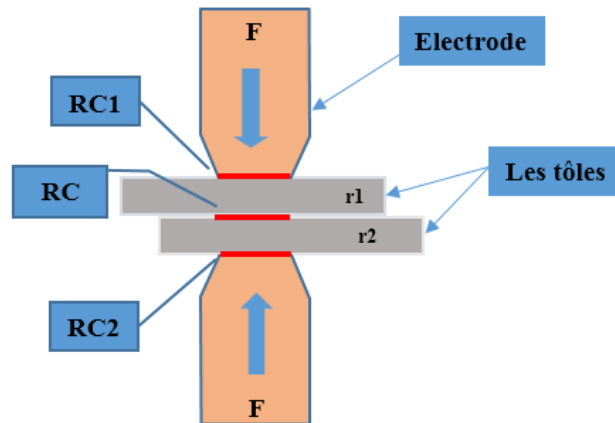


Figure 4 : Mécanisme de formation de point de soudure par résistance par point [9]

V.2. Principe du procédé de soudage par point

La figure 5 représente deux tôles soudées par points, ces derniers peuvent avoir des caractéristiques différentes (caractéristiques physique et chimique, revêtement...). Si les deux tôles sont de même matériau on parle de soudage par points homogène et si les matériaux sont différents on parle du soudage par point hétérogène. L'étude mécanique des assemblages hétérogènes fait l'objet de notre étude. Le cycle de soudage par point se décompose en quatre phases :

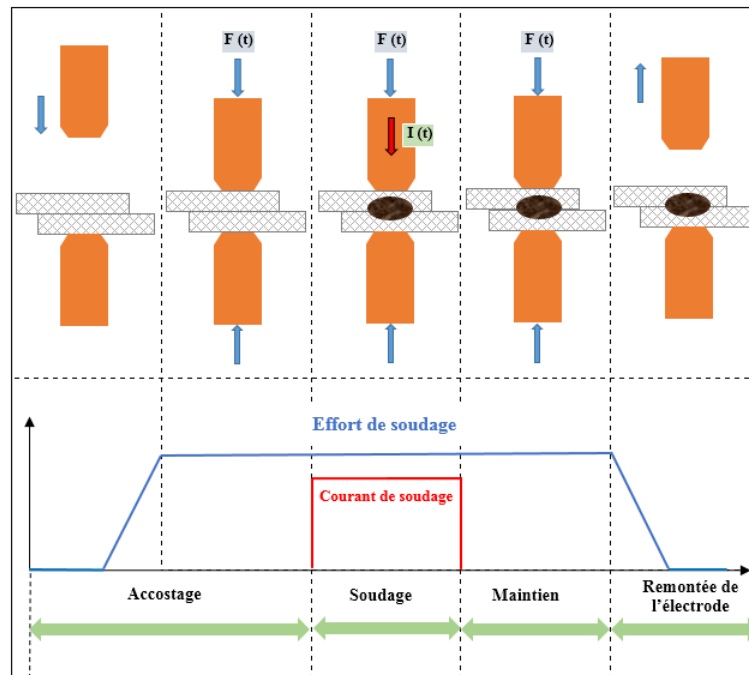


Figure 5 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point [1].

a) Phase d'accostage d'électrodes

Les électrodes vont se rapprocher et compriment les pièces à souder à la position prévue sous une certaine force. Pour les machines à souder de type CRDM, seule l'électrode supérieure peut monter et descendre, l'électrode inférieure est fixe au châssis de la machine à souder. Durant cette phase on assure le serrage des parties actives des électrodes sur les tôles à assembler ce qui permet de déterminer la valeur de la résistance sur lequel l'effet joule sera appliqué. Cette phase se termine dès que la force est stabilisée. Le temps d'accostage d'électrode est très important car s'il y a un retard d'accostage ça peut provoquer des défauts comme les points d'incendie, éclaboussures de métal en fusion, explosion au niveau des électrodes, absence de la résistance mécanique des points ainsi on constate une usure inhabituelle des électrodes. Un ralentissement de la cadence est provoqué si le temps d'accostage est trop long.

b) Phase de soudage

Les tôles étant maintenues en un point par l'effort de soudage, un courant de forte intensité passe entre les électrodes et les tôles accostées durant un temps « t » dit "temps de soudage". L'effet joule associé à la résistance de contact entre les deux tôles produit assez de chaleur à l'interface tôle/tôle pour générer un noyau fondu à l'interface des deux tôles.

c) Phase de maintien

Le but de cette étape est de solidifier le noyau et la zone affectée thermiquement (ZAT). Les pièces sont toujours maintenues par la force des électrodes et le courant ne circule plus. La chaleur est dissipée vers le circuit de refroidissement par l'eau froide dans les électrodes. La durée du temps de maintien est liée à l'épaisseur des plaques à assembler.

d) Phase de remontée des électrodes

Les deux tôles deviennent une seule pièce et peut alors être déplacée afin de procéder à la soudure d'un nouveau point [1, 9].

V.3. Paramètres du procédé

Les paramètres sont ajustés en fonction des caractéristiques des matériaux que l'on veut souder. Les principaux paramètres décrits par ordre chronologique sont :

- ◆ **Force de soudage** : La force appliquée à partir de l'accostage des électrodes et la valeur appliquée dépende essentiellement des propriétés mécaniques et de l'épaisseur des plaques à souder. L'augmentation de la force dans la phase de montage n'est pas linéaire comme il

est illustré par la figure 5. Mais dépend du système de charge de la machine à souder CRDM.

- ◆ **Intensité de soudage** : d'après la loi de l'effet joule W , on remarque que le courant de soudage a un grand impact, parce qu'il interfère au carré dans l'énergie dissipée par Joule. Généralement la plage optimale du courant de soudage compris entre 5kA et 20 kA, dépend essentiellement des propriétés mécaniques et de l'épaisseur des plaques à souder et de la présence du revêtement ou non. Les soudeuses utilisent généralement un courant alternatif monophasé à 50 Hz. Le choix du courant est très important car si l'intensité est trop forte et provoque des défauts comme : le cuivrage des tôles, des projections de métal en fusion, indentation trop importante et une détérioration rapide des électrodes. Et si l'intensité est insuffisante, elle peut provoquer un mauvais soudage à cause de manque de fusion.
- ◆ **Temps de soudage** : c'est le temps de passage du courant dans les électrodes et les tôles, et d'après l'effet joule c'est le temps de chauffage des tôles. L'ordre de grandeur est très court de quelques dixièmes de secondes, le temps de soudage dépend aussi de l'épaisseur des tôles et ça nuance. L'unité du temps de soudage est en milliseconde, ou en cycles, ou un cycle correspond généralement à 0.02 s pour une fréquence réseau de 50 Hz.
- ◆ **Temps de maintien** : le temps du maintien a par rôle d'assurer la solidification du noyau formé et la zone affectée thermiquement. Le comportement mécanique dépend fortement du temps de maintien. Les pièces restantes toujours maintenues par le même effort de soudage, une évacuation de la chaleur s'effectue par le système de refroidissement lié aux électrodes.
- ◆ **Electrode** : est un paramètre externe et essentiel pour le procédé de soudage par point et affecte directement le domaine de soudabilité des matériaux. L'électrode joue trois rôles principaux :
 - **Rôle mécanique** : nécessaire pendant la phase de serrage pour assurer un bon contact électrique entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur spécifiée pour le soudage. Pendant la phase de soudage et le maintien, l'électrode agit comme un stabilisatrice pour garder la zone fondue des deux matériaux pendant le chauffage et le refroidissement.

- **Rôle Electrique** : Pendant la phase de soudage une intensité de soudage très élevé passe via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. Donc les électrodes doivent avoir une bonne conductivité électrique.
- **Rôle Thermique** : l'électrode est un canal de l'eau de refroidissement pour absorber la chaleur évacuée pendant le soudage à l'interface électrode/tôle qui doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface. Pour ça le matériau de l'électrode doit avoir une bonne conductivité thermique ainsi qu'une bonne capacité calorifique.

La figure 6 représente la section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6 mm : TH6 utilisée pour nos assemblages. La formation du point de soudure dépend de la combinaison des paramètres de soudage et du diamètre de l'électrode qui est en relation avec les épaisseurs à assembler [1], [6].

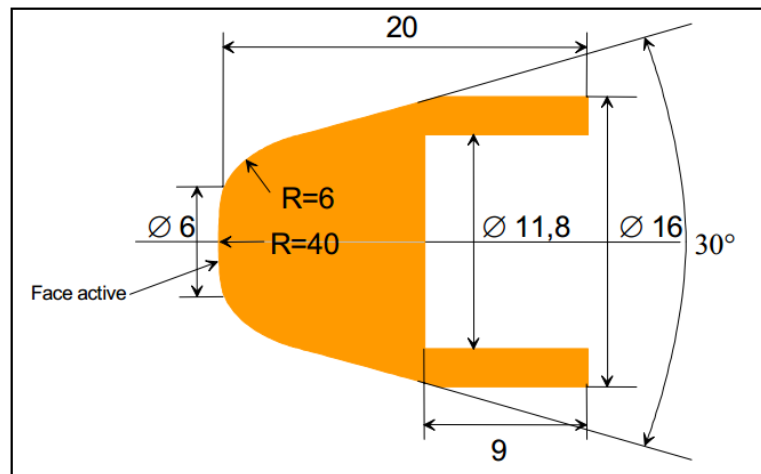


Figure 6 : Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm : TH6 [1].

Après l'utilisation répétitives de l'électrode, sont face active va se détériore et se dilate à cause de la malformation thermique répétée lors de la compression à chaud. Cette expansion de la face active réduit considérablement le diamètre de noyau souhaité. Tout d'abord, la réinitialisation de l'intensité est effectuée à sa magnitude pour maintenir la taille du noyau spécifié. Après l'usure de la face active de l'électrode après un nombre de points soudés, il est inévitable de les remplacer. Puisque le profil de face active et le diamètre d'électrode influence directement sur le procédé de soudage La géométrie de l'électrode est variable selon l'application.

V.4. Mécanisme de formation de la soudure :

La chaleur qui sert à fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créé par l'effet Joule pendant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur générée pendant un temps t en fonction de l'intensité du courant passé dans les conducteurs et de la résistance électrique traversée est donné par la relation :

$$Q = \int_{t_0}^{t_0+1} RI^2 dt \quad (4)$$

Q : la quantité de chaleur générée en joules.

R : la résistance électrique dynamique globale des pièces, en ohm.

I : l'intensité de courant de soudage en ampère.

t : le temps de passage du courant en cycle.

La figure 7 illustre l'évolution de la résistance en fonction du temps de soudage en cas d'acier nu. L'analyse de l'évolution de ces résistances permet de mieux comprendre le mécanisme de la formation de la soudure. Vu que l'échauffement se produit et commence en premier lieu à l'interface tôle/tôle, la formation du noyau est initiée à l'interface des tôles, puis grossie dans l'épaisseur par l'augmentation de la résistivité avec la température. Dans le cas de soudage des tôles revêtues, on prend en compte aussi la résistivité ohmique du revêtement jusqu'à sa température de la fusion.

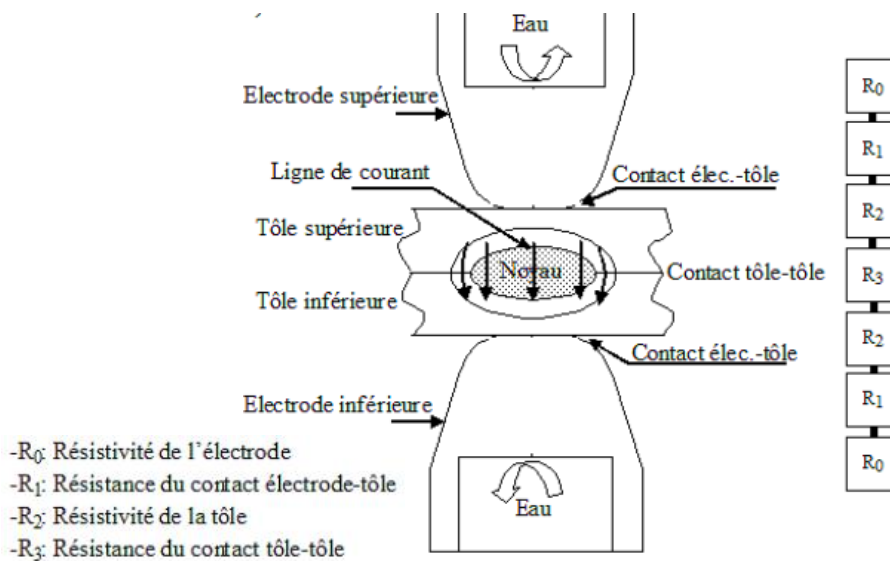


Figure 7 : Phénomènes électrique au cours du soudage par points [1]

V.5. Interaction électrique, thermique, métallurgique et mécanique

Afin de comprendre le soudage par résistance par point, il nous faut comprendre la relation entre les différentes interactions électriques, thermiques, métallurgiques et mécaniques (Figure 8) [7].

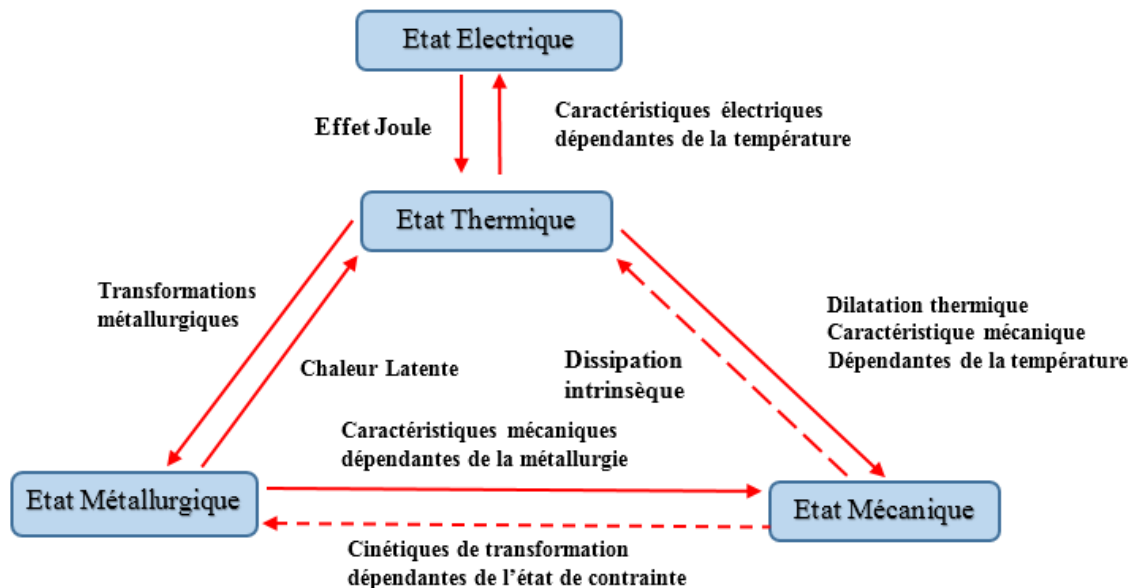


Figure 8 : Schéma des interactions entre les états électriques, thermiques, métallurgiques et mécaniques [7].

Les interactions électrothermiques reflètent l'influence du comportement électrique sur la chaleur et vice versa. Le changement de température produit des changements dans la résistivité du matériau. A son tour, l'effet Joule produit un changement de température.

L'interaction thermo-métallurgique représente l'effet thermique sur la métallurgie et réciproquement. Les changements de température au chauffage et au refroidissement génèrent des transformations microstructurales. Ces transformations s'accompagnent d'un dégagement ou d'une absorption de chaleur et de modifications des propriétés thermiques du matériau. La variation des propriétés mécaniques avec la température et la dilatation thermique représentent l'effet thermique sur la mécanique. De même, les transformations inélastiques produisent une libération de chaleur qui est souvent ignorée. Ces interactions sont thermomécaniques. Les propriétés mécaniques impliquées dans les interactions métal-mécaniques en fonction de la métallurgie, ainsi que les conséquences mécaniques qu'elles produisent telles que la déformation de transition ou la plasticité de transition [7].

VI. POINT DE SOUDURE ET SON ENVIRONNEMENT

VI.1. Géométrie du point de soudure

La figure 9 représente un schéma d'un point soudé entre deux tôles selon une coupe transversale, la géométrie d'un point de soudure se décompose en trois zones métallurgiques distinctes [7] :

- Le noyau fondu.
- La zone affectée thermiquement (ZAT).
- Les métaux de base.

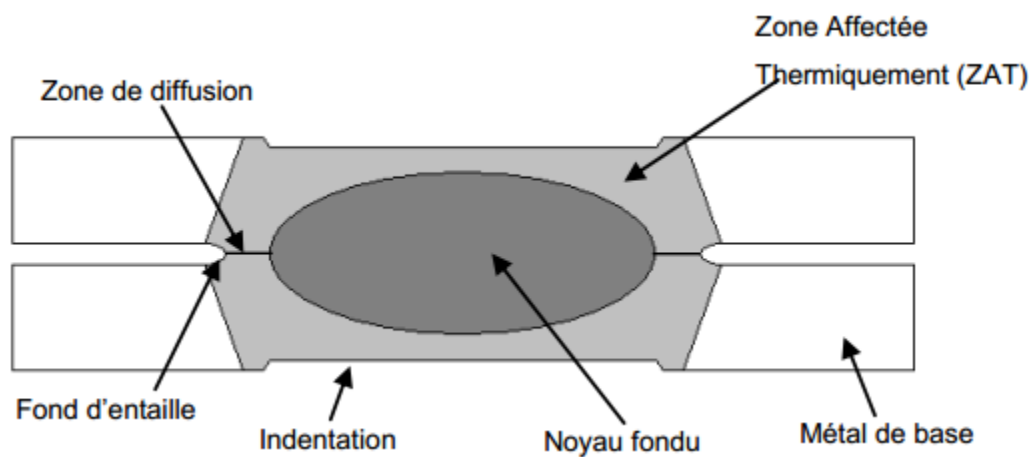
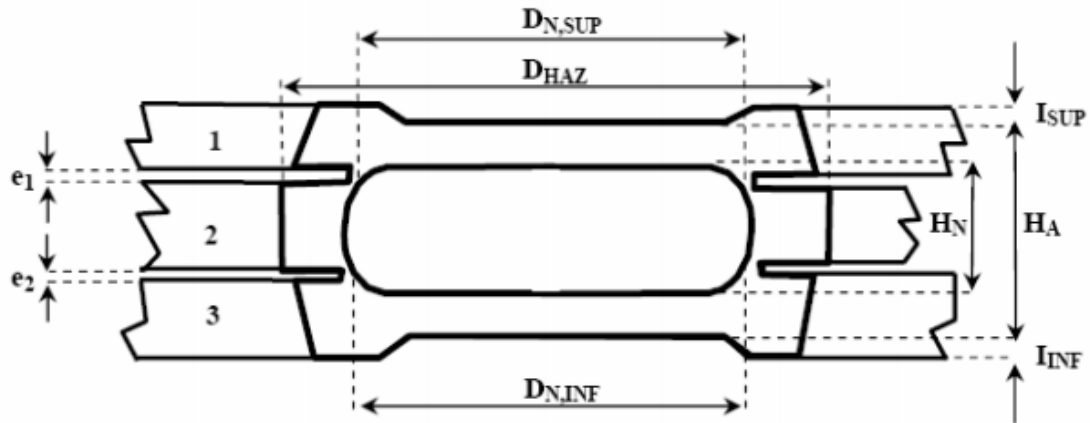


Figure 9 : Schéma d'un point soudé selon une coupe [6].

Les différentes tailles géométriques du point soudé identifiables sur une coupe transversale sont données par la figure 10.



Nomenclatures :

- D_N : Dia. du noyau fondu
- D_{HAZ} : Dia. de la ZAT
- D_{ENT1} : Dia. de l'entaille entre tôle 1 et 2
- D_{ENT2} : Dia. de l'entaille entre tôle 2 et 3
- e_1 : Jeu aux bords entre tôle 1 et 2
- e_2 : Jeu aux bords entre tôle 2 et 3
- H_N : Epaisseur du noyau fondu
- H_A : Epaisseur de l'assemblage
- I_{INF} : Indentation de l'électrode sur la tôle inférieure
- I_{SUP} : Indentation de l'électrode sur la tôle supérieure

Figure 10 : Les différentes Tailles géométriques du point soudé [1].

Qualitativement, nous trouvons que les propriétés mécaniques du noyau fondu sont principalement influencées par la dimension du noyau fondu, notamment par son diamètre dans le plan des tôles [10]. La taille du noyau a une relation avec la puissance électrique, Si l'intensité électrique donnée est trop faible, le noyau fondu formé, est trop petit, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus l'intensité électrique augmente, plus le noyau est expansé et plus la pointe est résistante mécaniquement. Après quand arriver à une certaine valeur de l'intensité électrique qui s'appelle le seuil, le noyau fondu atteint le fond de la rainure ou une des deux faces extérieures des tôles sous l'influence de la pression mécanique appliquée aux électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu et c'est un phénomène connu par l'expulsion ou la qualité du point soudé se dégradée. Par conséquent, le critère de soudabilité est déterminé sur la base de la recherche de la résistance de soudure requise pour produire les diamètres de noyau minimum et maximum [11].

VI.2. Microstructures du point soudé

Le procédé de soudage par point se caractérise par un cycle thermique très rapide qui se modifie profondément la microstructure des métaux de base au voisinage du point soudé. Le métal subit une augmentation de température à des vitesses de l'ordre du 1000 °C/s 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. L'opération de soudage par point complet ce fait en moins d'une seconde [6]. La figure 11 représente les différentes zones illustrées schématiquement au niveau microscopique :

- ❖ **La zone du métal de base MB** : La température dans cette région reste inférieure à environ 600°C où aucun changement structurel n'est détecté dans cette zone.
- ❖ **La zone subcritique SCZAT** : Dans cette zone la température sera compris entre 600°C ET 720°C (Ac1), ou on constater certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial mais aucun impact sur la taille des grains. Dans la phase de refroidissement on observe une précipitation coalescence en présence d'éléments dispersés.
- ❖ **La zone intercritique ICZAT** : la température dans cette zone est comprise entre la température du début d'austénisation AC1 et la température de la fin d'austénisation AC3. Il s'agit d'une zone austénitique partielle, caractérisée par la coexistence de ferrite et d'austénitique. Des changements importants dans la microstructure ont été observés dans la région.
- ❖ **La zone à grains fins GFZAT** : (Fine Grained Heat Affected Zone) la température dans cette zone est comprise entre AC3 et 1100°C environ, Selon le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est complète dans cette zone. Dans le cas de la soudure, Ac3 peut être décalé à cause de la vitesse du cycle thermique. Lorsqu'elle est chauffée, la nouvelle structure austénitique, hétérogène et lisse, remplace la microstructure d'origine. Après refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainito-martensitique fine avec éventuellement quelques inhomogénéités.
- ❖ **La zone à gros grains GGZAT** : La température dans cette zone est environ entre 1100 °C et la zone de fusion, dans cette zone on remarque une croissance vigoureuse des grains austénitiques donnant à cette région une forte trempabilité, la microstructure obtenue après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.

- ❖ **La Zone fondu ZF** : située au cœur du point soudé et une petite zone qui s'appelle aussi le Noyau. Dans cette zone. La vitesse de refroidissement contrôler la dureté et la composition chimique de cette zone. Après le refroidissement rapide, une microstructure grossière est obtenue. Cette zone se caractérise par une dureté importante à cause de la présence des phases martensitiques et bainitiques résiduelles, ainsi que le centre du point est plus fin en bordure de noyau [6], [7]. Il est clair que les variations profondes du métal de base autour du point de soudure peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la résistance du point.

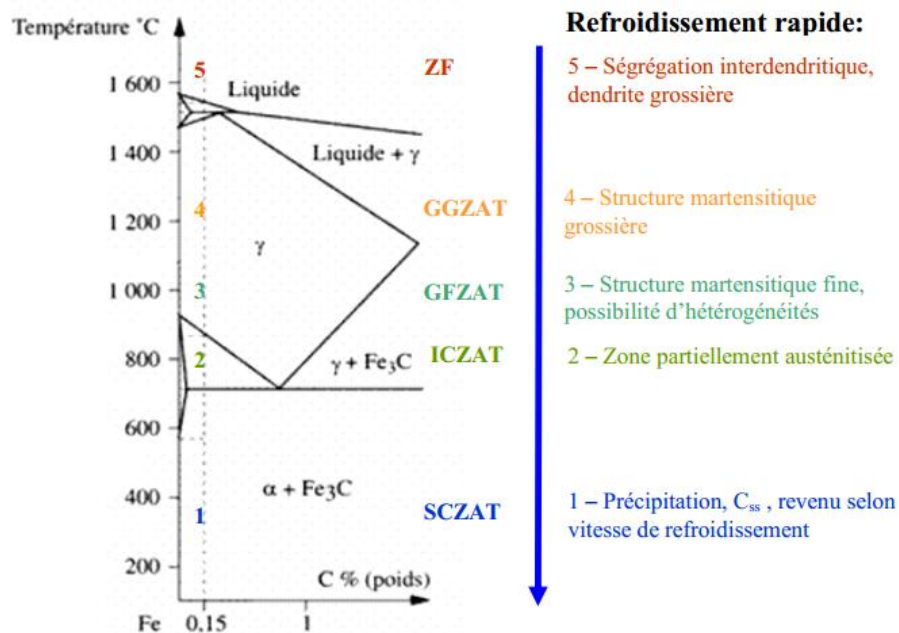


Figure 11 : Microstructures générées par l'opération de soudage [6].

VI.3. Domaine de soudabilité

D'après la norme [NF A 87-001], le domaine de soudabilité est défini comme l'intervalle d'intensités du courant efficace de soudage qui permettant de former un point de soudure qui porte des tenues mécaniques correspond aux critères définis auparavant. Selon la norme on déduit que la quantité d'énergie électrique fournie à la soudure contrôle la taille du noyau fondu, si l'intensité électrique utilisée est trop faible, il se forme un noyau fondu trop petit ou inexistant, C'est ce qui conduit au absence de déboutonnage au test destructif, et si l'intensité électrique arrive à un certain seuil, se forme un noyau fondu ce qui conduit au phénomène du déboutonnage dans le test destructif, donc plus quand augmente l'intensité fournie plus que la zone fondue est plus large ce qui induit à un point de soudure résistant aux contraintes mécanique.

Cependant, après un certain seuil d'intensité électrique, le noyau fondu commence à déborder. Cela indique qu'il y a une expulsion intense d'expulsion qui est-ce qui conduit à une diminution de la taille du noyau fondu. En bref, il faut étudier les variations du diamètre du noyau en fonction de l'intensité électrique efficace, Ceci est schématisé sur la figure 12 [12].

