

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 Abou bakr Belkaïd-Tlemcen-

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire

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

En : Génie *Mécanique*

Spécialité: *Assemblages soudés et matériaux*

Par: M^{elle}. Soumia ELHADOURI

Sujet

*Optimisation des paramètres de soudage par points
de l'acier 304L par la méthode de Taguchi*

Soutenu publiquement, le : 17/ 06 / 2025, devant le jury composé de:

HADJOUI Féthi

Univ. Tlemcen

président

BENACHOUR Mustapha

Univ. Tlemcen

Encadreur

RAMDANI Mohammed

Univ. Tlemcen

Co-encadreur

RAHOU Mohammed

Univ. Tlemcen

Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remercîments

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 : **Ramdani Mohammed** Co-encadreur qui à participé à la direction de cette thèse.

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

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

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

Dédicace

À mes chers parents,

Pour tout l'amour, les sacrifices silencieux et les encouragements constants que vous m'avez offerts. Vous avez été ma première force, mon premier refuge, et les piliers sur lesquels j'ai bâti chaque étape de ma vie.

Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous.

À mes sœurs Fatima, Mériem, Safaa, et à mon frère Lokman,

Merci pour votre présence, vos sourires, votre patience et votre soutien. Vous avez toujours su trouver les mots justes pour me rassurer, me motiver ou simplement me faire rire dans les moments de doute.

À ma grand-mère Fatima Zohra,

Ta sagesse, ton amour discret mais profond, et ta bienveillance m'ont toujours accompagné. Tu es un repère dans ma vie, une mémoire vivante que je chéris profondément.

À mes amies Khadidja et Asmaa,

Merci pour votre amitié fidèle, vos éclats de rire partagés, vos encouragements et votre écoute. Ces moments de complicité resteront gravés dans ma mémoire comme des éclats de lumière.

Et à tous ceux qui me connaissent,

À ceux qui, par un mot, un geste, un regard, ont su m'apporter un peu de chaleur humaine sur ce chemin exigeant. Votre soutien, qu'il ait été discret ou manifeste, m'a aidé à aller plus loin.

Résumé

L'objectif de ce mémoire porte sur l'optimisation des paramètres du soudage par points, une technique largement utilisée en industrie automobile, l'aéronautique et l'électroménager pour l'assemblage des tôles. Le but principal est d'améliorer la qualité de l'assemblage à travers la résistance mécanique des assemblages en acier inoxydable 304L (épaisseur 2 mm) en optimisant les paramètres de soudage (courant, temps, force) en appliquant de la méthode de Taguchi. Cette méthode, fondée sur des plans d'expériences orthogonaux, permet de réduire le nombre d'essais tout en identifiant les facteurs les plus influents à l'aide du rapport signal/bruit (S/N) et de l'analyse ANOVA.

L'approche expérimentale a été conduite selon un plan L9, en évaluant l'effet de chaque paramètre sur la force de cisaillement par traction de joints par recouvrement. Les résultats montrent que le courant de soudage est le facteur dominant, suivi par le temps et la force. L'influence de la longueur de recouvrement a été également analysée (A20, A25, A30), affichant une variation modérée de la force maximale.

Des modèles de régression ont été établis pour prévoir la performance du soudage selon différentes combinaisons de paramètres. Cette étude démontre l'efficacité de la méthode de Taguchi pour améliorer la qualité des soudures et propose une approche rigoureuse pour optimiser les procédés de fabrication. Elle ouvre également des perspectives pour des études futures sur d'autres types de matériaux ou via des méthodes multicritères.

Mots clés : Optimisation, soudage par points, acier inoxydable 304L, méthode de Taguchi, rapport signal/bruit, ANOVA, force de cisaillement maximal, modélisation par régression.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين معاملات اللحام بالمقاومة النقطية، وهي تقنية مستخدمة على نطاق واسع في صناعات مثل السيارات والطيران والأجهزة المنزلية لتجميع الصفائح المعدنية. يتمثل الهدف الرئيسي في تحسين المقاومة الميكانيكية لتجميعات الفولاذ المقاوم للصدأ L304 (سمك 2 مم) عن طريق تحسين معاملات اللحام (التيار، الوقت، القوة) بتطبيق طريقة تاغوشي. تتيح هذه الطريقة، القائمة على تصميم التجارب المتعامدة، تقليل عدد الاختبارات مع تحديد العوامل الأكثر تأثيرًا باستخدام نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) وتحليل التباين (ANOVA).

تم إجراء النهج التجريبي وفقًا لتصميم L9، مع تقييم تأثير كل معامل على قوة القص الشدية لوصلات التراكب. تُظهر النتائج أن تيار اللحام هو العامل المهيمن، يليه الوقت والقوة. كما تم تحليل تأثير طول التراكب (A20، A25، A30)، حيث أظهر تباينًا معتدلاً في القوة القصوى.

تم وضع نماذج انحدار للتنبؤ بأداء اللحام وفقًا لمجموعات مختلفة من المعاملات. تُظهر هذه الدراسة فعالية طريقة تاغوشي في تحسين جودة اللحامات وتقتراح نهجًا صارمًا لتحسين عمليات التصنيع. كما تفتح آفاقًا لدراسات مستقبلية حول أنواع أخرى من المواد أو عبر طرق متعددة المعايير.

كلمات مفتاحية

اللحام بالمقاومة النقطية، تحسين، الفولاذ المقاوم للصدأ L304، طريقة تاغوشي، تصميم التجارب، نسبة الإشارة إلى الضوضاء، ANOVA، قوة القص القصوى، النمذجة بالانحدار.

Abstract

The objective of this thesis focuses on optimizing the parameters of spot resistance welding, a technique widely used in industries such as automotive, aerospace, and appliances for assembling sheet metal. The primary goal is to enhance the mechanical strength of 304L stainless steel assemblies (2 mm thickness) by optimizing welding parameters (current, time, force) using the Taguchi method. This method, based on orthogonal experimental designs, reduces the number of trials while identifying the most influential factors using the signal-to-noise ratio (S/N) and analysis by ANOVA.

The experimental approach was conducted using an L9 orthogonal array, evaluating the effect of each parameter on the shear strength of lap joints through tensile testing. Results indicate that welding current is the dominant factor, followed by time and force. The influence of overlap length (A20, A25, A30) was also analyzed, showing a moderate variation in maximum strength.

Regression models were developed to predict welding performance under different parameter combinations. This study demonstrates the effectiveness of the Taguchi method in improving weld quality and proposes a rigorous approach to optimize manufacturing processes. It also opens avenues for future studies on other material types or through multicriteria methodologies.

Key words: Optimization, Taguchi method, resistance spot welding, , stainless steel 304L, design of experiments, S/N ratio, ANOVA, Maximum shear strength, regression modeling, weld quality.

Liste des abréviations

RSW: Resistance Spot Welding

ZAT: Zone Affectée Thermiquement

ZF: Zone fondue

MB: Métal de base

SCZAT : Zone sub-critique

ICZAT : Zone inter-critique

CFZAT : Zone à grain fins

I : courant de Soudage (KA)

T : Temps de Soudage (Cycle)

F : Force de Soudage (bar)

A : Recouvrement (mm)

Som Car Ajust : Somme des carrés ajustés

CM ajust : carrés moyens ajustés

ANOVA : Analyse Of Variance

S/N : rapport signal/bruit

Liste des figures

Chapitre I : Notion générale sur le soudage par point

Figure I.1: Principe du soudage par points.....	16
Figure I.2: Différentes phases d'un cycle de soudage	17
Figure I.3: Microstructures générées par l'opération de soudage	21
Figure I.4: Courbes de traction pour différents types d'aciers inoxydable	24

Chapitre II: État de l'art sur l'optimisation des paramètres de soudage par la méthode Taguchi

Figure II.1: Graphique du rapport S/N pour la contrainte de traction et de cisaillement.....	29
Figure II.2 : Contribution de chaque paramètre	30
Figure II.3 : Graphique S/N pour le diamètre du noyau.	30
Figure II.4: Graphique S/N pour la résistance au cisaillement en traction.	31
Figure II.5: Macrographie typique des zones de soudure	32
Figure II.6: Montre influence des paramètres de soudage sur les valeurs moyenne S/N utilisé par la méthode de Taguchi	33
Figure II.7: Paramètre de processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction....	34
Figure II.8: Graphique d'interaction pour la force ultime	34

Chapitre III: Résultats et interprétations

Figure III.1: Fenêtre de logiciel.....	37
Figure III.2 : Choix de la méthode.....	38
Figure III.3 : Type de plan.	38
Figure III.4: Choix de plan.....	39
Figure III.5 : Saisie des niveaux	39
Figure III.6 : Introduction des paramètres de soudage.....	40
Figure III.7 : Méthode d'analyse	40
Figure III.8 : Méthode de régression.....	41
Figure III.9: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A30.....	44
Figure III.10: Histogramme des résidus pour A30	45
Figure III.11: Diagramme de Pareto des effets normalisés A30.	45
Figure III.12: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A30.....	47

Figure III.13: Histogramme des résidus pour A30.	47
Figure III.14: Diagramme de Pareto des effets normalisés A30.	48
Figure III.15: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction	49
Figure III.16: Diagramme des interactions pour FM.	49
Figure III.17: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A25.....	53
Figure III.18: Histogramme des résidus pour A25.	53
Figure III.19: Diagramme de Pareto des effets normalisés A25.	54
Figure III.20: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A25.....	56
Figure III.21: Histogramme des résidus pour A25.	56
Figure III.22: Diagramme de Pareto des effets normalisés A25.	57
Figure III.23: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction	58
Figure III.24: Diagramme des interactions pour FM.	58
Figure III.25: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A20.....	61
Figure III.26: Histogramme des résidus pour A20.	61
Figure III.27: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20.	62
Figure III.28: Contrainte de traction calculée par rapport aux valeurs expérimentales A20. ...	63
Figure III.29: Histogramme des résidus pour A20.	64
Figure III.30: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20%	64
Figure III.31: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction	65
Figure III.32 : Diagramme des interactions pour FM.....	66

Liste des tableaux

Chapitre I : Notion générale sur le soudage par point

Tableau I.1: Paramètres de soudage par résistance par points de l'acier inoxydable 304L (Guide de soudage par points : SOREMEP-Tlemcen)	24
--	----

Chapitre III: Résultats et interprétations

Tableau III.1: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 30 mm.....	43
Tableau III.2: Analyse des variances pour A30	43
Tableau III.3: Analyse des variances pour A30	46
Tableau III.4: Réponses pour les rapports signal/bruit	48
Tableau III.5: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 25 mm.....	51
Tableau III.6 : Analyse des variances pour A25	52
Tableau III.7: Analyse des variances pour A25	55
Tableau III.8: les réponses pour les rapports signal/bruit	57
Tableau III.9: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 20 mm.....	59
Tableau III.10: Analyse des variances pour A20	60
Tableau III.11: Analyse des variances pour A20	62
Tableau III.12 : Réponses pour les rapports signal/bruit	65

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Tables des Matières

Introduction générale

Chapitre I : Notion générale sur le soudage par point

I.	Soudage par résistance par points.....	15
I.1	Définition	15
I.1.1	Désignation du procédé	15
I.1.2	Effet joule.....	15
I.1.3	Principe	16
I.1.4	Déroulement de cycle de soudage par points.....	17
I.2	Avantages du soudage par points	18
I.3	Inconvénients du soudage par points.....	18
I.4	Paramètre de soudage par points	19
I.5	Formation du point de soudure.....	20
I.6	Soudabilité des aciers inoxydables	22
I.6.1	Aciers inoxydables austénitiques.....	22
I.6.2	Aciers inoxydables ferritiques.....	23
I.6.3	Aciers inoxydables martensitique.....	23
I.7	Comportement mécanique des aciers inoxydables	23
I.8	Influence des paramètres de soudage par points sur la résistance mécanique	25
I.9	Références chapitre I	26

Chapitre II: État de l'art sur l'optimisation des paramètres de soudage par la méthode Taguchi

II.	État de l'art sur l'analyse de la méthode de Taguchi en soudage	28
II.1	Analyse de la méthode de Taguchi appliquée au soudage par point	28
II.2	Analyse de la méthode de Taguchi appliquée à différents types de soudage	32
II.3	Références chapitre II.....	35

Chapitre III: Résultats et interprétations

III.	Introduction	37
III.1	Étapes de l'étude.....	37
III.2	Analyse de conception par la méthode Taguchi.....	42
III.3	Modélisation et optimisation pour A 30	42
III.3.1	Modèle linéaire I, F, T	43
III.3.2	Model linéaire avec dépendance F*T	46
III.4	Modélisation et optimisation pour A 25	51
III.4.1	Model linéaire I, F, T.....	51
III.4.2	Model linéaire avec dépendance F*T	54
III.5	Modélisation et optimisation pour A 20	59
III.5.1	Modèle linéaire I, F, T.....	60
III.5.2	Modèle linéaire avec dépendance F*T	62
III.6	Références chapitre III.....	67
	Conclusion générale	68

Introduction générale

Dans le domaine d'assemblages des pièces mécaniques, notamment les tôles, plusieurs méthodes sont utilisées, telles que le rivetage, sertissage, le soudage avec apport de métal, ainsi que le soudage par points. Ce dernier est largement employé dans divers secteurs industriels. Le soudage par points présente de nombreux avantages : il est rapide, économique, relativement simple à mettre en œuvre et bien adapté au soudage des aciers.

L'objectif du présent mémoire est d'optimiser les paramètres de soudage par points (courant, temps, effort de l'électrode) en utilisant la méthode de Taguchi afin de réduire le nombre de joints à soudé.

La méthode Taguchi est une technique d'optimisation expérimentale utilisée pour améliorer la qualité des procédés industriels. Elle repose sur l'utilisation de plans d'expériences orthogonaux permettant de réduire le nombre d'essais tout en analysant l'effet de plusieurs facteurs. Cette méthode utilise le rapport signal/bruit (S/N) pour identifier les paramètres les plus influents et garantir la robustesse du procédé. Elle permet ainsi de maximiser la performance tout en minimisant la variabilité.

Dans ce travail, les paramètres de soudage sélectionnés, sont applicable pour assures l'assemblage des plaques en acier inoxydable 304L d'épaisseur 2mm.

Le manuscrit comporte trois chapitres.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur le soudage par points par résistance est présentée. Le deuxième chapitre fait l'objet d'un état de l'art sur l'optimisation des paramètres de soudage par la méthode Taguchi et l'influence des paramètres de soudage sur le comportement mécanique. Une revue critique des travaux antérieurs met en lumière l'efficacité de la méthode Taguchi couplée à des plans d'expériences et à des outils statistiques (ANOVA, rapports S/N).

Enfin dans le troisième chapitre est réservé à la présentation et discussion des résultats obtenus. Il vise à optimiser les paramètres de soudage par points (courant, temps, force) pour maximiser la contrainte de cisaillement des assemblages, via la méthode Taguchi en appliquant le plan (L9) et des analyses statistiques (ANOVA, rapports S/N). Les résultats révèlent l'impact dominant du courant et les contributions marginales des interactions entre paramètres. L'approche permet de réduire les essais expérimentaux tout en identifiant les conditions optimales pour la résistance mécanique.



Chapitre I

Notions générales sur le soudage par point

I. Soudage par résistance par points

I.1 Définition

Le soudage par points est une technique d'assemblage localisé de deux tôles métalliques, exploitant l'effet Joule. Pour cela, les tôles sont comprimées entre deux électrodes (souvent en alliage de cuivre) à travers lesquelles circule un courant électrique de haute intensité. La chaleur générée par ce courant à l'interface des tôles provoque la fusion localisée du métal, formant, après refroidissement, un nucléole de soudure (point soudé).

I.1.1 Désignation du procédé

- * Française : SP (Soudage par Point)
- * Américaine: RSW
- * Numérique : 21

I.1.2 Effet joule :

Lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, la chaleur générée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps de circulation [1].

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

W : la quantité de chaleur générée (joule).

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

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

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

La résistivité(ρ) : C'est la capacité d'un matériau à résister au passage du courant électrique.

Elle est utilisée pour calculer la résistance des matériaux.

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

R : La résistivité de la pièce (Ohm)

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

L : longueur de la pièce (m)

S : section de la pièce (m²)

La résistance d'un métal augmente avec sa température :

$$R(T2) = R (T1). (1 + \alpha (T2 - T1)) \quad (3)$$

R : résistance (Ohm), T : température (k), α coefficient de température : (K⁻¹)

Le soudage par points est un procédé appartenant à la famille du soudage par résistance, au même titre que les méthodes par molette, par bossages ou en bout. Il est principalement employé pour assembler deux tôles métalliques. Il est à noter que ces tôles peuvent présenter des caractéristiques distinctes (composition chimique, revêtement de surface). L'origine de cette technique remonte à 1877, lorsque l'Américain Thomson imagina d'utiliser un courant électrique de forte intensité traversant l'assemblage pour générer, par effet Joule, la chaleur nécessaire à la fusion localisée du point de soudure. Depuis des décennies, ce procédé est le premier choix pour l'assemblage des carrosseries automobiles avec environ 4 000 points de soudure pour assurer sa solidité structurelle [2].

I.1.3 Principe

La figure I.1 illustre de manière schématique le principe du soudage par points : les deux pièces métalliques sont maintenues entre deux électrodes, permettant d'assurer un contact étroit à leur interface. Un courant électrique de très haute intensité est ensuite appliqué, provoquant la fusion localisée du matériau au point de contact entre les tôles. Cette zone fondue, appelée noyau de fusion, se solidifie lors du refroidissement, créant ainsi une liaison permanente entre les deux éléments [2].

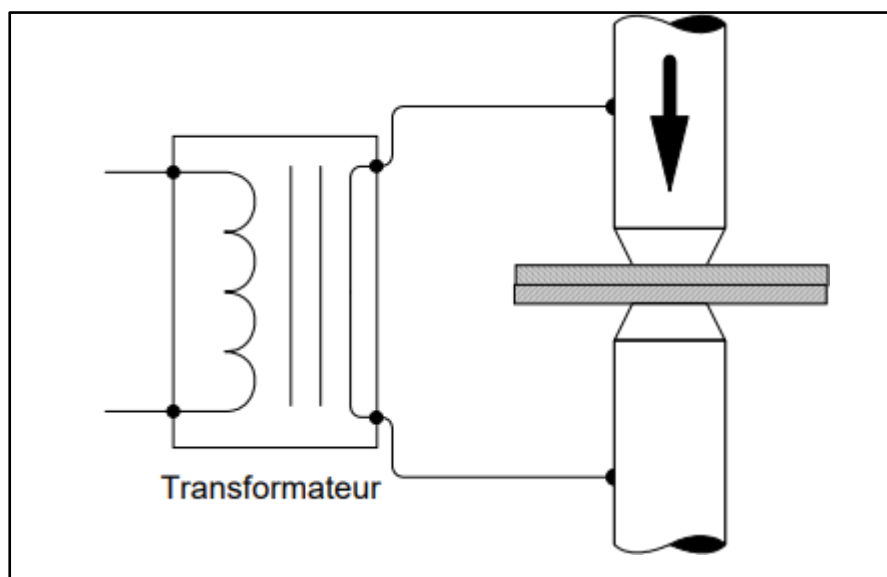


Figure I.1: Principe du soudage par points [3]

I.1.4 Déroulement de cycle de soudage par points

- * **Accostage** : Les électrodes se rapprochent pour assurer le contact des pièces à assembler au point de soudure prévu, sous un effort contrôlé. Dans les machines du CRDM, seule l'électrode supérieure est mobile, tandis que l'inférieure reste fixe. Cette phase s'achève lorsque l'effort mécanique nominal est atteint.
- * **Soudage** : Le passage du courant, activé par la fermeture du commutateur du circuit de puissance, génère un échauffement par effet Joule à l'interface des tôles, provoquant la formation d'une zone fondue.
- * **Forgeage** : L'effort mécanique est maintenu (sans courant) pour permettre au noyau fondu de se solidifier de manière contrôlée, tout en restant confiné entre les tôles.
- * **Remontée de l'électrode** : L'électrode mobile se rétracte, libérant les pièces assemblées. L'ensemble peut alors être déplacé pour réaliser un nouveau point de soudure.

