

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En : GENIE MECANIQUE**

**Spécialité : ASSEMBLAGES SOUDES ET MATERIAUX**

**Par :**

Mlle. BEKHECHACH BOURAS SAIAH Asmaa

**Sujet**

**Application de l'analyse de régression pour l'étude des effets des paramètres de soudage par points de l'acier 316L sur le comportement mécanique**

Soutenu publiquement, le 18 / 06 /2025, devant le jury composé de :

M/ SEBAA Fethi	Université de Tlemcen	Président
M/ BENACHOUR Mustapha	Université de Tlemcen	Encadreur
M/ BENCHADLI Ismail	Université de Tlemcen	Co-Encadreur
Mme/ MEDJADI Nassima	Université de Tlemcen	Examineur

**Année universitaire : 2024/2025**

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur soutien sans faille et leurs prières constantes qui ont éclairé mon chemin tout au long de mes années d'études.

À mes frères et sœurs, à toute ma famille, à mes proches et à mes amies, pour leur présence, leur affection et leur encouragement indéfectible dans les moments de doute comme dans ceux de réussite.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers l'ensemble de mes enseignantes et enseignants, ainsi que toute l'équipe administrative du département de Génie Mécanique, pour leur engagement et leur accompagnement tout au long de mon cursus.

*BEKHECHACH Asmaa*

# *Remerciements*

Avant tout, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur BENACHOUR Mustapha, mon encadreur, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, ses conseils judicieux, et surtout pour sa bienveillance tout au long de ce travail. Son expertise et son soutien ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi Monsieur BENCHADLI Ismail pour son aide à mettre à disposition la base de données expérimentale et explications expérimentales en enrichissantes.

Je remercie aussi les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, pour leurs remarques enrichissantes et leur évaluations bienveillantes. Leur contribution a permis d'enrichir la qualité de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants et du personnel administratif du département de Génie Mécanique, pour leur encadrement, leur soutien et leur professionnalisme tout au long de mon parcours universitaire.

Je rends un hommage particulier à mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible. À mes frères et sœurs, à ma famille et à mes amies, je vous remercie pour votre présence, vos encouragements et votre précieuse aide.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

*BEKHECHACH Asmaa*

# ABSTRACT

Resistance spot welding is a fusion welding process. In this study, the effects of welding parameters (welding current from 8 to 16 kA, welding time from 10 to 13 cycles, and welding force from 6 to 8 bar) are investigated.

The experimental dataset, developed in the "Mechanical Systems & Materials Engineering: IS2M" laboratory by the doctoral student **BENCHADLI Ismail**, was used to optimize the spot welding parameters in relation to the maximum strength of lap and peel joints made of 316L stainless steel with a thickness of 1.5 mm, as well as the geometrical characteristics of the weld nugget. A regression analysis is applied to determine the significance of the process parameters, using a full factorial experimental design combined with statistical and graphical analysis of the results.

The regression analysis particularly focuses on studying the effects of spot welding parameters of 316L stainless steel on mechanical behavior through indicators such as weld diameter, penetration, and maximum tensile shear strength. The study shows that welding current is the dominant parameter influencing these three responses, while welding force and time have secondary effects that vary depending on the response. The resulting regression models exhibit excellent predictive accuracy with  $R^2$  values exceeding 90%. Furthermore, an optimized mathematical model, based on an analysis of variance, is used to achieve the highest strength level.

**Keywords:** Spot welding / welding parameters / 316L stainless steel / mechanical behavior / indentation diameter / penetration / maximum shear strength / regression analysis.

## RESUME

Le soudage par résistance par point est un procédé de soudage autogène. Dans cette étude, les effets des paramètres de soudage (courant de soudage 8 à 16 kA, temps de soudage 10 à 13 cycle et force de soudage 6 à 8 bar) sont étudiés.

La base des données expérimentales élaborée au niveau du laboratoire "Ingénierie des Systèmes Mécaniques & Matériaux : IS2M" par le doctorant BENCHADLI Ismail a été utilisée pour optimiser les paramètres de soudage par points en liaison avec la résistance maximale des assemblages à clin et en Peel joints en acier 316L d'une épaisseur de 1.5 mm et les paramètres géométriques du point de soudure. Une analyse de régression est appliquée pour déterminer l'importance des paramètres du processus en utilisant le couplage du plan expérimental factoriel complet avec une analyse statistique et graphique des résultats. L'application de l'analyse de régression portera notamment sur l'étude des effets des paramètres de soudage par points de l'acier 316L sur le comportement mécanique, à travers des indicateurs tels que le diamètre de la soudure, la pénétration et la résistance maximale en cisaillement par traction. L'étude montre que l'intensité du courant est le paramètre dominant influençant ces trois réponses, tandis que la force et le temps de soudage ont des effets secondaires, variables selon la réponse considérée. Les modèles de régression obtenus présentent une excellente précision prédictive avec des résidus  $R^2$  supérieurs à 90 %. De plus, un modèle mathématique optimisé au moyen d'une analyse de variance est utilisé pour obtenir le niveau de résistance le plus élevé.

**Mots clé :** Soudage par points / paramétrés de soudage / acier 316L / comportement mécanique / diamètre d'indentation / pénétration / résistance maximale cisaillement / Analyse par régression.

## م ا خ ص

يُعتبر اللحام بالمقاومة النقطية عملية لحام انصهاري. في هذه الدراسة، تم دراسة تأثير معلمات اللحام (تيار اللحام من 8 إلى 16 ك.أ، زمن اللحام من 10 إلى 13 دورة، وقوة اللحام من 6 إلى 8 بار). تم استخدام قاعدة البيانات التجريبية التي تم تطويرها في مختبر "هندسة الأنظمة الميكانيكية والمواد IS2M : من قبل الطالب الباحث بن شادلي إسماعيل، من أجل تحسين معلمات اللحام النقطي بالارتباط مع المقاومة القصوى لوصلات التراكب (clin joints) ووصلات النقشير (peel joints) المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ L 316 بسماكة 1.5 ملم، وكذلك الخصائص الهندسية لنقطة اللحام.

تم تطبيق تحليل انحداري لتحديد أهمية معلمات العملية باستخدام دمج بين تصميم تجريبي عاملي كامل وتحليل إحصائي ورسومي للنتائج. يركز تطبيق تحليل الانحدار بشكل خاص على دراسة تأثير معلمات اللحام النقطي للفولاذ L 316 على السلوك الميكانيكي، من خلال مؤشرات مثل قطر اللحام، الاختراق، والمقاومة القصوى للقص بواسطة الشد. أظهرت الدراسة أن شدة التيار الكهربائي هي المعلمة الأساسية التي تؤثر على هذه المؤشرات الثلاثة، بينما لقوة اللحام ومدة اللحام تأثيرات ثانوية تختلف باختلاف المؤشر المدروس.

النماذج الانحدارية الناتجة أظهرت دقة تنبؤية عالية جدًا، حيث تجاوزت قيمة  $R^2$  نسبة 90%. علاوة على ذلك، تم استخدام نموذج رياضي محسن اعتمادًا على تحليل التباين من أجل الوصول إلى أعلى مستوى من المقاومة.

الكلمات المفتاحية: اللحام النقطي / معلمات اللحام/ الفولاذ المقاوم للصدأ L316 /السلوك الميكانيكي/ قطر الاندماج/ الاختراق/ أقصى مقاومة قص/ تحليل انحداري.

# LA LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I :

<b>Figure I. 1:</b> principe de soudage par points .....	18
<b>Figure I. 2:</b> Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues .....	19
<b>Figure I. 3:</b> Les différentes phases d'un cycle de soudage .....	20
<b>Figure I. 4:</b> Electrode de la soudure par point en cuivre .....	22
<b>Figure I. 5:</b> Coupe d'un point soudé .....	23
<b>Figure I. 6:</b> Définition du domaine de soudabilité .....	24

## CHAPITRE II:

<b>Figure II. 1:</b> Capacité de charge de traction-cisaillement des échantillons de points de résistance soudés à un temps de soudage constant de 4 cycles .....	30
<b>Figure II. 2:</b> Variations du diamètre du noyau de soudure en fonction de courant de soudage .....	31
<b>Figure II. 3:</b> Comparaison des prédictions issues de l'apprentissage automatique basé sur la fonction Sigmoïde avec les valeurs mesurées de la résistance dynamique.....	32
<b>Figure II. 4:</b> Moyenne des rapports S/B pour la charge de rupture .....	34
<b>Figure II. 5 :</b> Moyenne des rapports S/B pour l'indentation .....	34
<b>Figure II. 6:</b> Signal de puissance typique et sa courbe de résistance dynamique correspondante .....	36
<b>Figure II. 7:</b> Features extracted from the power signal.....	37
<b>Figure II. 8:</b> Précision des données prédites et mesurées : a déplacement maximal, b charge de pointe et c énergie de rupture .....	38
<b>Figure II. 9:</b> Graphiques de résidus pour la hauteur des billes .....	40
<b>Figure II. 10:</b> Graphiques des résidus pour la largeur des billes .....	41

## CHAPITRE III:

<b>Figure III. 1:</b> Étapes de configuration d'une analyse de régression linéaire dans Minitab ....	45
<b>Figure III. 2:</b> Exemple de résultats numériques d'une régression linéaire dans Minitab.....	46
<b>Figure III. 3:</b> Ajout un modèle de régression .....	46
<b>Figure III. 4:</b> Graphique des résidus généré automatiquement par Minitab.....	46
<b>Figure III. 5:</b> Aperçu de l'interface d'analyse factorielle dans Minitab.....	47
<b>Figure III. 6:</b> Éléments de sortie de Minitab pour l'analyse factorielle.....	47
<b>Figure III. 7:</b> Diamètre prévue par rapport aux valeurs expérimentales.....	50

<b>Figure III. 8:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés – diamètre D .....	51
<b>Figure III. 9:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – diamètre D) .....	53
<b>Figure III. 10:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – diamètre D).....	53
<b>Figure III. 11:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – diamètre D)	54
<b>Figure III. 12:</b> Histogramme des résidus (modèle 1 – diamètre D).....	54
<b>Figure III. 13 :</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – diamètre D).....	54
<b>Figure III. 14:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – diamètre D) .....	56
<b>Figure III. 15:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – diamètre D).....	57
<b>Figure III. 16:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – diamètre D)	57
<b>Figure III. 17:</b> Histogramme des résidus (modèle 2 – diamètre D).....	57
<b>Figure III. 18 :</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – diamètre D).....	58
<b>Figure III. 19:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – diamètre D) .....	59
<b>Figure III. 20:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – diamètre D).....	60
<b>Figure III. 21:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – diamètre D)	60
<b>Figure III. 22:</b> Histogramme des résidus (modèle 3 – diamètre D).....	60
<b>Figure III. 23:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – diamètre D).....	61
<b>Figure III. 24:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – diamètre D) .....	62
<b>Figure III. 25:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – diamètre D).....	63
<b>Figure III. 26:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – diamètre D)	63
<b>Figure III. 27:</b> Histogramme des résidus (modèle 4 – diamètre D).....	63
<b>Figure III. 28:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – diamètre D).....	64
<b>Figure III. 29:</b> Pénétration prévue par rapport aux valeurs expérimentales .....	66
<b>Figure III. 30:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés– pénétration .....	66
<b>Figure III. 31:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – pénétration P) ..	68
<b>Figure III. 32:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – pénétration P) .....	69
<b>Figure III. 33:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – pénétration P) .....	69
<b>Figure III. 34:</b> Histogramme des résidus (modèle 1 – pénétration P) .....	69
<b>Figure III. 35:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – pénétration P).....	70

<b>Figure III. 36:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – pénétration P) ..	71
<b>Figure III. 37:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – pénétration P) .....	72
<b>Figure III. 38:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – pénétration P) .....	72
<b>Figure III. 39:</b> Histogramme des résidus (modèle 2 – pénétration P) .....	72
<b>Figure III. 40:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – pénétration P).....	73
<b>Figure III. 41:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – pénétration P) ..	74
<b>Figure III. 42:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – pénétration P) .....	75
<b>Figure III. 43:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – pénétration P) .....	75
<b>Figure III. 44:</b> Histogramme des résidus (modèle 3 – pénétration P) .....	75
<b>Figure III. 45:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – pénétration P).....	76
<b>Figure III. 46:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – pénétration P) ..	77
<b>Figure III. 47:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – pénétration P) .....	78
<b>Figure III. 48:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – pénétration P) .....	78
<b>Figure III. 49:</b> Histogramme des résidus (modèle 4 – pénétration P) .....	78
<b>Figure III. 50:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – pénétration P).....	79
<b>Figure III. 51:</b> Résistance maximale de traction prévue par rapport aux valeurs expérimentales.....	81
<b>Figure III. 52:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés – résistance maximale $R_m$ .....	82
<b>Figure III. 53:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – résistance maximale $R_m$ ).....	84
<b>Figure III. 54 :</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – résistance maximale $R_m$ ) .....	84
<b>Figure III. 55:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – résistance maximale $R_m$ ).....	84
<b>Figure III. 56:</b> Histogramme des résidus (modèle 1 – résistance maximale $R_m$ ) .....	85
<b>Figure III. 57:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – résistance maximale $R_m$ ).....	85

<b>Figure III. 58:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – résistance maximale $R_m$ ).....	87
<b>Figure III. 59:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – résistance maximale $R_m$ ) .....	88
<b>Figure III. 60:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – résistance maximale $R_m$ ).....	88
<b>Figure III. 61:</b> Histogramme des résidus (modèle 2 – résistance maximale $R_m$ ) .....	89
<b>Figure III. 62:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – résistance maximale $R_m$ ).....	89
<b>Figure III. 63:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – résistance maximale $R_m$ ).....	91
<b>Figure III. 64:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – résistance maximale $R_m$ ) .....	91
<b>Figure III. 65:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – résistance maximale $R_m$ ).....	92
<b>Figure III. 66:</b> Histogramme des résidus (modèle 3 – résistance maximale $R_m$ ) .....	92
<b>Figure III. 67:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – résistance maximale $R_m$ ).....	93
<b>Figure III. 68:</b> Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – résistance maximale $R_m$ ).....	94
<b>Figure III. 69:</b> Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – résistance maximale $R_m$ ) .....	95
<b>Figure III. 70:</b> Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – résistance maximale $R_m$ ).....	95
<b>Figure III. 71:</b> Histogramme des résidus (modèle 4 – résistance maximale $R_m$ ) .....	96
<b>Figure III. 72:</b> Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – résistance maximale $R_m$ ).....	96

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I :

**Tableau I. 1:** Compatibilité de soudage des métaux usuels ..... 26

## CHAPITRE III:

**Tableau III. 1:** Données expérimentales pour le diamètre (D)..... 49

**Tableau III. 2:** Tableau d'analyse des variances- modèle linéaire diamètre (D) ..... 50

**Tableau III. 3:** Résultats d'analyse de variance - modèle 1 diamètre (D)..... 53

**Tableau III. 4:** Résultats d'analyse de variance- modèle 2 diamètre (D)..... 56

**Tableau III. 5:** Résultats d'analyse de variance - modèle 3 diamètre (D)..... 59

**Tableau III. 6:** Résultats d'analyse de variance - modèle 4 diamètre (D)..... 62

**Tableau III. 7:** Données expérimentales pour pénétration ..... 65

**Tableau III. 8:** Tableau d'analyse des variances– modèle linière pénétration (P)..... 66

**Tableau III. 9:** Résultats d'analyse de variance– modèle 1 pénétration (P)..... 68

**Tableau III. 10:** Résultats d'analyse de variance– modèle 2 pénétration (P)..... 71

**Tableau III. 11:** Résultats d'analyse de variance– modèle 3 pénétration (P)..... 74

**Tableau III. 12:** Résultats d'analyse de variance– modèle 4 pénétration (P)..... 77

**Tableau III. 13:** Données expérimentales pour la résistance maximale en traction..... 80

**Tableau III. 14:** Tableau d'analyse des variances- modèle linière résistance maximale (Rm)  
..... 81

**Tableau III. 15:** Résultats d'analyse de variance- modèle 1 résistance maximale (Rm) ..... 83

**Tableau III. 16:** Résultats d'analyse de variance- modèle 1 résistance maximale (Rm) ..... 87

**Tableau III. 17:** Résultats d'analyse de variance- modèle 3 résistance maximale (Rm) ..... 90

**Tableau III. 18:** Résultats d'analyse de variance- modèle 4 résistance maximale (Rm) ..... 94

## Liste des Abréviations

- Q** : Quantité de chaleur générée, exprimée en joules (J)
- R** : Résistance électrique dynamique globale des pièces à souder, exprimée en ohms ( $\Omega$ )
- I** : Intensité du courant de soudage, exprimée en ampères (A)
- t** : Temps de passage du courant, exprimé en secondes (s)
- RSW** : Resistance Spot Welding (soudage par résistance par points)
- SP** : Soudage par Point
- AC** : Courant Alternatif
- MFDC** : Courant Continu à Moyenne Fréquence
- CASPR** : Coefficient d'Aptitude au Soudage par Résistance
- D** : Diamètre du point de soudure (mm)
- P** : Pénétration de la soudure (mm)
- F** : Force de soudage, exprimée en bar
- T** : Temps de soudage (cycle)
- ANOVA** : Analyse de la Variance
- R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination
- TSFL** : Tensile Shear Failure Load – charge maximale en cisaillement par traction
- NZH** : Nugget Zone Hardness – dureté dans la zone du noyau
- LAP-TSFL** : Charge de rupture en traction cisaillement en recouvrement
- CROSS-TSFL** : Charge de rupture en cisaillement transversal
- WA** : Amplitude de soudage (Welding Amplitude)
- WT** : Temps de soudage (Welding Time)
- WP** : Pression de soudage (Welding Pressure)
- XGBoost** : Extreme Gradient Boosting (modèle d'apprentissage automatique)
- ANN** : Artificial Neural Network
- CNN**: Convolutional Neural Network
- LSTM**: Long Short-Term Memory

## SOMMAIRE

Dédicace.....	II
Remerciements .....	III
ABSTRACT .....	IV
RESUME.....	V
مقدمة .....	VI
LA LISTE DES FIGURES .....	7
LISTE DES TABLEAUX .....	11
Liste des Abréviations.....	12
SOMMAIRE .....	13
Chapitre I : Généralités sur le soudage par points .....	17
I.1. Soudage par résistance par point :.....	18
I.1.1. Définition :.....	18
I.1.2. Principe :.....	18
I.1.3. Mécanisme de formation de la soudure [4] :.....	19
I.1.4. Cycle de soudage :.....	19
I.1.5. Paramètres de soudage par points [6] : .....	20
I.1.5.1. Effort de soudage :.....	20
I.1.5.2. Intensité de soudage : .....	21
I.1.5.3. Temps de soudage :.....	21
I.1.5.4. Temps de maintien : .....	21
I.1.5.5. Électrodes [6] : .....	21
I.1.5.5.1. Diamètre de la face active d'électrode :.....	22
I.1.6. Géométrie d'un point soudé :.....	22
I.1.8. Soudabilité des métaux [9] :.....	24
I.1.8.1. Soudabilité opératoire :.....	25
I.1.8.2. Soudabilité métallurgique :.....	25

<b>I.1.9. Avantages et inconvénients du soudage par points :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.1.9.1. Avantages :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.1.9.2. Inconvénients :</b> .....	<b>27</b>
<b>Référence chapitre I :</b> .....	<b>28</b>
<b>Chapitre II : Etat de l'arc sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage.....</b>	<b>29</b>
<b>II.1. Influence des paramètres de soudage par points et modèle d'analyse :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.2. État de l'art sur l'analyse de régression dans le soudage par points :</b> .....	<b>33</b>
<b>II.3. Optimisation des paramètres de soudage par points ultrasonique de l'alliage AA6061-T6 par régression polynomiale :</b> .....	<b>39</b>
<b>II.4. Modélisation des effets des paramètres du procédé SAW sur les caractéristiques du cordon de soudure par régression linéaire :</b> .....	<b>40</b>
<b>II.5. Analyse de régression appliquée au soudage à l'arc (procédé TIG) [18] :</b> .....	<b>41</b>
<b>Référence chapitre II :</b> .....	<b>42</b>
<b>Chapitre III: Résultats&amp;Discussions.....</b>	<b>44</b>
<b>III.1. Utilisation de la méthode d'analyse de régression :</b> .....	<b>45</b>
<b>III.2. Analyse factorielle sur le diamètre du point de Soudure :</b> .....	<b>47</b>
<b>III.3. Modélisation de régression et analyse de processus des paramètres de soudage sur le diamètre :</b> .....	<b>51</b>
<b>III.3.1. Modèle 1 – avec effets linéaires et interactions simples :</b> .....	<b>51</b>
<b>III.3.2. Modèle 2 – avec interactions <math>I \times T</math> et <math>I \times F</math> :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.3.3. Modèle 3 : Interaction entre <math>I^2</math> et une interaction triple <math>I \times T \times F</math> :</b> .....	<b>58</b>
<b>III.3.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative (<math>I \times T \times F</math>) :</b> .....	<b>61</b>
<b>III.4. Analyse de la pénétration au point de soudure :</b> .....	<b>64</b>
<b>III.5. Modélisation par régression et analyse de l'effet des paramètres de soudage sur la pénétration :</b> .....	<b>66</b>
<b>III.5.1. Modèle 1 – avec effets linéaires et interactions simples :</b> .....	<b>67</b>
<b>III.5.2. Modèle 2 – Avec interactions <math>IT</math> et <math>IF</math> :</b> .....	<b>70</b>

III.5.3. Modèle 3 : Interaction entre $I^2$ et une interaction triple $I \times T \times F$ :.....	73
III.5.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative : .....	76
III.6. Analyse de la résistance maximale en traction : .....	79
III.7. Modélisation par régression et analyse de l'influence des paramètres de soudage sur la résistance maximale en traction : .....	82
III.7.1. Modèle 1 – Avec effets linéaires et interactions simples : .....	82
III.7.2. Modèle 2 – Avec interactions $I \times T$ et $I \times F$ : .....	85
III.7.3. Modèle 3 : Interaction entre $I^2$ et une interaction triple $I \times T \times F$ :.....	89
III.7.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative : .....	93
Référence chapitre III : .....	96
Conclusion Générale .....	97

# Introduction Générale

Le soudage par résistance par points (RSW) est un procédé largement utilisé dans les industries automobile, aéronautique et de fabrication métallique pour l'assemblage rapide de tôles métalliques. Ce procédé présente de nombreux avantages, notamment une grande rapidité d'exécution, une bonne économie de matériau d'apport. Toutefois, la qualité d'une soudure par points dépend fortement de plusieurs paramètres de soudage tels que le courant électrique, la durée de l'impulsion, et la force appliquée. Une maîtrise précise de ces paramètres est donc essentielle pour garantir la performance mécanique et la fiabilité des assemblages.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en combinant les connaissances théoriques du soudage par points avec une approche analytique fondée sur l'analyse de régression. Le **premier chapitre** est consacré à une revue détaillée des principes du soudage par résistance par points, incluant ses mécanismes, ses paramètres clés, et ses domaines d'application. Le **deuxième chapitre** présente un état de l'art sur l'utilisation de l'analyse de régression dans l'optimisation des procédés de soudage, mettant en lumière les résultats de travaux antérieurs ayant utilisé des modèles statistiques et d'apprentissage automatique. Enfin, le **troisième chapitre** expose l'étude expérimentale menée dans ce travail. Celle-ci a pour objectif d'identifier les effets des paramètres de soudage sur trois réponses mécaniques essentielles : le diamètre du point soudé, la profondeur de pénétration, et la résistance maximale en traction. Les modèles de régression développés à l'aide du logiciel **Minitab 19** permettent de quantifier ces influences et de proposer des stratégies d'optimisation efficaces.

Ce travail vise ainsi à fournir un outil de décision rigoureux, basé sur la modélisation mathématique, pour améliorer le contrôle qualité du procédé RSW dans un contexte industriel.

# **Chapitre I :**

Généralités sur le soudage  
par points

### I.1. Soudage par résistance par point :

#### I.1.1. Définition

Le soudage par résistance par point est un procédé de soudage autogène, qui ne nécessite pas de métal d'apport. Il utilise l'effet Joule, où la chaleur générée par la résistance au passage d'un courant électrique à travers les pièces à assembler. Ces dernières sont empilées et comprimées entre deux électrodes en cuivre pur, qui concentrent le courant et la pression sur la zone à souder. La chaleur produite entraîne la fusion locale des surfaces en contact, formant un point de soudure (ou "nugget") qui se solidifie rapidement après l'arrêt du courant. [1]

#### ❖ Désignations du procédé

- Française : SP (Soudage par Point)
- Américaine : RSW (Resistance Spot Welding)
- Numérique : 21

#### I.1.2. Principe

Le principe du soudage par point repose sur le maintien en contact de deux tôles à assembler, serrées entre deux électrodes en cuivre par un dispositif de type étau. Un courant électrique de haute intensité est ensuite appliqué, traversant l'ensemble des tôles et des électrodes. Cette circulation de courant génère, par effet Joule, une chaleur intense qui provoque la fusion localisée des surfaces en contact des tôles, formant ainsi un noyau fondu. Lorsque le courant est coupé, ce noyau refroidit et se solidifie, créant une liaison solide entre les deux tôles au niveau du point de soudure. [1]

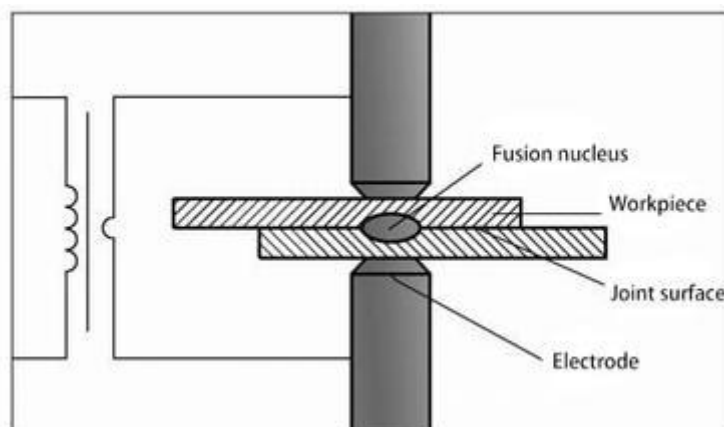


Figure I. 1: principe de soudage par points [2]

### I.1.3. Mécanisme de formation de la soudure [4]

La chaleur nécessaire pour fondre l'acier au niveau du contact entre les deux tôles est générée par **effet Joule** lors du passage du courant électrique à travers les conducteurs. La quantité de chaleur produite dépend de l'intensité du courant, de la résistance électrique rencontrée et de la durée du passage du courant. Cette quantité de chaleur est exprimée par la relation suivante : [3]

$$Q = R \cdot I^2 \cdot dt \quad (\text{I.1})$$

Où :

**Q** : Quantité de chaleur générée, exprimée en joules (J).

**R** : Résistance électrique dynamique globale des pièces à souder, exprimée en ohms ( $\Omega$ ).

**I** : Intensité du courant de soudage, exprimée en ampères (A).

**t** : Temps de passage du courant, exprimé en secondes (s). [4]

Cette chaleur provoque la fusion localisée des surfaces en contact, formant ainsi le noyau fondu qui, en refroidissant, solidifie et crée la soudure.