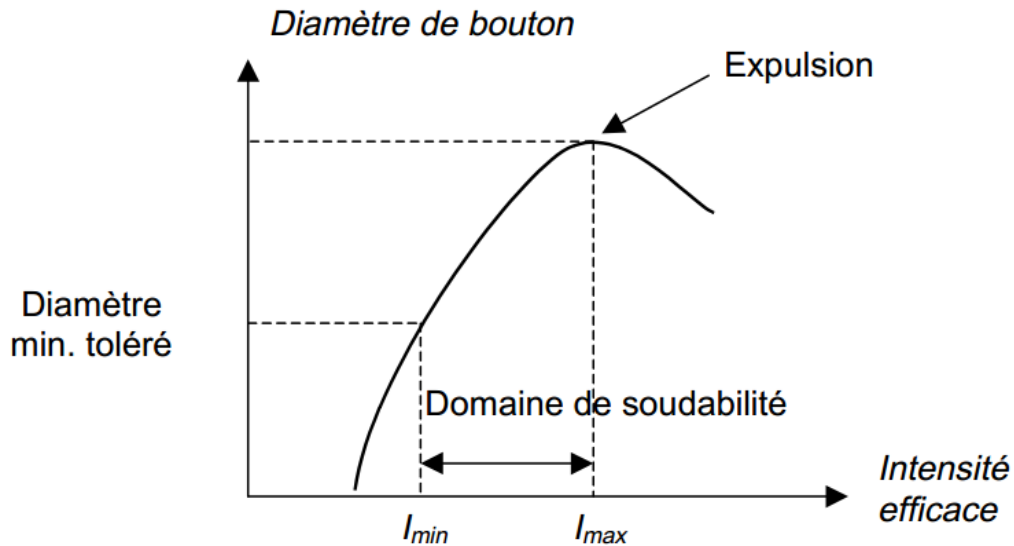


Figure 12 : Définition du domaine de soudabilité [12].

En trouve aussi dans le domaine de soudabilité un intervalle d'intensité électrique qui contient I_{min} est l'intensité minimale qui nous donnant un diamètre du noyau fondu acceptable, et aussi contient I_{max} (haut du domaine de soudabilité) ou l'intensité maximale donnant aussi un diamètre du noyau fondu acceptable sans provocation d'expulsion [12].

VI.4. Soudabilité des métaux

Théoriquement : on peut dire que tous les métaux sont soudables, mais avec des qualités de soudage inégale surmontables pour la mise en œuvre de leur soudage par résistance. La soudabilité peut s'envisager en deux métaux identiques (soudage homogène). Elle peut être éventuellement des métaux différents (soudage hétérogène).

Les grandes difficultés à surmonter peuvent être :

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

Soudabilité opératoire : Il est basé sur un ensemble des conditions dans lequel un fonctionnement de soudage sans problème peut être garanti.

- Fiabilité : mécanique, électrique, thermique des machines.
- Matériau de qualité suivie : résistivité, conductivité.
- Aspect de surface (calamine, rouille ...)

La loi de **COEFFICIENT D'APTITUDE AU SOUDAGE PAR RESISTANCE** permet de prédéterminer la soudabilité des matériaux :

$$C. A. S. P. R = \frac{\text{Résistivité}}{\text{Temps de fusion} \times \text{Conductivité thermique}} \quad (4)$$

L'aptitude au soudage par résistance augmente avec la valeur **CASPR**

Soudabilité métallurgique : Bien qu'il y ait un lien, l'assemblage n'est pas satisfaisant pour des raisons métallurgiques. L'assemblage peut être faible si en prend en compte tenu des matériaux en présence et du cycle thermique. D'après tous les facteurs cités précédemment la qualité de soudage des métaux reste inégale. Le tableau 1 représente la compatibilité de soudage des métaux usuels.

Tableau 1 : Compatibilité de soudage des métaux usuels [9].

| Métaux | Alum | Inox | Zinc | Galva | Acier | Laiton | Cuivre | Plomb | Nickel | Fer Blanc | Bronze Phosp |
|--------------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-----------|--------------|
| Alum | 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

VI.4.1. Aciers inoxydables

Si un acier est subit a un long contact avec l'air humide ou de l'eau et ne s'oxyde pas et n'est pas attaqué par la corrosion on peut dire que cette acier est inoxydable. Les compositions principales

de la rouille sont l'hydroxyde de fer et l'oxyde de fer. Les propriétés originales de l'inox reposent sur un alliage métallique s'appelle le chrome.

Une couche d'oxyde a liaison absorbante se compose à la surface de l'acier ce qui forme l'oxyde, de chrome ce qui induit un état passif qui signifie que la structure moléculaire suppose très difficile avec d'autres liaisons chimiques.

Cette réaction chimique est semblable à celui des métaux nobles, c'est pour ça on a besoin une concentration d'oxygène dans le milieu pour bien obtenir la passivité, car l'oxygéné est très important pour former l'oxydes. Généralement on distingue trois catégories principales des aciers inoxydables :

- A. Structures ferritiques :** Identifiées par leurs caractéristiques magnétiques, comme thermiquement fragiles et donc difficiles à souder.
- B. Structure austénitique :** Non magnétique et à sa structure très stable en régime thermique très diversifié. L'acier inoxydable dans cette catégorie a une bonne soudabilité.
- C. Les Réfractaires :** Magnétiques ou non magnétiques, certaines sont besoin des précautions particulières, et certain besoin d'autres plus de traitement thermique ou d'application sur la machine pour prouver les souder [13].

Le tableau 2 représente les compositions et les propriétés des aciers inoxydables et le tableau 3 représente les paramètres de soudage par point de l'acier inoxydable 304L.

VI.4.2. Aciers galvanisés

Parmi les tôles revêtues c'est le type le plus utilisée dans l'industrie et parmi aussi les matériaux utilisée dans notre présente étude. C'est un acier recouvert d'une couche de zinc par l'une des procédés de galvanisation par trempage à chaud ou de dépôt électrolytique pour donner plus résistant à la corrosion, les aciers galvanisés sont utilisés largement dans l'industrie automobile, structures sujettes à la rouille.

a- Domaine de soudabilité

Les aciers galvanisés parmi les tôles revêtues qui sont généralement soudables, mais sous certains paramètres particuliers.

b- Domaines d'activités [9]

- Les grands poteaux avec différentes tensions pour les lignes électriques.
- Mâts et tours de télécommunications avec support d'antenne

- Mâts de signalisation routière.
- Les citernes, réservoirs, ballons d’eaux chaudes....

c- Paramètres de soudage d’acier galvanise

Le tableau 4 présente les paramètres de soudage de l’acier galvanisé à différentes épaisseurs :

Tableau 2 : Compositions et les propriétés des aciers inoxydables [9, 13]

| Type d’acier inoxydable | Composition des alliages | Propriétés |
|--------------------------|--|---|
| Structures ferritiques | Chrome : 14 à 30 % Nickel : 6 à 36 % | – Ductile – Tenace – Très résistant à la corrosion – Non magnétique |
| Structures austénitiques | Chrome : 11 à 27 % Carbone : 0,12 à 0,35 % | – Magnétique – Résistant – Ductile – Résistant à la corrosion et à l’oxydation (surtout lorsque le taux de carbone est un peu plus élevée) |
| Structures martensite | Chrome : 4 à 18 % Carbone : pas plus de 0,15 % Autres éléments d’alliage : jusqu’à 3 % | – Très rigide et résistant – Magnétique – Fragile |

Tableau 3 : Paramètres de soudage par point de l'acier inoxydable 304L [9]

| Epaisseur du tôle (mm) | Diamètre d'électrode (mm) | Intensité (kA) | Temps de Soudage (Cycles) | Force de Soudage (daN) | Diamètre du noyau (mm) | Temps de forgeage |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 0.5 | 3.2 à 4 | 4 à 5 | 2 à 3 | 180 à 230 | 3 à 4 | 8 |
| 0.6 | 4 à 4.2 | 4.5 à 5.2 | 4 à 5 | 190 à 240 | 3.5 à 4 | 10 |
| 0.8 | 4.5 à 4.8 | 5.5 à 6 | 5 à 6 | 250 à 300 | 4 | 10 |
| 1 | 5 | 6.8 à 7 | 7 | 300 à 400 | 4.8 | 16 |
| 1.2 | 5.4 | 8 | 8 à 9 | 450 à 500 | 5 | 20 |
| 1.5 | 6 à 6.2 | 9 à 10 | 10 | 500 à 600 | 6 | 22 |
| 1.8 | 6.7 à 6.9 | 12 | 11 | 850 | 7 | 24 |
| 2 | 7 à 7.2 | 14 | 12 | 900 | 8 | 25 |
| 2.4 | 7.2 à 7.5 | 15 | 13 | 1000 | 9 | 25 |
| 2.5 | 7.5 à 8 | 16 | 14 | 1200 | 6 | 30 |
| 3 | 9 | 17.5 à 18 | 16 | 1500 | 7 | 40 |

Tableau 4 : Paramètres de soudage d'acier galvanisé pour différents épaisseur [9].

| Epaisseur du tôle (mm) | Diamètre d'électrode (mm) | Intensité (kA) | Temps de Soudage (Cycles) | Force de Soudage (Bar) | Pas minimale (mm) | Recouvrement minimal des tôles (mm) |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 0.5 | 3.5 à 4 | 8.5 à 9.5 | 5 à 7 | 1.3 à 2 | 12 | 10 |
| 0.6 | 4 à 4.3 | 9 à 10 | 6 à 7 | 1.5 à 2.3 | 12 | 10 |
| 0.8 | 4.5 à 5 | 6.5 à | 8 à 10 | 2 à 2.8 | 15 | 12 |
| 1 | 5 à 5.5 | 11 à 13 | 8 à 12 | 2.5 à 3.8 | 20 | 14 |
| 1.2 | 5.5 à 6 | 11 à 14 | 10 à 14 | 3 à 4 | 25 | 15 |
| 1.5 | 6 à 6.5 | 12 à 15.5 | 14 à 18 | 3.5 à 4.5 | 30 | 16 |
| 2 | 7 à 7.5 | 14 à 19 | 20 à 28 | 5 à 7 | 35 | 18 |
| 2.5 | 8 à 8.5 | 17 à 25 | 30 à 40 | 6.5 à 9 | 45 | 24 |
| 3 | 9.5 à 10 | 22 à 28 | 40 à 50 | 9 à 12 | 55 | 30 |
| 4 | 12 à 13 | 24 à 30 | 60 à 80 | 12.5 à | 100 | 45 |
| 5 | 13 à 14 | 26 à 32 | 80 à 120 | 15 à 18 | 130 | 55 |

POINTS A RETENIR / CONCLUSION

L'intérêt de ce chapitre est de bien comprendre le procédé de soudage par résistance électrique de façon générale ainsi que la technique de soudage par résistance par point spécialement puisqu'elle est notre intérêt dans cette étude, Avec l'explication de ses paramètres ainsi que l'interaction Electrique, Thermique, Métallurgique, Mécanique pour obtenir ce type de soudage. Ensuite une description sur le point de soudure et son environnement et la soudabilité des matériaux avec les paramètres de soudage de nos matériaux d'étude qui sont l'acier inoxydable et l'acier galvanisé sont présentés.

REFERENCES

- [1] S. Chainarong (2005). Modélisation du procédé de soudage par points. Mécanique [physics.medph], École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [2] R. CAZES (1993). Soudage par résistance. Techniques de l'Ingénieur : Travail des matériaux – Assemblage. Vol. base documentaire : TIP153WEB., No ref. article : b7720. Editions T.I.
- [3] Z. Guotao, Z. Hang, X. Xianghe, Q. Guohua, L. Yongbing, et L. Zhongqin (2019). Metallic bump assisted resistance spot welding (MBaRSW) of AA6061-T6 and Bare DP590: Part II-joining mechanism and joint property. Journal of Manufacturing Processes, pp. 19-27.
- [4] P. Yong, G. Nicolò, S. Hang, L. Wencheng, M. Jun, et Y. Siu Fung (2022). Experimental investigation on microstructures and mechanical properties of PG4 flash-butt rail welds. Engineering Failure Analysis, Vol. 141, 106650.
- [5] R. CAZES (1993). Soudage par résistance. Techniques de l'ingénieur Travail des matériaux - Assemblage, vol. base documentaire : TIP153WEB., no ref. article : b7720. Editions T.I.
- [6] D. Syvain (2009). 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.
- [7] R. Frederique (2007). Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point. Thèse de Doctorat, Université balaise pascal.
- [8] T. Eric (1992). Modélisation du soudage par résistance par points. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- [9] Roland Cazes (1993). Soudage par resistance : Travail des métaux en feuilles, Assemblages. Technique de l'Ingénieur, Réf : B7720 v1.
- [10] G. Edouard (2018). Soudage par résistance des tôles fines revêtues : formation du noyau dans un assemblage de trois tôles. Mécanique [physics.med-ph], Université de Bretagne Sud.

- [11] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi & M. Goodarzi (2007). Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds ». *Science and Technology of Welding and Joining*, 12:3, pp 217-225
- [12] Monari G. (2022), Introduction au soudage par points-chapitre 6/
https://www.neurones.espci.fr/Theses_PS/MONARI_G/chapitre6.pdf.
- [13] Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication, métallique industrielle (CSMOFMI) en collaboration avec le Centre d'élaboration des, et moyens d'enseignement du Québec (CEMEQ) (2010). Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

Chapitre II :

Etat de l'art sur le soudage par résistance par points

INTRODUCTION

Ce chapitre présente un état de l'art sur les études des assemblages homogènes en aciers inoxydables et aciers galvanisés par soudage par points d'un côté. De l'autre côté, l'étude des assemblages hétérogènes d'une façon générale et principalement des assemblages acier inoxydable/acier galvanisé.

I. SOUDAGE PAR RSW DES MATERIAUX HOMOGENES

I.1. Soudage par résistance par point de l'acier inoxydable

La relation entre le diamètre du noyau et le courant de soudage pour le soudage par résistance par point des aciers inoxydables austénitiques de type 304 a été étudié par Shamsul et al [1]. La distribution de la dureté le long de la zone de soudage a également été étudiée. Les résultats montrent que l'augmentation du courant de soudage a permis de générer une augmentation du diamètre de noyau (Tableau 1). Par contre cette augmentation du courant de soudage n'a pas une grande influence sur la distribution de la dureté (Figure 1).

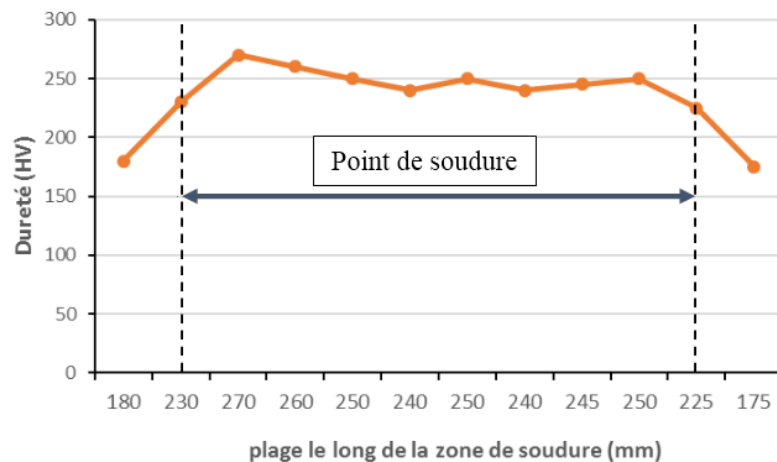


Figure 1 : Distribution de la micro-dureté sur le noyau de soudure [1].

Tableau 1 : Diamètres des pépites produites par chaque courant de soudage appliqué [1].

| N° | Courant de soudage (kA) | Diamètre du noyau (mm) |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| Eprouvette 1 | 2.50 | 3.00 |
| Eprouvette 2 | 3.75 | 3.00 |
| Eprouvette 3 | 5.00 | 5.00 |

| | | |
|--------------|------|------|
| Eprouvette 4 | 6.25 | 6.00 |
|--------------|------|------|

La relation de performance processus-microstructure dans le soudage par résistance par points de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 été l'intérêt de l'étude de Alizadeh-Sh et al. [2]. Les transformations de phase qui se produisent au cours du cycle thermique de soudage ont été analysées en détail, sur la base de la métallurgie physique du soudage des aciers inoxydables ferritiques. Il a été constaté que la microstructure de la zone de fusion et de la zone affectée par la chaleur est influencée par différents paramètres mise en jeu, notamment la croissance des grains, la formation de martensite et la précipitation de carbure. Les effets du cycle de soudage sur les propriétés mécaniques des points de soudure en termes de charge ou effort maximale, d'absorption d'énergie et de mode de défaillance ont été discutés.

L'effet du courant de soudage sur la taille de la zone de fusion est illustré par la figure 2. Plus le courant de soudage est élevé, plus la taille de la zone de fusion FZ est grande en raison de l'apport en chaleur élevé. Ce constat a été confirmé par les travaux de Pourvani [3] sur l'effet des paramètres de soudage sur la charge maximale et l'énergie d'absorption lors du soudage par point de l'acier faiblement alliés. La relation entre le courant de soudage et les propriétés mécaniques de la soudure en termes de charge maximale et d'énergie de rupture est illustrée par la figure 3. La charge maximale et l'énergie de rupture augmentent avec l'augmentation du courant de soudage en raison de l'augmentation de la zone de fusion des tôles (point de soudure ou noyau). La corrélation entre la taille de la zone de fusion et les propriétés mécaniques des soudures est présentée par la figure 4. Les deux caractéristiques de réponse mécanique des soudures par résistance par points lors des essais de cisaillement par traction sont améliorées en augmentant la taille de la zone de fusion. En effet, une taille de zone de fusion plus grande offre une plus grande surface de liaison entre les plaques par recouvrement. Le résultat obtenu [2] montre que la résistance du noyau à la rotation augmente et, par conséquent, plus de force est nécessaire pour atteindre la contrainte de résistance ultime à la traction du métal de base pour un mode de rupture par déboutonnage [4, 5].

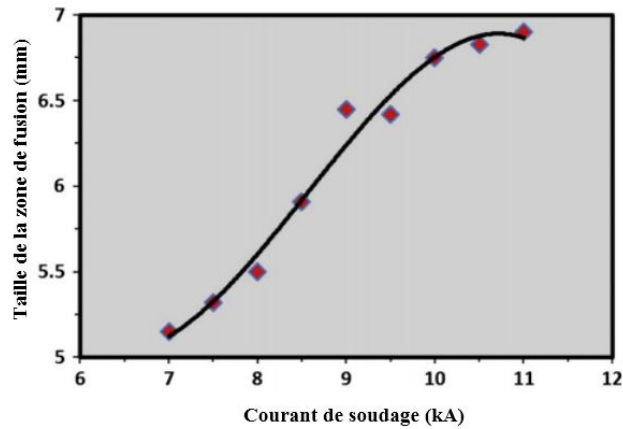


Figure 2 : Corrélation entre le courant de soudage et la taille de fusion [2].

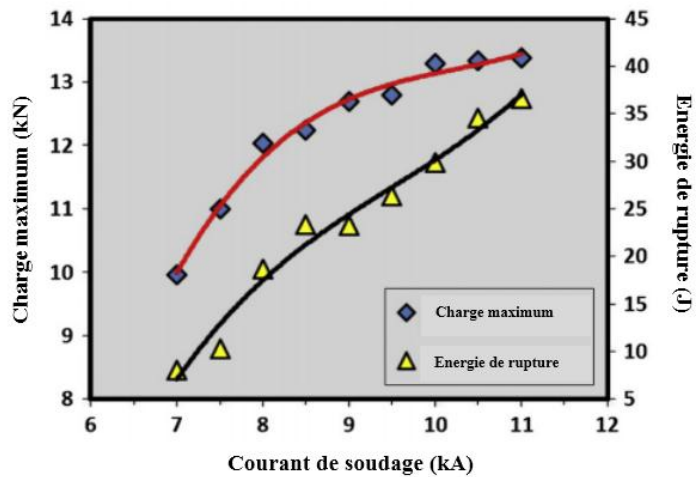


Figure 3 : Relation entre le courant de soudage et les propriétés mécaniques [2].

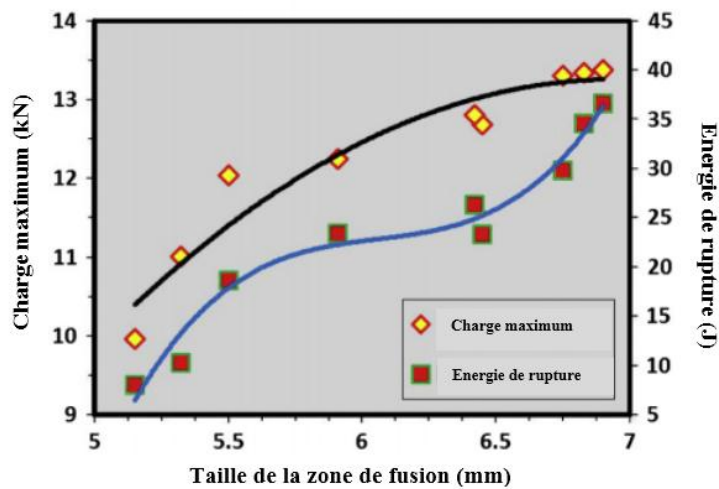


Figure 4 : Dépendance des propriétés mécaniques à la taille de la zone fusion [2].

Afin d'assurer une grande qualité d'un assemblage soudé, Les paramètres de soudage doivent être optimisés. Kianersi et al. [6] ont optimisé les paramètres de soudage par points pour l'acier inoxydable 316L. Ils ont révélé que l'augmentation du courant de soudage pour un temps de soudage fixe fait augmenter la charge maximale de rupture jusqu'à la valeur de courant de 8 kA (figure 5) de l'assemblage soudé en raison de l'augmentation du noyau de fusion (figure 6). Divers modes de rupture se sont produits sous l'augmentation du courant de soudage de la rupture interfaciale à la rupture par déboutonnage suivi de la déchirure du métal de base. Pour un courant de soudage plus élevé, des ruptures interfaciales et expulsion interfaciale ont été constaté selon les travaux de Haetham et al [7] (figure 7).

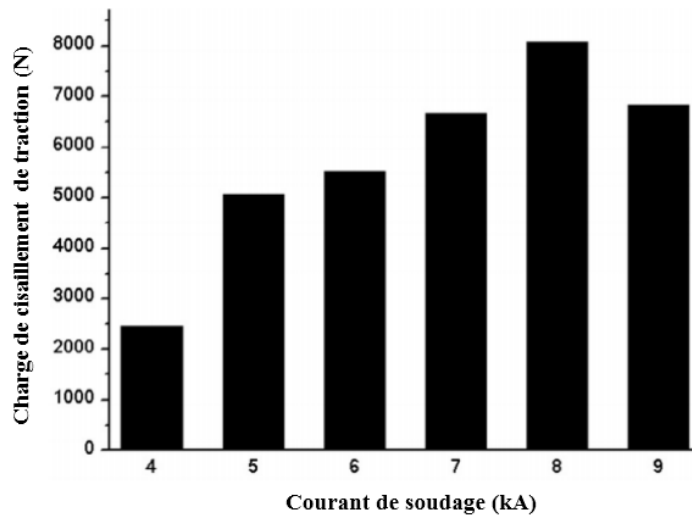


Figure 5 : capacité de charge de traction-cisaillement des échantillons de points de résistance soudés à un temps de soudage constant de 4 cycles [6].

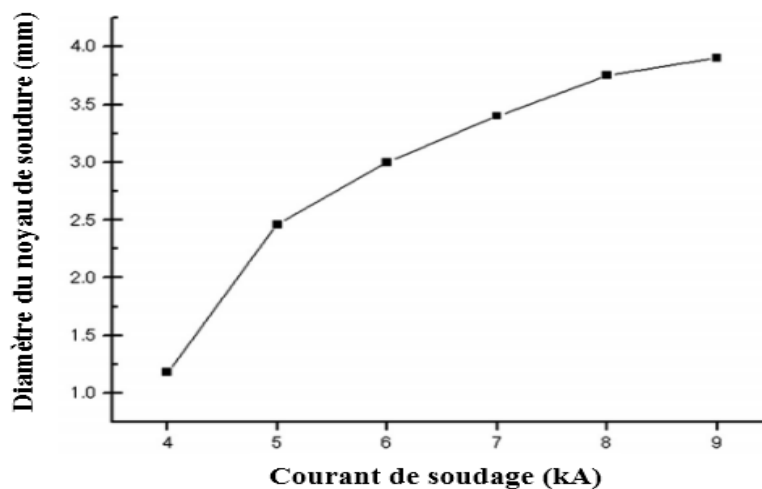


Figure 6 : Variations du diamètre du noyau de soudure en fonction de courant de soudage [6].

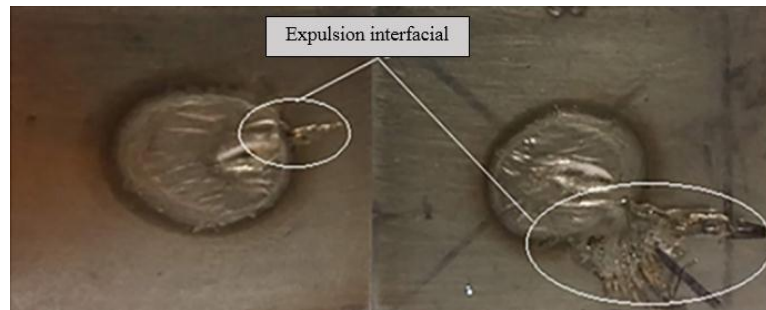


Figure 7 : Le mode de rupture de la résistance au cisaillement par traction [7].

L'effet du courant de soudage par résistance par points des tôles en acier inoxydable 304 de 0,4 mm d'épaisseur a été étudié par Bhat et al. [8]. L'effet de la variation du courant de soudage de 1 kA à 5 kA est investigué. Ils sont constatés que la taille du noyau de soudure augmente linéairement (figure 8) avec le courant de soudage jusqu'à la détection de l'expulsion du liquide au niveau de l'interface des plaques assemblées. L'analyse des échantillons a révélé des modes de rupture par déboutonnage. Les défauts tels que les fissures à chaud ont significativement influencé les modes de rupture. L'exposition à haute température a entraîné un appauvrissement en chrome dans la région ZAT. Ils sont trouvés que les défauts tels que la fissuration à chaud se trouvent dans les tôles en acier inoxydable 304 soudées par résistance.

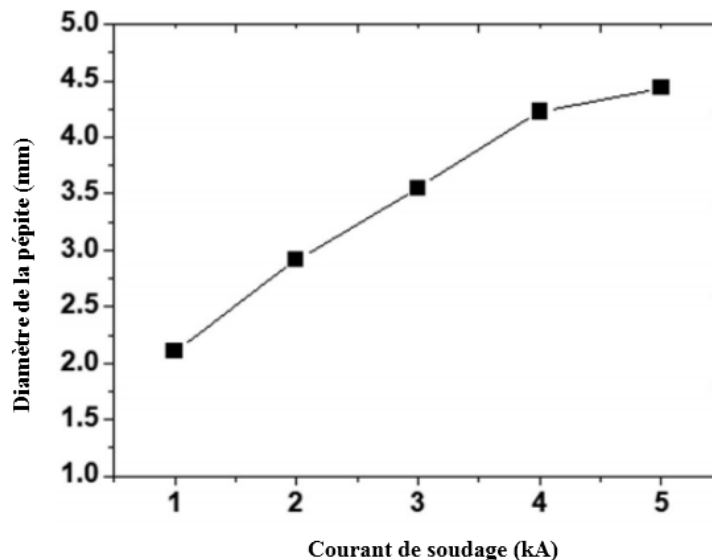


Figure 8 : Effet du courant de soudage sur la taille du noyau [8].

