

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

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présenté pour l'obtention du grade de DOCTEUR en SCIENCES

En : Génie Mécanique

Spécialité : Science des Matériaux

Présenté par : **RAMDANI MOHAMMED**

Intitulé du Sujet

Optimisation des paramètres de soudage par points et leurs effets sur le comportement mécanique

Soutenu publiquement le : 01/07/2024, devant le jury composé de :

M. SEBAA Féthi	Prof	Université de Tlemcen	Président
M. BENACHOUR Mustapha	prof	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
M. RAHOU Mohammed	Prof	ESSA Tlemcen	Co directeur de thèse
M. BOUCHOUICHA Benattou	prof	Université de Sidi Bel Abb	Examineur
M. MERGHACHE Sidi Mohammed	prof	Université De Tissemsilt	Examineur
M. HADJOUI Féthi	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M. BENGUDIAB Mohammed	Prof	Université de Sidi Bel Abb	Invité

Laboratoire LMSE

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents.

Ma petite famille.

Ma grand famille mon frère et mes sœurs.

Mon conjointe

Mes deux enfants Atif Houcine et Baraa Abdel alouadoud.

Mon cher ami de l'entreprise MILOUD ABID BENEDINNE

A tous ceux qui me connaissent.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord **Allah** le tout-puissant de nous avoir donnés le courage, la patience et surtout la Volonté de mener à bien réaliser ce travail.

Nous remercions avec appréciation notre encadreur prof **Mr Benachour Mustapha** , pour sa personnalité honnête qui nous fait apprendre beaucoup et sa confiance vers nous a propos ce projet de recherche expérimental, ses encouragements et conseils, qui nous a donné l'esprit pour rester toujours motivés.

Aussi, Nous voulons également merci Mr : **Rahou Mohammed** Co-encadreur qui à participé à la direction de cette thèse.

Grand remerciement pour **Pr.** , professeur à l'université de Tlemcen , qui nous a fait l'honneur de présider mon jury. Et **Mr** : , Et **Mr** : d'avoir accepté d'examiner notre travail.

ملخص

تلعب المقاومة عن طريق اللحام النقطي في القطاع الصناعي دوراً مهماً في تجميع المواد التي تستخدم التأثيرات المشتركة للضغط الميكانيكي والتيار الكهربائي الذي يمر عبر الأجزاء والوقت. تستخدم هذه العملية على نطاق واسع في لحام الصفائح المعدنية الرقيقة، وخاصة صفائح الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي L304.

المعاملات الرئيسية للمقاومة باللحام النقطي هي: تيار اللحام وزمن اللحام وقوة القطب. يعتبر طول تغطية الأجزاء المجمعة معامل هندسي يجب أخذه بعين الاعتبار. يتراوح تيار اللحام من 10 كيلو أمبير إلى 16 كيلو أمبير، زمن اللحام من 11 إلى 13 دورة، وقوة القطب تتراوح من 6 إلى 8 بار. تم اعتبار ثلاثة أطوال لتغطية الألواح المجمعة: 20 مم، 25 مم، و30 مم.

من أجل دراسة مقاومة الكسر للمجموعات الملحومة نقطياً، تم تطبيق خطة تجريبية عاملية وفقاً لمعايير اللحام المختارة. تم دراسة تأثيرات معاملات اللحام من خلال تقييم قوة القص القصوى عن طريق الجر وتحديد قطر وعمق المسافة الفارغة. أظهرت الزيادة في تيار اللحام زيادة معتبرة في قوة القص القصوى بالجر والحجم الخارجي لنقطة اللحام مقارنة بمعاملات اللحام الأخرى. تم إنشاء نمذجة وتحسين معاملات اللحام من خلال النماذج الرياضية للتعبير عن العلاقة بين معاملات اللحام (تيار اللحام I ، وزمن اللحام T ، وقوة القطب F وطول التغطية A) وقوة القص الأقصى عن طريق الجر. تم تطبيق تحليل التباين ANOVA لتحديد تأثيرات عوامل اللحام والتفاعل بينها. تم أيضاً إنشاء نماذج رياضية تربط بين معاملات اللحام لكل طول تغطية ثابت، بالإضافة إلى نموذج يدمج طول التغطية كمعامل تأثير.

الكلمات الرئيسية:

الفولاذ المقاوم للصدأ L304. اللحام البقيعي. معلمة اللحام. أقصى قوة القص. التحليل العاملية. تفاعل. المعلمات.

Résumé :

Dans le secteur industriel le soudage par résistance par point joue un rôle très important dans l'assemblage des matériaux qui utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces. Ce procédé présente une large utilisation dans le soudage des tôles minces et spécialement les tôles en acier inoxydable austénitiques 304L.

Les principaux paramètres de soudage par résistance par point sont : le courant de soudage, temps de soudage et la force d'électrode. La longueur de recouvrement des pièces assemblées est considérée comme paramètres dimensionnelle tenir en compte. La gamme du courant de soudage sélectionnée varie de 10 kA à 16 kA. Le temps de soudage varie de 11 à 13 cycles et la force d'électrode varie de 6 à 8 bars. Trois longueurs de recouvrement des tôles à assembler sont considérées 20 mm, 25 mm et 30 mm.

Afin d'étudier la résistance à la rupture des assemblages soudés par points, un plan expérimental factoriel est appliqué selon les paramètres de soudage sélectionnés. Les effets des paramètres de soudage sont investigués à travers l'évaluation de la force de cisaillement maximale par traction et la détermination du diamètre et la profondeur d'indentation. L'augmentation du courant de soudage a montré une augmentation significative de la force de cisaillement maximale par traction et la taille extérieur du point de soudure comparativement par rapport aux autres paramètres de soudage. Une modélisation des paramètres de soudage par des modèles mathématiques est établit afin d'exprimer la relation entre les paramètres du soudage (courant de soudage I , temps de soudage T et la force d'électrode F et A longueur de recouvrement) et la charge maximale de cisaillement par traction. L'analyse de variance "ANOVA" est appliquée afin de déterminer les effets des paramètres de soudage et l'interaction entre eux. Des modèles mathématiques liant les paramètres de soudage pour chaque longueur de recouvrement fixe est établit ainsi qu'un modèle intégrant la longueur de recouvrement comme paramètre d'effet.

Mots clés: Aciers inoxydable 304L. Soudage par point. Paramètre de soudage. Force maximale de cisaillement. Analyse factoriel.intéraction des paramètres.

Abstract:

In the industrial sector, the resistance by point welding plays a very important role in the assembly of materials which uses the combined effects of mechanical pressure and an electric current passing through the parts and time. This process is widely used in welding thin metal sheets, especially austenitic stainless steel sheets 304L.

The main parameters of the resistance by point welding are: the welding current, the welding time and the electrode force. The covering length of the assembled parts is considered as a geometric parameter to take into account. The selected welding current varies from 10 kA to 16 kA. The welding time ranges from 11 to 13 cycles and the electrode force ranges from 6 to 8 bar. Three covering lengths of the assembled sheets are considered: 20 mm, 25 mm and 30 mm.

In order to study the breaking resistance of the point welded assemblies, a factorial experimental plan is applied according to the selected welding parameters. The effects of welding parameters are investigated through the evaluation of the maximum shear force by traction and the determination of the diameter and depth of indentation. The increase in the welding current showed a significant increase of the maximum shear force by traction and the external size of the welding point compared to other welding parameters. A modeling and optimization of the welding parameters by mathematical models is established in order to express the relationship between the welding parameters (welding current I , welding time T , the electrode force F and the covering length A) and the maximum shear load by traction. The analysis of variance ANOVA is applied to determine the effects of the welding parameters and the interaction between them. Mathematical models linking the welding parameters for each fixed covering length are established, as well as a model integrating the covering length as an effect parameter.

Keywords: 304L stainless steels. Spot welding. Welding parameter. Maximum shear force. Factor analysis. Interaction of parameters.

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique sur le soudage par points

Figure I. 1: Illustration du principe de soudage par points (Manladan et al, 2017) .5	5
Figure I. 2: Cycle de soudage par points	7
Figure I. 3: Microstructure d'un point soudé sur tôles en acier (Raelison, 2010 ; Raelison, et al., 2012).	9
Figure I. 4: Formation de la nouvelle microstructure générée après une opération de soudage	11
Figure I. 5: Courbes de traction pour différents types d'aciers inoxydables	13

Chapitre II : Etat de l'art sur le comportement mécanique des joints soudés

Figure II. 1: Effets des paramètres de soudage sur la charge de rupture (a) courant de soudage, (b) temps de soudage (c) force de l'électrode (Pereira et al., 2010).....	20
Figure II. 2: Effet du temps de soudage sur la formation de la taille du noyau (Moshayedi et Sattari-Far, 2012).....	21
Figure II. 3: Effet du courant de soudage sur la formation de la taille du noyau (Moshayedi et Sattari-Far, 2012).....	22
Figure II. 4: Distribution des contraintes résiduelles radiales (a) effet du courant de soudage (b) effet du temps de soudage (Moshayedi et Sattari-Far, 2014).....	23
Figure II. 5: Variation de la taille du noyau en fonction du courant de soudage (Kianersi et al., 2014)	24
Figure II. 6: Influence du courant de soudage sur la force de cisaillement par traction de l'acier 316 L à t=4 cycles (Kianersi et al., 2014)	24
Figure II. 7: Soudure par points en acier inoxydable martensitique : (a) macrostructure (b) profil de dureté, (c) diamètre du noyau (Pouranvari, 2017)	25
Figure II. 8: Courbes charges/Déplacements des joints (a) joints 304/304; (b) joints 304/430; (c) joints 430/430 (Zhang et al. (2020)).....	26
Figure II. 9: Distribution de la dureté Vickers dans les zones des joints de soudure (Zhang et al., 2020).....	26

Figure II. 10: Diagramme de Pareto des effets normalisés des paramètres de soudage Ternane et al. (2022).....	30
--	----

Chapitre III : Etude expérimentale des joints soudés par point

Figure III. 1: Machine de traction ControlLab 600 KN	39
Figure III. 2: Eprouvettes d'essais de traction.....	39
Figure III. 3: Courbe contrainte/déformation de l'acier 304L.....	40
Figure III. 4: Dimension des assemblages réalisés par soudage par point.....	41
Figure III. 5: Exemples de réalisation d'assemblages par soudage par points.....	41

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Figure IV. 1: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=20 mm et F=6 bar	48
Figure IV. 2: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=20 mm et F=7 bar	49
Figure IV. 3: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=20 mm et F=8 bar	49
Figure IV. 4: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=6 bar	50
Figure IV. 5: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=7 bar	50
Figure IV. 6: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=8 bar	51
Figure IV. 7: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=6 bar	51
Figure IV. 8: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=7 bar	52
Figure IV. 9 : Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=8 bar	52
Figure IV. 10: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation moyen.	53
Figure IV. 11: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=6 bar	54

Figure IV. 12: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=7 bar	54
Figure IV. 13: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=8 bar	55
Figure IV. 14: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=6 bar	55
Figure IV. 15: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=7 bar	56
Figure IV. 16: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=8 bar	56
Figure IV. 17: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=6 bar	57
Figure IV. 18: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=7 bar	57
Figure IV. 19: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=8 bar	58
Figure IV. 20: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation moyen	58
Figure IV. 21: Points spécifiques des courbes Charges/Déplacement	60
Figure IV. 22: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage	61
Figure IV. 23: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour A=25 mm, T= 13 cycles et F= 7 bar	61
Figure IV. 24: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage	62
Figure IV. 25: Détails de rupture d'assemblages soudés par points.....	63
Figure IV. 26: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=20 mm	64
Figure IV. 27: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=20 mm	64
Figure IV. 28: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 8 bars et A=20 mm	65

Figure IV. 29: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=25 mm	65
Figure IV. 30: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=25 mm	66
Figure IV. 31: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 8 bars et A=25 mm	66
Figure IV. 32: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=30 mm	67
Figure IV. 33: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=30 mm	67
Figure IV. 34: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=30 mm	68
Figure IV. 35: Evolution de la charge maximale moyenne (T et F) en fonction du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction	68
Figure IV. 36: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F)	73
Figure IV. 37: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimental A20	76
Figure IV. 38: Histogramme des résidus pour A20	76
Figure IV. 39: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20	77
Figure IV. 40: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F) pour A25	79
Figure IV. 41: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction calcul et celles obtenues expérimentalement pour A25	81
Figure IV. 42: Histogramme des résidus pour A25	82
Figure IV. 43: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto A25	82
Figure IV. 44: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F) pour A30	85
Figure IV. 45: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction calculé et celles obtenues expérimentalement pour A30.....	86

Figure IV. 46: Histogramme des résidus pour A30	87
Figure IV. 47: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto "A30"	87
Figure IV. 48: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction calcul et celles obtenues expérimentalement en couplage	89
Figure IV. 49: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto en couplage.....	90

Liste des tableaux :

Chapitre I : Etude bibliographique sur le soudage par points

Tableau I. 1: Paramètres de soudage par résistance par points de l'acier inoxydable 304L (Guide de soudage par points : SOREMEP-Tlemcen)	14
--	----

Chapitre III : Etude expérimentale des joints soudés par point

Tableau III. 1: Désignation normalisée de l'acier inoxydable 304L.....	37
Tableau III. 2: Composition chimique de l'acier inoxydable 304L	38
Tableau III. 3: Dimensions des éprouvettes de traction.....	38
Tableau III. 4: Propriétés mécaniques de l'acier 304L	40
Tableau III. 5: Paramètres de soudage sélectionnés.....	41
Tableau III. 6: Plan factoriel des assemblages réalisés par soudage par points.....	42
Tableau III. 7: Etapes de l'étude expérimentale (Soudage et rupture des joints soudés).....	44

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau IV. 1 : Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 20 mm.....	72
Tableau IV. 2 : Analyse des variances pour A20	74
Tableau IV. 3: Résultats d'analyse des variances pour A20	75
Tableau IV. 4: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 25 mm.....	78
Tableau IV. 5: Analyse de variances A25	80
Tableau IV. 6: Résultats d'analyse de variances "A25"	80
Tableau IV. 7: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 30 mm.....	83
Tableau IV. 8: Analyse de variances A30	84
Tableau IV. 9: Résultats d'analyse de variances "A30"	84
Tableau IV. 10: Analyse de variances en couplage.....	88

Liste des abréviations:

RSW:	Resistance Spot Welding
SP:	Soudage par Point
ZAT:	Zone Affectée Thermiquement
ZF:	Zone fondue
MB:	Métal de base
SCZAT :	Zone sub-critique
ICZAT :	Zone inter-critique
CFZAT :	Zone à grain fins
FCAW :	Soudage à l'arc sous flux
I :	courant de Soudage (KA)
T :	Temps de Soudage (Cycle)
F :	Force de Soudage (bar)
KA :	Kilo Ampère
L :	Longueur de la pièce (mm)
W :	largeur de la pièce (mm)
A :	Recouvrement (mm)
e :	Epaisseur (mm)
R :	rayon (mm)
Som Car Ajust :	Somme des carrés ajustés
CM ajust :	carrés moyens ajustées
σ:	Force maximale de cisaillement
ANOVA :	Analyse Of Variance
RSM :	méthode des surfaces de repenses

Tables des matières :

Dédicaces.....	I
Remerciement.....	II
ملخص	III
Résumé :	IV
Abstract:	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux :.....	XI
Liste des abréviations:.....	XII
Tables des matières :	XIII
Introduction générale :	2
CHAPITRE I: Etude bibliographique sur le soudage par points	4
I. SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINTS.....	5
I.1. Définition du procédé de soudage par points.....	5
I.2. Avantages et inconvénients :	7
I.2.1. Avantages :.....	7
I.2.2. Inconvénients :.....	7
I.3. Paramètres de soudage par points :.....	8
I.4. Formation d'un point soudé :	9
II. Soudabilité des aciers inoxydables :.....	11
II.1. Aciers inoxydables austénitiques :	11
II.2. Aciers inoxydables ferritiques :.....	12
II.3. Aciers inoxydables martensitique :	12
III. Effet des paramètres de soudage par points sur le comportement mécanique :	14
III.1. Zones affectées par la chaleur (ZAT) :	14
III.2. Formation de joints soudés :	15
III.3. Effets de la contrainte résiduelle :.....	15
Références chapitre I :.....	16
CHAPITRE II: Etat de l'art sur le comportement mécanique des joints soudés	18

I. Paramètres de soudage.....	19
I.1. Analyse analytique.....	19
I.2. Analyse factorielle	27
Conclusion :.....	31
Références chapitre II :	32
CHAPITRE III: Procédures Expérimentales	36
I. Introduction :.....	37
II. Matériau.....	37
II.1. Composition chimique de l'acier 304L	37
I.2. Caractérisation mécanique.....	38
III. Conclusion :.....	45
CHAPITRE IV: Résultats et Discussion.....	46
I. Introduction.....	47
II. Effet des paramètres de soudage sur la profondeur et le diamètre d'indentation du point de soudure	47
II.1. Effets des paramètres de soudage sur le diamètre d'indentation.....	47
II.2. Effets des paramètres de soudage sur la profondeur d'indentation.....	53
III. Effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique.....	58
IV. Modélisation et l'optimisation des paramètres de soudage	69
IV.1. Méthodes d'optimisations	69
IV.1.1. Optimisation par descente de gradient :.....	69
IV.1.2. Méthodes d'optimisation stochastique :.....	69
IV.1.3. Méthodes d'optimisation de deuxième ordre :	70
IV.1.4. Algorithme de recherche aléatoire :.....	70
IV.1.5. Méthodes d'optimisation par essais :.....	70
IV.1.6. Algorithmes génétiques :	70
IV.1.7. Méta heuristiques :.....	70
IV.1.8. Optimisation convexe :	70
IV.1.9. Optimisation multi-objectif :.....	70
V. Analyse de variance et méthodologie des surfaces de réponse.....	71
V.1. Modélisation et optimisation pour A 20 :.....	71
V.2. Modélisation et optimisation pour A 25 :.....	78

V.3. Modélisation et optimisation pour A 30 :.....	82
V.4. Couplage de la longueur de recouvrement et les paramètres de soudage	87
Conclusion :.....	91
Références chapitre IV	92
Conclusion générale	95

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le domaine d'assemblage des pièces mécanique et spécialement l'assemblage des tôles il existe plusieurs méthodes tel que le raffûtage, pliage et le soudage par un rapport de métal. et le soudage par résistance par point (Résistance Spot Wilding) RSW. qui est couramment utilisé dans nombreux domaine industriel : Aéronautique. Automobile. Industries Agroalimentaires, Electroménager. Elle présente plusieurs avantage rapide, économique, moins compliqué .et adapter au soudage des aciers.

Les aciers inoxydables tels que 304 L sont de bons candidats pour les applications d'assemblages métalliques par point vue leur caractéristique intéressant ou sa résistance et sa masse volumique, un cout de fabrication raisonnable. la soudabilité par points des aciers austénitique a été largement étudiée de plusieurs décennie, le comportement mécanique des points soude par point présente à ce jour-là un champ d'investigation

Dans ce cadre notre travail et base sur une recharge expérimentale afin d'évaluer l'influences des paramètres de soudage par résistance par points sur le comportement des assemblages soudés, dont le mode de sollicitation classique utilisé dans l'industrie est la traction cisaillement. Suivie par une analyse statistique (ANOVA) dans le but d'optimiser les paramètres de soudage

Le travail de recherche de cette thèse est structuré en quatre chapitres principaux :

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur le soudage par résistance par point est présentée, et des notions générales relatives au soudage des aciers inoxydable 304L.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'état de l'art et consacrer sur le comportement mécanique des assemblages soudés par résistance par point en acier 304L. des études (expérimentale et statistique) antérieures sur la résistance à la traction, la dureté sont analysées a fin de comprendre l'influence des paramètres de soudage par résistance.

Dans le troisième chapitre, consacré à l'étude expérimental conduite sur l'acier inoxydable 304L, qui commence par la préparation des éprouvettes base sur des dimensionnement bien étudié suivi d'un assemblage par recouvrement avec la variation des paramètres de soudage par résistance par point sous un plan factotiel. des mesure de

la géométrie à été prise et des essais de sollicitation en traction cisaillement en était réalisé dans le but de déterminer la force maximale de cisaillement.

Enfin dans le quatrième chapitre les résultats des expériences sont présentés une discussion sur les effets des paramètres de soudages sélectionnés (Courant de soudage I, Temps de soudage T, Force d'électrode F et la longueur de recouvrement A) et la géométrie du noyau. Une analyse statistique est réalisée pour déterminer les relations entre les paramètres de soudage et leurs interactions sont évaluées.

La thèse se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Etude bibliographique sur le soudage par points

I. SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINTS

I.1. Définition du procédé de soudage par points

Le soudage par points est une technique de soudure qui a été développée au cours du XIXe siècle. Il est généralement attribué à Elihu Thomson (Messler, 2004 ; Chainarong, 2005), qui a déposé un brevet pour cette technique en 1885. Le procédé de soudage par points implique l'utilisation de deux électrodes qui appliquent une pression sur les pièces à souder, tout en envoyant un courant électrique à travers les pièces. La résistance de ces dernières à la chaleur fait fondre le matériau, formant ainsi une soudure. En plus d'Elihu Thomson, d'autres inventeurs ont également contribué au développement de cette technique, notamment Elihu Gibbs et Nikolai Slavyanov. En fait, il y a eu plusieurs brevets pour des techniques similaires déposés à cette époque. Cependant, Thomson est généralement reconnu comme l'inventeur du soudage par points en raison de son travail pionnier dans le domaine et de la popularisation de cette technique. Sa société, la Thomson Electric Welding Company, a joué un rôle clé dans la diffusion de cette technique dans l'industrie. Les points de soudure sont formés en utilisant un mouvement de pression pour souder les pièces ensemble (Figure I.1). Ce processus est souvent utilisé pour le soudage de pièces en acier inoxydable, en aluminium et principalement appliqué dans l'industrie automobile (carrosseries), l'électroménager, aéronautiques (Beker et al., 2014 ; Tanmoy, 2022). Il est reporté à titre d'exemple que le nombre de points de soudure dans une seule voiture atteint approximativement 5000 points de soudure (Hayat, 2011 ; Hamidinejad et al., 2012 ; Florea et al., 2013).

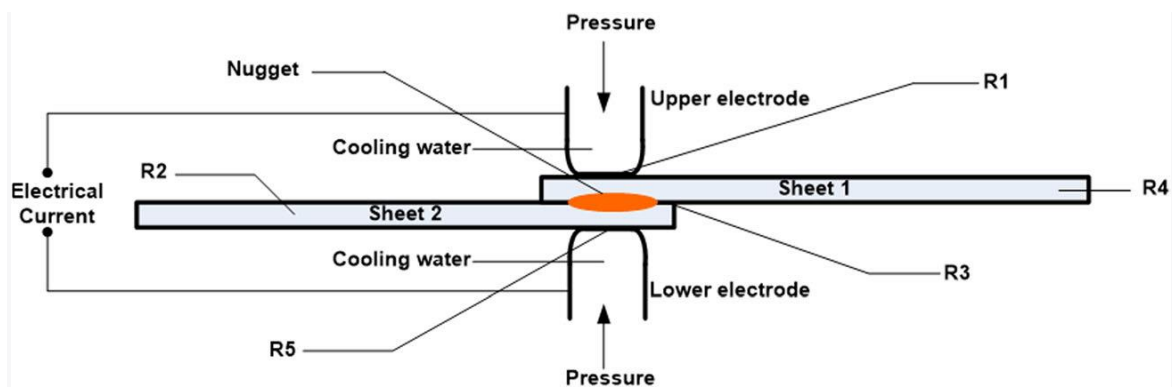


Figure I. 1: Illustration du principe de soudage par points (Manladan et al, 2017)

Le soudage par points, étant un processus de soudage par fusion, implique l'utilisation d'un courant électrique pour fondre localement et joindre deux pièces de métal généralement minces. Voici les étapes typiques du processus de soudage par points :

- **Préparation des pièces:** Les pièces à souder doivent être propres et dépourvues de tout revêtement ou contamination qui pourraient empêcher la formation d'un joint solide. Les bords des pièces doivent être alignés avec précision.
- **Alignement des pièces :** Les pièces à souder sont placées l'une sur l'autre avec une électrode de soudage de chaque côté. Les électrodes sont positionnées de manière à ce que le courant électrique puisse passer à travers les deux pièces.
- **Application du courant électrique :** Un courant électrique est appliqué aux électrodes, ce qui génère de la chaleur et fait fondre la surface des pièces à souder. Le courant est généralement appliqué pendant une fraction de seconde à une seconde
- **Refroidissement :** Une fois que le courant est coupé, les pièces commencent à refroidir et le métal fondu se solidifie pour former un joint soudé. Les électrodes sont ensuite retirées et le processus est répété pour former des soudures supplémentaires si nécessaire.

Le processus de soudage par points se résume aux points suivants dont la figure I.2 montre les étapes de ce processus :

- **Accostage :** Les électrodes viennent appuyer sur les tôles (maintien des tôles).
- **Passage du courant :** On maintient l'effort, pendant cette période le cœur entre les pièces s'échauffe.
- Forgeage Effet de maintien pour laisser le temps à l'assemblage de refroidir.
- Remontée des électrodes.

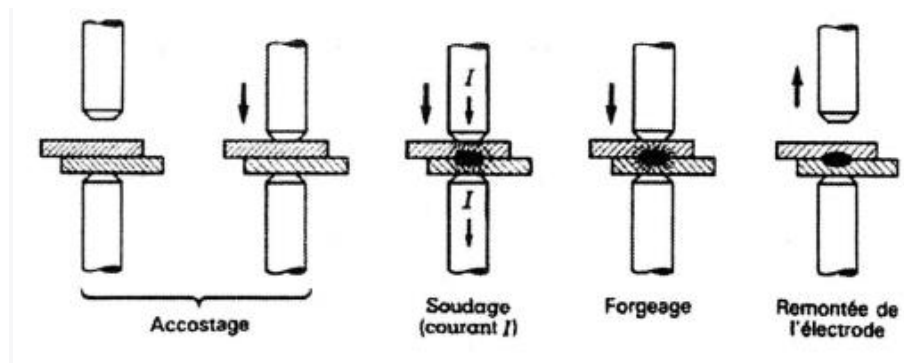


Figure I. 2: Cycle de soudage par points

I.2. Avantages et inconvénients :

Le procédé de soudage par points présente de meilleurs avantages comparativement par rapport ses inconvénients et par rapport à d'autres procédés de soudage :

I.2.1. Avantages :

- **Coût** : le soudage par points est une méthode économique pour assembler des métaux minces car il utilise un minimum de matériau et nécessite moins de temps et d'énergie par rapport à d'autres méthodes de soudage
- **Rapidité** : le soudage par points peut être effectué rapidement car il utilise une impulsion électrique brève pour faire fondre les métaux et les assembler
- **Propreté** : le soudage par points ne génère pas de gaz nocifs, de fumées ou de déchets, ce qui le rend plus propre que d'autres méthodes de soudage
- **Solidité** : le soudage par points peut créer des joints solides et fiables qui résistent aux contraintes mécaniques.

I.2.2. Inconvénients :

- **Limité aux métaux minces** : le soudage par points n'est pas recommandé pour les métaux épais ou les pièces lourdes car il peut être difficile d'atteindre une température suffisamment élevée pour faire fondre le matériau.
- **Limité aux métaux conducteurs** : le soudage par points nécessite des métaux conducteurs, tels que l'acier doux, l'acier inoxydable et l'aluminium, pour fonctionner d'une façon efficace.

- **Peut nécessiter une compétence spécialisée :** bien que le soudage par points soit une méthode relativement simple, il peut nécessiter une certaine compétence et expérience pour produire des joints de haute qualité.

I.3. Paramètres de soudage par points :

Les paramètres de soudage par points peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que le matériau à souder, l'épaisseur du matériau, la forme des pièces à souder, la force de serrage des électrodes, le temps de soudage et le courant de soudage (Xu et al, 2023, Jain et al., 2023 ; Bhuyan et al., 2024 ; Pawar et al., 2023). Ci-dessous quelques paramètres courants pour le soudage par points :

- **Courant de soudage :** le courant de soudage est un paramètre important qui détermine la quantité de chaleur qui est générée pendant le soudage. Le courant peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines d'ampères en fonction des matériaux et de l'épaisseur des pièces à souder.
- **Temps de soudage :** le temps de soudage est le temps pendant lequel le courant de soudage est appliqué aux électrodes pour souder les pièces ensemble. Le temps de soudage peut varier de quelques millisecondes à plusieurs secondes
- **Pression d'électrode :** la pression d'électrode est la force avec laquelle les électrodes sont appliquées aux pièces à souder. La pression peut varier de quelques kilogrammes à plusieurs centaines de kilogrammes.
- **Diamètre des électrodes :** le diamètre des électrodes peut également avoir un impact sur le processus de soudage par points. Des électrodes de différents diamètres peuvent être nécessaires en fonction de la forme et de l'épaisseur des pièces à souder.

Il est important de noter que ces paramètres ne sont pas universels et peuvent varier en fonction des spécifications du projet. Il est recommandé de se référer aux instructions du fabricant ou à un expert en soudage pour déterminer les paramètres optimaux pour un projet spécifique.

I.4. Formation d'un point soudé :

Suite à une opération de soudage par points, un des moyens d'analyser les noyaux formés est de réaliser une analyse métallographique suite à une section transversale. Différentes zones sont observées (figure I.3) :

- **Une zone fondue (ZF)** qui représente la zone où l'acier a dépassé sa température de fusion. La microstructure après refroidissement est de type colonnaire ou basaltique.
- **Une zone affectée thermiquement (ZAT)** qui subit des transformations de phases et/ou de la recristallisation à l'état solide liées au gradient thermique apparaissant entre la ZF et le métal de base.
- **Le métal de base (MB)** qui ne subit pas de transformation structurale compte tenu des faibles niveaux de températures atteints.

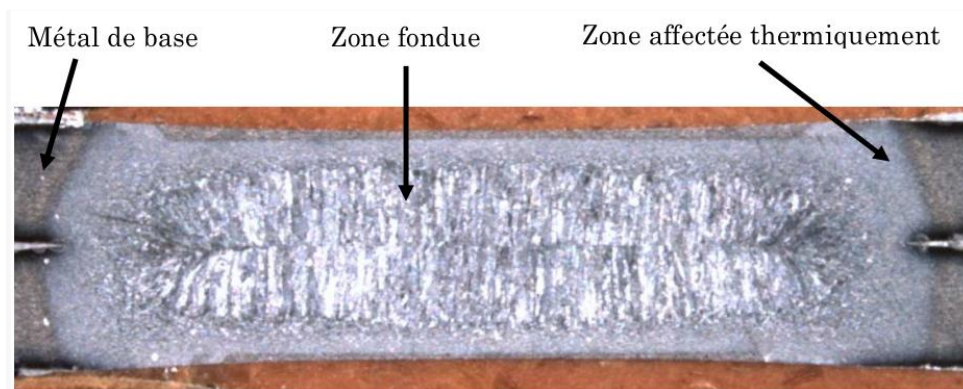


Figure I. 3: Microstructure d'un point soudé sur tôles en acier (Raoelison, 2010 ; Raoelison, et al., 2012).

L'analyse microstructurale d'un point de soudure a permis de distinguer plusieurs zones, montré schématiquement par la figure 4 et détaillés ci-dessous.

- **Zone associé au métal de base MB :** La température atteinte dans cette zone est restée en dessous de 600 °C avec aucune modification structurale visible.
- **Zone sub-critique SCZAT :** Zone où la température maximale atteinte est comprise entre environ 600 °C et Ac1. Aucun effet n'est constaté sur la taille des grains mais quelques modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu selon l'état initial. au chauffage où une partie du carbone peut être remise en solution. Au cours du refroidissement, on peut observer de la précipitation-

coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, des phénomènes de revenu (de la martensite du métal de base en fonction de la vitesse de refroidissement.

- **Zone inter-critique ICZAT** : Zone où la température est entre A_{c1} et A_{c3} avec austénitisation partielle (coexistence de la ferrite alpha et de l'austénite gamma) qui conduit à des modifications significatives de la microstructure.
- **Zone à grain fins CFZAT** : Zone de température entre A_{c3} et 1100 °C environ. D'après le diagramme d'équilibre Fe-C, l'austénitisation est total dans cette zone. Dans le cas du soudage, A_{c3} peut être décalé par la rapidité du cycle thermique .au chauffage. La nouvelle structure austénitique, non homogène et globalement fine, remplace la microstructure initiale. Suite au refroidissement rapide, on observera généralement une structure bainito-martensitique fine.
- **Zone à grande grains GGZAT** : Zone obtenue pour des températures comprises entre 1100 °C environ et la température de fusion. Cela génère la formation d'une forte croissance du grain austénitique qui confère à cette zone une forte trempabilité où la microstructure obtenue après refroidissement rapide est en général martensitique et homogène.
- **Zone fondu ZF** : Outre une fine zone de liaison (difficilement détectée) constituée par la zone semi-solide. La dernière zone est la zone fondue (ZF) où la température a dépassé la température de liquidus. La microstructure observée après refroidissement rapide sera dendritique, grossière au centre du point et plus fine en bordure de noyau.