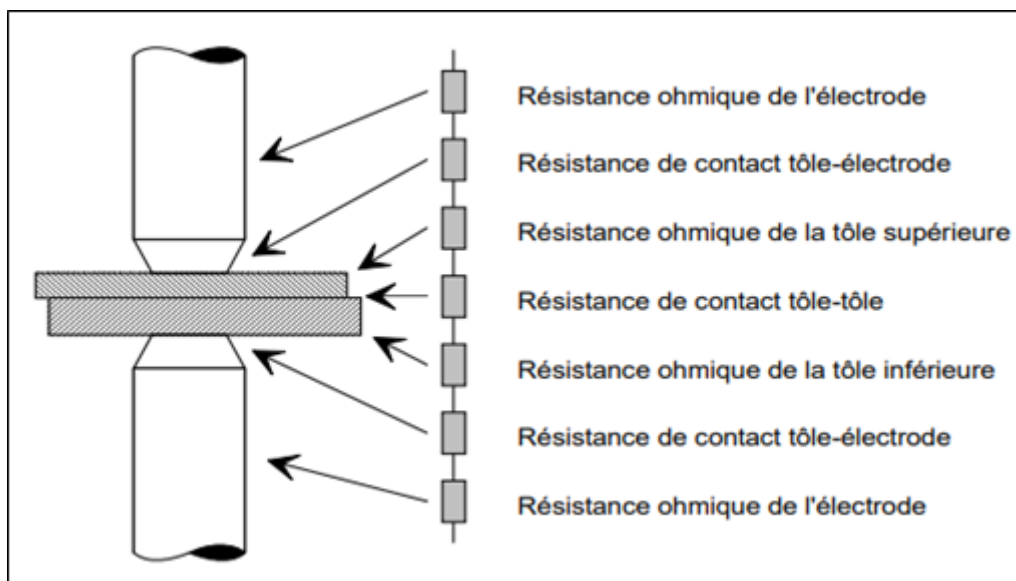


Figure I. 2: Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [5]

### I.1.4. Cycle de soudage

Le cycle de soudage se décompose en quatre phases principales :

- ❖ **Accostage** : Les électrodes se rapprochent pour comprimer les pièces à assembler jusqu'à atteindre l'effort de soudage requis. Dans les machines de soudage à commande

numérique (CRDM), seule l'électrode supérieure est mobile, tandis que l'électrode inférieure reste fixe.

- ❖ **Soudage** : Un courant électrique traverse les pièces à souder, produisant de la chaleur par effet Joule. Cette chaleur fait fondre localement la zone de contact entre les tôles.
- ❖ **Forgeage** : Après l'arrêt du courant, la pression est maintenue pour permettre au métal fondu de refroidir et de se solidifier tout en restant confiné, assurant une liaison solide.
- ❖ **Remontée de l'électrode** : Les électrodes se séparent, libérant les tôles soudées et permettant de déplacer les pièces pour réaliser un nouveau point de soudure. [5]

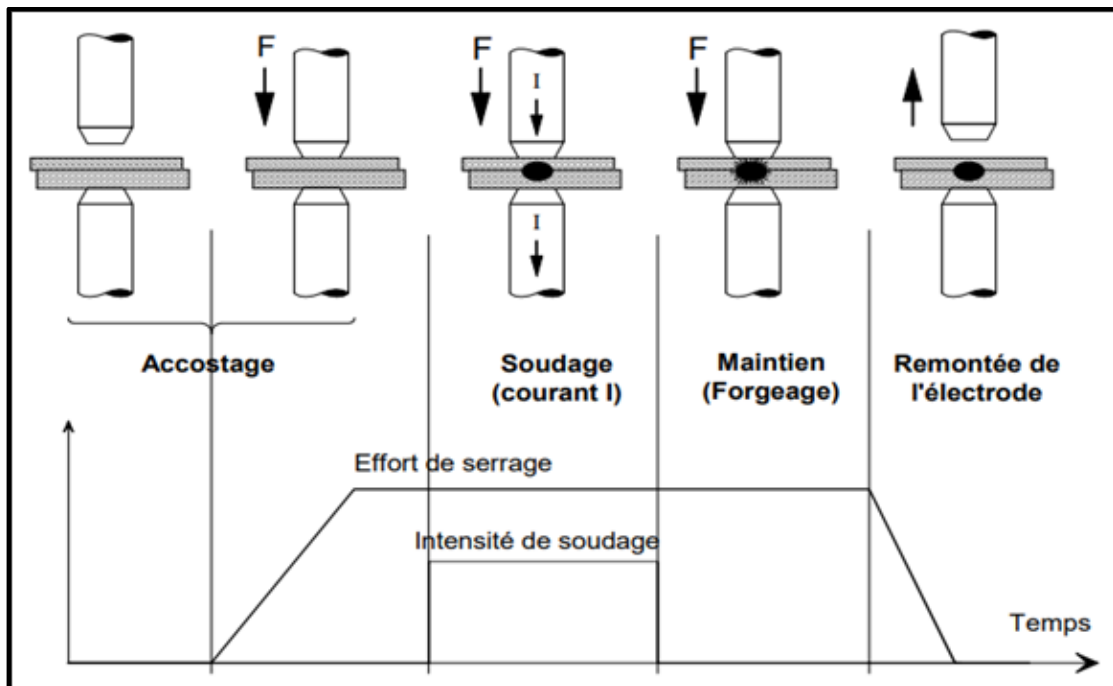


Figure I. 3: Les différentes phases d'un cycle de soudage [5]

### I.1.5. Paramètres de soudage par points [6]

Les paramètres de soudage sont ajustés en fonction des propriétés spécifiques des tôles à assembler. Les principaux paramètres, suivis dans l'ordre chronologique du processus, incluent l'effort de soudage, l'intensité du courant, la durée du soudage et la durée du maintien de la pression.

#### I.1.5.1. Effort de soudage :

L'effort de soudage est appliqué dès la phase d'accostage. Sa valeur dépend principalement des propriétés mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. En pratique, l'augmentation de l'effort pendant l'accostage n'est pas linéaire, mais varie selon les systèmes de chargement spécifiques de la machine de soudage.

### **I.1.5.2. Intensité de soudage :**

L'intensité du courant de soudage est un paramètre clé, car elle détermine l'énergie dissipée et influence directement la génération de chaleur par effet Joule. Ce courant peut être appliqué sous forme de courant alternatif monophasé (AC-50Hz) ou de courant continu à moyenne fréquence (MFDC-1000Hz).

### **I.2.5.3. Temps de soudage :**

Le temps de soudage correspond à la durée de la phase de chauffage, généralement de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. Selon les normes, ce temps varie en fonction de la nuance de l'acier et de son épaisseur. Pour les tôles épaisses ou à haute résistance mécanique, l'utilisation d'un courant pulsé est souvent nécessaire pour stabiliser la formation du noyau de fusion. Ce procédé implique des cycles alternés de chauffage et de refroidissement, avec un nombre de pulsations ajusté pour les matériaux à haute résistance.

### **I.1.5.4. Temps de maintien :**

Le temps de maintien est crucial pour permettre la solidification du noyau fondu en évacuant la chaleur vers le circuit de refroidissement à eau. Cette phase garantit la stabilité et la qualité de la soudure.

### **I.1.5.5. Électrodes [6] :**

Les électrodes jouent un rôle essentiel dans ce procédé de soudage. Un exemple typique d'électrode, de profil tronconique avec une face active hémisphérique. Ce paramètre externe influence directement le domaine de soudabilité, car la forme de la face active détermine la taille de la zone de contact aux interfaces. L'électrode remplit trois fonctions principales :

#### **❖ Mécanique :**

Pendant la phase de serrage, l'électrode assure un contact électrique optimal entre les tôles en exerçant une pression définie pour le soudage. Durant le soudage et le maintien, elle stabilise la zone fondue lors des phases de chauffage et de refroidissement. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit posséder une excellente résistance mécanique à chaud.

#### **❖ Electrique :**

Les électrodes transmettent une forte intensité de courant de soudage sans s'échauffer significativement. Ainsi, elles doivent présenter une conductivité électrique élevée.

#### **❖ Thermique :**

Les électrodes servent à évacuer la chaleur générée dans la zone de soudage vers le système de refroidissement par eau. Pendant le processus, il est crucial d'éliminer rapidement la chaleur

produite à l'interface électrode/tôle afin d'éviter que la zone fondue atteigne cette interface. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit combiner une grande capacité calorifique et une conductivité thermique élevée.

### I.2.5.5.1. Diamètre de la face active d'électrode :

Le diamètre de contact de l'électrode doit être approximativement égal à deux fois l'épaisseur de la pièce à souder, augmenté de 3 mm, soit :

$$D = 2e + 3 \text{ (mm)} \quad (\text{I.2})$$

Lorsque les pièces à souder ont des épaisseurs différentes mais une même nuance de matériau, l'électrode de plus petit diamètre est placée sur la pièce ayant l'épaisseur la plus faible. À l'inverse, si les pièces ont des épaisseurs identiques mais des nuances de matériau différentes, l'électrode de plus petit diamètre est positionnée sur la pièce ayant la résistivité la plus faible.

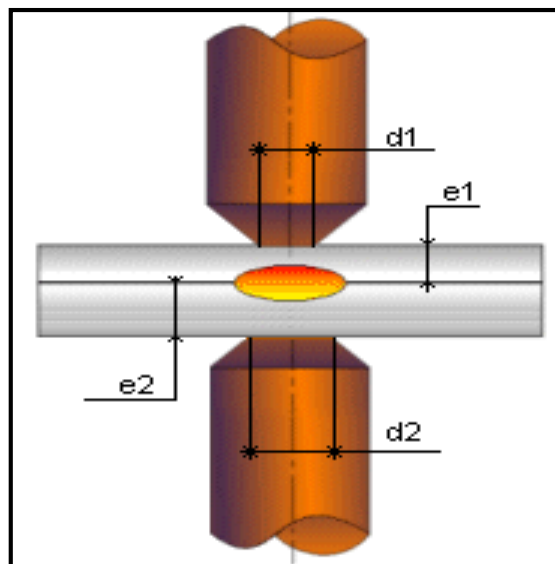
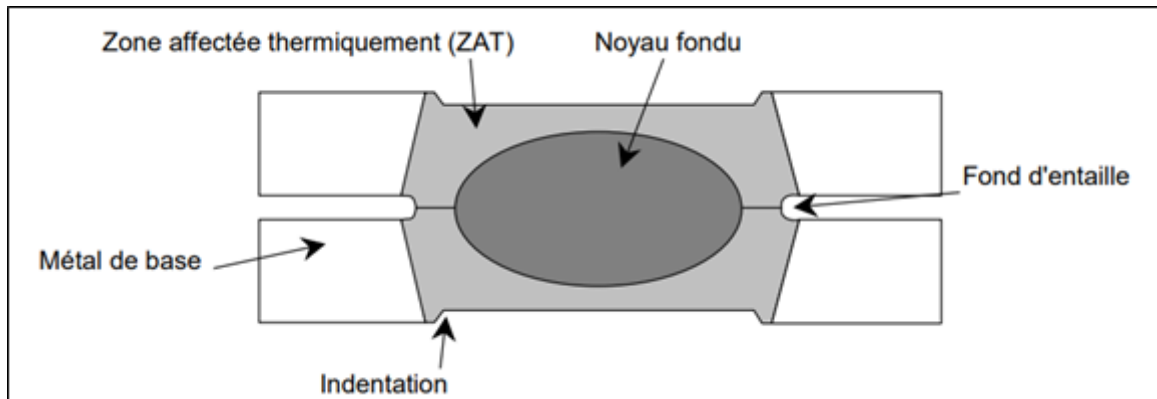


Figure I. 4: Electrode de la soudure par point en cuivre [7]

### I.1.6. Géométrie d'un point soudé

La géométrie d'un point soudé se distingue par trois caractéristiques principales :

- La discontinuité au niveau de l'assemblage,
- La présence d'une encoche qui engendre une concentration des contraintes sous l'effet de sollicitations mécaniques,
- L'indentation des surfaces externes de l'assemblage, résultant de la pénétration des électrodes.

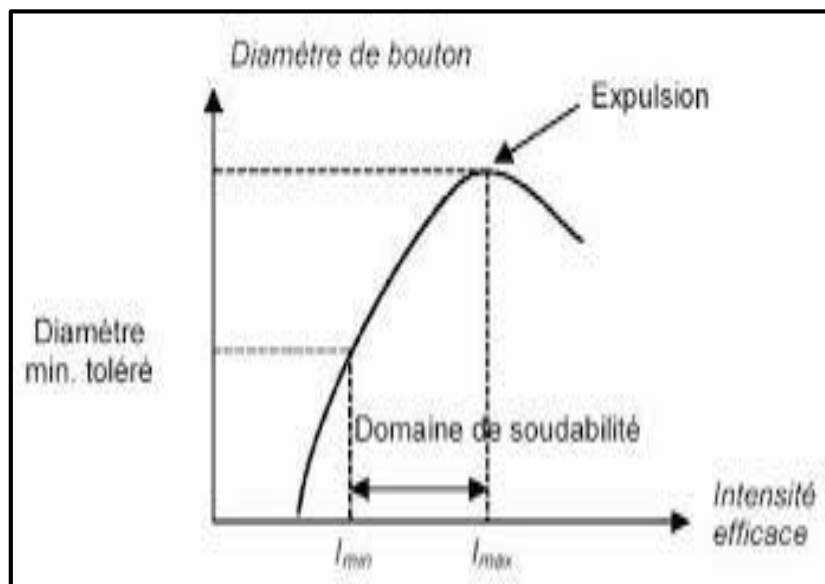


**Figure I. 5:** Coupe d'un point soudé [5]

Les propriétés mécaniques d'une soudure dépendent de la taille du noyau fondu, influencée par la puissance électrique utilisée. Une puissance trop faible entraîne un noyau fondu réduit ou absent, compromettant la résistance mécanique. Une puissance adéquate augmente la zone fondue, améliorant la soudure. Cependant, une puissance excessive provoque l'expulsion de métal fondu, dégradant la qualité. Pour un matériau, une durée et une force spécifiques, il existe une plage d'intensité (domaine de soudabilité) où la soudure est de qualité acceptable, entre une intensité minimale et une intensité maximale. [5]

### I.2.7. Domaine de soudabilité

Selon la norme [NF A 87-001], le domaine de soudabilité correspond à l'intervalle des intensités de courant efficace de soudage permettant de produire un point de soudure répondant aux critères mécaniques définis. Cette norme stipule que la quantité d'énergie électrique fournie au processus de soudage détermine la taille du noyau fondu. Si l'intensité électrique est insuffisante, le noyau fondu sera soit trop petit, soit inexistant, ce qui entraîne l'absence de déboutonnage lors des tests destructifs. En revanche, lorsque l'intensité atteint un certain seuil, un noyau fondu se forme, favorisant le déboutonnage lors des tests destructifs. Ainsi, plus l'intensité fournie augmente, plus la zone fondue s'élargit, ce qui améliore la résistance mécanique du point de soudure. [5]



**Figure I. 6:** Définition du domaine de soudabilité [8]

Le domaine de soudabilité correspond à l'intervalle  $[I_{min}, I_{max}]$ , où  $I_{min}$  désigne l'intensité minimale de soudage nécessaire pour obtenir un diamètre de noyau fondu acceptable, et  $I_{max}$  représente l'intensité maximale au-delà de laquelle des projections de matériau se produisent.

### I.1.8. Soudabilité des métaux [9]

En théorie, tous les métaux sont soudables, mais leur aptitude au soudage peut varier considérablement. Ces différences peuvent être surmontées en adaptant les techniques de soudage par résistance. La soudabilité peut concerner des métaux identiques (soudage homogène) ou des métaux différents (soudage hétérogène).

Les principales difficultés à surmonter incluent :

- Une structure cristalline thermiquement fragile ou incompatible.
- Des points de fusion très éloignés entre les métaux.
- Des intervalles de variation de température très courts.
- Une sensibilité excessive à l'oxydation.

### I.1.8.1. Soudabilité opératoire :

La soudabilité opératoire repose sur un ensemble de conditions garantissant un processus de soudage fluide et sans problème. Ces conditions incluent :

- ✓ **Fiabilité** : des machines sur les plans mécanique, électrique et thermique.
- ✓ **Qualité des matériaux** : en termes de résistivité et de conductivité.
- ✓ **Aspect de surface** : absence de défauts tels que la calamine ou la rouille.

La **loi du coefficient d'aptitude au soudage par résistance** permet d'évaluer à l'avance la soudabilité des matériaux :

$$\text{C. A. S. P. R} = \frac{\text{Résistivité}}{\text{Temps de fusion} \times \text{Conductivité thermique}} \quad (\text{I.3})$$

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

### I.1.8.2. Soudabilité métallurgique :

Bien qu'il existe une corrélation entre les propriétés des matériaux et leur soudabilité, l'assemblage peut s'avérer insatisfaisant en raison de limitations métallurgiques. La solidité de l'assemblage peut être compromise en fonction des matériaux utilisés et du cycle thermique appliqué. Ainsi, malgré les différents facteurs mentionnés précédemment, la qualité du soudage des métaux reste variable.

## Chapitre I : Généralités sur le soudage par points

**Tableau I. 1:** Compatibilité de soudage des métaux usuels

Métaux	Alum	Inox	Zinc	Galva	Acier	Laiton	Cuivre	Plomb	Nickel	Fer Blanc	Bronze Phosp
Alum	2	6	3	3	4	4	5	5	3	4	3
Inox	6	1	6	2	1	5	5	6	3	4	3
Zinc	3	6	3	2	2	5	5	4	5	3	4
Galva	3	6	2	2	2	4	5	4	4	3	3
Acier	4	1	2	2	1	4	5	4	4	3	3
Laiton	4	5	5	4	4	5	5	6	5	4	3
Cuivre	5	5	5	5	5	5	5	6	5	4	4
Plomb	5	6	3	4	4	6	6	5	6	5	3
Nickel	3	3	5	4	4	5	5	6	1	4	3
Fer Blanc	4	4	3	3	3	4	4	5	4	2	3
Bronze Phosp	3	4	4	3	3	3	4	5	3	4	2

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

### I.1.9. Avantages et inconvénients du soudage par points

#### I.1.9.1. Avantages :

- **Uniformité des joints :** Produit des soudures uniformes grâce à une pression et un courant constants à chaque point de soudure.
- **Assemblage de matériaux différents :** Permet de souder des matériaux dissemblables sans distorsion ni déformation.
- **Assemblage de matériaux légers :** Évite les brûlures et les dommages sur les matériaux légers en appliquant une chaleur contrôlée.
- **Rentable :** Réduit les coûts en éliminant la nécessité de gaz inertes ou de matériaux supplémentaires.
- **Vitesse de soudage :** Réalise une soudure rapide en quelques millisecondes, augmentant la productivité.
- **Répétabilité :** Offre une cohérence dimensionnelle exceptionnelle, surtout avec l'automatisation.

- **Zone moins affectée par la chaleur** : Limite le transfert de chaleur, réduisant les dommages thermiques aux pièces soudées.

### I.1.9.2. Inconvénients :

- **Limitation d'épaisseur** : Non adapté aux tôles de plus de 3 mm d'épaisseur, rendant la procédure inefficace pour les matériaux épais.
- **Taille de pièce limitée** : Convient principalement aux pièces petites ou moyennes, inadapté aux pièces volumineuses ou de formes complexes.
- **Nombre limité de points** : Peu efficace pour souder de grandes surfaces ou joindre plusieurs points en même temps.
- **Préparation de la surface** : La qualité de la soudure peut être compromise si les surfaces ne sont pas correctement nettoyées (absence de saleté, huile ou peinture).
- **Consommation d'énergie élevée** : Exige une puissance électrique importante, augmentant les coûts énergétiques.
- **Nécessite un opérateur qualifié** : Demande des compétences spécifiques pour configurer et utiliser l'équipement correctement.

### Référence chapitre I

- [1] The Aluminum Joining Manual - Version 2015
- [2] <https://artizono.com/fr/les-bases-du-soudage-par-points/>
- [3] Majid Pouranvari, Pirooz Marashi. (2010). "Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds". *Materials Science and Technology* 26(9), pp 1137-1144.
- [4] Majid Pouranvari (2011). "Effect of Fusion Zone Size on the Mechanical Response of DQSK Steel Resistance Spot Welds". *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(12), pp 573-577
- [5] Thèse : Étude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points -Gaétan MONARI.
- [6] Modélisation du procédé de soudage par points -Chainarong Srikunwong .
- [7] <https://www.soudeurs.com/site/le-soudage-par-resistance-par-points-procede-21-273/>
- [8] <http://www.educauto.org/ressources-mediatheque/elementsdecorrection-08-4jpg>
- [9] Ternane Fouad (2023). Caractérisation mécanique des assemblages soudés à matériaux hétérogènes. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- [10] Roland Cazes (1993). Soudage par résistance : Travail des métaux en feuilles, Assemblages. *Technique de l'Ingénieur*, Réf: B7720 v1.

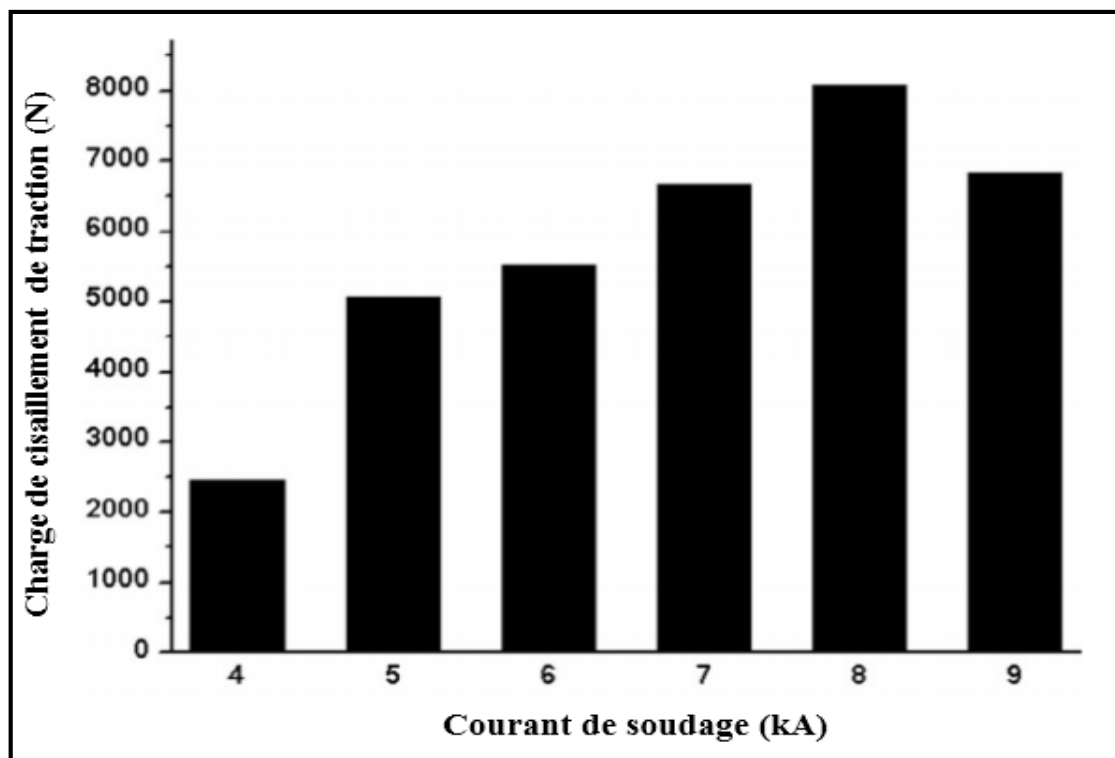
## **Chapitre II :**

Etat de l'art sur l'analyse de régression  
pour l'optimisation des paramètres de  
soudage

Ce chapitre présente un état de l'art sur l'influence et l'optimisation des paramètres de soudage par points de l'acier 316L intégrant la méthode de régression.

### **II.1. Influence des paramètres de soudage par points et modèle d'analyse**

Les paramètres de soudage appliqués à un tel assemblage doivent être optimisés et cela pour assurer une meilleure qualité. L'étude menée par Kianersi et al. [1] a permis d'optimiser les paramètres de soudage par points de l'acier inoxydable 316L. La variation des paramètres de soudage ont montré que l'augmentation du courant de soudage pour un temps de soudage fixe a fait augmenter la charge maximale de rupture (figure 1) de l'assemblage pour raison d'augmentation du noyau de fusion (figure 2).