Ces phases, ainsi que les variations de l'effort mécanique et du courant durant le cycle, sont montrés par la figure I.2.

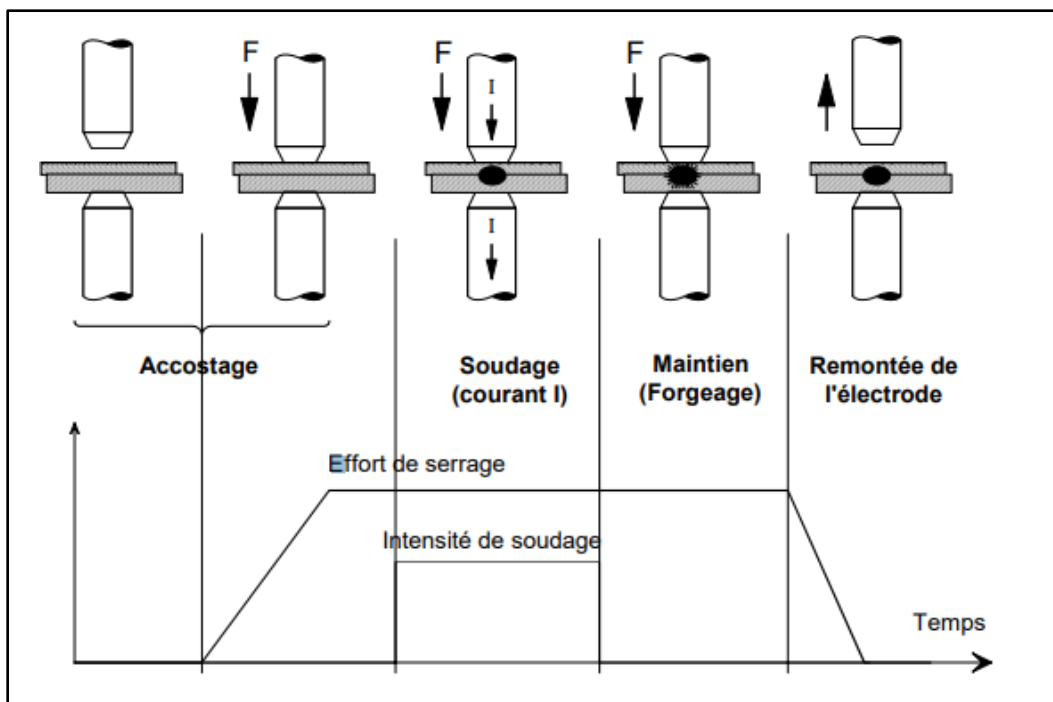


Figure I.2 : Différentes phases d'un cycle de soudage [3]

Les courbes d'effort et d'intensité illustrées ici sont présentées à titre qualitatif. En réalité, leurs variations ne suivent jamais une linéarité parfaite, car les valeurs mesurées sont perturbées par les fluctuations des résistances mécaniques et électriques durant le processus [4].

I.2 Avantages du soudage par points

*** Économique**

Cette méthode est peu coûteuse pour assembler des métaux minces, car elle nécessite très peu de matériau (pas de métal d'apport) et consomme moins de temps et d'énergie que d'autres procédés de soudage. Son efficacité réduit les coûts de production, notamment dans les industries à grande échelle.

*** Procédé rapide**

La rapidité du soudage par points est assurée par une impulsion électrique de courte durée (quelques millisecondes), qui fond localement les métaux pour les lier instantanément. Cette vitesse en fait un choix idéal pour les chaînes de montage intensives.

*** Processus propre**

Aucun gaz toxique, fumée ou déchet n'est généré pendant l'opération.

*** Assemblages robustes**

Les joints créés sont solides et durables, capables de résister à des contraintes mécaniques (vibrations, charges, etc.). La fusion localisée garantit une liaison homogène, essentielle pour des applications exigeantes comme l'automobile ou l'électronique.

I.3 Inconvénients du soudage par points

*** Applicabilité restreinte aux métaux fins**

Le procédé convient principalement aux matériaux de faible épaisseur. Pour les métaux épais ou les pièces volumineuses, la génération d'une chaleur suffisante pour fusionner le matériau devient complexe, limitant ainsi son utilisation dans ces contextes.

*** Exigence de conductivité électrique**

Seuls les métaux conducteurs (acier doux, acier inoxydable, aluminium, etc.) sont compatibles avec cette méthode. Les matériaux isolants (plastique, céramique) ou à faible conductivité ne peuvent pas être assemblés par cette technique.

*** Nécessité d'une expertise technique**

Bien que le soudage par points soit un procédé simplifié, la production de joints homogènes et robustes demande un certain savoir-faire. La qualité des assemblages dépend de

la précision des réglages (durée du courant, pression des électrodes) et de l'expérience de l'opérateur.

I.4 Paramètre de soudage par points

Les paramètres de soudage doivent être ajustés en fonction des propriétés des tôles à assembler. A titre d'exemple, des tôles plus épaisses demandent un apport énergétique plus élevé pour fondre une quantité de métal suffisante et générer un noyau de soudure de taille adéquate.

- * **Effort de soudage** : Premier paramètre à définir, il agit dès la phase d'accostage des tôles. La force appliquée (typiquement quelques centaines de daN pour des tôles < 1 mm) dépend des propriétés mécaniques et de l'épaisseur des matériaux. La courbe de mise en effort n'est pas linéaire et varie selon les spécificités de la machine utilisée.
- * **Courant de soudage** : Paramètre dominant, car son intensité (généralement entre 5 et 20 kA) influence l'énergie dissipée par effet Joule. Cette valeur dépend de l'épaisseur des tôles, de leurs propriétés mécaniques et de la présence éventuelle de revêtements. Un courant alternatif monophasé (50 Hz) est couramment utilisé, avec régulation électronique de la valeur efficace.
- * **Temps de soudage** : Directement lié à l'énergie électrique, il se situe généralement entre quelques dixièmes de seconde. Pour des durées prolongées, le temps est découpé en « pulsations » (phases actives) alternant avec des « temps froids ».
- * **Temps de forgeage** : Nécessaire à la solidification du noyau, sa durée est comparable à celle du temps de soudage.

La réalisation d'un point de soudure prend environ 1 à 2 secondes, ce qui rend le procédé compatible avec les cadences élevées requises dans l'industrie automobile. Chaque paramètre (effort, courant, durée) est donc optimisé pour garantir à la fois la qualité des assemblages et la productivité [2].

I.5 Formation du point de soudure

Après une opération de soudage par points, l'un des moyens d'examiner les noyaux créés consiste à réaliser une analyse métallographique sur une coupe transversale. Les observations révèlent trois zones distinctes (voir figure I.3) :

- **Zone fondue (ZF) :**
Région où l'acier a atteint ou dépassé sa température de fusion. Après refroidissement, sa microstructure adopte une structure colonnaire ou basaltique (typique d'une solidification rapide).
- **Zone affectée thermiquement (ZAT) :** Zone adjacente à la ZF, soumise à un gradient thermique important. Elle subit des transformations structurales (changements de phase, recristallisation) à l'état solide, sans fusion, en raison des cycles thermiques générés pendant le soudage.
- **Métal de base (MB) :** Partie non altérée par le procédé, car les températures atteintes y restent insuffisantes pour provoquer des modifications microstructurales. Sa structure originale est préservée.
- **Zone sub-critique (SCZAT) :** Température entre 600 °C et Ac1. Aucun changement de taille de grain, mais transformations métallurgiques possibles (ex. remise en solution partielle du carbone). Lors du refroidissement, précipitation-coalescence et phénomènes de revenu (martensite du MB) selon la vitesse de refroidissement.
- **Zone inter-critique (ICZAT) :** Température entre Ac1 et Ac3. Austénitisation partielle (ferrite α + austénite γ), induisant des modifications microstructurales significatives.
- **Zone à grains fins (CFZAT) :** Température entre Ac3 et ~1100 °C. Austénitisation complète (avec décalage possible d'Ac3 dû au cycle thermique rapide). Microstructure austénitique fine et hétérogène, transformée en bainite-martensite fine après refroidissement.
- **Zone à gros grains (GGZAT) :** Température entre ~1100 °C et le point de fusion. Croissance excessive des grains austénitiques, conduisant à une microstructure martensitique homogène post-refroidissement (trempabilité accrue).
- **Zone fondue (ZF) :** Température supérieure au liquidus. Microstructure dendritique après solidification, grossière au centre et plus fine en périphérie.

Impact mécanique : Ces modifications microstructurales autour du point soudé influencent directement ses propriétés mécaniques [5].

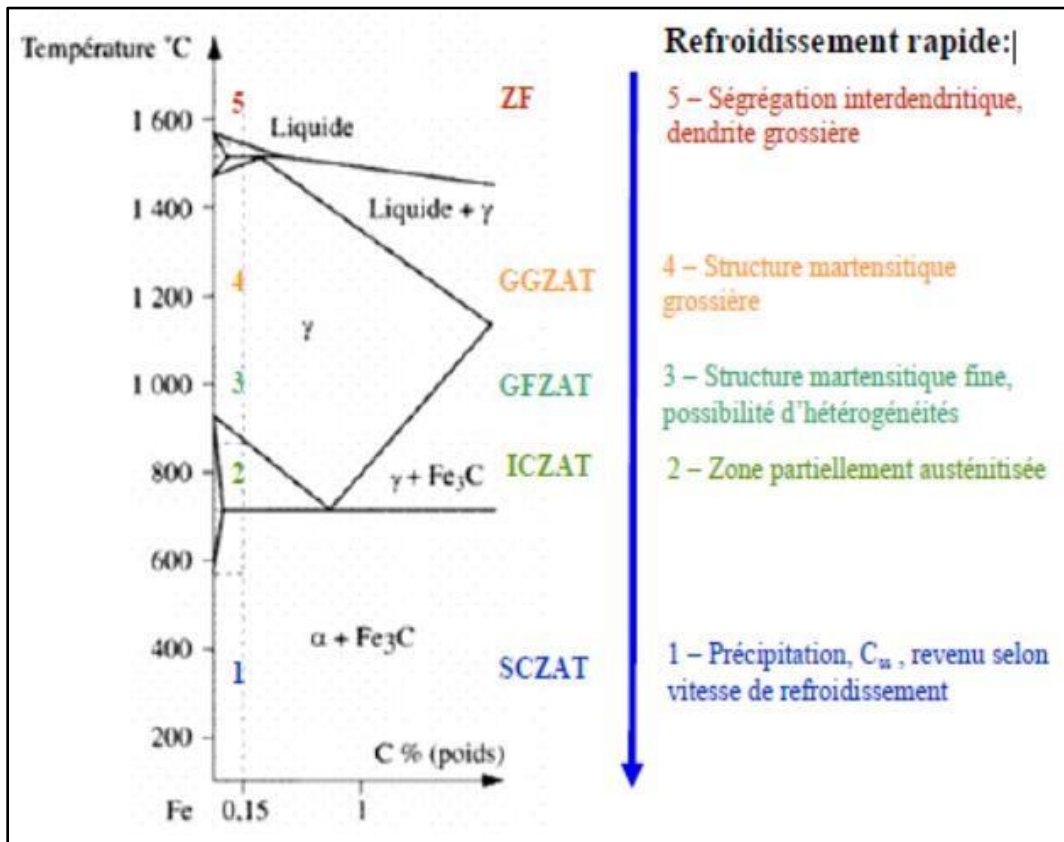


Figure I.3: Microstructures après l'opération de soudage [5].

I.6 Soudabilité des aciers inoxydables :

La capacité à souder les aciers inoxydables est influencée par divers éléments, tels que la composition chimique de l'acier, le procédé de soudage employé et les conditions dans lesquelles le soudage est réalisé. Ces aciers se divisent généralement en trois grandes catégories, selon leur structure cristalline et leur composition chimique : austénitiques, ferritiques et martensitiques. Voici quelques points à prendre en compte concernant la soudabilité de chacun de ces types :

I.6.1 Aciers inoxydables austénitiques :

Ces aciers sont les plus fréquemment utilisés et présentent une bonne capacité de soudage. Toutefois, 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. Pour atténuer ces problèmes, il est essentiel d'appliquer des techniques appropriées, telles que le contrôle des paramètres de soudage, l'utilisation de gaz de protection adaptés, ainsi que le préchauffage et le refroidissement contrôlé.

L'acier inoxydable austénitique est un type d'acier inoxydable qui se distingue par sa structure cristalline austénitique à température ambiante. Cette structure est non magnétique et offre une excellente résistance à la corrosion, ce qui en fait un matériau très prisé 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 améliorent également leur résistance aux températures élevées et aux environnements agressifs.

Parmi les aciers inoxydables austénitiques les plus répandus, on trouve les séries 300, comme le 304 et le 316, qui sont 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. Grâce à leur excellente résistance à la corrosion et à leur facilité de formage et de soudage, les aciers inoxydables austénitiques sont très polyvalents et trouvent une large application dans de nombreux domaines de l'ingénierie.

I.6.2 Aciers inoxydables ferritiques :

Ils sont souvent jugés plus faciles à souder que les aciers austénitiques, grâce à leur faible teneur en carbone et à leur structure cristalline. Toutefois, ils peuvent présenter une sensibilité à la fissuration à froid. Pour prévenir ce problème, il est essentiel de sélectionner des techniques de soudage adaptées.

I.6.3 Aciers inoxydables martensitique :

Ils sont généralement considérés comme les plus difficiles à souder en raison de leur forte teneur en carbone et de leur vulnérabilité à la fissuration pendant le refroidissement. Pour obtenir des soudures de qualité, il est souvent nécessaire d'utiliser des techniques spécifiques, telles que le préchauffage, le contrôle rigoureux des paramètres de soudage et l'emploi de métaux d'apport appropriés. Pour garantir une bonne soudabilité des aciers inoxydables, il est crucial de sélectionner avec soin les paramètres de soudage, d'appliquer des techniques appropriées, de choisir des métaux d'apport compatibles et, si nécessaire, de préchauffer les pièces à souder en fonction des exigences spécifiques de l'acier et du procédé de soudage utilisé. Le tableau I.1 présente un résumé des paramètres de soudage par points pour l'acier inoxydable austénitique 304L, qui sera au cœur de notre investigation expérimentale en fonction des différentes épaisseurs à souder. Cela permettra d'optimiser le processus et d'assurer des résultats de qualité.

I.7 Comportement mécanique des aciers inoxydables :

Le comportement mécanique des aciers inoxydables se réfère à la manière dont le matériau réagit lorsqu'une contrainte de traction est appliquée, entraînant soit une déformation, soit une rupture. Lorsque la contrainte est faible, la déformation est élastique, ce qui signifie que le matériau retrouve sa forme originale après le retrait de la contrainte. En revanche, lorsque la contrainte est élevée, le matériau subit une déformation plastique et ne peut pas retrouver sa forme initiale.

L'acier inoxydable austénitique 304L est particulièrement reconnu pour son comportement élasto-plastique. Bien qu'il présente des caractéristiques mécaniques relativement faibles, il se distingue par sa bonne ductilité, ce qui lui permet de se déformer sans se rompre. Cette propriété est essentielle dans de nombreuses applications où une certaine flexibilité est requise.

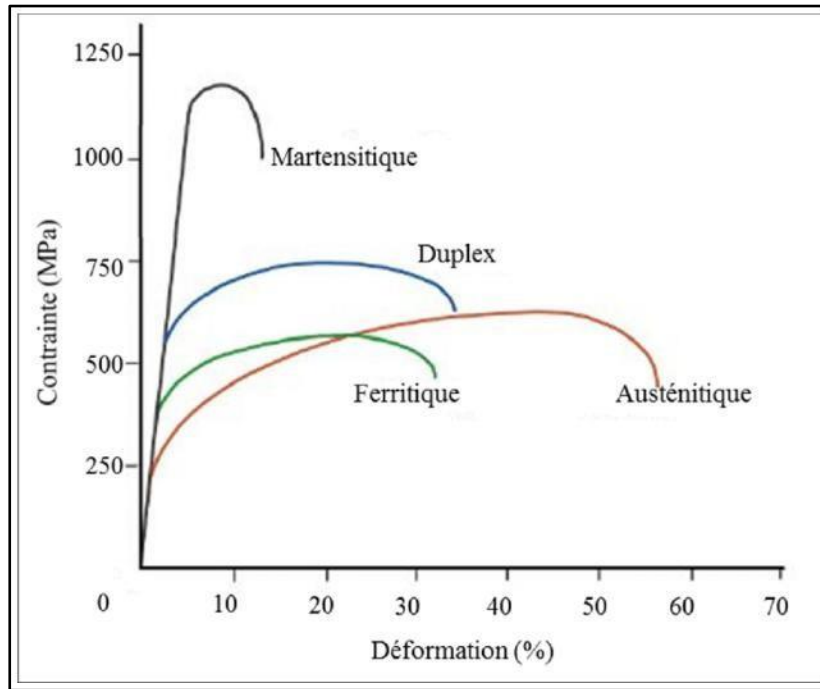


Figure I.4: Courbes de traction pour différents types d'aciers inoxydables [6]

Tableau I.1: Paramètres de soudage par résistance par points de l'acier 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

I.8 Influence des paramètres de soudage par points sur la résistance mécanique :

L'acier inoxydable 304L est un acier austénitique très répandu dans diverses applications industrielles grâce à sa résistance à la corrosion, sa facilité de soudage et sa polyvalence mécanique. Lorsqu'il est soudé par points, plusieurs facteurs peuvent influencer son comportement mécanique.

- **Zones affectées par la chaleur (ZAT) :** Lors du soudage par points, la chaleur générée par la résistance électrique au niveau du joint entraîne un cycle thermique rapide (chauffage et refroidissement) autour de la soudure. Cette exposition à des températures élevées, bien qu'inférieures au point de fusion, crée une **zone affectée thermiquement (ZAT)**. Les modifications microstructurales dans cette zone dépendent du matériau, de la température atteinte et de la vitesse de refroidissement, influençant ainsi les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion.
- **Formation de joints soudés :** Dans le soudage par points, les pièces sont assemblées grâce à la fusion localisée des matériaux à leurs surfaces de contact. La qualité du joint soudé, qui inclut son intégrité structurelle et sa résistance mécanique, est influencée par plusieurs facteurs : température, la durée du soudage, la pression exercée par l'électrode et l'intensité du courant de soudage.

I.9 Références chapitre I

- [1] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physique pour scientifiques et ingénieurs* (6e éd.). De Boeck Supérieur.
- [2] https://www.neurones.espci.fr/Theses_PS/MONARI_G/chapitre6.pdf (03/03/2025)
- [3] DJEBARA, Youcef. Homogénéisation numérique des nano composites. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université de Batna 2, 2017.
- [4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/soudage-par-resistance-b7720/soudage-par-points-b7720niv10002.html> (03/03/2025)
- [5] Dancette S, Fabregue D., Merlin J., Massardier-Jourdan V. Bouzekri M. (2007). *Welding of advanced high strength steels: Study of the microstructures obtained and damage mechanism during cross tension test*. Internal report 2007 7737 AUP.
- [6] https://www.researchgate.net/figure/courbes-contraintes-deformations-typiques-des-differents-types-daciens-inoxydables_fig1_355034316 (03/03/2025)



Chapitre II

***État de l'art sur l'optimisation
des paramètres de soudage
par la méthode Taguchi***

Ce chapitre présente un état de l'art sur l'optimisation des paramètres de soudage par points de l'acier 304L par la méthode de Taguchi.