Il apparait important que les modifications significatives de la microstructure du métal de base autour du point soudé, puissent jouer un rôle primordial dans la détermination de la tenue mécanique du point soudé (Dancette, 2009).

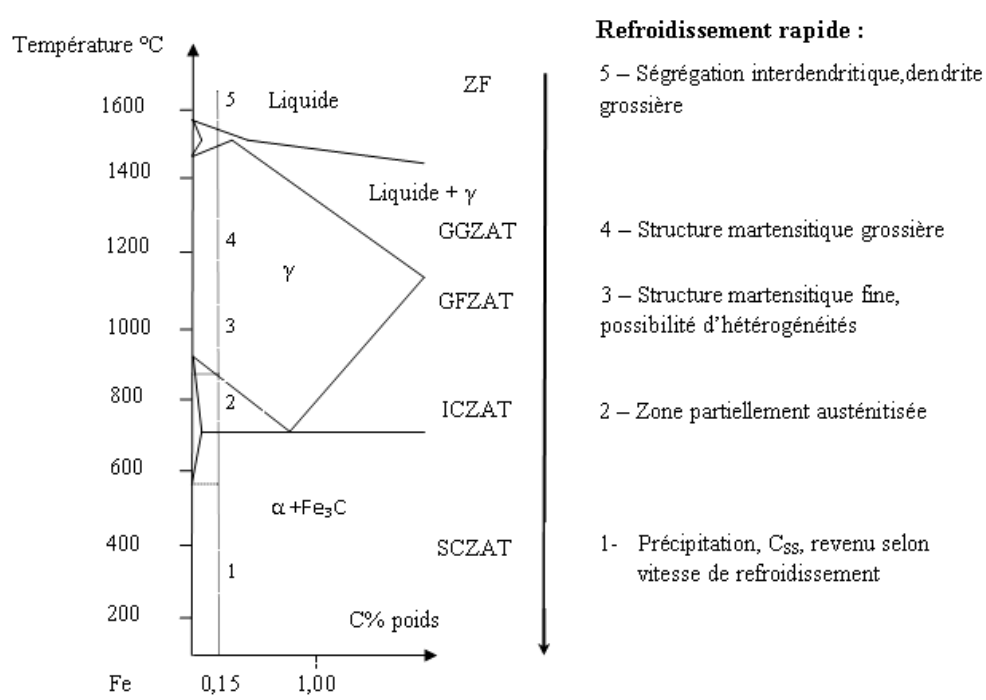


Figure I. 4: Formation de la nouvelle microstructure générée après une opération de soudage

II. Soudabilité des aciers inoxydables :

La soudabilité des aciers inoxydables dépend de plusieurs facteurs, notamment de la composition chimique de l'acier inoxydable, du type de procédé de soudage utilisé et des conditions de soudage. Les aciers inoxydables sont généralement classés en trois grandes catégories en fonction de leur structure cristalline et de leur composition chimique : austénitiques, ferritiques et martensitiques. Voici quelques considérations générales concernant la soudabilité de chaque type :

II.1. Aciers inoxydables austénitiques :

Ils sont les plus couramment utilisés et offrent une bonne soudabilité. Cependant, ils peuvent être sensibles à la solidification et à la fissuration à chaud lorsqu'ils sont soumis à certains procédés de soudage, comme le soudage à l'arc sous flux (FCAW) ou le soudage par points. L'utilisation de techniques appropriées, telles que le contrôle des paramètres de soudage, l'utilisation de gaz de protection adéquats et le préchauffage/le refroidissement contrôlé, peut minimiser ces problèmes.

L'acier inoxydable austénitique est un type d'acier inoxydable qui est caractérisé par sa structure cristalline austénitique à température ambiante. Cette structure

austénitique est non magnétique et offre une excellente résistance à la corrosion, ce qui en fait un matériau très populaire dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Les aciers inoxydables austénitiques contiennent généralement des alliages de chrome, de nickel et parfois de molybdène, qui leur confèrent leurs propriétés anticorrosion. Ces alliages permettent également d'améliorer leur résistance aux températures élevées et aux environnements agressifs.

Parmi les aciers inoxydables austénitiques les plus courants, on trouve les séries 300, telles que le 304 et le 316, largement utilisés dans les équipements de cuisine, les applications médicales, les industries chimiques et pétrolières, ainsi que dans la construction navale et la production alimentaire. En raison de leur excellente résistance à la corrosion et de leur facilité de formage et de soudage, les aciers inoxydables austénitiques sont très polyvalents et sont largement utilisés dans de nombreux domaines de l'ingénierie

II.2. Aciers inoxydables ferritiques :

Ils sont généralement considérés comme plus faciles à souder que les austénitiques en raison de leur faible teneur en carbone et de leur structure cristalline. Cependant, ils peuvent être sensibles à la fissuration à froid. Le préchauffage et le choix des techniques de soudage appropriées sont importants pour éviter ce problème.

II.3. Aciers inoxydables martensitique :

Ils ont tendance à être les plus difficiles à souder en raison de leur forte teneur en carbone et de leur susceptibilité à la fissuration lors du refroidissement. Des techniques spéciales, tel que le préchauffage, le contrôle précis des paramètres de soudage et l'utilisation de métaux d'apport adaptés, sont souvent nécessaires pour obtenir des soudures de qualité.

En général, pour assurer une bonne soudabilité des aciers inoxydables, il est essentiel de sélectionner soigneusement les paramètres de soudage, d'utiliser des techniques appropriées, de choisir des métaux d'apport compatibles et éventuellement de préchauffer les pièces à souder selon les exigences spécifiques de l'acier et du procédé de soudage utilisé.

Le tableau I.1 résume les paramètres de soudage par points pour l'acier inoxydable austénitique 304 qui fera l'objet de notre investigation expérimentale selon les épaisseurs à souder.

Comportement mécanique des aciers inoxydable :

Le comportement mécanique des aciers inoxydables relève sur la réponse du matériau lorsqu'une en applique une contrainte de traction soit se déforme soit se rompe. Lorsqu'elle est faible la déformation est élastique, le matériau retrouve sa forme originale et lorsque la contrainte est élevée le matériau se déforme plastiquement le matériau ne trouve pas sa forme originale. L'acier inoxydable austénitique 304L est connu pour son comportement élasto-plastique avec des caractéristiques mécaniques relativement faibles, mais il a une bonne ductilité Figure I.x B.Van Hecke (2008).

B.Van Hecke : le potentiel de l'acier inoxydable au formage, Article, Euro Inox Première édition 2008.

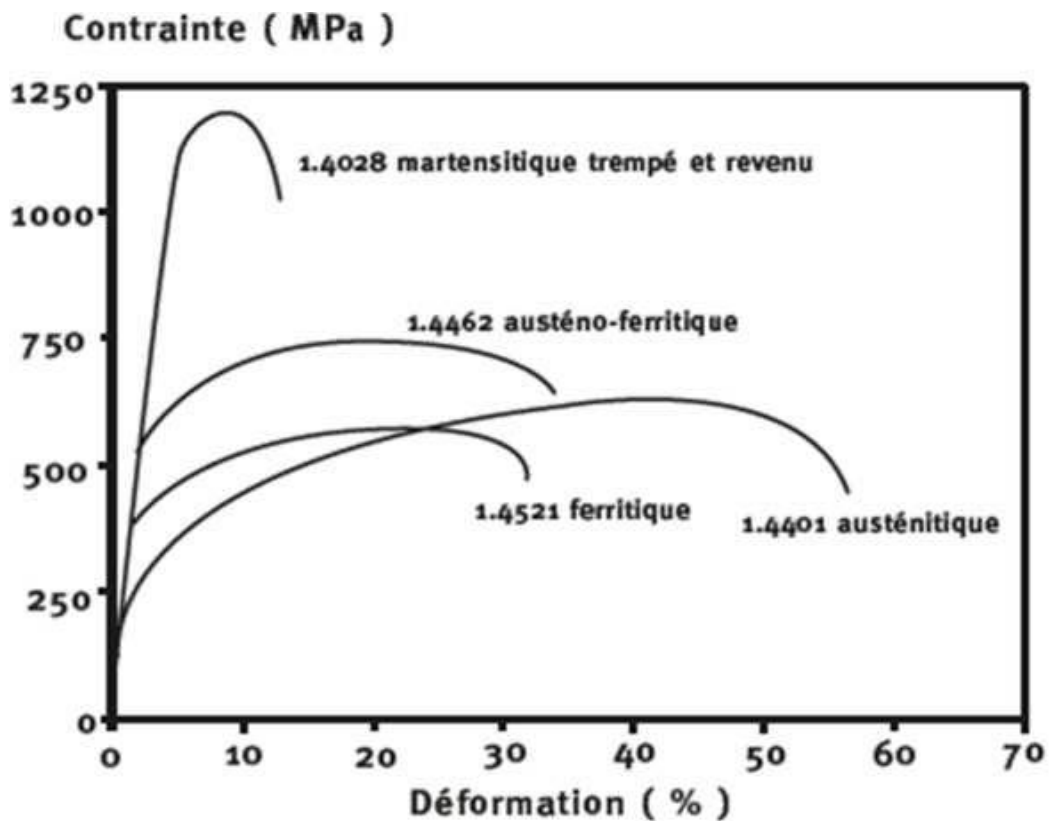


Figure I. 5: Courbes de traction pour différents types d'aciers inoxydables

Tableau I. 1: Paramètres de soudage par résistance par points de l'acier inoxydable 304L (Guide de soudage par points : SOREMEP-Tlemcen)

Epaisseur (mm)	Diamètre face active électrode	Effort (daN)	Temps de soudage	Courant de soudage (kA)	Diamètre du noyau	Temps de forgeage
0.5	3.2 à 4.0	180 à 230	2 à 3	4.0 à 5.0	3.0 à 4.0	8
0.6	4.0 à 4.2	190 à 240	4 à 5	4.5 à 5.2	3.5 à 4.0	10
0.8	4.5 à 4.8	250 à 300	5 à 6	5.5 à 6.0	4.0	10
1.0	5.0	300 à 400	7	6.8 à 7.0	4.8	16
1.2	5.4	450 à 500	8 à 9	8.0	5.0	20
1.5	6 à 6.2	500 à 600	10	9.0 à 10.0	6.0	22
1.8	6.7 à 6.9	850	11	12.0	7.0	24
2.0	7 à 7.2	900	12	14.0	8.0	25
2.4	7.2 à 7.5	1000	13	15	9.0	25
2.5	7.5 à 8	1200	14	16.0	6.0	30
3.0	9.0	1500	16	17.5 à 18.0	7.0	40

III. Effet des paramètres de soudage par points sur le comportement mécanique :

L'acier inoxydable 304L est un acier austénitique largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles en raison de sa résistance à la corrosion, de sa facilité de soudage et de sa polyvalence mécanique. Lorsqu'il est soudé par points, son comportement mécanique peut être influencé par plusieurs facteurs :

III.1. Zones affectées par la chaleur (ZAT) :

Lors du soudage par points, les températures élevées impliquées peuvent entraîner la formation de zones affectées thermiquement par la chaleur autour de la soudure. Ces zones peuvent subir des modifications microstructurales, ce qui peut influencer les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la corrosion et la ductilité.

III.2. Formation de joints soudés :

Dans le processus de soudage par points, les pièces sont jointes en utilisant la fusion locale des matériaux à leurs surfaces de contact. La qualité du joint soudé, y compris son intégrité structurale et sa résistance mécanique, dépend de nombreux paramètres du soudage, tels que la température, le temps de soudage, la pression appliquée de l'électrode et le courant du soudage.

III.3. Effets de la contrainte résiduelle :

Le soudage par points peut induire des contraintes résiduelles dans la zone soudée. Ces contraintes peuvent influencer le comportement mécanique global de la structure, en particulier en ce qui concerne la résistance à la fatigue et la résistance aux contraintes externes.

Les paramètres de soudage affectent principalement la formation et la taille du noyau de soudure d'où le comportement mécanique. Plusieurs recherches ont mis l'accent sur l'influence des paramètres de soudage sur le comportement mécanique. Ce chapitre présente un état de l'art sur les effets des paramètres de soudage sur le comportement mécanique des joints soudés par points et principalement les joints en acier inoxydables austénitiques 304L.

Références chapitre I :

- Florea R, Bammann D, Yeldell A, Solanki K, Hammi Y (2013). "Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy". *Mater Des*, 45, pp. 456-465.
- Hamidinejad SM, Kolahan F, Kokabi AH (2012). "The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing". *Mater Des* 34, pp. 759-767.
- Hayat F (2011). "The effects of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials". *Mater Des* 32(4), pp. 2476-2484
- Manladan, S.M., Yusof, F., Ramesh, S. et al. (2017). "A review on resistance spot welding of aluminum alloys". *Int J Adv Manuf Technol* 90, pp. 605–634.
- MESSLER, Jr. R.W. (2004). "What's Next for Hybrid Welding", *Welding Journal*, 83(3), pp. 30-34.
- N. Becker, J. Gilgert, E. J. Petit, Z. Azari (2014). "The effect of galvanizing on the mechanical resistance and fatigue toughness of a spot welded assembly made of AISI410 martensite," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 596, pp. 145–156.
- Priyansu Bhuyan, Suwendu Soumyaranjan Sahoo, Subham Mahananda, Dilip Kumar Bagal (2024). Optimisation of resistance spot welding parameters using Taguchi's orthogonal array. *Materials Today: Proceedings*, In press.
- R. Raelison (2010). *Etude et modélisation des conditions interfaciales dans le procédé de soudage par résistance par point de tôles revêtues*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud.
- R. Raelison, A. Fuentes, P. Rogeon, P. Carre, T. Loulou, D. Carron, and F. Dechalotte (2012). Contact conditions on nugget development during resistance spot welding of Zn coated steel sheets using rounded tip electrodes. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, pp.1663-1669.
- S. Chainarong (2005). *Modélisation du procédé de soudage par points*. Mécanique [physics.medph], École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.

- Saurabh Pawar, Abhishek Kumar Singh, Ki-Seong Park, Shi-Hoon Choi (2023). Effect of welding current on the microstructural evolution and lap-shear performance of resistance spot-welded 340BH steel, *Materials Characterization*, Vol. 203, 113126.
- Syvain Dancette (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, 2009
- Tanmoy D. (2022). “Resistance spot welding: principles and its applications” in *Engineering Principles*, K. O. Cooke and R. C. Cozza, Eds. London, UK: IntechOpen.
- Vikram Kumar S. Jain, V. Subramanya Sarma, Murugaiyan Amirthalingam (2023). Resistance spot welding behaviour of novel medium manganese (M-Mn) steels - Role of welding parameters on weld microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 101, pp. 1405-1418.
- Zhongwei Xu, Aixia Xiao, Shijing Jiang, Lizhong Mao, Hongsheng Tian, Bengang Yi, Heping Ling (2023). Effect of plate thickness on mechanical properties and failure behaviors of resistance spot welded advanced high strength steels. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 95, pp. 392-404.

CHAPITRE II

Etat de l'art sur le comportement mécanique des joints soudés

I. Paramètres de soudage

I.1. Analyse analytique

L'étude menée par Essoussi et al. (2019) a montré que le mode de défaillance dans les soudures par points de l'acier 304 dépend de la taille du noyau et de la microstructure dans la zone affectée thermiquement. Les joints de soudure du 304 par points offrent une résistance au cisaillement par traction élevée par rapport à l'acier ferritique 1000.

Thakur et Nandedkar (2010) ont appliquée la méthode de Taguchi afin de déterminer les effets des paramètres de soudage (courant de soudage, effort de l'électrode et temps de soudage) sur l'effort de résistance de cisaillement par traction de l'acier inoxydable 304. Une contribution importante est associée au courant de soudage de 31.18% et celui du temps de soudage de 17.77% ainsi que l'interaction du courant à la force de l'électrode de 40%. Les mêmes auteurs (Thakur et Nandedkar, 2014) ont montré statistiquement que le courant de soudage présente une contribution de 53.87% sur l'évaluation de la résistance au cisaillement et 52.05% sur l'évaluation du diamètre du noyau de l'acier galvanisé. Le comportement mécanique et l'aspect de la microstructure des points de soudure par résistance sont examinés sous les effets des paramètres de soudage afin d'assurer une bonne qualité du point de soudure (Pereira et al., 2010). Les résultats obtenus montrent que le diamètre du noyau augmente avec l'augmentation du courant de soudage et le diamètre du noyau se stabilise pour une dimension de 5 mm, pour un courant de 26.4 kA et une force de 3.24 kN. L'influence du courant de soudage sur la charge de rupture illustrée sur la figure II.1 montre une augmentation significative de la charge de rupture avec l'augmentation du courant de soudage et du temps de soudage et une diminution avec l'augmentation de l'effort de l'électrode.

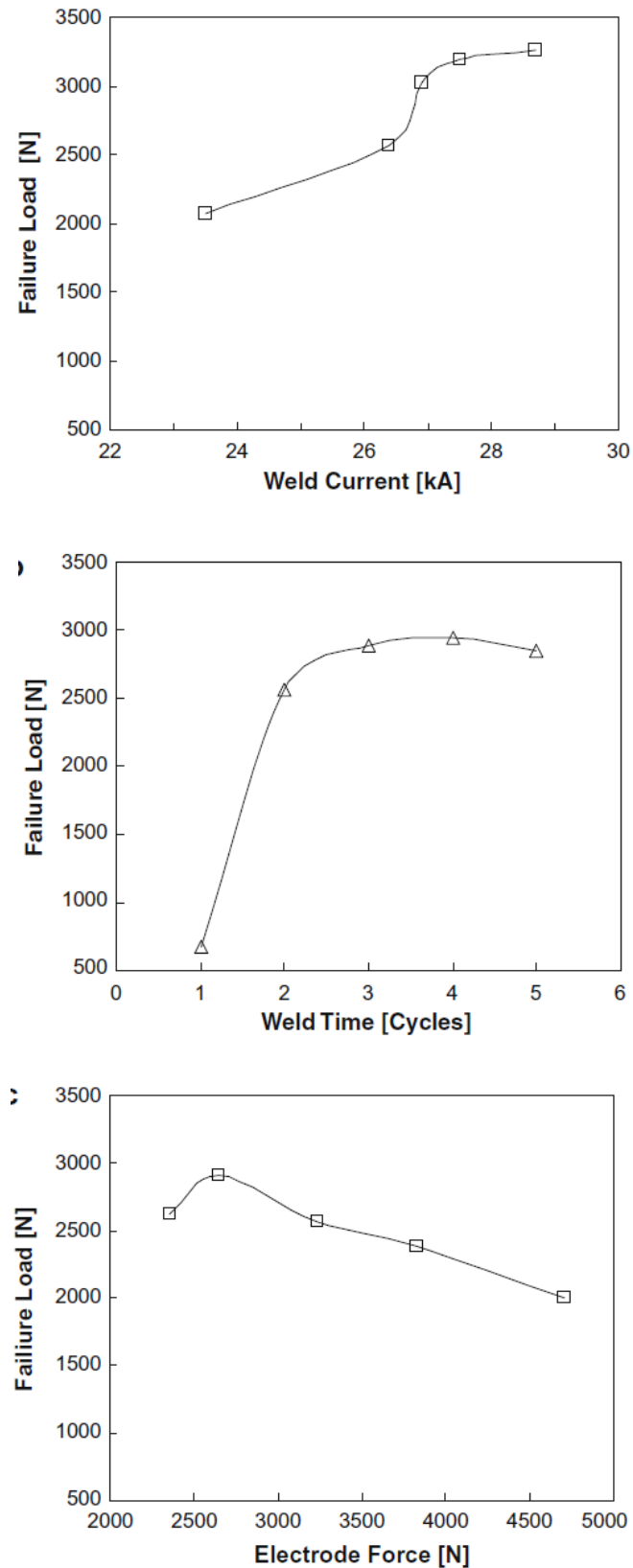


Figure II. 1: Effets des paramètres de soudage sur la charge de rupture (a) courant de soudage, (b) temps de soudage (c) force de l'électrode (Pereira et al., 2010)

L'investigation sur le soudage par points conduite par Muhammad et al. (2012) présente une méthode alternative afin d'optimiser les paramètres de soudage par points pour avoir une bonne qualité du joints de soudure en tenant compte du diamètre du noyau et de la zone affectée thermiquement. Les paramètres optimaux sont étudiés en appliquant la méthode de Taguchi (Chaudhary et Signh, 2022). Les valeurs optimales sont déterminées par la méthode de Taguchi multi-objective. L'influence des paramètres de soudage révèle que le courant de soudage présente le paramètre primordial de 73.91% et le temps de soudage de 16.72%.

L'effet du courant du soudage et du temps du soudage sur la taille de la zone de fusion (noyau) a fait l'objet d'une étude expérimentale et numérique conduite par (Moshayedi et Sattari-Far, 2012). D'une façon générale, l'augmentation du temps et du courant de soudage s'accompagne d'une augmentation de la taille de la zone de fusion avec une pente décroissante (figure II.2 et II.3). Cependant, si l'expulsion se produit, la taille des noyaux diminue en raison des éclaboussures de matière fondue. De plus, le temps de soudage a un effet mineur sur la taille du noyau par rapport au courant de soudage.

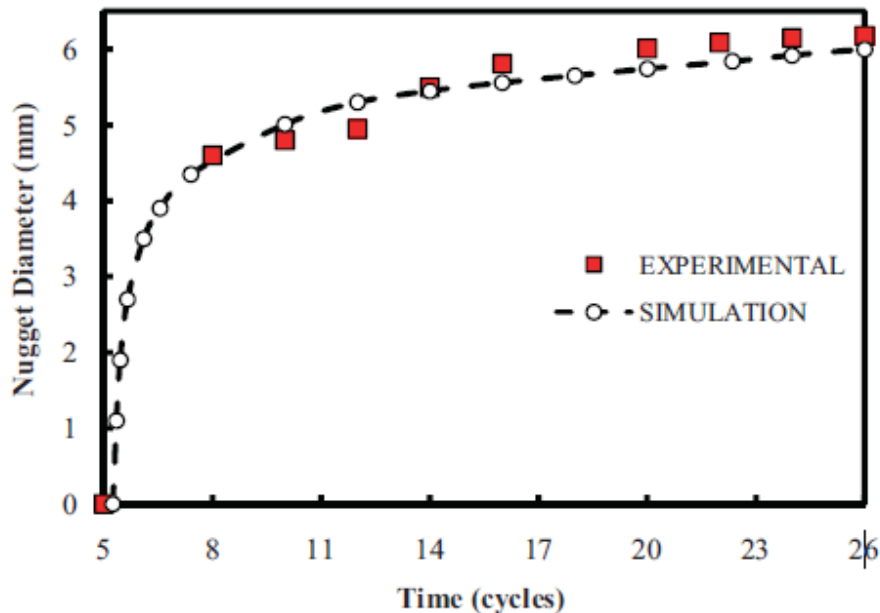


Figure II. 2: Effet du temps de soudage sur la formation de la taille du noyau (Moshayedi et Sattari-Far, 2012)

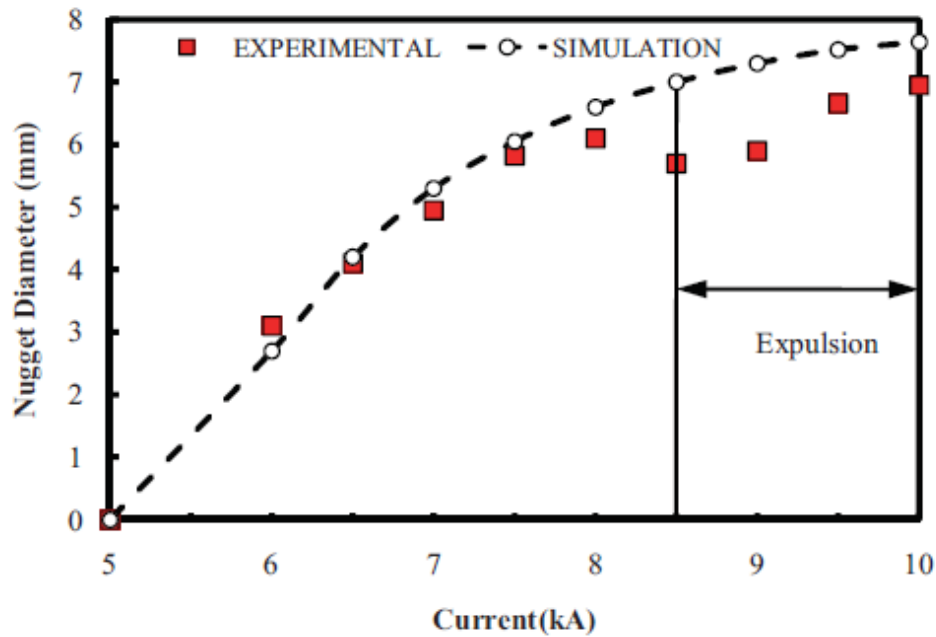


Figure II. 3: Effet du courant de soudage sur la formation de la taille du noyau (Moshayedi et Sattari-Far, 2012)

L'effet du courant et du temps de soudage sur la distribution des contraintes résiduelles radiales sur des éprouvettes soudées par points en acier inoxydable 304 pour différents courants de soudage a été étudié par Moshayedi et Sattari-Far (2014). Avec l'augmentation du courant de soudage, la répartition des contraintes résiduelles a été étendue et le niveau de contrainte résiduelle maximale a augmenté dans la soudure intérieure et extérieure et la zone du noyau de soudure, tandis qu'il diminue légèrement sur les bords du noyau de soudure (figure II.4). L'effet du temps de soudage présente la même tendance que le courant de soudage sur la distribution des contraintes résiduelles radiales.

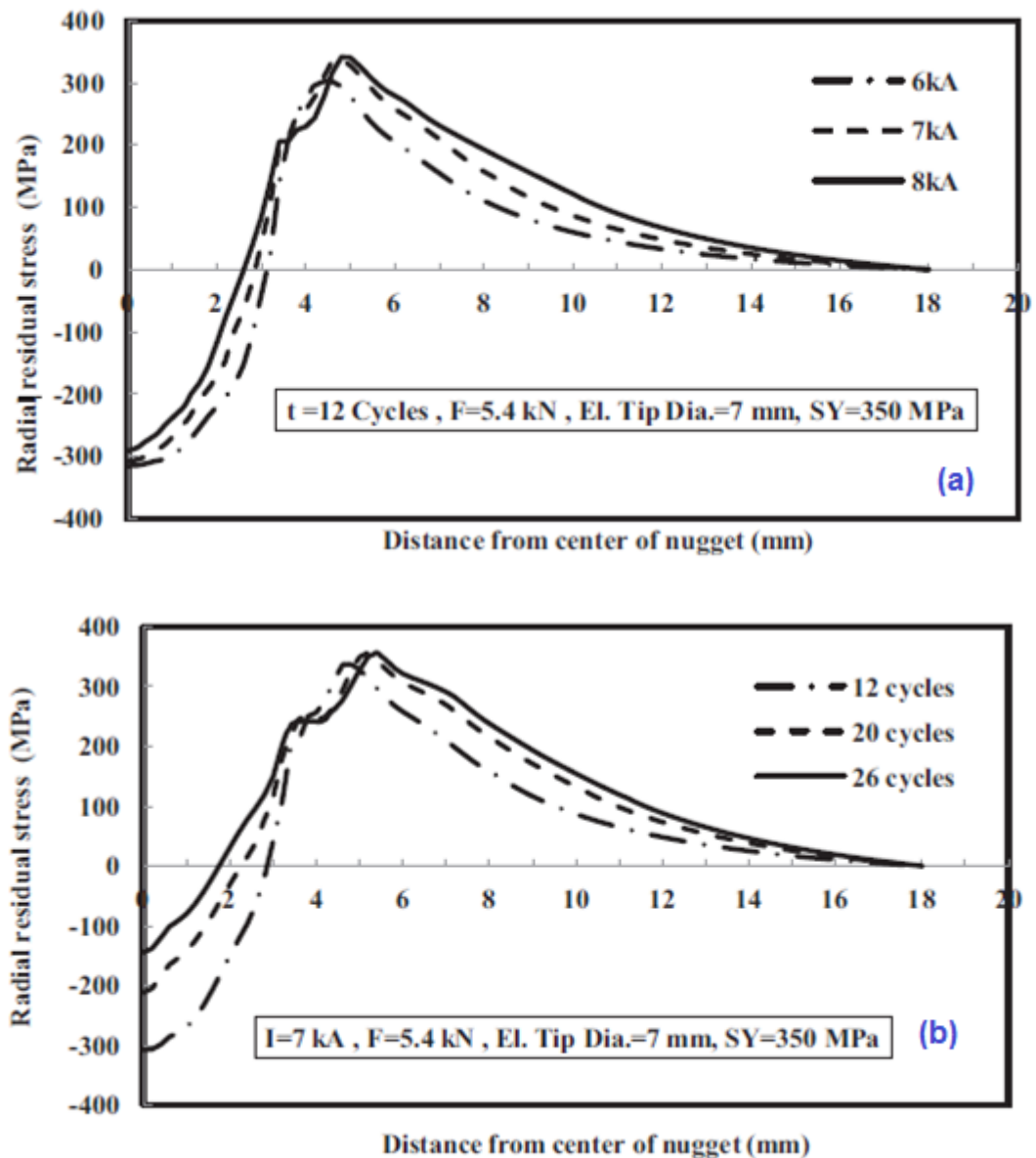


Figure II. 4: Distribution des contraintes résiduelles radiales (a) effet du courant de soudage (b) effet du temps de soudage (Moshayedi et Sattari-Far, 2014)

L'étude conduite par Kianersi et al. (2014) a pour objectif d'optimiser les paramètres de soudage par points de l'acier inoxydable 316L. L'effet du courant de soudage pour un temps de soudage constant a montré une augmentation de la taille du noyau (figure II.5 et de la force de cisaillement par traction (figure II.6) à une valeur optimale à I=8 kA et se réduit pour I=9 kA.

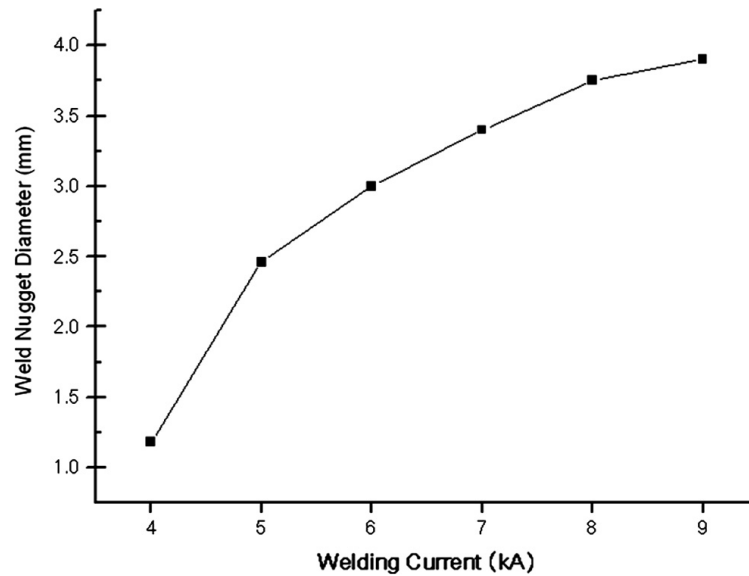


Figure II. 5: Variation de la taille du noyau en fonction du courant de soudage (Kianersi et al., 2014)

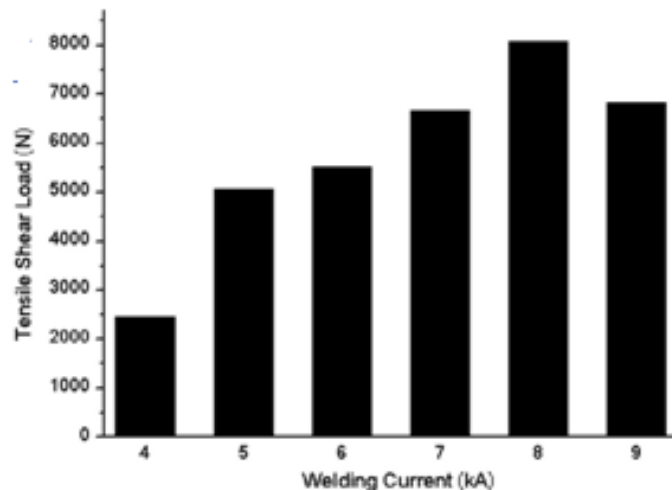


Figure II. 6: Influence du courant de soudage sur la force de cisaillement par traction de l'acier 316 L à $t=4$ cycles (Kianersi et al., 2014)

Les caractéristiques de rupture des points de soudure par résistance en acier inoxydable martensitique AISI420 (acier martensitique) sont étudiées par Pouranvari (2017). Les facteurs contrôlant les propriétés mécaniques des soudures sont déterminées (diamètre du noyau, dureté) et montrent que l'augmentation du courant du soudage augmente la taille du noyau. La variation de la dureté est presque constante dans la zone de fusion accompagnée d'une chute progressive dans la zone affectée thermiquement (figure II.7). Ce résultat confirme les résultats antérieurs obtenus sur le soudage par point de l'acier à faible teneur en carbone (Pouranvari et Marashi, 2010).