**Figure II. 1:** Capacité de charge de traction-cisaillement des échantillons de points de résistance soudés à un temps de soudage constant de 4 cycles [1]

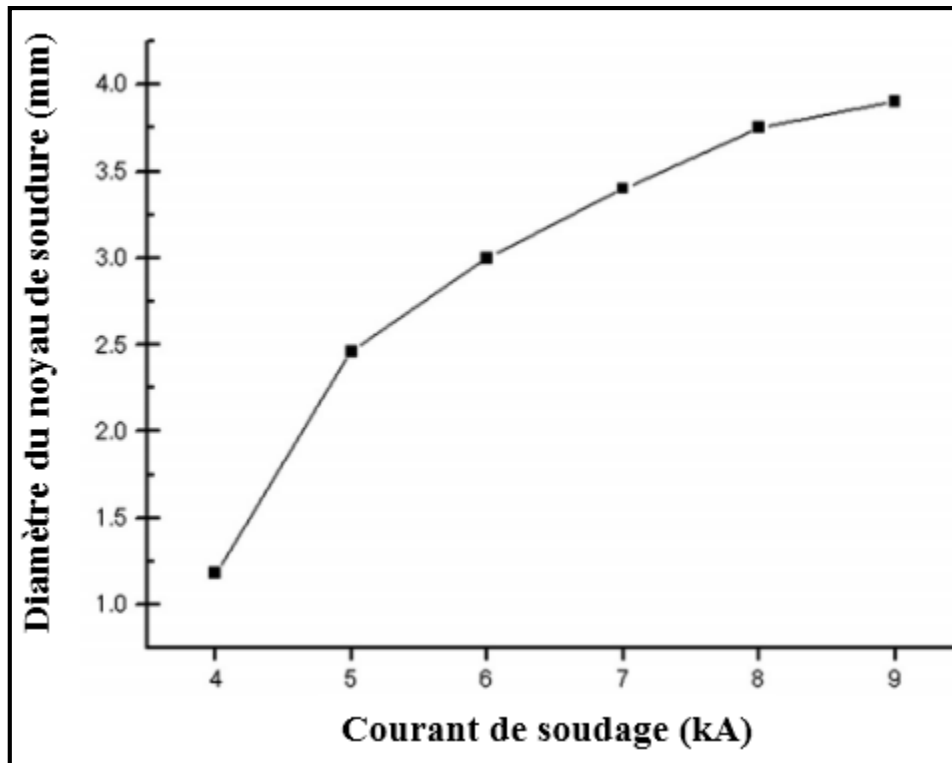


Figure II. 2: Variations du diamètre du noyau de soudure en fonction de courant de soudage [1]

Ternane et al. [2] ont appliqué la méthode de régression afin d'étudier l'influence des paramètres de soudage par points d'assemblages hétérogènes (304L SS- Z275 AG). Un modèle de régression linéaire a été proposé pour relier la résistance au cisaillement par traction des joints RSW au courant de soudage  $I$ , au temps de soudage  $T$  et à la force de soudage  $F$ .

L'effet des paramètres de soudage par RSW sur la résistance au cisaillement par traction du de l'alliage 5052Al à l'aide d'un plan factoriel a été étudié par Peasura [3]. Les effets des paramètres du procédé RSW et leurs interactions ont été étudiés par Luo et al. [4] en appliquant un modèle de régression non linéaire.

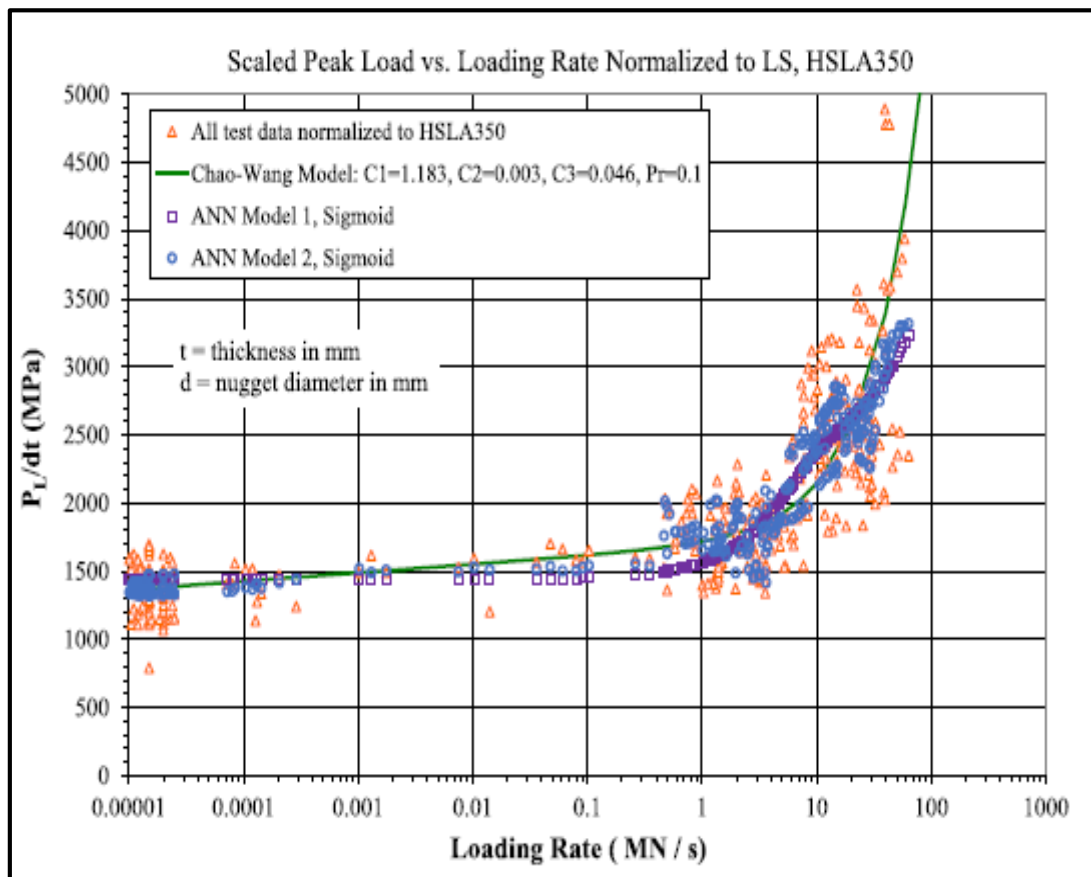
L'analyse de régression polynomiale a été utilisée par Rajarajan et al. [5] pour développer des relations empiriques entre les paramètres de soudage par points et les caractéristiques mécaniques de performance des joints en acier AHSS. Les modèles de régression développés dépendent des paramètres de soudage et l'interaction entre eux.

L'analyse de régression multiple a été utilisée par Jung et Kim [6] pour modéliser de façon empirique l'influence des paramètres de soudage laser — notamment la puissance et la vitesse de soudage — sur la profondeur de pénétration dans les joints en acier inoxydable STS301L.

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

Leurs modèles tiennent compte non seulement des effets individuels de chaque paramètre, mais aussi de leurs interactions croisées et effets quadratiques. Cette approche a permis d'atteindre une précision de prédiction de l'ordre de 98 %, ce qui représente un atout considérable pour garantir la qualité des soudures.

Zhu et al [7] se sont penchés sur la résistance dynamique des soudures par points dans les aciers à haute résistance, en combinant des méthodes de régression classiques et des techniques d'apprentissage automatique. Ils ont d'abord évalué des modèles linéaires, exponentiels, ainsi qu'un modèle hybride dit de Chao-Wang, capables de prédire la résistance en fonction du taux de chargement. Mais c'est l'intégration de réseaux de neurones artificiels (ANN) qui a permis une nette amélioration des résultats. Ces modèles, prenant en compte des variables supplémentaires telles que l'épaisseur des tôles et le diamètre du noyau de soudure, ont offert une prédiction bien plus précise, notamment dans les cas à fort taux de variabilité.



**Figure II. 3:** Comparaison des prédictions issues de l'apprentissage automatique basé sur la fonction Sigmoïde avec les valeurs mesurées de la résistance dynamique

## **II.2. État de l'art sur l'analyse de régression dans le soudage par points**

Ghunage et Ahuja [8] se sont penchés sur l'optimisation du procédé de soudage par points de résistance appliqué à l'assemblage d'aciers dual phase DP590 et DP980, très répandus dans l'industrie automobile en raison de leur légèreté et de leur résistance mécanique. Pour évaluer l'effet des paramètres du procédé sur la qualité du joint, ils ont mis en œuvre une analyse de régression multiple, outil statistique permettant de modéliser les relations entre plusieurs variables. Plus précisément, leur modèle visait à relier la résistance au cisaillement des soudures à trois paramètres principaux : l'intensité du courant, la durée d'impulsion (exprimée en cycles) et la force de serrage appliquée. L'expérimentation a été structurée autour d'un plan factoriel complet à trois niveaux, garantissant une exploration rigoureuse et systématique de l'espace des paramètres. Les résultats obtenus ont permis d'identifier le courant et le temps de soudage comme les facteurs ayant le plus d'impact sur la résistance mécanique des joints, tandis que la force de serrage, bien que non négligeable, s'est révélée moins influente. Le modèle de régression construit a montré une capacité prédictive satisfaisante, confirmée par une analyse de la variance (ANOVA). Pour appuyer ces observations, les auteurs ont présenté des graphes d'effets principaux illustrant l'influence de chaque paramètre sur la charge de rupture et l'empreinte laissée par les électrodes. Ces visualisations sont synthétisées dans les figures 4 et 5 : la première met en évidence la variation de la charge maximale en fonction des paramètres (figure 4), tandis que la seconde montre l'évolution de l'indentation (figure 5). Ces éléments graphiques viennent renforcer la pertinence du modèle proposé et illustrent l'intérêt concret de l'approche statistique pour l'optimisation des procédés de soudage.

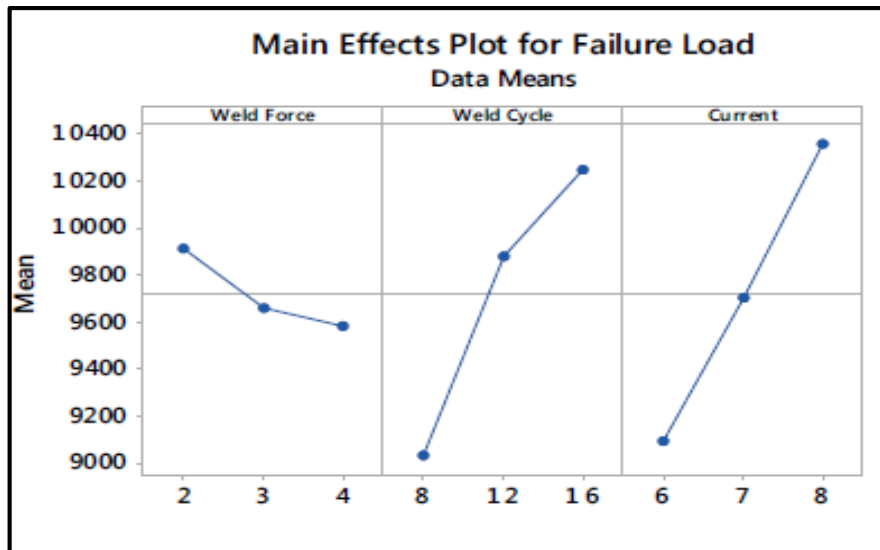


Figure II. 4: Moyenne des rapports S/B pour la charge de rupture [9]

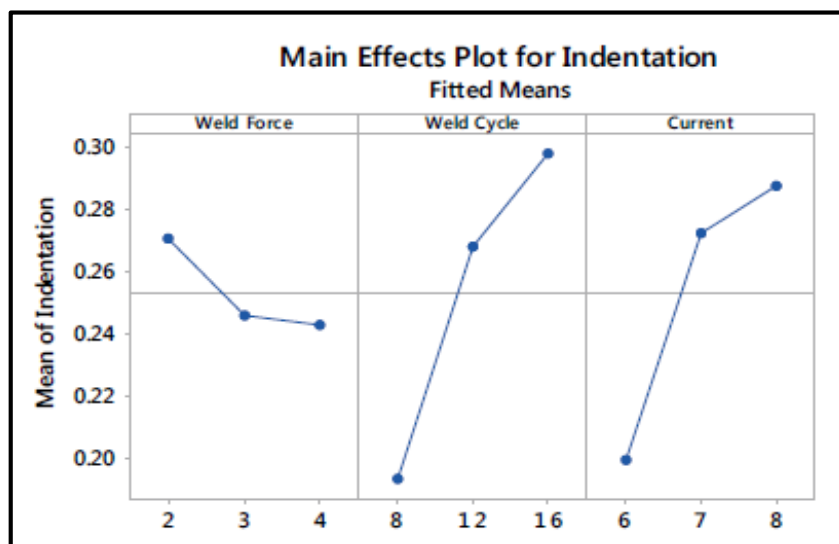


Figure II. 5 : Moyenne des rapports S/B pour l'indentation [9]

Chuenmee et al. [10] ont appliqué la méthode de régression en combinaison avec l'apprentissage automatique pour prédire la qualité des soudures par points par résistance dans l'industrie automobile. Un modèle de régression, basé principalement sur des paramètres extraits du processus de soudage (tels que la résistance dynamique, le courant de soudage et le temps de soudage), a été établi pour classer la qualité des soudures en trois niveaux : soudure satisfaisante, expulsion et soudure froide. Leur étude s'est appuyée sur la collecte de données issues à la fois d'expériences en laboratoire et de lignes de production industrielles réelles. À partir de ces données, des modèles de machine learning, notamment l'Artificiel Neural Network (ANN), le Convolutional Neural Network (CNN) et le Long Short-Term Memory (LSTM),

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

---

Random Forest, et XGBoost, ont été développés et comparés. Parmi eux, le modèle XGBoost a montré la meilleure performance, atteignant une précision de 97,1 %

Wang et al. [11] ont appliqué la méthode de régression afin d'étudier l'influence des paramètres de soudage par points d'assemblages hétérogènes (acier inoxydable 304L – acier doux à faible teneur en carbone). Un modèle de régression linéaire a été proposé pour relier la résistance au cisaillement par traction des joints RSW au courant de soudage I, au temps de soudage T et à la force de serrage F. L'équation de régression développée est de la forme :

$$\text{Résistance au cisaillement} = aI + bT + cF + d \quad (\text{II.1})$$

Les résultats ont montré que le courant de soudage est le facteur dominant influençant la résistance mécanique, suivi du temps de soudage et enfin de la force de serrage. Le modèle proposé a présenté une forte corrélation avec les valeurs expérimentales, validée par un coefficient de détermination  $R^2$  supérieur à 99 %.

Zhao et al. [12] ont appliqué une méthode de régression afin d'étudier l'influence des paramètres du second cycle de soudage par points sur les assemblages homogènes en acier HSLA 420. Un modèle de régression quadratique a été proposé pour relier le diamètre du noyau de soudure, la charge maximale et l'énergie absorbée aux paramètres du procédé, à savoir le courant de soudage I, le temps de soudage T et le temps de refroidissement  $t_0$ . Ces modèles ont permis d'optimiser les conditions post-soudage en vue d'améliorer les propriétés mécaniques et géométriques des joints soudés.

Le modèle de régression utilisé s'exprime selon l'équation générale suivante :

$$f(I, t, t_0) = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 t + \beta_3 t_0 + \beta_{11} I^2 + \beta_{22} t^2 + \beta_{33} t_0^2 + \beta_{12} It + \beta_{13} It_0 + \beta_{23} tt_0 \quad (\text{II.2})$$

Où f désigne la variable de réponse (par exemple, la résistance mécanique ou le diamètre du noyau), et  $\beta$  les coefficients de régression.

Les résultats montrent que le courant de soudage est le facteur le plus influent, suivi du temps de soudage, tandis que le temps de refroidissement joue un rôle secondaire. Le modèle a permis

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

de prédire la qualité des soudures avec une précision élevée, comme en témoigne un coefficient de détermination  $R^2$  supérieur à 0,95.

Zhao et al. [13] ont appliqué la méthode de régression afin d'étudier l'influence des paramètres du signal de puissance dynamique sur la qualité des soudures par points en alliage de titane TC2. Un modèle de régression quadratique a été proposé pour relier le diamètre du noyau de soudure aux caractéristiques extraites du signal de puissance, notamment le pic de puissance, le point d'inflexion, la variation de puissance, le taux de diminution de la puissance et la quantité de chaleur générée, comme illustré dans les Figures 5 et 9. Les coefficients du modèle ont été déterminés par la méthode de régression pas à pas, permettant d'identifier les variables les plus significatives sur la croissance du noyau de soudure.

$$D = 0,1596 \times P_m + 5,1538 \times P_s + 0,05728 \times Q + 1,0963 \times P_m \times P_s - 2,38315 \times P_n \times P_s - 9,6121 \times P_s^2 - 0,0007 \times Q^2 \quad (\text{II.3})$$

Où :

- $D$  = diamètre du noyau de soudure (en mm)
- $P_m$  = puissance maximale (peak power)
- $P_s$  = taux de diminution de la puissance (power decrease rate)
- $Q$  = quantité totale de chaleur générée (intégrale du signal de puissance)
- $P_n$  = puissance au point d'inflexion (inflection point power)

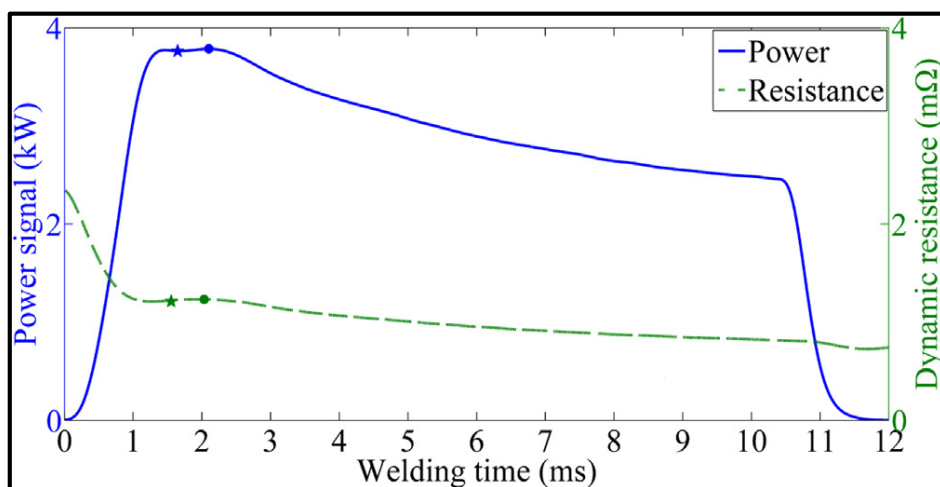


Figure II. 6: Signal de puissance typique et sa courbe de résistance dynamique correspondante

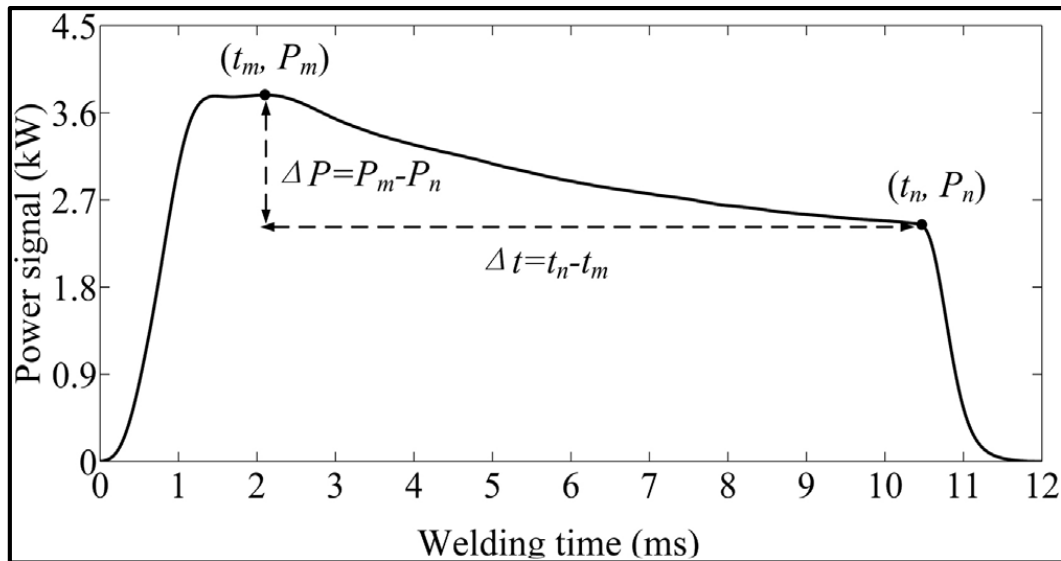


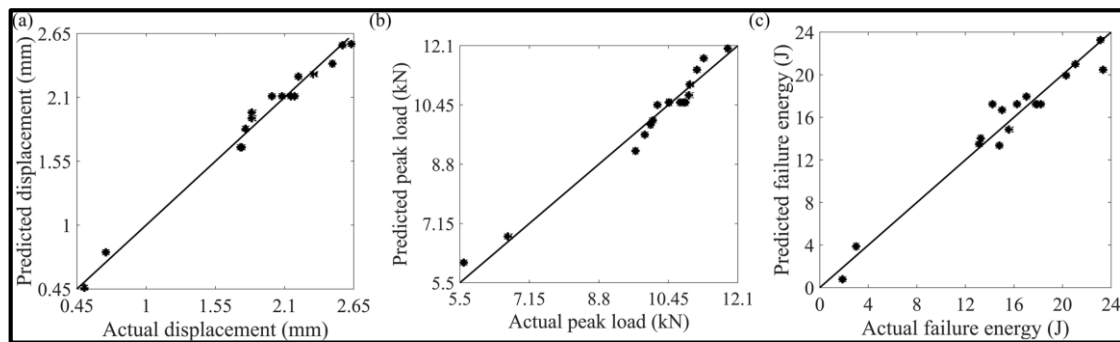
Figure II. 7: Features extracted from the power signal

Rajarajan et al. [14] ont appliqué une méthode de régression polynomiale du second ordre dans le but d'optimiser les paramètres de soudage par points par résistance (RSW) pour l'assemblage de tôles minces en acier à haute résistance dual-phase DP800. Les auteurs ont modélisé l'influence du courant de soudage (I), de la pression des électrodes (P) et du temps de soudage (T) sur la charge de rupture en cisaillement par traction en recouvrement (LAP-TSFL), la charge de rupture en cisaillement transversal (CROSS-TSFL) ainsi que sur la dureté de la zone de noyau (NZH). À cette fin, ils ont utilisé une analyse de régression multiple intégrée dans une méthodologie de surface de réponse (RSM), et ont établi un modèle polynômial de second ordre prenant en compte les effets linéaires, quadratiques et d'interaction des facteurs. L'adéquation du modèle a été validée par une analyse de variance (ANOVA), montrant un excellent coefficient de détermination ( $R^2 > 0,999$ ) et un écart de prédiction moyen inférieur à 2 %. Ce modèle a permis d'identifier une combinaison optimale des paramètres de soudage (I = 5,05 kA, P = 3,99 MPa, T = 1,53 s) garantissant une performance mécanique élevée des joints soudés, avec une LAP-TSFL de 21,57 kN, une CROSS-TSFL de 17,34 kN, et une dureté de 585 HV dans la zone du noyau.

Zhao et al. [15] ont appliqué une méthode de régression polynomiale du second ordre pour étudier l'effet des paramètres de soudage par points sur les propriétés mécaniques d'assemblages dissemblables entre les aciers HSLA 420 et BH 220. Un modèle de régression a été établi pour relier le déplacement maximal, la charge maximale et l'énergie de rupture aux variables de procédé telles que le courant de soudage (I), le temps de soudage (T) et la pression

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

des électrodes (F). L'étude s'est appuyée sur un plan d'expérience Box-Behnken et une analyse de variance (ANOVA) a confirmé la significativité du modèle, avec des coefficients de détermination élevés ( $R^2 \geq 0,94$ ). Les résultats ont montré que le courant de soudage est le facteur le plus influent, et que les interactions entre paramètres ont également un effet significatif sur les performances mécaniques des joints RSW. Un modèle d'optimisation par fonction de désirabilité a permis d'identifier une combinaison optimale des paramètres ( $I = 10,8$  kA,  $T = 13,9$  cycles,  $F = 0,4$  MPa), confirmée par des essais expérimentaux avec une erreur de prédiction moyenne inférieure à 5,5 %.



**Figure II. 8:** Précision des données prédites et mesurées : a déplacement maximal, b charge de pointe et c énergie de rupture

### **II.3. Optimisation des paramètres de soudage par points ultrasonique de l'alliage AA6061-T6 par régression polynomiale**

Rajalingam et al. [16] ont appliqué la méthode de régression afin d'étudier l'influence des paramètres de soudage par points ultrasonique (USW) sur l'alliage d'aluminium AA6061-T6. Un modèle de régression polynomiale d'ordre deux a été proposé pour relier la résistance au cisaillement par traction des joints USW (TSFL) à l'amplitude de soudage (WA), au temps de soudage (WT) et à la pression de soudage (WP). La validation du modèle par l'analyse de variance (ANOVA) a montré une forte corrélation avec un coefficient de détermination  $R^2=0.9446$ , attestant de sa précision. Le modèle a ainsi permis d'optimiser efficacement les paramètres de soudage pour atteindre une capacité de charge maximale de 5.08 kN.

## II.4. Modélisation des effets des paramètres du procédé SAW sur les caractéristiques du cordon de soudure par régression linéaire

L'analyse de régression linéaire a été utilisée par Vedrtnam et al. [17] pour établir des relations empiriques entre les paramètres du procédé de soudage à l'arc submergé (SAW) et les caractéristiques géométriques et mécaniques du cordon de soudure. Les modèles de régression développés mettent en évidence l'effet individuel des paramètres de soudage tels que la tension d'arc, le courant, la vitesse de déplacement et la distance buse-plaque ainsi que leurs influences combinées sur la largeur du cordon, la hauteur du cordon et la dureté du joint. Bien que ces modèles soient principalement linéaires, l'étude a montré que certaines réponses complexes nécessitent des formulations polynomiales plus avancées pour mieux capter les interactions entre les variables du procédé.