II. État de l'art sur l'analyse de la méthode de Taguchi en soudage

II.1 Analyse de la méthode de Taguchi appliquée au soudage par point

Singh et al. [1] ont appliqué la méthode de Taguchi pour optimiser les paramètres de soudage par résistance par points (RSW) sur l'acier inoxydable austénitique AISI 301L. L'étude a utilisé un plan d'expériences basé sur une matrice orthogonale L32 avec quatre facteurs (courant de soudage, cycle de soudage, temps de maintien et temps de refroidissement) à deux niveaux chacun. Un modèle basé sur l'ANOVA a été proposé pour relier la qualité du point de soudure - caractérisé principalement par l'indentation, le diamètre du noyau et la résistance à la traction - aux paramètres de soudage. Les résultats ont montré que le cycle de soudage, ainsi que l'interaction entre le courant et le cycle de soudage, sont les facteurs les plus significatifs affectant l'indentation et la qualité globale des soudures.

Mahomet et al. [2] ont appliqué une méthode multi-objectif basée sur l'approche de Taguchi combinée à la méthodologie de surface de réponse (RSM) afin d'optimiser simultanément plusieurs paramètres de soudage par résistance par points (RSW), notamment le courant de soudage, le temps de soudage et le temps de maintien. L'optimisation visait à maximiser la taille du noyau de soudure tout en minimisant la zone affectée thermiquement (HAZ). Le plan d'expériences a été établi selon une matrice orthogonale L9. L'analyse de la variance (ANOVA) a permis d'identifier le courant de soudage comme le facteur ayant l'influence la plus significative (contribution de 73,91 %) sur la qualité du soudage. Des modèles prédictifs linéaires ont été développés via le RSM pour estimer la taille du noyau et la largeur de la HAZ avec un ajustement de R^2 supérieur à 90 %. Les tests de validation expérimentale ont confirmé l'efficacité du modèle et de l'approche d'optimisation multi-objective.

Lin et al. [3] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par points par résistance (RSW) sur des tôles d'acier à haute résistance utilisées dans l'industrie automobile. Un modèle combinant l'analyse de variance (ANOVA) et les réseaux de neurones artificiels a été proposé pour relier la résistance au cisaillement des joints de soudures aux paramètres de soudage, notamment le courant de soudage, le temps de soudage, la force électrode et la taille de l'embout d'électrode. Les résultats ont montré que le courant

de soudage et la taille de l'embout d'électrode influençaient de manière significative la résistance au cisaillement, le courant étant le facteur le plus déterminant. Le réseau de neurones a ensuite permis de raffiner l'optimisation au-delà des niveaux discrets explorés par la méthode Taguchi.

Muthu [4] a appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par points par résistance (RSW) pour l'assemblage de tôles en acier inoxydable AISI 316L. Un modèle basé sur ANOVA a été proposé pour faire la liaison entre la résistance au cisaillement en traction des joints soudés aux paramètres de soudage qui sont le diamètre de l'électrode, l'intensité du courant de soudage et le temps de chauffage. Les résultats ont montré que le diamètre de l'électrode influence principalement la résistance au cisaillement, suivi du courant de soudage, tandis que le temps de chauffage a une influence moindre.

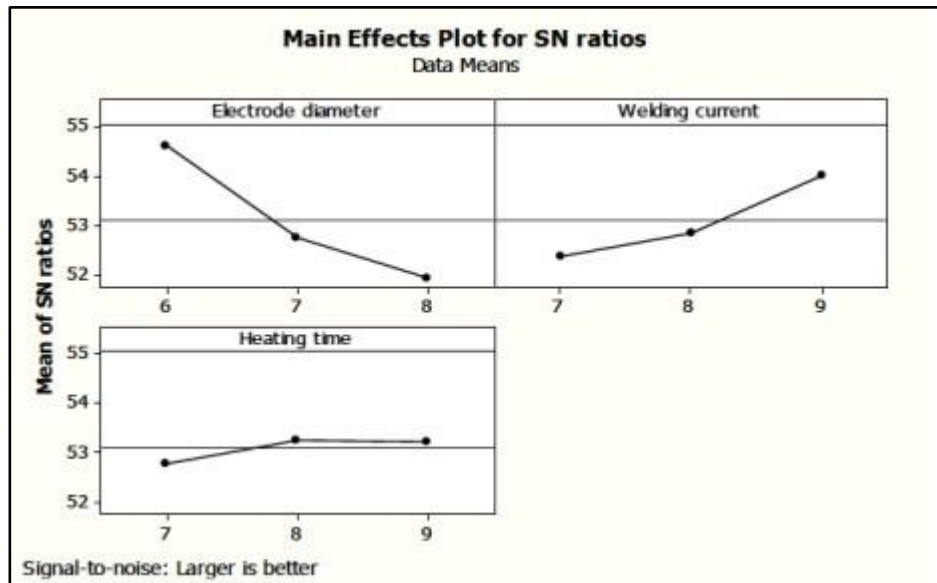


Figure II.1: Graphique du rapport S/N pour la contrainte de traction et de cisaillement

Récemment, **Nguyen et al. [5]** ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par points par résistance (RSW) pour l'assemblage hétérogène entre l'alliage d'aluminium AA6061-T6 et l'acier doux SS400. Un modèle basé sur l'analyse de variance (ANOVA) a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés - notamment la résistance au cisaillement ultime - aux paramètres de soudage. Les résultats ont montré que le courant de soudage influence principalement la résistance au cisaillement, tandis que le temps de soudage et la force d'électrode jouent un rôle secondaire.

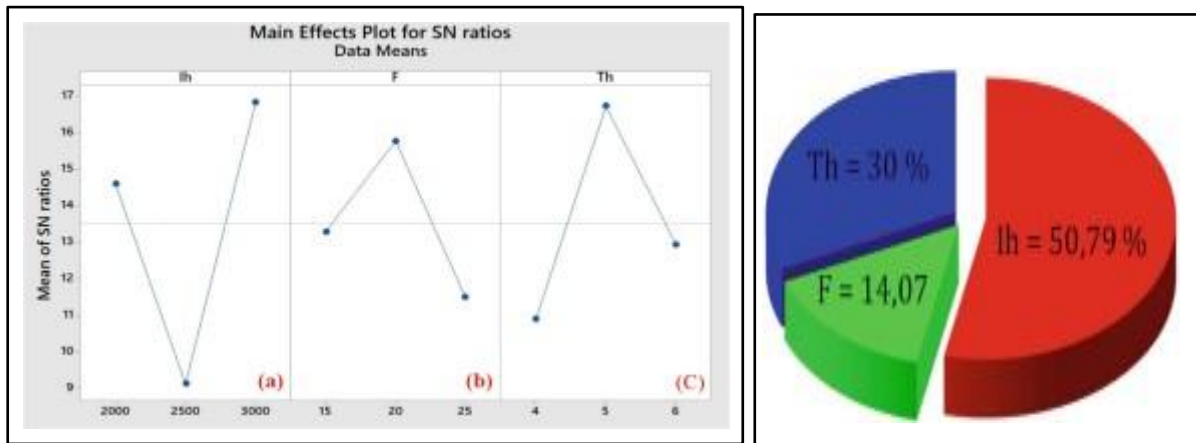


Figure II.2 : Contribution de chaque paramètre.

Thakur et al. [6] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par RSW pour l'assemblage de tôles en acier galvanisé. Un modèle basé sur l'analyse ANOVA a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés - diamètre du noyau et résistance au cisaillement - aux paramètres de soudage que sont le courant de préchauffage, le temps de serrage, le courant de soudage, le temps de soudage, le temps de maintien et la pression exercée par l'électrode. Les résultats ont montré que le courant de soudage influence principalement à la fois la résistance au cisaillement et le diamètre du noyau, tandis que le temps de maintien et le courant de préchauffage ont des effets moindres.

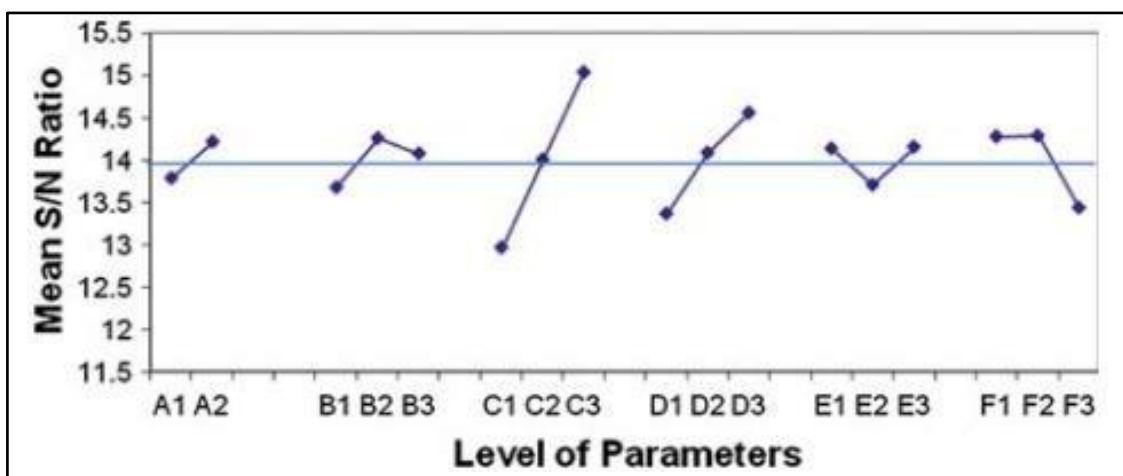


Figure II.3 : Graphique S/N pour le diamètre du noyau.

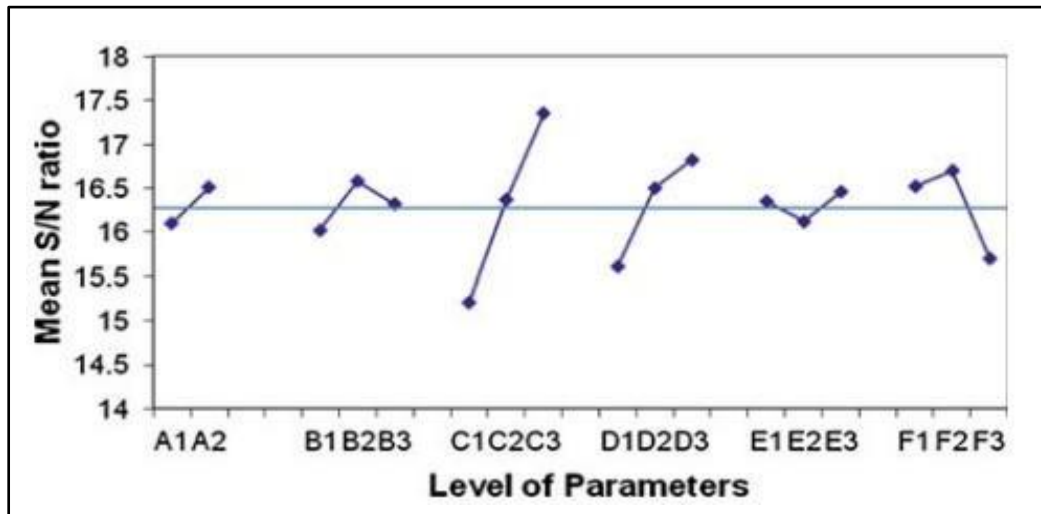


Figure II.4: Graphique S/N pour la résistance au cisaillement en traction.

Shaik Shafee et al. [7] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres du soudage par RSW pour l'assemblage de tôles d'acier doux laminées à froid de différentes épaisseurs (0,8 mm et 1,0 mm). Un modèle basé sur ANOVA a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés - résistance au cisaillement et résistance en traction directe - aux paramètres de soudage que sont la force d'électrode, le courant de soudage et le temps de soudage. Les résultats ont montré que le courant de soudage influence principalement la résistance au cisaillement, Alors que le temps de soudage est le facteur déterminant pour la résistance en traction directe.

Ghazali et al. [8] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par résistance par points (RSW) pour l'assemblage de tôles en acier doux. Un modèle basé sur ANOVA et la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés - taille de la zone fondue (FZ), taille de la ZAT et la charge de cisaillement par traction - aux paramètres de soudage par RSW. Les résultats ont montré que le courant de soudage influence principalement la qualité des soudures, avec une contribution de 68,68 %, tandis que la force de l'électrode et le temps de soudage ont des influences moindres.

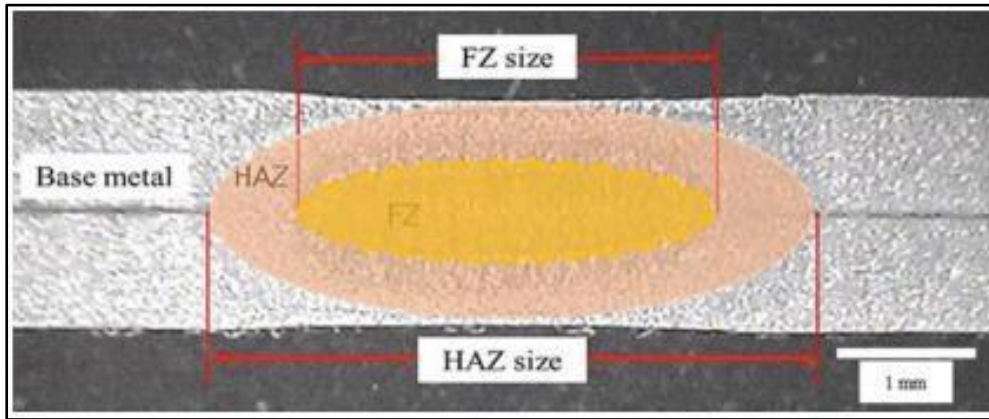


Figure II.5: Macrographie typique des zones de soudure.

II.2 Analyse de la méthode de Taguchi appliquée à différents types de soudage

Tesfaw et al. [9] ont appliqué la méthode de Taguchi pour optimiser les paramètres du soudage MAG (Metal Active Gas) sur des plaques en acier doux mort, utilisées dans l'industrie automobile. Ils ont étudié l'effet de quatre de soudage - la tension de soudage, le courant de soudage, la vitesse d'avance du fil et le débit de gaz - chacun à trois niveaux. Un plan d'expérience basé sur une matrice orthogonale L9 a été utilisé. L'analyse ANOVA et le calcul du rapport signal/bruit (S/N) ont permis de déterminer que le courant de soudage avait l'influence la plus significative sur les duretés des soudures, suivi de la vitesse d'avance du fil et du débit de gaz. Le voltage avait l'effet le plus faible. L'augmentation du courant et du débit de gaz ont amélioré les qualités, tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance du fil les réduisait. L'optimisation a conduit à un notable de la qualité des soudures, confirmée par des expériences de validation.

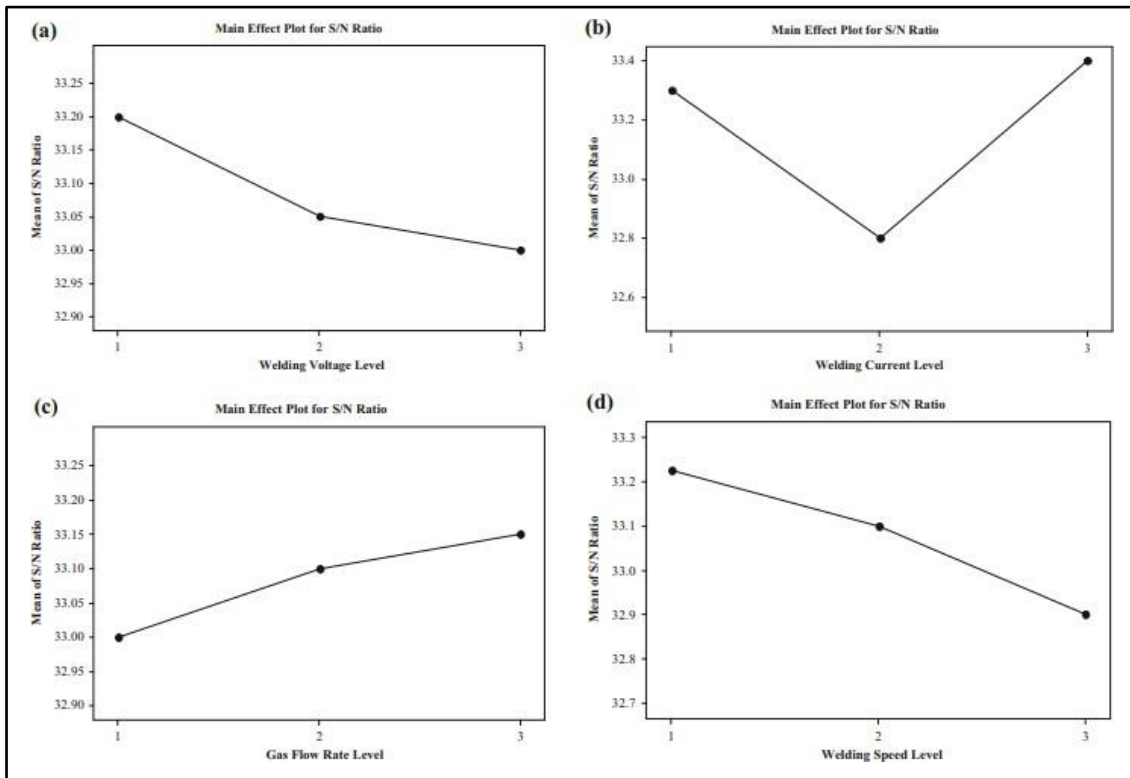


Figure II.6: Influence des paramètres de soudage sur les valeurs moyenne S/N utilisé par la méthode de Taguchi

Jagtap et Raut [10] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres du soudage à l'arc sous gaz avec fil électrode (GMAW ou MIG) pour l'assemblage de tôles en acier doux laminé à chaud IS 1079 HR 2. Un modèle basé sur ANOVA a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés- en particulier la résistance à la traction - aux paramètres de soudage que sont l'intensité du courant, la tension de soudage et le débit du gaz de protection. La tension de soudage affecte principalement la résistance à la traction du joint soudé, suivie par le débit de gaz, tandis que le courant de soudage a un effet plus modéré.