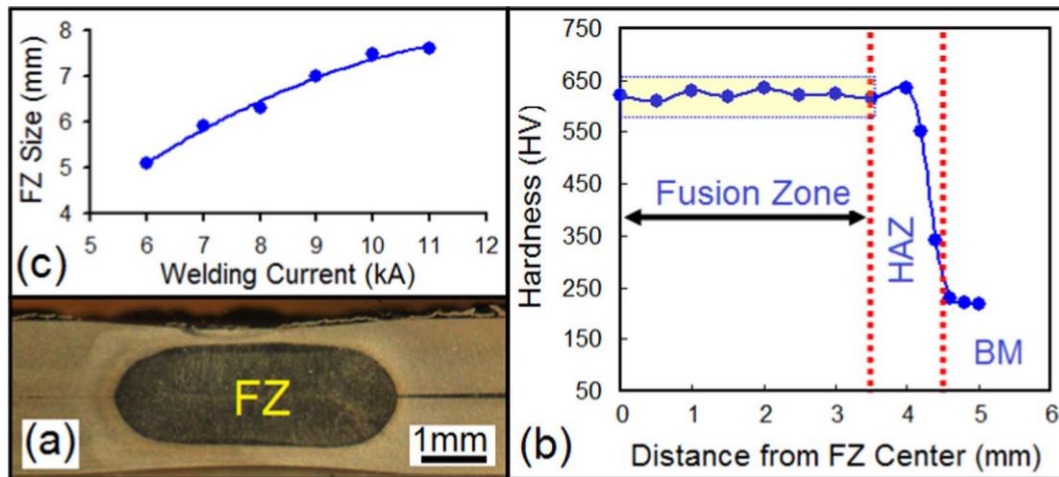


Figure II. 7: Soudure par points en acier inoxydable martensitique : (a) macrostructure (b) profil de dureté, (c) diamètre du noyau (Pouranvari, 2017)

Vshwakarma et al. (2017) ont étudié l'effet des paramètres de soudage par points et optimisation par la méthode de Taguchi afin de contribuer à une meilleure qualité du point de soudure. Les résultats de cette étude indiquent que le courant de soudage est le paramètre le plus important contrôlant la résistance au cisaillement par traction du point de soudure ainsi que le diamètre du noyau. Les résultats indiquent aussi que le courant de soudage contribue de 61 % pour l'effort de cisaillement par traction et 81 % pour le diamètre des noyaux comparativement par rapport aux autres paramètres de soudage par points (temps et force d'électrode).

Selon l'étude conduite par Sivaraj et al (2020), le paramètre le plus influent du procédé de soudage par points de l'acier DP600 est le courant de soudage. À mesure que le courant de soudage augmente, il augmente la profondeur de la zone du noyau et la résistance de cisaillement par traction de la soudure. Le mode de rupture représente une rupture interfaciale et une défaillance par déboutonnage. La relation entre le diamètre du noyau et le courant de soudage ainsi que la dureté le long de la zone de soudage pour l'acier inoxydable austénitique 304 ont été étudiées par Shamsul et Hisyam (2007). Les résultats obtenus ont montré que la taille du noyau de soudure augmente avec l'augmentation du courant de soudage. Pour d'autres recherches sur les assemblages de tôles d'acier inoxydable, il a été conclu que le courant de soudage est le paramètre le plus efficace contrôlant la formation du diamètre des noyaux ainsi que la résistance au cisaillement par des soudures par points (Savaş, 2015).

Sous la variation des paramètres de soudage (courant, temps et force d'électrode), Zhang et al. (2020) ont investigués le comportement mécanique d'assemblages soudés par points de deux types d'aciers inoxydable à savoir le 304 et 430 avec les combinaisons 304/304, 304/430 et 430/430. Les résultats montrent que l'assemblage 304/304 présente une charge maximale supérieure à celui de l'assemblage 304/430 et 430/430 (figure II.8). Les profils de dureté dans la zone de fusion montrent que l'assemblage 304/304 présente une dureté inférieure à celle des assemblages 304/430 et 430/430 (figure II.9)

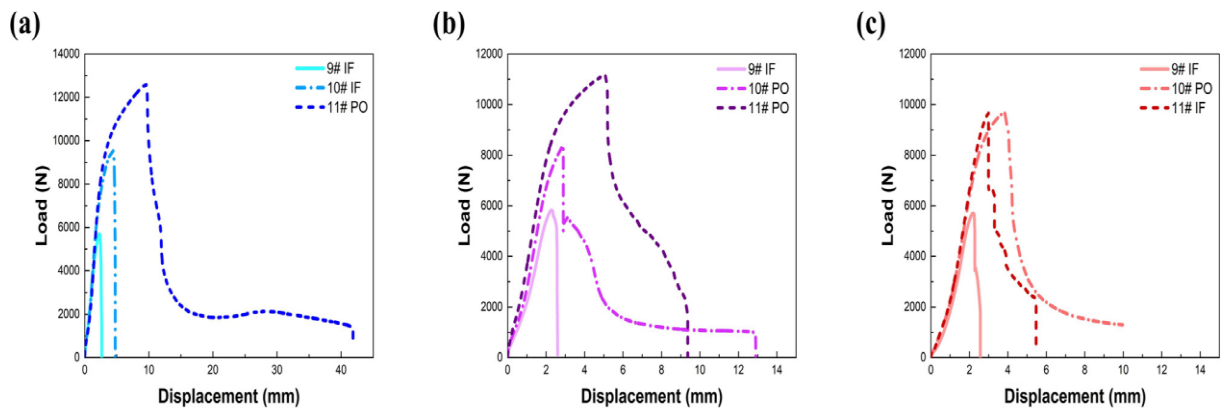


Figure II. 8: Courbes charges/Déplacements des joints (a) joints 304/304; (b) joints 304/430; (c) joints 430/430 (Zhang et al. (2020))

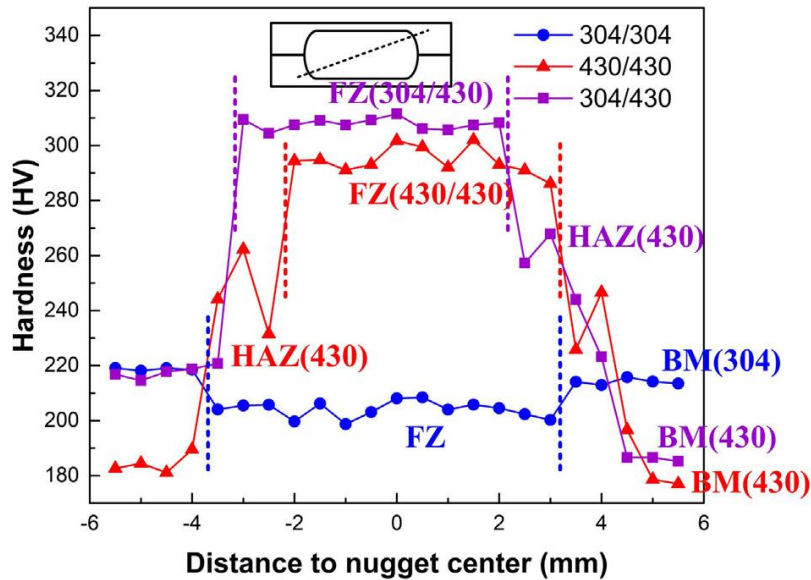


Figure II. 9: Distribution de la dureté Vickers dans les zones des joints de soudure (Zhang et al., 2020)

Généralement, la qualité des joints de soudage par points par résistance (RSW) des aciers inoxydables austénitiques est liée à la résistance en cisaillement par traction et principalement l'acier 304. L'étude menée par Martín et al. (2016) sur le comportement en cisaillement par traction des joints soudés par points en acier inoxydable 304 a permis d'optimiser les paramètres de soudage. Un modèle prédictif utilisant une expansion polynomiale des paramètres de soudage pertinents, à savoir le courant de soudage (I), le temps de soudage (T) et la force d'électrode (F), est proposé (équation 1) pour évaluer la résistance au cisaillement par traction.

$$\begin{aligned} TS = & -1.93914 + 0.34904 \times T - 0.02266 \times T^2 \\ & + 1.95763 \times I - 0.14341 \times I^2 - 0.36273 \times F \\ & + 0.01260 \times T \times C + 0.03211 \times T \times F + 0.01422 \times I \times F \end{aligned} \quad (1)$$

Dans leurs études, Wang et al. (2022) ont montré expérimentalement que la résistance au cisaillement des joints hétérogènes acier inoxydable/acier à faible teneur en carbone augmente puis diminue avec l'augmentation du courant de soudage ou du temps de soudage et diminue avec l'augmentation de la force de l'électrode.

Les paramètres de soudage par points par résistance (RSW) (courant de soudage, temps de soudage et la force d'électrodes) ont été optimisés à l'aide de la méthode de surface de réponse (RSM) pour l'assemblage de tôles minces en acier AHS-DP800 utilisé principalement pour la fabrication de cadres structurels automobiles (Rajarajan, 2022). Les résultats obtenus par l'analyse de variance (ANOVA) ont indiqué que les paramètres de soudage affectent d'une façon significative la résistance des types de joints à savoir joint par recouvrement et joint en section croisée.

I.2. Analyse factorielle

L'analyse factorielle est une technique statistique utilisée pour explorer et comprendre la structure sous-jacente d'un ensemble de données multi variées. Elle vise à réduire la dimensionnalité des données en identifiant des modèles ou des facteurs latents qui expliquent la variation observée dans les variables observées. Cette technique est largement utilisée dans différents domaines tels que l'économie, la biologie, engineering, sciences sociales.... Dans le domaine du soudage par points, l'analyse

factorielle peut être utilisée pour plusieurs objectifs, notamment pour comprendre les relations entre différentes variables liées au processus de soudage. Ci-dessous des applications spécifiques de l'analyse factorielle dans le domaine du soudage par points sont présentées :

- **Optimisation des paramètres de soudage** : L'analyse factorielle peut aider à identifier les combinaisons optimales de paramètres de soudage tels que la puissance de soudage, la durée du pulse, la pression des électrodes, le courant de soudage et le temps de soudage etc., en examinant leur effet sur les résultats de soudage comme la résistance, la qualité de la soudure.
- **Évaluation de la qualité des soudures** : En analysant les données provenant de tests de qualité des soudures, tels que des tests destructifs ou non destructifs, l'analyse factorielle peut permettre d'identifier les principaux facteurs qui influent sur la qualité des soudures et de déterminer les critères les plus pertinents pour évaluer cette qualité.
- **Étude des facteurs de variabilité** : En identifiant les sources de variabilité dans le processus de soudage, l'analyse factorielle peut aider à déterminer les facteurs internes et externes qui influent sur la cohérence et la fiabilité des soudures.
- **Analyse des matériaux** : L'analyse factorielle peut être utilisée aussi pour étudier les propriétés des matériaux utilisés dans le processus de soudage, telles que leur conductivité thermique, leur ductilité, leur résistance à la traction, etc., et leur relation avec les performances de soudage.

Globalement, l'analyse factorielle peut être un outil précieux dans le domaine du soudage par points pour comprendre les relations complexes entre les variables de processus, optimiser les paramètres de soudage, évaluer la qualité des soudures et améliorer la fiabilité et la cohérence du processus de soudage. Ci-dessous on présente quelques travaux de recherches appliquant l'analyse factorielle dans le domaine d'optimisation des paramètres de soudage par points et autres procédés.

Murugan et Gunaraj (2002) ont développé un modèle analytique pour établir une relation entre les paramètres du processus et le volume des cordons de soudure. La géométrie des cordons de soudure peut être prédite par des modèles mathématiques

développés utilisant la technique factorielle fractionnaire comme indiqué par Gupta et Parmar (1986) pour le procédé de soudage arc submergé et Ravindran (1987) pour le soudage avec fil fourré. Les travaux de Kim et al. (2003) se sont concentrés sur le développement de modèles mathématiques pour la sélection des paramètres du processus de soudage GMA et la prédiction de la géométrie des cordons de soudure. Le plan factoriel est utilisé comme moyen pour l'optimisation des paramètres du processus. Les facteurs intégrés dans le modèle factoriel sont le courant d'arc, la tension de soudage et la vitesse de soudage. L'optimisation de paramètres de soudage par points a fait l'objet d'une étude conduite par Medina et al. (2012). Les paramètres qui ont le plus d'influence dans le soudage par résistance sont le courant de soudage et la combinaison du courant et de la matière première. Le modèle statistique utilisé pour le processus d'optimisation est l'analyse de variance (ANOVA) avec analyse factorielle complète.

L'investigation menée par Samal et al. (2020) a été réalisée pour analyser les effets des paramètres d'entrée de soudage tels que le courant de soudage, la vitesse de soudage et l'angle de la torche sur la distorsion angulaire lors du soudage TIG des aciers faiblement alliés à haute résistance (HSLA). Une modèle mathématique a été développée en appliquant la technique statistique de plan factoriel complet où l'analyse de variance ANOVA est utilisée. Il a été conclu le courant de soudage et l'angle de la torche ont des effets positifs sur la distorsion angulaire, tandis que la vitesse de soudage présente un effet négatif. Les effets de divers paramètres de soudage par arc submergé sur la géométrie des cordons d'éprouvettes en acier doux ayant de plaques de 10 mm d'épaisseur ont fait l'objet d'une étude menée par Rathi (2021). La tension, la vitesse du chariot, la vitesse d'alimentation du fil, le diamètre de l'électrode et le flux ont été choisis comme paramètres variables et la hauteur du cordon, la largeur du cordon et la profondeur de pénétration pour chaque éprouvette après l'opération de soudage, représentent les paramètres résultats. Les résultats ont été analysés mathématiquement à l'aide d'un plan factoriel et d'une analyse de variance "ANOVA".

Les effets des paramètres de soudage par le procédé TIG de l'alliage d'aluminium sont étudiés en appliquant l'analyse complète factorielle afin d'optimiser les paramètres de soudage (courant de soudage, vitesse de soudage et le débit) et la résistance du cordon de soudure (Sathishkumar et Das, 2021). Le logiciel statistique Minitab est utilisé pour

identifier la qualité des paramètres de soudage. Les résultats montrent que la combinaison courant de soudage/débit du gaz et la vitesse de soudage sont les paramètres à effets majeurs sur l'optimisation sur la résistance maximale du cordon de soudure.

Les effets des paramètres de soudage par points (courant, temps, effort de l'électrode) sur le comportement mécanique d'assemblages hétérogènes (acier inoxydable 304L/acier galvanisé) ont fait l'objet d'une étude menée par Ternane et al. (2022). Une analyse de régression a été réalisée afin déterminer la signification des paramètres du processus de soudage en utilisant le couplage du plan expérimental factoriel complet avec l'analyse statistique et graphique des résultats. De plus, une analyse de variance a été utilisée pour déterminer les paramètres et les combinaisons optimaux pour atteindre le niveau de résistance le plus élevé. L'importance des paramètres de soudage sur l'optimisation de la résistance de cisaillement par traction sont montrés par le diagramme de Pareto où le courant de soudage est le paramètre le plus influant (figure II.10).

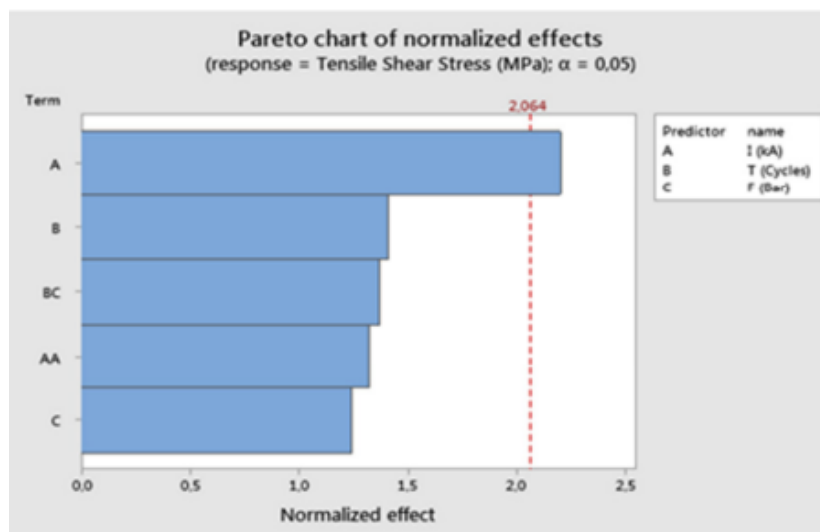


Figure II. 10: Diagramme de Pareto des effets normalisés des paramètres de soudage Ternane et al. (2022).

Conclusion :

L'état de l'art du comportement mécanique des joints soudés par résistance par points a fait l'objet de ce chapitre. Les effets des paramètres de soudage par RSW et leur influence sur l'évolution de la taille du noyau et la résistance maximale de cisaillement par traction ont été éclaircis. Les principales conclusions retirées de cet état de l'art se résume aux points suivants :

- La taille du noyau (zone de fusion) augmente avec l'augmentation du courant du soudage.
- Le courant de soudage est le paramètre le plus influent sur les processus de soudage (RSW, TIG, etc.).
- La résistance au cisaillement par traction est liée à la taille du noyau et aussi à l'interaction des paramètres de soudage.
- L'analyse factorielle complète présente un outil très utilisé et efficace pour optimiser les paramètres de soudage pour tous procédés confondu.
- Analyse par variance ANOVA est un outil efficace pour déterminer les paramètres et les combinaisons optimales afin d'atteindre la résistance optimale.
- Cet état de l'art nous a ouvert le champ pour conduire l'étude expérimentale et abordé ensuite la synthèse des résultats expérimentaux.

Références chapitre II :

- Chakkaravarthi Rajarajan, Paramasivam Sivaraj, Tushar Sonar, Selvaraj Raja, Nallusamy Mathiazhagan (2022). Resistance spot welding of advanced high strength steel for fabrication of thin-walled automotive structural frames. *Forces in Mechanics*, Volume 7, 100084.
- Chaudhary Neeru, Sarbjit Singh,(2022). Multi-objective optimization of friction stir spot welded Al 6061-T6 incorporated with silicon carbide using hybrid Grey Rational Analysis-Taguchi technique, *Materials Today: Proceedings*.
- D. Sathishkumar, A. Daniel Das (2021). Investigations on effect of process parameters on GTAW of aluminium alloy welding using full factorial design technique. *Materials Today: Proceedings*, Volume 37, Part 2, pp. 621-626.
- Danial Kianersi, Amir Mostafaei, Ahmad Ali Amadeh (2014). Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. *Materials & Design*, Volume 61, pp. 251-263.
- Essoussi H., Elmouhri S., Ettaqi S., Essadiqi E., (2019). Microstructure and mechanical performance of resistance spot welding of AISI 304 stainless steel and AISI 1000 series steel. *Procedia Manufacturing*, Volume 32, pp. 872-876.
- Gupta V.K., Parmar R.S., Fractional factorial technique to predict dimensions of the weld bead in automatic submerged arc welding, *J. Inst. Eng. (India)* 70 (1989) 67.
- Kim I.S., Son K.J., Yang Y.S., Yaragada P.K.D.V. (2003). Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Issue 8, pp. 763-769.
- Martín Óscar, Ahedo Virginia, Santos José Ignacio, De Tiedra Pilar, Galán José Manuel (2016). Quality assessment of resistance spot welding joints of AISI 304 stainless steel based on elastic nets. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 676, pp. 173-181.

- Medina, D., Bermejo, R., Hernandez, R. *et al.* (2012). Evaluation of resistance spot welding conditions using experimental design. *MRS Online Proceedings Library* **1481**, pp. 83-88.
- Moshayedi Hessamoddin, Sattari-Far Iradj (2012). Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Issue 2, pp. 347-354.
- Moshayedi Hessamoddin, Sattari-Far Iradj (2014). Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 214, Issue 11, pp. 2545-2552.
- Muhammad, N., Manurung, Y.H.P., Hafidzi, M. *et al.* (2012). Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM. *J Mech Sci Technol* 26, 2365–2370 (2012)
- Murugan N., Gunaraj V., Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes, DOI:10.1016/S0924-0136(99)00296-4, 2002.
- Pereira A.M., Ferreira J.M., Loureiro, A., Costa J.D.M., Bártolo P.J. (2010). Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy, *Materials & Design* (1980-2015), Volume 31, Issue 5, pp. 2454-2463.
- Pouranvari, M. (2017). Fracture toughness of martensitic stainless steel resistance spot welds. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 680, pp. 97-107.
- Pouranvari, M., Marashi, S.P.H. (2010). On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile–shear loading. *Materials & Design*, Volume 31, Issue 8, pp. 3647-3652.
- Rathi A.K. (2021). To study the effect of submerged arc welding parameters on bead geometry and hardness for mild steel (IS-2062A) using fractional factorial design. *Materials Today: Proceedings*, Volume 34, Part 2, pp. 525-530.

- Ravindra J., Pramara R.S. (1987). Mathematical model to predict weld bead geometry for the flux cored welding process. *Metal Construct* 19, pp. 31 R-35R.
- Samal Tejaswini, Laksha, Khanna Pradeep (2020). Factorial approach to estimate angular distortion in TIG welding of high strength low alloy steels. *Materials Today: Proceedings*, Volume 26, Part 2, pp. 1585-1589.
- Savaş, O. (2015). Effect of some welding parameters on nugget size in electrical resistance spot welding. *Steel and Composite Structures*, 18(2), pp. 345-355.
- Shamsul, J.B. & Hisyam, M.M. (2007). Study of spot welding of austenitic stainless steel type 304. School of Materials Engineering, University Malaysia Perlis, *Journal of Applied Sciences Research*, INSI net Publication.
- Sivaraj P., Seeman M., Kanagarajan D., Seetharaman R. (2020). Influence of welding parameter on mechanical properties and microstructural features of resistance spot welded dual phase steel sheets joint. *Materials Today: Proceedings* 22, pp. 558-562.
- Ternane F., Benachour M., Sebaa F., Benachour, N. (2022). Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Dissimilar Steel Sheets. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 12(4), pp. 8896-8900.
- Thakur, A G, Nandedkar, V M (2010). Application of Taguchi method to determine resistance spot welding conditions of austenitic stainless steel AISI 304. *JSIR* Vol.69(09), pp 680-683.
- Thakur, A.G., Nandedkar, V.M. (2014). Optimization of the Resistance Spot Welding Process of Galvanized Steel Sheet Using the Taguchi Method. *Arab J Sci Eng* 39, pp. 1171–1176.
- Vshwakarma, S.K. Shrivastava, A. & Singh, S. (2017). Optimization of resistance spot welding parameters using Taguchi method. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3(3), 506-513.
- Wang Bingxu, Feng Qiu, Lei Chen, Qunchao Zhou, Baixin Dong, Hongyu Yang, Jing Yang, Zude Feng, Na Tyrer, Gary C. Barber, Ming Hu (2022). Microstructure and shearing strength of stainless steel/low carbon steel joints produced by

resistance spot welding. Journal of Materials Research and Technology, Volume 20, pp. 2668-2679.

Yu Zhang, Jing Guo, Yang Li, Zhen Luo, Xu Zhang (2020). A comparative study between the mechanical and microstructural properties of resistance spot welding joints among ferritic AISI 430 and austenitic AISI 304 stainless steel. Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 1, pp. 574-583.

CHAPITRE III
Procédures Expérimentales

I. Introduction :

Le présent chapitre a pour but de présenter l'étude expérimentale conduite afin de réaliser des joints de soudure par points sous la variation des paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage et effort des électrodes) et la surface de recouvrement, et conduire des tests de caractérisation mécaniques en cisaillement par traction.

II. Matériau

II.1. Composition chimique de l'acier 304L

Le matériau utilisé est l'acier inoxydable 304L. Cet acier est classé dans la catégorie des aciers inoxydables austénitiques. L'acier inoxydable austénitique 304L connu avec les trois dénominations mondiales indiquées dans le tableau 1 est un matériau polyvalent, facile à souder et adapté à de nombreuses applications industrielles et commerciales où la résistance à la corrosion et la durabilité sont des exigences importantes. La lettre "L" dans 304L signifie "Low Carbon" (faible teneur en carbone).

Tableau III. 1: Désignation normalisée de l'acier inoxydable 304L

EN 10027 (Européenne)	AFNOR NF A 35573 (France)	AISI (Etats-Unis)
X2 CrNi 19.11	Z3CN18-10	304L

L'acier inoxydable 304L appartenant à la famille des aciers austénitiques. Sa composition chimique est donnée au Tableau 2. Ci-dessous quelques spécifications et des caractéristiques de l'acier 304 L.

- Résistance à la corrosion : l'acier inoxydable 304L est résistant à la corrosion atmosphérique, à la corrosion inter-granulaire après soudage, même à de nombreux produits chimiques ainsi qu'à des solutions corrosives.
- Facilité de soudage : il est facile à souder et peut être soudé à tous les types de méthodes de soudage sans nécessité de traitement thermique après soudage pour maintenir ses anticorrosion.
- Polyvalence : il est utilisé dans une large gamme d'applications, notamment dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique, chimique, pétrolière et gazière, ainsi que

dans la construction naval et la fabrication de matériel médical.la visserie et pièces de rechange....

- Facilité de formage et de fabrication : il peut être facilement formé à froid ou à chaud, ce qui le rend idéal pour une variété de processus de fabrication (pliage, estampage, emboutissage...).

Tableau III. 2: Composition chimique de l'acier inoxydable 304L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Autre
0,03	1,0	2,0	0,045	0,0152	17,5-19,5	8-10	N < 0,11

I.2. Caractérisation mécanique

Des essais de traction ont été conduits afin de déterminer les propriétés mécaniques de l'acier 304L sur la machine de traction "ControLab 600 KN" (Figure III.1). Les essais de traction sont effectués sur des éprouvettes plates d'épaisseur "e=2 mm" (Figure III.2). Les dimensions de ces éprouvettes sont résumées au Tableau III.3. La courbe contrainte/déformation obtenue est donnée par la figure III.3.

Tableau III. 3: Dimensions des éprouvettes de traction

Désignation	Valeurs (mm)
L	180
LC	108
H	30
W	30
w'	16
R	6
e	2



Figure III. 1: Machine de traction Controlab 600 KN

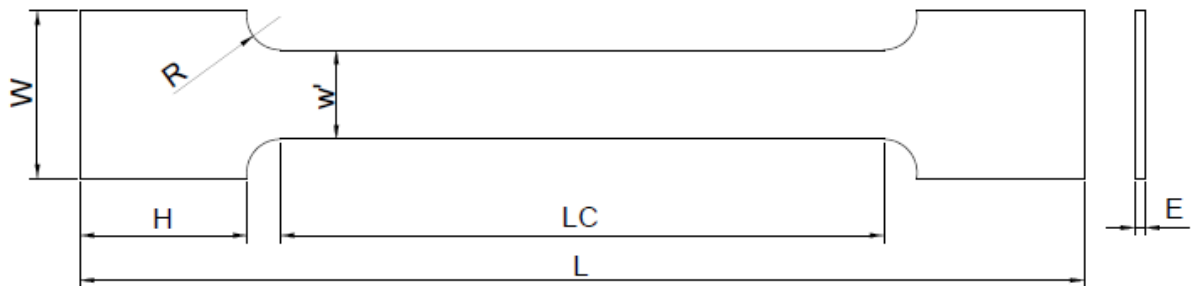


Figure III. 2: Eprouvettes d'essais de traction

La courbe donnée par la figure III.3 représente la courbe contrainte/déformation obtenue par l'essai de traction de l'acier 304L. Les caractéristiques mécaniques déduites des courbes contraintes/déformations sont données au Tableau III.2 et comparées à celles fournies par le fournisseur.

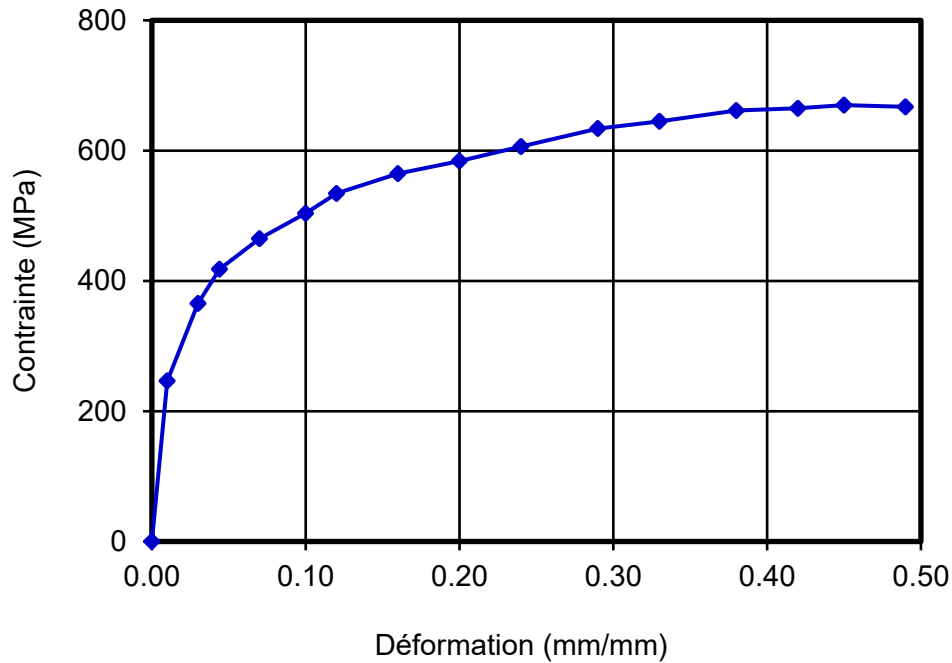


Figure III. 3: Courbe contrainte/déformation de l'acier 304L

Tableau III. 4: Propriétés mécaniques de l'acier 304L

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

La procédure de soudage des éprouvettes est réalisée sur la machine TECNA ART¹. Les éprouvettes à souder ont été découpées sur une tôle de dimension 1000×2000 (mm*mm) et d'épaisseur 2 mm. Les éprouvettes découpées sont soudées avec des électrodes neuves de 7 mm de diamètre de la face active. Les efforts des électrodes (efforts de soudage) sélectionnées varient de 6 à 8 bars. Le temps de soudage varie de 11 à 13 cycles et le courant de soudage varie de 10-16 kA. De plus des paramètres du procédé de soudage déjà sélectionnées, un paramètre géométrique est introduit définissant la longueur de recouvrement (Tableau III.5).

Afin de réaliser les éprouvettes soudés un plan factoriel a été établi montrant la combinaison des paramètres de soudage sélectionnés au Tableau III.6.

¹ Société SOREMPEP - Tlemcen

Selon les combinaisons faites au Tableau III.5, des essais de cisaillement par traction ont été réalisés. La figure III.4 montre en détail l'éprouvette soudée par points y compris les dimensions finaux de l'assemblage. Un exemple de pièces soudées par points est donné par la figure III.5. Le tableau III.7 détaille les étapes conduites pour la réalisation des assemblages soudés jusqu'aux essais de rupture.