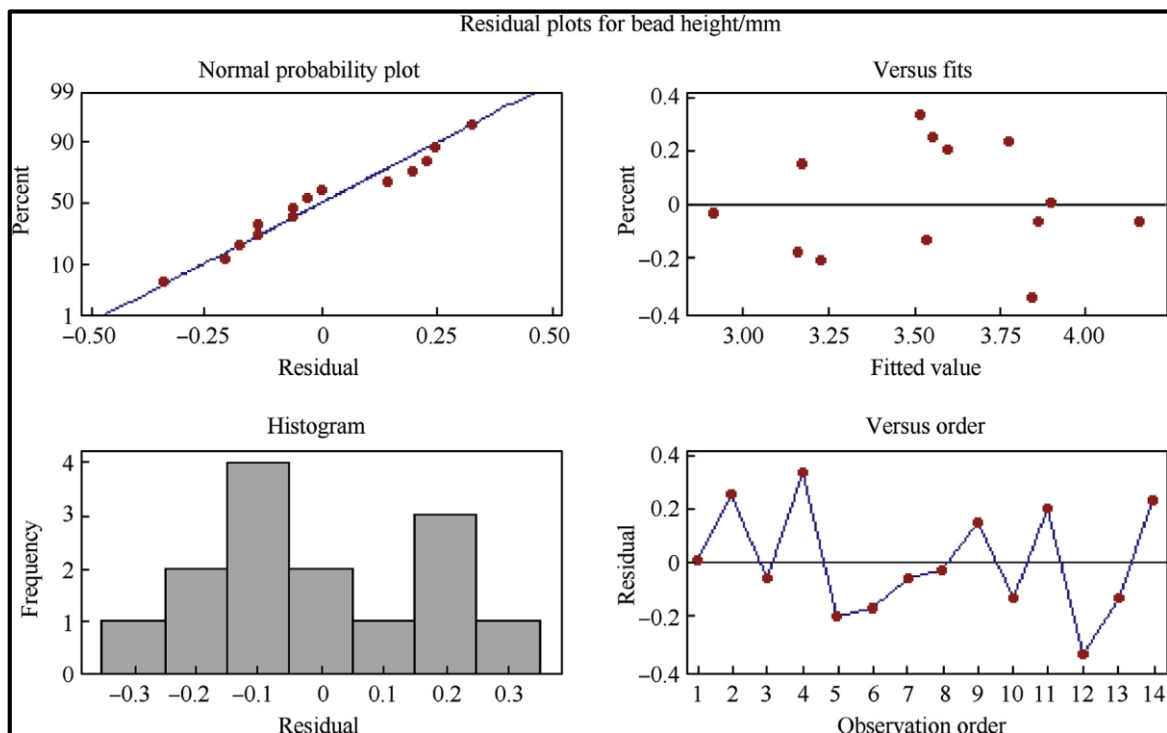
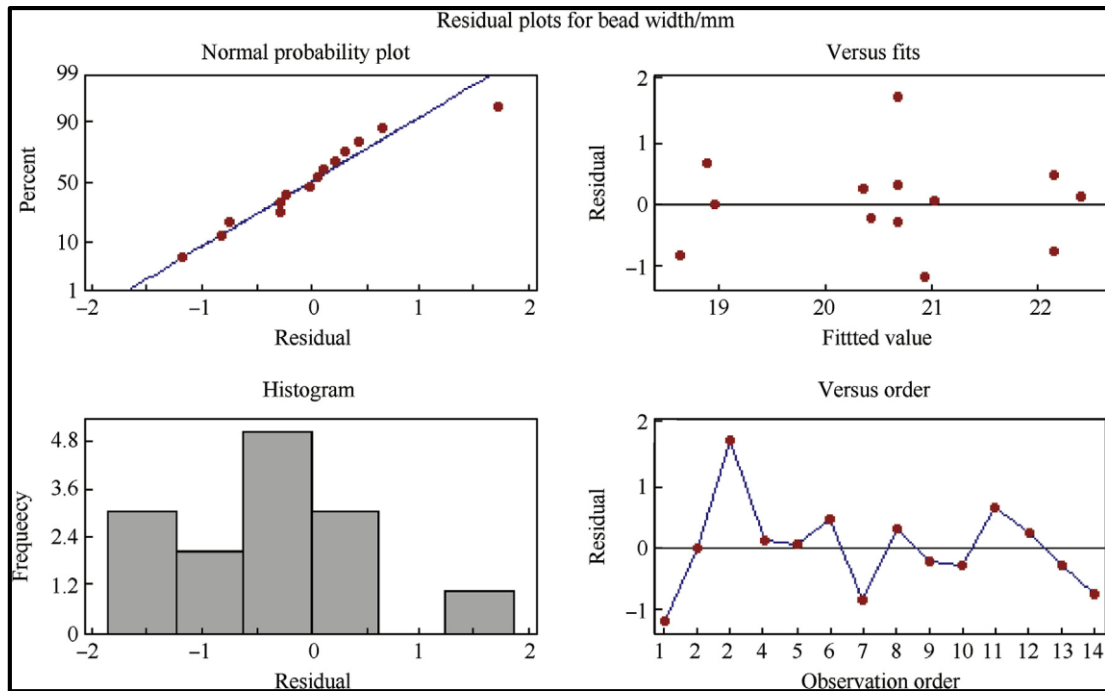


Figure II. 9: Graphiques de résidus pour la hauteur des billes



**Figure II. 10:** Graphiques des résidus pour la largeur des billes

## II.5. Analyse de régression appliquée au soudage à l'arc (procédé TIG) [18]

L'analyse de régression linéaire constitue un outil fondamental dans l'étude des procédés de soudage à l'arc, permettant de quantifier l'influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques géométriques du cordon. Dans le cadre du soudage TIG sur l'acier inoxydable SS304, une étude a été conduite pour modéliser les effets du courant de soudage ( $I$ ), de la vitesse d'avance ( $S$ ) et du débit de gaz de protection ( $L$ ) sur trois réponses : la profondeur de pénétration ( $BP$ ), la hauteur du cordon ( $BH$ ) et la largeur du cordon ( $BW$ ). Les équations de régression obtenues sont les suivantes :

$$BP = 3,60 + 0,141 \times S + 0,00033I + 0,0450 \times L \quad (II.4)$$

$$BH = -0,719 + 0,0520 \times S + 0,00267 \times I + 0,00333 \times L \quad (II.5)$$

$$BW = 6,71 + 0,0807 \times S + 0,00367 \times I - 0,00333 \times L \quad (II.6)$$

Ces modèles révèlent que :

- La pénétration augmente principalement avec la vitesse de soudage et le débit de gaz.
- La hauteur du cordon est sensible à la variation du courant et de la vitesse d'avance.
- La largeur du cordon est positivement corrélée au courant et à la vitesse, mais diminue légèrement avec un débit de gaz plus élevé.

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

---

L'interprétation de ces modèles permet une optimisation rationnelle du procédé TIG, notamment dans les configurations exigeant des tolérances dimensionnelles strictes et une répétabilité du résultat.

### Référence chapitre II

- [1] Kianersi D., Mostafaei A., Amadeh A.A. (2014). "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations"; *Materials and Design* 61 (2014) 251–263
- [2] Ternane, F., Benachour, M., Sebaa, F. and Benachour, N. (2022). Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Dissimilar Steel Sheets. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 12, 4 (Aug. 2022), 8896–8900.
- [3] P. Peasura (2013) "Optimization of Resistance Spot Welding on Aluminum Magnesium 5052 Grade with 2<sup>3</sup> Factorial Designs," *Advanced Materials Research*, vol. 622–623, pp. 340–343.
- [4] Y. Luo, J. Liu, H. Xu, C. Xiong, and L. Liu (2009) "Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet," *Materials & Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2547–2555.
- [5] 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.
- [6] O. Komaki, T. Hiroshima, T. Murata and T. Marutani (2012). Laser Welding Method, Laser-Welded Joint, Outside Sheathing Panel, and Body Structure for Rolling Stock, U.S. Patent No 8124908.
- [7] Lin S.H., Pan J., Wu S., Tyan T. (2004) Failure loads of spot weld specimens under impact opening and shear loading conditions. *Exp Mech* 44(2):147–157.
- [8] Bina, M.H., Jamali, M., Shamanian, M., Sabet, H. (2015). Effect of welding time in the resistance spot-welded dissimilar stainless steels. *Trans. Indian Inst. Met.* 68, 247–255.
- [9] S.U. Ghunage, B.B. Ahuja (2023) "Experimental Investigation on Joining of DP590–DP980 Automotive Steels by Resistance Spot Welding" *Advances in Additive Manufacturing and Metal Joining, Lecture Notes in Mechanical Engineering*.
- [10] Kirchheim, A., Schaffner, G., Staub, R., Jeck, N. (2001). Elektrodenkraft als wichtige Prozessgröße beim Widerstandspunktschweißen. *Z. Schweißen und Schneiden* 53, 635–637.

## Chapitre II : Etat de l'art sur l'analyse de régression pour l'optimisation des paramètres de soudage

---

- [11] Wang, B., Qiu, F., Chen, L., Zhou, Q., Dong, B., Yang, H., Yang, J., Feng, Z., Tyrer, N., Barber, G.C., Hu, M. (2022). Microstructure and shearing strength of stainless steel/low carbon steel joints produced by resistance spot welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2668–2679.
- [12] Zhao, D., Vdonin, N., Radionova, L., Glebov, L., & Bykov, V. (2022). Optimization of post-weld tempering parameters for HSLA 420 steel in resistance spot welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123, 1811–1823
- [13] Zhao, D., Wang, Y., Liang, D., & Ivanov, M. (2020). Performances of regression model and artificial neural network in monitoring welding quality based on power signal. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1231–1240.
- [14] C. Rajarajan, P. Sivaraj, T. Sonar, S. Raja, N. Mathiazhagan (2022). Resistance spot welding of advanced high strength steel for fabrication of thin-walled automotive structural frames, *Forces in Mechanics*, vol. 7, 100084.
- [15] Zhao, D., Vdonin, N., Radionova, L., Glebov, L., & Guseinov, K. (2023). Resistance spot welding of high-strength low-alloyed (HSLA) 420 steel and bake-hardening (BH) 220 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128, 1441–1453
- [16] Rajalingam P., Rajakumar S., Kavitha S., Sonar T. (2024). Ultrasonic spot-welding of AA 6061-T6 aluminium alloy: Optimization of process parameters, microstructural characteristics and mechanical properties of spot joints, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7, 25–36.
- [17] Vedrtam, A., Singh, G., & Kumar, A. (2018). Optimizing submerged arc welding using response surface methodology, regression analysis, and genetic algorithm. *Defence Technology*, 14(3), 204–212.
- [18] Mukti Chaturvedi & S. Arungalai Vendan (2021). *Advanced Welding Techniques: Holistic View with Design Perspectives*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. — Chapitre 4, section 4.6 à 4.7.

# **Chapitre III:**

## **Résultats & Discussions**

### III.1. Utilisation de la méthode d'analyse de régression

L'analyse de régression a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 19, afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres de soudage sur les réponses mécaniques obtenues. Comme illustré dans la figure III.1, cette méthode commence par la sélection de la variable de réponse et des prédicteurs via le menu dédié à la régression. Après validation, Minitab génère automatiquement des résultats statistiques (figure III.2), incluant les coefficients de régression, les p-valeurs, les tests F et les coefficients de détermination ( $R^2$ ). La figure III.3 présente les principaux graphiques de diagnostic (résidus, probabilité normale, etc.), qui permettent de vérifier la validité des hypothèses statistiques. En complément, la figure III.4 offre un aperçu graphique des effets des paramètres de soudage, facilitant l'interprétation des résultats. La figure III.5 illustre l'interface d'analyse factorielle du logiciel, tandis que la figure III.6 montre les éléments de sortie obtenus lors de cette analyse, incluant tableaux de données, résumés statistiques et graphiques associés. L'ensemble de ces outils fait de Minitab 19 un logiciel complet pour la modélisation par régression et l'analyse de données expérimentales [1].

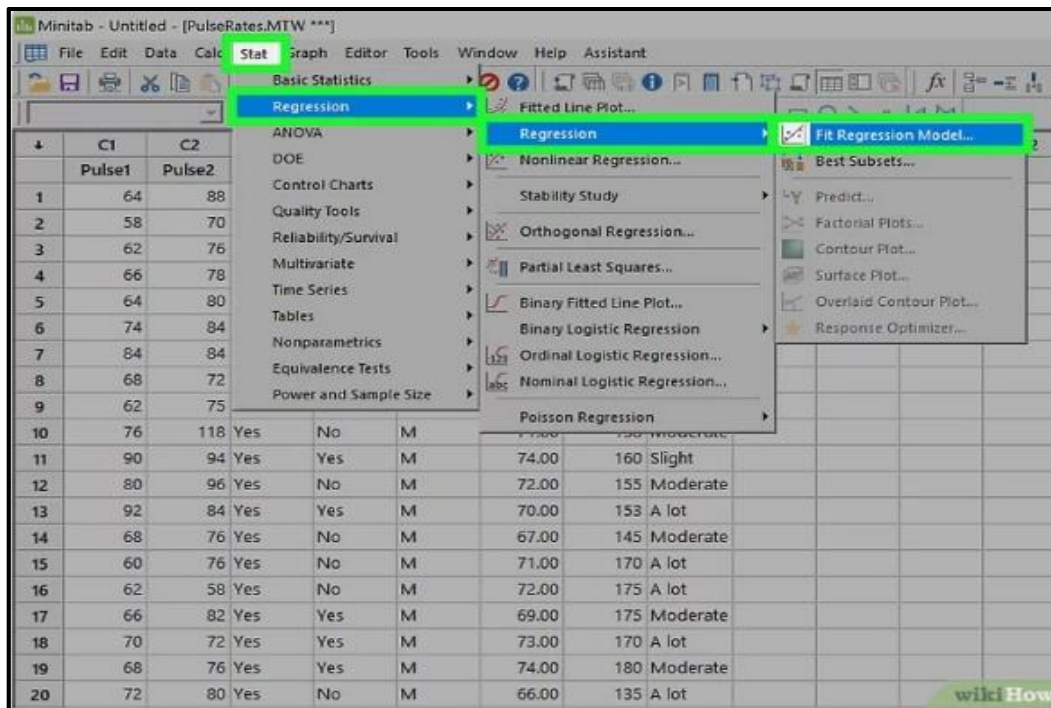


Figure III. 1: Étapes de configuration d'une analyse de régression linéaire dans Minitab

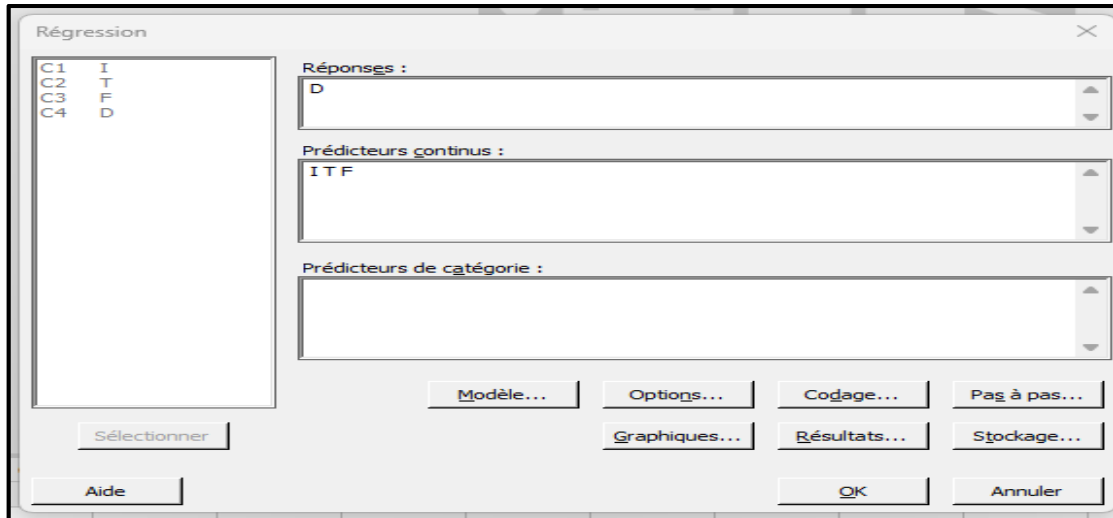


Figure III. 2: Exemple de résultats numériques d'une régression linéaire dans Minitab

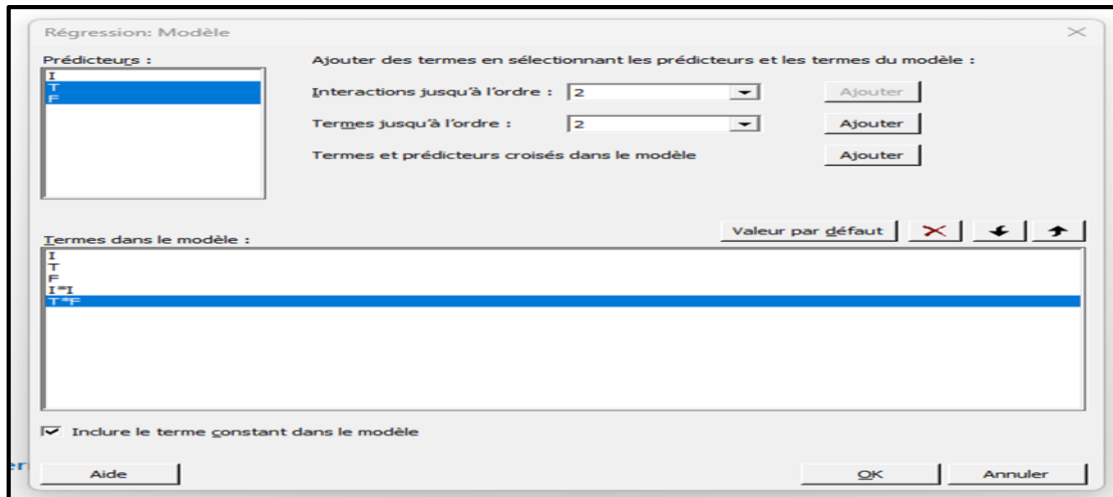


Figure III. 3: Ajout un modèle de régression

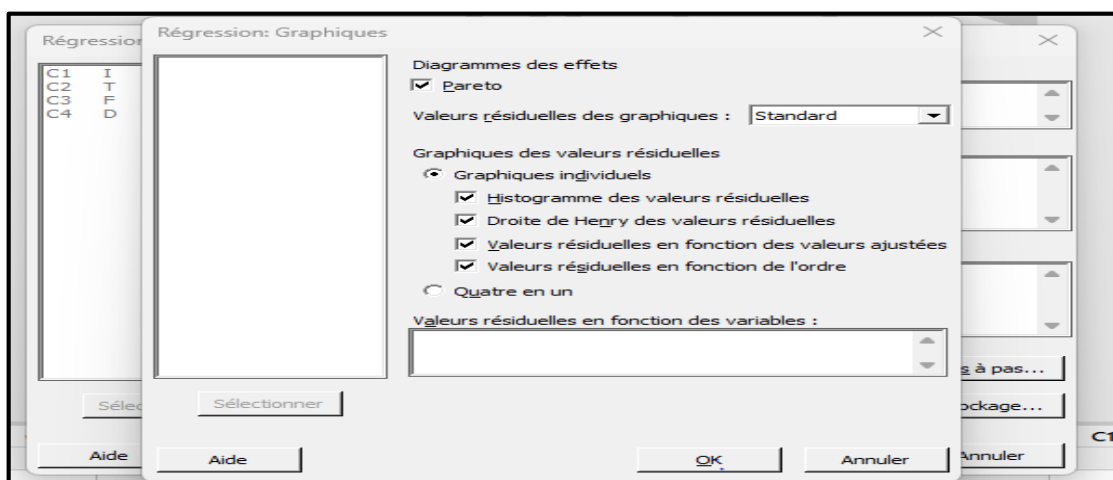


Figure III. 4: Graphique des résidus généré automatiquement par Minitab

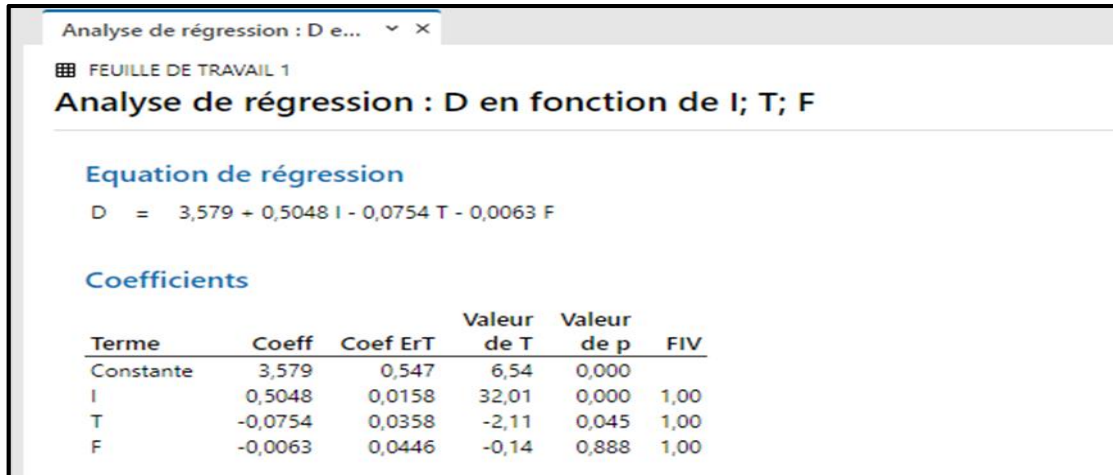


Figure III. 5: Aperçu de l'interface d'analyse factorielle dans Minitab

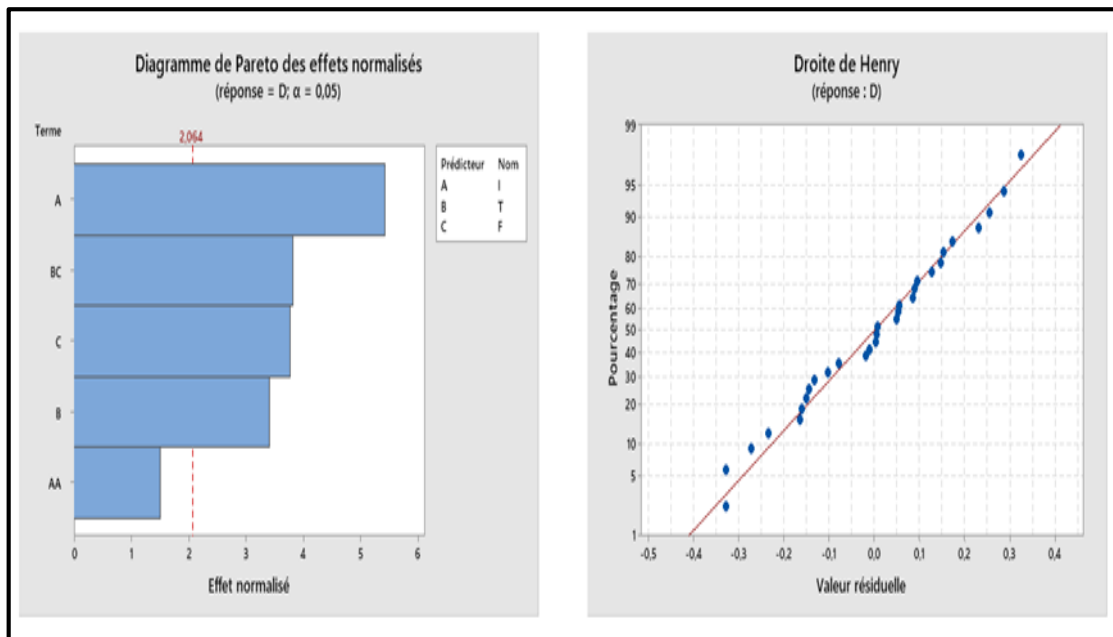


Figure III. 6: Éléments de sortie de Minitab pour l'analyse factorielle

### III.2. Analyse factorielle sur le diamètre du point de Soudure

Dans cette section, une analyse factorielle des résultats a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab19 [2]. Cette démarche a permis de développer un modèle mathématique visant à évaluer l'influence de trois paramètres de soudage sur le diamètre en traction. Ce modèle met en évidence l'impact de chaque paramètre de soudage sur cette contrainte.

Le tableau 1 présente les valeurs de diamètre en fonction des différentes combinaisons de paramètres utilisées lors des essais. Le tableau 2 résume les coefficients du modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse factorielle. L'équation (1) décrit la relation mathématique entre les paramètres de soudage et le diamètre, telle que déterminée par une régression linéaire.

$$D = 3,579 + 0,5048 I - 0,0754 T - 0,0063 F \quad (III.1)$$

L'analyse du modèle linéaire, prenant en compte uniquement les effets principaux des paramètres de soudage (intensité du courant I, temps T et force F), révèle une excellente qualité d'ajustement, comme en atteste un coefficient de détermination particulièrement élevé ( $R^2=97,54\%$ ). Ce résultat montre que le modèle parvient à expliquer l'essentiel de la variabilité observée dans les diamètres de soudure. L'analyse de variance renforce cette observation en soulignant que l'intensité du courant est, de loin, le facteur le plus déterminant : elle présente une valeur de  $F'$  extrêmement élevée (1024,70) et une  $p$ -valeur inférieure à 0,001, confirmant son rôle central dans le processus de soudage. À l'inverse, le temps de soudage, bien que nettement moins influent, affiche une  $p$ -valeur de 0,045, indiquant un effet complémentaire mais significatif. Quant à la force appliquée, son impact est négligeable, comme en témoigne une  $p$ -valeur très élevée ( $p= 0,888$ ), traduisant l'absence d'effet notable sur la réponse. Ces résultats sont d'ailleurs corroborés par le diagramme de Pareto des effets normalisés : seul le facteur I franchit nettement le seuil de signification, suivi à distance par T, tandis que F demeure largement en deçà. En définitive, cette analyse met en lumière que l'intensité du courant constitue le principal levier d'action pour contrôler le diamètre de soudure, tandis que le temps de soudage exerce un effet secondaire et que la force appliquée reste sans influence significative dans les conditions expérimentales étudiées.