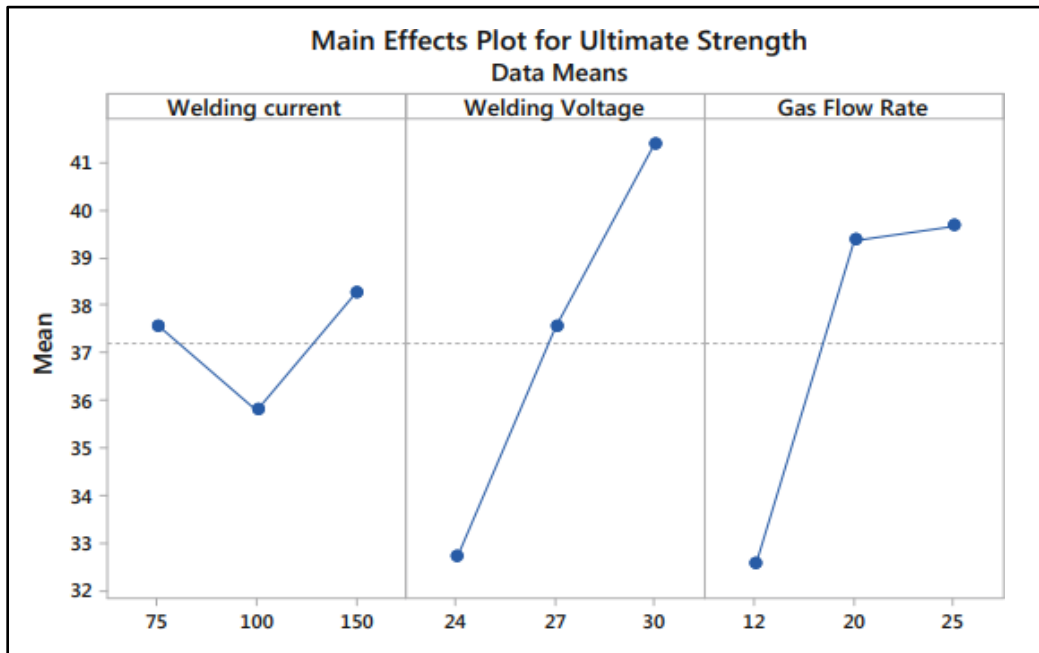


Figure II.7: Paramètre de processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction

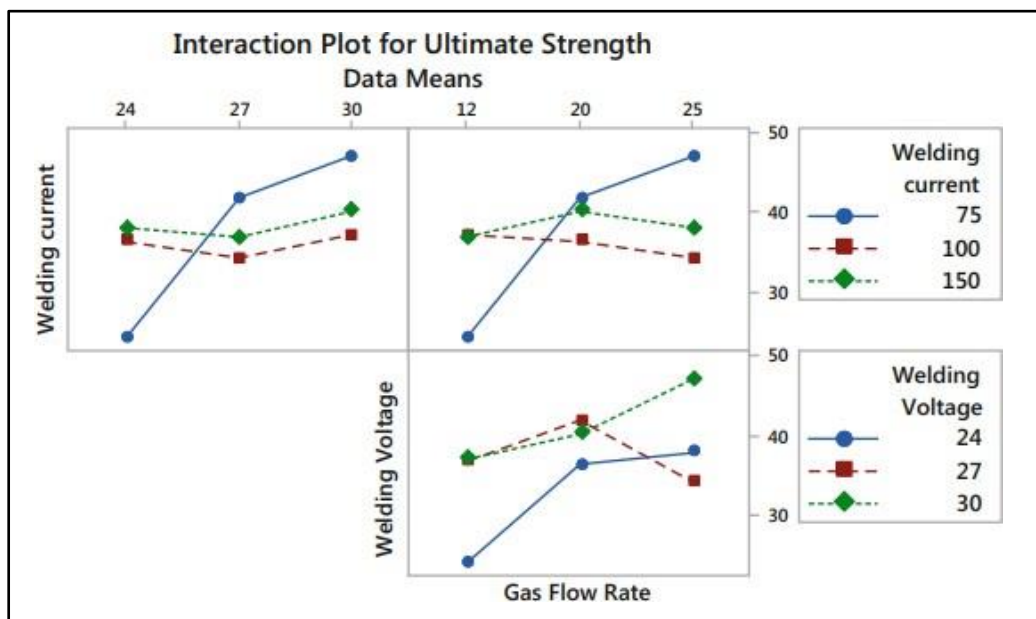


Figure II.8: Graphique d'interaction pour la force ultime

Shunmugasundaram et al. [11] ont appliqué la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de soudage par friction malaxage (FSW) pour l'assemblage hétérogène des alliages d'aluminium AA5383 et AA7075. Un modèle basé sur ANOVA et la régression linéaire a été proposé pour relier les propriétés mécaniques des joints soudés - résistance à la traction, résistance à l'impact et finitions - aux paramètres de soudage qui sont la vitesse de rotation de l'outil, l'avance et l'angle d'inclinaison. Les résultats ont montré que la vitesse de rotation influence principalement la résistance à la traction et les duretés, tandis que l'angle d'inclinaison est déterminant pour la résistance à l'impact.

II.3 Références chapitre II

- [1] Niranjan Kumar Singh, Y(2012). Application of Taguchi method for optimization of resistance spot welding of austenitic stainless steel AISI 301L.
- [2] Mahomet (2012). Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM. *Journal des sciences Mécaniques et de la Technologie*, 26(8), 2365–2370
- [3] Lin, H.-L., Chou, T., & Chou, C.-P. (2007). Optimization of Resistance Spot Welding Process Using Taguchi Method and a Neural Network. *Experimental Techniques*, 31(5), 30–36.
- [4] Muthu, P. (2019). Optimization of the process parameters of resistance spot welding of AISI 316L Sheets Using Taguchi Method. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 23, pp. 64-69.
- [5] Nguyen, V. N., Le, V. T., Nguyen, M. T., & Dinh Thi, T. L. (2022). Optimization of the Resistance Spot Welding Parameters for Aluminum - Steel Weld Joint by Using the Taguchi Method. In: Long, B.T. (eds) *Advances in Mechanical and Automation Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.
- [6] Thakur, A. G., & Nandedkar, V. M. (2014). Optimization of the Resistance Spot Welding Process of Galvanized Steel Sheet Using the Taguchi Method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 1171–1176.
- [7] Shaik Shafee, B. Balu Naik, K. Sammaiah (2015). Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method, *Materials Today: Proceedings*, Volume 2, Issue 4-5, pp. 2595-2604.
- [8] Ghazali, F. A., Salleh, Z., Manurung, Y. H. P., Taib, Y. M., Hyie, K. M., Ahamat, M. A., & Ahmad Hamidi, S. H. (2019). Three Response Optimization of Spot-Welded Joint Using Taguchi Design and Response Surface Methodology Techniques. In: M. Awang (ed.), *The Advances in Joining Technology*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Singapore.
- [9] Tesfaw, T., Singh, AP, Gezahegn, A. (2021) Optimization of MAG welding process parameters using Taguchi design method on dead mild steel used in automotive industry. *Proceedings of International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
- [10] Jagtap, M. D., & Raut, N. (2019). Parametric Optimization of MIG Welding on IS 1079 HR 2 by Taguchi Method. In: Vasudevan, H. et al. (eds), *Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.
- [11] Shunmugasundaram, M., Nagarajan, SM, Reddy, Y., Chaurasiya, PK, Kumar, A., et Rajak, U. (2022). An Experimental Study and Joining Parameters Optimization of Friction Stir Weld Butt Joint by Taguchi Approach to Maximize the Mechanical Properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 8601–8615.



Chapitre III

Résultats et interprétations

III. Introduction

Ce chapitre s'inscrit dans le but d'optimiser les paramètres de soudage par points pour garantir la qualité et la résistance mécanique des assemblages métalliques. L'objectif principal est d'analyser l'influence de trois paramètres clés à savoir le courant de soudage (I), le temps de soudage (T) et la force d'électrode (F) sur la contrainte maximale de cisaillement par traction, un indicateur déterminant de la performance des joints soudés. Pour ce faire, la méthode Taguchi a été privilégiée en raison de sa capacité à réduire la variabilité expérimentale tout en explorant efficacement l'espace des paramètres.

La démarche adoptée repose sur l'utilisation du logiciel Minitab19 pour générer des plans orthogonaux, notamment le plan L9 (3 facteurs à 3 niveaux), permettant de structurer 9 essais expérimentaux. Ces essais ont été complétés par des analyses statistiques rigoureuses, incluant l'analyse de variance (ANOVA), les rapports signal-bruit (S/N) et des modèles de régression linéaire, afin d'identifier les contributions relatives des paramètres et leurs interactions potentielles.

III.1 Étapes de l'étude

Les étapes de travail effectuées pour l'étude d'optimisation se résument comme suit on utilise logiciel Minitab19 :

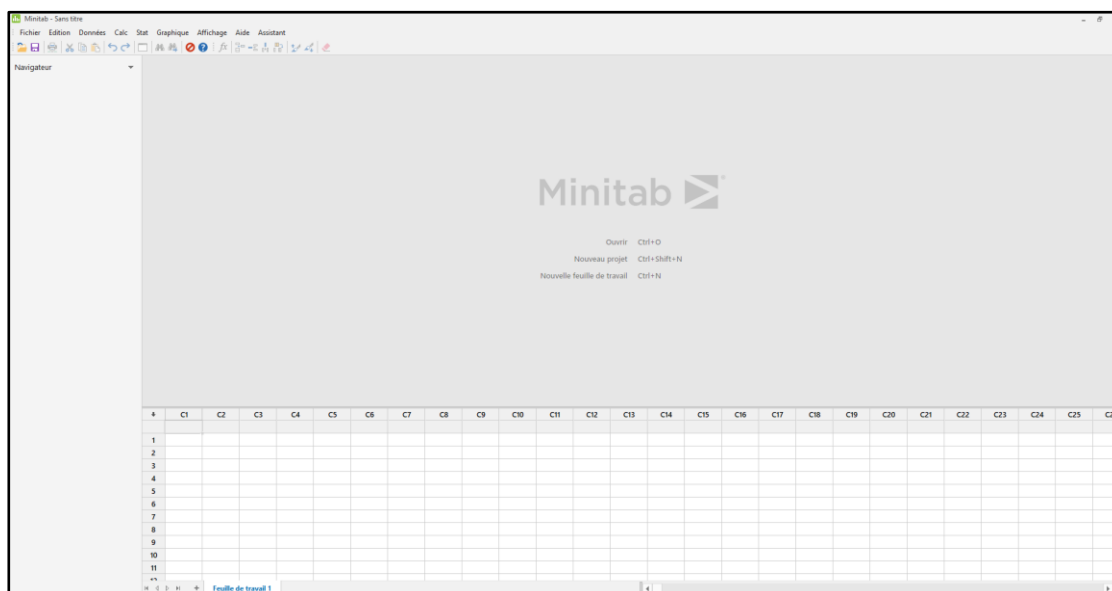


Figure III.1: Fenêtre de logiciel.

Sélectionnez Stat > DOE (plan d'expériences) > Taguchi > Créer un plan de Taguchi pour générer un plan de Taguchi (répertoire orthogonal).

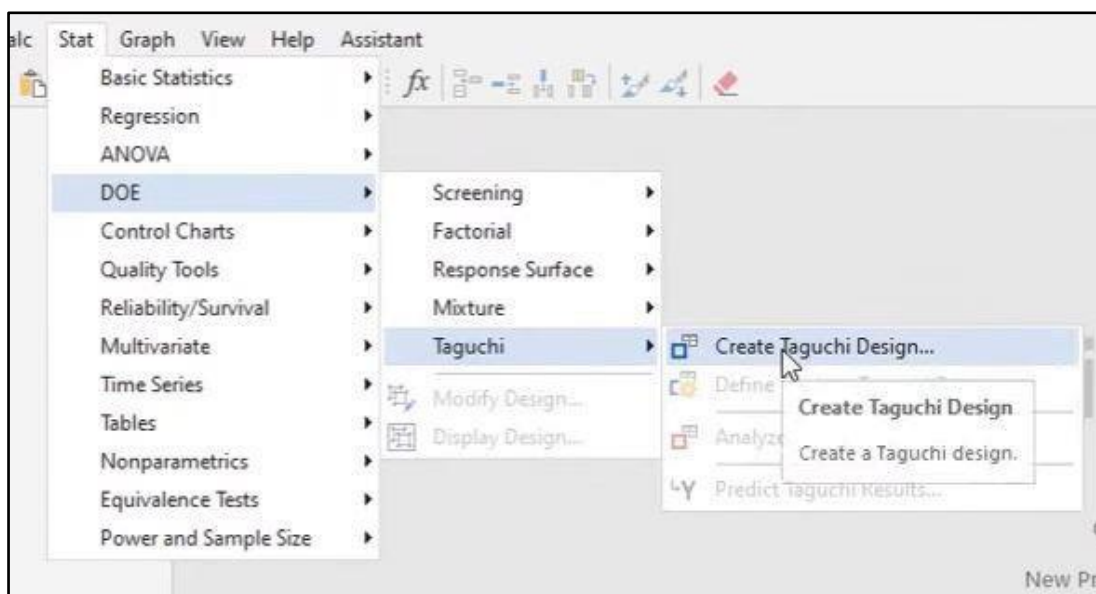


Figure III.2 : Choix de la méthode.

Nous choisissons le plan à 3 niveaux et le nombre de facteur 3.

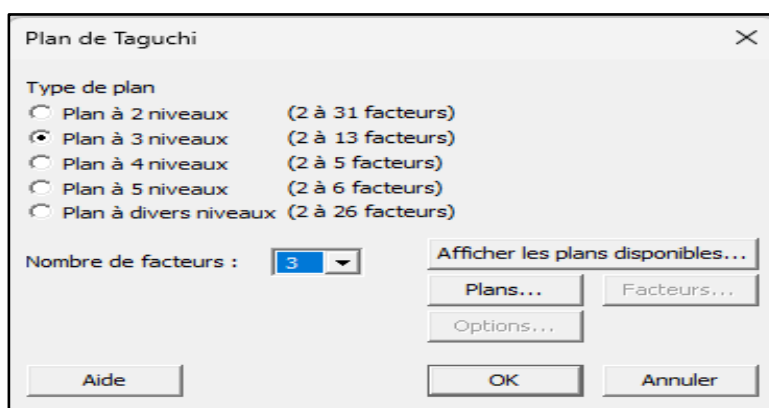


Figure III.3 : Type de plan.

Sélectionnez un répertoire adapté (L9) en fonction du nombre de facteurs et de niveaux. Nous choisissons le plan L9 parce que étudier 3 facteur avec 3 niveaux mais le plans L27 permet d'étudier jusqu'à 13 facteur avec 3 niveaux (selon la configure choisie)

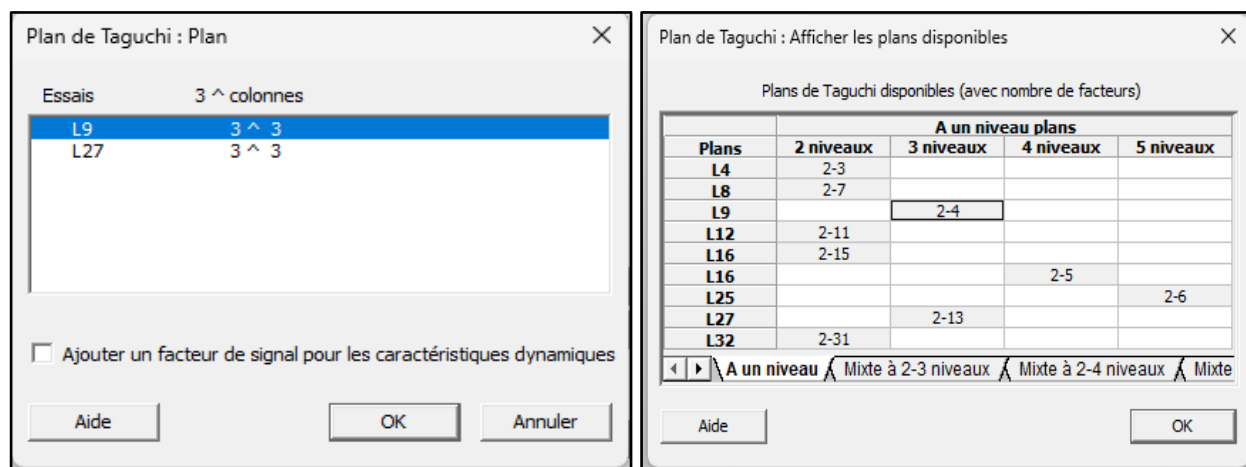


Figure III.4: Choix de plan.

Saisie des niveaux : Par défaut, Minitab codera les niveaux par des entiers (souvent 1, 2, 3). Vous pouvez modifier ces niveaux et renommer les facteurs dans la boîte de dialogue.

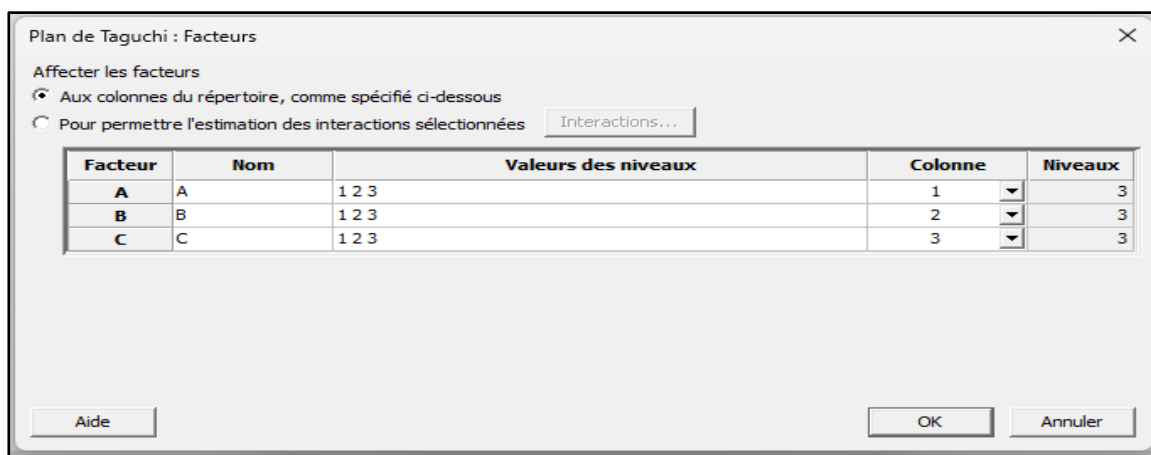


Figure III.5 : Saisie des niveaux.

Saisie des données : Entrez dans Minitab les résultats observés pour chaque essai dans les colonnes correspondantes à la réponse.

C1	C2	C3	C4	C5
F	T	I	FM	
6	11	12	26,336	
6	12	14	26,703	
6	13	16	29,275	
7	11	14	28,907	
7	12	16	28,238	
7	13	12	24,610	
8	11	16	31,368	
8	12	12	25,381	
8	13	14	28,503	

Figure III.6 : Introduction des paramètres de soudage.

Sélectionnez Stat > DOE > Taguchi > Analyser un plan de Taguchi pour générer les tableaux de réponses, les graphiques d'effets principaux et les diagrammes des interactions.

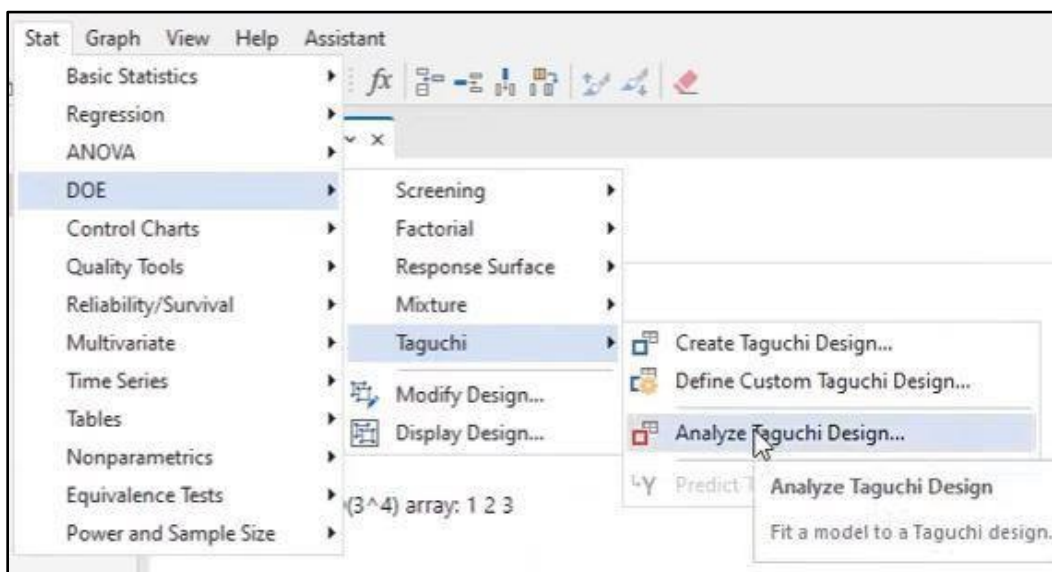


Figure III.7 : Méthode d'analyse

Sélectionnez Stat > Régression > Fit Régression Model pour déterminer les équations de régression selon la variabilité des paramètres et leur dépendance de soudage, les tableaux d'analyse et les graphique d'effet principaux.