Les essais de cisaillement par traction sont couramment utilisés pour caractériser le comportement d'un assemblage soudé par résistance par point. Cet essai permet de donner la courbe charge/déplacement et l'effort de nécessaire pour rompre l'assemblage soudé. L'effort de rupture est communément appelé effort de cisaillement par traction (Tensile Shear Strength)

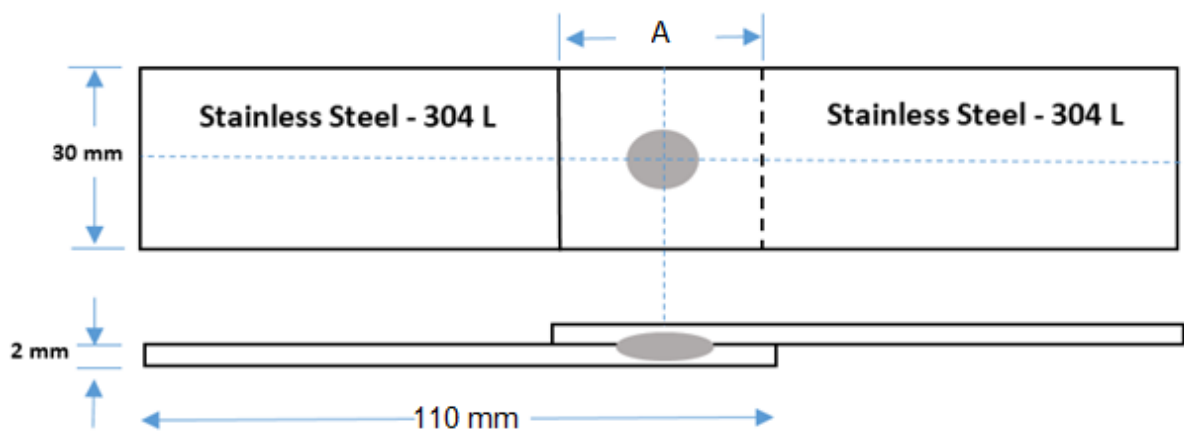


Figure III. 4: Dimension des assemblages réalisés par soudage par point

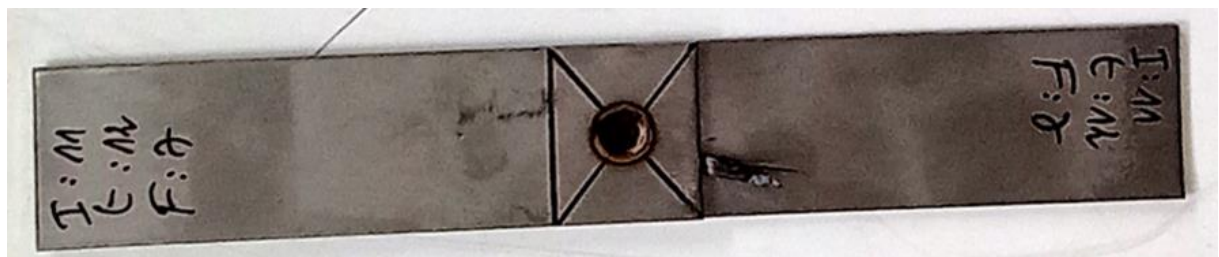


Figure III. 5: Exemples de réalisation d'assemblages par soudage par points

Tableau III. 5: Paramètres de soudage sélectionnés

Paramètres de soudage	Nombre de variables	Valeurs
I (kA)	7	10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16
T (cycles)	3	1 ; 12 ; 13
F (bar)	3	6 ; 7 ; 8
A (mm)	3	20 ; 25 ; 30


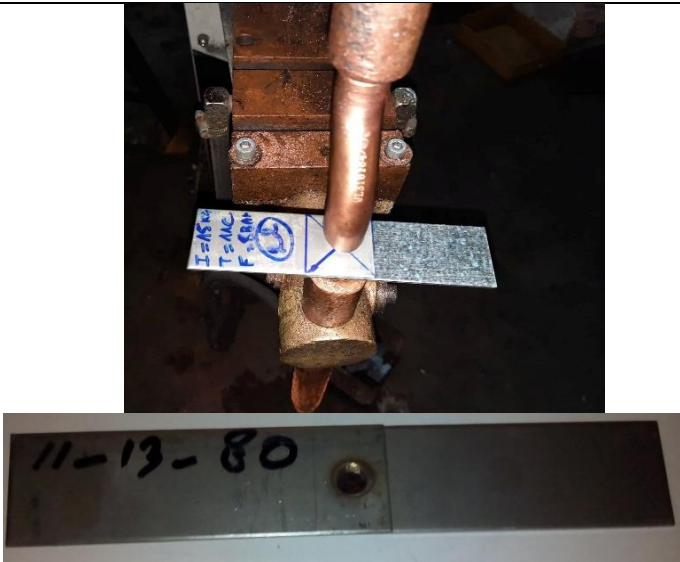

Tableau III. 6: Plan factoriel des assemblages réalisés par soudage par points

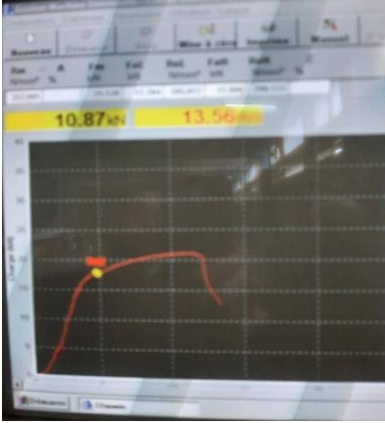
N°	Epaisseur (mm)	Recouvrement (mm)	Electrode (mm)	I (kA)	T (Cycles)	F (Bar)
1	2	20, 25, 30	7	10	11	6
2				11		
3				12		
4				13		
5				14		
6				15		
7				16		
8	2	20, 25, 30	7	10	12	6
9				11		
10				12		
11				13		
12				14		
13				15		
14				16		
15	2	20, 25, 30	7	10	13	6
16				11		
17				12		
18				13		
19				14		
20				15		
21				16		
22	2	20, 25, 30	7	10	11	7
23				11		
24				12		
25				13		
23				14		
26				15		
27				16		
28	2	20, 25, 30	7	10		7

29				11		
30				12		
31				13	12	
32				14		
33				15		
34				16		
35				10		
36				11		
37				12		
38	2	20, 25, 30	7	13	13	7
39				14		
40				15		
41				16		
42				10		
43				11		
45				12		
46	2	20, 25, 30	7	13	11	8
47				14		
48				15		
49				16		
50				10		
51				11		
52				12		
53	2	20, 25, 30	7	13	12	8
54				14		
55				15		
56				16		
57				10		
58				11		
59	2	20, 25, 30	7	12	13	8
60				13		
61				14		

61			15	
63			16	

Tableau III. 7: Etapes de l'étude expérimentale (Soudage et rupture des joints soudés)

<p>La forme des éprouvettes avant l'opération de soudure des deux matériaux.</p>	
<p>Opération de soudage par RSW</p>	
<p>Essai de cisaillement par traction</p>	

Résultats des essais de cisaillement par traction (Courbes charge/déplacement)			
--	--	--	--

III. Conclusion :

Ce chapitre a détaillé la procédure expérimentale pour étudier la rupture par cisaillement en traction des joints soudés par points de l'acier inoxydable 304L. Une analyse factorielle a été choisie pour accomplir cette étude. Les paramètres de soudage important ont été sélectionnés (courant de soudage, temps de soudage, effort des électrodes, longueur de recouvrement). Un ensemble de 189 éprouvettes a été soudé. Les courbes charges/déplacements obtenues permettent de tirer les résultats suivants selon la fiche résultats fournie :

- Charge maximale R_m (N/mm^2).
- Limite d'élasticité, R_{el} qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité.
- Résistance à la traction R_m , qui caractérise la limite à la rupture.
- Limite élastique R_p (N/mm^2)
- Force maximale F_{max} (kN)
- L'allongement à la rupture $A\%$.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussion

I. Introduction

Le chapitre IV a permis de donner un aperçu sur l'étude expérimentale du comportement mécanique des points soudés par RSW de l'acier 304L. Ce chapitre est consacré à la synthèse et discussion des résultats expérimentaux dans une première partie sous l'influence des paramètres de soudage déjà sélectionnés. La deuxième partie des résultats a fait l'objet d'une étude d'optimisation des paramètres de soudage ainsi que la longueur de recouvrement des plaques soudées.

II. Effet des paramètres de soudage sur la profondeur et le diamètre d'indentation du point de soudure

II.1. Effets des paramètres de soudage sur le diamètre d'indentation

Suite à la réalisation de soudage par résistance par points des assemblages par recouvrement des plaques en acier 304L sous la variations des paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage et effort de l'électrode) et la longueur de recouvrement "A" (A=20, 25 et 30 mm), des mesures ont été effectuées sur la géométrie du point de soudure afin de déterminer le diamètre d'indentation (diamètre externe) et la profondeur d'indentation "p". L'effet combiné du courant de soudage et le temps du soudage pour un effort fixe donné et d'une longueur de recouvrement donnée. Les figures IV.1 à IV.9 montrent l'évolution du diamètre d'indentation en fonction du courant de soudage. L'analyse des résultats montre que l'augmentation du courant permet d'augmenter le diamètre d'indentation quelques soit la variation du temps de soudage ou la longueur de recouvrement. L'analyse des résultats pour une longueur de recouvrement A= 20 mm montre que pour les points spécifiques I=10 kA et I=16 kA, la différence minimale et maximale en diamètre pour différents temps de soudage et efforts d'électrodes varient respectivement 0.25 à 0.80 mm. A A=25 mm, la différence est respectivement de 0.20 à 0.80. Alors que pour A=30 mm, la différence en diamètre d'indentation est respectivement de 0.15 à 0.70 mm. L'effet du courant pour des valeurs moyennes du diamètre sous l'effet de l'effort de l'électrode et du temps de soudage est montré par la figure IV.10. La variation du diamètre d'indentation en fonction du courant de soudage est corrélée par une fonction linéaire inscrite sur le graphe. Cette variation montre que pour A=20 mm et A=30 mm, aucune différence n'existe sur la variation du diamètre avec la variation du courant de soudage. Par contre pour une

longueur de recouvrement $A=25$ mm, une faible différence existe pour les faibles valeurs de I (10 kA et 11 kA). Cette différence est de l'ordre de 0.27 mm. Les courbes de tendances sont montrées sur le graphe de la figure IV.10.

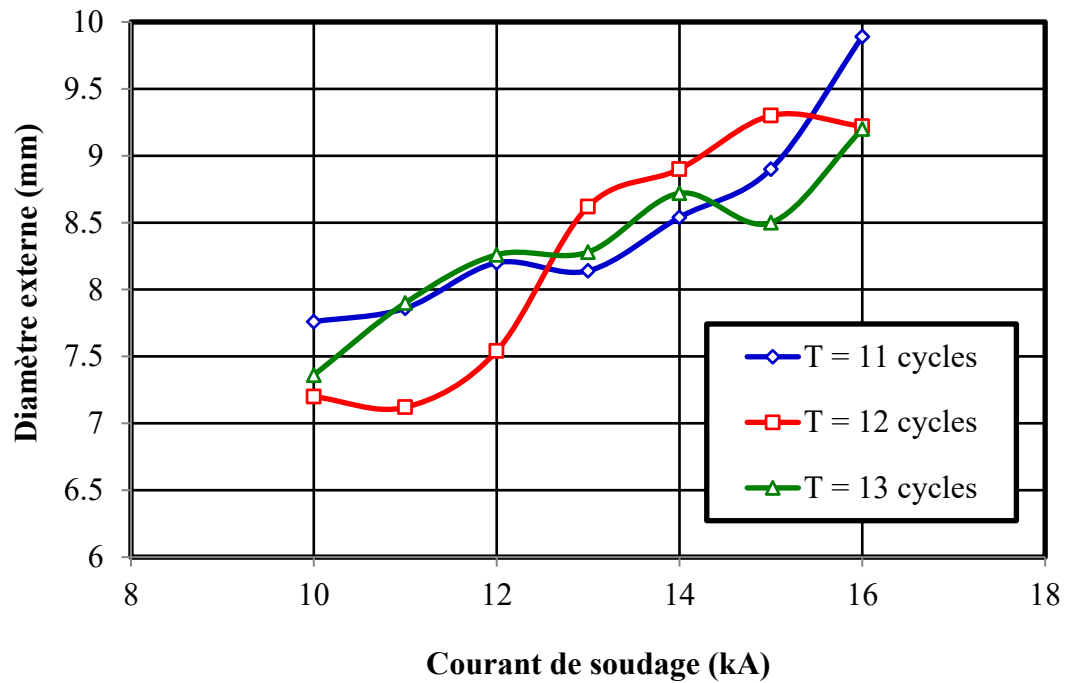


Figure IV. 1: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour $A=20$ mm et $F=6$ bar

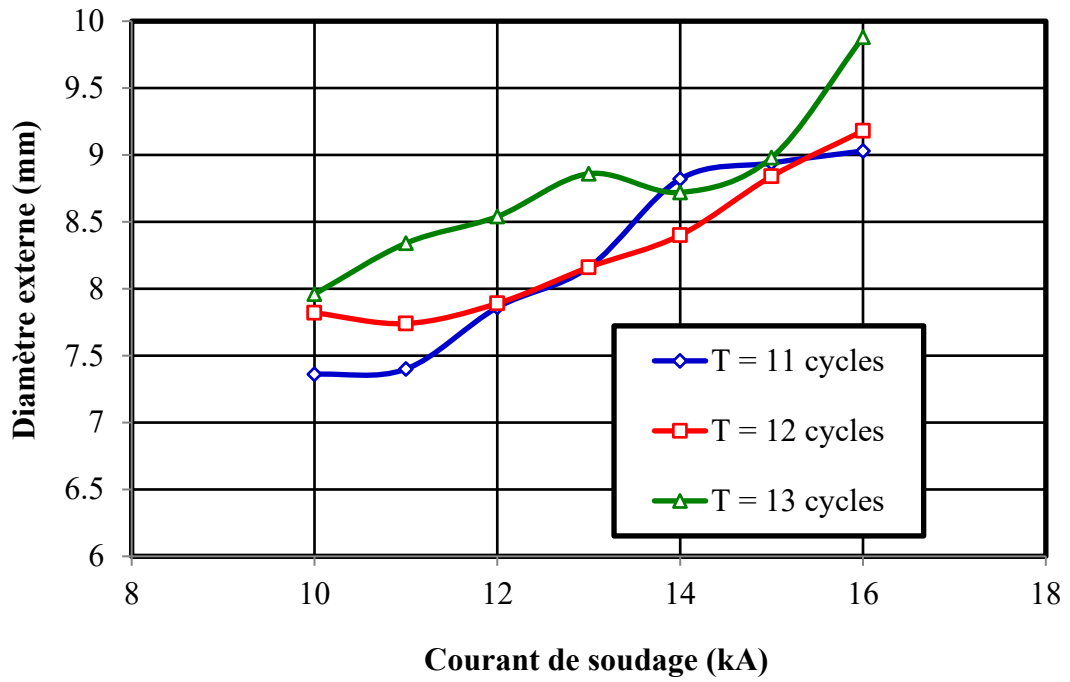


Figure IV. 2: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=20 mm et F=7 bar

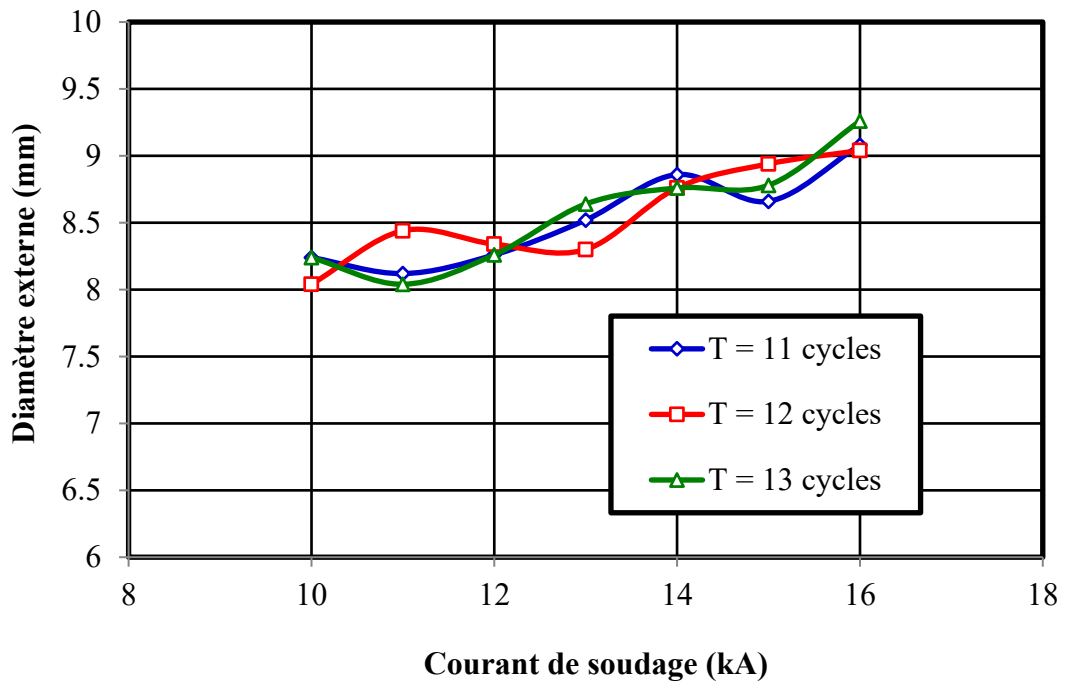


Figure IV. 3: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=20 mm et F=8 bar

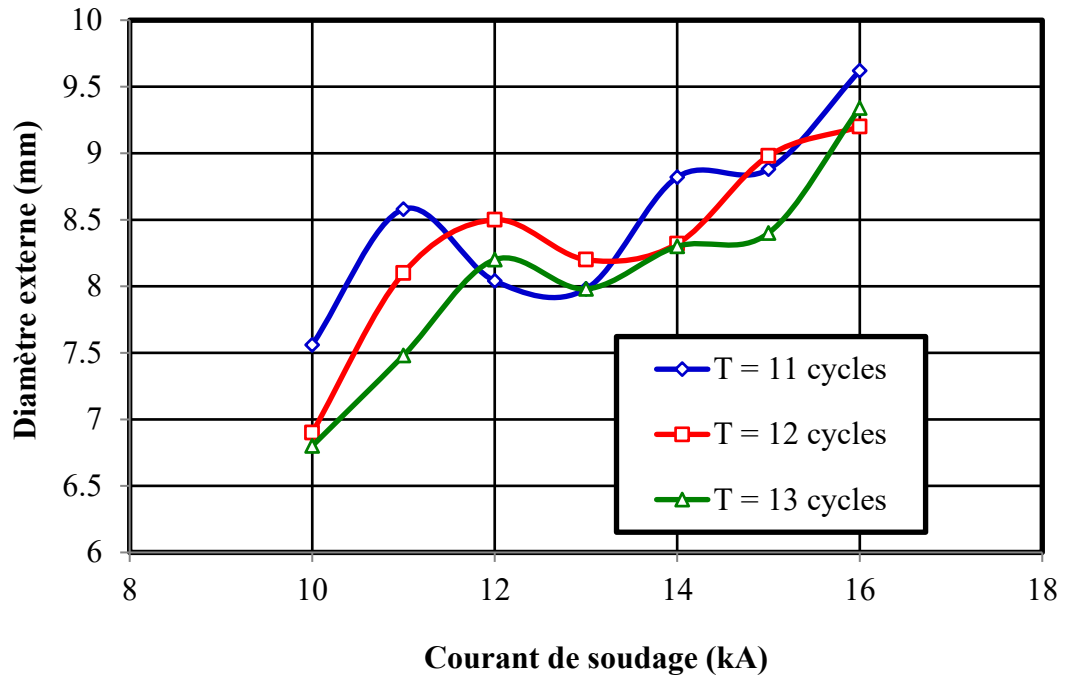


Figure IV. 4: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=6 bar

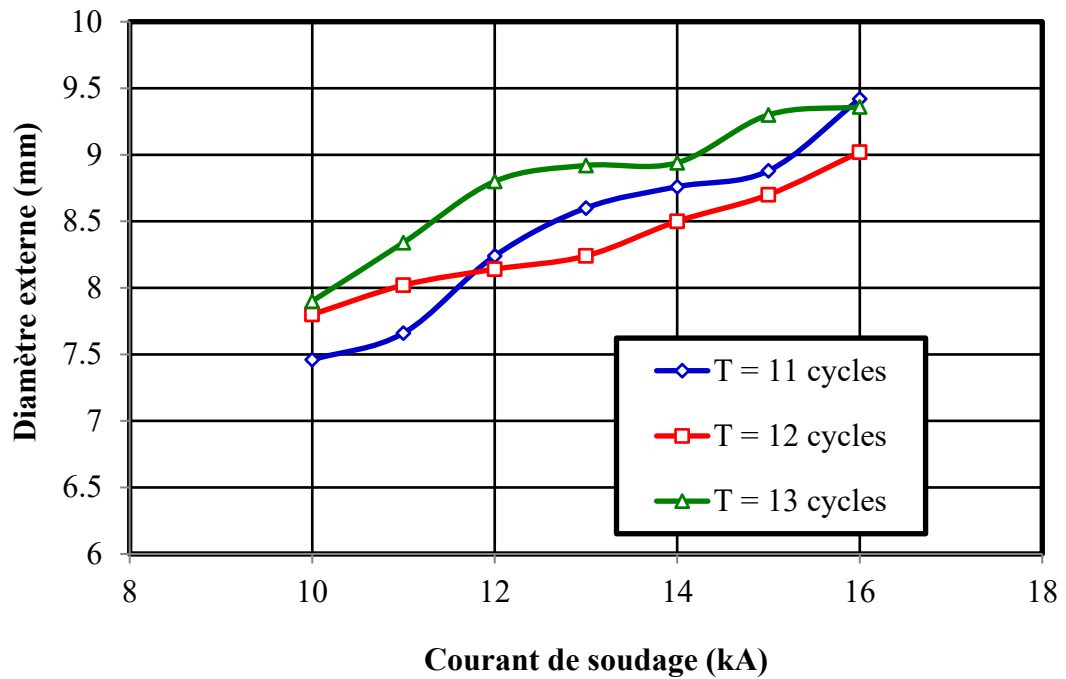


Figure IV. 5: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=7 bar

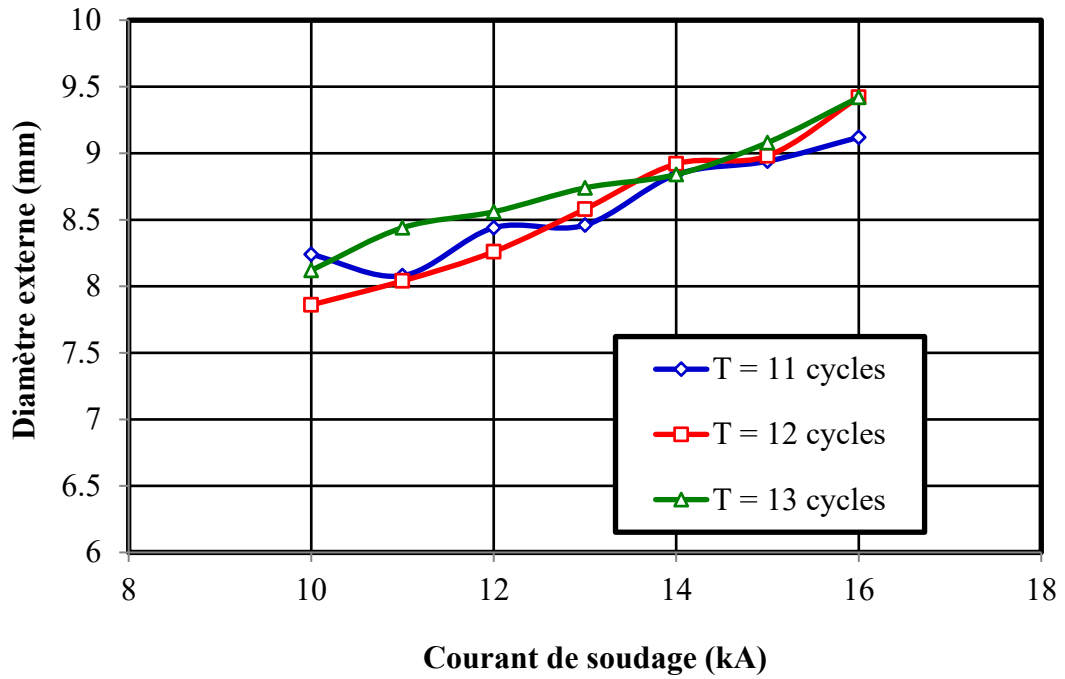


Figure IV. 6: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=25 mm et F=8 bar

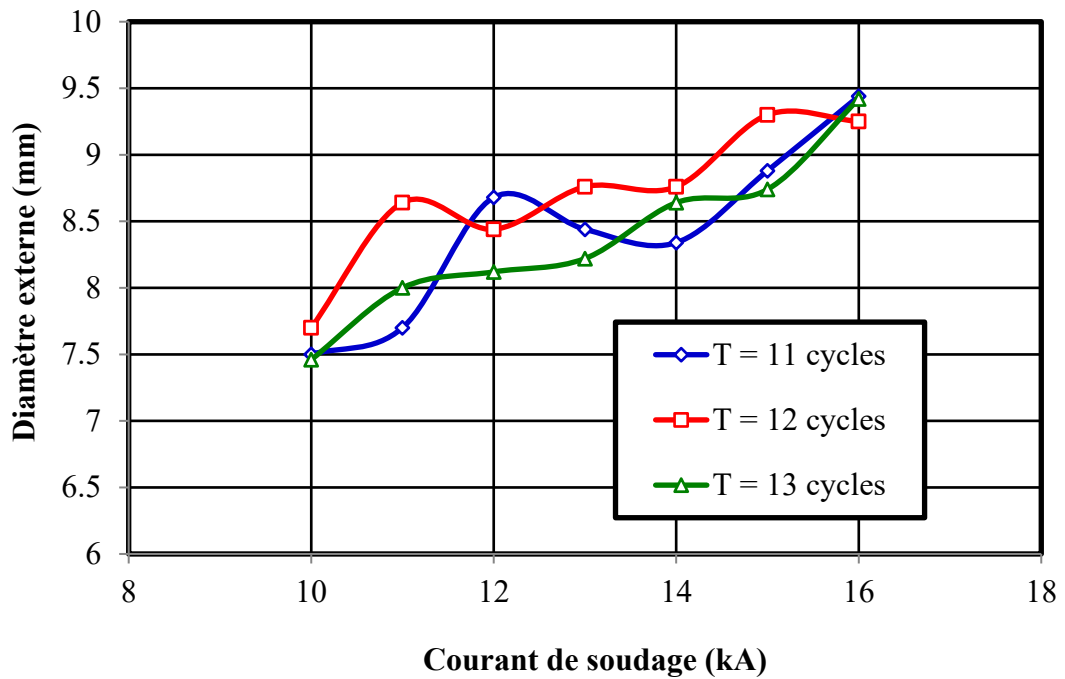


Figure IV. 7: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=6 bar

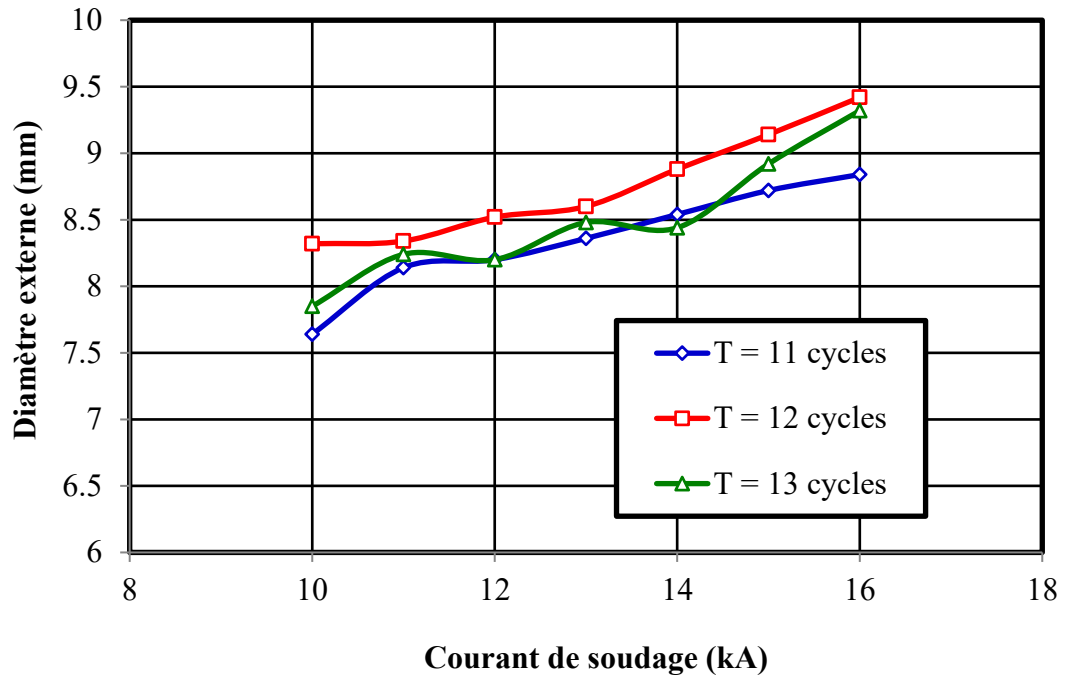


Figure IV. 8: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=7 bar

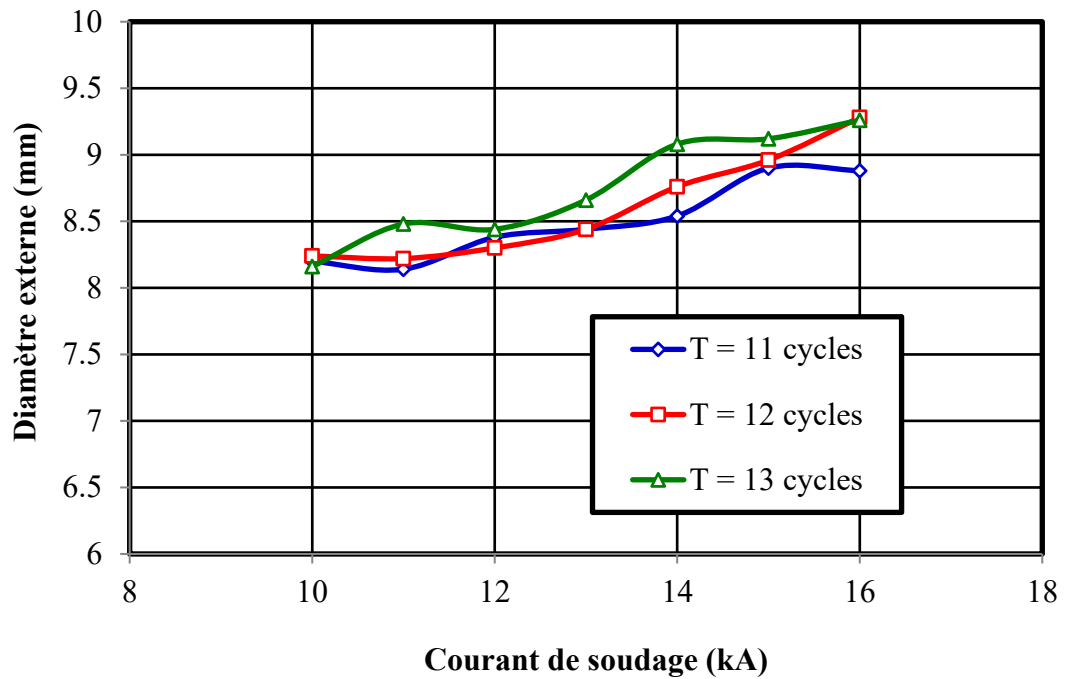


Figure IV. 9 : Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation pour A=30 mm et F=8 bar

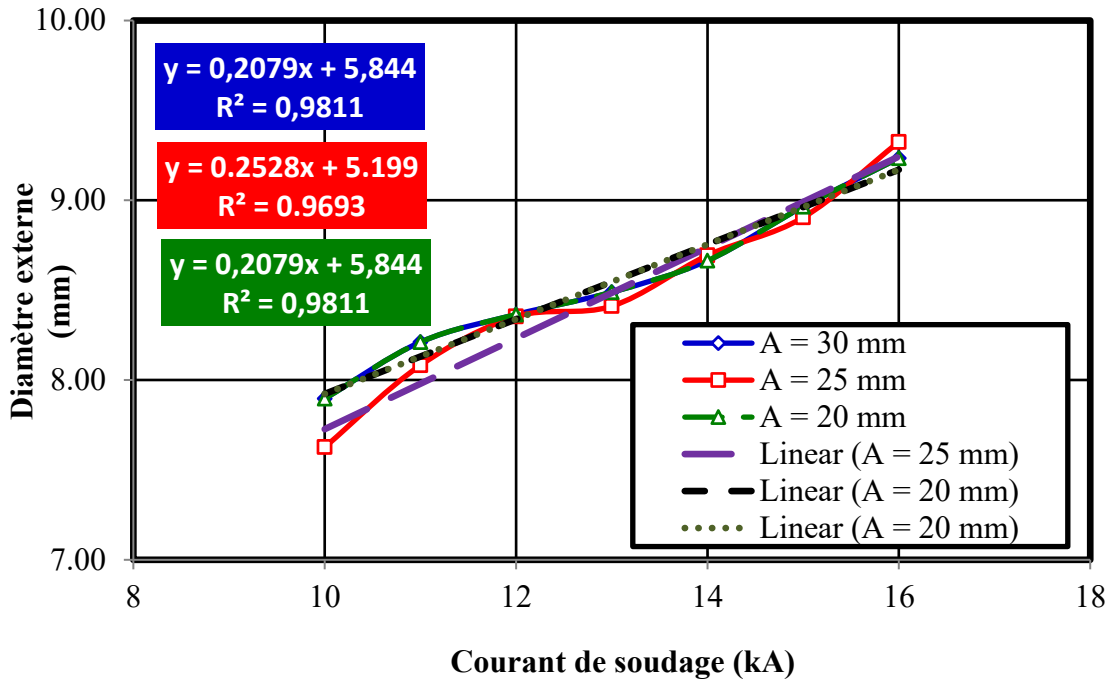


Figure IV. 10: Effet du courant de soudage sur le diamètre d'indentation moyen

II.2. Effets des paramètres de soudage sur la profondeur d'indentation

L'effet des paramètres de soudage sur la profondeur au point de soudure causé par l'électrode a été investigué. Sur le point morphologie du point de soudure on remarque visuellement une large différence des profondeurs au niveau des points de soudure pour les différentes intensités appliquées Figure IV 11 à IV.19. Quantitativement, la variation de la profondeur en fonction des paramètres de soudage est donnée par les figures IV.11 à IV .19. Une faible différence en profondeur est constatée sous la variation du temps et de l'effort de soudage. Cette différence ne dépasse pas les 1,5 mm pour une même intensité. Contrairement à ces deux derniers paramètres, l'augmentation du courant de soudage appliqué, augmente considérablement. Pour un courant de 10 KA, la profondeur moyenne est de 0.38 et pour un courant maximal de 15 KA, la valeur moyenne est de l'ordre de 1.43. La figure IV.20 représente l'évolution de la profondeur moyenne en fonction du courant de soudage. Une augmentation du courant de soudage permet d'augmenter la profondeur du point de soudure.