Les effets des paramètres de soudage par points (courant de soudage, temps de soudage et efforts des électrodes) sur le comportement mécanique des assemblages soudés en acier inoxydable 304 ont été étudiés par Kumar et al. [9]. Il a été constaté que le courant de soudage et le temps de soudage ont des effets significatifs sur la résistance à la traction car ils sont directement liés à la génération de flux thermique durant l'opération de soudage. La figure 9 met en évidence ses effets. La micro-dureté dans la zone de fusion est supérieure à celles de la zone affectée thermiquement et au métal de base en raison de la recristallisation [9].

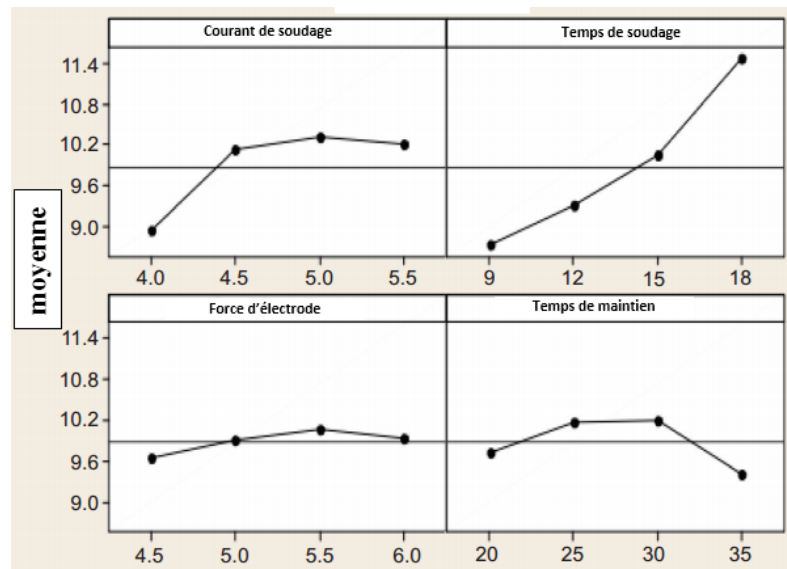


Figure 9 : Effet des paramètres de soudage sur la résistance à la traction [9].

La soudabilité d'un acier inoxydable (H1000) nouvellement développé en comparant avec des aciers biphasés et à faible teneur en carbone galvanisés à chaud (DP590 et GMW2) dans un empilement de deux tôles de métal similaire est investiguer par Feng et al [10] ils sont étudiés les lobes de soudure, les propriétés mécaniques, la morphologie de la soudure, les microstructures et les profils de micro-dureté des soudures réalisées avec les trois matériaux ont été comparés. Les résultats ont montré qu'un ramollissement significatif a été observé dans le noyau de soudure en acier inoxydable. Comparé à l'acier biphasé et à l'acier à faible teneur en carbone, l'acier inoxydable a un lobe de soudure très étroit mais nécessite un courant de soudage plus faible et un temps de soudage plus court (Figure 10). La soudure en acier inoxydable présente de meilleures propriétés mécaniques dans le cas de soudures avec la même taille du noyau, mais il avait tendance à présenter une rupture interfaciale dans les essais de cisaillement en traction (Figure 11) [10].

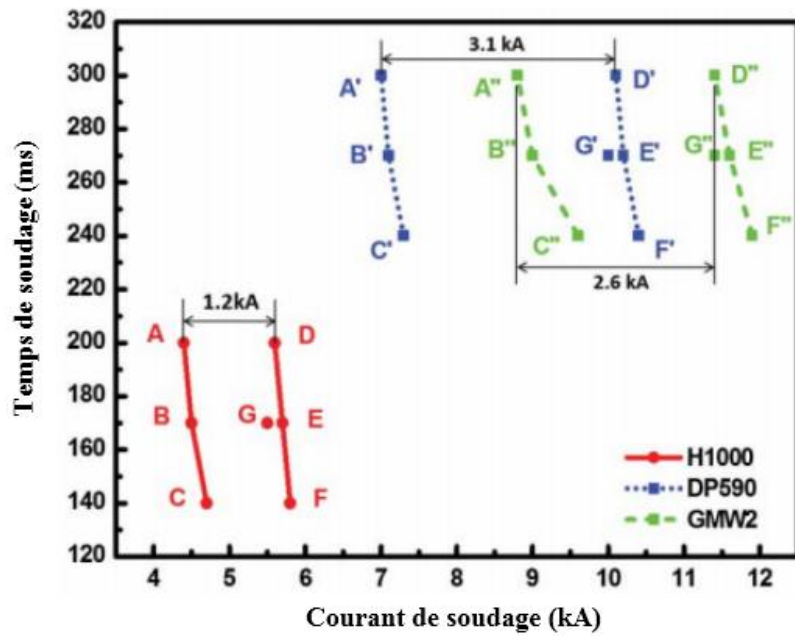


Figure 10 : Lobes de soudage des trois aciers à une force d'électrode de 3,6 kN [10].

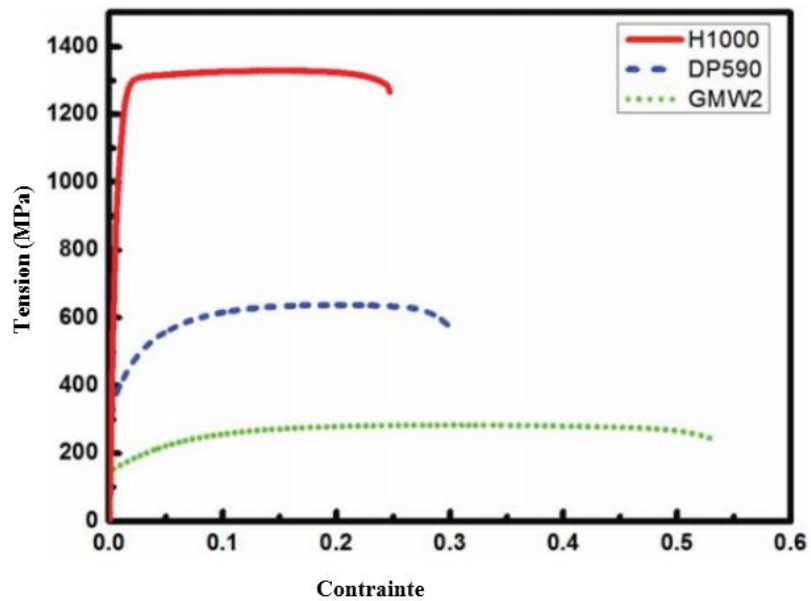


Figure 11 : Courbes contrainte-déformation des aciers H1000, DP590 et GMW2 [10].

I.2. Soudage par résistance par point des aciers galvanisés

L'effet du courant de soudage ainsi que le temps de soudage sont optimisés suite à une étude expérimentale réalisée par Viňáš et al. [11]. L'optimisation de ses paramètres de soudage par résistance par points des tôles en acier micro alliées galvanisées à chaud (Les tôles d'acier galvanisées H260 LAD EN 10292/2000 et H340 LAD EN 10292/2000) d'une épaisseur de 1 mm sont déterminés. Ce type de matériau est utilisé dans la fabrication de carrosseries d'automobiles. Sous un effort de soudage constant, les soudures réalisées, sont effectuées sous différents valeurs de courant et de temps de soudage. D'après l'évaluation de l'influence du courant de soudage sur la qualité des joints soudés par points par résistance de tôles d'acier micro alliées galvanisées à chaud, il a été montré que l'augmentation du courant de soudage a fait augmenter l'effort de cisaillement maximale dans les deux types de matériaux (Figure 12) [11].

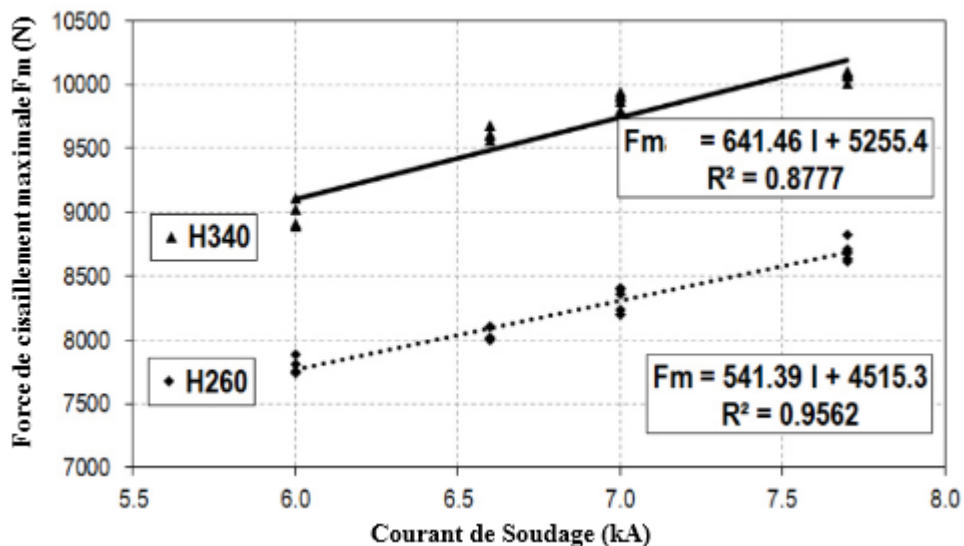


Figure 12 : Effet du courant de soudage sur la capacité de l'effort maximal F_m des assemblages par points [11].

D'après la modélisation de régression et l'analyse de processus élaborée par Yi et al. [12] du soudage par résistance par points des tôles en acier galvanisé, la méthode de conception d'assemblage de régression orthogonale multiple non linéaire a été appliquée. La géométrie des zones de fusion (noyau) et la résistance maximale en cisaillement par traction des soudures par points sont évaluées. De plus, quatre paramètres du processus, à savoir le courant de soudage, la force de l'électrode, la durée du courant de soudage et le courant de préchauffage, et les interactions

entre eux ont été considérés comme des facteurs ayant un impact sur les indices (diamètre du noyau, résistance maximale en cisaillement par traction). Les modèles mathématiques développés ont été optimisés au moyen d'une analyse de variance.

Les résultats de l'analyse ont indiqué que les effets du processus de soudage sur la taille du noyau et les propriétés mécaniques ne varient pas avec une courbe linéaire simple mais avec des caractéristiques non linéaires. Un noyau de diamètre important se formerait en raison de l'effet thermique et le transfert de chaleur généré par un courant de soudage plus élevé. Le diamètre du noyau étant limité par le diamètre d'électrode utilisé, la croissance du noyau tend vers une valeur extrême. Ce phénomène est montré par les figures 13a et b. : les courbes variables des valeurs de diamètre de pépite ont tendance à converger vers une zone à mesure que le courant de soudage augmente sous l'action de différentes forces d'électrode ou Temps de courant. Le plus grand diamètre de pépite a tendance à augmenter la surface effective à charger et à augmenter la résistance à la traction et au cisaillement de la soudure par points, ce qui pourrait être soutenu par les courbes des figures 14a et b. Ainsi, le changement de diamètre sur les figures 13a et b et le changement de résistance sur les figures 14a et b répondent de manière synchrone. Sur la figure 13c, la variation du diamètre du noyau fluctue avec l'augmentation de la force de l'électrode, ce qui est important pour le soudage de tôles d'acier galvanisées. L'effet de la force de l'électrode sur le diamètre du noyau n'obéit pas à une loi linéaire sous l'action d'un certain courant de soudage et d'un certain temps d'application du courant. D'une part, promouvoir correctement la force de l'électrode est bénéfique pour comprimer étroitement les pièces et générer des pépites. Mais l'augmentation excessive de la force de l'électrode conduit à une couche de zinc à bas point de fusion à fondre et à s'accumuler autour de l'électrode pour agrandir la zone de contact entre les pièces et les électrodes. Ainsi, la chaleur de résistance diminue en raison d'une densité de courant plus faible avec ce phénomène, puis un diamètre de pépite plus petit est obtenu. D'autre part, une force d'extrusion excessive des électrodes écrase le métal liquide pour se transformer en éclaboussures lors de la formation des noyaux. La taille du noyau diminue avec cet effet, ce qui est également désavantageux pour la qualité du soudage par RSW en raison de la diminution de la surface effective à charger et des propriétés mécaniques de la soudure par points. Ainsi, la force d'électrode appropriée est nécessaire pour le soudage par points par résistance [12].

L'analyse des résultats obtenus par Yi et al. [12] et présentés par la figure 14c montre que la résistance des soudures par points était presque égale à celle du métal de base et les soudures par points étaient presque déchirées sur le côté du métal de base.

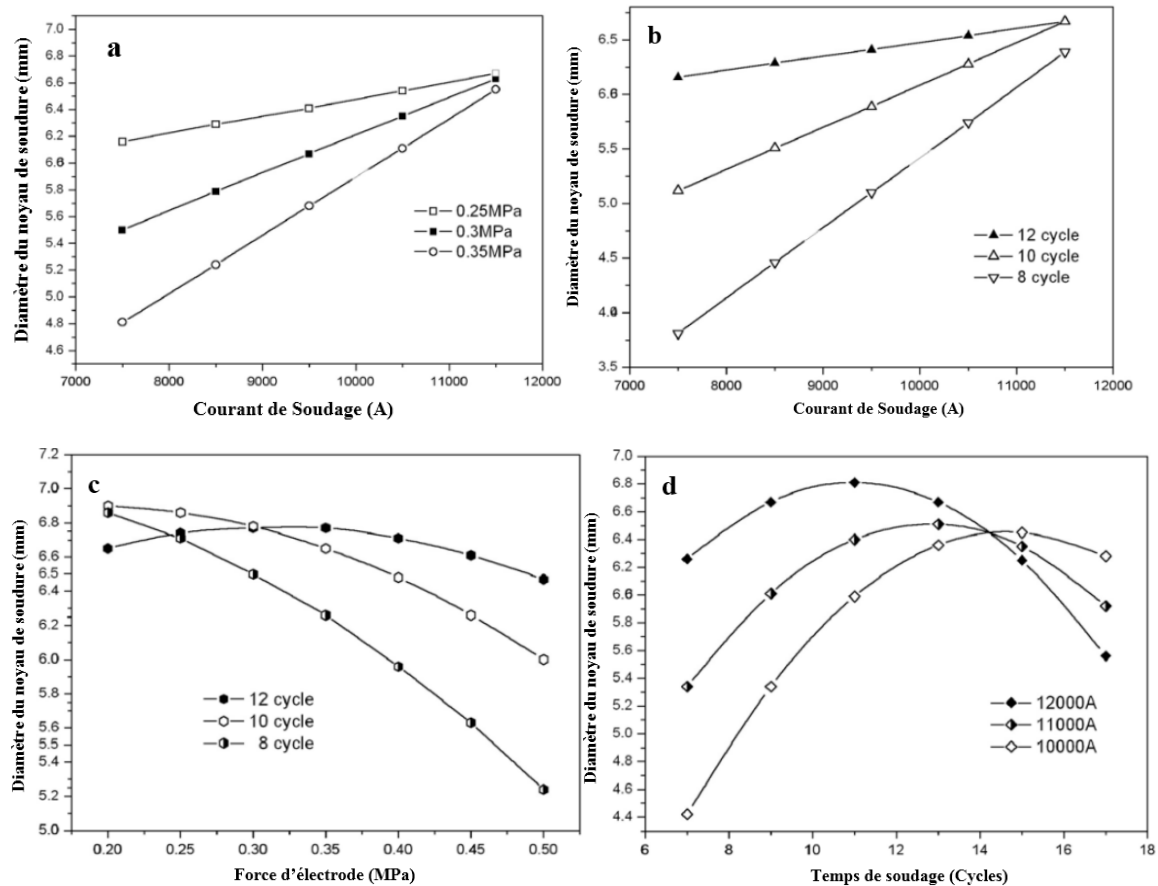


Figure 13 : Effet des paramètres de processus sur le diamètre du noyau

(a) Durée du courant de soudage est de 12 cycles, (b) Force de l'électrode est de 0,3 MPa, (c) Courant de soudage est de 12 kA et (d) Force de l'électrode est de 0,3 MPa [9].

Les figures 13d et 14d illustres l'effet non linéaire de la durée du courant variant sur le diamètre du noyau et la résistance au cisaillement par traction de la soudure par points. D'une part, plus de chaleur de résistance est générée avec l'augmentation de la durée du courant par rapport à la description de l'équation d'effet joule, et la plus grande taille de noyau est obtenue, ce qui est bénéfique pour la formation fiable de soudures par points avec une résistance au cisaillement par traction plus élevée [12].

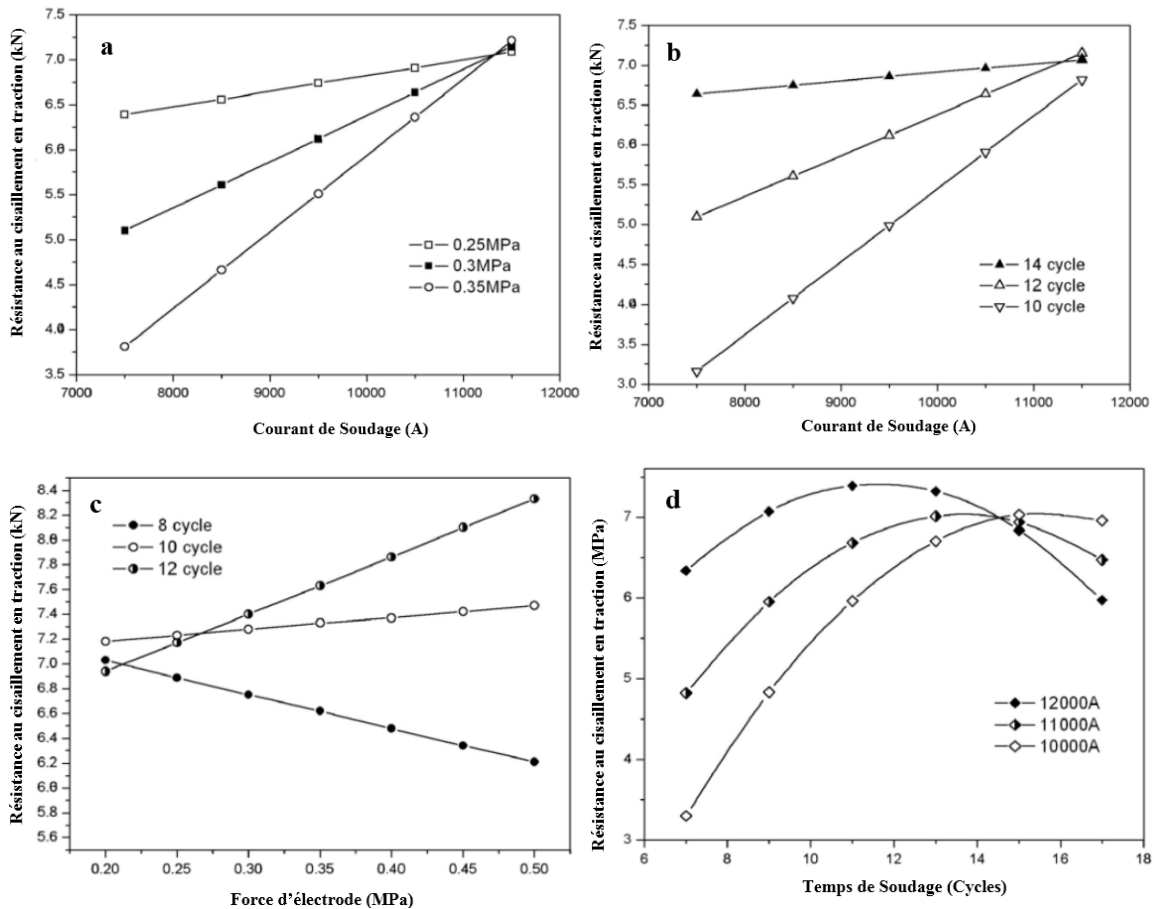


Figure 14 : Effet des paramètres de soudage sur la résistance de cisaillement par traction (a) Durée du courant de soudage est de 12 cycles, (b) Force de l'électrode est de 0,3 MPa, (c) Courant de soudage est de 12 000 A et (d) Force de l'électrode est de 0,3 MPa [12].

L'effet des paramètres de soudage tels que le courant de soudage et le temps de soudage, les effets du revêtement de zinc sur la géométrie du noyau de soudure, la résistance au cisaillement par traction, les modes de rupture, la dureté et la microstructure de l'échantillon soudé par points par résistance par points ont été étudiés par Ertek Emre et al. [13] expérimentalement sur des aciers TRIP800 galvanisés et des aciers non revêtus de zinc. Il a été constaté que le diamètre du noyau augmentait avec l'augmentation des courants de soudage supérieurs à 6 kA pour tous les temps de soudage (15, 20 et 25 cycles) (figure 15 a et b). L'utilisation d'un courant de soudage supérieur à 6 kA provoque plus de forgeage de zones tendres et diminue la hauteur du noyau (figure 18c et d). Le revêtement sur la surface de l'acier TRIP800 provoque une diminution de la taille du noyau de soudure et de la résistance au cisaillement de la soudure où la section transversale du noyau est plus épaisse [13].

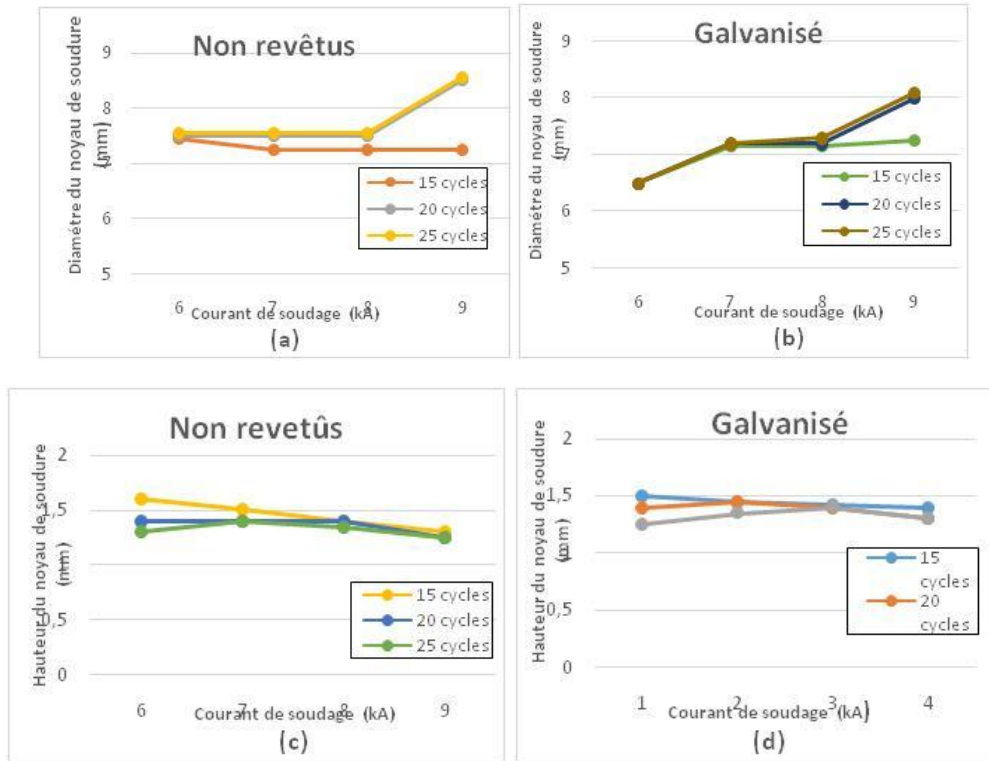


Figure 15 : Effet des paramètres de soudage sur : (a) et (b) : Diamètre du noyau de soudure. (c) et (d) : Hauteur du noyau de soudure [13].

La figure 16 indique que la largeur de la ZAT des deux soudures s'agrandit avec l'augmentation des paramètres de soudage. Il convient de noter que l'échantillon soudé galvanisé au zinc a une ZAT plus grande. Cela pourrait s'expliquer par la conductivité thermique plus élevée de l'acier galvanisé et un élargissement du rayon de contact électrothermique, dû à l'accumulation de zinc ou aux incertitudes des expériences et des mesures (y compris l'identification de la ZAT) [13].

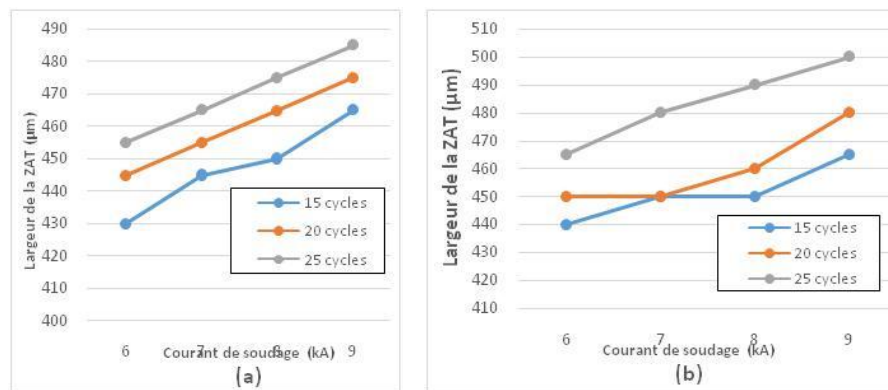


Figure 16 : Effet des paramètres de soudage sur la largeur de la ZAT : (a) sans revêtement ; (b) galvanisé [13].

L'investigation expérimentale conduite par Hillan Sar [14] sur le soudage par points d'acier galvanisé ASTM A653 utilisant une couche intermédiaire en cuivre à haute conductivité sans oxygène a mis en évidence l'effet du courant de soudage et la charge appliquée sur la charge de cisaillement par traction. Trois valeurs de courant 9.6, 11.0 et 12.3 kA et des charges d'électrode de 350, 400 et 450 kg ont été sélectionnés avec un temps de soudage constant de 25 Cycles [14].

Le résultat de l'effort tranchant pour l'éprouvette soudée est présenté à la figure 17. Comme il a été observé, quel que soit le courant, la force de cisaillement augmente avec la diminution de la charge. La présence de cuivre réduit la force de cisaillement de la soudure, c'est-à-dire que la force de cisaillement augmente avec la diminution de la charge appliquée. D'autre part, la force de cisaillement augmente à mesure que le courant augmente. Alors que les résultats optimaux sont obtenus pour un courant de soudage plus élevé (12.3 kA). La force de cisaillement optimale est obtenue avec un courant de 12.3 kA et une charge de 350 kg [14].