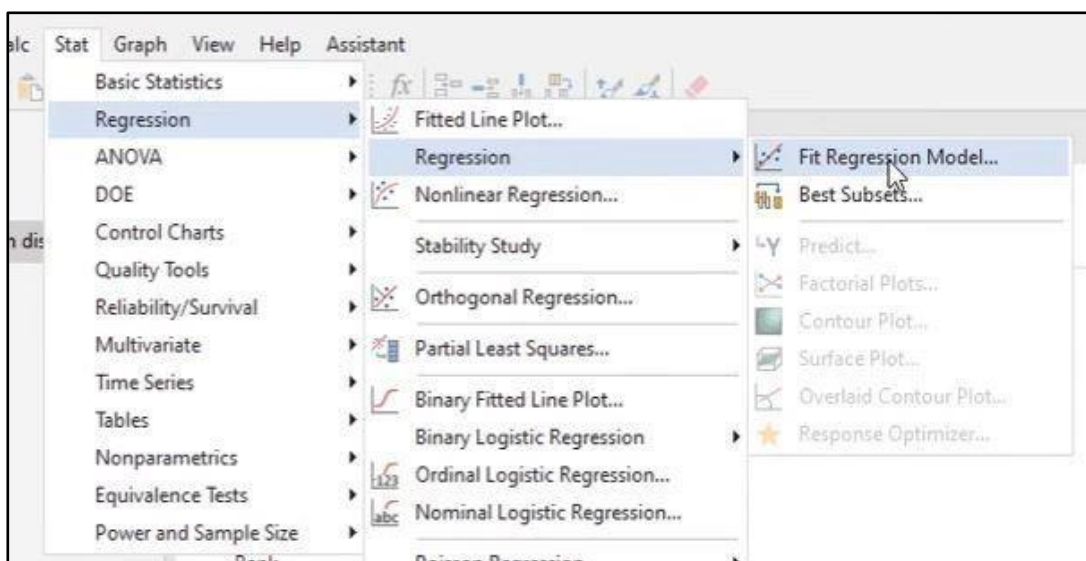


Figure III.8 : Méthode de régression.

III.2 Analyse de conception par la méthode Taguchi

La base des données expérimental utilisé, est tirée des travaux des doctorants RAMDANI Mohamed [1,2]. Dans cette étude, la **méthode Taguchi**, couplée au **plan orthogonal L9** (3 facteurs à 3 niveaux chacun), a été employée pour analyser l'impact des paramètres de soudage **I**, **T** et **F** sur la **contrainte maximale de cisaillement par traction**, un indicateur clé de la résistance mécanique des joints soudés. Le plan L9, généré via **Minitab19**, a structuré 9 essais expérimentaux combinant systématiquement les niveaux des trois facteurs réduisant ainsi la variabilité tout en couvrant l'espace des paramètres.

Les données de contrainte maximale, mesurées pour chaque combinaison, ont été traitées via les **rapports signal-bruit (S/N)** avec un critère "*plus grand est mieux*", visant à maximiser la résistance. L'**analyse de variance (ANOVA)** a identifié les contributions relatives de chaque paramètre et leurs interactions résiduelles.

III.3 Modélisation et optimisation pour A 30 :

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 30 mm "A30". Le tableau III.1 présente les combinaisons des résultats expérimentaux des essais de traction des éprouvettes en fonction des variations des paramétrées de soudage dans le cas du recouvrement A30. Les paramètres de soudage optimaux obtenus dans cette étude sont 16KA, 11cycle, et 8bar (FM=31,36).

Tableau III.1: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 30 mm

I(KA)	T (cycle)	F (bar)	FM
12	11	6	26,336
14	12	6	26,703
16	13	6	29,275
14	11	7	28,907
16	12	7	28,238
12	13	7	24,61
16	11	8	31,368
12	12	8	25,381
14	13	8	28,503

III.3.1 Modèle linéaire I, F, T

Le tableau III.2 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression écrit par l'équation (1)

$$FM = 18,07 + 0,490 F - 0,704 T + 1,046 I \quad (1)$$

Tableau III.2: Analyse des variances pour A30

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	3	30,678	10,226	9,42	0,017
F	1	1,439	1,439	1,33	0,302
T	1	2,972	2,972	2,74	0,159
I	1	26,267	26,267	24,20	0,004
Erreur	5	5,428	1,086		
Total	8	36,106			

Le tableau d'analyse de variance (tableau III.2) indique que l'équation de régression(1), intégrant trois paramètres de soudage, est globalement significative (avec une valeur F de 9,42 et un p de 0,017), ce qui confirme que le modèle peut expliquer une partie importante de la variabilité de la contrainte de traction. Toutefois, une analyse des contributions individuelles montre que seul le paramètre I se révèle statistiquement significatif (p = 0,004), tandis que les paramètres F (p = 0,302) et T (p = 0,159) n'ont pas d'impact

suffisamment marqué pour atteindre le seuil de significativité habituelle.

La figure III.9 présente 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 et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture....

Dans cet histogramme (figure III.10) 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 III.11), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 03 fois de l'effet du temps T et 04 fois de l'effet du force F.

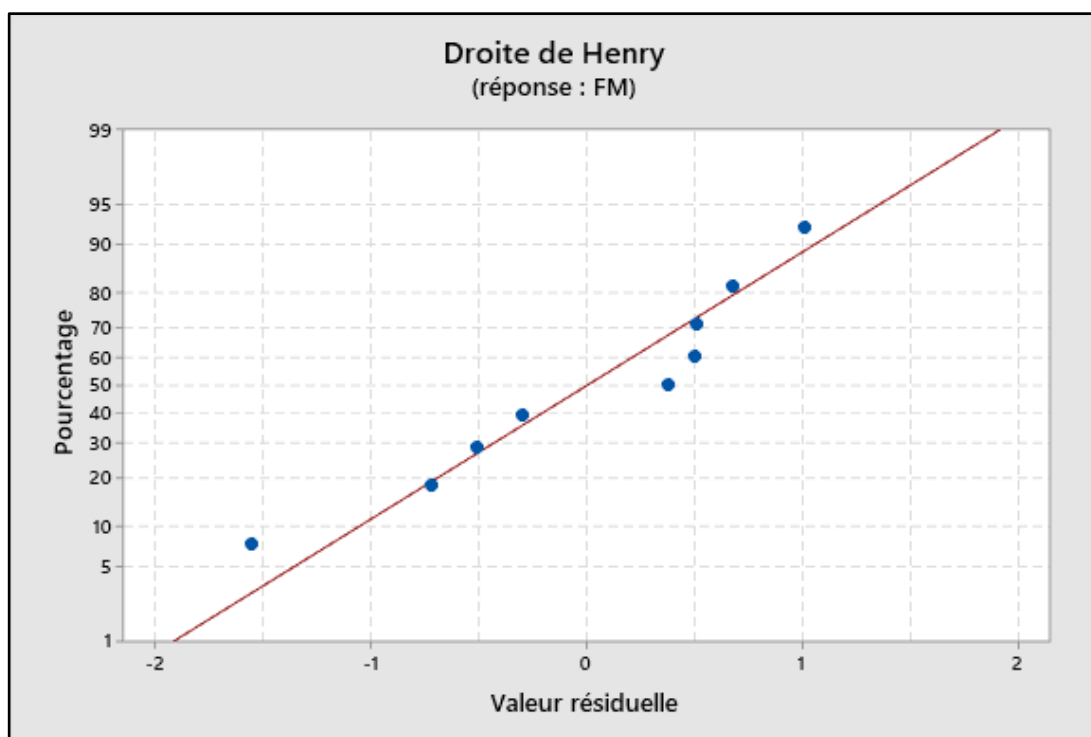


Figure III.9: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A30

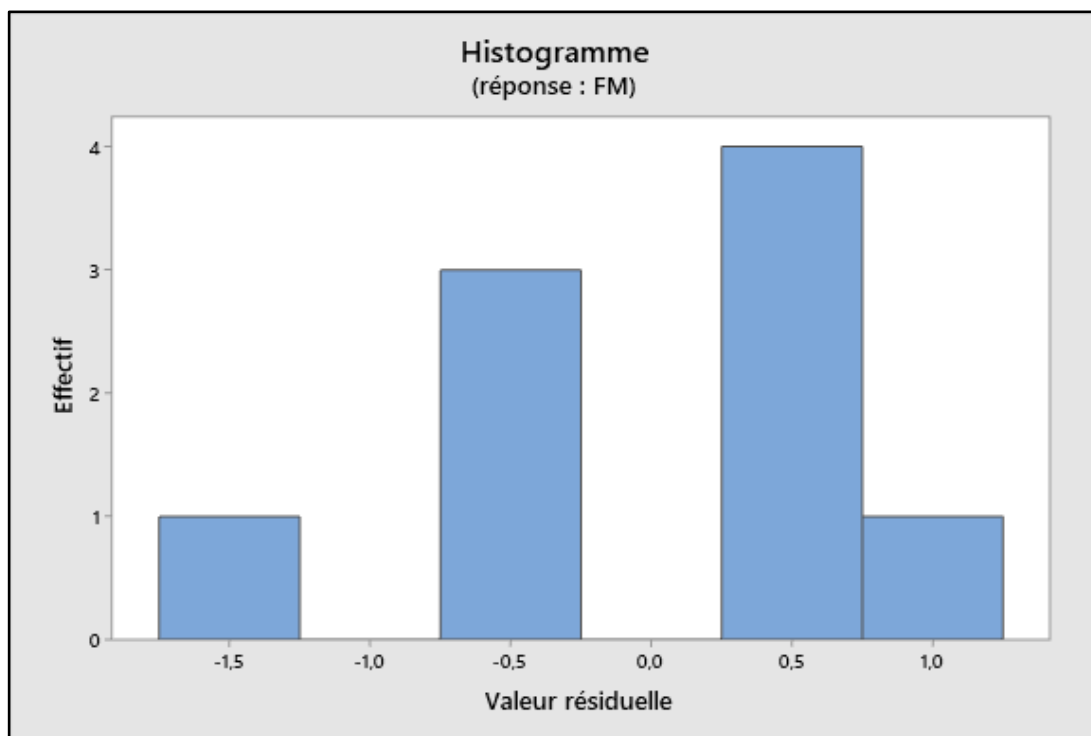


Figure III.10: Histogramme des résidus pour A30

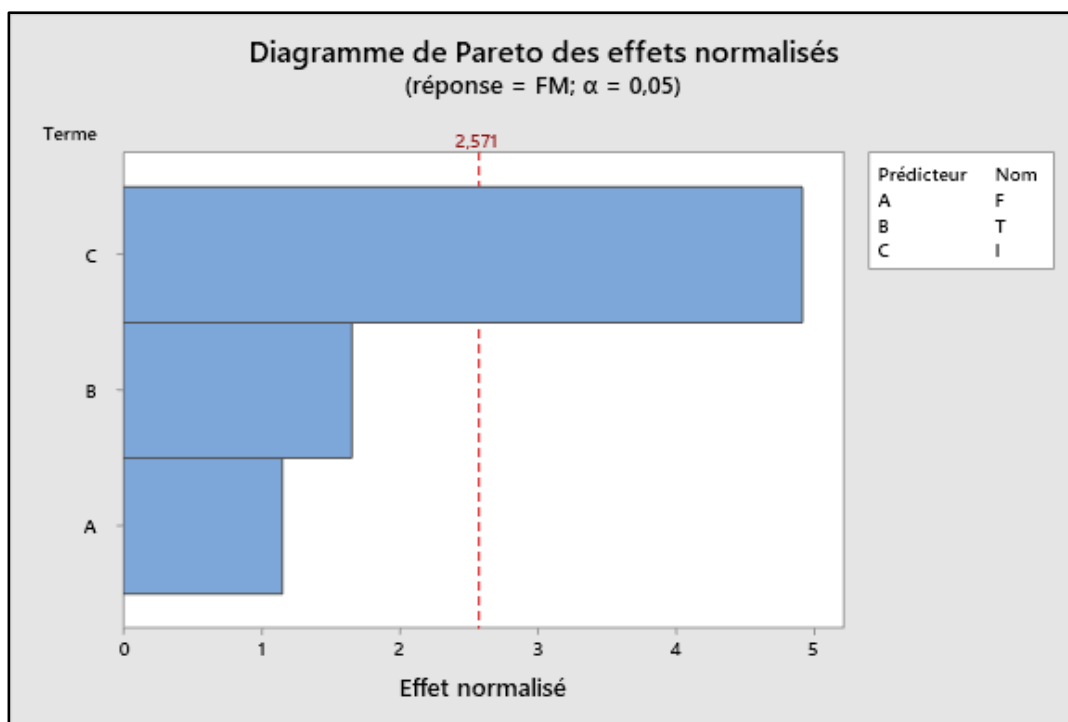


Figure III.11: Diagramme de Pareto des effets normalisés A30.

III.3.2 Model linéaire avec dépendance F*T

Le tableau III.3 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression dépendent et d'écrire par l'équation (2)

$$FM = 33,3 - 1,78 F - 2,03 T + 1,093 I + 0,189 F * T \quad (2)$$

Tableau III.3: Analyse des variances pour A30

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	4	30,7676	7,6919	5,76	0,059
F	1	0,0549	0,0549	0,04	0,849
T	1	0,2081	0,2081	0,16	0,713
I	1	17,9350	17,9350	13,44	0,021
F*T	1	0,0895	0,0895	0,07	0,808
Erreur	4	5,3387	1,3347		
Total	8	36,1063			

Le tableau d'analyse de variance (tableau III.3) montre que la régression globale explique une partie importante de la variabilité avec une somme des carrés de consommation de 30,7676 et une valeur F de 5,76 ($p \approx 0,059$), suggérant une tendance vers la significativité globale du modèle. Parmi les paramètres étudiés, seul le paramètre I présente une influence statistiquement significative avec une valeur F de 13,44 et une valeur de p de 0,021, alors que les paramètres F et T, ainsi que leur interaction F*T, n'ont pas d'effet notable (p indépendamment de 0,849, 0,713 et 0,808). La répartition de l'erreur résiduelle (somme des carrés résiduels égale à 5,3387 avec 4 degrés de liberté) indique que la variabilité non expliquée reste relativement faible.

La figure III.12 présente les paramètres de soudage I, T, F dans le cas A30 qui sont biens réparties suivant une loi normal concentrés autours de 5% à 95% pourcent et montre un bon accord entre le modèle mathématique donné par l'équation de régression et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture....

Dans cet histogramme (figure III.13) 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 III.14), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 09 fois de l'effet du temps T, 18 fois de l'effet du force F et 14 fois de l'effet du l'interaction F*T.

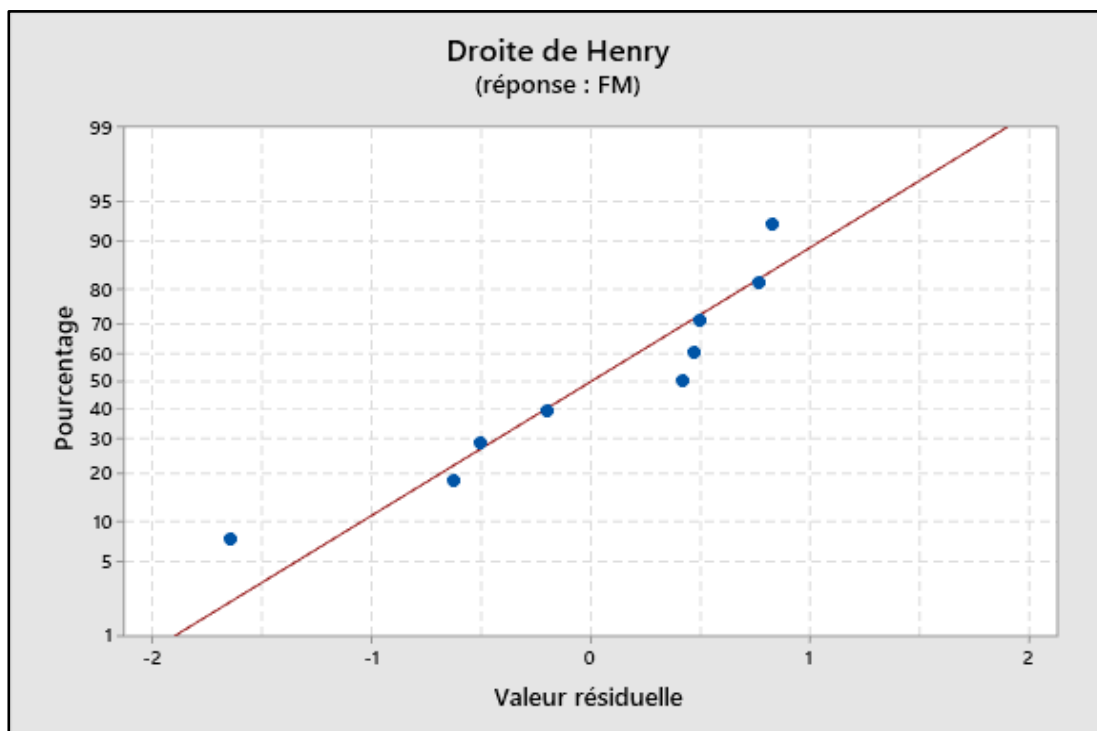


Figure III.12: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A30.

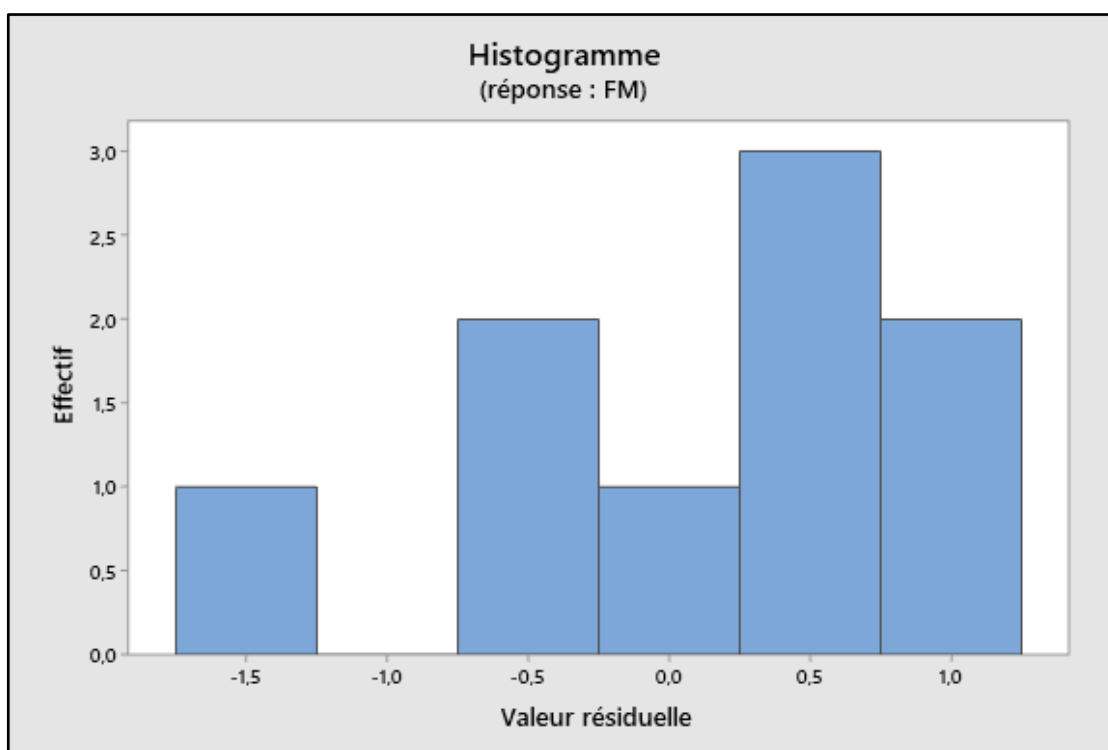


Figure III.13: Histogramme des résidus pour A30.