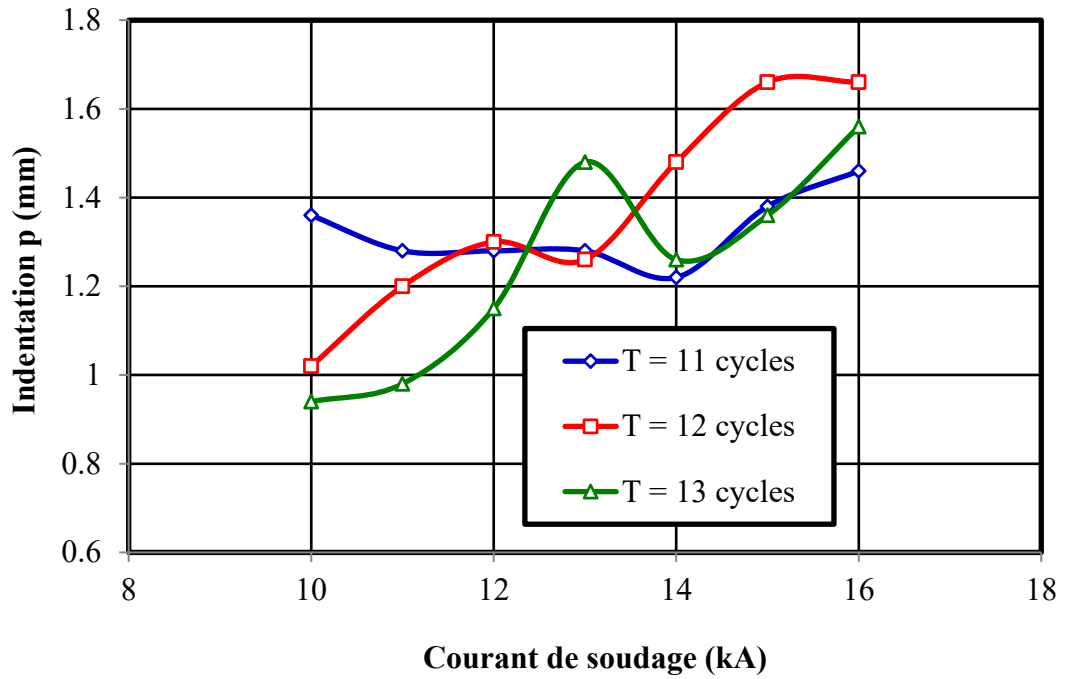


Figure IV. 11: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=6 bar

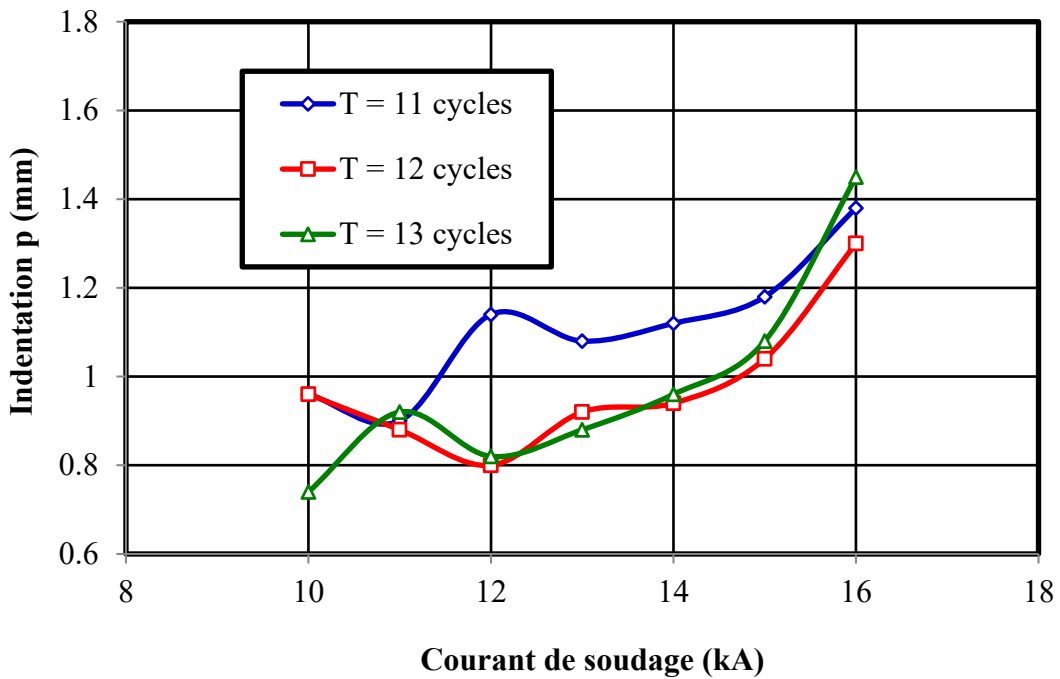


Figure IV. 12: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=7 bar

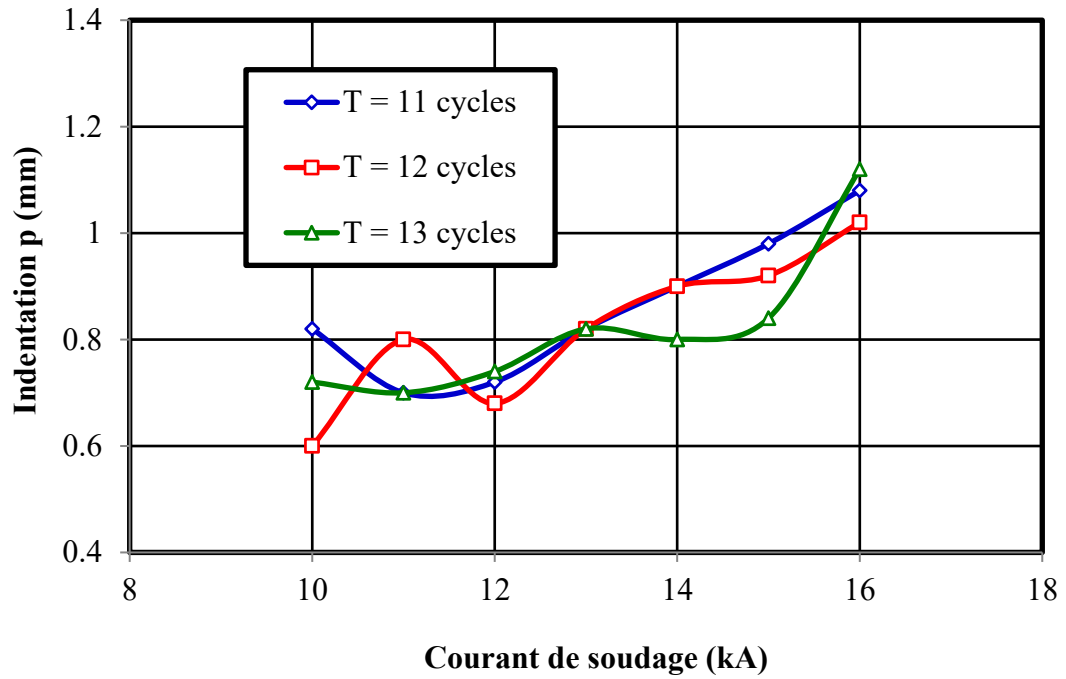


Figure IV. 13: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=20 mm et F=8 bar

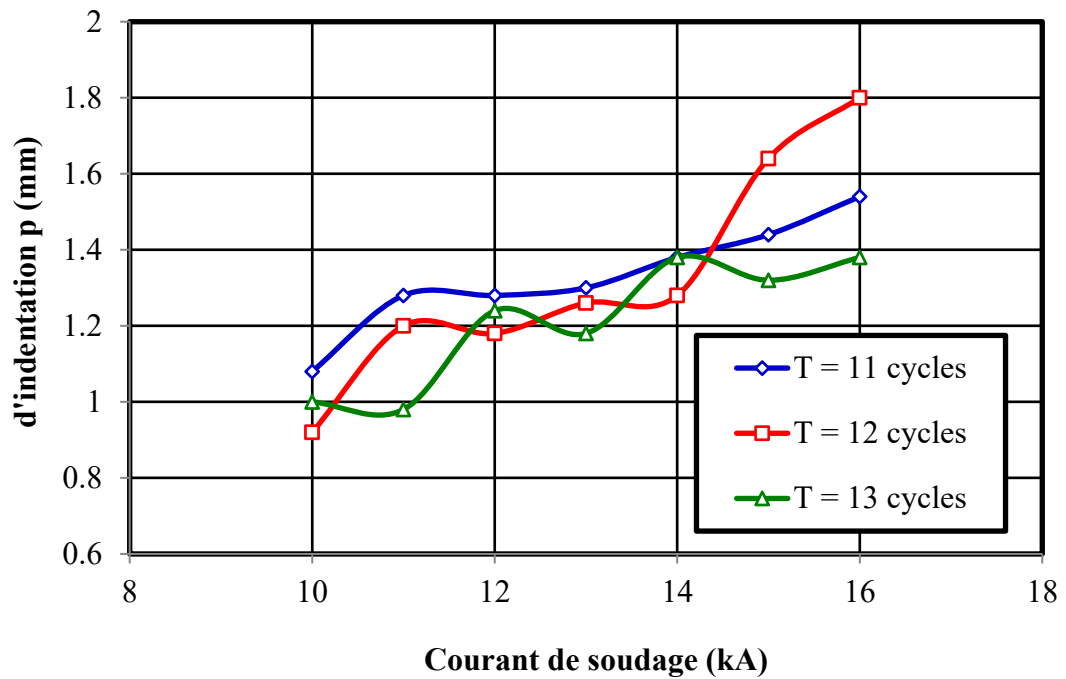


Figure IV. 14: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=6 bar

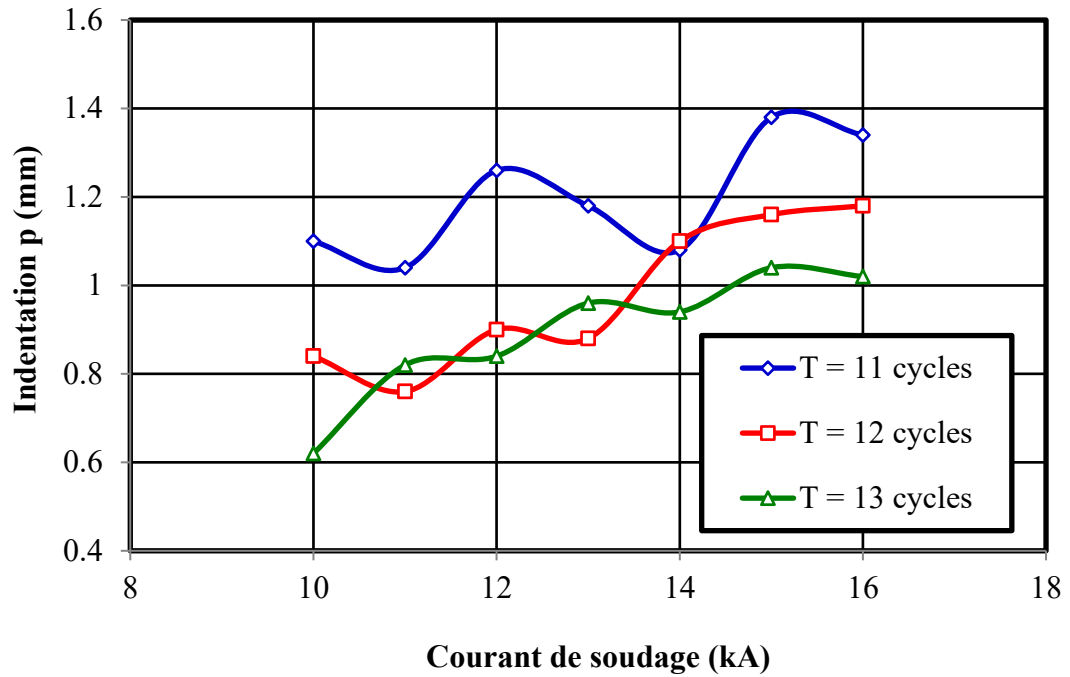


Figure IV. 15: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=7 bar

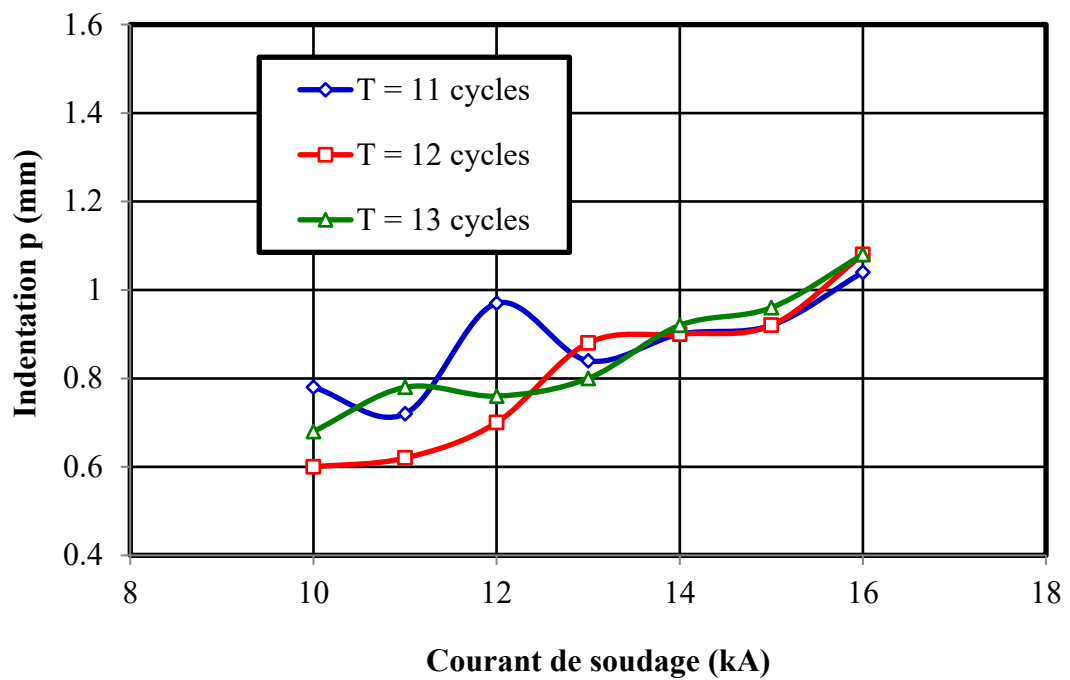


Figure IV. 16: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=25 mm et F=8 bar

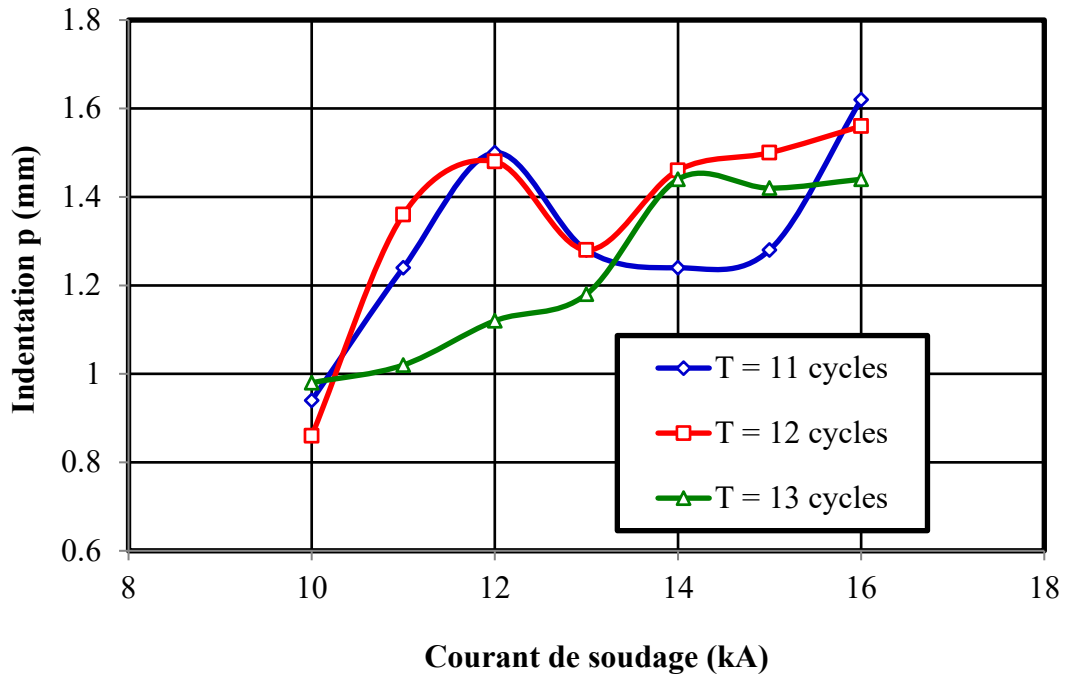


Figure IV. 17: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=6 bar

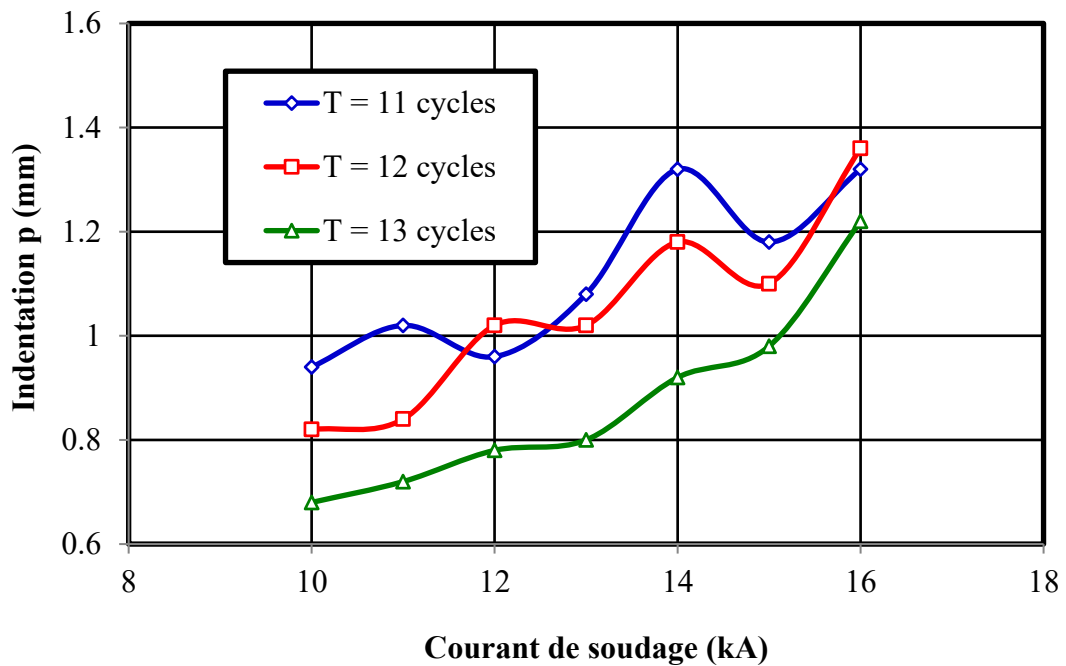


Figure IV. 18: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=7 bar

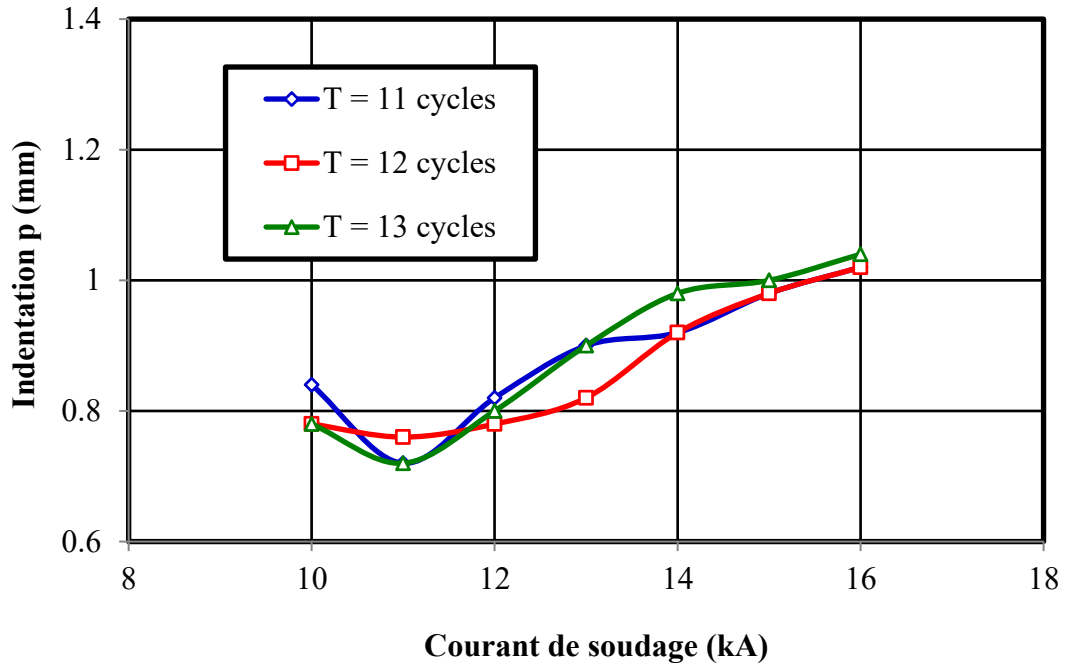


Figure IV. 19: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation pour A=30 mm et F=8 bar

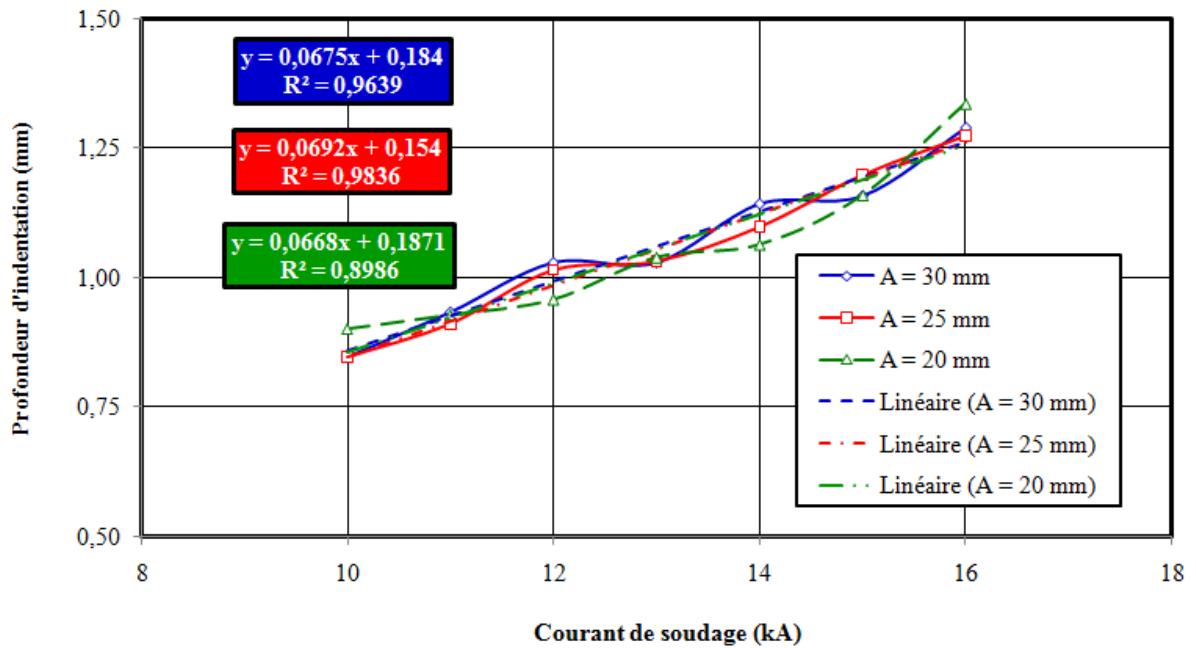


Figure IV. 20: Effet du courant de soudage sur la profondeur d'indentation moyen

III. Effet des paramètres de soudage sur le comportement mécanique

La figure IV.21 illustre l'allure des courbes charges/déplacement pour I=10 kA et 15 kA et montrons aussi les points spécifiques de chaque courbes. Ses points définissent les zones du comportement mécanique. Les points A et A' définissent les limites

élastique de chaque assemblage. Les points B et B', création d'une rotation des tôles assemblées afin d'aligner les deux tôles dans la direction de chargement et amorçage de la striction. Les points C et C' montrent les charges maximales de cisaillement par traction et les points D et D' les charges de rupture finales.

L'effet du courant de soudage sur les évolutions des courbes charges/déplacement pour un temps de soudage $T=13$ cycles et un effort de l'électrode $F=7$ bar respectivement pour des longueurs de recouvrement $A=20$ mm, $A=25$ mm et $A=30$ mm sont données par les figures IV.22, IV.23 et IV.24. L'effet du courant de soudage se traduit par l'augmentation de la charge maximale de cisaillement par traction pour un courant de soudage "I" allant de 10 kA à 16 kA pour les trois longueurs de recouvrements. De plus la zone de déformation plastique augmente avec l'augmentation du courant. Cette augmentation est liée à la taille de la zone de fusion (noyau ou point de fusion), d'où la qualité du point de soudure est meilleure. Aux faibles courants de soudage (I entre 10 et 12 kA), la zone de déformation plastique n'est pas fortement affectée. On note aussi une faible variation dans la charge maximale.

Les résultats des assemblages rompus montrent que la rupture n'a pas eu lieu au sein de l'interface de soudure. Tous les échantillons soudés sous différents courants de soudage ont révélé une séparation des formes de déchirure ou déboutonnage suivi de déchirure (figure IV.25). La séparation des matériaux soudés a commencé à partir de la région extérieure de la ZAT pour toutes les conditions de soudage. Cette forme de rupture est approuvée par d'autres résultats expérimentaux (Özyürek, 2008 ; Salleh, 2019).

Les figures IV.26 à IV.34 montrent l'évolution de la charge maximale en fonction du courant de soudage et le temps de soudage. On note toujours une augmentation de la charge maximale en fonction de l'augmentation du courant de soudage (Moshayedi and Sattari-Far 2012 ; Biradar and Dabade, 2020 ; Deshmukh and Kharche, 2023). En général, on constate que les charges de cisaillement sont supérieures pour un temps de soudage $T=13$ cycles par rapport aux autres temps (11 et 12 cycles) à l'exception pour un courant $I=10$ kA. De plus on note certaines interactions ou comportements aléatoires expérimentales pour certaines valeurs de courants et temps de soudage. La figure IV.35

présente l'évolution de la charge maximale moyenne de cisaillement par traction en fonction du courant de soudage pour les paramètres de soudage F et T. Cette charge moyenne regroupe la moyenne de la charge pour tous les temps de soudage à un même courant de soudage et même force d'électrode et la moyenne de la charge pour tous les efforts des électrodes. Les courbes d'évolutions de la charge maximale moyenne pour tous les longueurs de recouvrement présentent une légère variation avec la variation du courant de soudage. Ces évolutions ont donné des courbes de tendance très proches avec des fonctions polynomiale du premier ordre données sur le graphe de la figure IV.35.