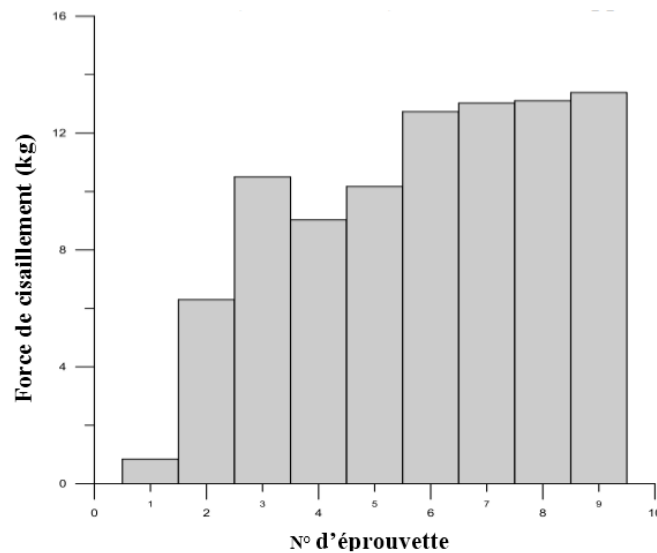


Figure 17 : Force de cisaillement pour éprouvettes galvanisées [14].

II. SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINT DES MATERIAUX HETEROGENES

II.1 soudage de l'acier doux et l'acier inoxydable

Les effets des paramètres de soudage sur la taille du noyau, la résistance au cisaillement en traction, les propriétés mécaniques du joint ont été étudiés expérimentalement par Wang et al. [15] de l'acier doux Q235 et l'acier inoxydable SUS304 qui ont été soudés par points avec une couche intermédiaire de Ni. La résistance au cisaillement en traction et le diamètre du noyau ont augmenté avec l'augmentation du courant de soudage et du temps de soudage, Inversement, le paramètre de résistance et le diamètre du noyau ont diminués par l'augmentation de l'effort de pression de l'électrode. De plus, les résultats indiquent que la résistance au cisaillement par traction d'un joint soudé par résistance par points avec un intercalaire en Ni est supérieure à celle obtenue par résistance par points conventionnel [15].

Kolarik et al. [16] ont investigué les propriétés mécaniques d'un assemblage par résistance par points entre l'acier à faible teneur en carbone DC 01 et l'acier inoxydable austénitique 304 avec une même épaisseur de 2 mm. Les paramètres de soudages sélectionnés sont le courant de soudage (7 à 8 kA) avec un effort de soudage constant de 4 kN et un temps de soudage de 370 ms [16].

La macrostructure du joint soudé obtenue pour un courant de soudage de 7,5 kA est présentée à la figure 18. Il est à remarquer que le joint soudé est asymétrique. La taille de la zone de fusion du côté de l'acier inoxydable est plus grande que celle de la zone de fusion du côté de l'acier à faible teneur en carbone. Des résultats similaires ont également observés dans les soudures réalisées avec des courants de soudage de 7 et 8 kA. La zone affectée thermiquement (ZAT) de l'acier DC 01 est plus large en raison de la conductivité thermique plus élevée de la tôle d'acier à faible teneur en carbone. Sur la base de l'analyse de la macrostructure, on peut affirmer que plus le courant de soudage est élevé plus la zone de fusion est importante [16]. La mesure de la dureté dans la zone de fusion a révélé l'augmentation de cette dernière (figure 19). La dureté mesuré dans la zone de fusion coté acier faible teneur en carbone est de 367,9 HV où cette dernière dans le métal de base a été de 131 HV. Une augmentation perceptible similaire a été atteinte dans la tôle d'acier inoxydable où la dureté mesurée dans l'acier AISI 304 est passée d'une valeur de 186,9 HV à une valeur de 359,9 HV dans la zone de fusion. L'étude de l'interface du joint soudé réalisée par

analyse EDX a révélé une augmentation de la teneur en fer dans le sens des métaux fondus vers l'acier DC01. De plus une diminution du Cr, Mn et Ni du métal fondu vers l'acier DC 01 a également été enregistrée [16].

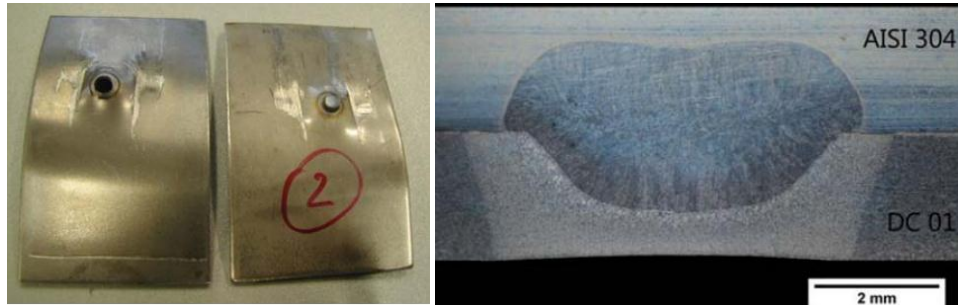


Figure 18 : Taille du noyau de soudure (à gauche) et de la macrostructure d'une soudure par points de résistance dissemblable sélectionnée ($I = 7,5 \text{ kA}$) [16].

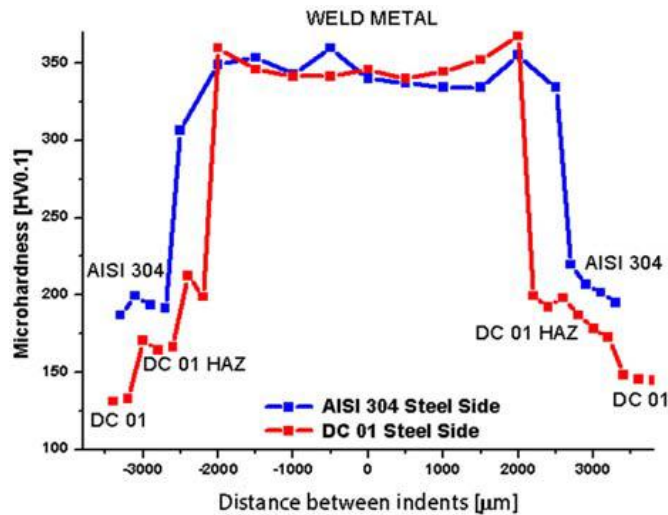


Figure 19 : Micro-dureté au niveau du point de soudure à matériaux hétérogènes [16].

D'après l'étude analytique réalisée Aravinthan et al. [17] où l'évolution de la dimension du noyau a été analysée sur les assemblages homogènes en acier doux et en acier inoxydable et les assemblages hétérogènes acier doux/acier inoxydable sous l'influence du courant de soudage et du temps de soudage pour un effort d'électrode fixe. La dureté de la zone soudée est supérieure à la dureté de la zone non soudée pour les trois types de joints et l'augmentation de la dureté entre la zone non soudée et la zone soudée est plus importante dans l'acier doux par rapport à l'acier inoxydable en raison de la meilleure conductivité thermique et de la résistance électrique inférieure (figure 20).

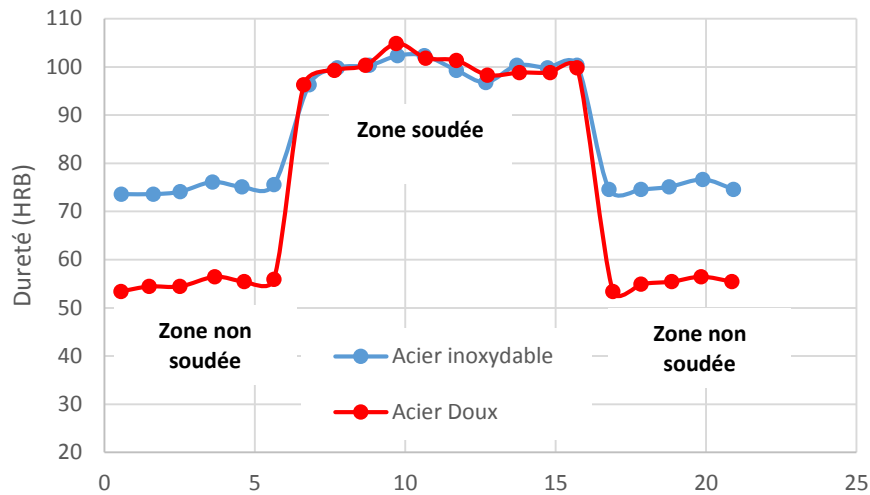


Figure 20 : Dureté au niveau d'un point de soudure à joint hétérogène (acier inoxydable/acier doux) [17].

En effet, une augmentation du courant et du temps de soudage a entraîné une augmentation du diamètre de la soudure et, par conséquent, une augmentation de la résistance de la soudure. La quantité de chaleur générée à l'interface de soudage augmentait à mesure que le courant de soudage et le temps de soudage augmentaient. Les soudures en acier inoxydable semblaient avoir une résistance à la traction plus élevée par rapport aux deux autres types de joints, puisque les ruptures se produisaient au bord de la soudure par points (déchirure du bord des noyaux), ce qui était attendu par les propriétés des matériaux (figure 21) [17]. L'acier inoxydable semble avoir une résistance de soudure plus élevée que l'acier doux et les soudures mixtes en raison de la nature de la dureté du matériau. Les ruptures d'arrachement se sont produites au bord de la soudure (déchirure du bord) dans la plupart des cas. Le déboutonnage a été remarqué pour de mauvaises soudures. La résistance de la soudure mixte (acier doux et acier inoxydable) est presque similaire à la résistance des soudures en acier doux pur.

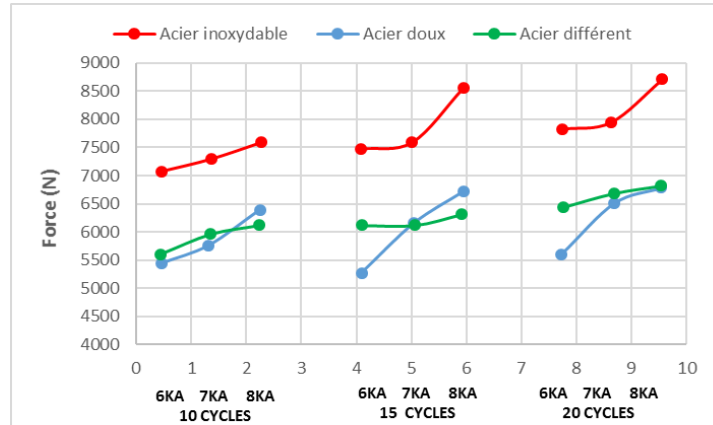


Figure 21 : Effort de cisaillement maximal en fonction des paramètres de soudage [17].

L'étude conduite par Jamasri et al. [18] sur le comportement en fatigue/corrosion des assemblages hétérogènes (hétérogènes) soudés par points avec une différence significative d'épaisseur entre l'acier au carbone et l'acier inoxydable austénitique. L'acier au carbone SS400 d'une épaisseur de 3,0 mm et l'acier inoxydable austénitique 304 de 1,0 mm d'épaisseur ont été assemblés par recouvrement par résistance par points. Sous les conditions de soudage fixe (4,7 kA, 20 cycles et 6 kN), des tests de fatigue/ corrosion ont été effectués à température ambiante dans un environnement d'eau de mer avec une salinité de 34.5 g/L et un pH de 8,0. Les résultats présentés par la figure 22 montrent que la résistance à la fatigue par compression des assemblages soudés par points dans l'eau de mer est inférieure à celle réalisée dans l'air. La limite d'endurance en fatigue conduite dans l'air est de 32,6 MPa alors que les échantillons en fatigue sous corrosion à cette contrainte se rompent à environ 4×10^5 cycles. Il semble que le mécanisme de plasticité renforcée par l'hydrogène qui tend à faciliter la génération de dislocations soit la cause du mécanisme des piqûres de corrosion [18].

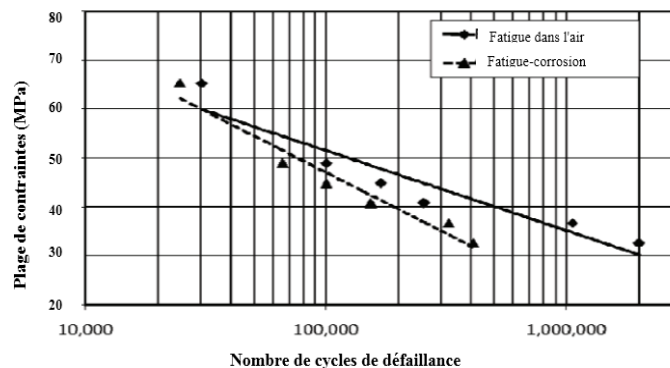


Figure 22 : Résultats des essais de fatigue sous corrosion et fatigue du joint hétérogène (dissemblable) soudé par points à différence significative en épaisseur [18].

Dans le même contexte Safari et al. [19] ont conduit une étude expérimentale sur le comportement mécanique des joints hétérogènes soudés par RSW des aciers eutectoïde AISI 1075 à l'acier inoxydable AISI 201. Les effets des paramètres de soudage tels que le courant de soudage, le temps de soudage, le temps de refroidissement et la force de l'électrode ont été investiguées. Les résultats du comportement mécanique montrent que le courant de soudage et le temps de soudage ont un effet significatif sur la résistance à la traction où l'augmentation de ses derniers paramètres augmente la résistance au cisaillement par traction (Figure 23). Par contre, l'augmentation de la force de l'électrode et du temps de refroidissement, la résistance en cisaillement par traction des joints soudés diminue. Lors des essais de traction-cisaillement, trois modes de rupture sont observés, le mode interfacial, le mode d'arrachement partiel et le mode de déboutonnage.

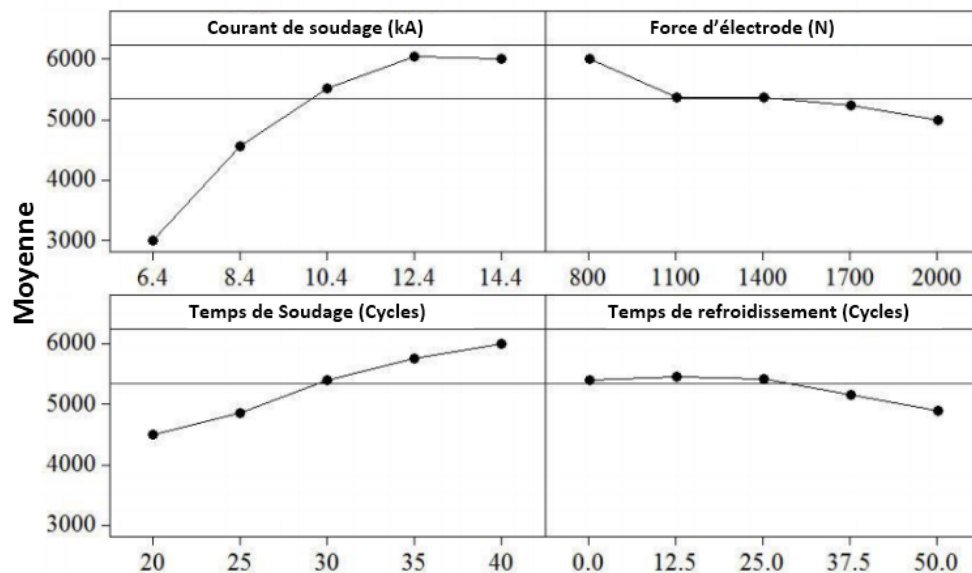


Figure 23 : Effets des paramètres de soudage sur la résistance cisaillement par traction [19].

L'analyse de la variance de la résistance au cisaillement par traction indique que les principaux paramètres d'effets de premier ordre sont le courant de soudage, la force de l'électrode, le temps de soudage, le temps de refroidissement, Les effets de second ordre sont les interactions à deux niveaux du courant de soudage avec le temps de soudage (Figure 24) où le temps de soudage varie entre 28 et 40 cycles entraîne une forte augmentation de la résistance au cisaillement par traction et la résistance des soudures par points augmente jusqu'à 6.8 kN. Cela est dû au fait que plus de flux de température est générée on a une augmentation de la résistance de la soudure. La figure 3

illustre la deuxième interaction qui est entre le courant de soudage et le temps de refroidissement où les résultats montrent que la résistance au cisaillement par traction des joints de soudures par points par résistance augmente avec l'augmentation du courant de soudage et la diminution du temps de refroidissement. Il est à noter à partir de la figure 25, que pour les cycles de refroidissement faibles, les variations du courant de soudage affectent sensiblement la résistance cisaillement par traction comparativement par rapport à l'effet du courant de soudage pour des cycles de refroidissement élevés. L'électrode sera alors plus exposée à l'usure si le cycle de refroidissement est trop long.

Pour l'interaction entre la force de l'électrode avec le temps de refroidissement, les résultats sont illustrés par la figure 26 où la résistance au cisaillement par traction des joints de soudures par RSW augmente avec la diminution de la force de l'électrode et du temps de refroidissement. La raison en est que lorsque la force de l'électrode a augmenté, l'énergie thermique diminue en raison de la résistance électrique plus faible. Pour des courants élevés, le métal fondu jaillit entre les tôles, ce qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement par traction.

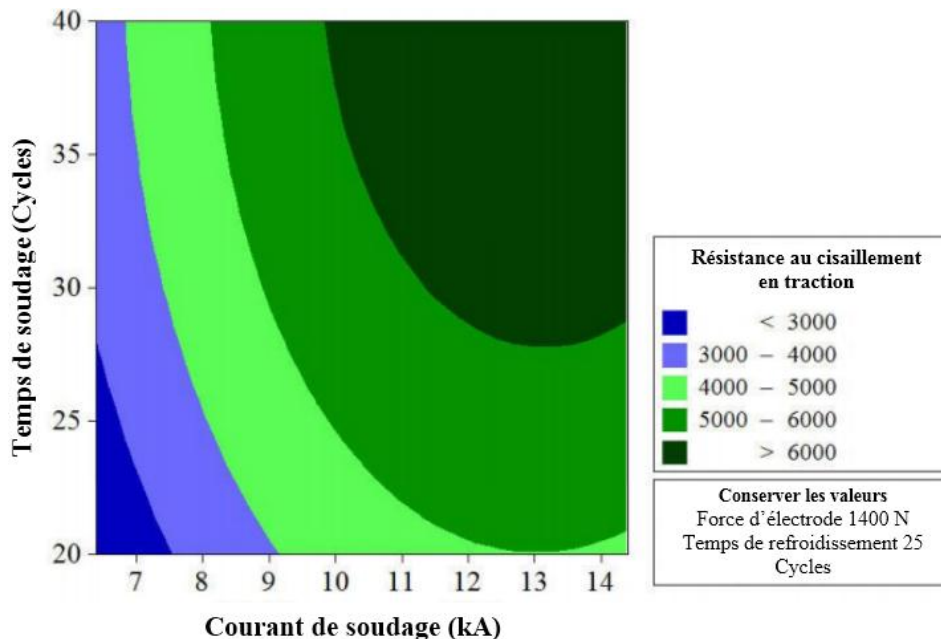


Figure 24 : Contour des effets d'interaction du courant de soudage et du temps de soudage [19].

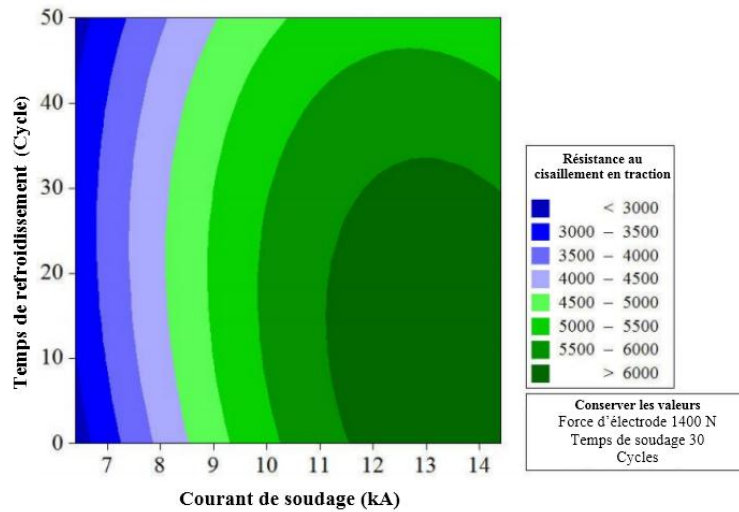


Figure 25 : Contour des effets d'interaction du courant de soudage et du temps de refroidissement [19].

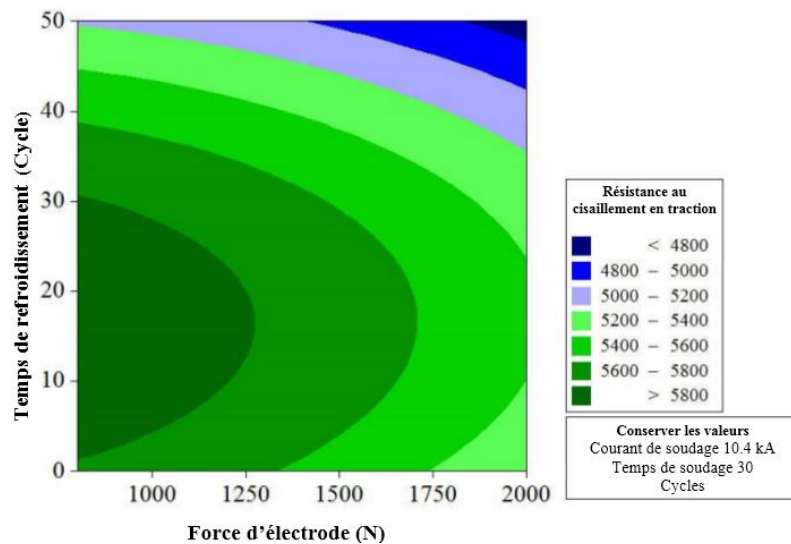


Figure 26 : Contour des effets d'interaction de la force de l'électrode et le temps de refroidissement [19].

L'étude expérimentale élaborée par Shawon et al. [20] est basée sur l'effet du courant de soudage (3 à 9 kA) sur la microstructure et les propriétés mécaniques des joints hétérogènes soudés par RSW des aciers inoxydables austénitiques et des aciers à faible teneur en carbone. La taille du noyau de soudure augmentait avec l'augmentation du courant de soudage (figure 27). La taille du noyau (plus grande) est contrôlée par l'apport de chaleur et en conséquence pour des courants plus élevés. L'analyse de la dureté dans les assemblages hétérogènes a montré que la valeur moyenne de la dureté est plus élevée dans la zone de fusion (noyau de soudure) que dans la zone affectée

par la chaleur et inférieure au métal de base dans les deux métaux de base. Cela est dû à la formation de martensite dans le noyau de soudure. En plus il a été constaté trois modes de rupture sont générés : mode interfacial, mode déboutonnage, et le mode de déchirure du métal (Figure 28) sous l'effet de la taille du noyau ou zone de fusion.

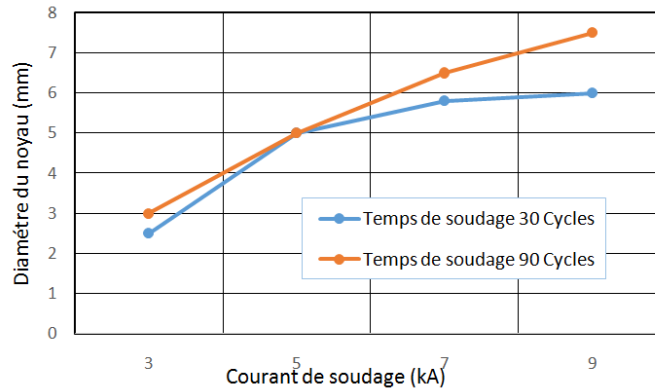


Figure 27 : Effet du courant de soudage sur la taille du noyau [20].



Figure 28 : Modes de rupture pour des joints hétérogènes [20].

(a) Interfacial, (b) déboutonnage, (c) déchirure du métal de base

Une analyse des modes de rupture des joints hétérogènes (acier inoxydable / Acier galvanisé) soudée par RSW a été menée par Pouranvani et al. [21]. Les résultats montrent que la taille du noyau (zone de fusion) et le mode de défaillance sont les facteurs les plus importants pour caractériser la qualité du joint de soudure en termes de la charge et d'absorption d'énergie qui sont liés aux paramètres de soudage à savoir le courant de soudage, le temps de soudage et la force de l'électrode (Figure 29). La microstructure prédite du noyau de soudure du joint hétérogène entre l'acier galvanisé et l'acier inoxydable à l'aide du diagramme de Schaeffler est entièrement martensite (Figure 30), lorsque la fraction volumique de l'acier galvanisé dans le noyau de soudure est de 60 %. Il convient de noter que le changement du courant de soudage dans cette plage (>8 kA) n'a pas d'effet significatif sur la dureté du noyau de soudure (Figure 31).

Selon Pouranvani et al. [21], l'augmentation du courant de soudage pour un temps de soudage constant conduit à une augmentation de la charge de maximale de rupture par cisaillement par traction et de l'énergie de rupture (figure 32). L'effet du temps de soudage lui aussi à son effet sur la charge maximale. Les résultats reportés par Hayat [22], montrent que l'augmentation du temps de soudage augmente légèrement la capacité de traction (figure 33).

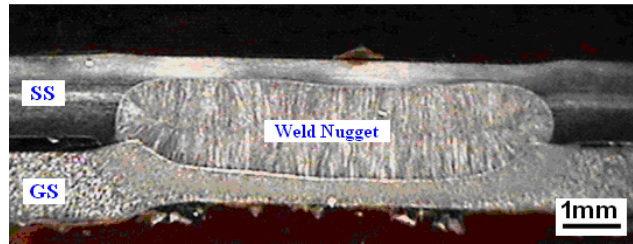


Figure 29 : Macro structure d'un joint hétérogène (Acier inoxydable/Acier galvanisé) [21].

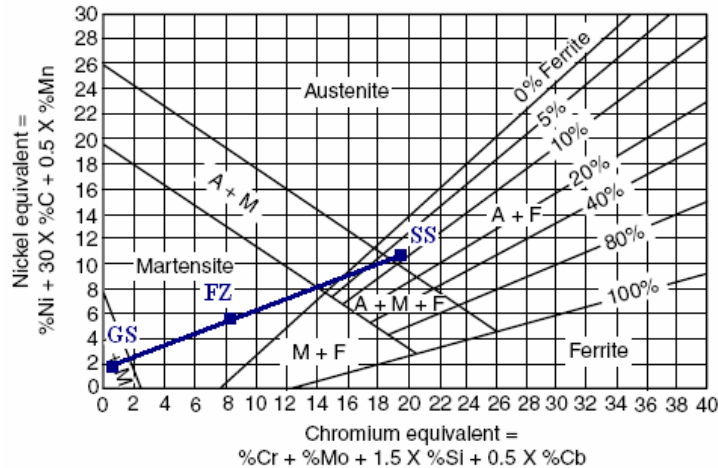


Figure 30 : Diagramme de Schaeffler, prédiction de la microstructure de la zone de fusion (Un noyau à 60 % d'acier galvanisé) [21].