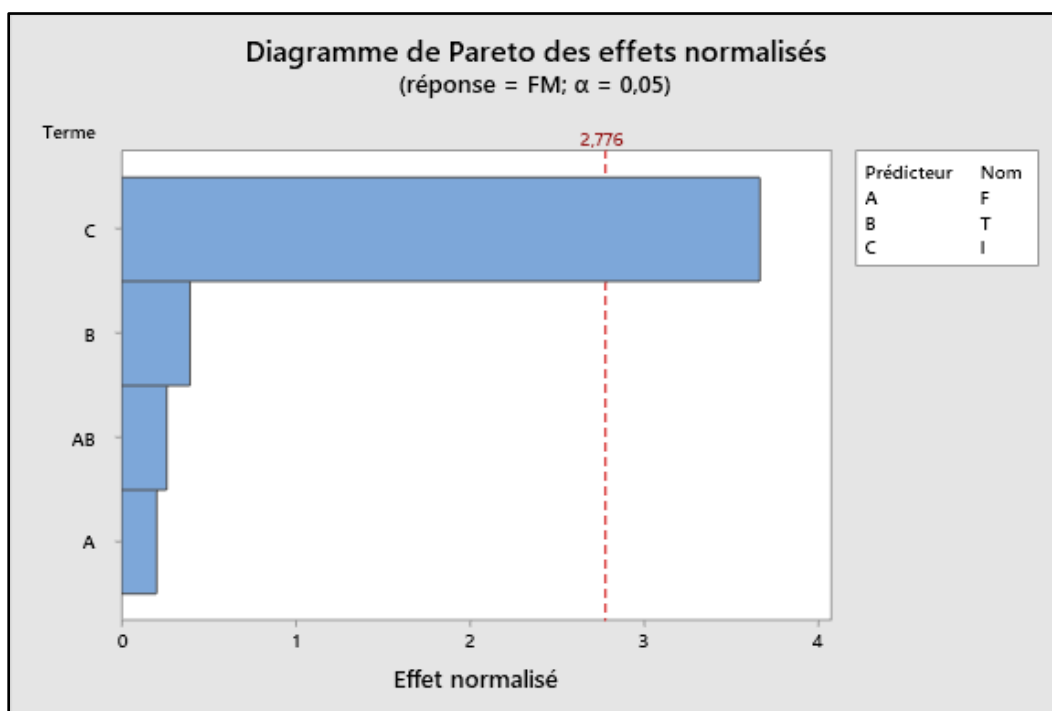


Figure III.14: Diagramme de Pareto des effets normalisés A30.

Tableau III.4: Réponses pour les rapports signal/bruit

Niveau	F (bar)	T (cycle)	I (KN)
1	-28,76	-29,19	-28,11
2	-28,69	-28,55	-28,95
3	-29,04	-28,75	-29,43
Delta	0,35	0,64	1,32
Rang	3	2	1

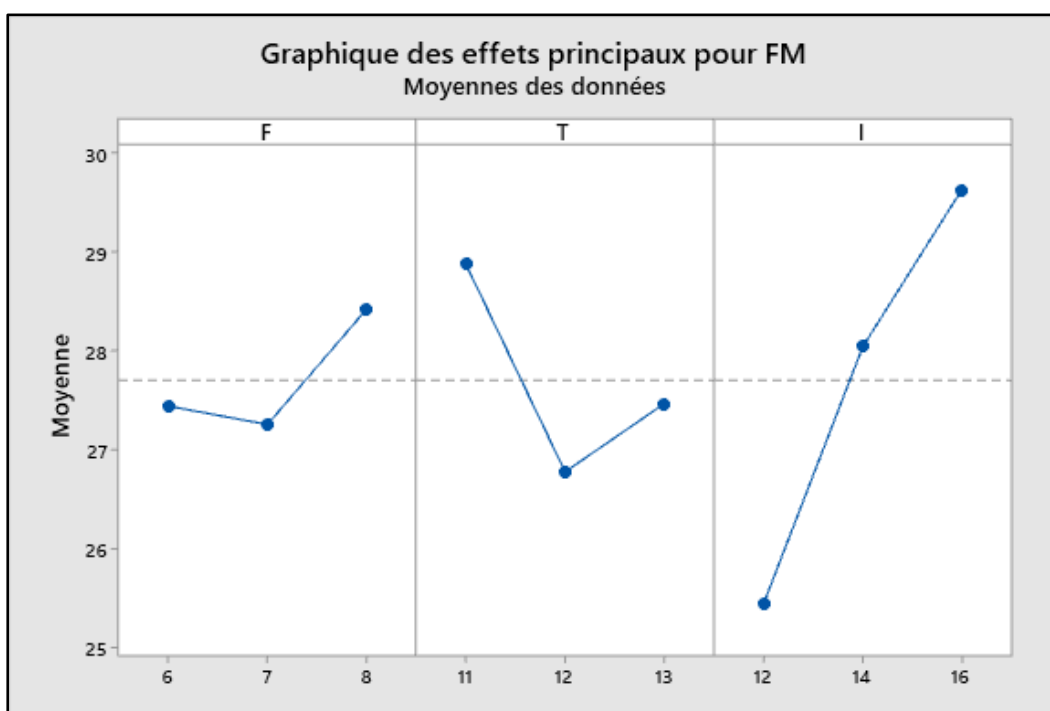


Figure III.15: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction.

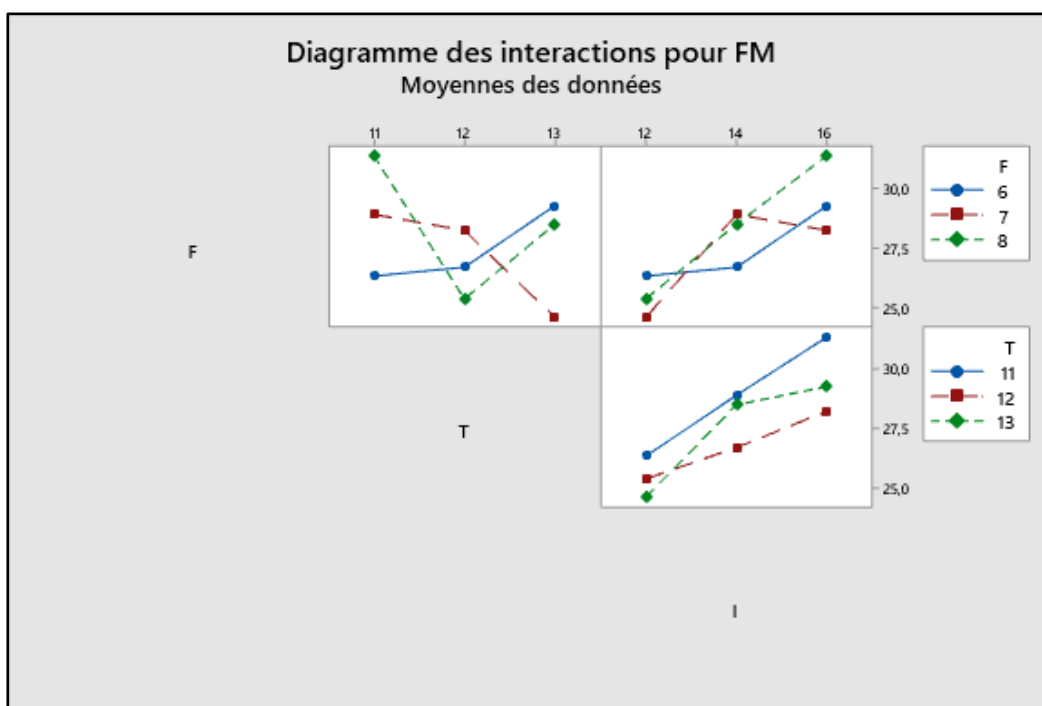


Figure III.16: Diagramme des interactions pour FM.

* **Effet du paramètre (F) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que la résistance à la traction présente une tendance dans la plage de 6 à 8. La résistance maximale de l'assemblage soudé est obtenue à 8. D'après le rapport S/N, la valeur augmente progressivement dans la plage de 7-8.

* **Effet du paramètre (T) sur la résistance à la traction:**

Nous observons que le temps joue un rôle crucial dans la résistance. Lorsque le temps augmente de 11 à 13, la résistance à la traction augmente également. D'après le tableau du rapport S/N, les valeurs moyennes du rapport S/N augmentent avec le temps

* **Effet du paramètre (I) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que le courant de soudage I influence la résistance jusqu'à un certain niveau, car la valeur de résistance augmente légèrement avec l'augmentation du I.

III.4 Modélisation et optimisation pour A 25 :

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 25mm "A25". Le tableau III.5 présente les combinaisons des résultats expérimentaux des essais de traction des éprouvettes en fonction des variations des paramétrées de soudage dans le cas du recouvrement A25. Les paramètres de soudage optimaux obtenus dans cette étude sont 16KA, 12cycle, et 7bar (FM=30,78).

Tableau III.5: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 25 mm

I (KN)	T (cycle)	F (bar)	FM
12	11	6	25,969
14	12	6	26,814
16	13	6	30,193
14	11	7	29,275
16	12	7	30,781
12	13	7	25,087
16	11	8	29,936
12	12	8	25,124
14	13	8	27,879

III.4.1 Model linéaire I, F, T

Le tableau III.6 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression écrire par l'équation (3)

$$FM = 14,80 - 0,006 F - 0,337 T + 1,228 I \quad (3)$$

Tableau III.6 : Analyse des variances pour A25

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	3	36,8431	12,2810	18,73	0,004
F	1	0,0002	0,0002	0,00	0,986
T	1	0,6807	0,6807	1,04	0,355
I	1	36,1621	36,1621	55,15	0,001
Erreur	5	3,2784	0,6557		
Total	8	40,1215			

Le tableau III.6 présente les résultats pour le modèle de régression les paramètres de soudage (I, F, T) à la réponse (FM). La régression globale est statistiquement significative (valeur (p = 0.004), indiquant que le modèle explique une part importante de la variabilité de (FM). Cependant, seuls certains paramètres contribuent significativement :

- Le courant (I) a un impact très significatif (valeur (p = 0.001)), avec un carré moyen ajusté élevé (36,16), ce qui en fait le principal facteur influençant (FM).
- La fréquence (f) (valeur (p = 0,986) et le temps (T) (valeur (p = 0,355) ne sont pas significatifs, suggérant que leur influence sur (FM) est négligeable dans ce modèle.

La figure III.17 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 et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture....

Dans cet histogramme (figure III.18) 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 III.19), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 07 fois de l'effet du temps T et 15 fois de l'effet du force F.

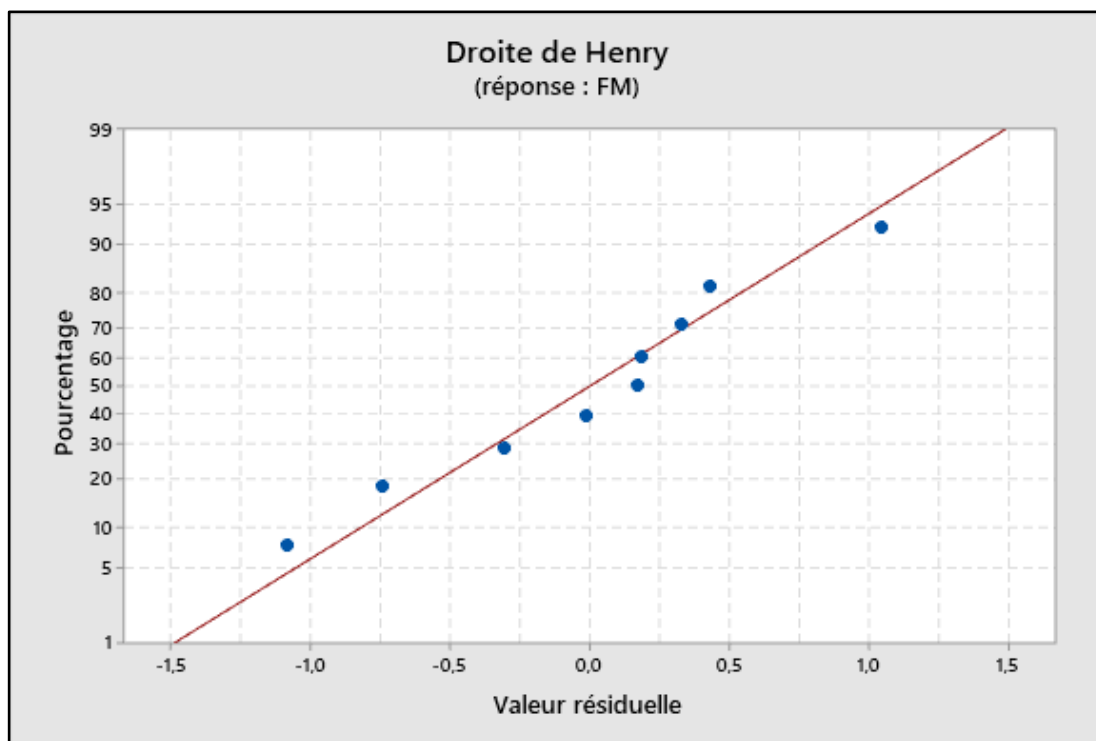


Figure III.17: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A25.

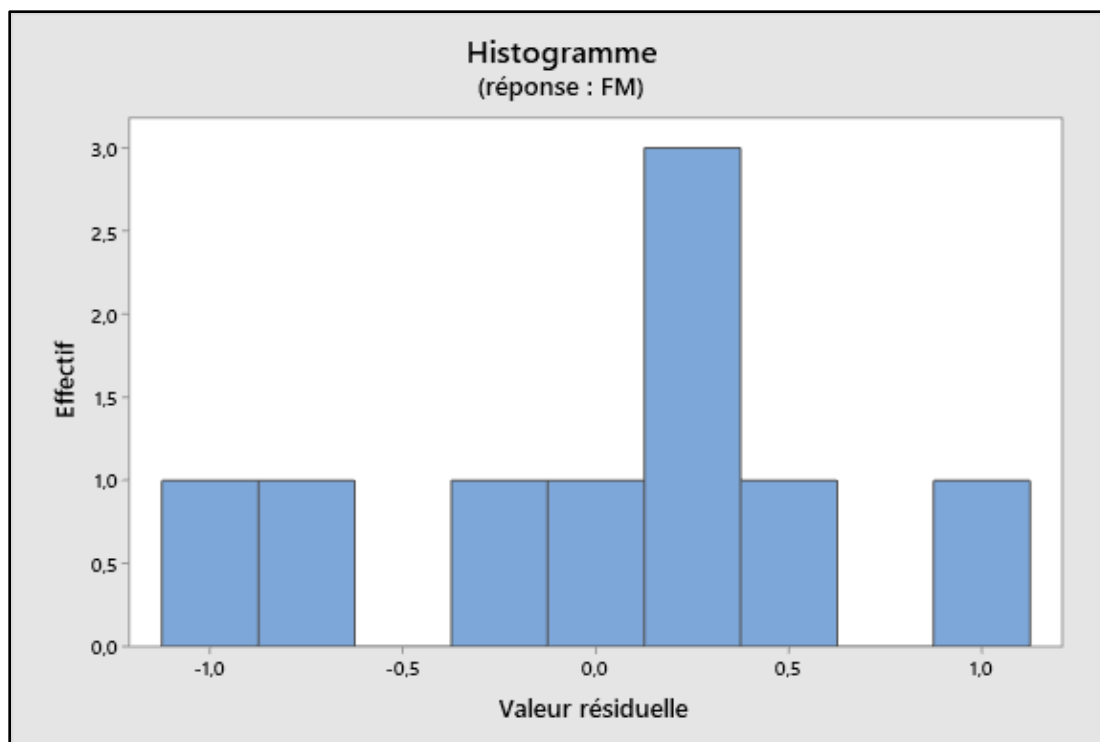


Figure III.18: Histogramme des résidus pour A25.

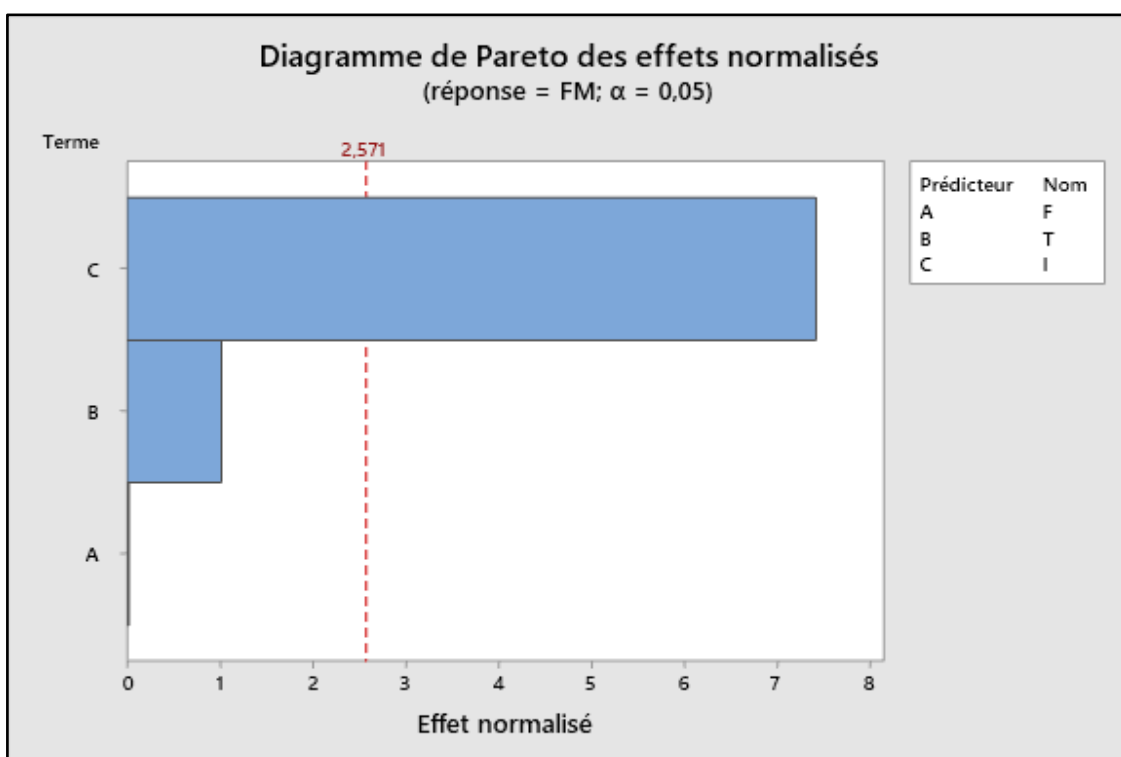


Figure III.19: Diagramme de Pareto des effets normalisés A25.

III.4.2 Model linéaire avec dépendance F*T

Le tableau III.7 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression dépendent et d'écrire par l'équation (4)

$$FM = 49,7 - 5,21 F - 3,37 T + 1,336 I + 0,434 F * T \quad (4)$$

Tableau III.7: Analyse des variances pour A25

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	4	37,3131	9,3283	13,29	0,014
F	1	0,4698	0,4698	0,67	0,459
T	1	0,5752	0,5752	0,82	0,417
I	1	26,7694	26,7694	38,13	0,003
F*T	1	0,4700	0,4700	0,67	0,459
Erreur	4	2,8083	0,7021		
Total	8	40,1215			

Le tableau III.7 présente les résultats de régression incluant l'interaction entre les paramètres de soudage (F), (T) et (I). La régression globale est statistiquement significative ($p = 0,014$), indiquant que le modèle explique une partie de la variabilité de la réponse (FM). Cependant, seul le courant (I) a un effet très significatif ($p = 0,003$), avec un carré moyen ajusté élevé (26,7694), confirmant son rôle prépondérant. Les autres termes, y compris l'interaction (T) ($p = 0,459$), la force (F) ($p = 0,459$) et le temps (T) ($p = 0,417$), ne sont pas significatifs.

L'erreur résiduelle (CM ajusté = 0,7021) suggère une variabilité non expliquée modérée, mais la validité du modèle dépend de la vérification des hypothèses sous-jacentes (normalité).

La figure III.20 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 et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture....

Dans cet histogramme (figure III.21) 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 III.22), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 06 fois de l'effet du temps T et 08 fois de l'effet du force F. L'interaction (F*T) présente la même importance que la force seule. Donc le courant de soudage reste un paramètre primordial pour le soudage par points.