**Tableau III. 1:** Données expérimentales pour le diamètre (D)

Ordre d'essai	I (kA)	T (cycle)	F (bar)	D (mm)
1	8	10	6	6,47
2	8	10	8	6,9
3	8	11	6	6,57
4	8	11	8	6,605
5	8	13	6	6,565
6	8	13	8	6,33
7	10	10	6	7,81
8	10	10	8	8,255
9	10	11	6	8,08
10	10	11	8	7,795
11	10	13	6	7,825
12	10	13	8	7,6
13	12	10	6	8,91
14	12	10	8	9,095
15	12	11	6	8,97
16	12	11	8	8,69
17	12	13	6	9,095
18	12	13	8	8,54
19	14	10	6	9,41
20	14	10	8	9,745
21	14	11	6	9,445
22	14	11	8	9,7
23	14	13	6	9,68
24	14	13	8	9,23
25	16	10	6	10,75
26	16	10	8	10,98
27	16	11	6	10,815
28	16	11	8	11,035
29	16	13	6	10,76
30	16	13	8	10,465

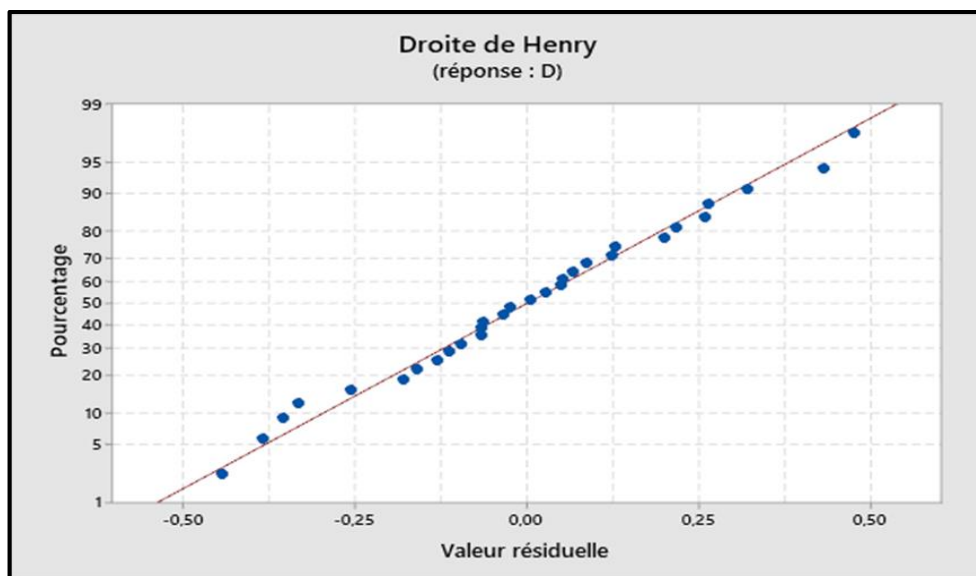


Figure III. 7: Diamètre prévue par rapport aux valeurs expérimentales

Tableau III. 2: Tableau d'analyse des variances- modèle linéaire diamètre (D)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	3	61,4220	20,4740	343,05	0,000
I	1	61,1555	61,1555	1024,70	0,000
T	1	0,2653	0,2653	4,44	0,045
F	1	0,0012	0,0012	0,02	0,888
Erreur	26	1,5517	0,0597		
Total	29	62,9737			

R carré =97,54%  
R carré (ajust) = 97,25%  
R carré (prédit) = 96,74%

**DL (Degrés de liberté)** : Nombre d'informations disponibles pour estimer l'effet.

**Som Car ajust** : Somme des carrés ajustée : variation expliquée par chaque facteur.

**CM ajust** : Moyenne des carrés : Somme des carrés / DL.

**Valeur F'** : Rapport entre la variation expliquée et la variation résiduelle.

**Valeur de  $\rho$**  : Probabilité que l'effet soit dû au hasard. Si  $\rho < 0,05$ , l'effet est significatif.

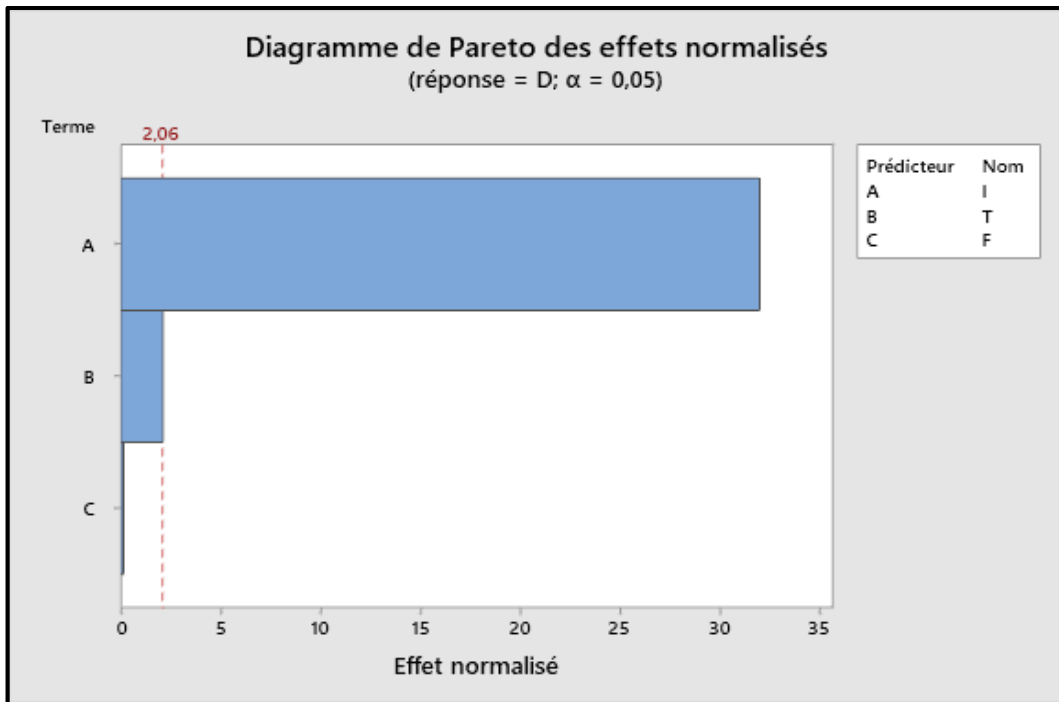


Figure III. 8: Diagramme de Pareto des effets normalisés – diamètre D

### III.3. Modélisation de régression et analyse de processus des paramètres de soudage sur le diamètre

Un modèle de régression a été proposé afin d'établir une relation entre le diamètre des joints soudés par soudage par points par résistance (RSW) et trois paramètres de soudage : le courant de soudage I, le nombre de cycle T et la force de soudage F. L'analyse de régression a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 19. Cette analyse a permis de développer un modèle mathématique décrivant l'influence de ces trois paramètres sur le diamètre du point de soudure, décrit sous la forme :

$$D = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{23} x_2 x_3 \quad (\text{III.2})$$

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

#### III.3.1. Modèle 1 – avec effets linéaires et interactions simples :

L'équation de régression déterminée entre le diamètre et les paramètres de soudage I, T et F est donnée par l'équation suivante :

$$D = -6,15 + 0,697 I + 0,687 T + 1,228 F - 0,00799 I^2 - 0,1089 T \times F \quad (\text{III.3})$$

Le tableau III.3 présente les résultats du modèle de régression, mettant en évidence une excellente fiabilité de celui-ci ( $F=326,45$ ,  $p=0,000$ ). Cela signifie que le modèle décrit de manière précise la variation du diamètre de soudure en fonction des paramètres de soudage. Les trois facteurs principaux l'intensité du courant (I), le temps de soudage (T) et la force appliquée (F) exercent chacun une influence significative sur le diamètre, comme en témoignent leurs  $p$ -valeurs inférieures à 0,05.

Par ailleurs, l'interaction entre le temps et la force ( $T \times F$ ) s'avère également significative, indiquant que la variation du diamètre dépend non seulement de l'effet individuel de chaque paramètre, mais aussi de leur combinaison. À l'inverse, le terme quadratique de l'intensité ( $I^2$ ) n'est pas significatif ( $p=0,146$ ), ce qui suggère une relation linéaire entre l'intensité du courant et le diamètre de soudure : une augmentation du courant entraîne une augmentation proportionnelle du diamètre.

Les graphiques de diagnostic viennent appuyer la qualité de l'ajustement du modèle. La figure III.9 montre que les erreurs suivent une distribution normale, les points s'alignant globalement sur la droite de probabilité. La figure III.10 présente la dispersion des résidus en fonction de l'ordre des essais ; la distribution aléatoire observée autour de zéro confirme l'indépendance des erreurs, excluant tout effet lié à l'ordre de réalisation des expériences. La figure III.11 illustre les résidus par rapport aux valeurs ajustées ; l'absence de structure particulière dans ce nuage de points indique que la variance des erreurs reste constante. L'histogramme des résidus, présenté en figure III.12, adopte une forme en cloche centrée sur zéro, ce qui renforce l'hypothèse de normalité des erreurs. Enfin, la figure III.13 expose le diagramme de Pareto des effets normalisés : l'intensité du courant apparaît comme le facteur prédominant, suivie par la force, le temps, puis l'interaction  $T \times F$ , tandis que l'effet du terme quadratique  $I^2$  reste négligeable.

En résumé, ce modèle met en évidence que le réglage précis de l'intensité du courant est essentiel pour maîtriser le diamètre de la soudure. Le temps de soudage et la force appliquée doivent également être pris en considération, bien que leur influence soit moins marquée.

Tableau III. 3: Résultats d'analyse de variance - modèle 1 diamètre (D)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
<b>Régression</b>	5	62,0612	12,4122	326,45	0,000
<b>I</b>	1	1,1213	1,1213	29,49	0,000
<b>T</b>	1	0,4403	0,4403	11,58	0,002
<b>F</b>	1	0,5411	0,5411	14,23	0,001
<b>I*I</b>	1	0,0858	0,0858	2,26	0,146
<b>T*F</b>	1	0,5534	0,5534	14,55	0,001
<b>Erreur</b>	24	0,9125	0,0380		
<b>Total</b>	29	62,9737			

$R^2=98,55\%$   
 $R^2$  (ajusté)=98,25%  
 $R^2$  (prédit)= 97,88%

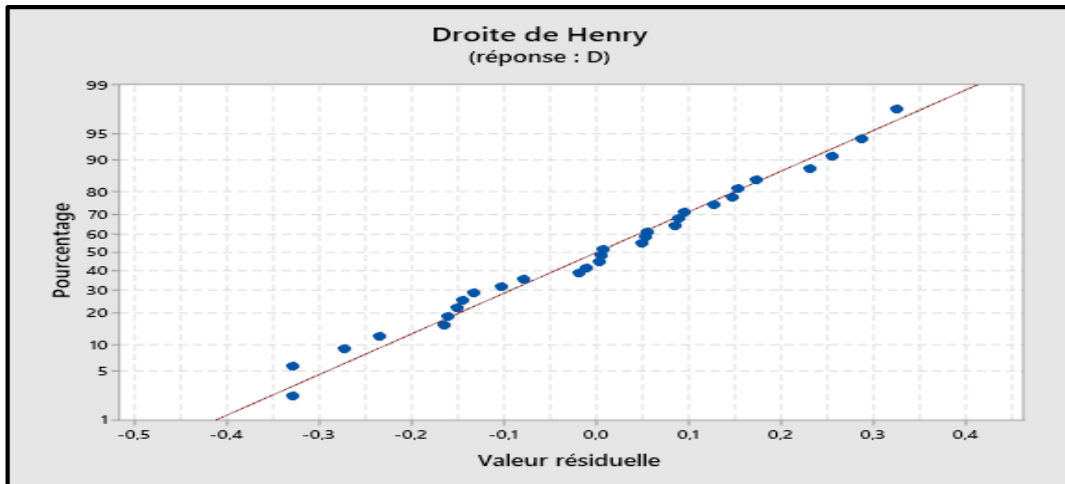


Figure III. 9: Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – diamètre D)

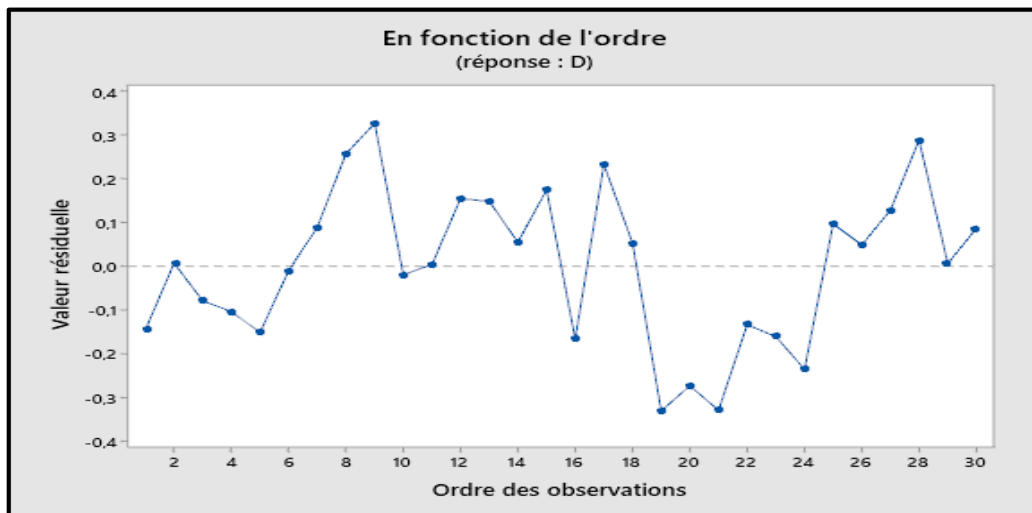


Figure III. 10: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – diamètre D)

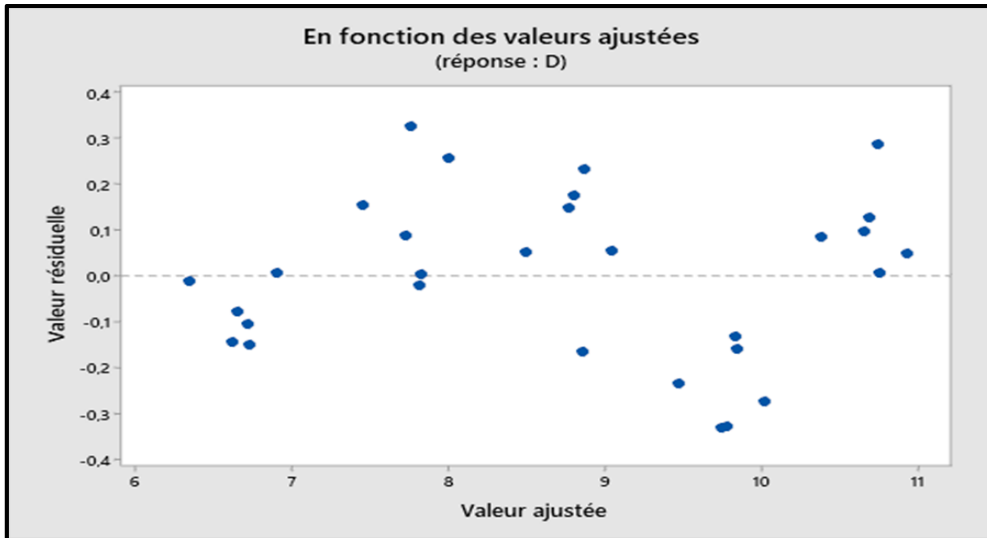


Figure III. 11: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – diamètre D)

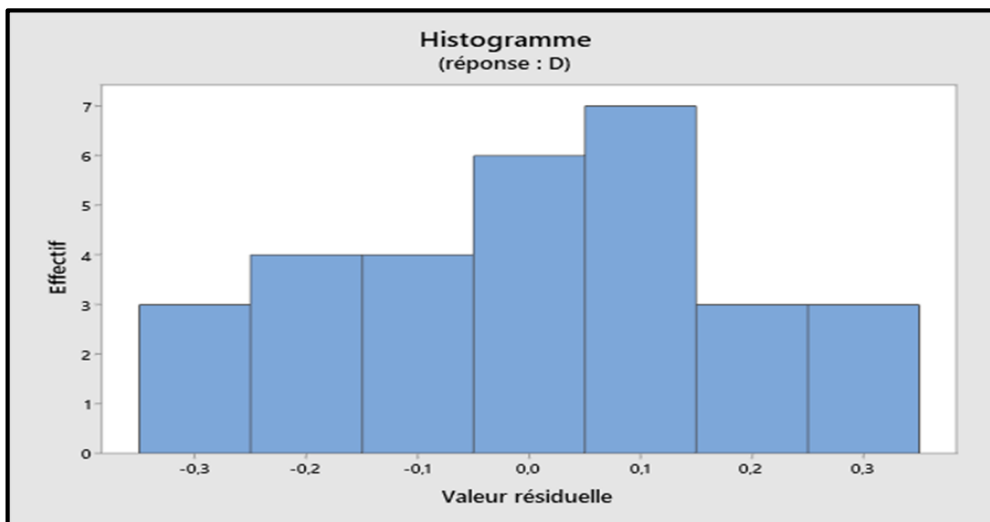


Figure III. 12: Histogramme des résidus (modèle 1 – diamètre D)

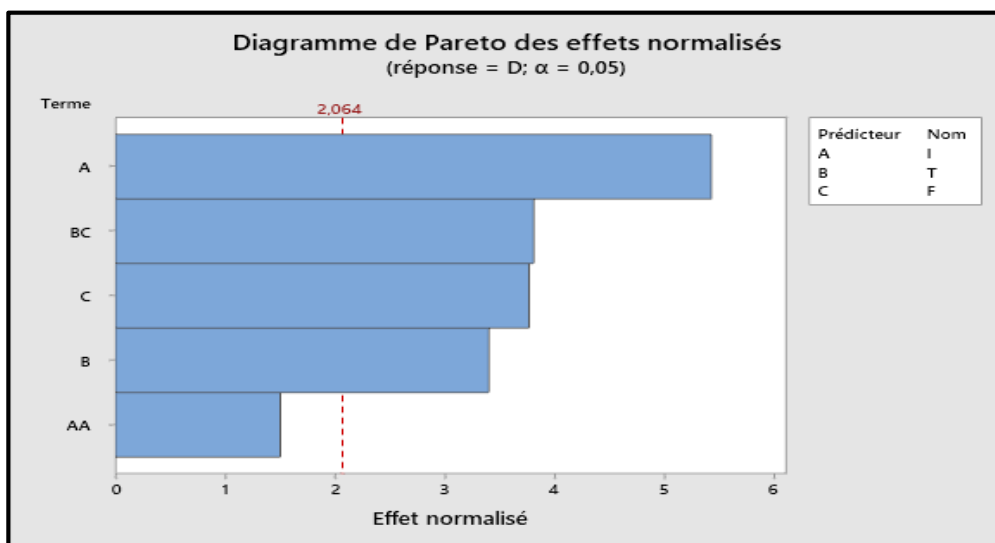


Figure III. 13 : Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – diamètre D)

**III.3.2. Modèle 2 – avec interactions I×T et I×F :**

Dans le modèle 2 on a introduit en plus courant (I), le temps (T) et la force (F), l'interaction du courant avec le temps (I×T) et l'interaction du courant avec la force (F) présentés dans l'équation 4.

$$D = 3,83 + 0,484 I - 0,094 T - 0,012 F + 0,0015 I \times T + 0,0005 I \times F \quad (\text{III.4})$$

L'analyse de variance résumée dans le tableau III.4 indique que le modèle utilisé est globalement fiable pour expliquer la variation du diamètre de soudure (D) ( $F'=190,12$  ;  $p=0,000$ ). Toutefois, parmi l'ensemble des paramètres étudiés, seule l'intensité du courant (I) exerce un effet significatif sur la réponse ( $p=0,017$ ). Le temps de soudage (T), la force appliquée (F) ainsi que les interactions I×T ; I×F présentent des p-valeurs très élevées, indiquant une absence d'influence notable sur le diamètre de soudure. Cette conclusion est renforcée par le diagramme de Pareto présenté en figure III.18, où seul le facteur III dépasse clairement le seuil de signification. L'évaluation des graphiques de résidus permet de vérifier la validité des hypothèses statistiques du modèle. La figure III.15, représentant le diagramme de probabilité normale, montre que les points suivent globalement une droite, attestant d'une distribution normale des erreurs, bien qu'une légère déviation soit observée pour l'observation 17, pouvant indiquer une valeur atypique. La figure III.16, illustrant les résidus en fonction des valeurs ajustées, révèle une dispersion aléatoire autour de zéro, sans motif particulier ; ce comportement confirme que l'erreur reste stable et que le modèle est bien ajusté. Quant à l'histogramme des résidus (figure III.17), il adopte une forme en cloche centrée sur zéro, confirmant que les erreurs sont globalement normales et symétriques.

En définitive, ce modèle met en évidence que l'intensité du courant constitue le seul facteur déterminant pour le contrôle du diamètre de soudure, tandis que le temps, la force appliquée et leurs interactions n'ont pas d'influence significative. Par conséquent, toute stratégie d'optimisation du procédé devra prioritairement s'appuyer sur un réglage précis de l'intensité du courant.

Tableau III. 4: Résultats d'analyse de variance- modèle 2 diamètre (D)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de p
Régression	5	61,4229	12,2846	190,12	0,000
I	1	0,4242	0,4242	6,57	0,017
T	1	0,0217	0,0217	0,34	0,568
F	1	0,0002	0,0002	0,00	0,954
I*T	1	0,0009	0,0009	0,01	0,908
I*F	1	0,0001	0,0001	0,00	0,978
Erreur	24	1,5508	0,0646		
Total	29	62,9737			

**R carré=97,54%**  
**R carré (ajusté)= 97,02%**  
**R carré (prédit)= 96,21%**

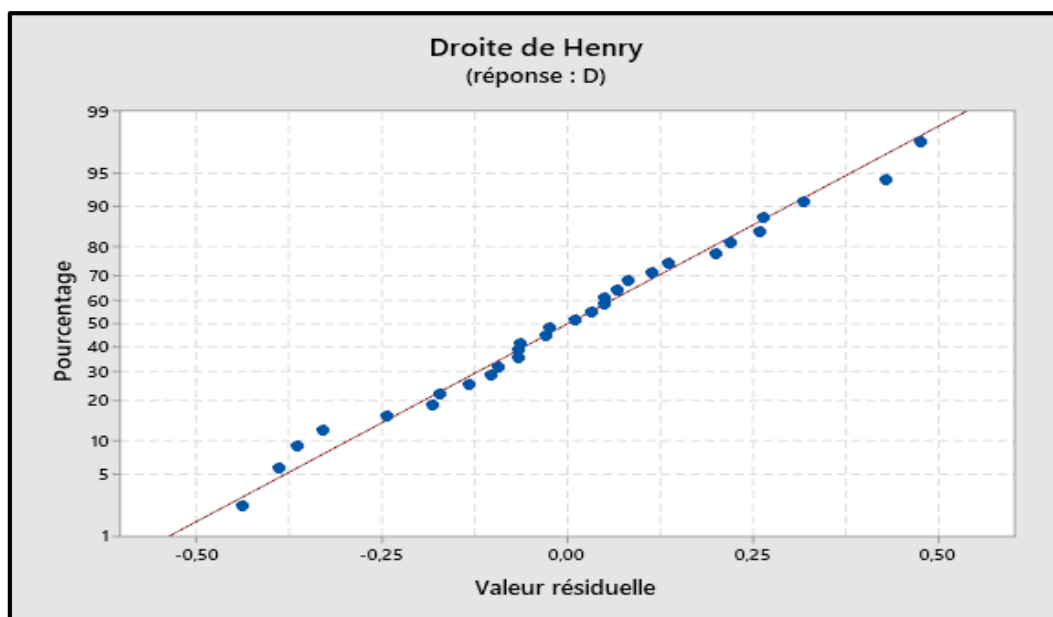


Figure III. 14: Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – diamètre D)

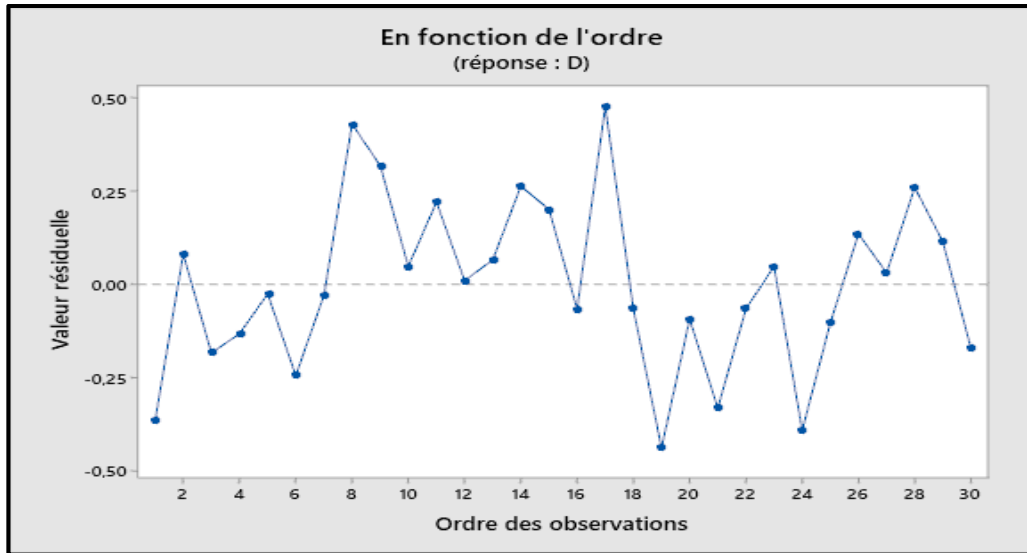


Figure III. 15: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – diamètre D)