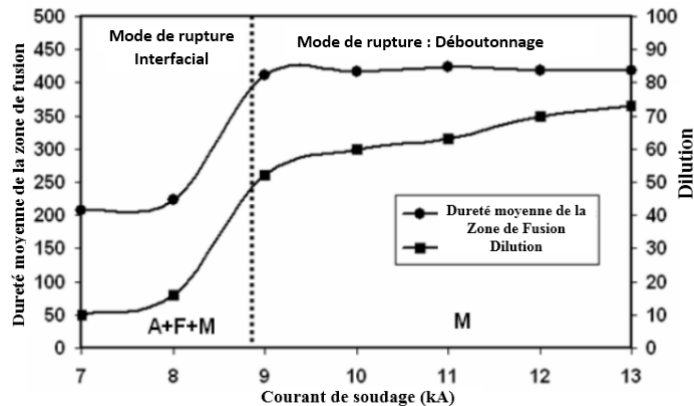


Figure 31 : Effet du courant de soudage sur la dilution, la dureté moyenne de la zone de fusion, la microstructure, et le mode de rupture du joint hétérogène [21].

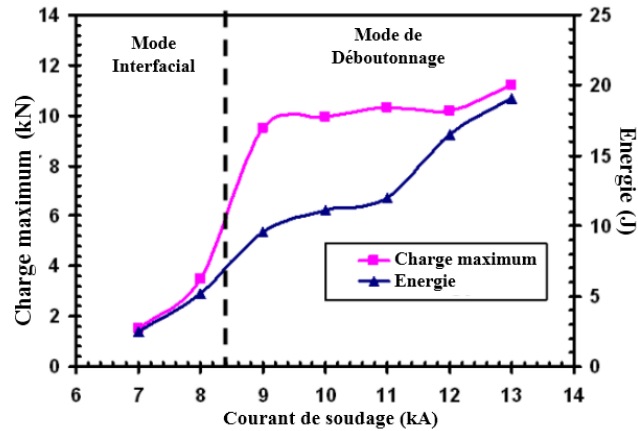


Figure 32 : Effet du courant de soudage sur la charge maximale et l'énergie de rupture [21].

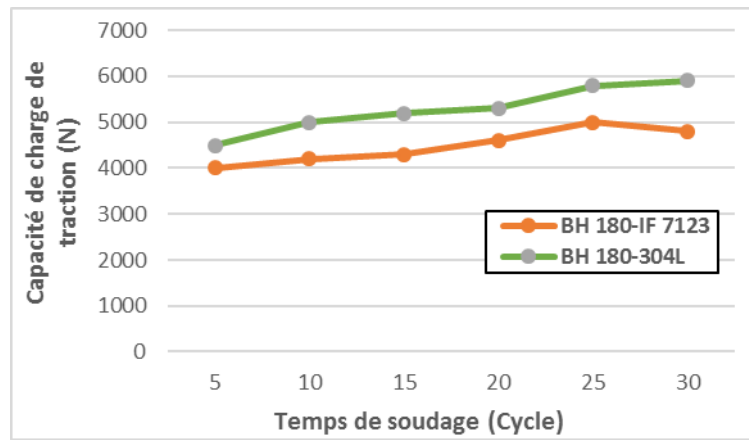


Figure 33 : Effet du temps de soudage sur la capacité portante de charge de traction (TLBC) des joints de soudure [22].

L'étude d'optimisation des paramètres de soudage RSW pour des joints hétérogènes sur la résistance maximale, le diamètre du noyau et l'indentation du point de soudure a été conduite par Aravinthan et al. [23] et a montré que le courant du soudage présente un effet important par rapport aux autres paramètres (temps de soudage et force de l'électrode) (figure 34).

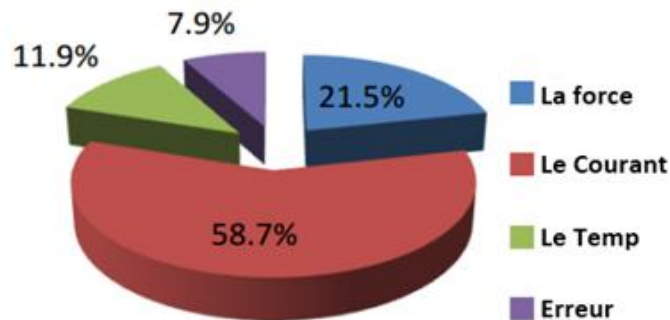


Figure 34 : Contribution des paramètres de soudage dans l'optimisation des processus [23].

POINTS A RETENIR / CONCLUSION

Ce chapitre comportant l'état de l'art sur le comportement mécanique des joints homogène et hétérogène soudés par RSW nous a permis de bien comprendre les effets des paramètres de soudage sur le comportement mécanique (charge maximale de rupture, dureté), l'aspect métallurgique et géométrique du point de soudure l'état de l'art des études antérieures pour le soudage par résistance par point des aciers quel que soit le soudage homogène ou le soudage hétérogène, ou nous pouvons le résumer dans les points suivants :

- L'augmentation du courant de soudage augmente la taille de la zone fusion et le diamètre du point de soudure ce qui augmente la charge maximale, et la charge de rupture.
- Le courant de soudage a eu le plus grand impact sur la charge maximale en cisaillement par traction ainsi que le temps de soudage, puis la force de soudage qui a un impact plus ou moins faible par rapport aux autres paramètres.
- Le revêtement sur la surface de l'acier provoque une diminution de la taille du noyau de soudure et de la résistance au cisaillement de la soudure et une section transversale de pépite plus épaisse.
- Les modes de rupture ont un indice très important sur la résistance en cisaillement par traction.

REFERENCES

- [1] Shamsul J.B., Hisyam M.M., (2007). "Study of Spot Welding of Austenitic Stainless Steel Type 304"; Journal of Applied Sciences Research, 3(11): 1494-1499
- [2] M. Alizadeh-Sh a, S.P.H. Marashi a, M. Pouranvari ; 2014 ; « Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties” ; Materials and Design 56 (2014) 258–263.
- [3] M. Pouranvani (2011). Effect of welding parameters on the peak load and energy absorption of low-carbon steel resistance spot welds. International Scholarly Research Notices, vol. 2011, Article ID 824149.
- [4] L. Boriwal, R.M. Sarviya, M.M. Mahapatra (2017). "Failure modes of spot welds in quasi – static tensile – shear loading of coated steel sheets”. Materials Today: Proceedings, vol. 4(2), Part A, pp 3672-3677.

- [5] M. Pouranvari, S.P.H. Marashi, D.S. Safanama, (2011). "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation". *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528 (29–30), pp. 8344-8352.
- [6] Kianersi D., Mostafaei A., Amadeh A.A. (2014). "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations"; *Materials and Design* 61 (2014) 251–263 ; <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.075>
- [7] Haetham G. Mohammed, Turnad L. Ginta, Mazli Mustapha (2021). "The investigation of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AISI 316L austenitic stainless steel"; *Materials Today: Proceedings* 46, pp 1640-1644.
- [8] Sandhya D. Bhat , V. Vijeesh , Prajwal Acharya , Muralidhara Rao ; 2021 ;" Investigation of thin sheet stainless steel resistance spot welds:Effect of weld current on nugget failure and microstructure" ; *Materials Today: Proceedings* 35(2021) 361-365.
- [9] Kumar, R., Chohan, J.S., Goyal, R. and Chauhan, P. (2021), "Impact of process parameters of resistance spot welding on mechanical properties and micro hardness of stainless steel 304 weldments", *International Journal of Structural Integrity*, vol. 12(3), pp. 366-377.
- [10] Q. B. Feng, Y. B. Li, B. E. Carlson & X. M. Lai ; 2018 ; « Study of resistance spot weldability of a new stainless steel" ; *Science and Technology of Welding and Joining*,
- [11] Ján Viňáš, Ľuboš Kaščák, and Miroslav Greš (2016), "Optimization of resistance spot welding parameters for microalloyed steel sheets". *Open Eng*; Vol. 6, pp 504–510.
- [12] Luo Yi, Liu Jinhe , Xu Huibin , Xiong Chengzhi , Liu Lin (2009). "Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet". *Materials and Design*, vol. 30, pp. 2547–2555.
- [13] Hayriye Ertek Emre, Ramazan Kaçar, (2016), "Resistance spot weldability of galvanize coated and uncoated TRIP Steels", *Metals*, vol. 6, 299.
- [14] Mohammed Hillan Sar, (2016), "Spot welding of galvanized steel ASTM A653 using oxygen free high conductivity copper interlayer", *Journal of Kerbala University*, vol. 11(4) Scientific, pp 63-72.
- [15] Nannan Wang, Ranfeng Qiu, Weijian Peng, Hongxin Shi (2014). "Resistance Spot Welding between Mild Steel and Stainless Steel", *Applied Mechanics and Materials* Vols 675-677, pp. 23-26.
- [16] Ladislav Kolarik, Miroslav Sahul, Marie Kolarikova (2012) "Resistance Spot Welding of dissimilar Steels", *Acta Polytechnica*, Vol. 52 No. 3.
- [17] Aravinthan A., Nachimani C. (2011), "Analysis of Spot Weld Growth on Mild and Stainless Steel", *welding journal*,2011, 90(8):143S-147S.
- [18] Jamasri M.N., Ilman R., SoekrisnoT. (2011), "corrosion fatigue behavior of resistance spot welded dissimilar metal welds between carbon steel and austenitic stainless steel with different thickness" *procedia engineering*, 10(2011), 649-654.

- [19] Mehdi Safari, Hossein Mostaan (2017). “Dissimilar resistance spot welding of AISI 1075 eutectoid steel to AISI 201 stainless steel”; *Journal of Advanced Materials and Processing*, vol. 5(1), pp 44-56.
- [20] M.R.A. Shawon ; F. Gulshan ; A. S. W. Kurny ; (2015); “Effect of welding current on the structure and properties of resistance spot welded dissimilar (Austenitic stainless steel and low carbon steel) Metal Joints” ; *J. Inst. Eng. India Ser. D* ; vol. 96 (1); pp 29–36.
- [21] M. Pouranvari, P. Marashi, M. Goodarzi ; (2008), “Failure mode of dissimilar resistance spot welds between austenitic and low carbon steels”; *Metal*; 13. – 15. 5.
- [22] Fatih Hayat; (2011), “Resistance Spot Weldability of Dissimilar Materials: BH180-AISI304L Steels and BH180-IF7123 Steels”; *J. Mater. Sci. Technol.*; vol 27(11); pp 1047-1058.
- [23] Arumugam A., Nor M., (2015) , ” Spot welding parameter optimization to improve weld characteristics for dissimilar metals” ; *International Journal of Scientific & Technology research*; Vol 4,(01); pp 75-80.

Chapitre III : Etude expérimentale

INTRODUCTION

Dans ce présente chapitre on va présenter et expliquer la partie expérimentale en détails à partir de la préparation des éprouvettes des deux types d'aciers différente qui sont l'acier inoxydable 304L et l'acier galvanisée Z275 et qui ont les mêmes dimensions et la même épaisseur (2 mm).Après la préparation des éprouvettes vient la partie du soudage des éprouvettes avec les paramètres sélectionnées (courant de soudage, temps de soudage et la force d'électrode) pour chaque éprouvette, après d'utiliser ses éprouvettes dans l'essai de cisaillement par traction afin de construire des graphes charge-déplacement pour chaque éprouvette pour l'utiliser dans la quatrième chapitre ce qui consiste à analyser les résultats des courbes charge –déplacement pour déterminer l'effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique des joints hétérogène.

I. MATERIAUX D'ETUDE

I.1. Acier Inoxydable 304L

L'acier inoxydable 304L est connu par trois nominations selon trois normes mondiales comme indiqué dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Nominations de l'acier inoxydable selon les normes [1].

| EN 10027 (Européenne) | AFNOR NF A 35573 (France) | AISI (États-Unis) |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------|
| X2CrNi18-09 1.4307 | Z3CN18-10 | 304L |

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

- Acier inoxydable martensitique.
- Acier inoxydable a durcissement par précipitation.
- Acier inoxydable ferrique.
- Acier inoxydable austéno-férritique.
- Acier inoxydable austénitique.

De la famille des aciers austénitiques appartient notre premier métal à étudier 304L, parmi leurs spécifications est, moyenne résistance à la corrosion, intermédiaire entre celle du 302 et 316 se forme facilement à froid (pliage, étampage, emboutissage). Une très importante de taux d'écrouissage qui nécessite des équipements adaptés.

Ce type d'acier peut subir des déformations plastiques (écrouissage) ce qui le rend un peu magnétisable. Le maintien à des températures entre 500 °C et 900 °C provoque la formation de phase solide aux conséquences nocives pour l'aptitude à la corrosion. Afin de dissoudre la phase solide, un recuit consécutif à refroidissement rapide est nécessaire pour éviter toute nouvelle précipitation [2]. Ce matériau est soudable par tous les procédés et ne nécessite aucun traitement thermique après soudage. Les soudures devront être décapées mécaniquement ou chimiquement puis passivées [3]. Ce type de matériaux est largement utilisé dans l'industrie chimique, alimentaire et pièces de rechange.

I.2. Acier galvanisé Z275

L'acier galvanisé est un type d'acier résistant à la corrosion par la présence d'une couche de zinc obtenue par dépôt électrolytique ou trempage à chaud. L'acier galvanisé est largement utilisé dans l'industrie automobile, structures travaillant dans les milieux humides.

I.3. Caractéristiques chimiques et physiques

Les compositions chimiques et les propriétés physiques des matériaux utilisés dans cette étude sont données respectivement par les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Composition chimique des matériaux utilisés [4]

| Aciers | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Autre |
|------------------|------|------|------|-------|-------|-----|------|---------|
| Inoxydable 304 L | 0.03 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.015 | 0.1 | 0.03 | N<0. 11 |
| Galvanisée Z275 | 0.12 | 0.50 | 0.60 | 0.10 | 0.045 | / | / | / |

Tableau 3 : Propriétés physiques de l'acier inoxydable 304L [4]

| Densité (Kg.m-3) | Résistivité électrique | Chaleur spécifique | Conductivité thermique | Module Elastique (GPa) | Coefficient dilatation | | | | |
|---------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| 7.90 | 0.73 | 500 | 15 | 200 à 20°C | 16 | 16.5 | 17 | 17.5 | 18 |

I.4. Caractérisation mécanique

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des deux matériaux, des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction Controlab de capacité maximale de 600 KN.

Table 4 : Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 304 L et de l'acier galvanisé Z275 [4]

| Matériaux | E (GPa) | σ_e (MPa) | UTS (MPa) | A% | HRB |
|-----------|---------|------------------|-----------|------|-----|
| SS 304L | 190 | 336 | 655 | 43.2 | 60 |
| GS Z275 | 200 | 266 | 330 | 22.0 | / |

II. REALISATION DES EPROUVETTES

Avant la phase de soudage, il faut préparer les éprouvettes de chaque matériau qui ont les mêmes dimensions à partir des tôles d'épaisseur « e = 2mm » les deux éprouvettes avant l'étape de soudage est illustré par la figure1.



Figure 1 : Epreuves avant l'opération de soudage.

II.1. Équipements de soudage - Opérations de soudage

L'assemblage réalisé par soudage par point entre deux plaques en acier inoxydable 304L et l'acier galvanisé Z275 est montré par la figure 2. La longueur de superposition par recouvrement (à clin) est égale à 30 mm. La Machine utilisé pour le soudage par point est de type " TECNA ART. 8201N ÷ 8214N "qui se trouve au niveau de l'entreprise SOREMEP (Zone industrielle - willaya de Tlemcen) (Figure3). Les tôles à assembler sont placés entre deux électrodes où le réglage des paramètres de soudage se fait par un tableau de commande (Figure 4).

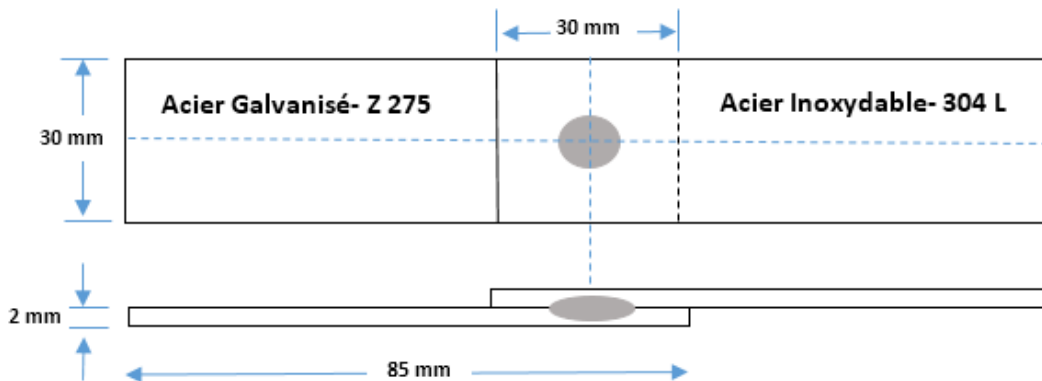


Figure 2 : Dimensions d'éprouvettes



Figure 3 : machine de soudage par point (TECNA)

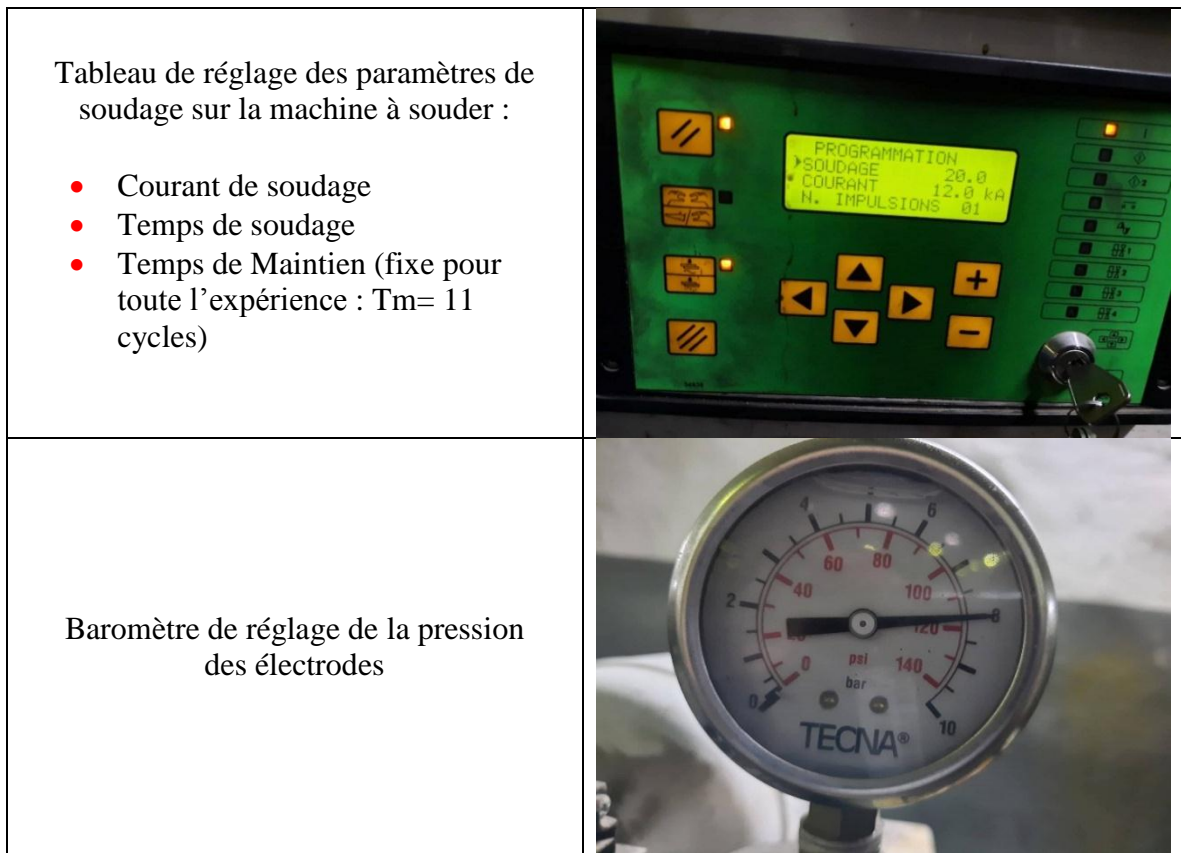


Figure 4 : Réglage des paramètres de soudage sur la machine à souder.

L'électrode de soudage par points utilisée était de type S à face active hémisphérique et réalisée avec un matériau de CuNi2Be (figure 5). Le diamètre de l'électrode ou le diamètre de la partie actif était de 7 mm selon la loi suivante :

$$D_{ACTIVE} = 2e + 3 \quad (1)$$

D_{ACTIF} : Diamètre actif

e : Épaisseur de tôle.



Figure 5 : Les électrodes de soudage utilisées

II.2. Choix des paramètres de soudage

La saisie des paramètres de soudage se fait à partir des recherches antérieures et de la soudabilité des matériaux [5], selon la nature des matériaux de base et son épaisseur, Les principaux paramètres du soudage par point est essentiellement :

- Intensité du courant I (kA)
- Temps de soudage T (cycle)
- Effort de soudage F (bar)

Le courant de soudage varie de 10 kA à 16 kA, le temps de soudage passe de 10 cycles à 13 cycles et deux valeurs de la force d'électrode sont également appliquées (7 bar et 8 bar). Le Tableau 5 présente les valeurs des paramètres de soudage. La répartition des valeurs des trois paramètres se fait avec un plan factoriel pour assurer l'union de toutes les valeurs entre elles. Le Tableau 6 montre la combinaison des paramètres de soudage et le nombre d'essais pour chaque facteur.

Tableau 5 : Paramètres de soudage.

| Facteurs | Niveaux | Valeurs |
|------------|---------|--------------------|
| I (kA) | 5 | 10; 12; 14; 15; 16 |
| T (Cycles) | 3 | 10; 11; 13 |
| F (Bar) | 2 | 7; 8 |

Tableau 6 : Plan factoriel de la répartition des paramètres de soudage

| Ordre des essais | Epaisseur (mm) | Superposition (mm) | Ø Electrode (mm) | I (kA) | T (Cycles) | F (Bar) |
|------------------|----------------|--------------------|------------------|--------|------------|---------|
| 1 | 2 | 30 | 7 | 10 | 10 | 7 |
| 2 | | | | | | 8 |
| 3 | | | | | 11 | 7 |
| 4 | | | | | | 8 |
| 5 | | | | | 13 | 7 |
| 6 | | | | | | 8 |
| 7 | 2 | 30 | 7 | 12 | 10 | 7 |
| 8 | | | | | | 8 |
| 9 | | | | | 11 | 7 |
| 10 | | | | | | 8 |
| 11 | | | | | 13 | 7 |
| 12 | | | | | | 8 |
| 13 | 2 | 30 | 7 | 14 | 10 | 7 |
| 14 | | | | | | 8 |
| 15 | | | | | 11 | 7 |
| 16 | | | | | | 8 |
| 17 | | | | | 13 | 7 |
| 18 | | | | | | 8 |
| 19 | 2 | 30 | 7 | 15 | 10 | 7 |
| 20 | | | | | | 8 |
| 21 | | | | | 11 | 7 |
| 22 | | | | | | 8 |
| 23 | | | | | 13 | 7 |
| 24 | | | | | | 8 |
| 25 | 2 | 30 | 7 | 16 | 10 | 7 |
| 26 | | | | | | 8 |
| 27 | | | | | 11 | 7 |
| 28 | | | | | | 8 |
| 29 | | | | | 13 | 7 |
| 30 | | | | | | 8 |

III. ESSAI DE CISAILLEMENT PAR TRACTION

L'essai de cisaillement par traction est le moyen le plus couramment utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux dans des conditions de chargement progressif à des vitesses faibles ou moyennes. Le test permet, en outre, l'étude de recherche et la détermination des structures de déformation plastique. Ajuster ensuite le processus principal de mise forme par ou sans enlèvement de matière, la matière dans la plupart des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique. L'essai de cisaillement par traction consiste à fixer notre éprouvette d'acier inoxydable et l'acier galvanisée entre les deux mors de la machine de traction est soumettre à une charge croissant jusqu'à provoquer la rupture d'éprouvette (Figure 6a). Les essais de cisaillement par traction réalisés, ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements, la limite élastique, la charge de la rupture, ainsi que l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, qui est le rapport entre la section de l'éprouvette à l'état de la rupture et sa section à l'état initiale. Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de nos éprouvettes soudés, des essais de traction ont été conduits sur une machine de traction 600 KN reliée avec un système d'acquisition de données (Figure 6b).

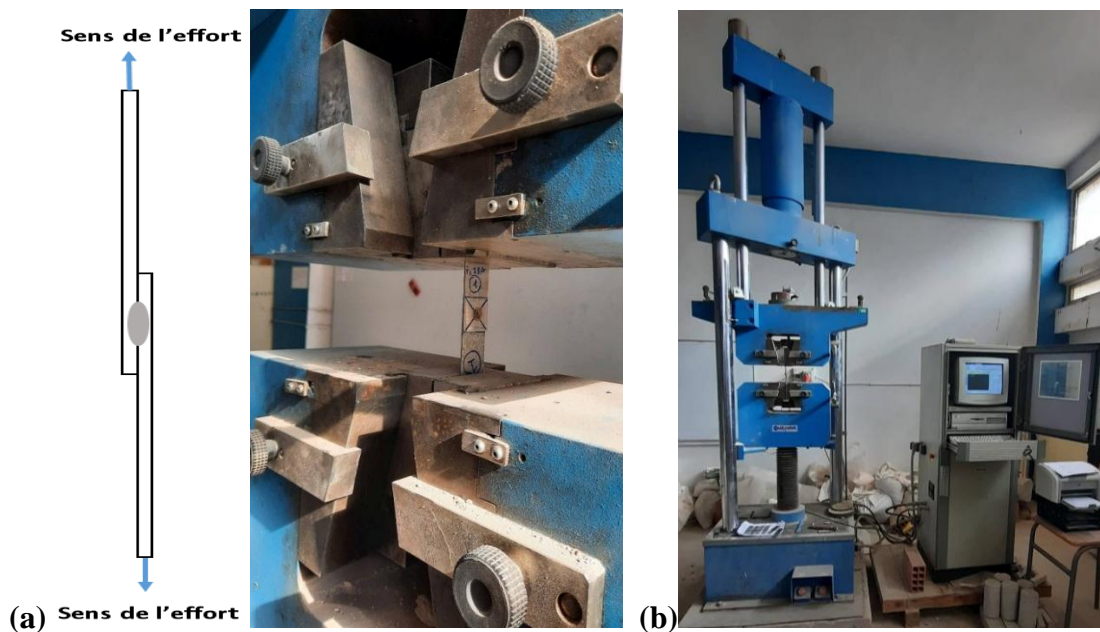



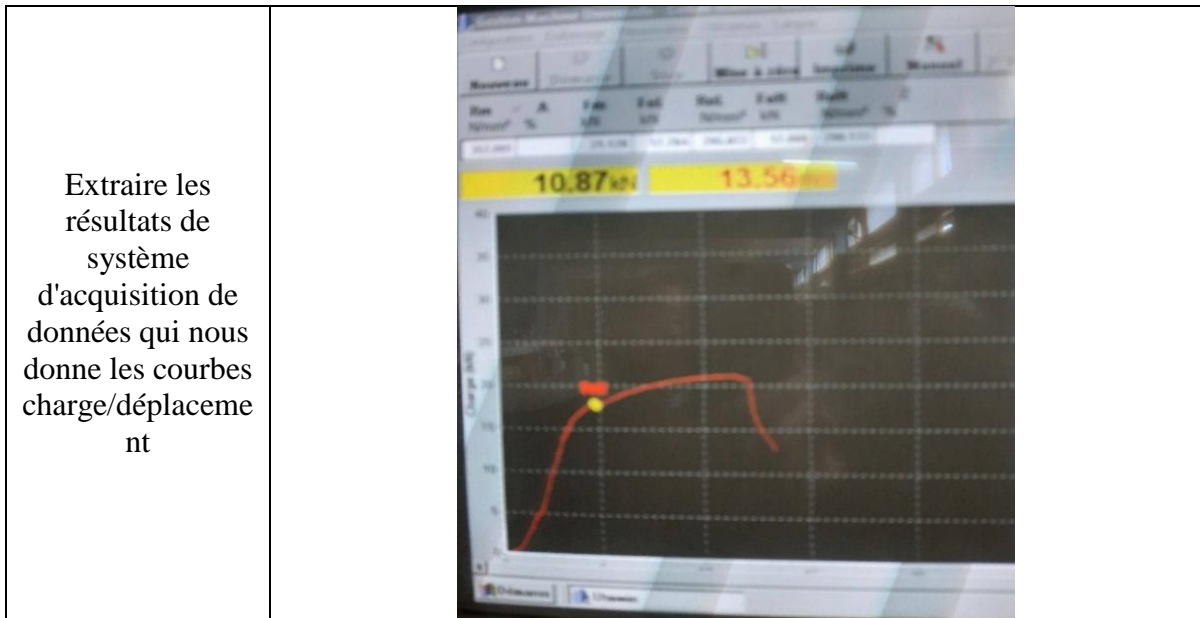


Figure 6 : (a) Essai de cisaillement par traction des points de soudure (b) Machine de traction 600 KN avec le système d'acquisition de données

Le tableau 7 résume les étapes de notre étude expérimentale

Tableau 7 : Résumé des étapes de la partie expérimentale.

| | |
|--|--|
| <p>La forme des éprouvettes avant l'opération de soudure des deux matériaux.</p> |  |
| <p>Soudage d'éprouvettes avec Réglage des paramètres de soudage</p> |  |
| <p>Le processus de mesure de la résistance à la traction des éprouvettes</p> |  |



POINTS A RETENIR / CONCLUSION

Le présent chapitre a fait l'objet de comprendre la préparation des éprouvettes avec les paramètres de soudage fixés afin de déterminer les courbes charge/déplacement afin de conduire une analyse analytique et statistique à partir des essais de cisaillement par traction des points de soudure afin de bien comprendre les effets de paramètres de soudage sur le comportement mécanique des assemblages hétérogènes (SS 304L et GZ 275).