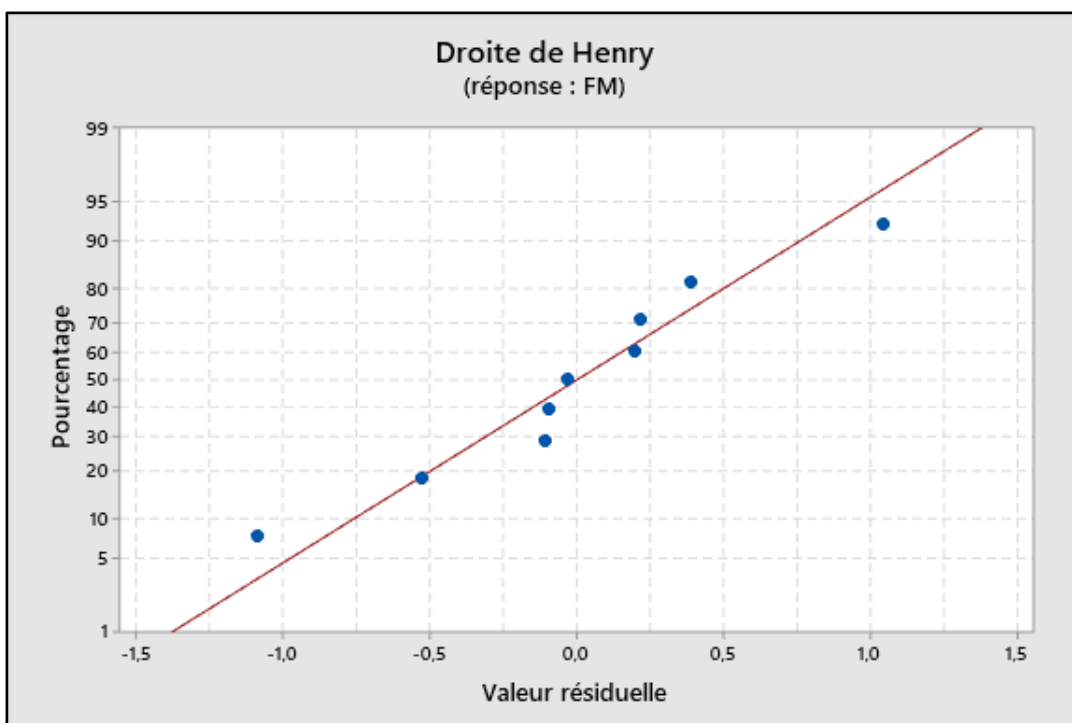


Figure III.20: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A25.

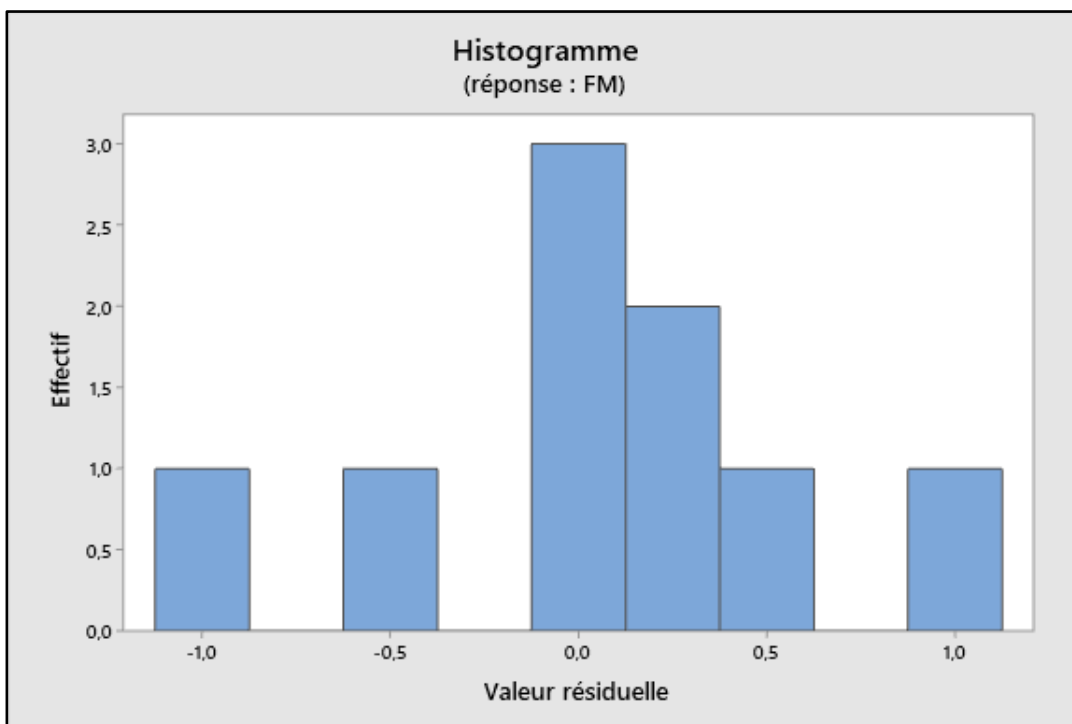


Figure III.21: Histogramme des résidus pour A25.

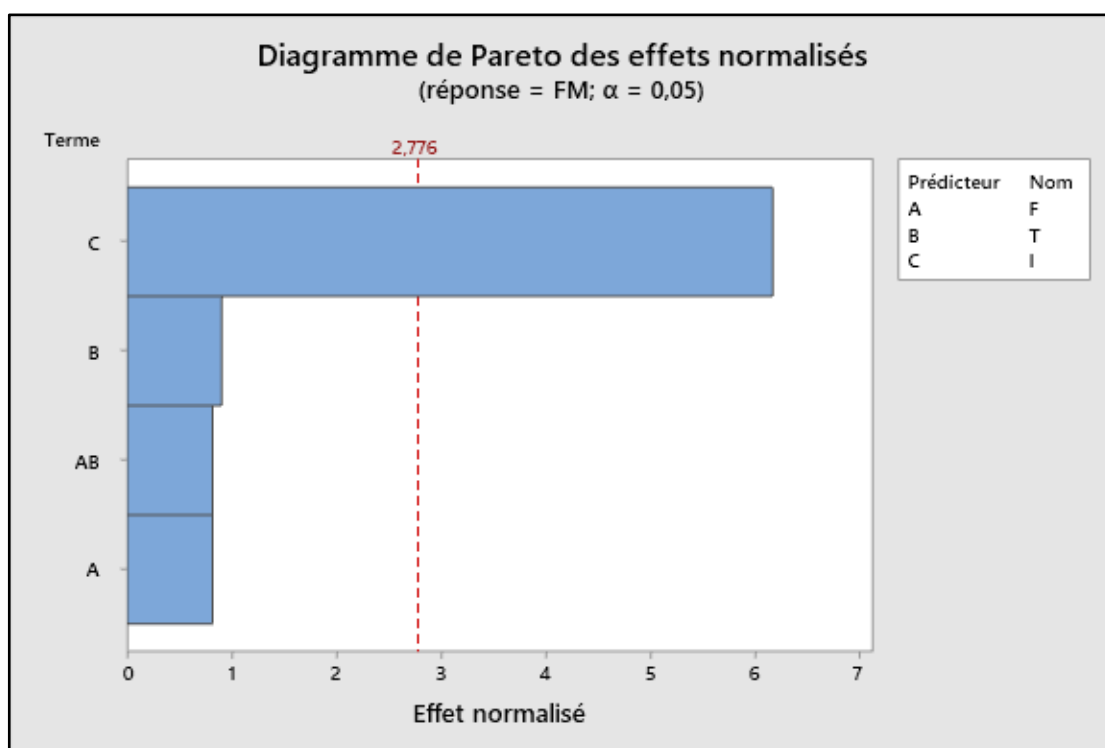


Figure III.22: Diagramme de Pareto des effets normalisés A25.

Tableau III.8: les réponses pour les rapports signal/bruit

Niveau	F (bar)	T (cycle)	I (KN)
1	-28,82	-29,05	-28,09
2	-29,03	-28,78	-28,93
3	-28,81	-28,83	-29,63
Delta	0,22	0,27	1,54
Rang	3	2	1

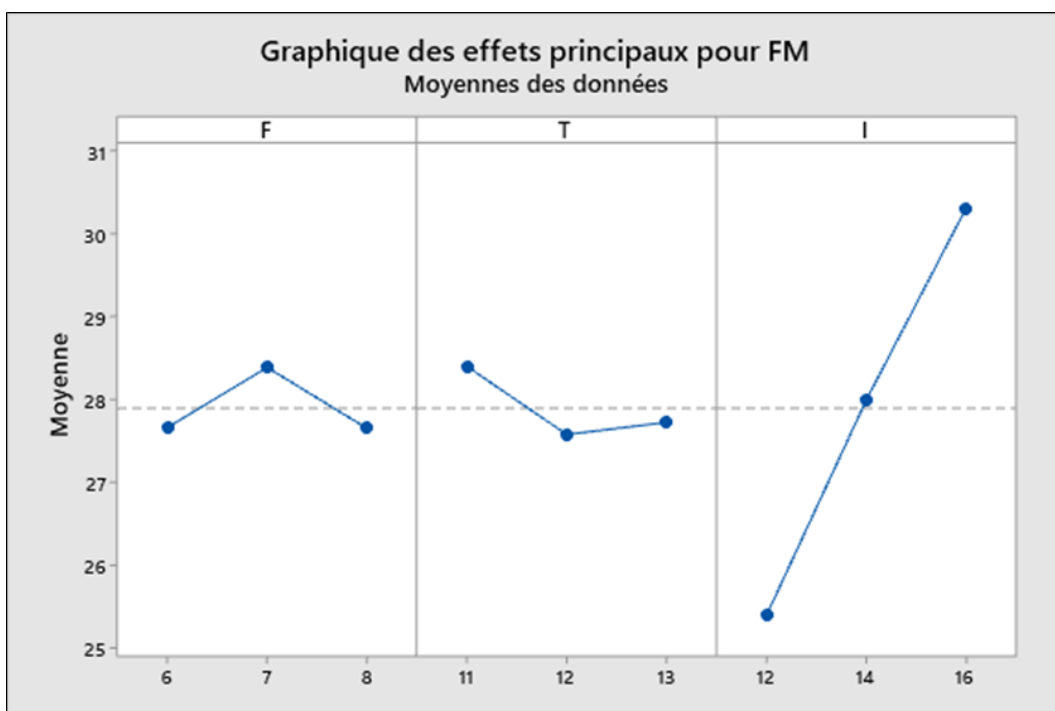


Figure III.23: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction.

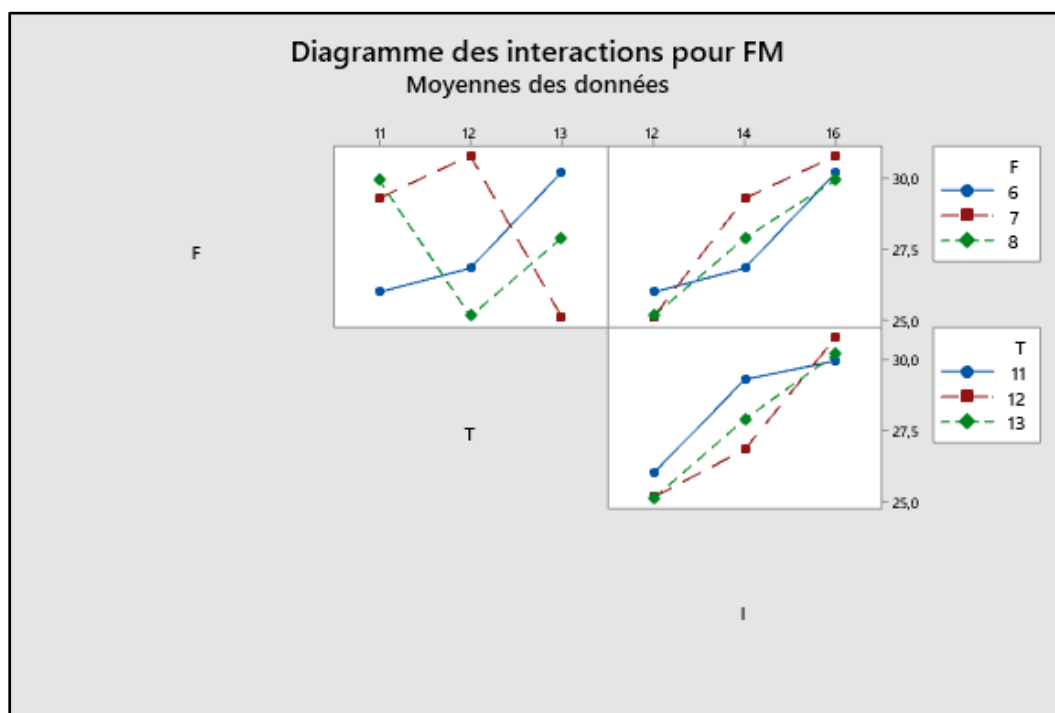


Figure III.24: Diagramme des interactions pour FM.

* **Effet du paramètre (F) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que la résistance à la traction présente une tendance dans la plage de 6 à 8. La résistance maximale de l'assemblage soudé est obtenue à 8. D'après le rapport S/N, la valeur augmente progressivement dans la plage de 7-8.

* **Effet du paramètre (T) sur la résistance à la traction:**

Nous observons que le temps joue un rôle crucial dans la résistance. Lorsque le temps augmente de 11 à 13, la résistance à la traction augmente également. D'après le tableau du rapport S/N, les valeurs moyennes du rapport S/N augmentent avec le temps

* **Effet du paramètre (I) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que le courant de soudage I influence la résistance jusqu'à un certain niveau, car la valeur de résistance augmente légèrement avec l'augmentation du I.

III.5 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 III.9 présente les combinaisons des résultats expérimentaux des essais de traction des éprouvettes en fonction des variations des paramétrées de soudage dans le cas du recouvrement A20. Les paramètres de soudage optimaux obtenus dans cette étude sont 16KA, 11cycle, et 8bar (FM=30,37).

Tableau III.9: Effet des paramètres de soudage sur la charge maximale de cisaillement par traction pour A = 20 mm

I(KN)	T (cycle)	F (bar)	FM
12	11	6	22,479
14	12	6	27,107
16	13	6	29,054
14	11	7	28,026
16	12	7	29,899
12	13	7	25,381
16	11	8	30,377
12	12	8	25,638
14	13	8	28,981

III.5.1 Modèle linéaire I, F, T

Le tableau III.10 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression écrite par l'équation (5)

$$FM = -1,65 + 1,059 F + 0,260 T + 1,319 I \quad (5)$$

Tableau III.10: Analyse des variances pour A20

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	3	49,4528	16,4843	29,95	0,001
F	1	6,7331	6,7331	12,23	0,017
T	1	0,9443	0,9443	1,72	0,247
I	1	41,7754	41,7754	75,90	0,000
Erreur	5	2,7520	0,5504		
Total	8	52,2048			

Le tableau d'analyse de variance (tableau III.10) indique que l'équation de régression(5) explique de manière significative la variabilité de réponse FM, comme en témoigne la valeur de p globale de 0.001 pour la régression (F = 29.95). Cela confirme que le modèle est statistiquement pertinent pour prédire FM à partir des paramètres F, T et I.

- * Paramètre F (valeur de p = 0.017) : La force (F) a un effet significatif sur FM, avec un coefficient positif de 1.059. Cela suggère qu'une augmentation de F entraîne une augmentation de FM, toutes choses égales par ailleurs.
- * Paramètre I (valeur de p = 0.000) : L'intensité (I) est très significative, avec le coefficient le plus élevé (1.319), ce qui en fait le facteur le plus influent dans le modèle.
- * Paramètre T (valeur de p = 0.247) : La température (T) n'a aucun impact statistiquement significatif sur FM dans ce modèle, ce qui indique que son inclusion pourrait ne pas être justifiée ici.

La figure III.25 présente les paramètres de soudage I, T, F dans le cas A20 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 et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture....

Dans cet histogramme (figure III.26) 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 III.27), on constate que l'impact du courant de soudage "I" représente 07 fois de l'effet du temps T et 02 fois de l'effet du force F.

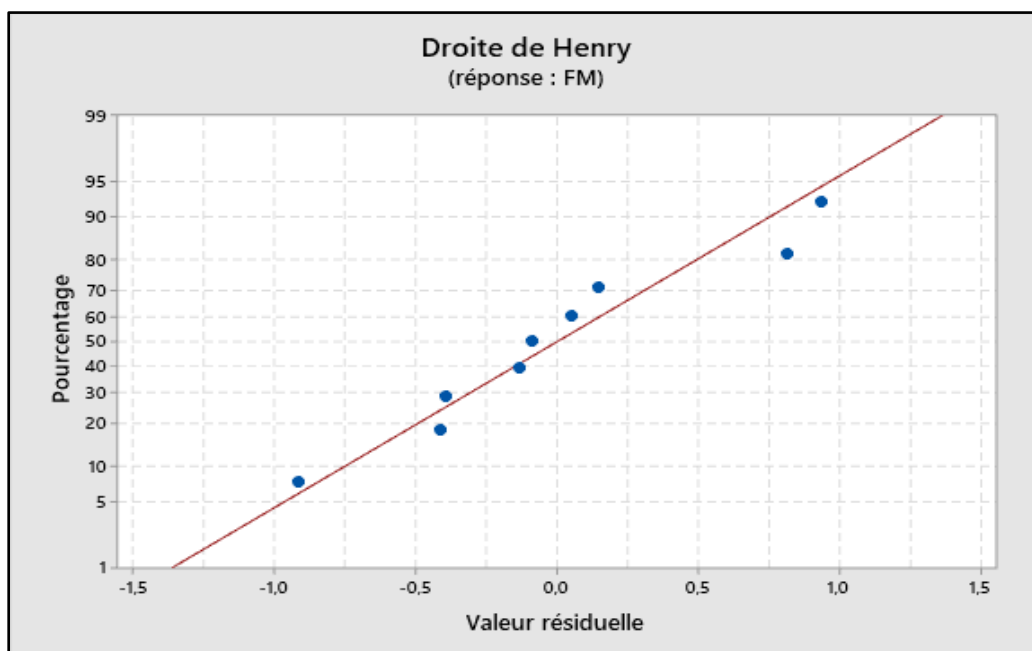


Figure III.25: Contrainte de traction calculer par rapport aux valeurs expérimentales A20

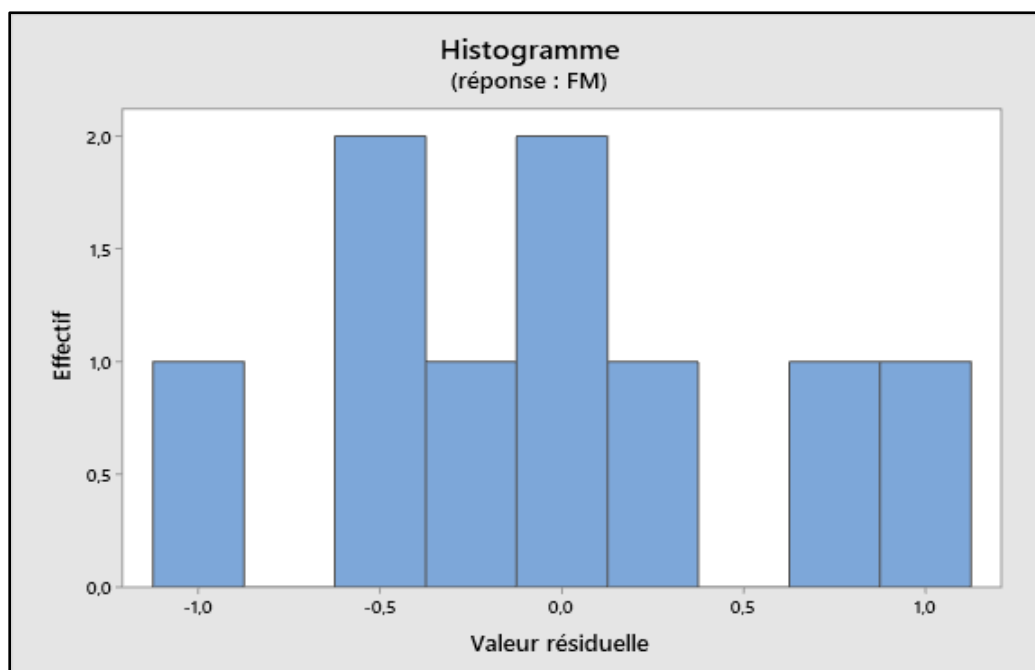


Figure III.26: Histogramme des résidus pour A20.