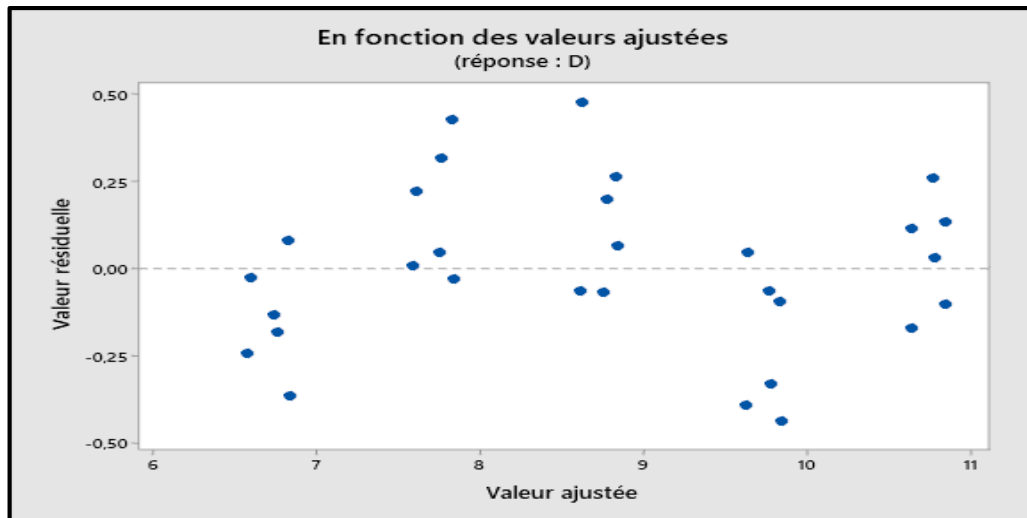


Figure III. 16: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – diamètre D)

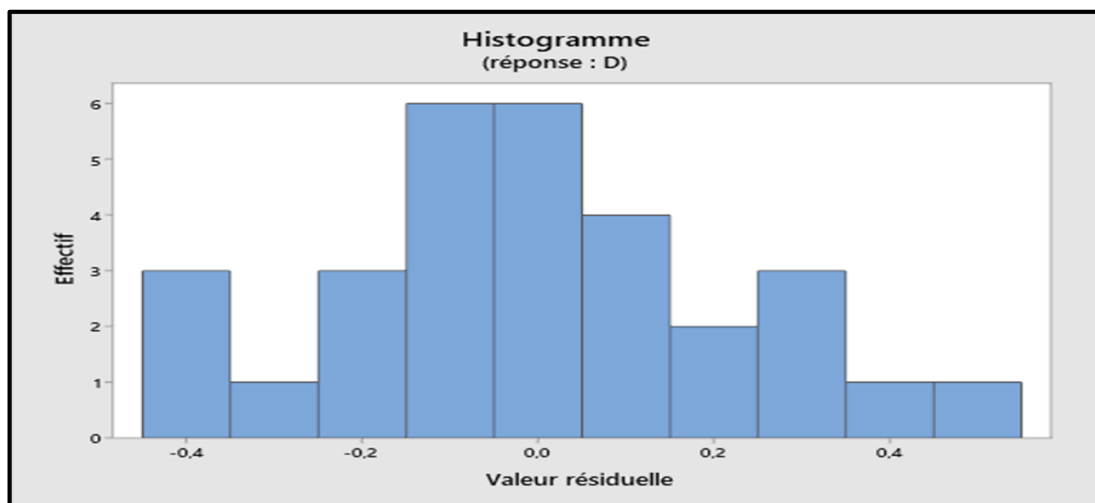


Figure III. 17: Histogramme des résidus (modèle 2 – diamètre D)

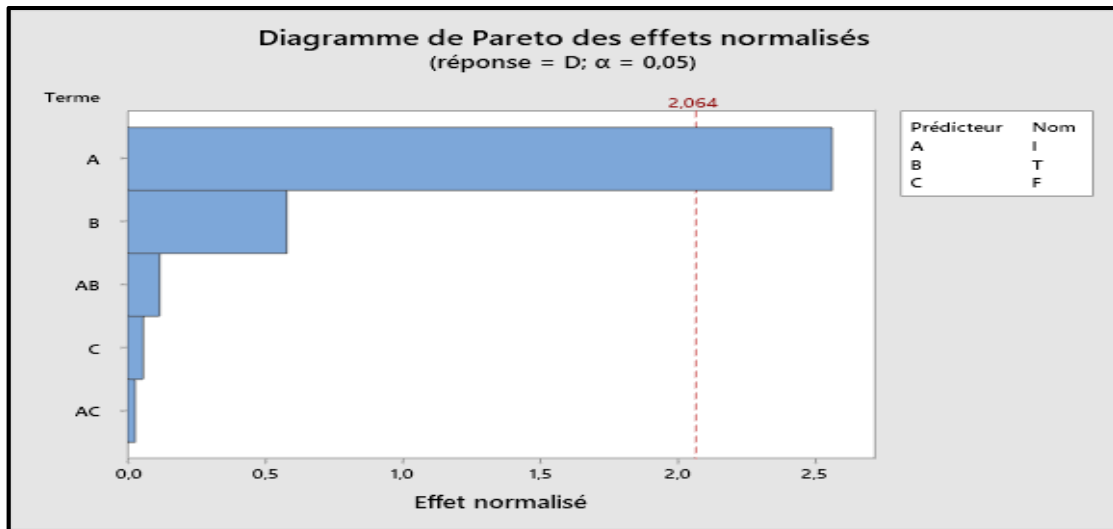


Figure III. 18 : Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – diamètre D)

### III.3.3. Modèle 3 : Interaction entre I<sup>2</sup> et une interaction triple I × T × F :

Le modèle 3, défini par l'équation (5), inclut les effets linéaires de l'intensité (I), du temps (T) et de la force (F), ainsi qu'un terme quadratique (I<sup>2</sup>) et une interaction triple (I × T × F) :

$$D = 0,812 I + 0,0304 T + 0,1638 F - 0,00871 I^2 - 0,001239 I \times T \times F \quad (III.5)$$

L'analyse statistique du modèle 3 montre qu'il est très fiable et qu'il parvient à expliquer efficacement la variation du diamètre de soudure. Parmi les trois paramètres étudiés, l'intensité du courant (I) se révèle être le facteur le plus influent, avec  $\rho=0,000$ , suivie par la force appliquée (F), dont l'effet est également significatif ( $\rho = 0,023$ ). En revanche, le temps (T) n'a pas d'effet notable sur le diamètre de soudure, avec  $\rho=0,485$ . Le terme quadratique de l'intensité (I<sup>2</sup>) s'avère non significatif ( $\rho=0,154$ ), ce qui suggère que la relation entre l'intensité et le diamètre reste linéaire. Cependant, l'interaction triple entre I, T et F (I × T × F) est significative ( $\rho = 0,015$ ), ce qui indique que la combinaison simultanée de ces trois paramètres influence de manière significative le résultat final. Les graphiques de diagnostic confirment que le modèle respecte les hypothèses statistiques nécessaires. Le diagramme de probabilité normale des résidus (figure III.19) montre que les points sont bien alignés sur une droite, suggérant que les erreurs suivent une distribution normale. Toutefois, l'observation 19 présente un résidu légèrement élevé, ce qui mérite une attention particulière car elle pourrait représenter une valeur atypique. Le graphique des résidus en fonction de l'ordre des essais (figure III.20) montre une distribution aléatoire autour de zéro, sans tendance particulière, confirmant ainsi l'indépendance des résidus. Le graphique des résidus par rapport aux valeurs ajustées (figure III.21) ne révèle aucune forme régulière, ce qui indique que les erreurs sont homogènes et que le modèle est bien ajusté. Enfin, l'histogramme des résidus (figure III.22) a une forme en cloche

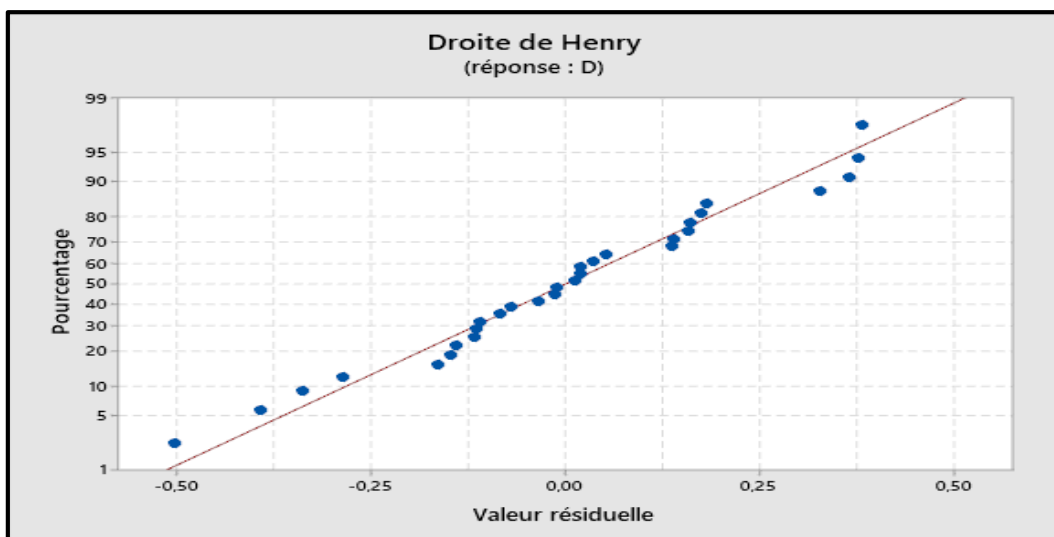
centrée sur zéro, renforçant l'hypothèse de normalité des erreurs. Le diagramme de Pareto (figure III.23) présente l'importance relative des facteurs et met en évidence que l'intensité du courant (I) est le paramètre le plus influent, suivi par l'interaction triple I×T×F et la force (F). Les autres effets sont peu significatifs.

En résumé, ce modèle montre que le bon réglage de l'intensité du courant et des interactions entre les paramètres est essentiel pour maîtriser le diamètre de la soudure, tout en restant vigilant face aux observations atypiques.

**Tableau III. 5:** Résultats d'analyse de variance - modèle 3 diamètre (D)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
<b>Régression</b>	5	2351,79	470,358	8315,35	0,000
<b>I</b>	1	2,94	2,944	52,04	0,000
<b>T</b>	1	0,03	0,028	0,50	0,485
<b>F</b>	1	0,33	0,331	5,85	0,023
<b>I*I</b>	1	0,12	0,122	2,16	0,154
<b>I*T*F</b>	1	0,38	0,382	6,76	0,015
<b>Erreur</b>	25	1,41	0,057		
<b>Total</b>	30	2353,20			

**R<sup>2</sup>=99,94%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 99,93%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 99,91%**



**Figure III. 19:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – diamètre D)

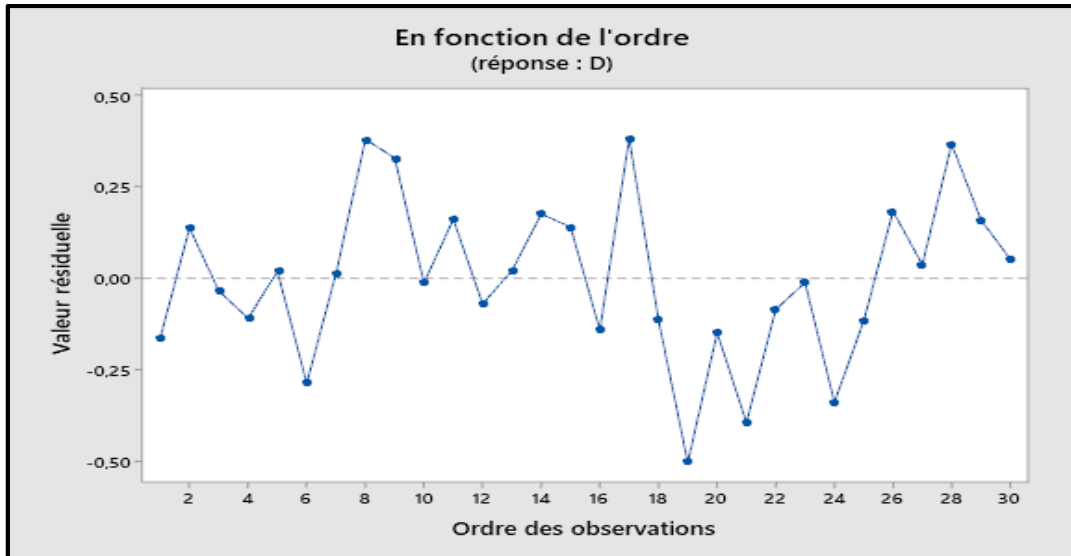


Figure III. 20: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – diamètre D)

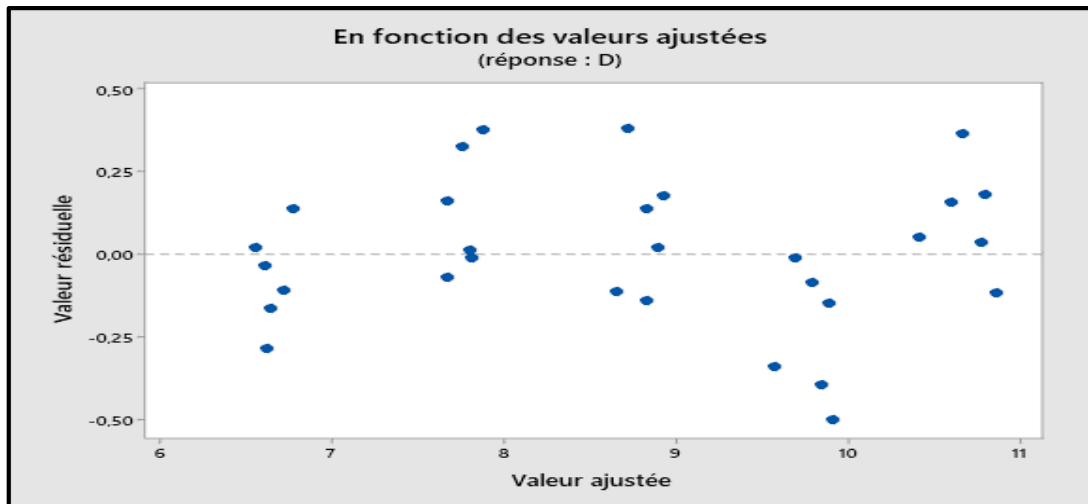


Figure III. 21: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – diamètre D)

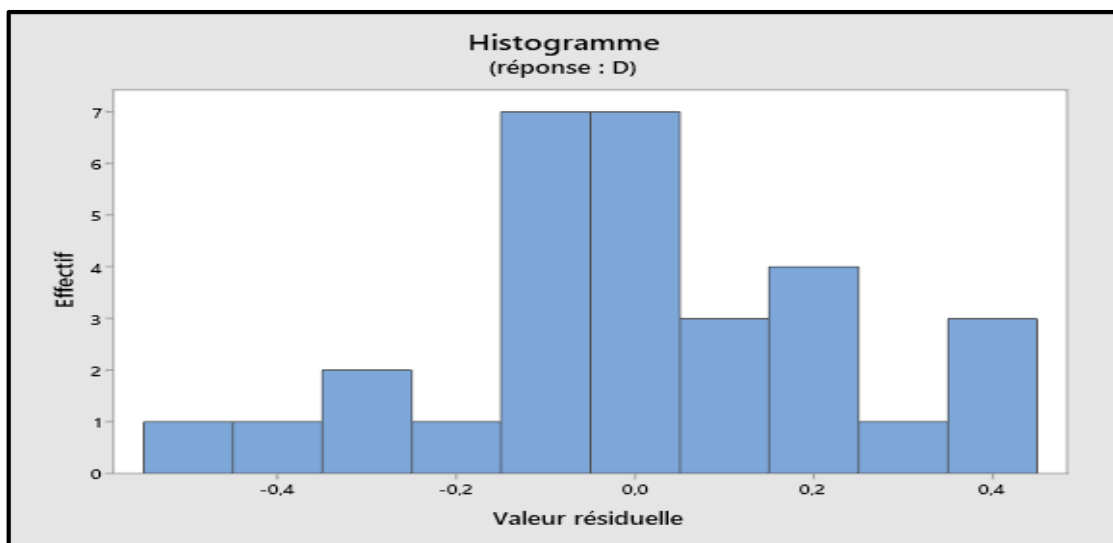


Figure III. 22: Histogramme des résidus (modèle 3 – diamètre D)

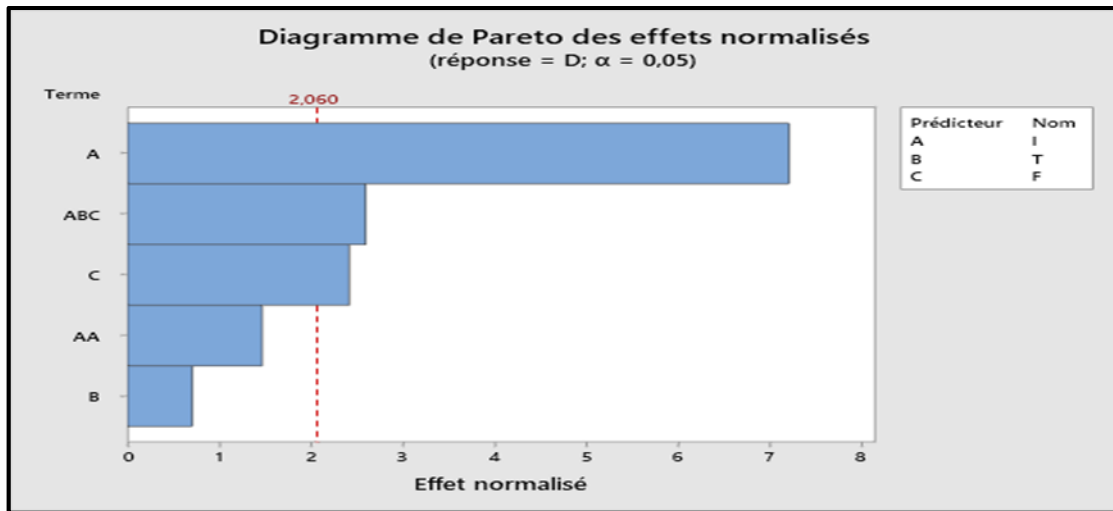


Figure III. 23: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – diamètre D)

### III.3.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative (I × T × F) :

Le modèle 4, défini par l'équation suivante, inclut les effets linéaires des trois paramètres de soudage (I, T, F) ainsi qu'une interaction triple (I × T × F), afin d'évaluer leur influence combinée sur le diamètre (D)

$$D = 0,6501 I + 0,0830 T + 0,2463 F - 0,001816 I \times T \times F \quad (III.6)$$

L'analyse de variance, présentée dans le tableau III.6, révèle que le modèle est hautement significatif ( $F'=9949,88$  ;  $p=0,000$ ), ce qui confirme son efficacité à expliquer la variation du diamètre de soudure (D). Les résultats indiquent que l'intensité du courant (I) est le facteur ayant le plus grand impact ( $F'=856,55$  ;  $p=0,000$ ), suivie par la force appliquée ( $F'=40,44$  ;  $p=0,000$ ) et le temps ( $T=11,94$  ;  $p=0,002$ ). De plus, l'interaction triple entre I, T et F est également significative ( $F'=43,44$  ;  $p=0,000$ ), indiquant que la combinaison de ces trois paramètres a un impact notable sur le diamètre de la soudure. Le modèle présente un excellent pouvoir explicatif avec un coefficient de détermination  $R^2=99,93\%$ , ce qui signifie qu'il reproduit presque entièrement la variabilité des données expérimentales. Les résultats des figures III.24 à III.27 permettent de confirmer la validité statistique du modèle. Le diagramme de probabilité normale des résidus, montré dans la figure III.24, révèle que les erreurs suivent une distribution normale, les points étant alignés sur la droite. Le graphique des résidus en fonction de l'ordre des essais (figure III.25) ne montre aucune tendance particulière, ce qui signifie que les erreurs sont indépendantes. De plus, le graphique des résidus par rapport aux valeurs ajustées (figure III.26) montre une distribution homogène autour de zéro, sans motif discernable, ce qui atteste d'un bon ajustement du modèle. L'histogramme des résidus (figure

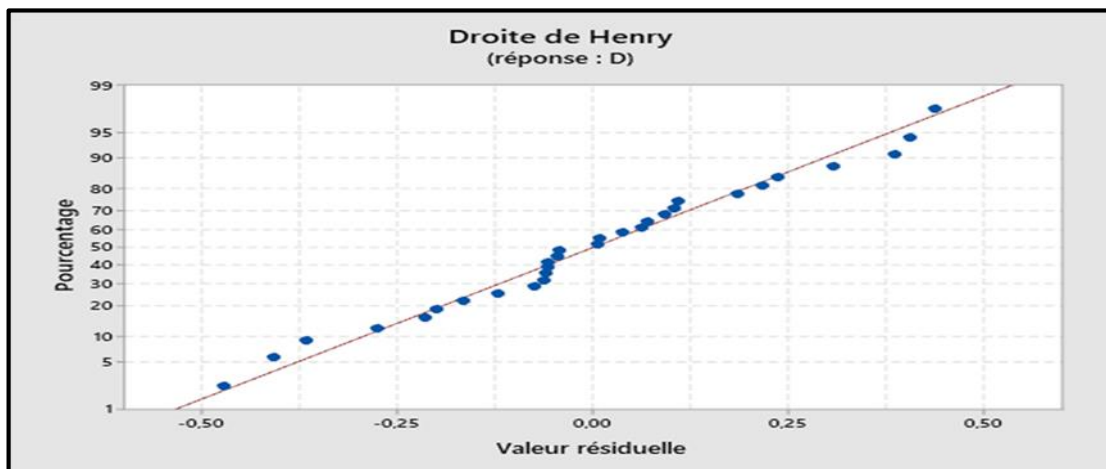
III.27), avec sa forme en cloche centrée, confirme également que les erreurs suivent une distribution normale et stable. Seule l'observation n°19 présente un écart légèrement plus marqué, mais cet écart reste acceptable et n'affecte pas la qualité globale du modèle. Enfin, la figure III.28 présente le diagramme de Pareto, qui classe les facteurs selon leur importance relative. Il met en évidence que l'intensité du courant est de loin le facteur le plus influent, suivie par la force appliquée et l'interaction triple I×T×F. Le temps (T), bien que présentant un effet plus faible, reste un paramètre non négligeable.

En conclusion, les résultats de cette analyse montrent que pour optimiser efficacement le diamètre de la soudure, il est primordial de contrôler précisément l'intensité du courant, tout en tenant compte des effets combinés de la force et du temps de soudage.