Les essais de soudage ont suivi une analyse factorielle selon la variation des paramètres de soudage (courant, temps et l'effort d'électrodes). Les courbes charges/déplacements permettent de tirer les résultats suivants :

- Charge maximale R_m (N/mm²).
- La limite d'élasticité, R_{el} qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité.
- La résistance à la traction R_m , qui caractérise la limite à la rupture.
- La limite élastique R_p (N/mm²)
- La force maximale F_{max} (kN) et le rendement supérieur R_{eH} (N/mm²)
- L'allongement à la rupture $A\%$.

REFERENCES

- [1] Aissaoui Fethi (2018). "Comportement mécanique des soudures par points : Effets d'arrangement des points de soudures dans les tôles en acier inoxydable". Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- [2] Cui, P.; Xing, G.; Nong, Z.; Chen, L.; Lai, Z.; Liu, Y.; Zhu, J. (2022). "Recent advances on composition microstructure-properties relationships of precipitation hardening stainless steel. *Materials* 2022, 15, 8443.
- [3] T. Devers, Y. Bienvenu et R. Portier (2017). "Mechanical and micro structural characterization of the butt joint 18-10 stainless steel/hafnium, formed by dynamic-diffusion-bonding". *Rev. Met. Paris*, Vol. 95, N°5 (Mai 1998), pp. 621–630.
- [4] Specification techniques tôle galvanisée, EPE SOREIMEP, structure DEFM, service engineering industriel, 2019.
- [5] Pouranvari, M., Marashi, P. and Goodarzi, M. (2008). Failure mode of dissimilar resistance spot welds between austenitic stainless and low carbon steels. *Hradec nad Moravicí: METAL*, 13, pp. 1-6.

Chapitre IV : Résultats & Discussions

INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à l'analyse des résultats de la partie expérimentale à partir des essais de caractérisation. Cette analyse consiste à étudier les modes de ruptures des points soudés. Ainsi la quantification du comportement, le mécanisme de rupture des différentes zones d'un point soudé devra permettre une meilleure compréhension de la soudabilité hétérogène et l'effet des paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage et la force d'électrode) sur le comportement mécanique des joints soudés et la résistance mécanique à la rupture de l'assemblage soudé hétérogène des aciers inoxydables avec l'acier galvanisée de haute résistance.

I. EFFET DES PARAMETRES DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS SOUDES

I.1. Effet du courant de soudage sur le comportement mécanique des joints soudé

Les différences de capacités de soudage par résistance par point des matériaux sont attribuées à la différence des propriétés mécaniques et physiques des matériaux assemblés. De ce point de vue, A partir des essais de cisaillement par traction et l'analyse des courbes charge –déplacement nous a permis de comprendre l'effet de l'intensité du courant de soudage des assemblages hétérogène soudée par résistance par points sur le comportement mécanique des joints soudée (la charge maximale de rupture et la charge limite élastique ...) qui consiste à varier les valeurs du courant et fixer les autres paramètres (temps de soudage T (cycles) et Force d'électrode F (Bar)) pour déterminer l'effet et la contribution de l'intensité du courant de soudage sur le comportement mécanique des joints hétérogènes.

L'effet du courant de soudage sur les résultats des essais de cisaillement par traction est présenté par les figures 1 à 6. Il a été constaté que la résistance à la traction du joint soudé augmentait avec l'augmentation du courant de soudage, ce qui montre une relation directe entre eux. On remarque que l'augmentation du courant de soudage augmente le domaine de la déformation plastique (c'est-à-dire le déplacement dans le comportement plastique) mais présente une évolution aléatoire de la variation du courant de soudage. Les courbes charge-déplacement montrent une augmentation de la charge de rupture avec l'augmentation des valeurs des courants de soudage. Les résultats

expérimentaux indiquent que le courant de soudage a un effet significatif sur la capacité de résistance des éprouvettes soudées sous des efforts de cisaillement en traction. Comme le montre la Figure 7, l'augmentation du courant de soudage conduit à augmenter les charges de maximales des joints hétérogènes (dissemblables) soudés par RSW. Ce fait, selon l'étude de Pouranvari [1], est attribué à l'augmentation du diamètre du noyau et de la profondeur de pénétration.

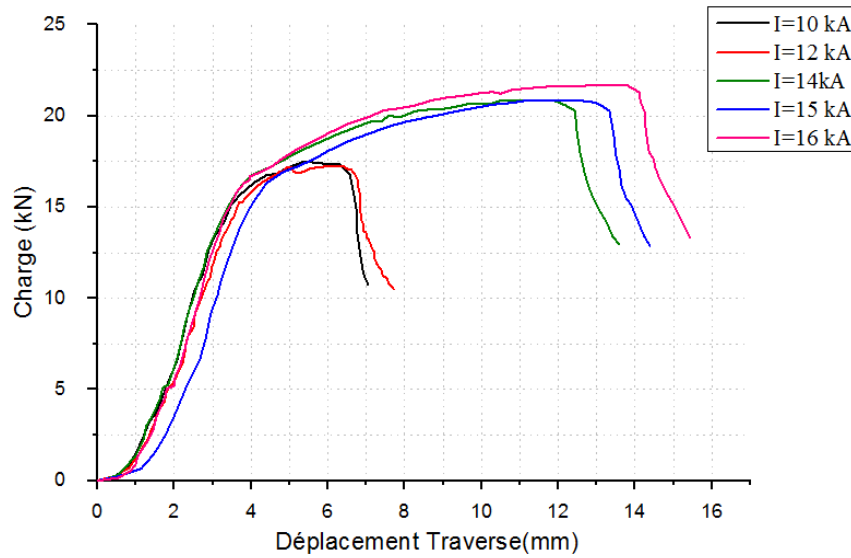


Figure 1 : Courbe de charge de déplacement pour T= 10 cycles (a) F = 7 Bar.

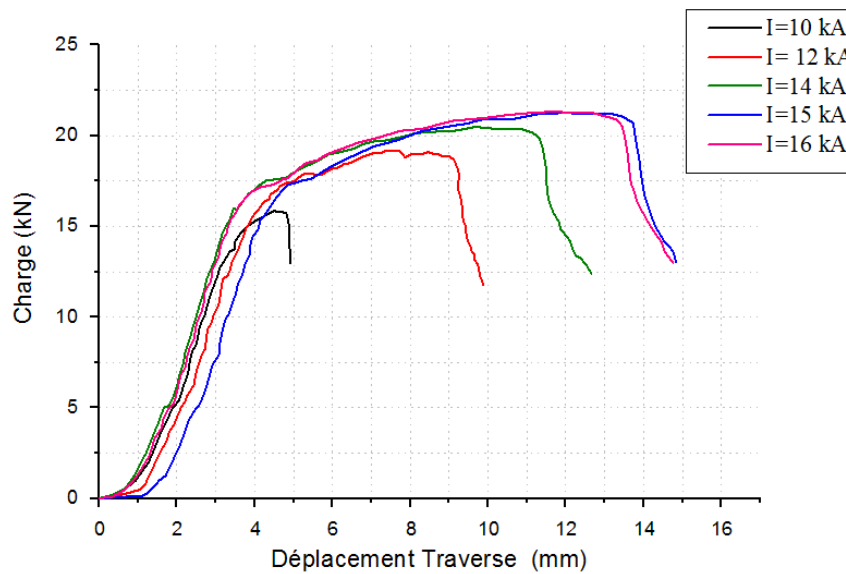


Figure 2 : Courbe de charge de déplacement pour T= 10 cycles (a) F = 8 bar.

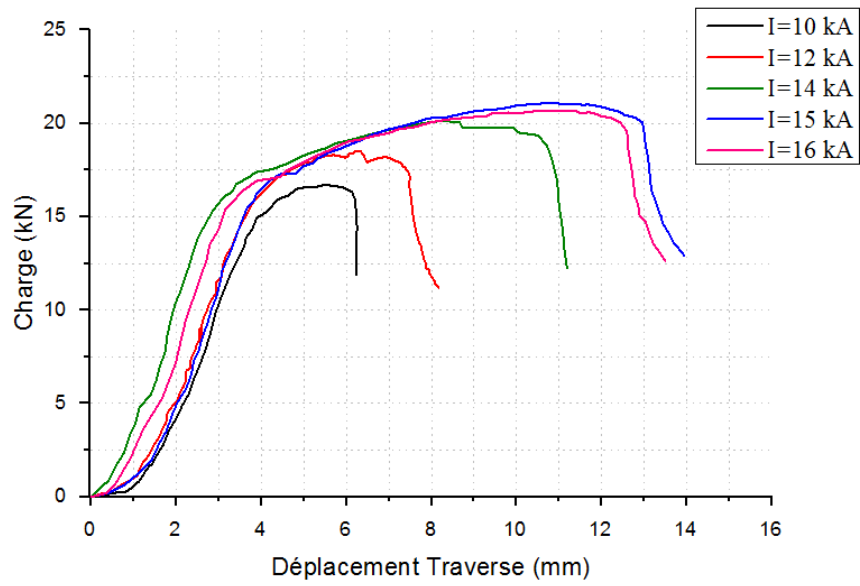


Figure 3 : Courbe de charge de déplacement pour T= 11 cycles (a) F = 7 bar.

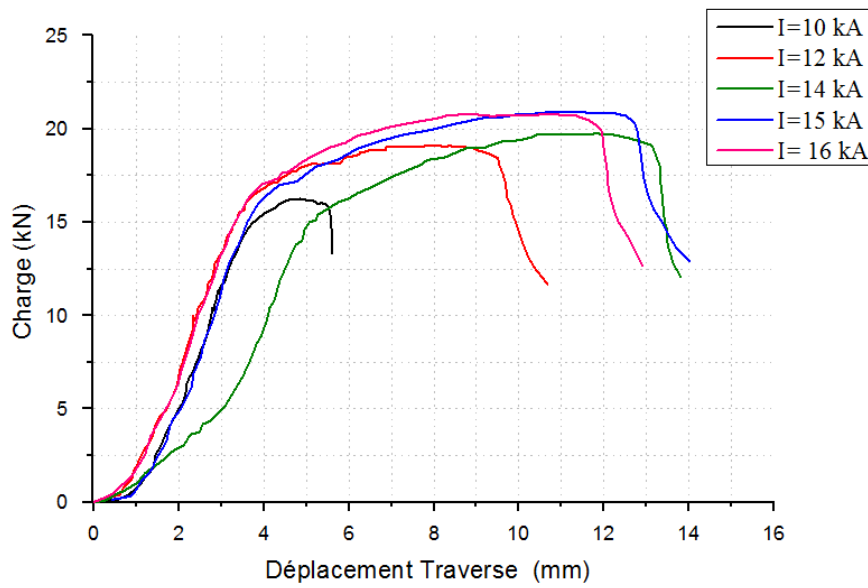


Figure 4 : Courbe de charge de déplacement pour T = 11 cycles (a) F = 8 bar.

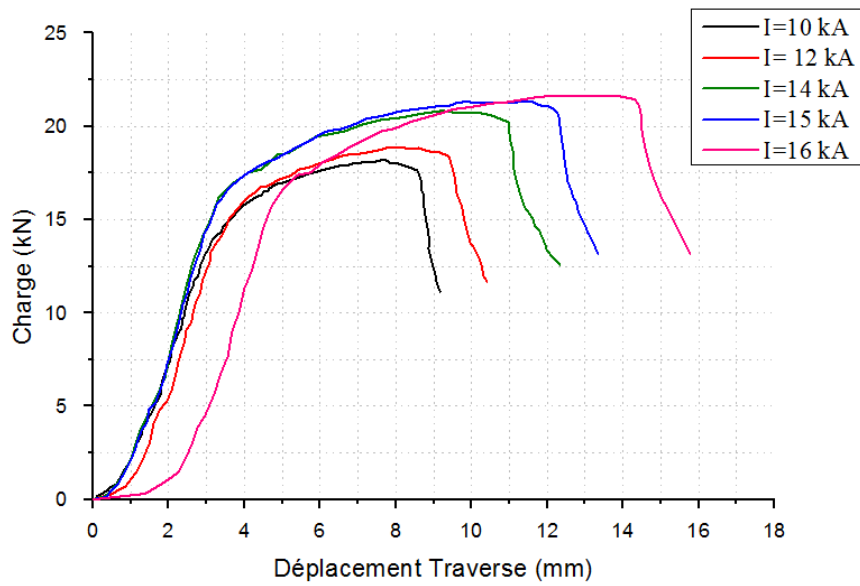


Figure 5 : Courbe de charge de déplacement pour T= 13 cycles (a) F = 7 bar.

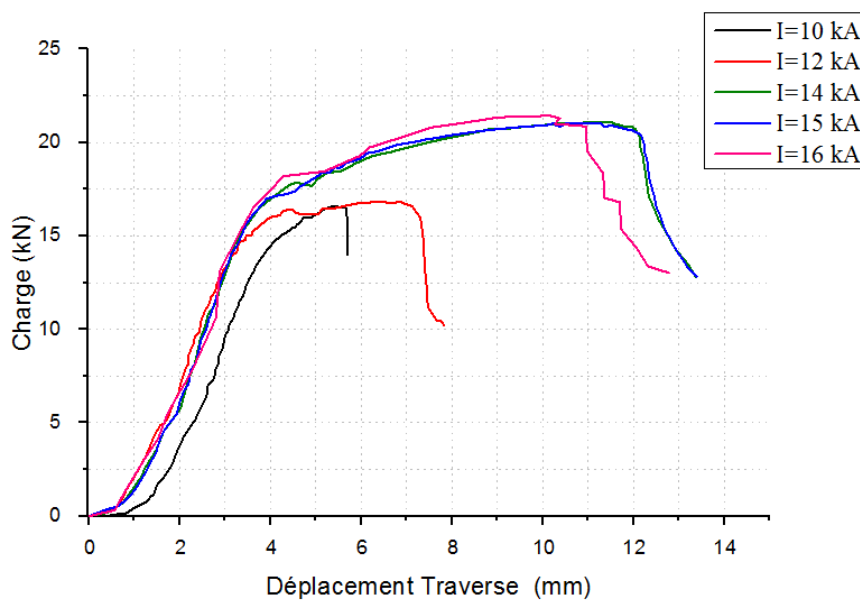


Figure 6 : Courbe de charge de déplacement pour T= 13 cycles (a) F = 8 bar.

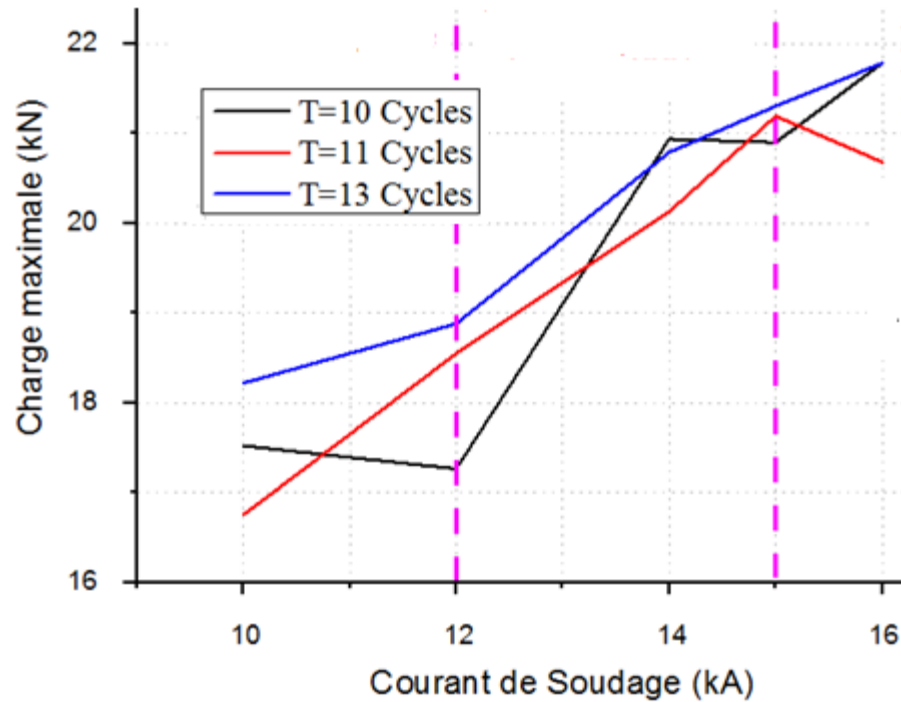


Figure 7 : Effet du courant de soudage sur la charge maximale pour F=7Bar.

I.2 Effet du temps de soudage et de la force de l'électrode sur le comportement mécanique de joints soudés hétérogènes

Dans cette section, l'effet du temps de soudage et de la force de soudage sur les propriétés des joints dissemblables soudés par RSW est étudié pour un courant de soudage fixe. Les résultats des essais de cisaillement par traction sont présentés par figures 8 à 12. Comme on peut le voir sur la figure 8 pour $I = 10$ kA, le déplacement transversal augmente avec l'augmentation du temps de soudage (c'est-à-dire l'augmentation de la déformation plastique) pour la force de soudage $F = 7$ et 8 bars. On remarque que la charge maximale est plus élevée pour $T=13$ cycles et $F=7$ bar. La figure 9 montre également l'effet du temps de soudage et de la force de soudage pour $I = 12$ kA. Un comportement aléatoire est présent. A l'exception de $T=11$ cycles et $F=8$ bar, pour tout temps et toutes forces de soudage, les comportements mécaniques sont similaires et la différence de déplacement transversal est faible pour les différents temps de soudage à $F=7$ bar et $F=8$ bar.

L'effet du temps de soudage et de la force de soudage représenté par les figures de 10 à 12, est réduit à l'exception pour $T=11$ cycles. Ceci est attribué à l'augmentation du courant de soudage où l'énergie générée affecte l'augmentation de la taille du noyau. Les figures 10 à 12 montrent

également l'effet de la force de soudage sur le comportement mécanique pour un courant de soudage spécifié. L'analyse de toutes les courbes pour tous les temps de soudage montre généralement une augmentation de la zone plastique caractérisée par une augmentation du déplacement transversal pour une force de soudage $F=7$ bar comparativement à $F=8$ bar. Une différence entre les courbes charge-déplacement est réduite pour des temps de soudage fixes à un courant de soudage égal ou supérieur à 15 kA et une variation de la force de soudage. Cette situation montre que pour des joints hétérogènes, le courant de soudage est le facteur le plus influent sur la résistance à la traction [2, 3]. Cette situation prouve que le courant de soudage présente une contribution plus élevée comparativement à l'effet du temps de soudage et de la force de soudage [4].

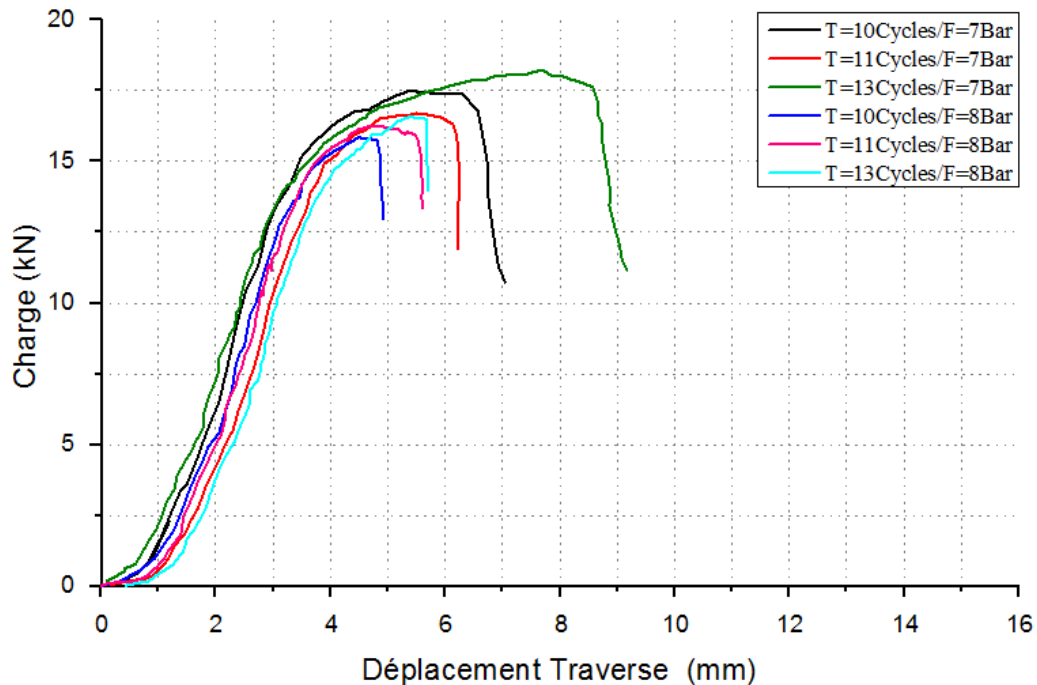


Figure 8 : Courbe de charge - déplacement pour $I=10$ kA.

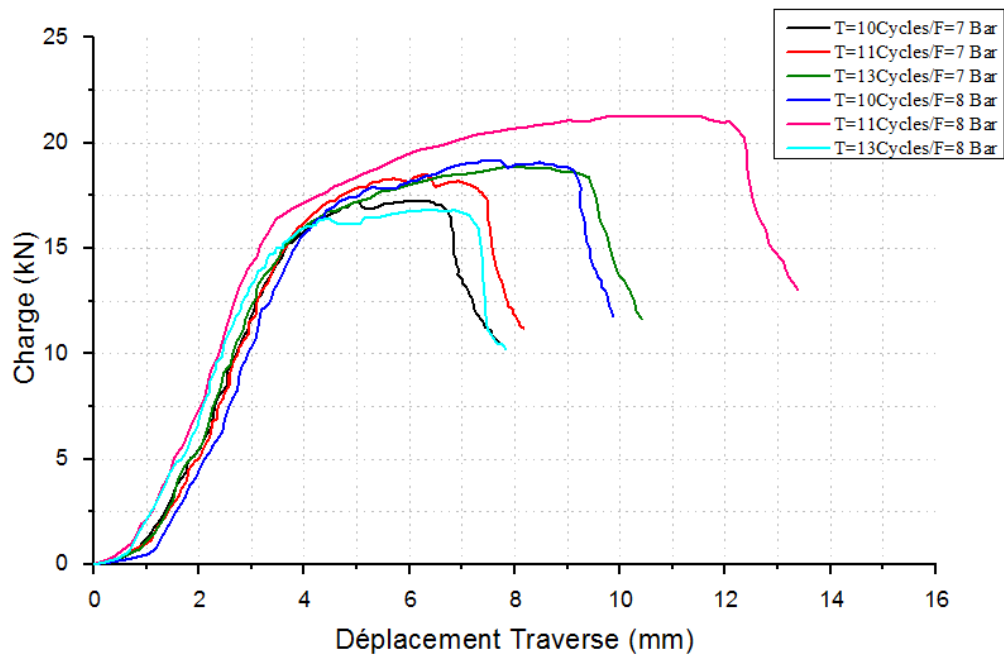


Figure 9 : Courbe de charge - déplacement pour I= 12 kA.

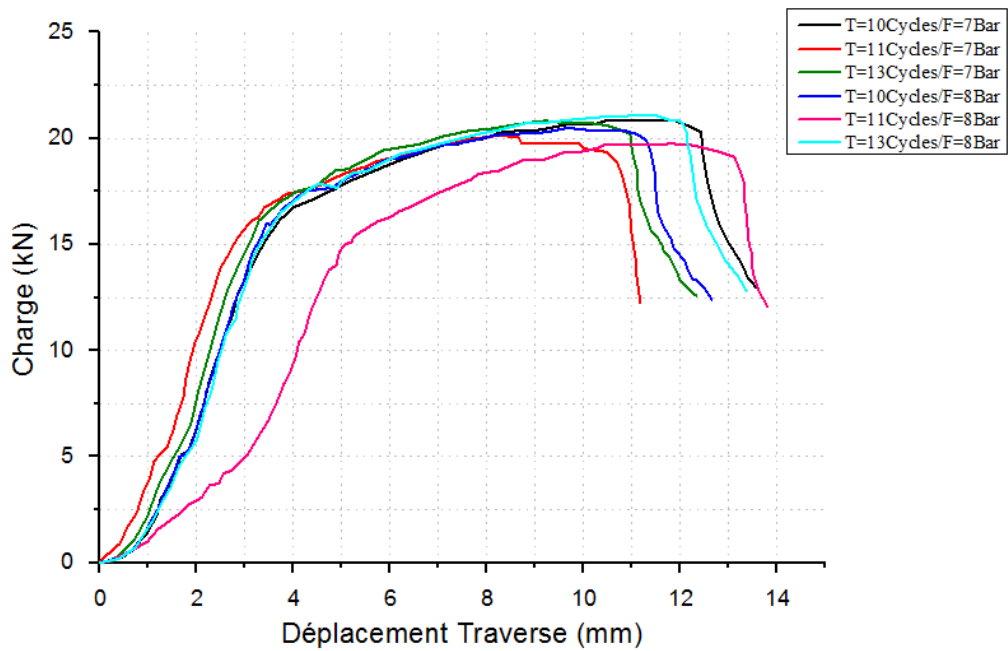


Figure 10 : Courbe de charge - déplacement pour I= 14 kA.