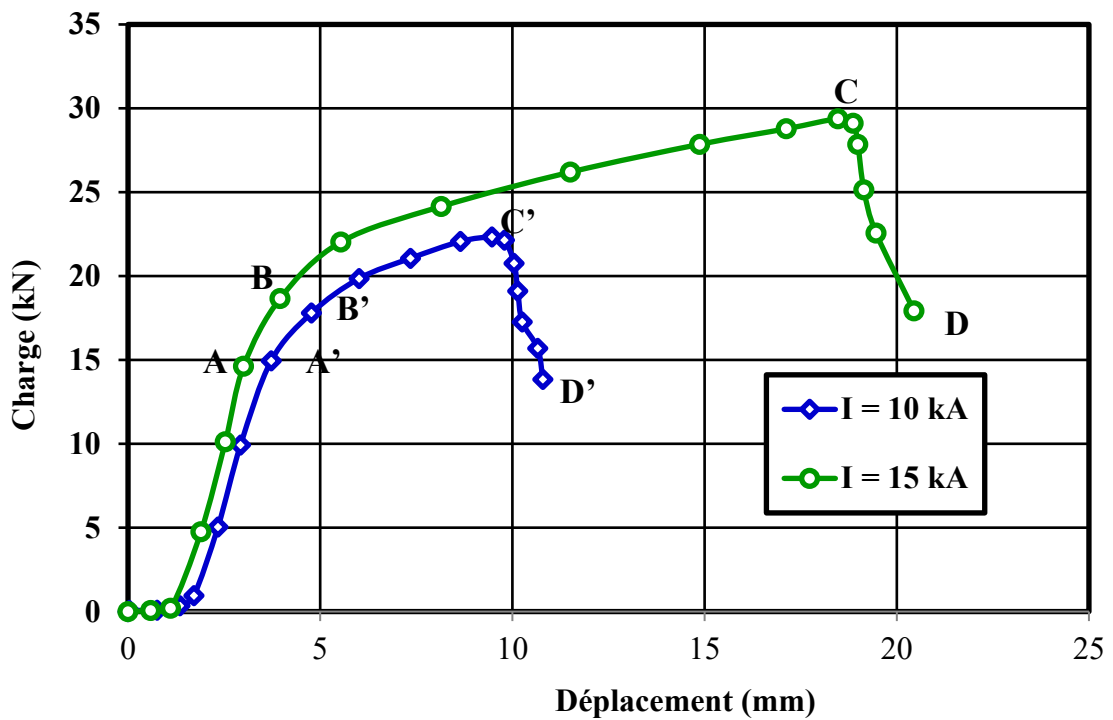


Figure IV. 21: Points spécifiques des courbes Charges/Déplacement

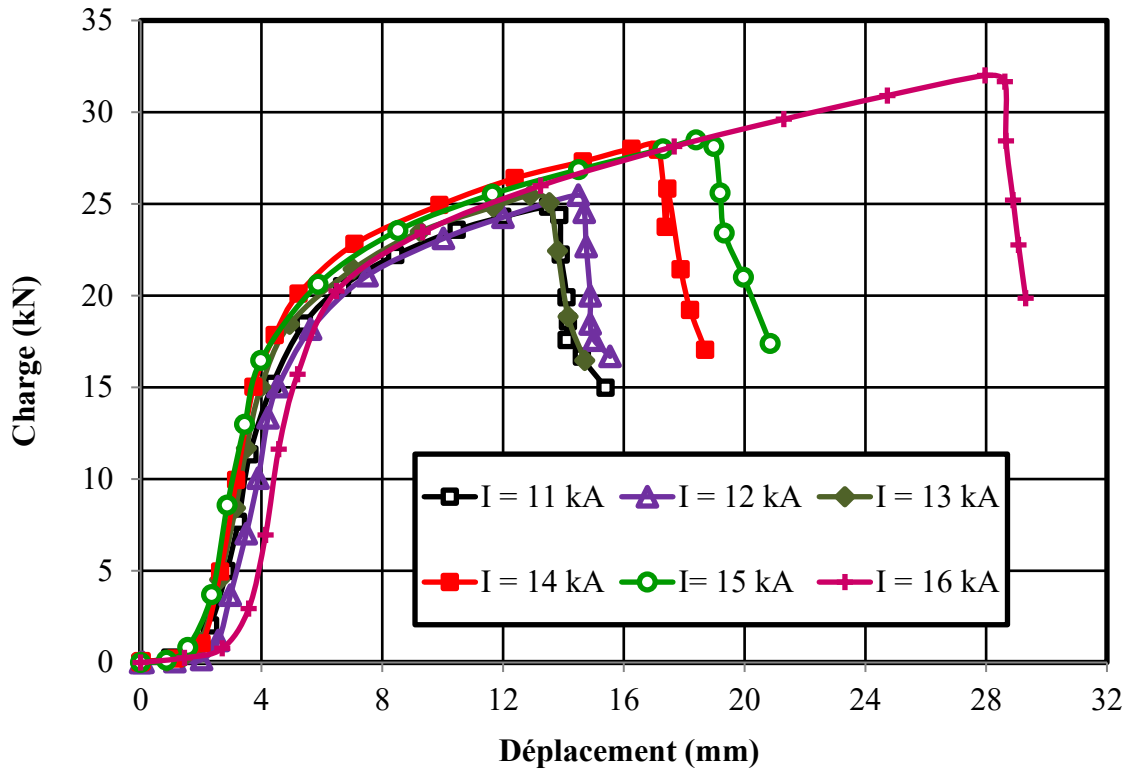


Figure IV. 22: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage

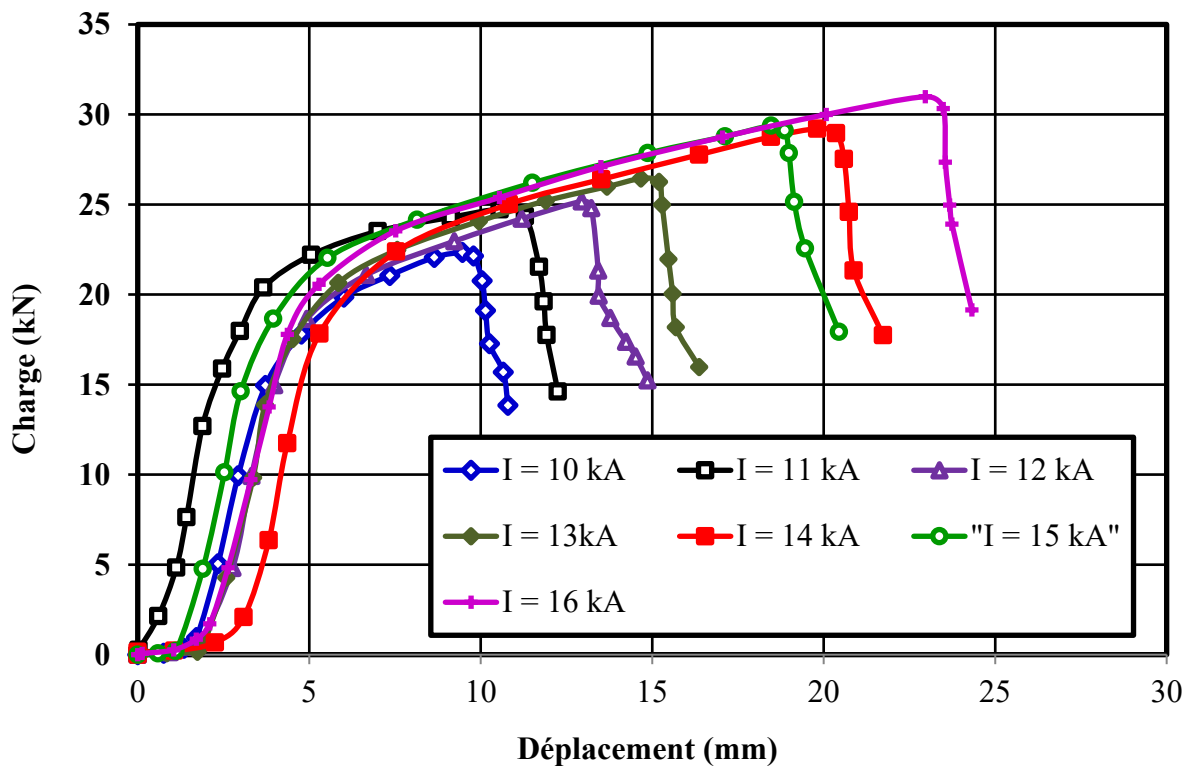


Figure IV. 23: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour A=25 mm, T= 13 cycles et F= 7 bar

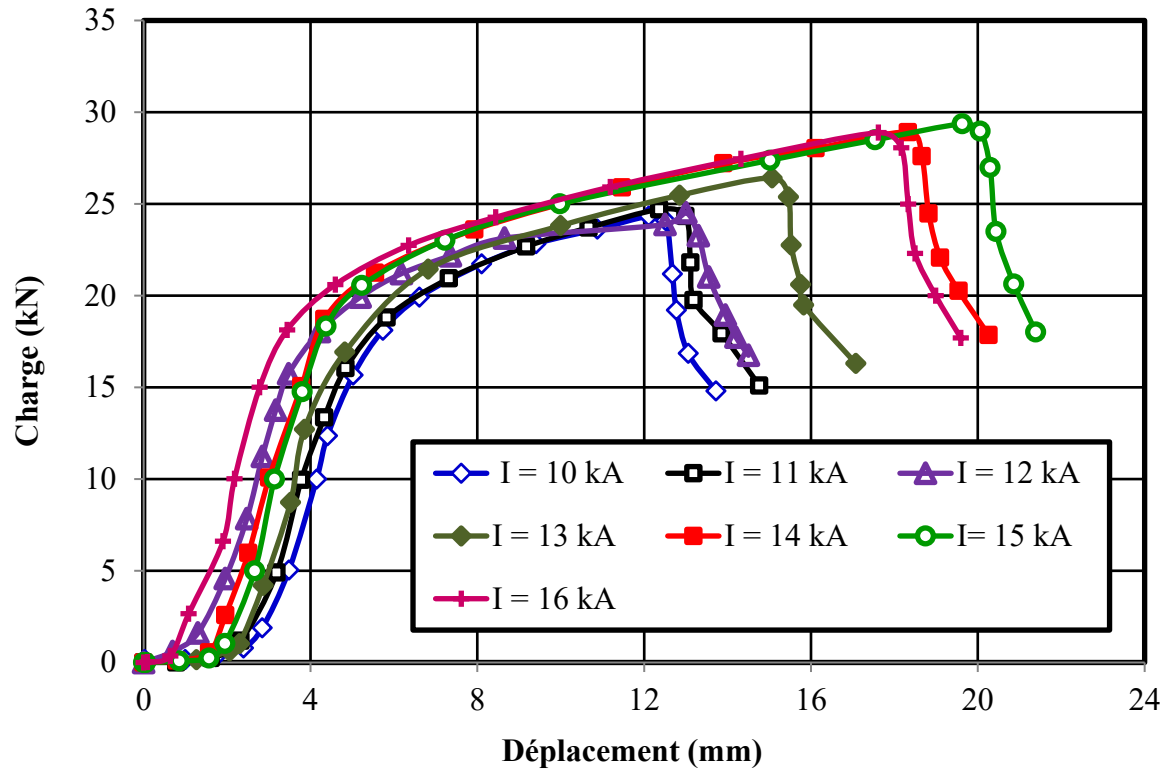


Figure IV. 24: Courbes charges/Déplacement sous l'effet du courant de soudage

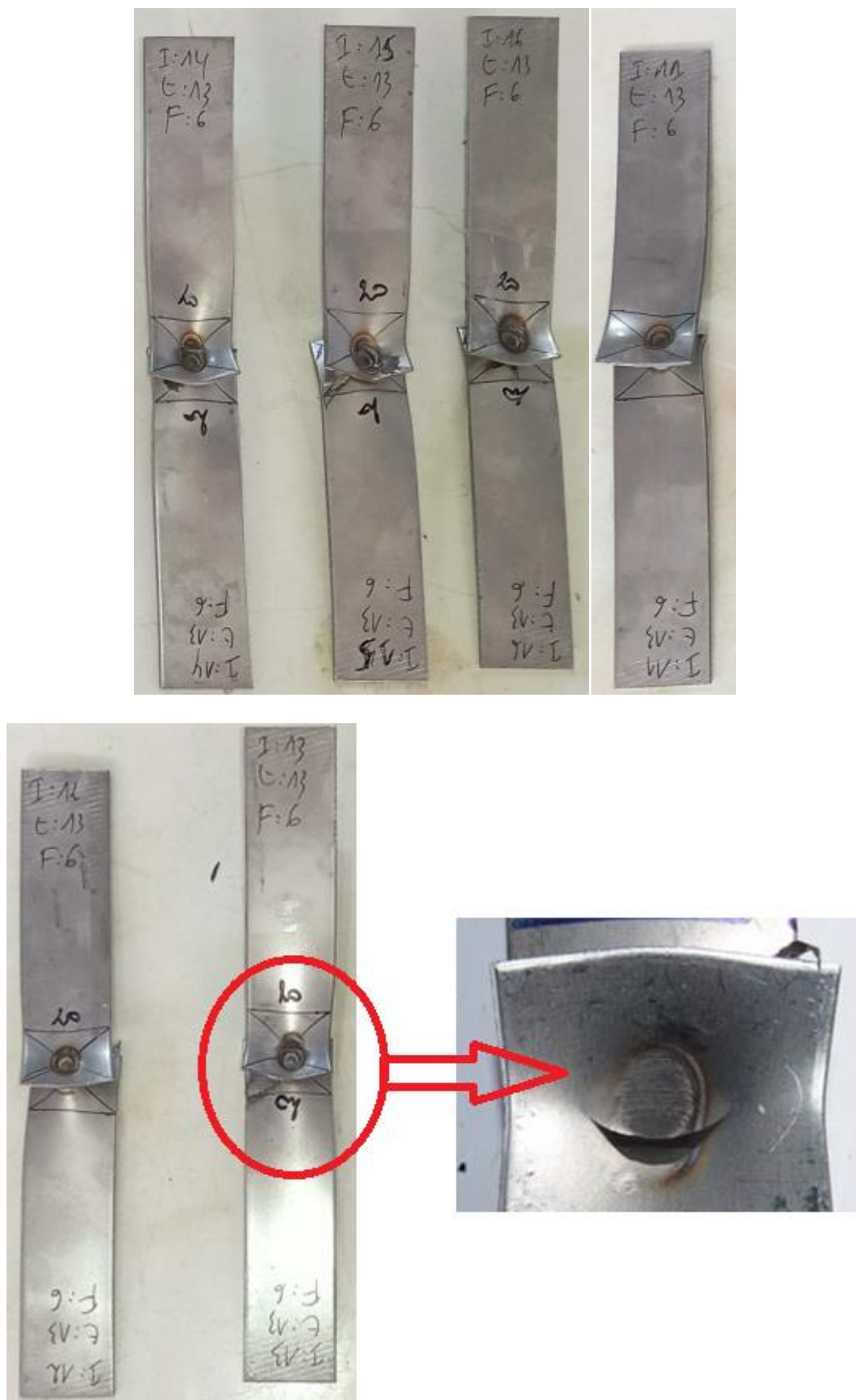


Figure IV. 25: Détails de rupture d'assemblages soudés par points

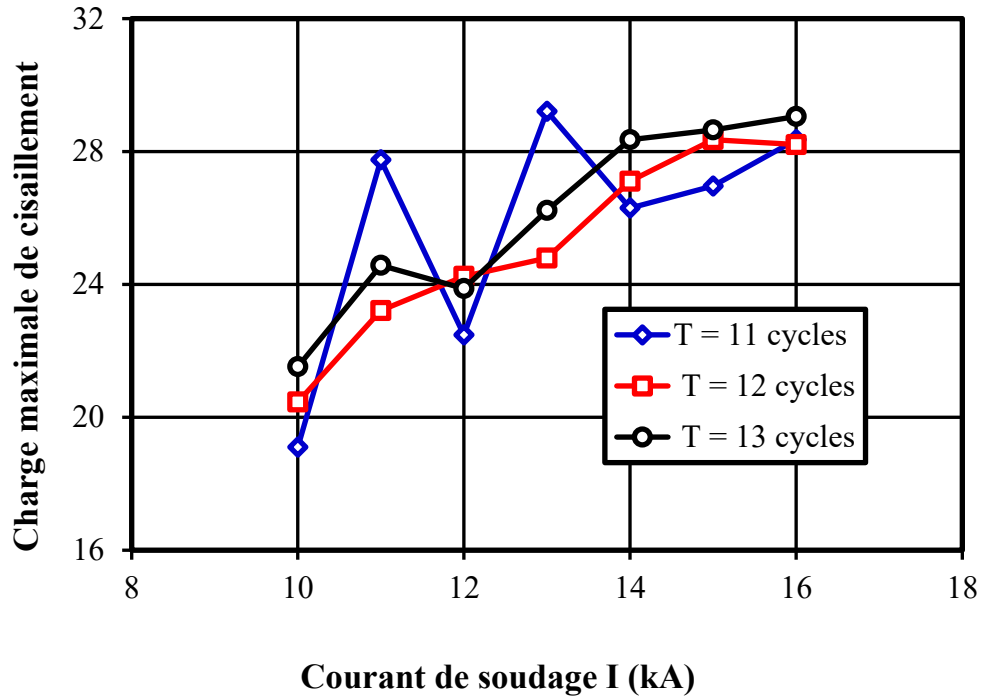


Figure IV. 26: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=20 mm

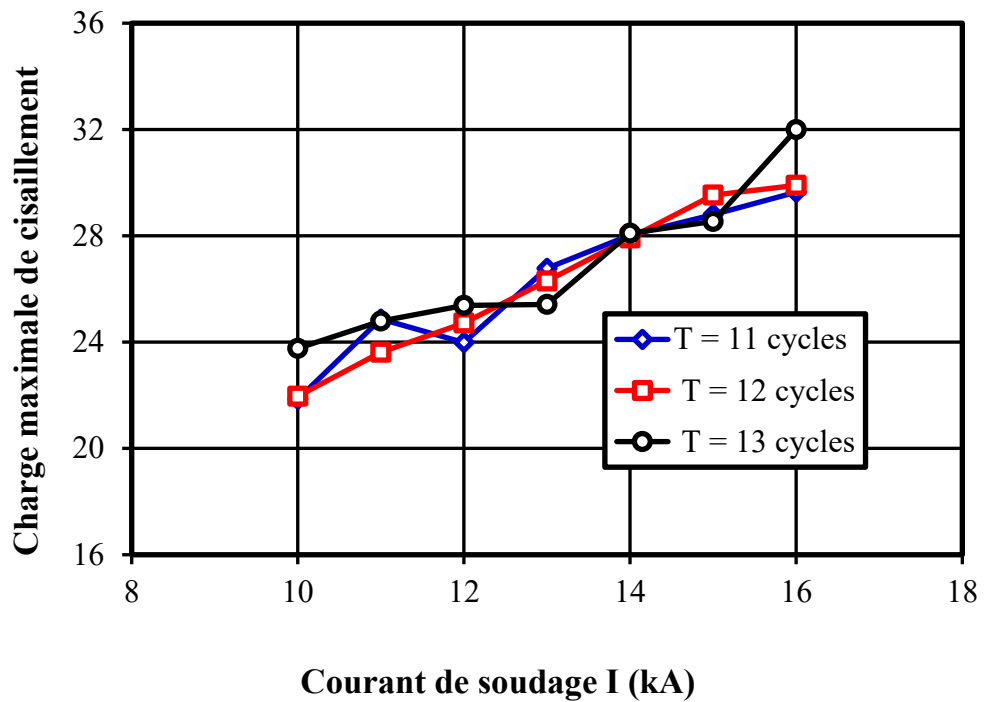


Figure IV. 27: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=20 mm

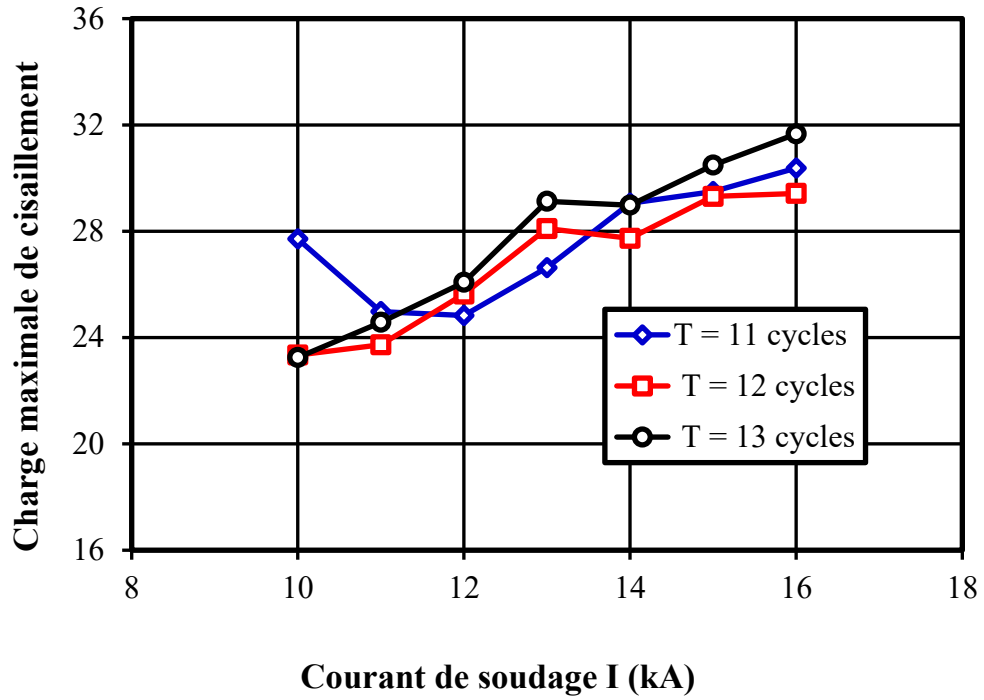


Figure IV. 28: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 8 bars et A=20 mm

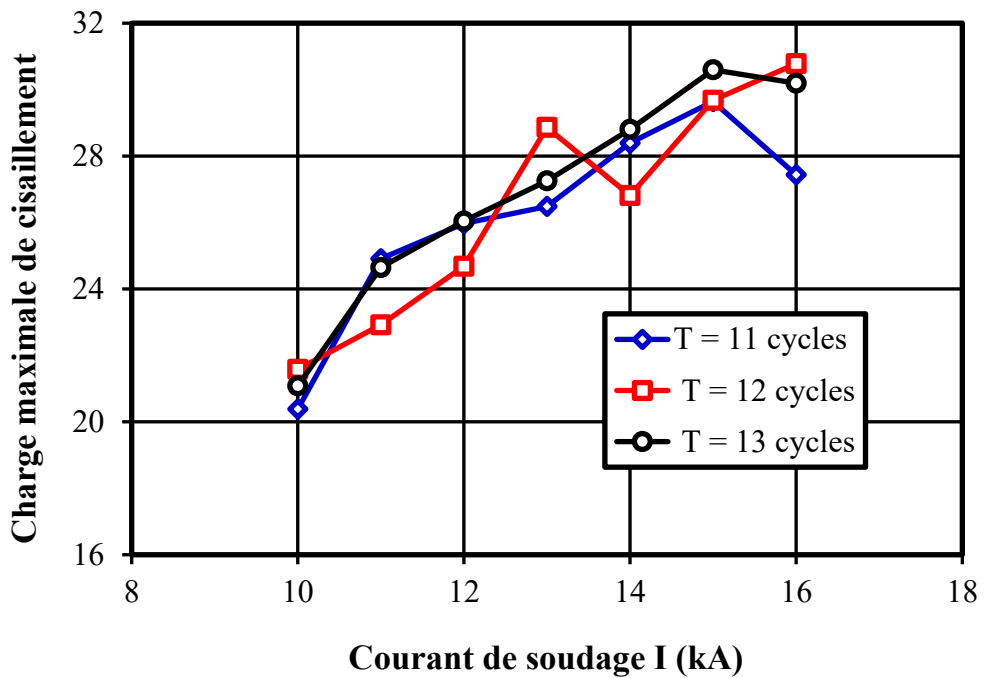


Figure IV. 29: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=25 mm

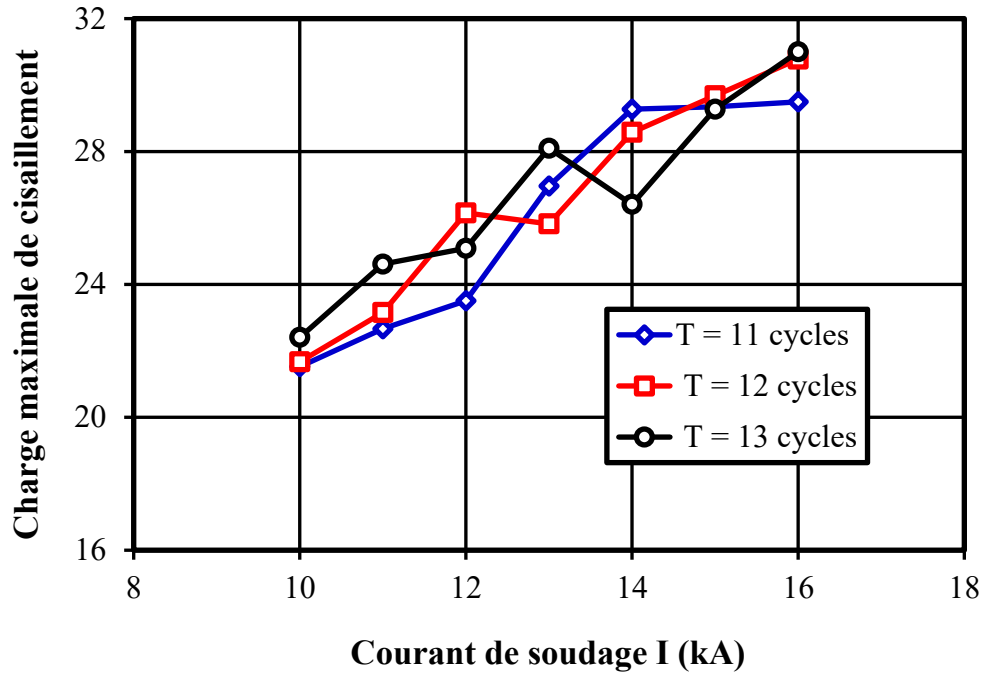


Figure IV. 30: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=25 mm

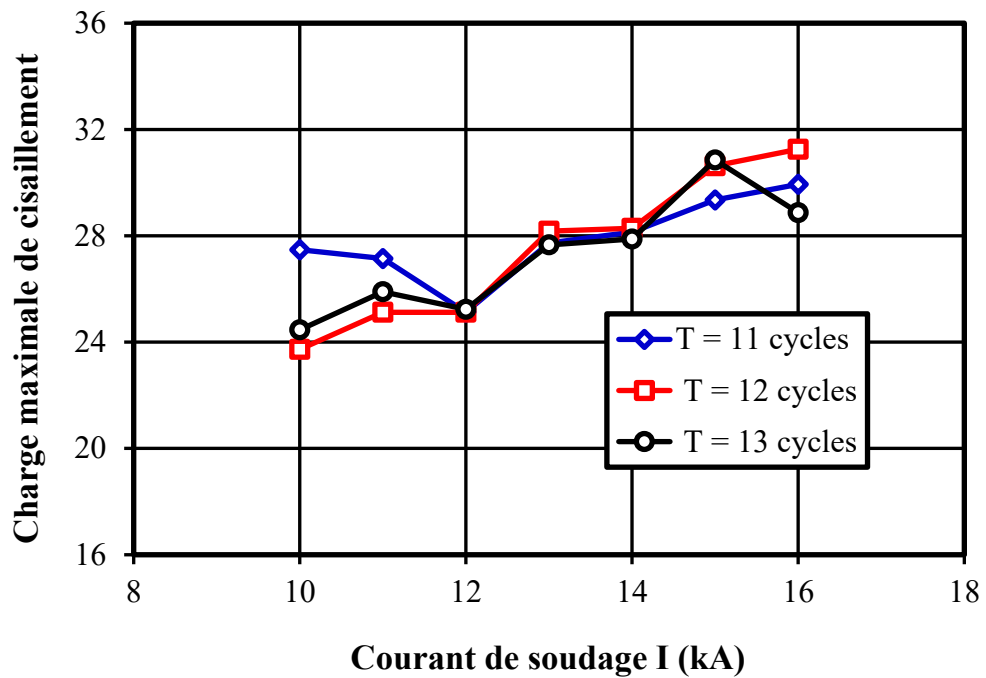


Figure IV. 31: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 8 bars et A=25 mm

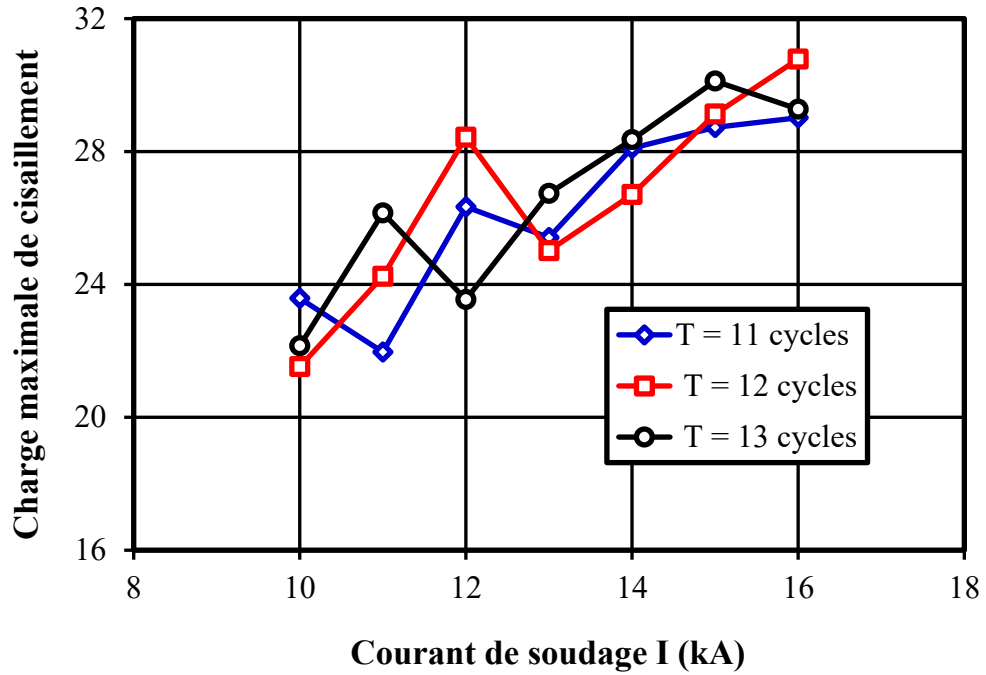


Figure IV. 32: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 6 bars et A=30 mm

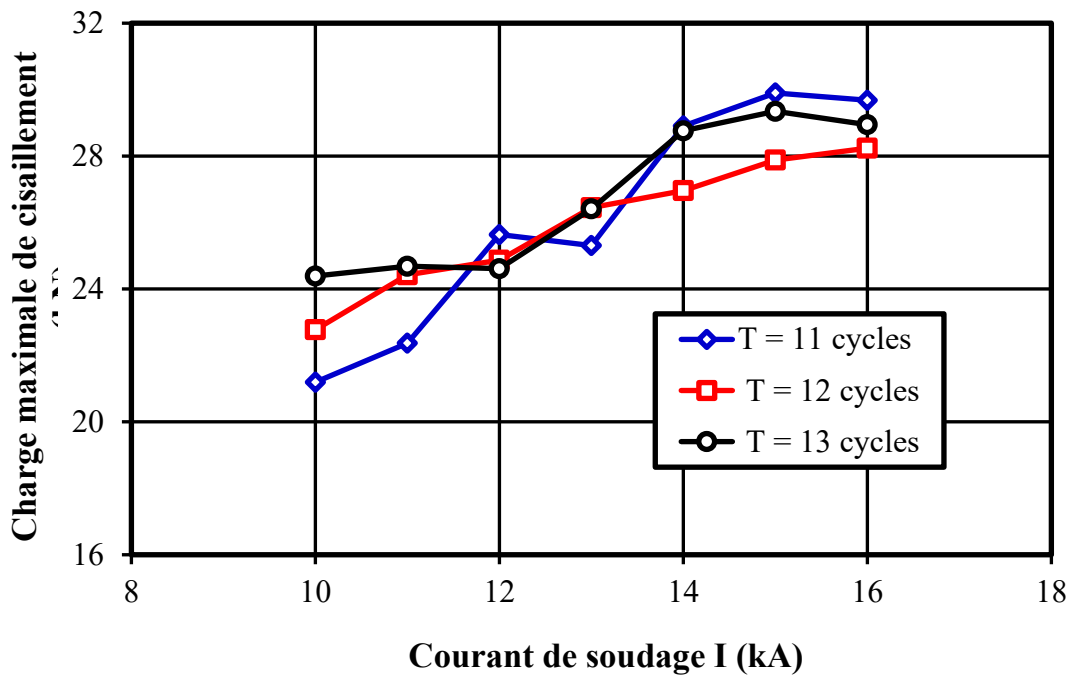


Figure IV. 33: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 7 bars et A=30 mm

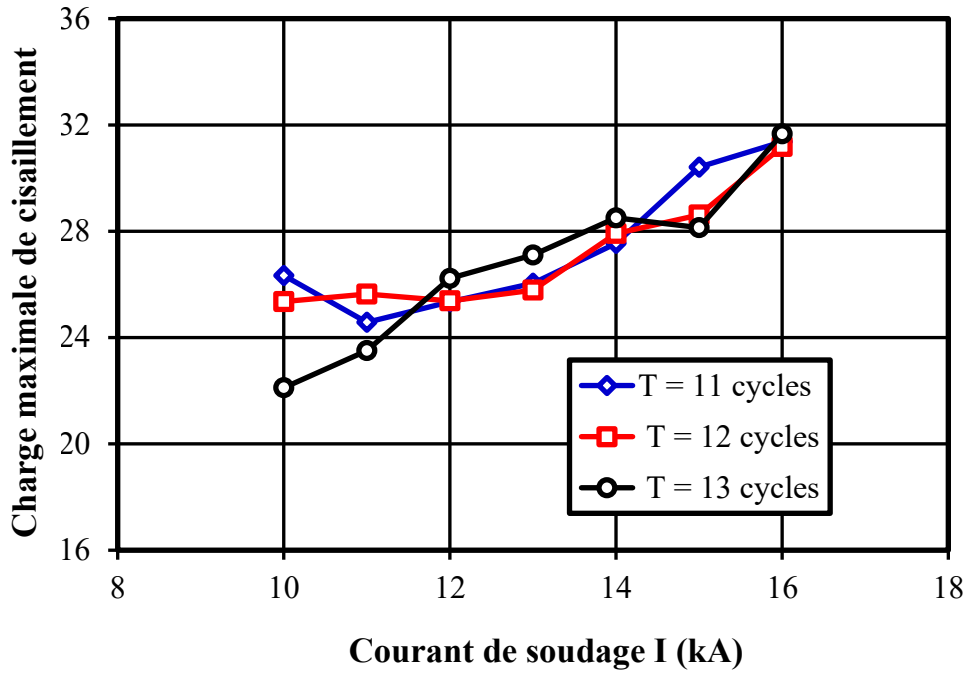


Figure IV. 34: Influence du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour un effort de 8 bars et A=30 mm

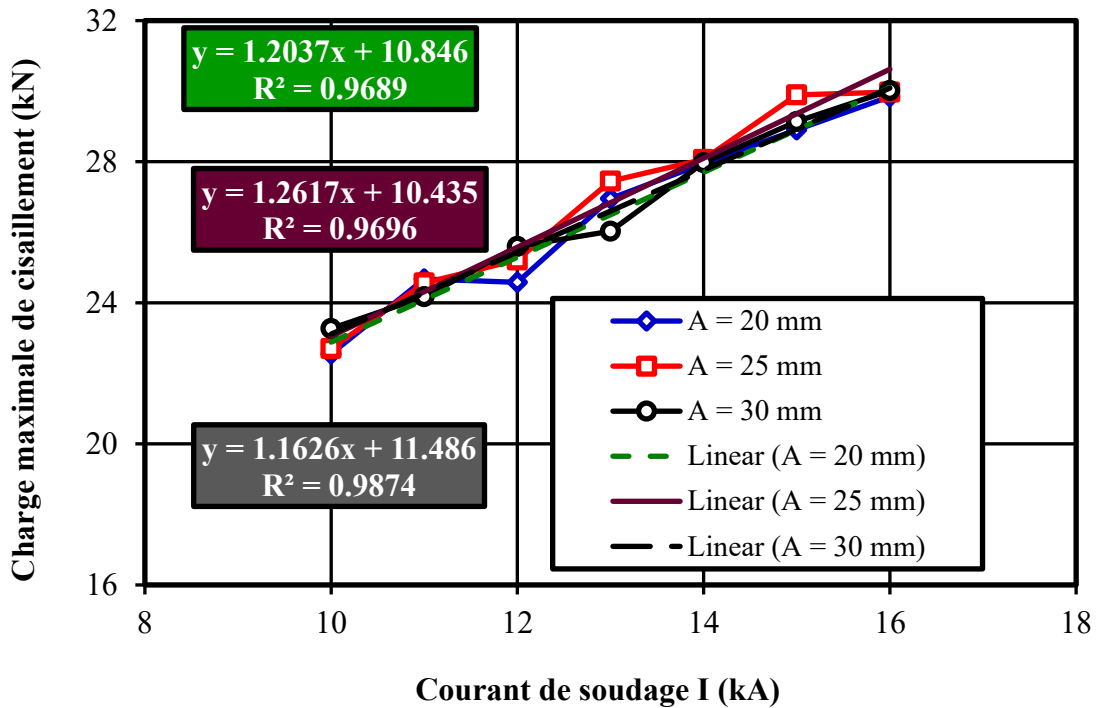


Figure IV. 35: Evolution de la charge maximale moyenne (T et F) en fonction du courant de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction

IV. Modélisation et l'optimisation des paramètres de soudage

Ce chapitre est réservé à l'analyse optimale des résultats de l'étude expérimentale de caractérisation des points de soudure de l'acier inoxydable 304. Les paramètres variables sont les paramètres de soudage I, T et F et la longueur de recouvrement des plaques soudées "A".