**Tableau III. 6:** Résultats d'analyse de variance - modèle 4 diamètre (D)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de p
<b>Régression</b>	4	2351,67	587,917	9949,88	0,000
<b>I</b>	1	50,61	50,612	856,55	0,000
<b>T</b>	1	0,71	0,706	11,94	0,002
<b>F</b>	1	2,39	2,389	40,44	0,000
<b>I*T*F</b>	1	2,57	2,567	43,44	0,000
<b>Erreur</b>	26	1,54	0,059		
<b>Total</b>	30	2353,20			

**R<sup>2</sup>=99,93%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 99,92%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 99,91%**



**Figure III. 24:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – diamètre D)

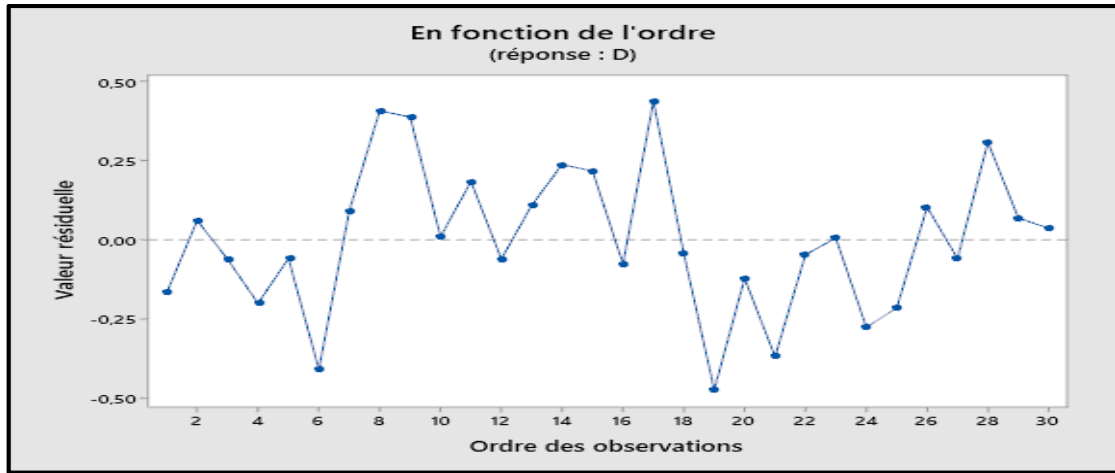


Figure III. 25: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – diamètre D)

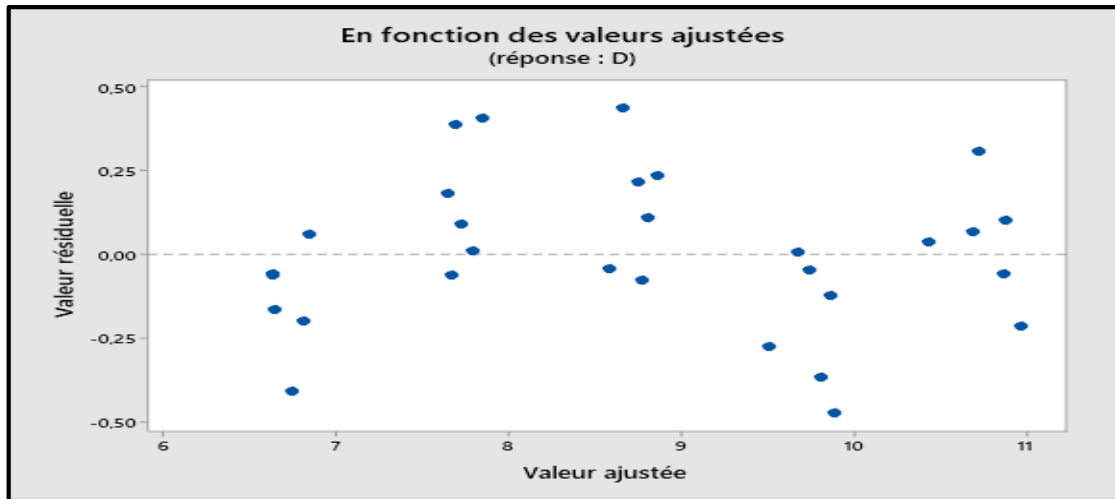


Figure III. 26: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – diamètre D)

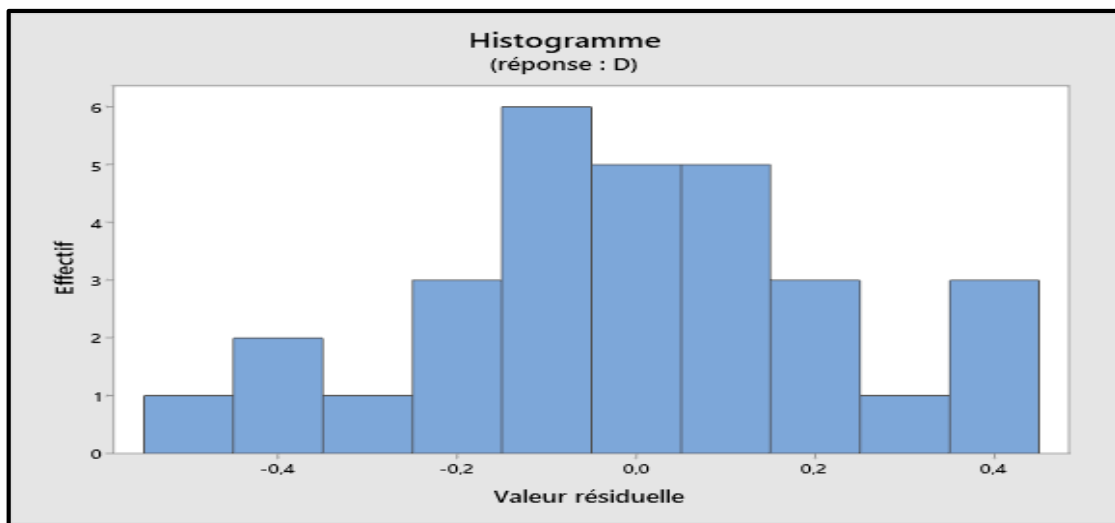


Figure III. 27: Histogramme des résidus (modèle 4 – diamètre D)

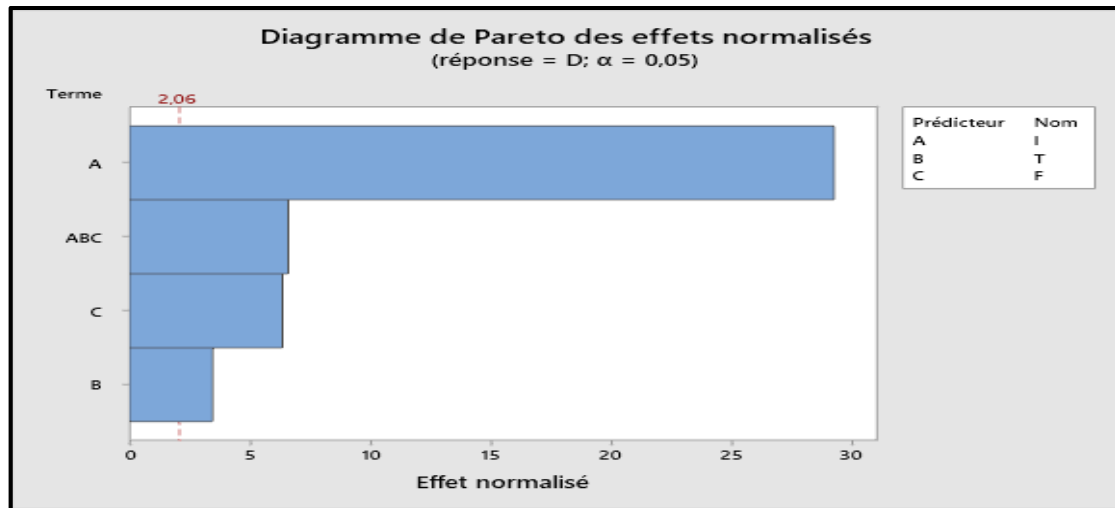


Figure III. 28: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – diamètre D)

### III.4. Analyse de la pénétration au point de soudure

Dans cette section, une analyse factorielle a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 19 afin d'étudier l'effet de trois paramètres de soudage : l'intensité du courant (I), le temps de soudage (T) et la force appliquée (F) sur la pénétration en traction. L'objectif était de développer un modèle mathématique équation 7 capable de quantifier l'influence de ces paramètres sur la qualité du point de soudure, et plus particulièrement sur la profondeur de pénétration. Le tableau III.7 présente les valeurs expérimentales obtenues pour la pénétration, en fonction des différentes combinaisons de réglages des paramètres. L'analyse statistique conduite (tableau III.8) a permis d'établir une équation de régression linéaire exprimant la pénétration ( $\rho$ ) en fonction des trois facteurs :

$$P = -0,613 + 0,08083 I + 0,00986 T + 0,0393 F \quad (\text{III.7})$$

L'équation présentée montre que l'intensité du courant (I) ainsi que la force appliquée (F) exercent un effet positif sur la profondeur de pénétration : l'augmentation de ces paramètres illustre une tendance à l'accroissement de la pénétration. Le facteur temps (T) montre également un effet positif, toutefois d'une ampleur nettement plus modérée. La figure III.29 illustre la vérification de la normalité des résidus par le biais du diagramme de Henry et montre que les points s'alignent correctement sur la diagonale. Cette disposition confirme que les erreurs sont normalement distribuées, ce qui constitue une condition essentielle à la validité des tests statistiques appliqués au modèle. Par ailleurs, la figure III.30 présente le diagramme de Pareto des effets normalisés et identifie les facteurs exerçant l'influence la plus marquée. Il est observé que l'intensité (I) et la force (F) dépassent nettement le seuil de signification, ce qui montre

qu'ils possèdent un impact réel et significatif sur la pénétration. En revanche, le facteur temps (T) reste situé sous ce seuil, illustrant ainsi son influence faible, voire négligeable, dans le contexte expérimental étudié. En synthèse, seuls les paramètres intensité et force présentent un effet significatif sur l'amélioration de la pénétration. L'optimisation du procédé devra donc prioriser l'ajustement de ces deux facteurs afin d'assurer une qualité supérieure du point de soudure.

**Tableau III. 7:** Données expérimentales pour pénétration

Ordre d'essai	I	T	F	Pénétration
1	8	10	6	0,32
2	8	10	8	0,44
3	8	11	6	0,43
4	8	11	8	0,43
5	8	13	6	0,46
6	8	13	8	0,42
7	10	10	6	0,55
8	10	10	8	0,68
9	10	11	6	0,59
10	10	11	8	0,64
11	10	13	6	0,62
12	10	13	8	0,6
13	12	10	6	0,71
14	12	10	8	0,68
15	12	11	6	0,69
16	12	11	8	0,74
17	12	13	6	0,68
18	12	13	8	0,73
19	14	10	6	0,78
20	14	10	8	1,02
21	14	11	6	0,77
22	14	11	8	0,96
23	14	13	6	0,86
24	14	13	8	1,05
25	16	10	6	0,94
26	16	10	8	1,16
27	16	11	6	1,1
28	16	11	8	1,1
29	16	13	6	1,07
30	16	13	8	1,1

Tableau III. 8: Tableau d'analyse des variances– modèle linière pénétration (P)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	3	1,61911	0,53970	154,87	0,000
I	1	1,56817	1,56817	450,00	0,000
T	1	0,00453	0,00453	1,30	0,264
F	1	0,04641	0,04641	13,32	0,001
Erreur	26	0,09061	0,00348		
Total	29	1,70972			

**R carré=94,70%**  
**R carré (ajust)= 94,09%**  
**R carré (prédit)= 92,93%**

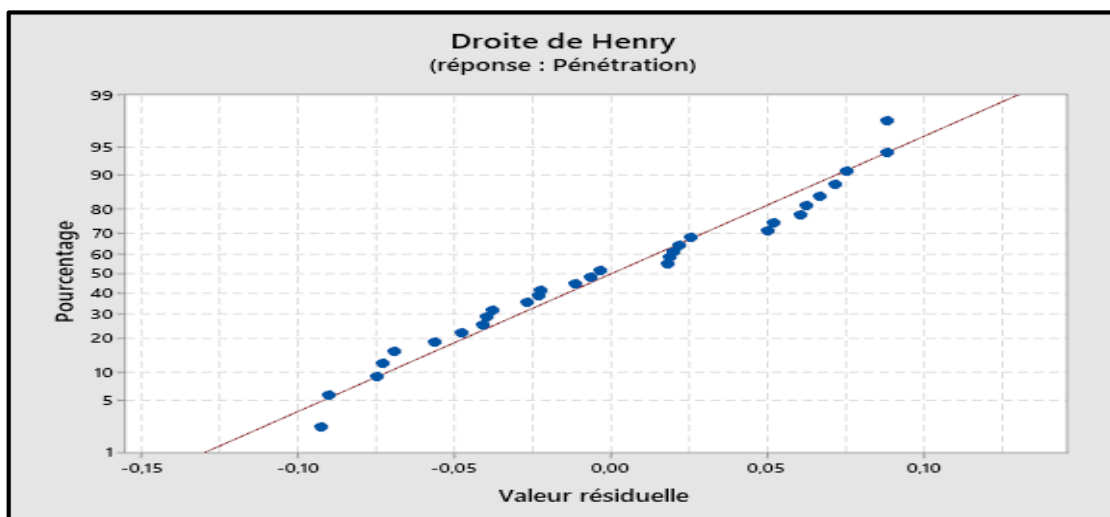


Figure III. 29: Pénétration prévue par rapport aux valeurs expérimentales

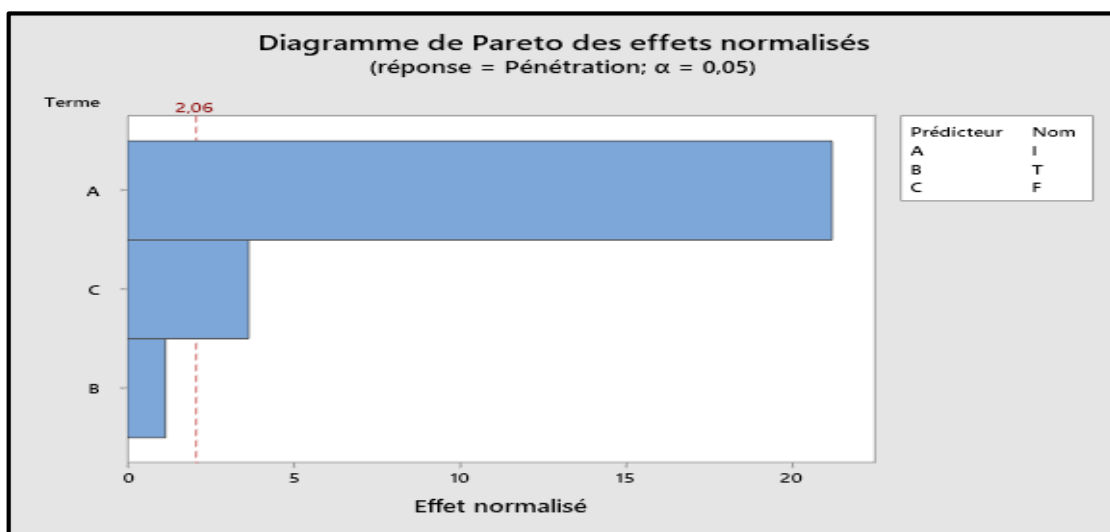


Figure III. 30: Diagramme de Pareto des effets normalisés– pénétration

### III.5. Modélisation par régression et analyse de l'effet des paramètres de soudage sur la pénétration

Un modèle de régression a été établi afin d'étudier l'influence des paramètres de soudage par résistance par points (RSW) — à savoir le courant de soudage (I), le nombre de cycles (T) et la force d'électrode (F) — sur la pénétration des joints soudés.

Pour cette analyse, le logiciel **Minitab 19** a été utilisé. Cela a permis de développer un modèle mathématique décrivant la relation entre ces trois paramètres et la pénétration. Le modèle prend la forme suivante :

$$P = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{23} x_2 x_3 \quad (\text{III.8})$$

#### III.5.1. Modèle 1 – avec effets linéaires et interactions simples :

Le modèle 1, présenté par l'équation (9), décrit la relation entre la pénétration (**P**) et les paramètres de soudage en prenant en compte à la fois les effets linéaires, une interaction simple et un terme quadratique :

$$P = -1,578 + 0,0551 I + 0,1079 T + 0,1980 F + 0,00107 I^2 - 0,01400 T \times F \quad (\text{III.9})$$

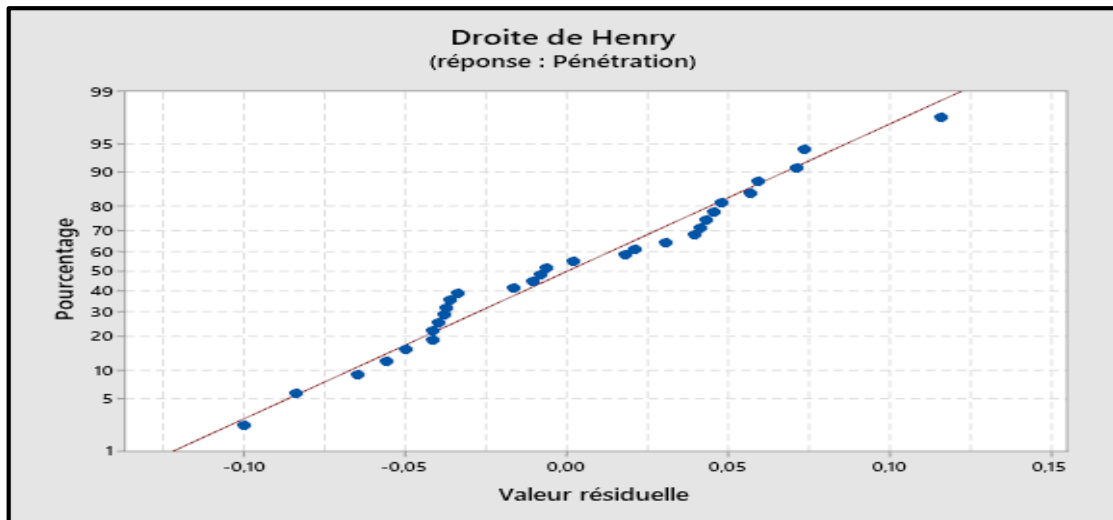
L'intensité (I) et le temps (T) présentent des valeurs  $p$  supérieures à 0,05, ce qui montre qu'ils ne sont pas statistiquement significatifs dans ce modèle. En revanche, la force (F) affiche une valeur  $p$  de 0,051, très proche du seuil de 5 %, suggérant qu'elle pourrait exercer un effet réel, bien que modéré. Le terme quadratique ( $I^2$ ) ainsi que l'interaction entre le temps et la force ( $T \times F$ ) ne montrent pas d'effet clair sur la réponse. L'ajustement du modèle est confirmé par l'analyse des résidus. La figure III.31 illustre que les erreurs suivent une distribution normale, comme l'indique l'alignement des points sur la droite du diagramme de probabilité. La figure III.32 montre que les résidus sont répartis de manière aléatoire en fonction de l'ordre des essais, ce qui confirme l'indépendance des erreurs. De plus, la figure III.33 illustre que les résidus se dispersent régulièrement autour de zéro lorsqu'ils sont tracés contre les valeurs ajustées, sans tendance apparente, ce qui confirme une variance constante des erreurs. Enfin, l'histogramme des résidus présenté dans la figure III.34 montre une forme en cloche centrée, ce qui valide l'hypothèse de normalité. La figure III.35, qui présente le diagramme de Pareto des effets normalisés, montre que la force (F) est le paramètre le plus proche du seuil de significativité, tandis que les autres facteurs présentent un impact nettement moindre.

En résumé, ce modèle est statistiquement robuste pour l'étude de la pénétration. Toutefois, la force (F) apparaît comme le paramètre le plus prometteur à surveiller pour optimiser la qualité du point de soudure.

**Tableau III. 9:** Résultats d'analyse de variance– modèle 1 pénétration (P)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	65763,1	13152,6	81,25	0,000
I	1	5573,2	5573,2	34,43	0,000
T	1	286,3	286,3	1,77	0,196
F	1	203,7	203,7	1,26	0,273
I*I	1	2575,9	2575,9	15,91	0,001
T*F	1	125,8	125,8	0,78	0,387
Erreur	24	3885,2	161,9		
Total	29	69648,3			

**R<sup>2</sup>=94,42%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 93,26%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 92,53%**



**Figure III. 31:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – pénétration P)

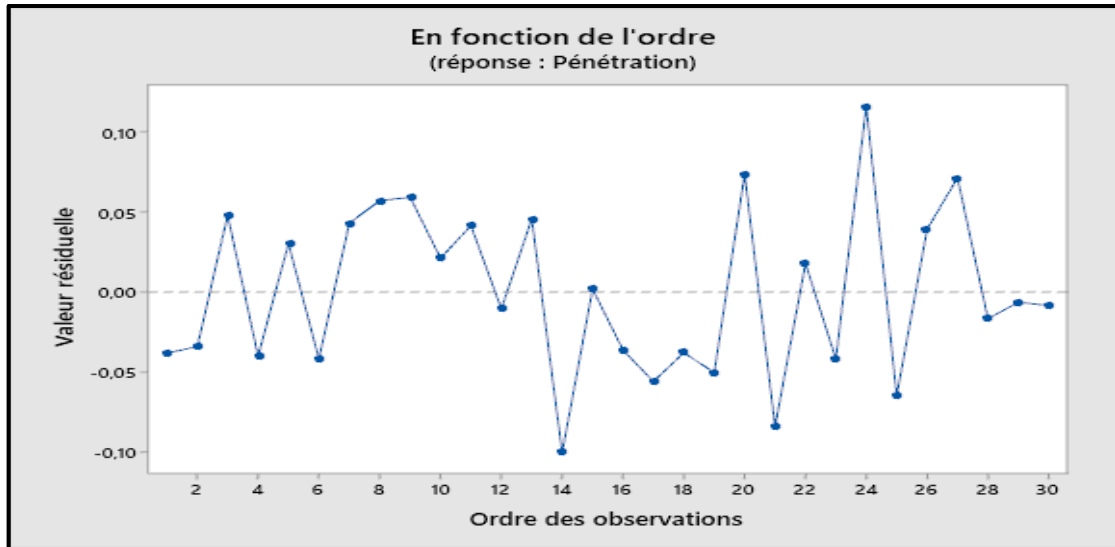


Figure III. 32: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – pénétration P)

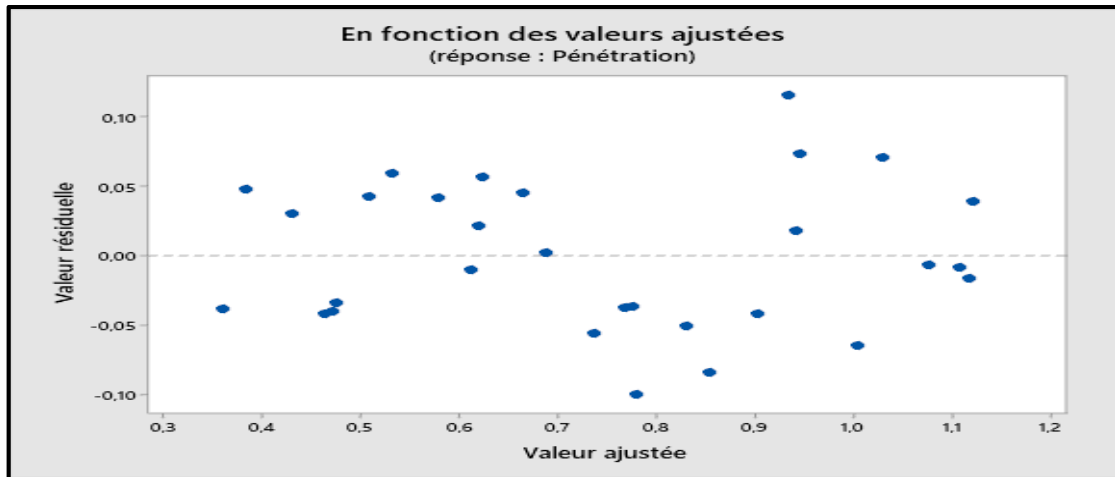


Figure III. 33: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – pénétration P)

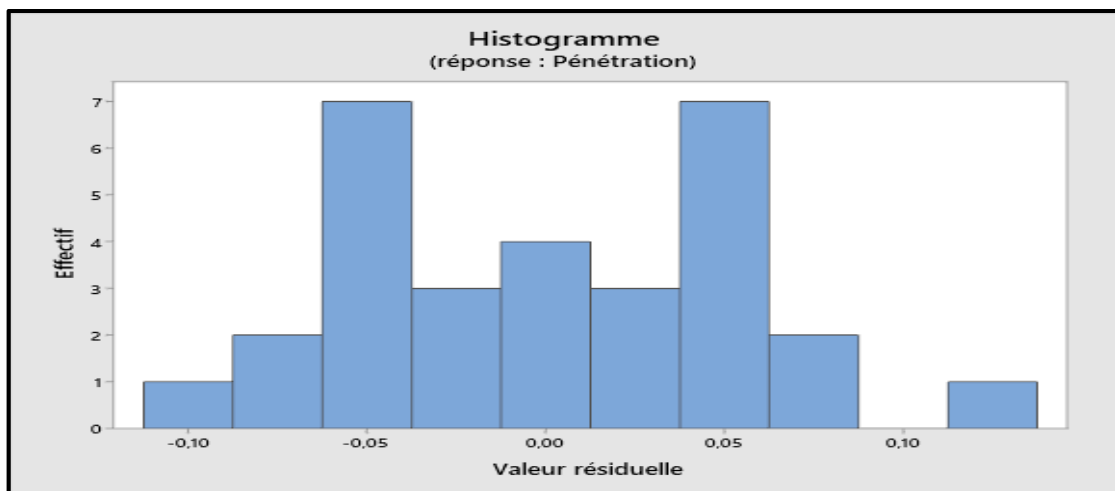


Figure III. 34: Histogramme des résidus (modèle 1 – pénétration P)

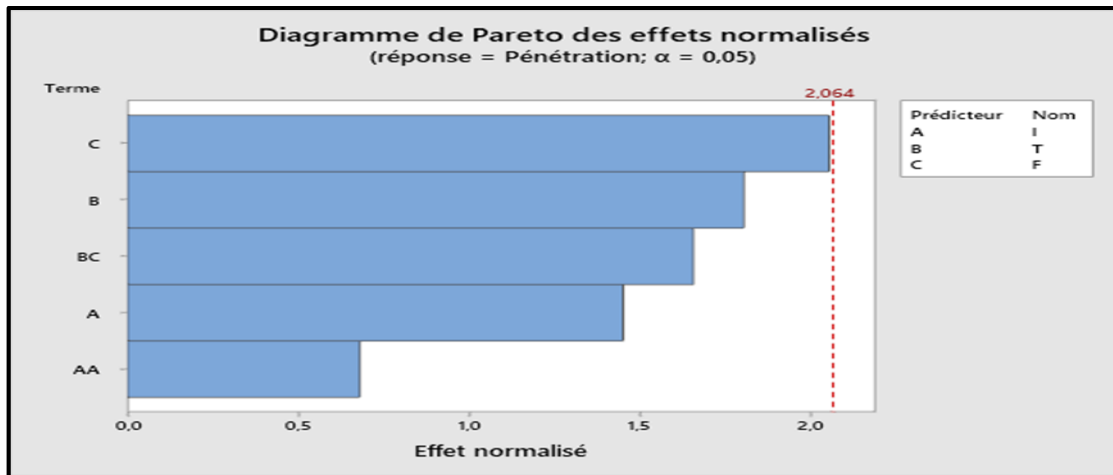


Figure III. 35: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – pénétration P)

### III.5.2. Modèle 2 – Avec interactions IT et IF :

Le modèle 2, défini par l'équation suivante, inclut les effets linéaires de l'intensité (**I**), du temps (**T**) et de la force (**F**), ainsi que deux interactions (**I × T**) et (**I × F**) :

$$P = 0,012 + 0,0307 I + 0,0062 T - 0,0407 F + 0,00030 I \times T + 0,00667 I \times F \quad (III.10)$$

L'analyse de variance présentée dans le tableau III.10 montre que le modèle est globalement statistiquement fiable ( $F' = 97,91$  ;  $\rho \approx 0$ ), ce qui indique que l'ensemble des paramètres retenus explique correctement les variations de la pénétration. Toutefois, l'examen individuel des facteurs illustre qu'aucun d'entre eux ne présente d'effet significatif pris isolément : les  $\rho$ -valeurs associées à l'intensité (**I**), au temps (**T**) et à la force (**F**) sont toutes supérieures à 0,05, ce qui montre l'absence d'influence claire de ces paramètres. L'interaction entre l'intensité et le temps (**I × T**) n'est pas significative non plus. Cependant, l'interaction entre l'intensité et la force (**I × F**) montre une  $p$ -valeur de 0,086, proche du seuil de significativité. Cette observation suggère un effet modéré potentiel de cette interaction, bien que la preuve statistique ne soit pas totalement concluante. La validation du modèle est illustrée par l'analyse graphique des résidus. La figure III.36 présente le diagramme de probabilité normale et montre que les erreurs sont alignées sur la droite théorique, confirmant ainsi la normalité des résidus. La figure III.37 illustre que les résidus sont répartis de manière aléatoire par rapport à l'ordre des essais, ce qui montre l'indépendance des erreurs. De plus, la figure III.38 montre une dispersion homogène des résidus autour de zéro en fonction des valeurs ajustées, indiquant la constance de la variance. Enfin, l'histogramme des résidus, présenté dans la figure III.39, montre une forme symétrique en cloche centrée sur zéro, renforçant la validité de l'hypothèse de normalité. La figure III.40, qui présente le diagramme de Pareto des effets normalisés, montre que la majorité

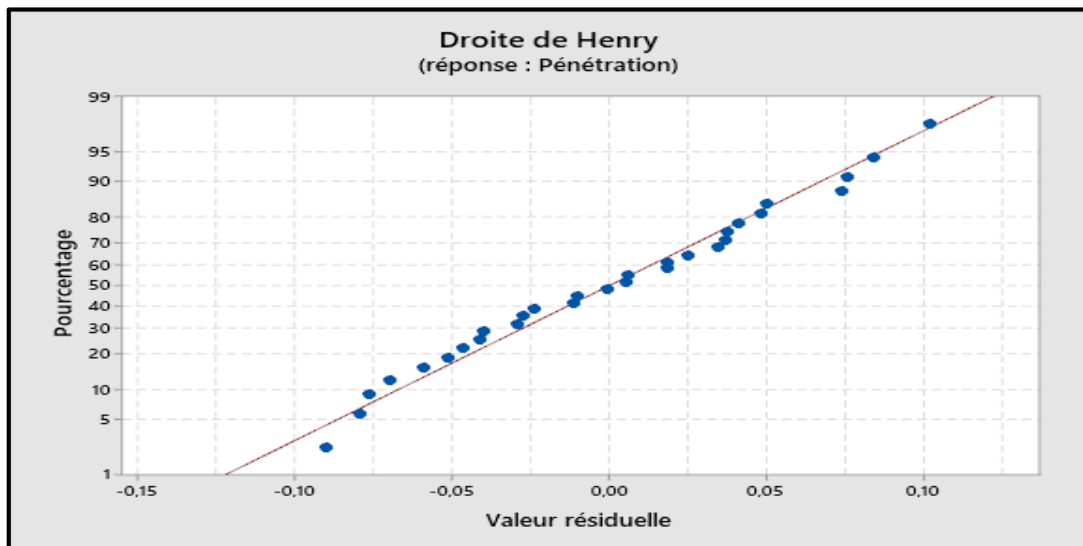
des effets restent faibles, mais que l'interaction  $I \times F$  se rapproche du seuil de signification, ce qui justifie une attention particulière dans les analyses futures.