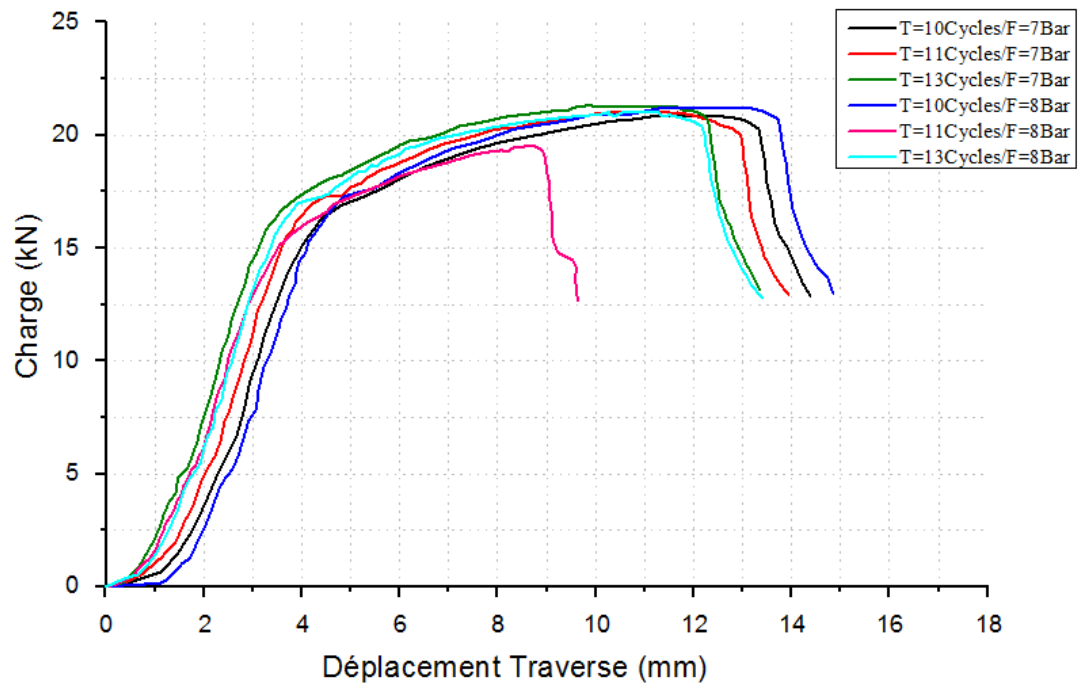


Figure 11 : Courbe de charge - déplacement pour $I= 15$ kA.

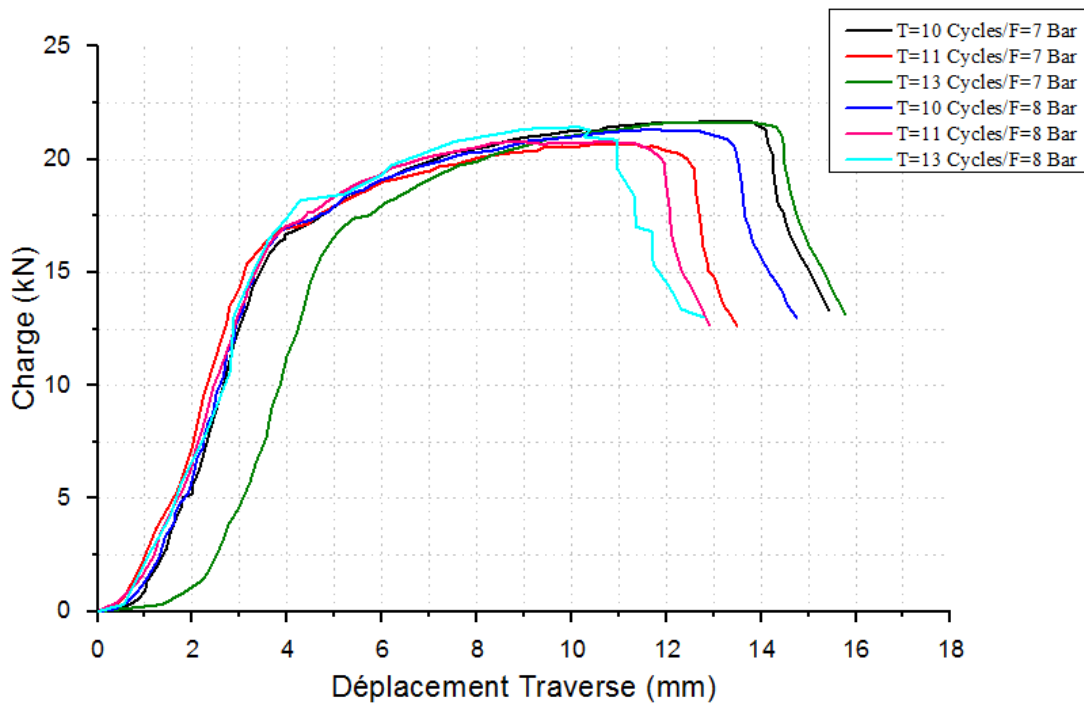


Figure 12 : Courbe de charge - déplacement pour $I= 16$ kA.

L'effet du temps de soudage sur les charges maximales pour différents courants de soudage appliqués est illustré par la figure 13. On remarque une augmentation de la charge maximale avec l'augmentation du temps de soudage, cela est dû au transfert de chaleur plus élevé des électrodes à des tôles jointées et augmentation de la taille des noyaux [5] à l'exception de $T=11$ cycles, où la diminution de la charge maximale ne dépasse pas 1 kN. De même, la charge de maximale la plus élevée pour $F=7$ bar et variation du temps de soudage, est atteinte à partir de $I=14$ kA (Figure 13). L'effet de la force de soudage pour $I = 10$ kA et la variation du temps de soudage sont illustrés par la figure 14. Comme on peut le constater sur la figure 14, l'augmentation de la force de soudage entraîne une diminution de la charge maximale des joints soudés hétérogènes. Ceci présente un effet inverse de l'effet combiné du courant de soudage et du temps de soudage. La charge maximale la plus élevée pour $I = 10$ kA a été atteinte pour un temps de soudage le plus élevé ($T = 13$ cycles) sous la variation de la force de soudage.

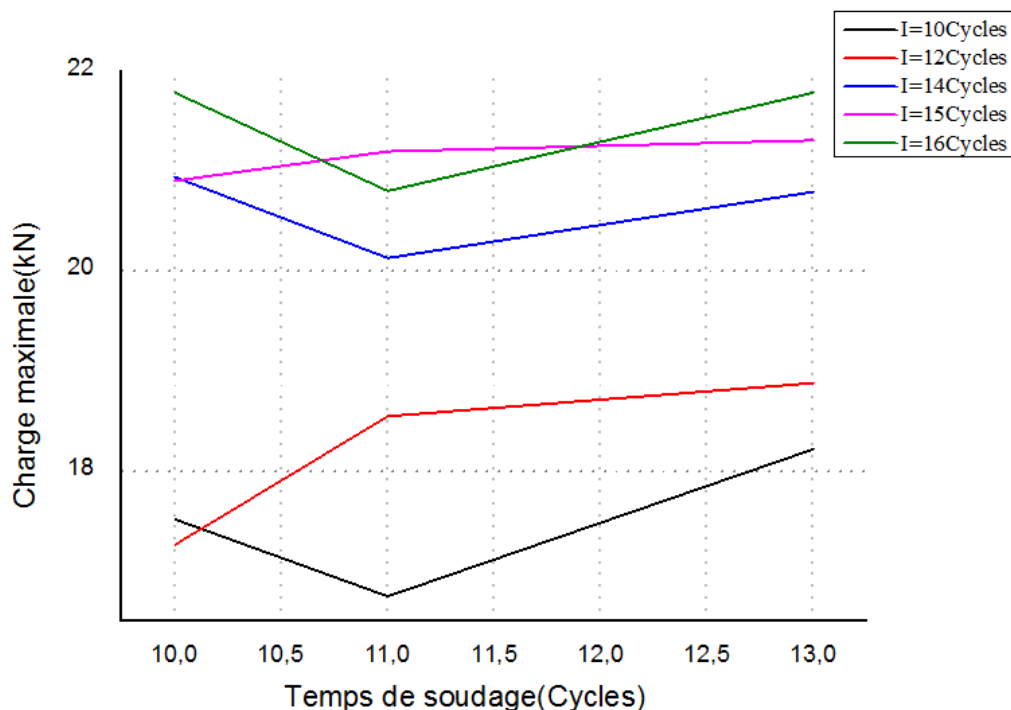


Figure 13 : Effet du temps de soudage sur la charge maximale pour $F=7$ Bar.

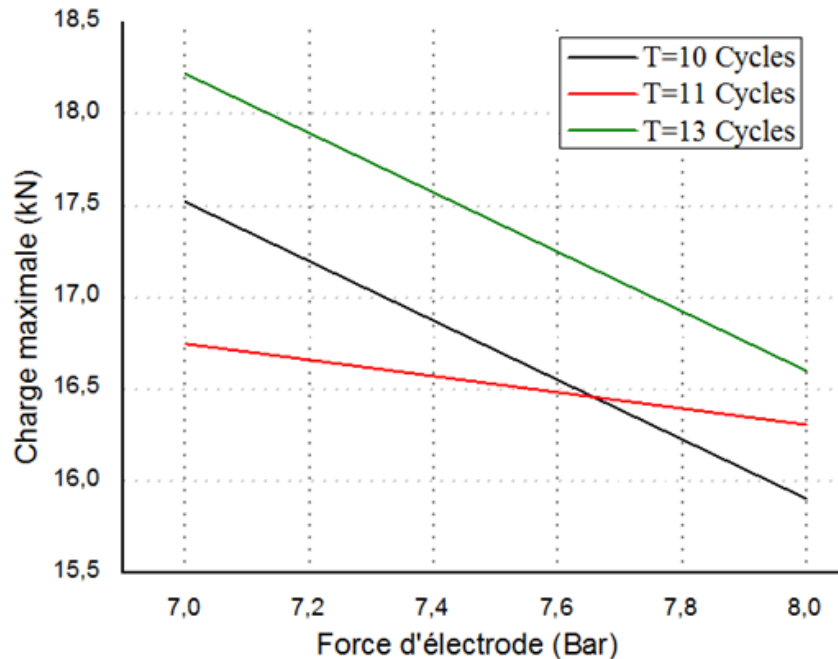


Figure 14 : Effet de la force de soudage sur la charge maximale avec $I=10$ kA.

I.3 Analyse des modes de défaillances

Au cours de l'essai de traction-cisaillement, trois modes de rupture ont été observés qui sont le mode de défaillance interfacial, le déboutonnage et le déchirement dans le métal de base pour tous les paramètres de soudage. Certaines soudures par points avec ces trois modes de défaillance sont illustrées à la figure 15 qui dépend du courant de soudage. Les résultats expérimentaux indiquent que le courant de soudage a un effet significatif sur le mode de défaillance. Les modes de défaillance dépendent des valeurs du courant de soudage (Figure 16). À partir de la rupture de tôles soudées dissemblables à une force de soudage fixe ($F=7$ bar) et de la variation du courant de soudage de 10 kA à 16 kA et du temps de soudage de 10 cycles à 13 cycles, on remarque que le courant de soudage contrôle le type ou le mode de défaillance. En dessous de 12 kA, on remarque que le mode de défaillance est interfacial. Entre 12 kA et 15 kA, le mode de rupture est le déboutonnage et au-delà de 15 kA, le mode de rupture est un mode d'arrachement en métal de base.

En mode interfacial, la défaillance se produit via la propagation de la fissure à travers la zone de fusion (noyau de soudure), tandis qu'en mode de déboutonnage, la défaillance se produit via une partie partielle d'une pépite de tôle qui peut laisser le trou dans la tôle d'acier galvanisée. Lors du

déchirement du métal de base, la pépite est partiellement retirée de l'acier galvanisé, puis la rupture se poursuit par le déchirement du métal de base. Cependant, comme l'acier inoxydable 304L présente des propriétés mécaniques très élevées et peut s'écrouir de manière significative dans les joints soudés les plus résistants, des défaillances se produisent plutôt sur l'acier galvanisé.

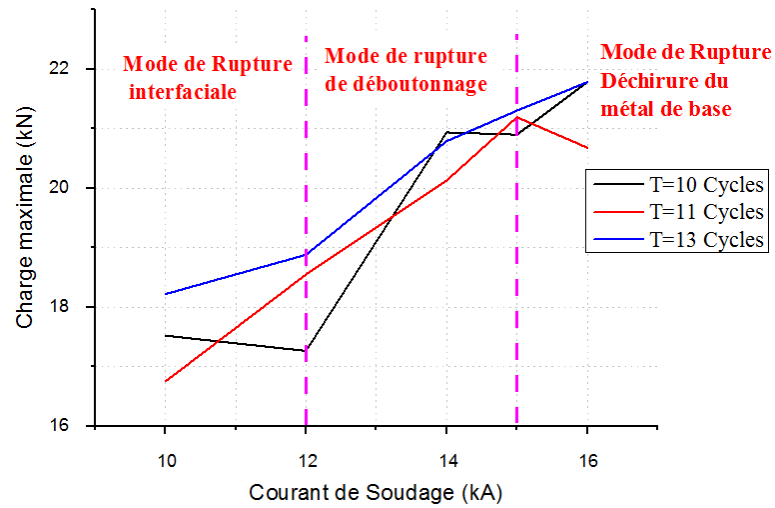
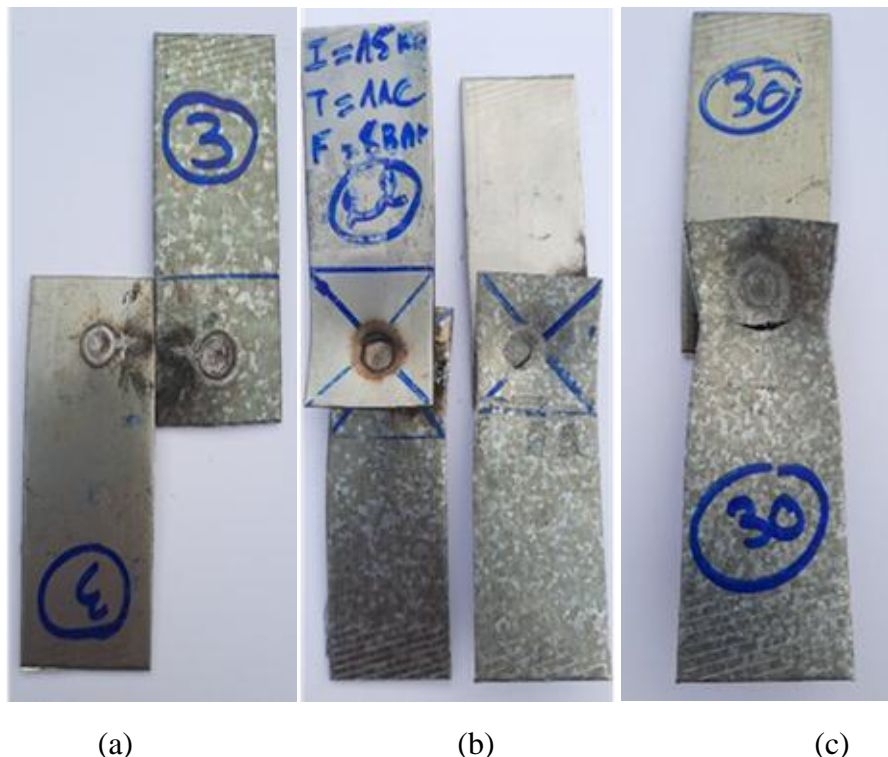


Figure 15 : Effet du courant de soudage sur le mode de défaillances des joints hétérogènes pour $F=7$ bar.



(a) (b) (c)
Figure 16 : Modes de défaillance (a) Interfaciale (b) Déboutonnage (c) Déchirure du métal de base.

II. ANALYSE FACTORIELLE DE CONCEPTION

Dans cette partie nous avons procédé à une analyse factorielle de nos résultats à l'aide du logiciel Minitab19 [4]. A la suite de cette analyse, un modèle mathématique a été développé pour voir l'influence des trois paramètres de soudage sur la contrainte maximale de cisaillement par traction. À l'aide de ce modèle mathématique, nous montrons comment les paramètres de soudage affectent la contrainte maximale de cisaillement par traction. Le tableau 1 montre les résultats de la contrainte maximale de cisaillement par traction en fonction des paramètres de soudage spécifiés pour chaque test. Le tableau 2 récapitule les valeurs des modèles obtenus à la suite de l'analyse factorielle par un modèle linéaire. Ce tableau montre également les autres mesures d'adéquation R2, R2 ajusté et R2 prédit. Ils sont tous proches de 0,9 et indiquent donc un modèle adapté. L'équation (1) présente la relation entre les paramètres de soudage et la résistance au cisaillement par traction obtenue par analyse de régression linéaire.

$$\sigma_{ct} \text{ (MPa)} = 172.0 + 13.282 \times I + 1.03 \times T - 4.057 \times F \quad (1)$$

σ_{ct} : Contrainte de cisaillement par traction.

Il est nécessaire de comparer les valeurs de contrainte de cisaillement par traction estimées par les équations du modèle (Equation 1) avec les valeurs obtenues à la suite des calculs expérimentaux. Les résidus consistent en la différence entre les données expérimentales et les données du modèle. Une comparaison des données estimées et expérimentales pour la contrainte de cisaillement par traction est présentée par la figure 17. Les résultats montrent qu'un bon accord est observé entre le modèle mathématique obtenu pour la contrainte de cisaillement par traction et les données expérimentales.

Tableau 1 : Données expérimentales pour la contrainte de cisaillement par traction.

| Ordre d'essai | I (kA) | T (Cycles) | F (Bar) | Contrainte de traction en cisaillement (MPa) |
|---------------|--------|------------|---------|--|
| 1 | 10 | 10 | 7 | 292,01 |
| 2 | 10 | 10 | 8 | 265,08 |
| 3 | 10 | 11 | 7 | 279,16 |
| 4 | 10 | 11 | 8 | 271,81 |
| 5 | 10 | 13 | 7 | 303,64 |
| 6 | 10 | 13 | 8 | 276,71 |

| | | | | |
|----|----|----|---|--------|
| 7 | 12 | 10 | 7 | 287,73 |
| 8 | 12 | 10 | 8 | 320,17 |
| 9 | 12 | 11 | 7 | 309,15 |
| 10 | 12 | 11 | 8 | 319,56 |
| 11 | 12 | 13 | 7 | 314,66 |
| 12 | 12 | 13 | 8 | 280,99 |
| 13 | 14 | 10 | 7 | 348,94 |
| 14 | 14 | 10 | 8 | 342,21 |
| 15 | 14 | 11 | 7 | 335,48 |
| 16 | 14 | 11 | 8 | 331,19 |
| 17 | 14 | 13 | 7 | 346,49 |
| 18 | 14 | 13 | 8 | 352,01 |
| 19 | 15 | 10 | 7 | 348,33 |
| 20 | 15 | 10 | 8 | 355,06 |
| 21 | 15 | 11 | 7 | 353,23 |
| 22 | 15 | 11 | 8 | 350,78 |
| 23 | 15 | 13 | 7 | 355,07 |
| 24 | 15 | 13 | 8 | 350,17 |
| 25 | 16 | 10 | 7 | 363,02 |
| 26 | 16 | 10 | 8 | 355,07 |
| 27 | 16 | 11 | 7 | 344,66 |
| 28 | 16 | 11 | 8 | 348,33 |
| 29 | 16 | 13 | 7 | 363,02 |
| 30 | 16 | 13 | 8 | 356,90 |

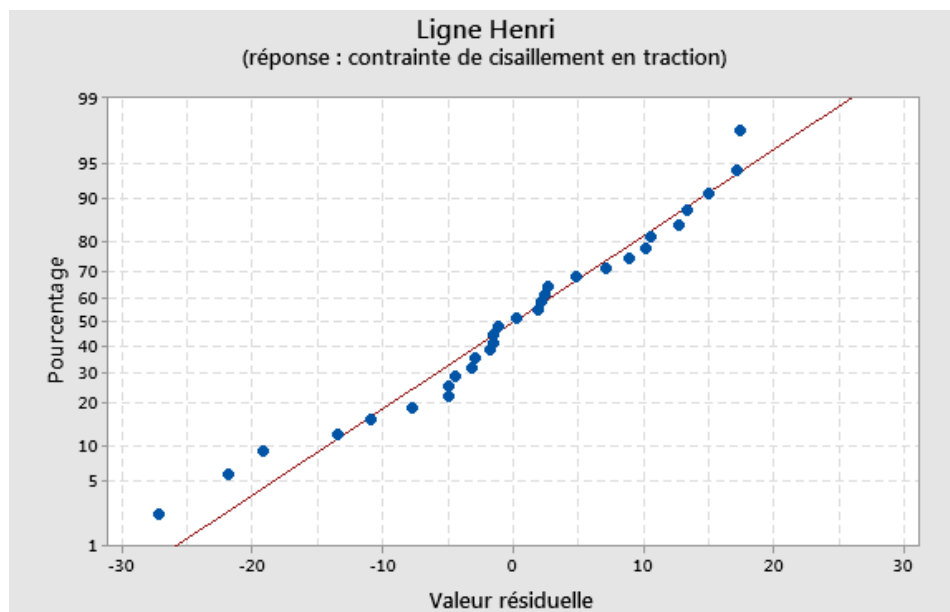


Figure 17 : Contrainte de traction prévue par rapport aux valeurs expérimentales

Le diagramme de Pareto fournit des informations statistiques sur les effets des variables d'entrée (facteur ou paramètres de soudage dans notre situation) sur les réponses (contrainte de cisaillement par traction). Le diagramme de Pareto obtenu pour la contrainte de cisaillement par traction est présenté par la figure 18. Les paramètres avant la limite en pointillés présentés dans la figure n'ont aucune signification pour le modèle. Il est important de connaître les niveaux d'effet des paramètres de soudage sur les résultats de sortie (contrainte de cisaillement en traction). En utilisant ces informations, on pourrait choisir quel paramètre est le plus important pour un assemblage par soudage parfait [4].

Tableau 2 : Tableau d'analyse des variances.

| Source | DL | Som Car ajust | CM ajust | Valeur F | Valeur de p |
|--------|----|---------------|----------|----------|-------------|
| I | 1 | 24558,0 | 24558,0 | 177,10 | 0,00 |
| T | 1 | 49,7 | 49,7 | 0,36 | 0,555 |
| F | 1 | 156,7 | 156,7 | 1,13 | 0,298 |
| Erreur | 26 | 3605,4 | 138,7 | | |
| Total | 29 | 28369,7 | | | |

R carré = 87.29%
R carré ajusté = 85.83%
R carré Prédit = 82.91%

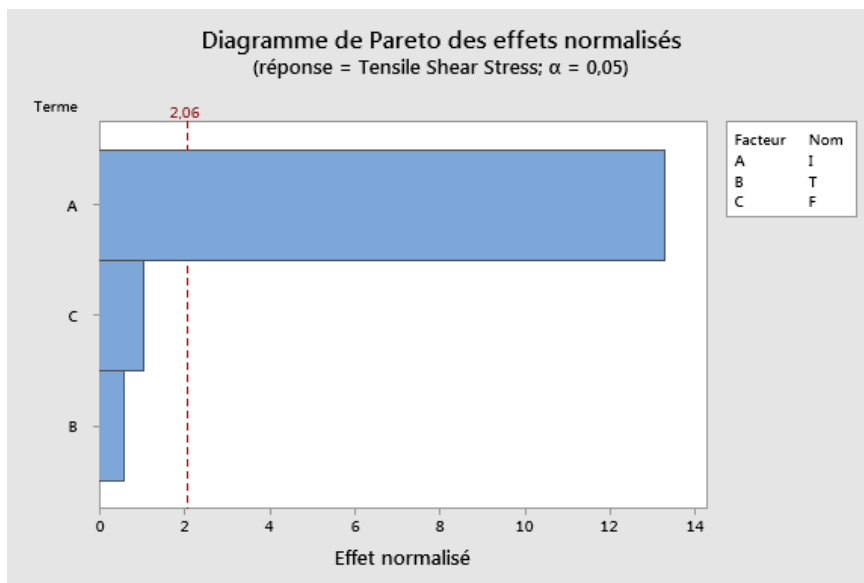


Figure 18 : Diagramme de Pareto des effets normalisés.

III. MODELISATION DE REGRESSION ET ANALYSE DE PROCESSUS DES PARAMETRES DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS HETEROGENES

Un modèle de régression a été proposé pour relier la résistance au cisaillement par traction des joints soudés par RSW au courant de soudage I , au temps de soudage T et à la force de soudage F . Minitab19 a été utilisé pour l'analyse de régression. En conséquence, un modèle mathématique a été développé pour l'influence des trois paramètres de soudage sur la contrainte de cisaillement par traction, décrit sous la forme :

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{23}x_2x_3 \quad (2)$$

Les paramètres x_1 , x_2 et x_3 définissent respectivement les paramètres de soudage (Courant : I , Temps : T , force d'électrode).

L'équation de régression déterminée entre la résistance au cisaillement par traction (σ_{ct}) et les paramètres de soudage I , T et F est donnée par l'équation suivante:

$$\sigma_{ct} = -343 + 33.2 \times I + 35.4 \times T + 47.4 \times F - 0.767 \times I^2 - 4.58 \times T \times F \quad (3)$$

Le tableau 3 illustre les résultats de l'analyse de variance avec quelques interactions entre les trois paramètres de soudage. Les données montrent que les principaux effets du courant de soudage sont pertinents pour la charge maximale. Étant donné que la valeur p du courant de soudage est inférieure au niveau de signification établi à un niveau de probabilité de 5 % ($p < 0,05$), l'interaction entre le temps de soudage et la force de l'électrode ne peut être considérée comme significative. Ce tableau montre également d'autres mesures d'adéquation : $R^2 = 88,96 \%$, R^2 ajusté = $86,66 \%$ et R^2 prédit = $81,59 \%$. Comme ils sont tous très proches de 0,9, ils indiquent un modèle adapté.