Une modélisation et l'optimisation des paramètres de soudage par des modèles mathématiques permettent d'exprimer la relation entre les éléments du soudage (courant de soudage I, temps de soudage T et la force d'électrode F et A longueur de recouvrement) et la charge maximale de cisaillement par traction. Le traitement des résultats est réalisé par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) (Deshmukh, et al 2023, Bae, et al 2021) et l'analyse de la variance (ANOVA) (Valera, et al 2017 ; Biradar et al 2020).

IV.1. Méthodes d'optimisations

L'optimisation est un processus ou une méthode visant à améliorer quelque chose afin d'obtenir le meilleur résultat possible dans des conditions données. Ce concept peut être appliqué dans de nombreux domaines, tels que les mathématiques, l'ingénierie, l'informatique, la gestion, l'économie et bien d'autres secteurs. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation, chacune adaptée à des types de problèmes spécifiques. Voici quelques-unes des méthodes d'optimisation les plus couramment utilisées :

IV.1.1. Optimisation par descente de gradient :

Cette méthode est largement utilisée pour optimiser des fonctions continues et différentiables. Elle consiste à ajuster itérativement les paramètres d'un modèle ou d'une fonction en suivant la direction du gradient (la pente) de la fonction objective pour minimiser cette fonction (Shor, 1968)

IV.1.2. Méthodes d'optimisation stochastique :

Ces méthodes sont particulièrement efficaces pour optimiser des fonctions coûteuses en calcul, telles que les fonctions de coût en apprentissage automatique. La descente de gradient stochastique (SGD) en est un exemple, où les mises à jour des paramètres sont calculées en utilisant un seul exemple d'entraînement à la fois, ce qui réduit la charge de calcul (Shim et al., 2023)

IV.1.3. Méthodes d'optimisation de deuxième ordre :

Contrairement à la descente de gradient, ces méthodes tiennent compte des informations sur la courbure de la fonction objective. Les méthodes de Newton Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) en sont des exemples (Albu, A.F et al 2022)

IV.1.4. Algorithme de recherche aléatoire :

Cette méthode consiste à explorer aléatoirement l'espace des solutions pour trouver une solution optimale. Elle est souvent utilisée pour des problèmes complexes ou la topologie de l'espace de recherche est mal connue (Kaelo, P et al 2016)

IV.1.5. Méthodes d'optimisation par essais :

Ces méthodes sont inspirées du comportement collectif d'un groupe d'entités, telles que les essaims d'oiseaux ou les colonies d'abeilles. L'algorithme de l'essaim des particules (PSO) et l'optimisation par essaim de particules sont des exemples de telles méthodes (Ruiz-Gazen et al. 2010)

IV.1.6. Algorithmes génétiques :

Inspirés par le processus de sélection naturelle, les algorithmes génétique sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation en évolution une population de solutions au fil des générations (Alhijawi et al 2023)

IV.1.7. Méta heuristiques :

Les méta heuristiques sont des approches génériques d'optimisation qui peuvent être adaptées à différents types de problèmes. Ils incluent des techniques telles que le recuit simulé, la recherche tabou, l'algorithme de recherche de colonies de fourmis (Slami, 2018 ; Wei et al 2023. Wei, Y et al 2023).

IV.1.8. Optimisation convexe :

Pour les problèmes d'optimisation convexe, il existe des algorithmes spécifiques tels que la méthode du gradient projeté, l'algorithme d'Uzawa, etc (Li et al 2023).

IV.1.9. Optimisation multi-objectif :

Lorsque vous avez plusieurs objectifs contradictoires, vous pouvez utiliser des méthodes d'optimisation multi-objective, comme les algorithmes génétiques multi-objectifs ou les méthodes de pondération (Gotardelo et al 2023).

V. Analyse de variance et méthodologie des surfaces de réponse

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus de soudage, elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value et F-value d'ANOVA. Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

V.1. Modélisation et optimisation pour A 20 :

Dans cette section, on utilise le principe de l'analyse de variance et les surfaces de réponses, afin de développer un modèle mathématique optimisé entre les paramètres de soudage (I, F, T) et la force maximale de cisaillement par traction pour une longueur de recouvrement de 20 mm "A20". Le tableau IV.1 présente les résultats expérimentaux des essais de traction des éprouvettes en fonction des variations des paramètres de soudage dans le cas du recouvrement A20 sur la base du plan factoriel donnée dans le chapitre III (étude expérimentale).

Tableau IV. 1 : Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 20 mm

I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	6	11	19,1	12	20,459	13	21,524
11			27,748		23,214		24,573
12			22,479		24,242		23,875
13			29,209		24,793		26,226
14			26,299		27,107		28,356
15			26,961		28,356		28,65
16			28,356		28,209		29,054
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	7	11	21,855	12	21,965	13	23,765
11			24,867		23,618		24,793
12			23,985		24,72		25,381
13			26,777		26,299		25,418
14			28,026		27,916		28,099
15			28,797		29,532		28,54
16			29,642		29,899		31,993
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	8	11	27,71	12	23,343	13	23,251
11			24,977		23,728		24,573
12			24,83		25,638		26,079
13			26,63		28,099		29,128
14			29,054		27,732		28,981
15			29,495		29,311		30,487
16			30,377		29,421		31,662

L'équation développée par Minitab19 pour relier la force maximale de cisaillement par traction (σ_{ct}) et les paramètres de soudage I, F, T est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{ct} = 101,9 + 0,95.I - 16,47.T + 1,47.F - 0,0407.I^2 + 0,628.T^2 + 0,036.F^2 + 0,1402.I.T - 0,0531.I.F - 0,036.T.F \quad (1)$$

La figure IV.36 présente graphiquement l'évolution de l'équation (1) c.à.d l'évolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D en fonction des paramètres de soudage tracée par programme sous Matlab. Les courbes tracées révèlent que la maximisation de la force maximale de cisaillement par traction est obtenue par maximisation du courant de soudage et de la force d'électrode et minimisation du temps de soudage.

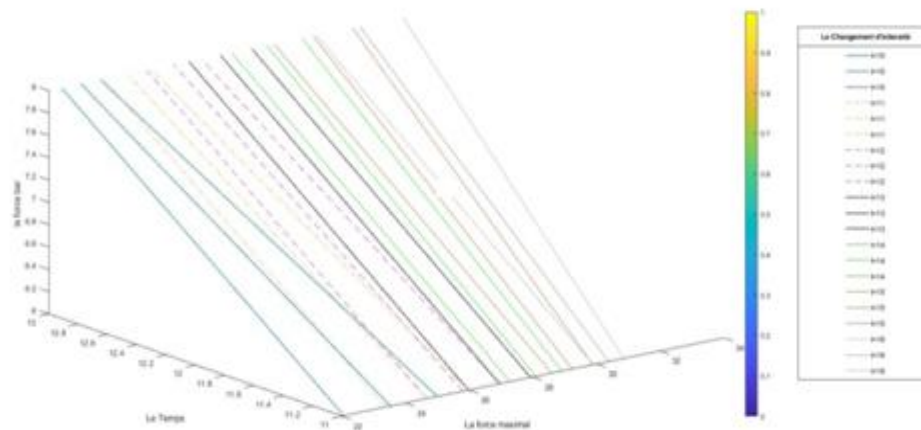


Figure IV. 36: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F)

Les résultats statistiques obtenus par l'analyse de variance sont regroupés dans le tableau IV.2 qui récapitule les valeurs du modèles obtenus à la suite d'analyse factorielle par un modèle linéaire. et montre également les mesures d'adéquation R^2 , R^2 ajusté et R^2 prédit qui sont proches du 85%, ce pourcentage assure une bonne convergence et indiquent une bonne adaptation du modèle.

Le tableau IV.3 montre les résultats de l'analyse de variance avec toutes l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F qui ne donnent que le courant I et les principaux paramètres influant sur la force maximale de cisaillement par traction montré par la valeur $p=14,92$ et la force F en deuxième position $p=4,3$. L'interaction entre le temps T de soudage et la force F ne peut être considérée comme significative.

Tableau IV. 2 : Analyse des variances pour A20

Source	DF	Adj SS	Adj MS	Valeur F	Valeur p
model	9	407,364	45,263	27,59	0
I	1	365,14	365,14	222,56	0
T	1	1,246	1,246	0,76	0
F	1	30,372	30,372	18,51	0
I*I	1	1,254	1,25	0,76	0,386
T*T	1	5,523	5,523	3,37	0,072
F*F	1	0,018	0,018	0,01	0,916
I*T	1	3,3	3,3	2,01	0,162
I*F	1	0,474	0,474	0,29	0,593
T*F	1	0,037	0,037	0,02	0,881
Erreur	53	86,953	1,641		
Total	62	494,317			
R carré = 82.41 %					
R carré ajusté = 79.42 %					
R carré Prédit = 72.68 %					

Tableau IV. 3: Résultats d'analyse des variances pour A20

Source		SE Coef	Valeur T	Valeur p	VIF
Constant		26,215	0,406	64,55	0
I	7,222	3,611	0,242	14,92	0
T	0,344	0,172	0,198	0,87	0,387
F	1,701	0,85	0,198	4,3	0
I*I	-0,733	-0,367	0,419	-0,87	0,386
T*T	1,256	0,628	0,342	1,83	0,072
F*F	0,072	0,036	0,342	0,11	0,916
I*T	0,841	0,42	0,296	1,42	0,162
I*F	-0,319	-0,159	0,296	-0,54	593
T*F	-0,073	-0,036	0,242	-0,15	0,881

On remarque que les paramètres de soudage (I, F, T) dans le cas du A20 sont bien réparties selon la loi normale, ils sont concentrés autour de 5% et 95% sauf quelques points sont dispersés dus au problème de dispersion expérimentales et à la procédure de soudage et après la comparaison des résultats expérimentaux avec les valeurs de l'équation (1) du modèle données, un bon accord entre les résultats expérimentaux et les valeurs du modèle mathématiques montré par la figure IV.37. Dans cet histogramme (figure IV.38) des résidus forment une courbe normale répartie autour de zéro, ce qui montre que l'hypothèse de normalité est bien vérifiée.

Comme le montre la figure IV.39 présente le diagramme de Pareto pour la force maximale de cisaillement par traction qui limite les paramètres de soudage qui ont l'importance dans le choix des paramètres de soudage. Selon le diagramme de Pareto, on remarque que le facteur le plus important concernant les paramètres de soudage c'est l'intensité I, en suite la force F, après l'interaction entre l'intensité I et le temps T ensuite l'interaction entre les trois facteurs, on constate que l'impact de l'intensité I sur le soudage représente de trois fois de l'effet de la force F et dix fois de l'effet du temps. Donc le choix de l'intensité joue un rôle très important pour l'optimisation des efforts

maximaux de cisaillement par traction. Et on ne peut pas éliminés le phénomène de l'interaction bien qu'on à des faibles coefficients.

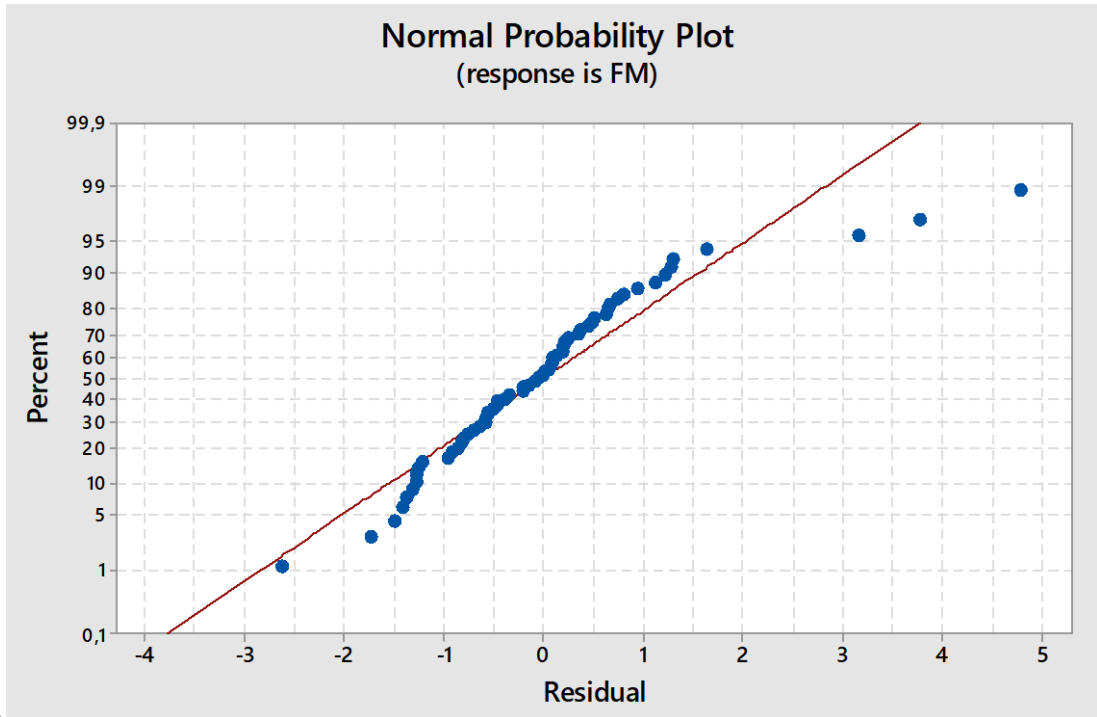


Figure IV. 37: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimental A20

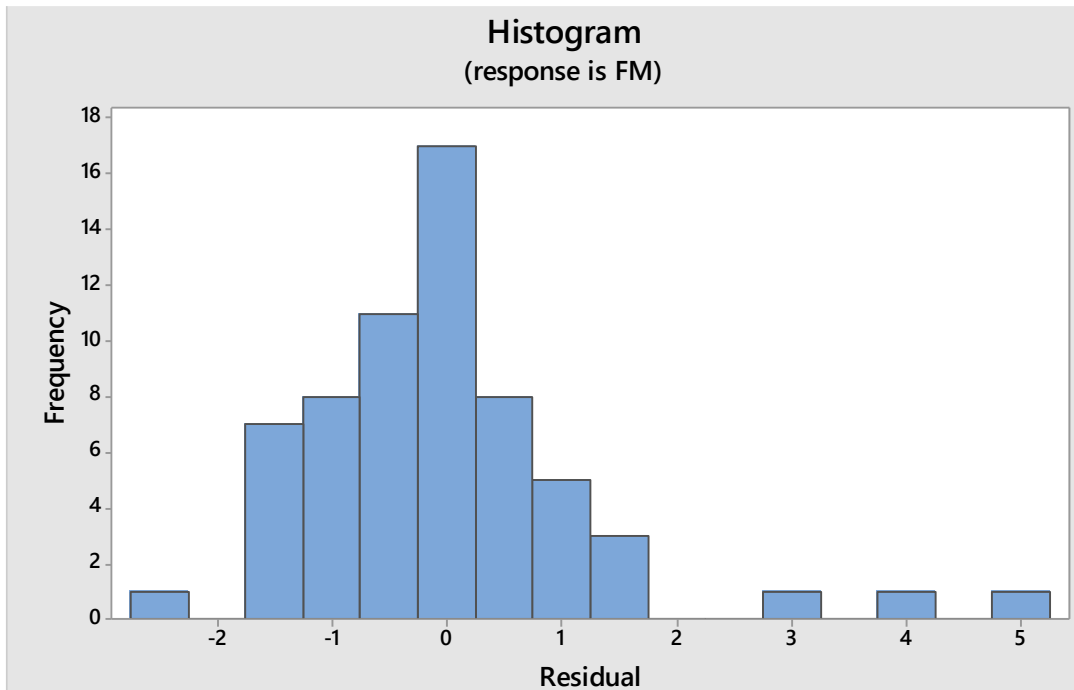


Figure IV. 38: Histogramme des résidus pour A20

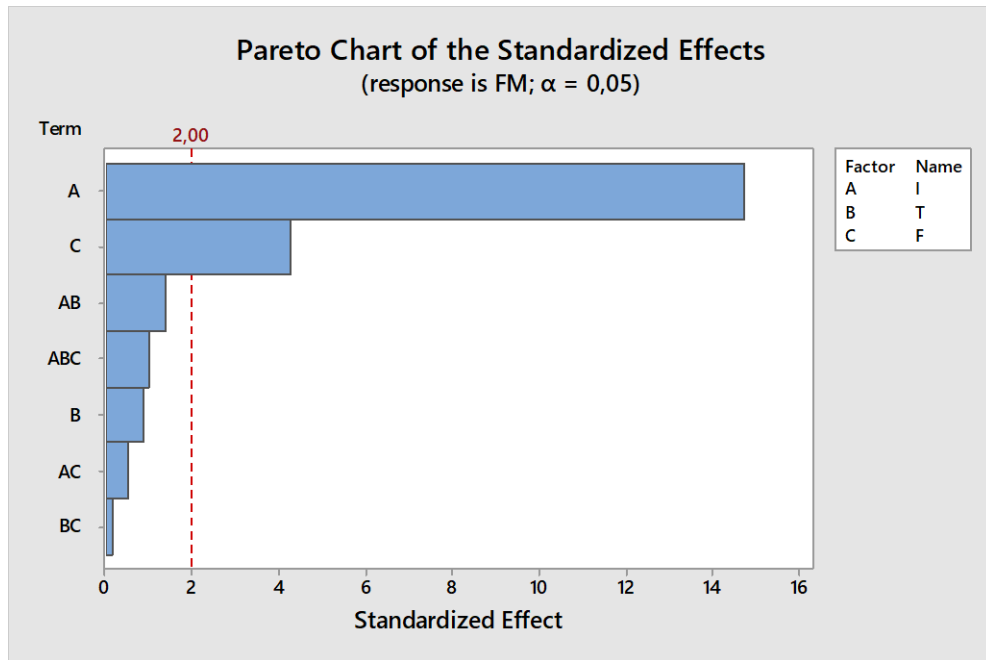


Figure IV. 39: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20

V.2. Modélisation et optimisation pour A 25 :

Le tableau IV.4 suivant montre les résultats expérimentales d'essais réalisés sur 63 cas possible en variant les paramètres de soudage I,T,F.

Tableau IV. 4: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 25 mm

I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	6	11	20,386	12	21,581	13	21,084
11			24,909		22,92		24,646
12			25,969		24,683		26,042
13			26,483		28,862		27,254
14			28,393		26,814		28,805
15			29,642		29,679		30,597
16			27,438		30,781		30,193
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	7	11	21,524	12	21,671	13	22,406
11			22,663		23,152		24,61
12			23,508		26,152		25,087
13			26,961		25,822		28,099
14			29,275		28,577		26,41
15			29,348		29,679		29,275
16			29,495		30,781		31,001
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	8	11	27,475	12	23,728	13	24,463
11			27,144		25,124		25,895
12			25,124		25,124		25,234
13			27,732		28,173		27,658
14			28,136		28,283		27,879
15			29,348		30,634		30,854
16			29,936		31,258		28,871

En fonction de ces résultats, un modèle mathématique optimisé (équation 2), a été développé pour calculer la force maximale de cisaillement par traction sous l'effet de I, F, T, dans le cas d'une longueur de recouvrement de 25mm "A25".

$$\sigma_{ct} = -16,1 + 3,95.I + 1,29.T - 0,37.F - 0,0745.I^2 + 0,007.T^2 + 0,577.F^2 + 0,0793.I.T - 0,2436.I.F - 0,337.T.F \quad (2)$$

La figure IV.40 présente l'évolution de l'équation (2) en 3D de la force maximale de cisaillement par traction en fonction des paramètres de soudage I, F et T dans le cas A25 afin de valider notre modèle (équation 2). Ce graphe confirme que le facteur le plus important c'est l'intensité ensuite la force et en dernier le temps et par conséquent notre modèle pour ce cas est fiable.

On remarque une augmentation de la force maximale de cisaillement par traction pour une augmentation de I. et on constate un croisement des valeurs de I pour des valeurs 14 ,15 et 16 kA respectivement pour T=13 cycles, 12 cycles et 11 cycles.

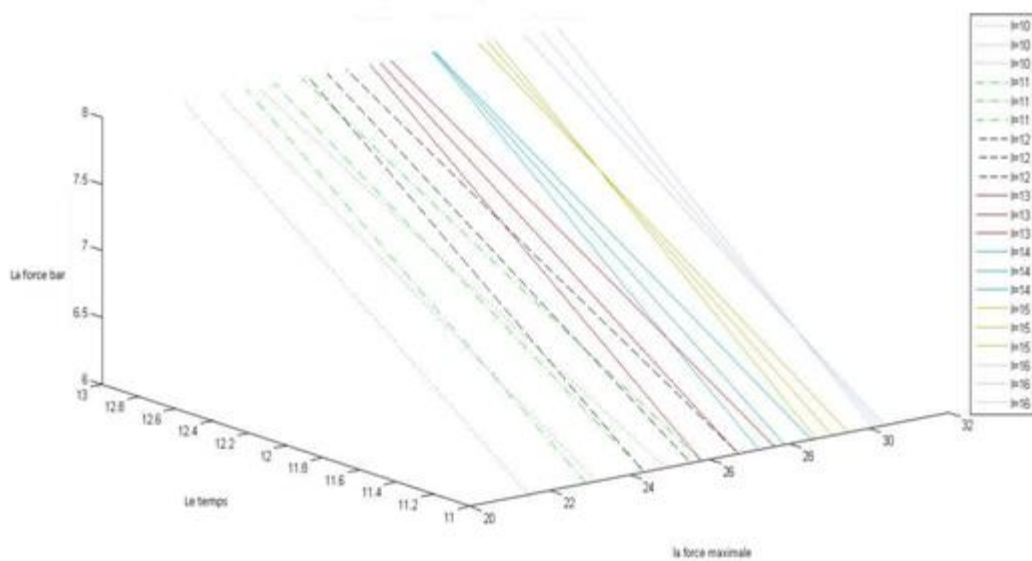


Figure IV. 40: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F) pour A25

Dans le cas d'une longueur de recouvrement de 25 mm "A25", on a utilisé le même principe pour le cas du recouvrement de 20 mm. L'analyse de variances et les surfaces de réponse sont appliquées afin de développer un modèle mathématique optimisé entre les paramètres de soudage (I, F, T) et la force maximale de cisaillement par traction. Les

résultats statistiques obtenus par l'analyse de variance sont regroupés dans le tableau IV.5.

Tableau IV. 5: Analyse de variances A25

Source	DF	Adj SS	AdjMS	Valeur F	Valeur p
Model	9	435,336	48,371	37,49	0
I	1	401,142	401,142	310,93	0
T	1	0,713	0,713	0,55	0
F	1	10,412	10,412	8,07	0,006
I*I	1	4,193	4,193	3,25	0,077
T*T	1	0,001	0,001	0	0,982
F*F	1	4,66	4,664	3,62	0,063
I*T	1	1,056	10,56	0,82	0,37
I*F	1	9,971	9,971	7,73	0,008
T*F	1	3,184	3,184	2,47	0,122
Erreur	53	68,377			
Total	62	503,713			

R carré = 86.43 %
R carré ajusté = 84.12 %
R carré Prédit = 79.26 %

Tableau IV. 6: Résultats d'analyse de variances "A25"

Term Effect Coef		SE Coef	Valeur T	Valeur p	VIF
Constant		26,745	0,36	74,27	0
I	7,57	3,785	0,215	17,63	0
T	0,261	0,13	0,175	0,74	0,46
F	0,996	0,498	0,175	2,84	0,006
I*I	-1,341	-0,67	0,372	-1,8	0,077
T*T	0,014	0,007	0,304	0,02	0,982
F*F	1,154	0,577	0,304	1,9	0,063
I*T	0,476	0,238	0,263	0,9	0,37
I*F	-1,462	-0,731	263	-2,78	0,008
T*F	-0,674	-0,337	0,215	-1,57	0,122

La figure IV.41 présente les paramètres de soudage I, T, F dans le cas A25 qui sont bien réparties suivant une loi normal concentrés autour de 5% à 95% pourcent et montre un bon accord entre le modèle mathématique donné par l'équation (2) et les données expérimentales.

Dans cet histogramme (figure IV.42) les résidus forment une courbe normale également répartie autour de zéro, ce qui montre que l'hypothèse de normalité est bien vérifiée. D'après le graphe de Pareto (figure IV.43), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 06 fois l'effet de la force F et 21 fois l'effet du temps. L'interaction (I-F) présente la même importance que la force seule. Donc le courant de soudage reste un paramètre primordial pour le soudage par points.

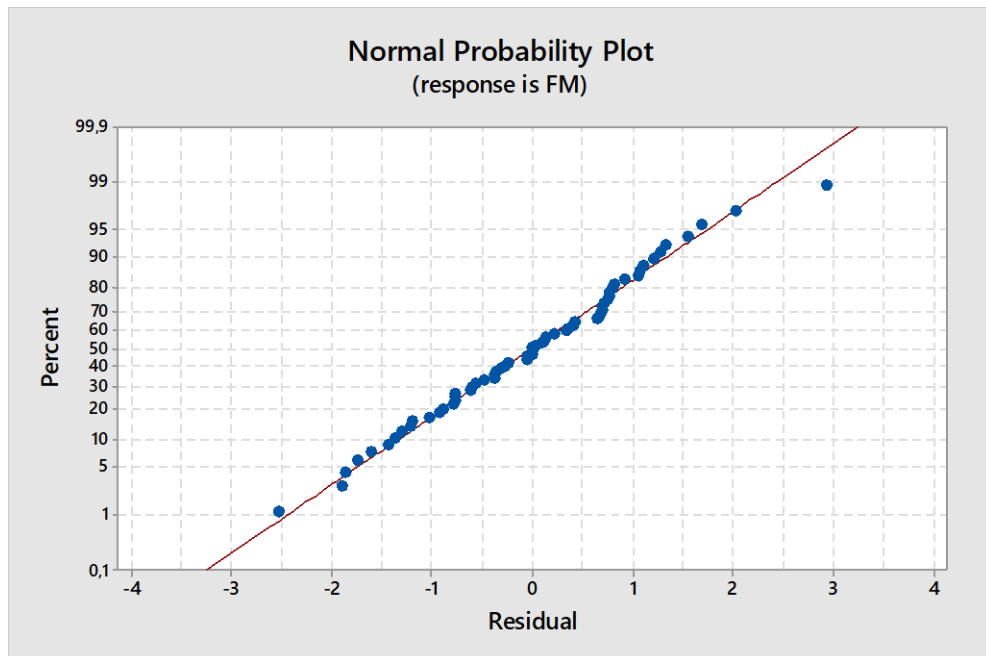


Figure IV. 41: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction calculée et celles obtenues expérimentalement pour A25

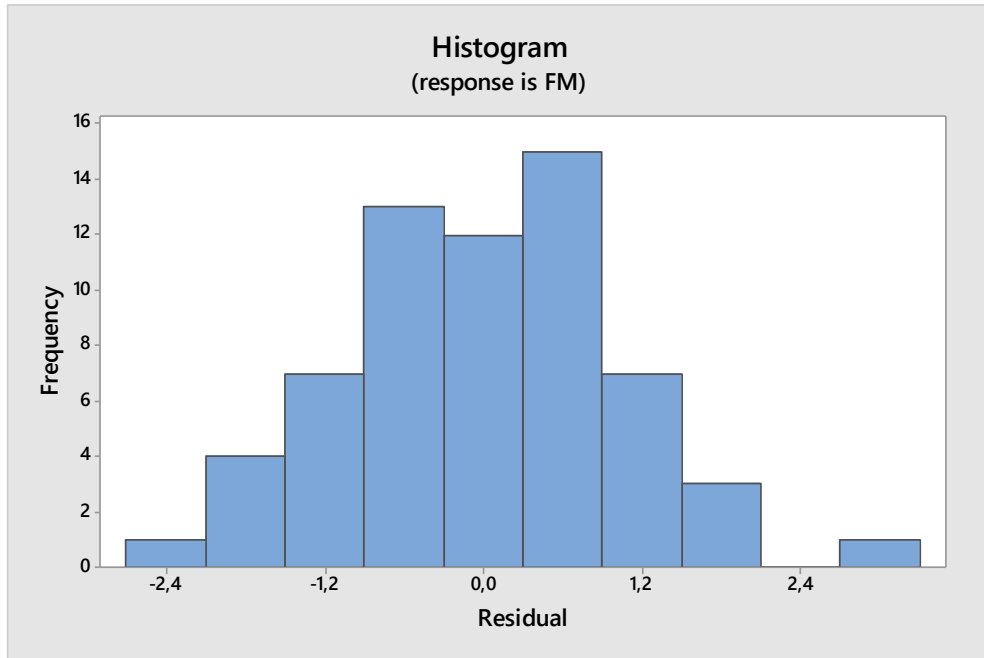


Figure IV. 42: Histogramme des résidus pour A25

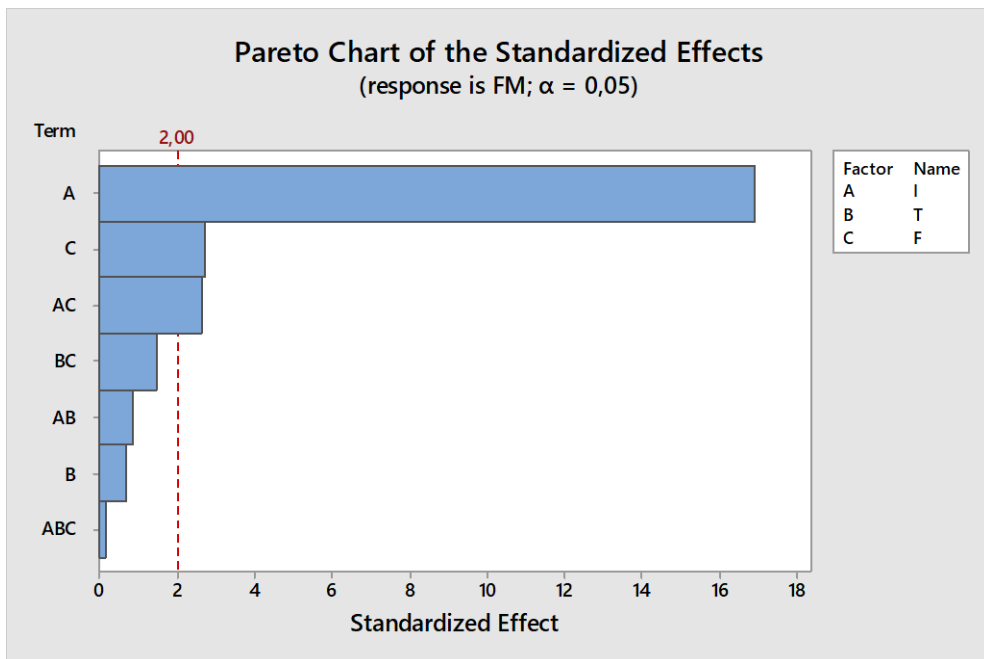


Figure IV. 43: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto A25

V.3. Modélisation et optimisation pour A 30 :

Le tableau IV.7 suivant montre les résultats expérimentales d'essais réalisés sur 63 cas possible en variant les paramètres de soudage I, T et F dans le cas d'une longueur de recouvrement de 30 mm "A30".