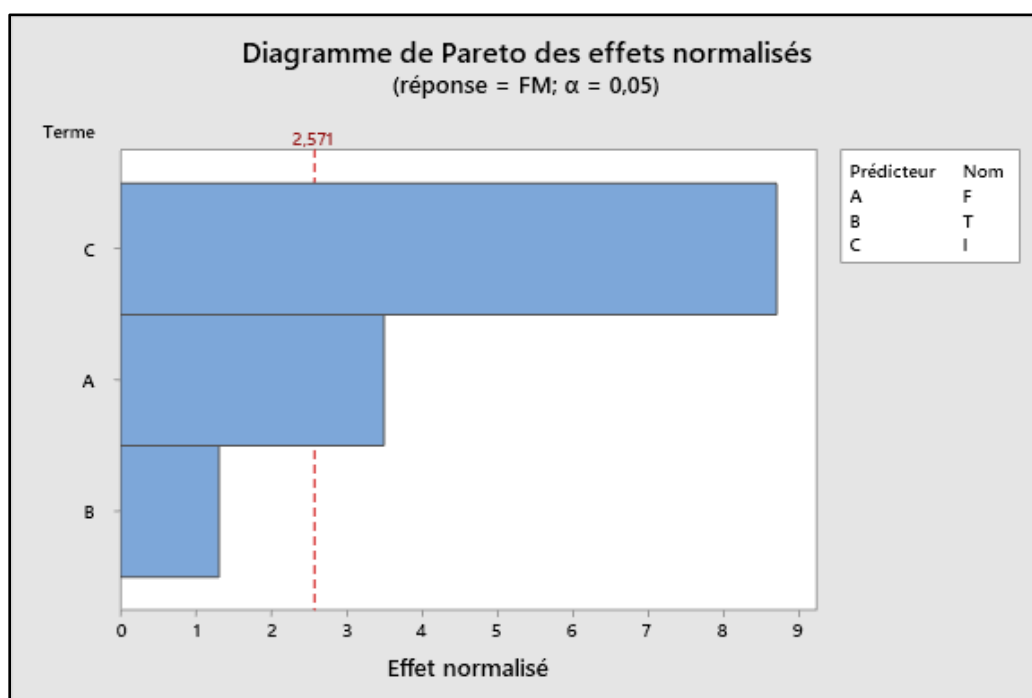


Figure III.27: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20.

III.5.2 Modèle linéaire avec dépendance F*T

Le tableau III.11 montre les résultats de l'analyse de variance avec l'interaction possibles entre les trois paramètres de soudage I, T et F, le modèle de régression dépendent et d'écrire par l'équation (6)

$$FM = 3,2 + 0,33 F - 0,15 T + 1,339 I + 0,059 F * T \quad (6)$$

Tableau III.11: Analyse des variances pour A20

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	4	49,4759	12,3690	18,13	0,008
F	1	0,0049	0,0049	0,01	0,937
T	1	0,0031	0,0031	0,00	0,949
I	1	30,7327	30,7327	45,05	0,003
F*T	1	0,0230	0,0230	0,03	0,863
Erreur	4	2,7289	0,6822		
Total	8	52,2048			

Le tableau d'analyse de variance (tableau III.11) indique que l'équation de régression (6) est globalement significatif pour expliquer la variabilité de FM, comme en atteste la valeur de p de 0.008 pour la régression ($F = 18.13$). Cependant, l'analyse détaillée révèle des limites majeures :

- * Paramètre I (valeur de p = 0.003) : L'intensité (I) est le seul facteur significatif, avec un coefficient positif de 1.339, indiquant qu'une augmentation de I entraîne une augmentation marquée de FM.
- * Paramètres F et T : Aucun des deux n'a d'impact statistiquement significatif (valeurs de p = 0.937 pour F et 0.949 pour T). Leurs coefficients (0.33 pour F, -0.15 pour T) suggèrent une influence marginale et non concluante.
- * Interaction F*T (valeur de p = 0.863) : L'effet combiné de F et T est non significatif, ce qui invalide l'hypothèse d'une synergie entre ces paramètres dans ce modèle.

La figure III.28 présente les paramètres de soudage I, T, F dans le cas A20 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 et les données expérimentales sauf quelques points sont dispersés dus au problème des erreurs de l'appareil, lecture.... Dans cet histogramme (figure III.29) 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 III.30), on constate que l'impact du courant de soudage "I".

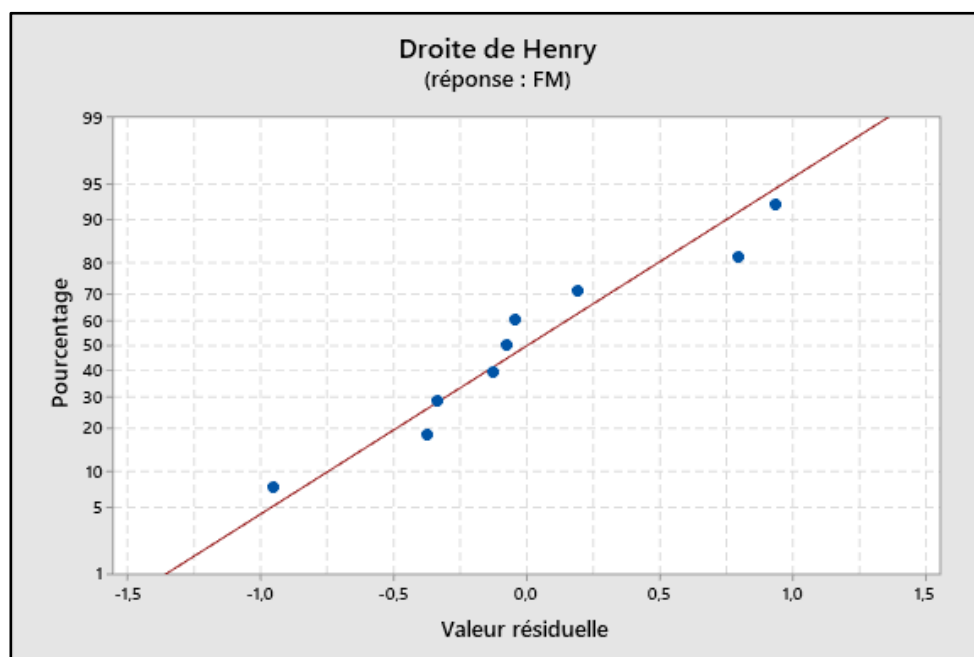


Figure III.28: Contrainte de traction calculée par rapport aux valeurs expérimentales A20.

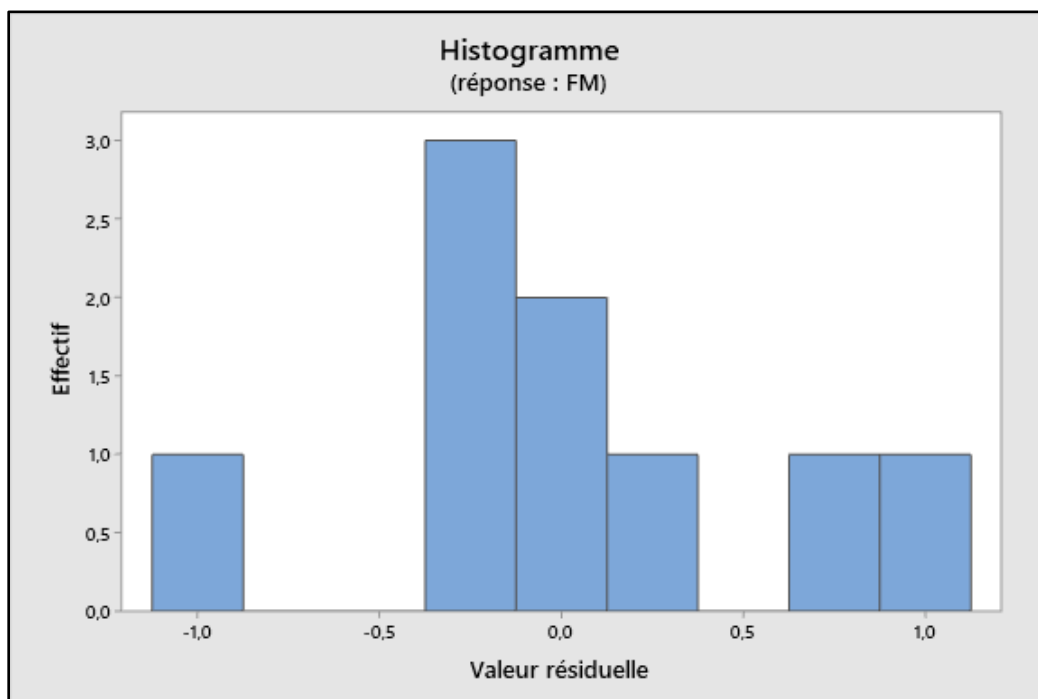


Figure III.29: Histogramme des résidus pour A20.

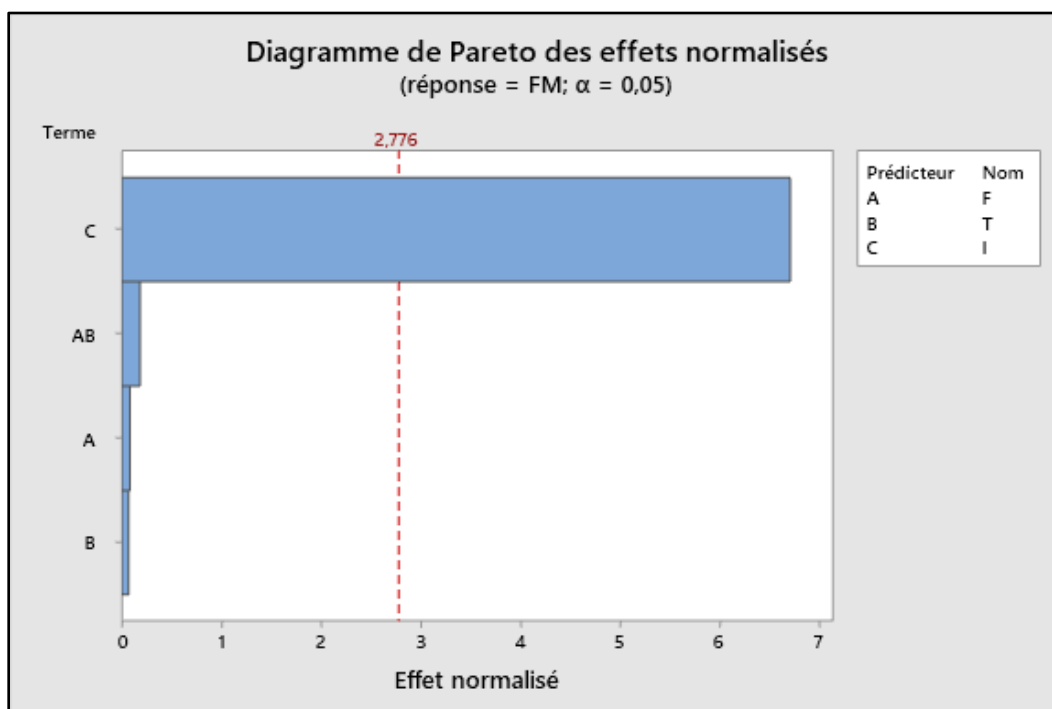


Figure III.30: Diagramme de Pareto des effets normalisés A20%

Tableau III.12 : Réponses pour les rapports signal/bruit

Niveau	F (bar)	T (cycle)	I (KN)
1	-28,32	-28,55	-27,77
2	-28,85	-28,78	-28,95
3	-29,02	-28,87	-29,48
Delta	0,70	0,32	1,71
Rang	2	3	1

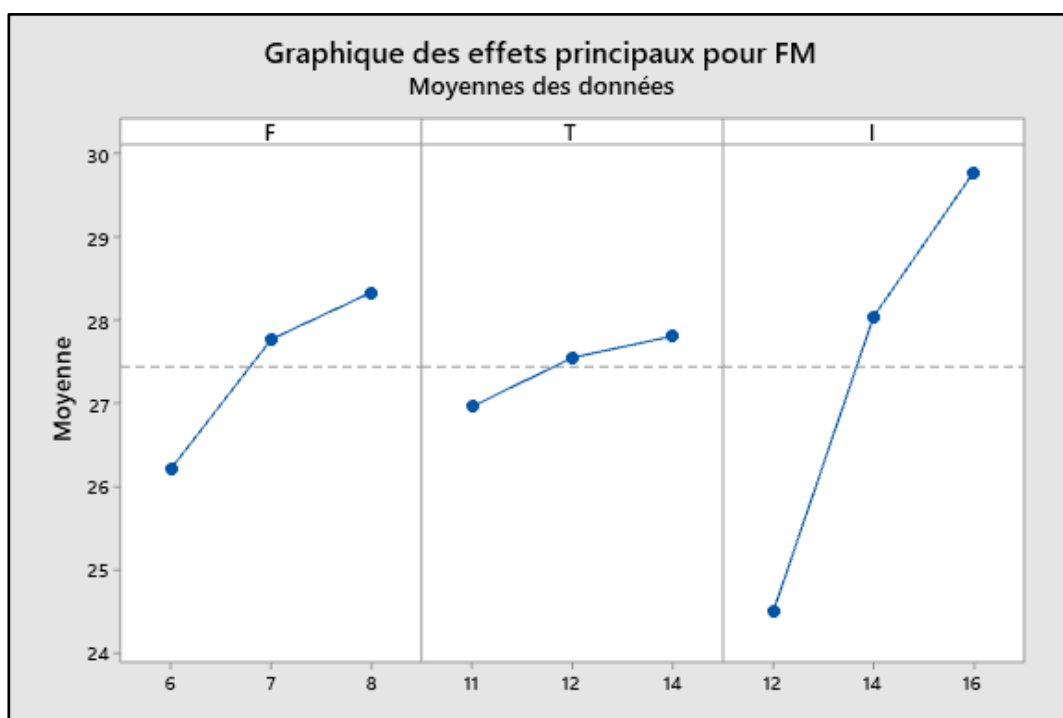


Figure III.31: Paramètre du processus par rapport à la moyenne de la résistance à la traction

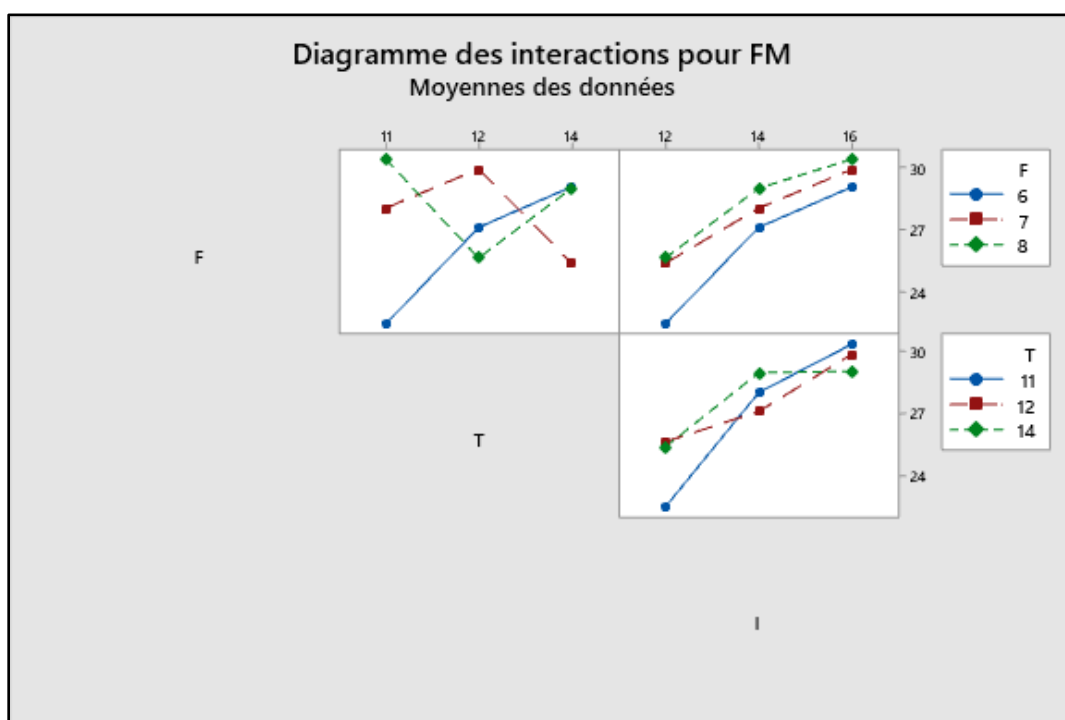


Figure III.32 : Diagramme des interactions pour FM

* **Effet du paramètre (F) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que la résistance à la traction présente une tendance dans la plage de 6 à 8. La résistance maximale de l'assemblage soudé est obtenue à 8. D'après le rapport S/N, la valeur augmente progressivement dans la plage de 7-8.

* **Effet du paramètre (T) sur la résistance à la traction:**

Nous observons que le temps joue un rôle crucial dans la résistance. Lorsque le temps augmente de 11 à 13, la résistance à la traction augmente également. D'après le tableau du rapport S/N, les valeurs moyennes du rapport S/N augmentent avec le temps

* **Effet du paramètre (I) sur la résistance à la traction :**

Nous observons que le courant de soudage I influence la résistance jusqu'à un certain niveau, car la valeur de résistance augmente légèrement avec l'augmentation du I.

III.6 Références chapitre III

- [1] Ramdani Mohammed (2024). Optimisation des paramètres de soudage par points et leurs effets sur le comportement mécanique. Thèse de doctorat, université de Tlemcen.
- [2] Ramdani, M., Benachour, M. and Rahou, M. (2023). The Effects of resistance spot welding parameters on the mechanical behavior of stainless steel. ETASR, 13(2), pp. 10501-10504. Doi:<https://doi.org/10.48084/etasr.5019>.

Conclusion générale

Le présent travail vise à évaluer, à la fois de manière expérimentale et statistique, l'influence de plusieurs paramètres de soudage notamment le courant de soudage (I), le temps de soudage (T), la force exercée par les électrodes sur la résistance mécanique des assemblages par soudage par points de l'acier 304L.

Les résultats expérimentaux obtenus, confirmant l'efficacité de la méthode de Taguchi pour améliorer la résistance mécanique des soudures. L'analyse des réponses mécaniques, telles que la force au cisaillement, a permis de valider les combinaisons optimales de paramètres, démontrant une amélioration notable de la qualité des assemblages.

En appliquant la méthode de Taguchi avec un plan d'expérience L9, les conclusions qui ressortent de ce travail se résument comme suite :

- * L'analyse par ANOVA vous a permis d'identifier les contributions relatives de chaque paramètre de soudage et leurs interactions résiduelles.
- * L'analyse de variance a été appliquée pour trois longueurs de recouvrement (A20, A25, A30) montre : une légère variation de la force maximale de cisaillement par traction en fonction de la longueur de recouvrement.
- * Des modèles de régressions ont été définis en appliquant de modèle linéaire, et modèle linéaire avec simple interaction (F*T).
- * Le diagramme de Pareto montre que le courant de soudage est le paramètre le plus influant sur la réponse (Effort de cisaillement maximale).
- * Les paramètres de soudage optimaux obtenus dans cette étude sont 16 kA, 11 cycles, et 8 bars.

Cette étude montre l'intérêt d'utilisation d'une approche méthodique et statistique dans l'optimisation des procédés de fabrication. Elle ouvre également la voie à des recherches complémentaires, notamment en étudiant d'autres matériaux ou en intégrant des méthodes multicritères pour une optimisation plus globale du procédé de soudage.