Tableau 3 : Résultats d'analyse de variance.

| Source | DL | Som Car ajust | CM ajust | Valeur F | Valeur de p |
|--|----|------------------|----------|----------|-------------|
| Régression | 5 | 25237.7 | 5047.5 | 38.68 | 0.000 |
| I | 1 | 632.6 | 632.6 | 4.85 | 0.038 |
| T | 1 | 258.8 | 258.8 | 1.98 | 0.172 |
| F | 1 | 201.3 | 201.3 | 1.54 | 0.226 |
| I*I | 1 | 228.4 | 228.4 | 1.75 | 0.198 |
| T*F | 1 | 245.0 | 245.0 | 1.88 | 0.183 |
| Erreur | 24 | 3132.0 | 130.5 | | |
| Total | 29 | 28369.7 | | | |
| R carré = 88.96% R carré ajusté = 86.66% R carré Prédit = 81.59% | | | | | |

Il est nécessaire de comparer les valeurs des contraintes de cisaillement par traction estimées par l'équation (3) avec les valeurs obtenues à la suite de calculs expérimentaux. Les résidus sont constitués de la différence entre les données et les données du modèle. Une comparaison des données estimées et expérimentales pour la contrainte de cisaillement par traction est présentée à la figure 19 [6,7]. Selon la figure 19, un bon accord est observé entre le modèle mathématique obtenu pour la contrainte de cisaillement par traction et les données expérimentales, et les résidus évoluent relativement le long d'une ligne droite. Par conséquent, l'hypothèse de distribution normale a été considérée comme satisfaisant.

La figure 20 présente un graphique des résidus par rapport à l'ordre d'observation ce qui montre que tous les points résidus sont répartis dans les limites inférieure et supérieure sans modèles évidents, confirmant l'hypothèse selon laquelle les résidus ont une variance régulière. Par conséquent, tous les tracés de diagnostic indiquent que toutes les hypothèses ANOVA nécessaires sont satisfaites.

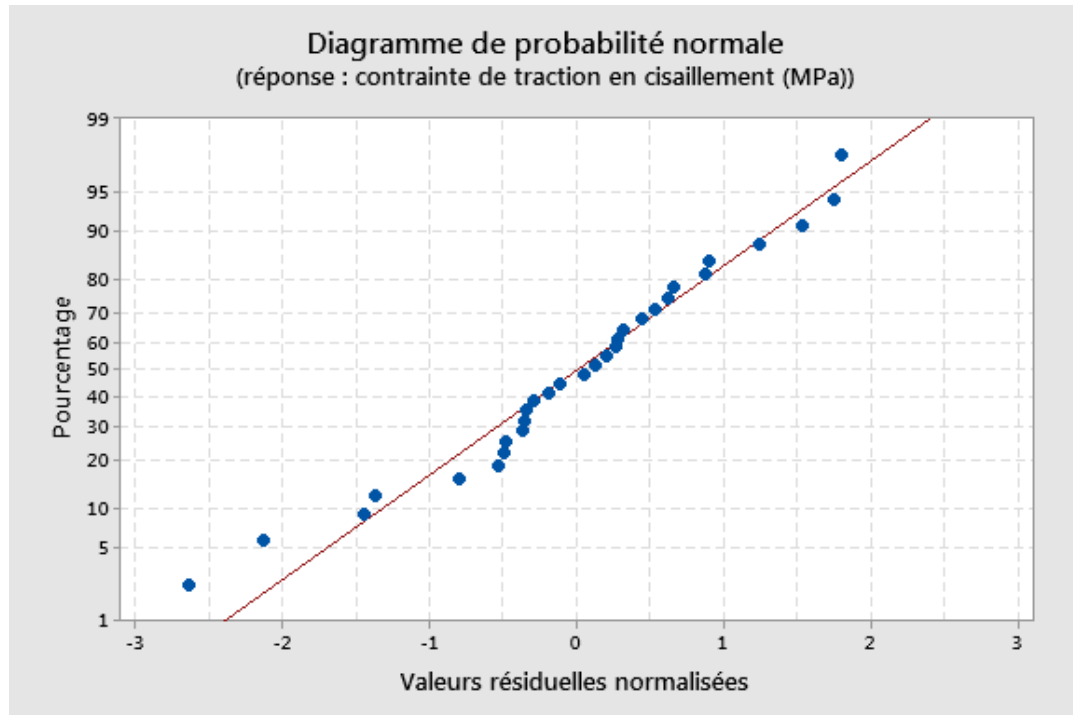


Figure 19 : Diagramme de probabilité normale des résidus.

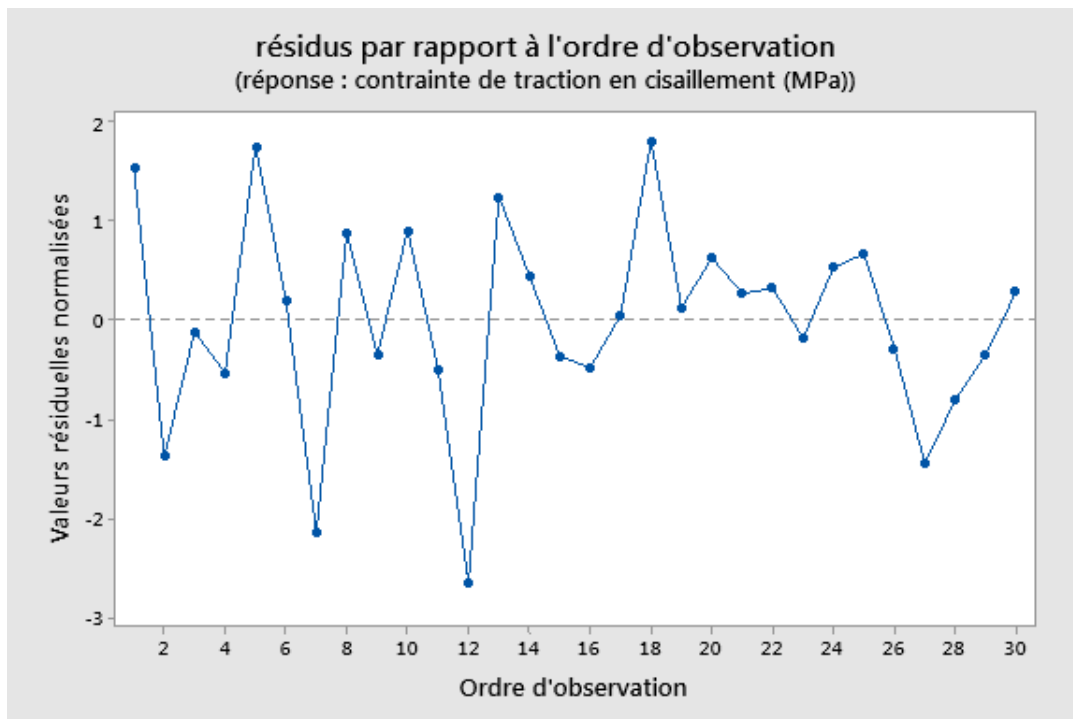


Figure 20 : Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation.

Comme le montre la figure 21 du Graphiques des résidus par rapport aux ajustements tous les points des résidus par rapport à la ligne zéro sont dispersés dans les limites inférieure et supérieure, ne montrant aucune distribution linéaire. Ce graphique indique que l'hypothèse d'indépendance est également satisfaite. L'histogramme des résidus illustré par la figure 22 forme une courbe normale également répartie autour de zéro, ce qui montre que l'hypothèse de normalité est plus que probablement vraie.

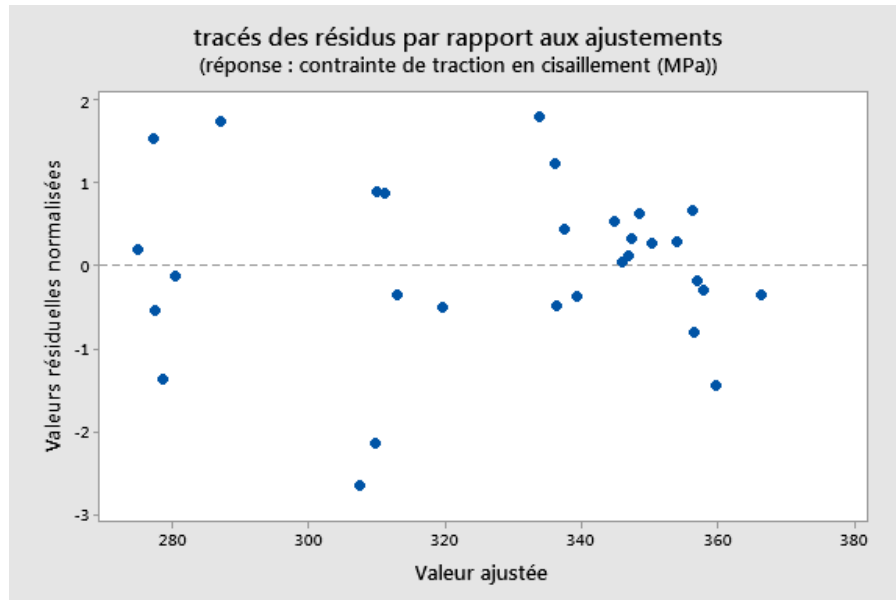


Figure 21 : Graphique des résidus par rapport aux ajustements.

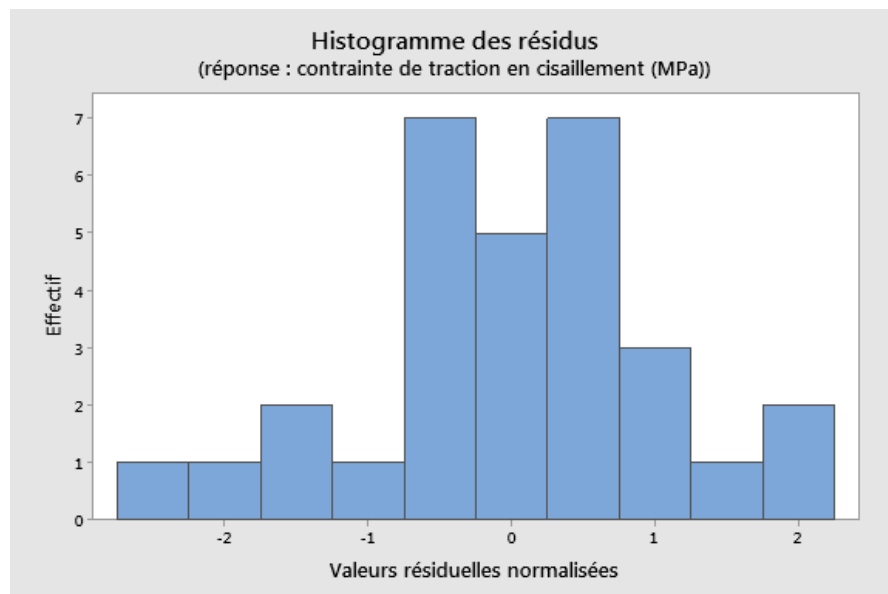


Figure 22 : Histogramme des résidus.

Comme le montre la figure 23, le diagramme de Pareto fournit des informations statistiques sur les effets des variables d'entrées, des facteurs ou des paramètres de soudage dans ce cas, sur la contrainte de cisaillement par traction. On observe que le facteur du courant de soudage a un impact pertinent sur la contrainte de cisaillement par traction car il se produit en dehors de la ligne pointillée à 2,064. Les autres paramètres et interactions ont un impact insignifiant ou moindre par rapport au courant de soudage. Il est important de connaître les niveaux d'effet des paramètres de soudage sur la contrainte de cisaillement par traction. En utilisant ces informations, on pourrait choisir quel paramètre est le plus important pour un assemblage par soudage parfait [8, 9].

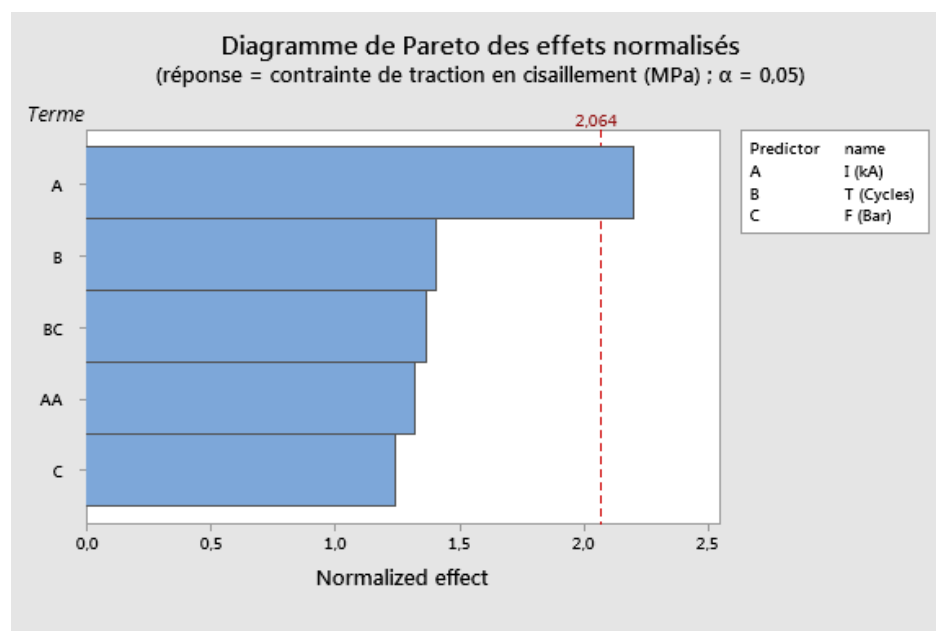


Figure 23 : Diagramme de Pareto des effets normalisés.

L'effet de ces facteurs et leurs combinaisons peuvent être classés par ordre croissant : courant de soudage I, temps de soudage T, Temps de soudage T/Force de soudage F, Courant de soudage I/Courant de Soudage I, Force de soudage F. Ce résultat peut être davantage étayé par la prise en compte des effets principaux et des graphiques d'interaction, comme le montrent les figures 23 et 24 respectivement. La figure 24 montre une représentation graphique des principaux effets des facteurs examinés pour la soudure par points concernant la contrainte de cisaillement par traction. Selon le graphique, on peut conclure que l'impact d'un facteur est directement lié à la pente et à la longueur de la ligne dans le graphique. Plus la pente est élevée, plus l'influence sur l'augmentation moyenne de la charge maximale sera élevée lors de la variation des niveaux de faible à élever.

Selon la figure 23, le courant de soudage a un impact significatif sur la contrainte de cisaillement par traction en raison de la pente plus élevée, tandis que le temps de soudage est moins sensible à la variabilité de la contrainte de cisaillement par traction par rapport au courant de soudage. D'autre part, la force de soudage a moins d'effet sur la contrainte de cisaillement par traction.

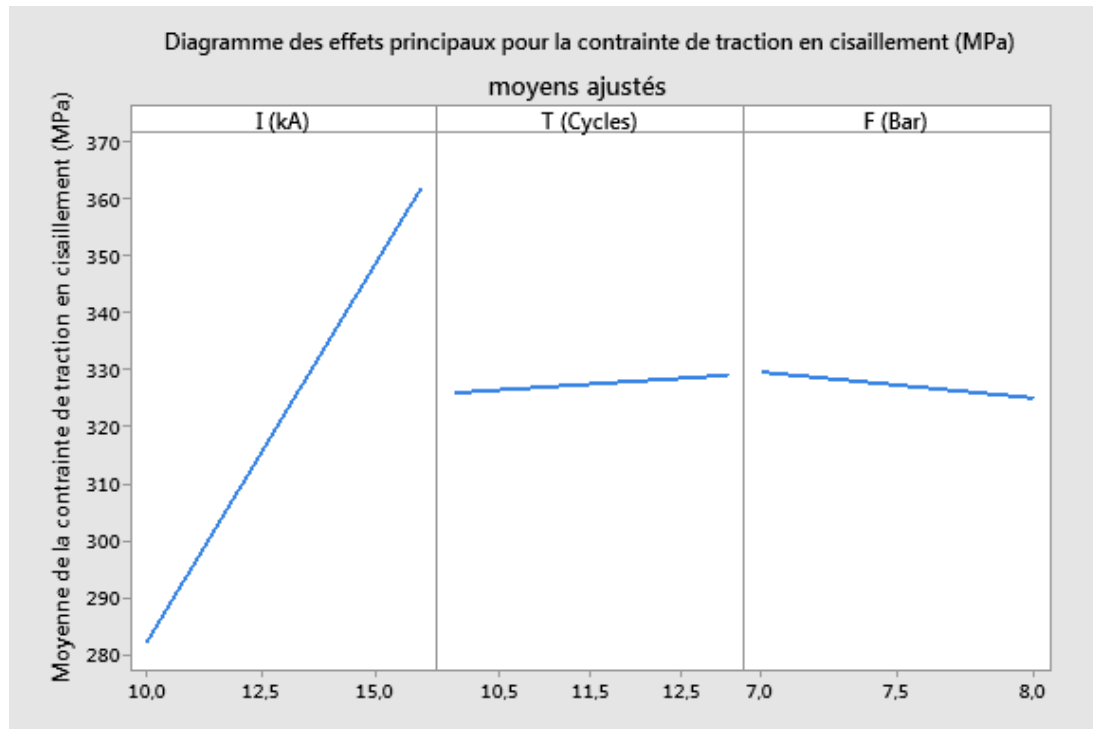


Figure 24 : Diagramme des effets principaux pour la contrainte de traction en cisaillement (MPa).

La figure 25 montre l'effet principal des trois paramètres de soudage sur la contrainte de cisaillement par traction. Les trois courbes d'interaction à deux facteurs indiquent un effet interaction significatif entre le courant de soudage et le temps de soudage, ainsi que le courant de soudage et la force de soudage. La contrainte de cisaillement par traction atteint son maximum lorsque le courant de soudage et le temps de soudage sont maintenus à un niveau élevé, mais la force de soudage est à un niveau bas, 16kA, 13cycles et 7bar respectivement. De même, la contrainte de cisaillement par traction atteint son minimum lorsque le courant de soudage et le temps de soudage sont tous deux à des niveaux bas, mais la force de l'électrode maintient un niveau élevé, c'est-à-dire 10 kA, 10 cycles et 8 bars respectivement.

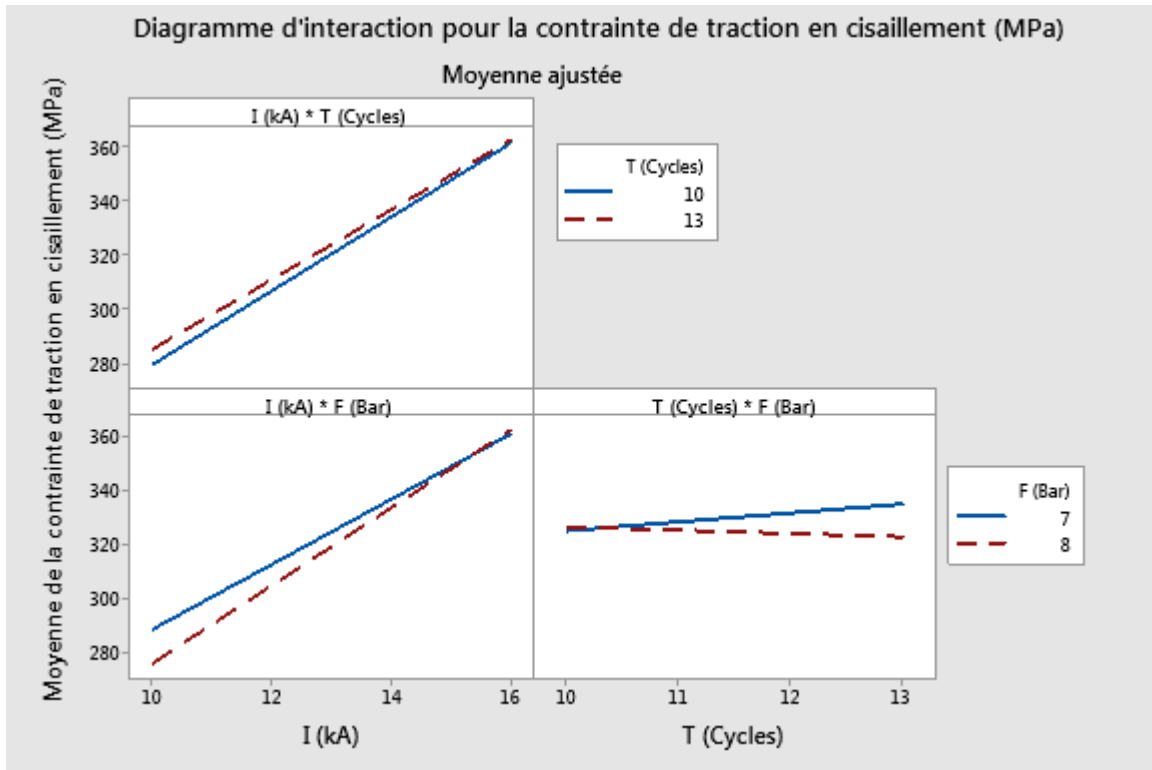


Figure 25 : Diagramme d'interaction pour la contrainte de cisaillement par traction.

POINTS A RETENIR /CONCLUSION

Le présent chapitre a fait l'objet de comprendre les effets des paramètres de soudage tel que le courant de soudage $I(kA)$, le temps de soudage $T(cycles)$ et la force de soudage $F(Bar)$ sur le comportement mécanique des assemblages soudé à matériaux hétérogènes (Acier inoxydable 304L/Acier Galvanisée Z275) d'une épaisseur de 2 mm pour les deux matériaux en utilisant le procédé de soudage par résistance par point à partir d'une étude analytique, statistique et une modélisation de régression et analyse de processus des paramètres de soudage ainsi que l'interaction entre les trois paramètres.

Selon les résultats obtenus et présenté dans ce chapitre on note que :

- Le courant de soudage a eu le plus grand impact sur la contrainte de cisaillement par traction par rapport aux autres paramètres, le temps de soudage, la force de soudage et à d'autres combinaisons. L'augmentation du courant de soudage augmente la résistance à la traction (ou la charge de maximale) ainsi que la surface de déformation plastique (déplacement transversal) des joints soudés.
- La charge maximale augmente avec l'augmentation du temps de soudage contrairement à la force de soudage quand elle augmente, la charge maximale diminue.
- L'analyse de régression a montré qu'il existe une relation linéaire entre les paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage et force d'électrode) et la résistance de cisaillement par traction des joints.
- Les paramètres optimaux qui ont donné une résistance au cisaillement par traction plus élevée étaient pour un courant de soudage plus élevé (16kA), un temps de soudage plus élevé (13cycles) et une force de soudage faible (7bar).
- Le mode de rupture est le facteur le plus critique de la qualité de la soudure en termes de charge de maximale, les modes de ruptures sont contrôlés par le courant de soudage et les durées de soudage du côté en acier galvanisé., inférieur à 12 kA, le mode de défaillance est interfacial. Entre 12 kA et 15 kA, c'est le mode de rupture par déboutonnage et au-delà de 15 kA, c'est le mode de rupture par arrachement dans le métal de base.

REFERENCES

- [1] Pouranvari, M., Marashi, P. and Goodarzi, M. (2008). Failure mode of dissimilar resistance spot welds between austenitic stainless and low carbon steels. *Hradec nad Moravicí: METAL*, 13, pp. 1-6.
- [2] Verma, A. B., Ghunage, S. U. and Ahuja, B. B. (2014). Resistance Welding of Austenitic Stainless Steels (AISI 304 with AISI 316). 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), IIT Guwahati, Assam, India, 12 -14 December.
- [3] Pasquale, R. S., Manuela, D. M., Franco L. and Matteo, R. (2016). Dissimilar resistance spot welding of Q&P and TWIP steel sheets. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(3), pp. 291-299.
- [4] Kadir, G. (2021). Factorial experimental design for second law analysis of panel radiators as a function of radiator dimension. *Journal of Building Engineering*, 43, 1-12.
- [5] Valera, J., Miguel, V., Martínez, A., Naranjo, J. and Cañas, M. (2017). “Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets”. *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 291-298.
- [6] Y. Luo, J. Liu, H. Xu, C. Xiong, and L. Liu (2009). "Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet," *Materials & Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2547–2555.
- [7] S.M. Hamidinejad, F. Kolahan, and A. H. Kokabi (2012). “The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing” *Materials & Design*, vol. 34, pp. 759–767.
- [8] K. Gelis (2021). “Factorial experimental design for second law analysis of panel radiators as a function of radiator dimension”. *Journal of Building Engineering*, vol. 43, Art. no. 102872.
- [9] T. Saeheaw (2020). "Regression modeling and process analysis of plug and spot welds used in automotive body panel assembly”. *International Journal of Engineering*, vol. 33, no. 11, pp. 2384–2398, Nov. 2020.

Conclusion Générale & Perspectives

I. CONCLUSION GENERALE

L'objectif globale de cette étude est d'évaluer et estimer expérimentalement l'effet des paramètres de soudage tel que le courant de soudage I, le temps de soudage T et la force de soudage F et les effets combinés de ses paramètres sur le comportement et la tenue mécanique des assemblages hétérogènes tel principalement la résistance mécanique à la rupture de l'acier inoxydable 304L et l'acier Galvanisé en utilisant le procédé de soudage par résistance par points.

Un état de l'art et synthèse des travaux liés aux assemblages soudés homogènes et hétérogènes ont été présentées. Sur la base des essais expérimentaux de cisaillement par traction et la modélisation par régression on fait ressortir les conclusions suivantes :

- Le procédé de soudage par résistance par point est un procédé très important dans l'industrie et qui nous permet d'assembler des matériaux différents.
- Le courant de soudage est le paramètre le plus affecte sur la contrainte de cisaillement par traction par rapport au autre paramètres, le temps de soudage, la force de soudage et à d'autres combinaisons. L'augmentation du courant de soudage augmente la résistance à la traction (ou la charge maximale) ainsi que la surface de déformation plastique (déplacement transversal) des joints soudés.
- La charge maximale augmente avec l'augmentation du temps de soudage contrairement à la force de soudage quand elle augmente, la charge maximale diminuera.
- D'après l'analyse de régression il existe une relation linéaire entre les paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage et force d'électrode) et la résistance de cisaillement par traction des joints.
- Le courant de soudage est le paramètre qui contrôle le mode de rupture et les durées de soudage du côté en acier galvanisé. Inférieur à 12 kA, le mode de défaillance est interfacial. Entre 12 kA et 15 kA, c'est le mode de rupture par déboutonnage et au-delà de 15 kA, c'est le mode de rupture par arrachement dans le métal de base.
- Les paramètres optimaux qui ont donné une résistance au cisaillement par traction plus élevée étaient un courant de soudage plus élevé (16kA) et un temps de soudage plus élevé (13cycles) et une force de soudage plus faible (7bar).

II. PERSPECTIVES

A travers les différents points étudiés dans la présente thèse ; nous relevons les perspectives suivantes afin d'améliorer et approfondir les effets des paramètres de soudage tel que la courant de soudage, le temps de soudage et la force d'électrode sur le comportement mécanique des assemblages hétérogènes soudée par résistance par point.

- La présente thèse à regrouper deux aspects : Aspect expérimentale permet d'étudier et évaluer les effets des paramètres de soudage par point sur des assemblages hétérogène (acier inoxydable et acier galvanisée) et aspect numérique (optimisation des paramètres de soudage par analyse statistique).
- Le travail expérimental fait dans la thèse contient un impact socio-économique représenté par : réduction du cout de la structure réalisée ; structure très résistante, réduction du poids de la structure ainsi que les émissions du CO₂.
- Le présent travail ouvre la voie à plusieurs recherches au future ou il permet d'étudier les compositions métallurgiques des joints hétérogènes ainsi que d'étudier la soudabilité d'autres matériaux entre eux tel que les aciers inoxydables avec l'aluminium.