Tableau IV. 7: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 30 mm

I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	6	11	23,581	12	21,524	13	22,152
11			21,965		24,242		26,152
12			26,336		28,43		23,545
13			25,41		25,014		26,74
14			28,099		26,703		28,356
15			28,724		29,128		30,119
16			29,017		30,781		29,275
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	7	11	21,194	12	22,773	13	24,389
11			22,369		24,426		24,683
12			25,638		24,867		24,61
13			25,308		26,446		26,41
14			28,907		26,961		28,76
15			29,899		27,879		29,348
16			29,679		28,238		28,944
I	F	T	FM	T	FM	T	FM
10	8	11	26,336	12	25,3545	13	22,112
11			24,573		25,638		23,508
12			25,344		25,381		26,226
13			26,042		25,785		27,107
14			27,544		27,916		28,503
15			30,413		28,613		28,136
16			31,368		31,185		31,662

Dans ce cas, on a utilisé le principe de l'analyse de variance et les surfaces de réponse, afin de développer un modèle mathématique optimisé entre les paramètres de soudage (I, F, T) et la force de cisaillement par traction pour un recouvrement de 30 mm (A30). Les résultats statistiques obtenus par l'analyse de variance dans le cas d'un recouvrement A30 sont regroupés au tableau IV.8.

Tableau IV. 8: Analyse de variances A30

Source	DF	Adj SS	Adj MS	Valeur F	Valeur p
Model	9	351,242	39,027	27,08	0
I	1	340,621	340,621	236,39	0
T	1	0,213	0,213	0,15	0,702
F	1	4,309	4,309	2,99	0,09
I*I	1	0,274	0,274	0,19	0,664
T*T	1	0,122	0,122	0,08	0,773
F*F	1	3,363	3,363	2,33	0,133
I*T	1	0,05	0,05	0,03	0,852
I*F	1	0,243	0,243	0,17	0,683
T*F	1	2,048	2,048	1,42	0,238
Erreur	53	76,369	1,441		
Total	62	427,611			

R carré = 82.14 %
R carré ajusté = 79.11 %
R carré Prédit = 73.45 %

Tableau IV. 9: Résultats d'analyse de variances "A30"

Term Effect Coef		SE Coef	Valeur T	Valeur p	VIF
Constant		26,134	0,381	68,67	0
I	6,976	3,488	0,227	15,38	0
T	0,142	0,071	0,185	0,38	0,702
F	0,641	0,32	0,185	1,73	0,09
I*I	0,343	0,171	0,393	0,44	0,664
T*T	0,186	0,093	0,321	0,29	0,773
F*F	0,98	0,49	0,321	1,53	0,133
I*T	-0,104	-0,052	0,28	-0,19	0,852
I*F	-0,228	-0,114	0,278	-0,278	683
T*F	-0,541	-0,27	0,227	0,227	0,238

Les résultats statistiques obtenus par l'analyse de variance sont regroupés dans le tableau IV.8 qui récapitule les valeurs du modèles obtenus à la suite d'analyse factorielle par un modèle linéaire. et montre également les mesures d'adéquation R^2 , R^2 ajusté et R^2 prédit qui sont proches du 85%, ce pourcentage assure une bonne

convergence et indiquent une bonne adaptation du modèle. Le tableau IV.9 montre les résultats de l'analyse de variance avec toutes l'interaction possibles entre les trois Paramètres de soudage I, T et F qui ne donnent que le courant I et les principaux paramètres influant sur la force maximale de cisaillement par traction montré par la valeur $p=15,38$ et la force F en deuxième position $p=1,73$. L'interaction entre le temps T de soudage et la force F ne peut être considérée comme significative. En fonction de ces résultats statistiques, un modèle mathématique optimisé a été développé (équation 3) pour calculer la contrainte de traction sous l'effet de I.F.T, dans un cas de A30.

$$\sigma_{ct} = 19,7 + 1,14.I - 0,05.T - 2,80.F + 0,0190.I^2 + 0,0093.T^2 + 0,490.F^2 - 0,073.I.T - 0,0380.I.F - 0,270.T.F \quad (3)$$

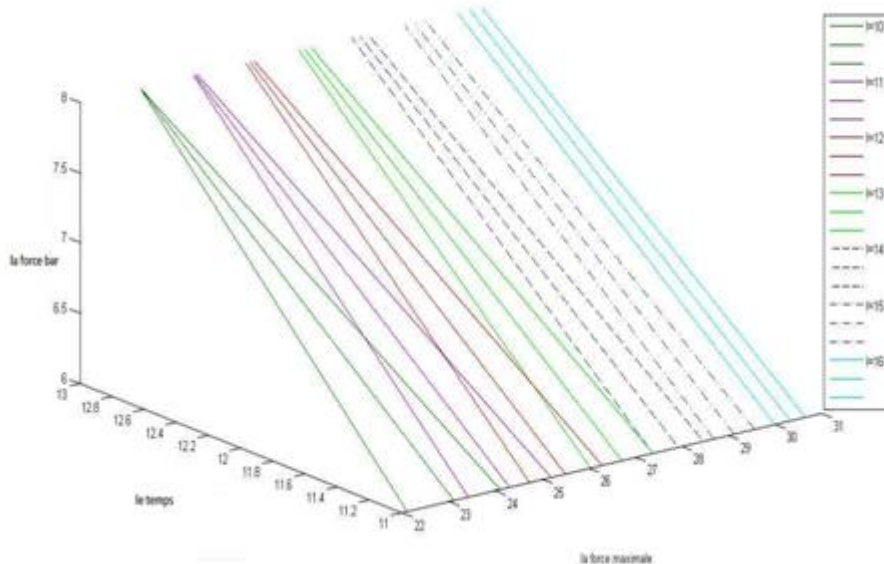


Figure IV. 44: Evolution de la force maximale de cisaillement par traction en 3D (I, T et F) pour A30

La figure IV.44 représente l'évolution de l'équation (3) en 3D de la force maximale de cisaillement par traction en fonction des paramètres de soudage I, F et T dans le cas d'une longueur de recouvrement de 30 mm "A30" afin de valider notre modèle (équation 3). Cette évolution confirme que le facteur le plus important est le courant du soudage "I" ensuite la force de l'électrode "F". Un phénomène aléatoire se présente sur l'évolution de la force maximale de cisaillement pour les courants de soudage I égales à 10, 11, 12 et 13 kA liés au temps de soudage. La figure IV.45 montre les effets les

paramètres de soudage I, T, F dans le cas A30 qui sont bien réparties suivant une loi normal concentrés autour de 5% à 95% pourcent et montre un bon accord entre le modèle mathématique donné par l'équation (3) et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture...

Dans cet histogramme (figure IV.46) les résidus forment une courbe normale également répartie autour de zéro, qui montre qu'un bon accord est observé entre le modèle mathématique obtenu pour la force maximale de cisaillement et les données expérimentales.

D'après le diagramme de Pareto (figure IV.47), on remarque que le facteur le plus important concernant les paramètres de soudage c'est l'intensité I, en suite la force F, après l'interaction entre l'intensité I et la force de soudage ensuite l'interaction entre les trois facteurs. On constate que l'impact de l'intensité I sur le soudage représente six fois de l'effet de la force F et dix fois de l'effet de l'interaction entre l'intensité I et la force de soudage et vingt fois de l'effet de l'interaction entre les trois facteurs (I, F et T).

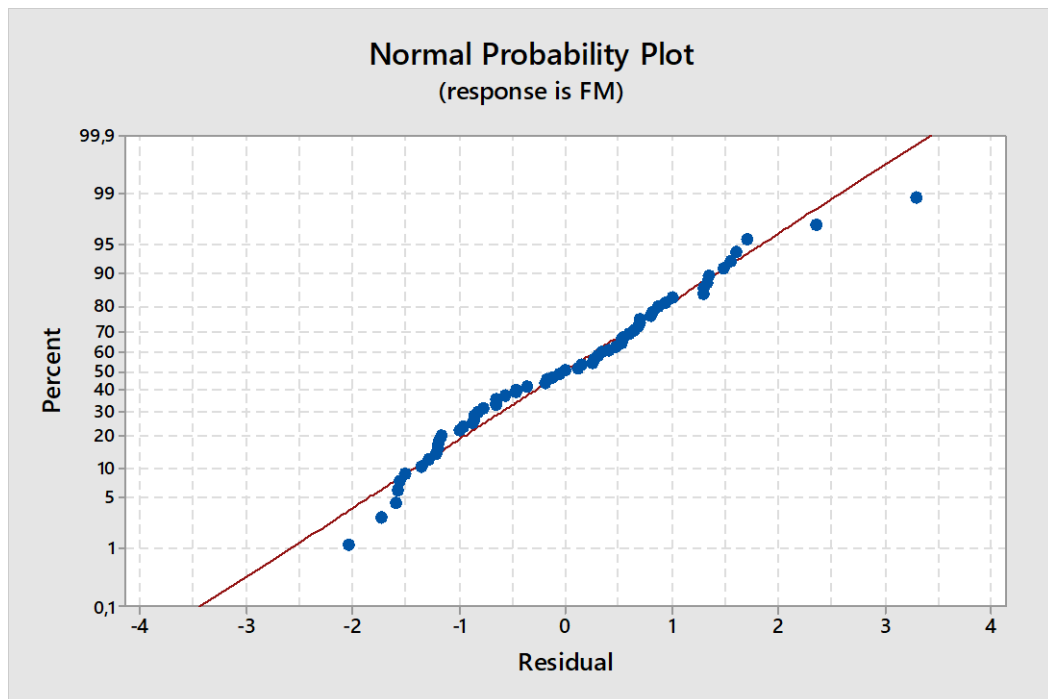


Figure IV. 45: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction calculée et celles obtenues expérimentalement pour A30

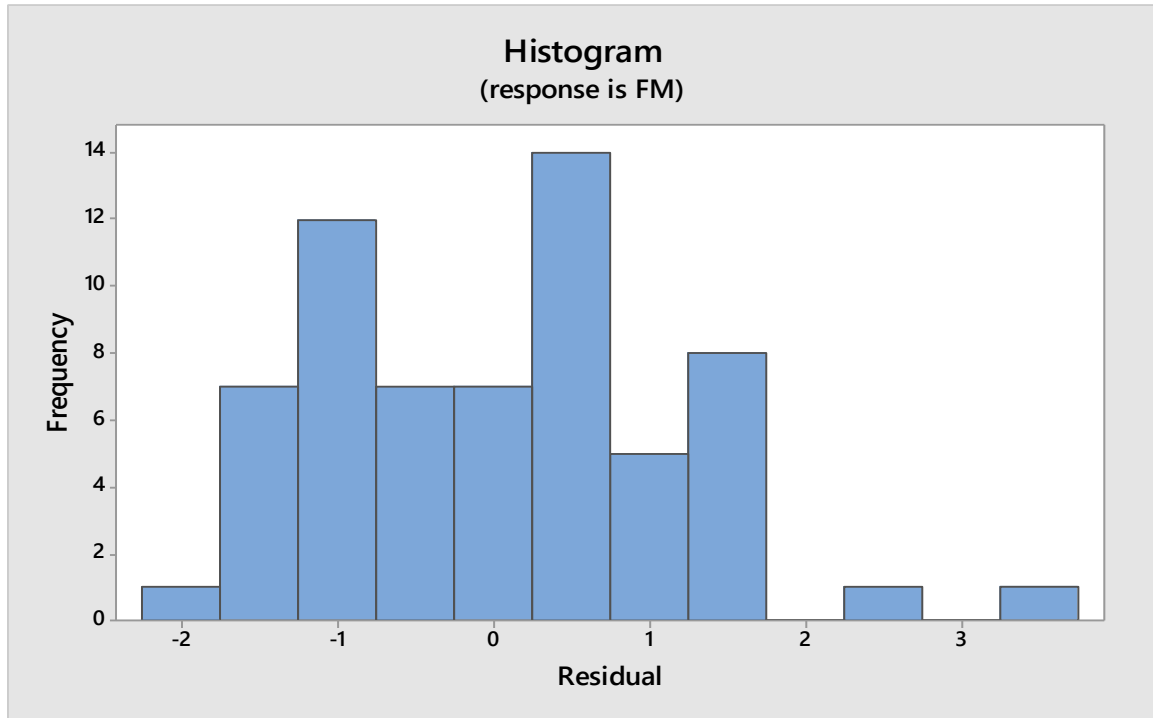


Figure IV. 46: Histogramme des résidus pour A30

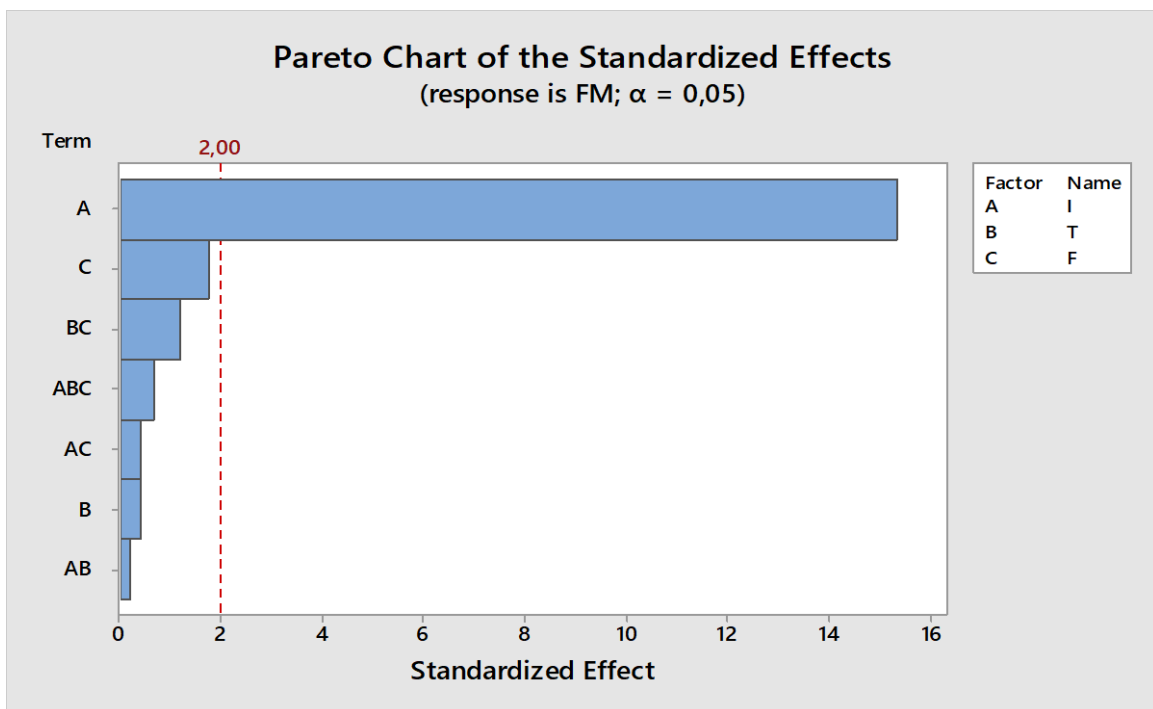


Figure IV. 47: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto "A30"

V.4. Couplage de la longueur de recouvrement et les paramètres de soudage

L'influence de la longueur de recouvrement est aussi prise en compte pour développer un modèle optimale de l'ensemble des variables (paramètres de soudage I, F et T) avec utilisation du principe de l'analyse de variance et les surfaces de réponse.

Le modèle mathématique optimisé lie les paramètres de soudage (I, F et T) et la force maximale de cisaillement de traction pour les trois recouvrement de A20, A25 et A30. Les résultats statistiques obtenus par l'analyse de variance sont regroupés dans le tableau IV.10.

Tableau IV. 10: Analyse de variances en couplage

Sorce	DF	Adj SS	AdjMS	Valeur F	Valeur p
Model	14	1202,97	85,93	59,77	0
Linear4		1175,31	293,83	204,38	0
A	1	0,49	0,49	0,34	0,56
I	1	1126,4	1126,4	783,48	0
T	1	2,3	2,3	1,6	0,208
F	1	40,66	40,66	28,28	0
Square	4	13,91	3,48	2,412	0,05
A*A	1	3,3	3,3	2,29	0,132
I*I	1	1,97	1,97	1,37	0,244
T*T	1	2,69	2,69	1,87	0,173
F*F	1	6,01	6,01	4,18	0,042
2-Way Interacion	6	17,45	2,91	2,02	0,065
A*I	1	0,09	0,09	0,06	0,805
A*T	1	0,11	0,11	0,08	0,784
A*F	1	5,31	5,31	3,69	0,056
I*T	1	2,87	2,87	1,99	0,16
I*F	1	5,55	5,55	3,86	0,051
T*F	1	3,39	3,39	2,36	0,127
Erreur	175	251,6	1,44		
Lack-of-Fit	174	2513,6	1,45		
Pure Erreur	1	0	0		
Total	189	1454,56			
R carré = 82.70 %					
R carré ajusté = 81.32 %					
R carré Prédit = 79.04 %					

En fonction de ces résultats statistiques, un modèle mathématique optimisé a été développé pour calculer la force maximale de cisaillement par traction sous l'effet de I, F, T et A.

$$\sigma_{ct} = 21,5 + 1,042.A + 1,87.I - 5,33.T + 0,28.F - 0,01119.A^2 - 0,0293.I^2 + 0,253.T^2 + 0,378.F^2 - 0,0026.A.I - 0,0071.A.T - 0,0500.A.F + 0,0748.I.T - 0,1041.I.F - 0,200.T.F \quad (4)$$

On remarque que les paramètres de soudage (I, F, T) dans le cas du couplage sont bien répartis selon la loi normale, ils sont concentrés autour de 5% et 95% sauf quelques points sont dispersés dus au problème de dispersion expérimentales et à la procédure de soudage et après la comparaison des résultats expérimentaux avec les valeurs de l'équation (4) du modèle données, un bon accord entre les résultats expérimentaux et les valeurs du modèle mathématiques est montré par la figure IV.48.

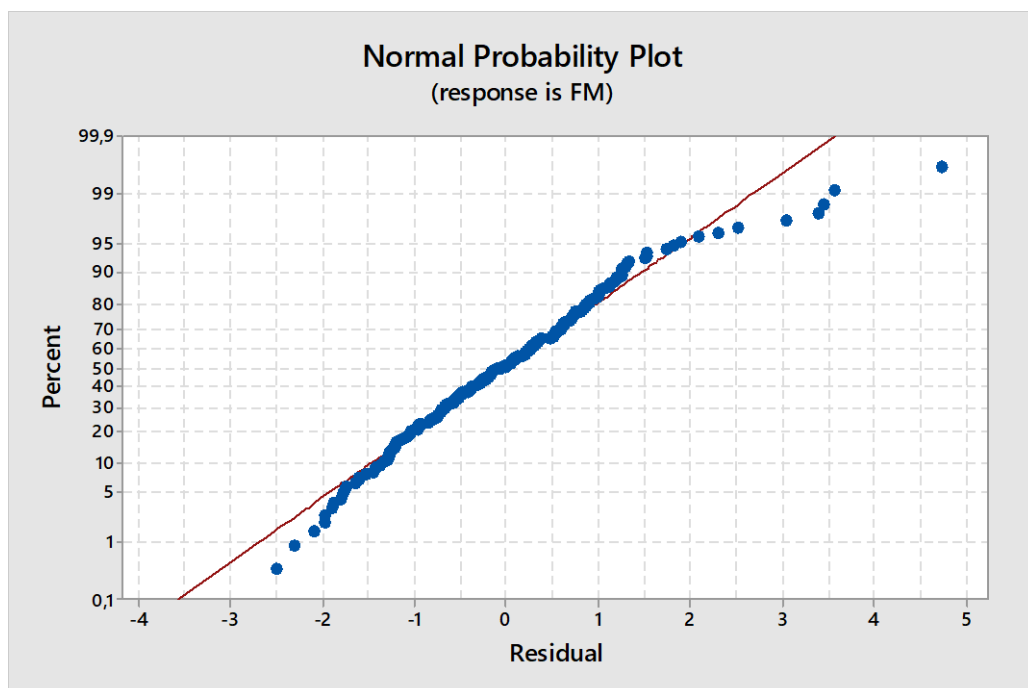


Figure IV. 48: Comparaison des forces maximales de cisaillement par traction et celles obtenues expérimentalement en couplage

D'après le diagramme de Pareto (figure IV.49), on remarque que le facteur le plus important concernant les paramètres de soudage est le courant de soudage I, ensuite la force F, suivi de l'interaction entre le courant I et la force de l'électrode soudage puis

l'interaction entre le recouvrement A et la force d'électrode. On constate que l'impact du courant de soudage I représente cinq fois l'effet de la force d'électrode F et dix fois l'effet de l'interaction entre le courant I et la force de l'électrode et de l'effet de l'interaction entre la longueur de recouvrement A et la force d'électrode. On remarque que le changement de la longueur de recouvrement "A" a une influence directe sur l'effet du courant de soudage et sur la force maximale de cisaillement par traction.

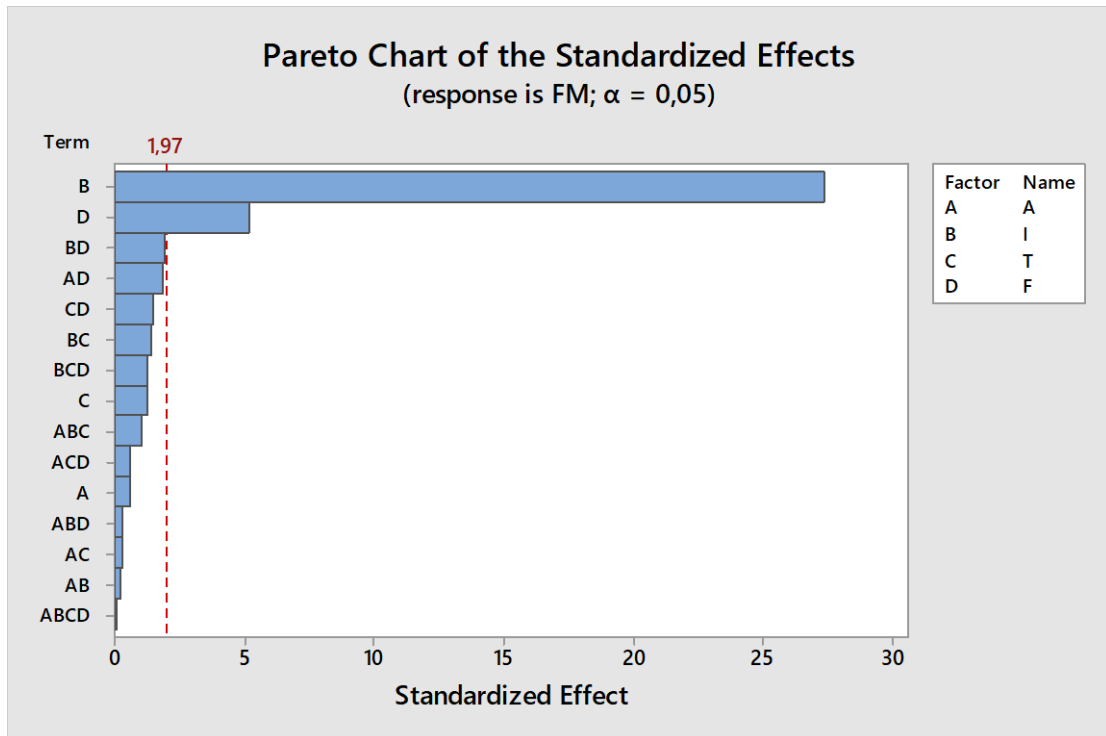


Figure IV. 49: Interactions des paramètres de soudage par la méthode Pareto en couplage

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé une analyse générale des résultats obtenus de la partie expérimentale afin de comprendre les effets des paramètres de soudage tels que le courant de soudage I (KA), le temps de soudage T (cycles), la force d'électrode F (bar) et même en ajoutant la variation de la longueur de recouvrement A sur le comportement mécanique des assemblages soudés par résistance par point à partir d'une analyse analytique complétée par une analyse statistique pour déterminer les effets des interactions entre les paramètres et déduire les paramètres optimaux.

Les résultats obtenus dans ce chapitre ont révélé les points suivants :

- Un grand effet du courant de soudage sur la géométrie du point de soudure (noyau) caractérisé par le diamètre et la profondeur ou l'augmentation du courant augmente la taille du noyau, tandis que l'effort et le temps de soudage présentent une faible différence sur la géométrie du noyau.
- Les essais de traction effectués sur l'ensemble des assemblages soudés par résistance par point montrent que le courant de soudage est le paramètre dominant par rapport au temps et à l'effort et à d'autres combinaisons sur l'évolution de la courbe charge /déplacement. Donc l'augmentation du courant de soudage augmente la force maximale de cisaillement.
- L'augmentation du courant de soudage I augmente la zone de déformation plastique des joints soudés.
- Le mode de rupture remarqué sur l'ensemble des éprouvettes est le mode déboutonnage ou la déchirure.
- L'analyse statistique a montré que l'effet des interactions entre les paramètres de soudage présente une faible influence par rapport au courant de soudage sur le comportement mécanique en force de traction par cisaillement.
- La longueur de recouvrement A (20,25 et 30 mm) présente une faible différence sur la force maximale de cisaillement.

Références chapitre IV

- A.K. Biradar, B.M. Dabade (2020). Optimization of resistance spot welding process parameters in dissimilar joint of MS and ASS 304 sheets. *Materials Today: Proceedings*, Volume 26, Part 2, pp. 1284-1288.
- Albu, A.F., Evtushenko, Y.G. & Zubov, V.I. (2022). Application of Second-Order Optimization Methods for Solving an Inverse Coefficient Problem in the Three-Dimensional Statement. *Proc. Steklov Inst. Math.* 317 (Suppl 1), S1–S15 (2022).
- Alhijawi, B., Awajan, A. (2023). Genetic algorithms: theory, genetic operators, solutions, and applications. *Evol. Intel.* (2023)
- Bae, JH., Park, YD., Lee, M. (2021). Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of AA3003 to Galvanized DP780 Steel Using Response Surface Methodology. *Int.J Automot. Technol.* 22, pp. 585–593.
- Dursun Özyürek, (2008). An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, vol. 29(3), pp 597-603.
- Deshmukh, D.D., Kharche, Y. Influence of processing conditions on the tensile strength and failure pattern of resistance spot welded SS 316L sheet joint. *Int J Interact Des Manuf* (2023). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01465-8>
- Gotardelo, D., Goliatt, L. Multi-objective optimization of portfolio selection involving non-convex attributes in an anti-fragile perspective. *Evolving Systems* (2023).
- Hessamoddin Moshayedi, Iradj Sattari-Far (2012). Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Issue 2, pp. 347-354.
- J. Valera, V. Miguel, A. Martínez, J. Naranjo, M. Cañas, (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.

- Kristianto Budiono Y, Martowibowo SY, (2017). Optimization of resistance spot welding process using response surface methodology and simulated annealing. *Manufacturing Technology*, vol. 17(4), pp. 434-440.
- Kaelo, P., Ali, M.M. (2006). Some Variants of the Controlled Random Search Algorithm for Global Optimization. *J Optim Theory Appl* 130, 253–264 (2006).
- Li, G., Zhang, X., Guo, H. et al. Real-Time Optimal Trajectory Planning for Autonomous Driving with Collision Avoidance Using Convex Optimization. *Automot. Innov.* 6, 481–491 (2023).
- L.A. Sarabia, M.C. Ortiz (2009). *Response Surface Methodology*, Editor(s): Steven D. Brown, Romá Tauler, Beata Walczak, *Comprehensive Chemometrics*, Elsevier, pp 345-390.
- Ruiz-Gazen, A., Marie-Sainte, S.L., Berro, A. (2010). Detecting Multivariate Outliers Using Projection Pursuit with Particle Swarm Optimization. In: Lechevallier, Y., Saporta, G. (eds) *Proceedings of COMPSTAT'2010*. Physica-Verlag HD.
- Shor, N.Z. The rate of convergence of the generalized gradient descent method. *Cybern Syst Anal* 4, 79–80 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF01073933>
- Shim, DS., Shim, J. A (2023). Modified Stochastic Gradient Descent Optimization Algorithm With Random Learning Rate for Machine Learning and Deep Learning. *Int. J. Control Autom. Syst.* 21, 3825–3831.
- Saadi Slami (2018). *Introduction à l'optimisation méta-heuristique : Cours, problèmes résolus et recueil des travaux pratiques*. Office des Publications Universitaires, Algérie.
- S.Sundaraselvan, N. Senthilkumar, T. Balamurugan, C. Kaviarasu, G.B. Sathishkumar, M. Rajesh (2023). Optimization of friction welding process parameters for Joining Al6082 and mild steel using RSM, *Materials Today: Proceedings*, Volume 74, Part 1, pp. 91-96
- Wei, Y., Hashim, H., Chong, K.L. et al. Investigation of Meta-heuristics Algorithms in ANN Streamflow Forecasting. *KSCE J Civ Eng* 27, 2297–2312 (2023).

Zuraidah Salleh, Yakub Md Taib, Nik Rozlin Nik Mohd Masdek, Farizah Adliza Ghazali (2019). Improvement of mechanical properties in treated spot welded joint. *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, Part 4, pp 1988-1993.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERAL

Le but de cette recherche est d'estimer expérimentalement et statistiquement l'influence des paramètres de soudage tel que le courant de soudage I, le temps de soudage T, la force d'électrode et même la longueur de recouvrement A .sur la tenue mécanique des assemblages soudé par résistance par point des aciers inoxydable 304L.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes peuvent être envisagées dans le cadre de l'étude ; la première partie regroupe la description des procédés de soudage par résistance par point.la deuxième partie un état de l'art des travaux liés aux assemblages soudés par point des aciers inoxydable est autres métaux, basé sur des essais expérimentaux de cisaillement par traction. Et des études statistique afin d'optimiser les effets combinés des paramètres de soudage.la dernière partie regroupe les différents résultats obtenus. Elle fait ressortir les conclusions suivantes :

- ✓ La géométrie ou le noyau du point de soudure caractérisé par le diamètre et la profondeur est affecté par le courant de soudage I. L'effort d'électrode F, le temps de soudage T et même la longueur de recouvrement A ont un faible effet sur la variation du diamètre et la profondeur du noyau du point de soudure contenant la ZAT.
- ✓ Les essais expérimentaux de cisaillement par traction effectués montrent que le courant de soudage est le paramètre le plus dominant sur la force maximale de cisaillement et sur l'évolution de la courbe charge / déplacement. Ou la force maximale de cisaillement augmente avec l'augmentation du courant de soudage I. du à l'augmentation de la zone de déformation plastique. (augmentation de la zone de fusion).
- ✓ Le mode de rupture remarqué sur l'ensemble des éprouvettes rompues sous la variation des paramètres de soudage (courant de soudage I 10 à 16 KA, la force d'électrode 6 à 8 bar et le temps de soudage de 11 à 13 cycles) et même la variation de la longueur de recouvrement ont révélé une séparation de forme déchirure ou déboutonnage ou la déchirure commence à partir de l'extérieur noyau.

- ✓ L'évolution de la force maximale de cisaillement en fonction des paramètres de soudage et la longueur de recouvrement à montrer que l'augmentation du courant de soudage augment la force maximale de cisaillement et en remarque que la force de cisaillement est supérieur pour un temps de soudage $T=13$ par rapport aux autres temps (11 et 12 cycles).
- ✓ La longueur de recouvrement A (20,25 et 30 mm) présente une faible différence sur la force maximale de cisaillement.
- ✓ L'analyse statistique à permet de conclure que les paramètres optimaux qui ont donné un max de la force de cisaillement étaient le courant de soudage $I=16\text{KA}$ le temps de soudage $T=13$ cycles et la force d'électrode $F=7$ bar.
- ✓ Les interactions entre les paramètres de soudage ont un faible effet sur le comportement de cisaillement par traction.

Perspectives

Les points suivant peuvent faire l'objet d'une continuité de cette thèse afin d'améliorer et approfondir les effets des paramètres de soudage sur le comportement mécanique des assemblages soudée par résistance par point :

- La simulation numérique du procédé de soudage par résistance par point.
- Une étude métallurgique et fractographique afin d'évaluer en détail les interactions des différents paramètres de soudage.
- Etude statistique par d'autres méthodes telles que la méthode Taguchi.