En conclusion, bien qu'aucun paramètre individuel ne soit clairement significatif, le modèle dans son ensemble présente une bonne capacité d'explication de la pénétration. L'interaction entre l'intensité du courant et la force appliquée apparaît comme un axe d'exploration prometteur pour l'optimisation du procédé de soudage.

**Tableau III. 10:** Résultats d'analyse de variance– modèle 2 pénétration (P)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	1,62982	0,325963	97,91	0,000
I	1	0,00171	0,001709	0,51	0,481
T	1	0,00009	0,000095	0,03	0,867
F	1	0,00261	0,002611	0,78	0,385
I*T	1	0,00003	0,000034	0,01	0,920
I*F	1	0,01067	0,010667	3,20	0,086
Erreur	24	0,07990	0,003329		
Total	29	1,70972			

$R^2=95,33\%$   
 $R^2$  (ajusté)= 94,35%  
 $R^2$  (prédit)= 92,53%



**Figure III. 36:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – pénétration P)

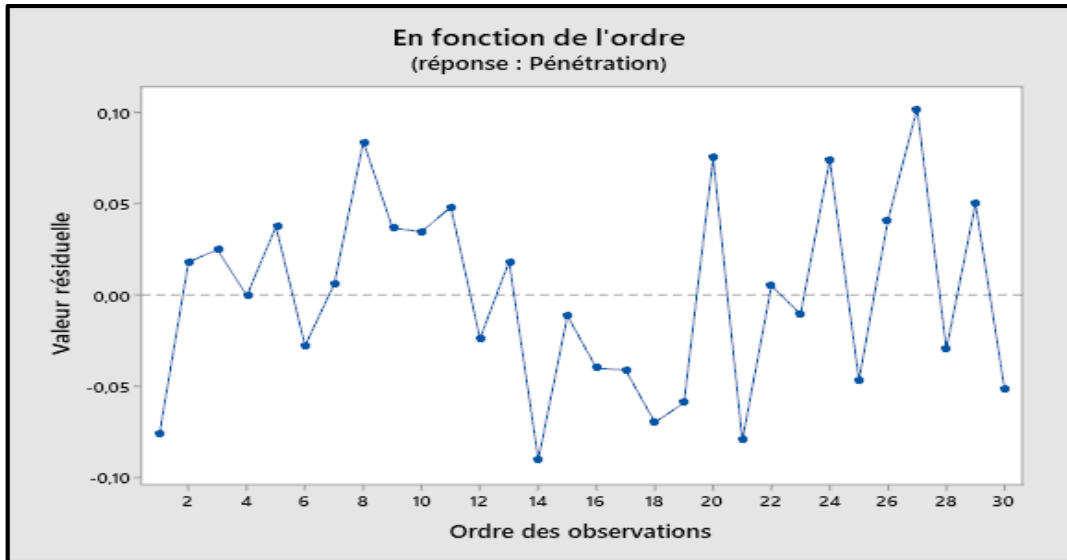


Figure III. 37: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – pénétration P)

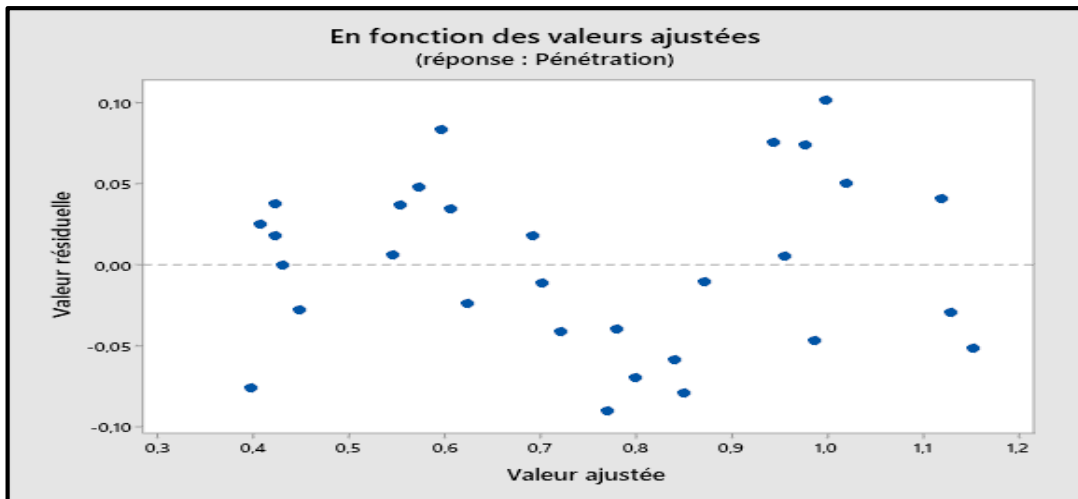


Figure III. 38: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – pénétration P)

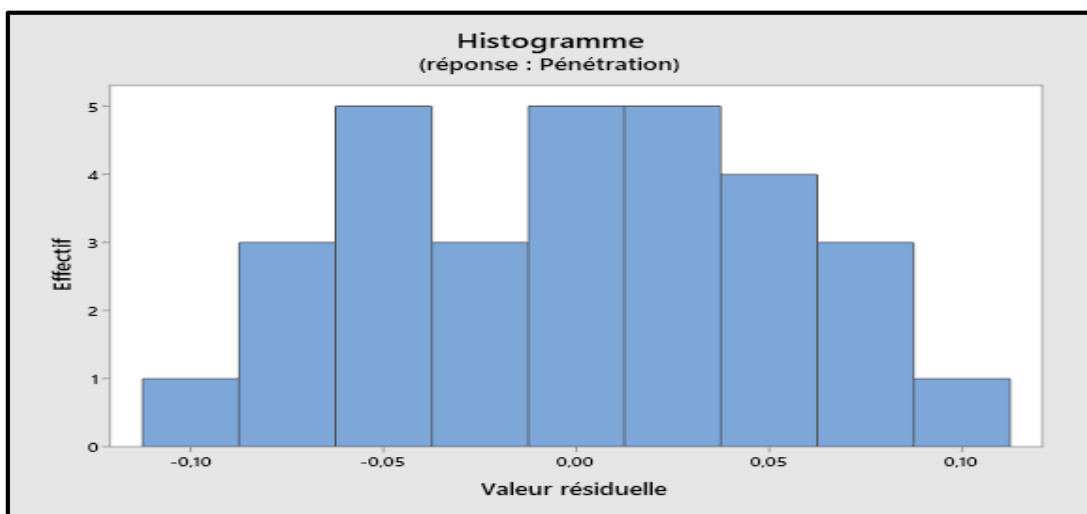


Figure III. 39: Histogramme des résidus (modèle 2 – pénétration P)

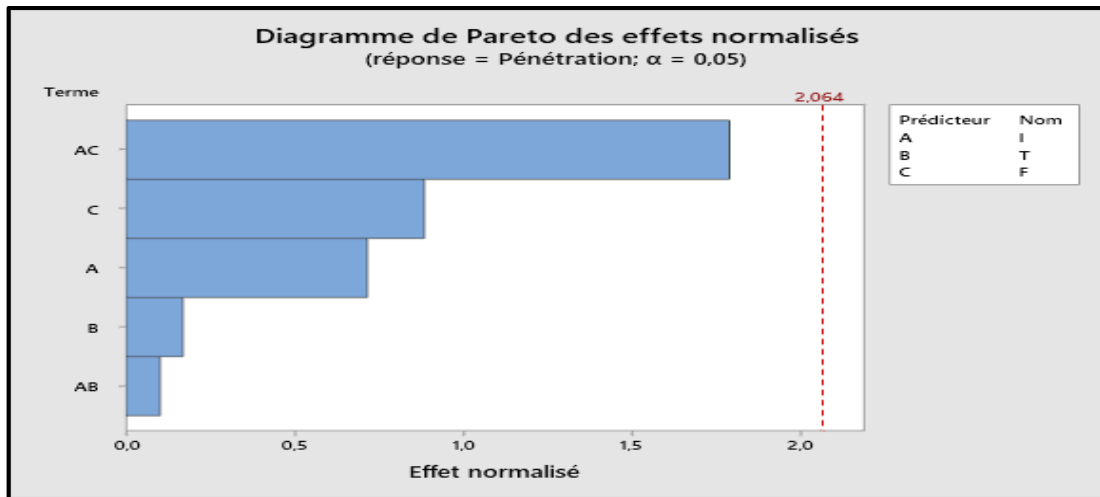


Figure III. 40: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – pénétration P)

### III.5.3. Modèle 3 : Interaction entre I<sup>2</sup> et une interaction triple I×T×F :

Le modèle 3, défini par l'équation (11), inclut les effets linéaires de l'intensité (I), du temps (T) et de la force (F), ainsi qu'un terme quadratique (I<sup>2</sup>) et une interaction triple (I × T × F) :

$$P = -0,083 + 0,0391 I - 0,0071 T + 0,0119 F + 0,00107 I^2 + 0,000202 I \times T \times F \quad (\text{III.11})$$

L'analyse de variance, présentée dans le tableau III.11, montre que le modèle est globalement fiable ( $F' = 89,77$  ;  $p \approx 0$ ), ce qui indique qu'il explique de manière satisfaisante les variations de la pénétration. Toutefois, l'examen individuel des paramètres montre qu'aucun facteur ne présente d'effet significatif : les valeurs p associées à l'intensité (I), au temps (T), à la force (F), au terme quadratique (I<sup>2</sup>) ainsi qu'à l'interaction triple (I × T × F) sont toutes supérieures à 0,3. Cette observation montre que, dans ce modèle, aucun paramètre ne contribue de manière notable de façon isolée. Ainsi, bien que le modèle dans son ensemble fonctionne correctement, il n'est pas possible d'identifier un facteur précis comme responsable des variations observées de la pénétration. La qualité de l'ajustement est confirmée par l'analyse des résidus. La figure III.41 présente le diagramme de probabilité normale et montre que les erreurs suivent une distribution normale, comme l'indique l'alignement des points sur la droite théorique. La figure III.42 illustre que les résidus sont distribués aléatoirement en fonction de l'ordre des essais, ce qui confirme l'absence de biais ou d'effet de série. La figure III.43 montre que les erreurs se répartissent régulièrement autour de zéro par rapport aux valeurs ajustées, témoignant d'une bonne homogénéité de la variance. De plus, l'histogramme des résidus, présenté dans la figure III.44, montre une forme en cloche centrée sur zéro, renforçant l'idée d'une distribution normale des erreurs. La figure III.45, qui présente le diagramme de Pareto des effets normalisés, montre que tous les facteurs restent en dessous du seuil de signification, confirmant qu'aucun

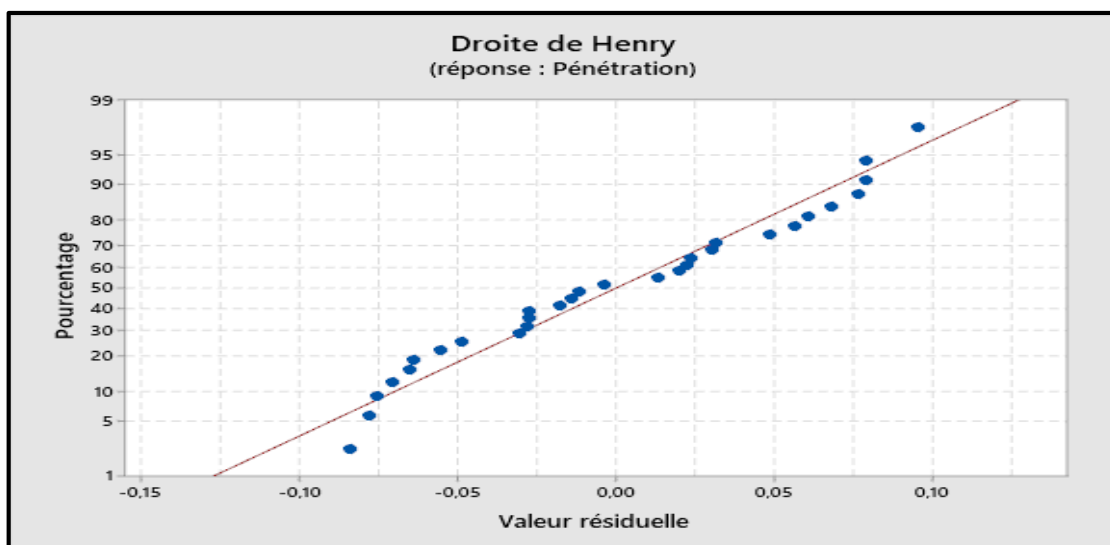
effet n'est dominant. Toutefois, quelques effets se rapprochent du seuil critique, ce qui pourrait justifier des investigations complémentaires dans de futurs travaux.

En résumé, bien que le modèle 3 soit valide d'un point de vue statistique, il ne permet pas d'identifier clairement des paramètres prioritaires pour l'optimisation de la pénétration. Il reste néanmoins utile pour comprendre les tendances générales du phénomène étudié.

**Tableau III. 11:** Résultats d'analyse de variance– modèle 3 pénétration (P)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	1,62294	0,324588	89,77	0,000
I	1	0,00281	0,002810	0,78	0,387
T	1	0,00034	0,000341	0,09	0,761
F	1	0,00039	0,000392	0,11	0,745
I*I	1	0,00154	0,001543	0,43	0,520
I*T*F	1	0,00228	0,002285	0,63	0,434
Erreur	24	0,08678	0,003616		
Total	29	1,70972			

**R<sup>2</sup>=94,92%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 93,87%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 91,50%**



**Figure III. 41:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – pénétration P)

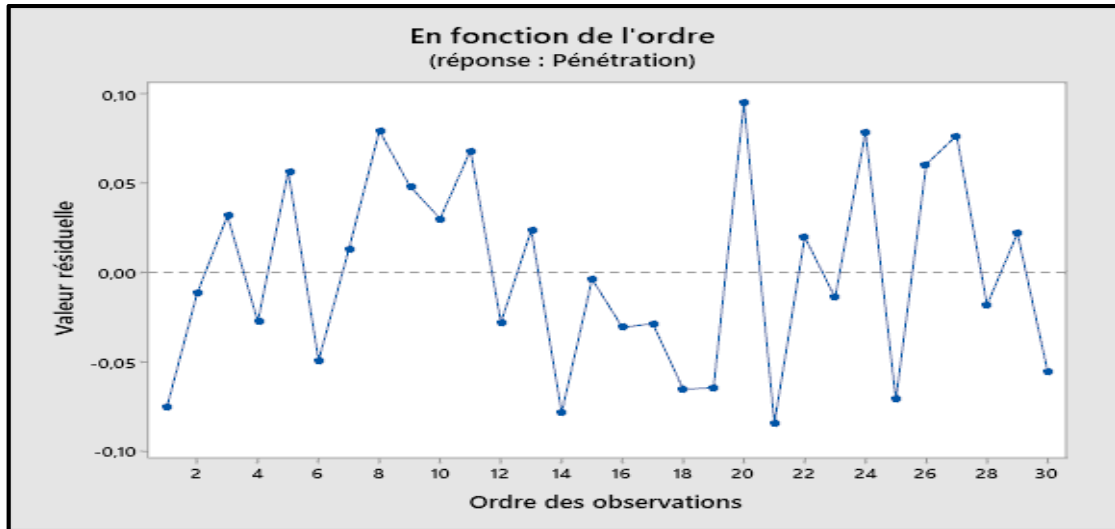


Figure III. 42: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – pénétration P)

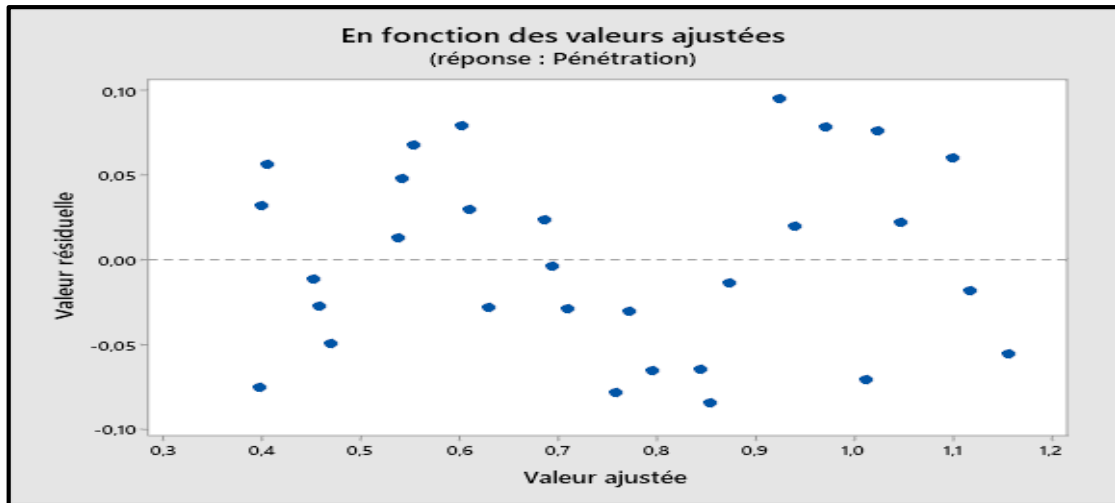


Figure III. 43: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – pénétration P)

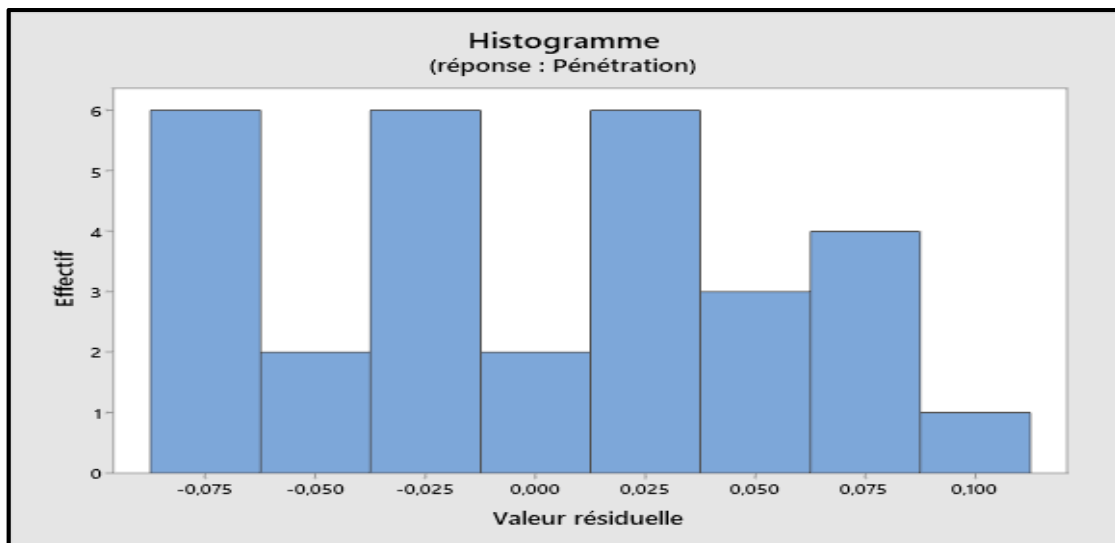


Figure III. 44: Histogramme des résidus (modèle 3 – pénétration P)

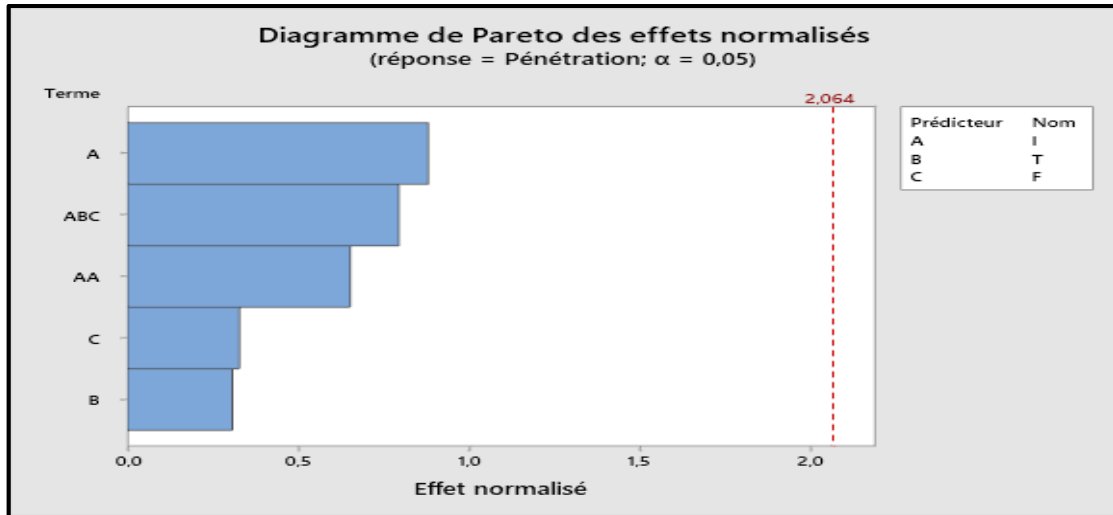


Figure III. 45: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – pénétration P)

#### III.5.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative :

Le modèle 4, présenté par l'équation (12), prend en compte les effets directs de l'intensité (I), du temps (T), de la force (F), ainsi qu'une interaction triple entre ces trois paramètres (I×T×F) :

$$P = -0,229 + 0,0648 I - 0,0071 T + 0,0119 F + 0,000202 I \times T \times F \quad (III.12)$$

L'analyse de variance présentée dans le tableau III.12 montre que le modèle est globalement très fiable, avec une valeur F' élevée (114,74) et une valeur  $\rho$  extrêmement faible, ce qui indique qu'il explique de manière efficace la variation observée de la pénétration. Toutefois, l'examen des effets individuels montre que seul l'intensité du courant (I) présente une influence statistiquement significative ( $F' = 10,25$  ;  $\rho = 0,004$ ). En revanche, le temps (T), la force (F), ainsi que l'interaction triple (I × T × F) n'exercent pas d'effet significatif dans ce modèle. La validation du modèle est illustrée par l'analyse des résidus. La figure III.46 présente le diagramme de probabilité normale et montre que les erreurs sont alignées de manière satisfaisante sur la droite théorique, ce qui confirme qu'elles suivent une distribution normale, condition indispensable à la fiabilité des tests statistiques. La figure III.47 montre que les résidus, tracés en fonction de l'ordre des essais, sont répartis aléatoirement autour de zéro, ce qui atteste de l'indépendance des erreurs. De même, la figure III.48 illustre que les résidus par rapport aux valeurs ajustées ne présentent aucun motif particulier, indiquant ainsi une homogénéité de la variance. L'histogramme des résidus, présenté dans la figure III.49, montre une forme symétrique en cloche centrée sur zéro, renforçant ainsi l'hypothèse de normalité. La figure III.50, qui présente le diagramme de Pareto des effets normalisés, montre que seul le

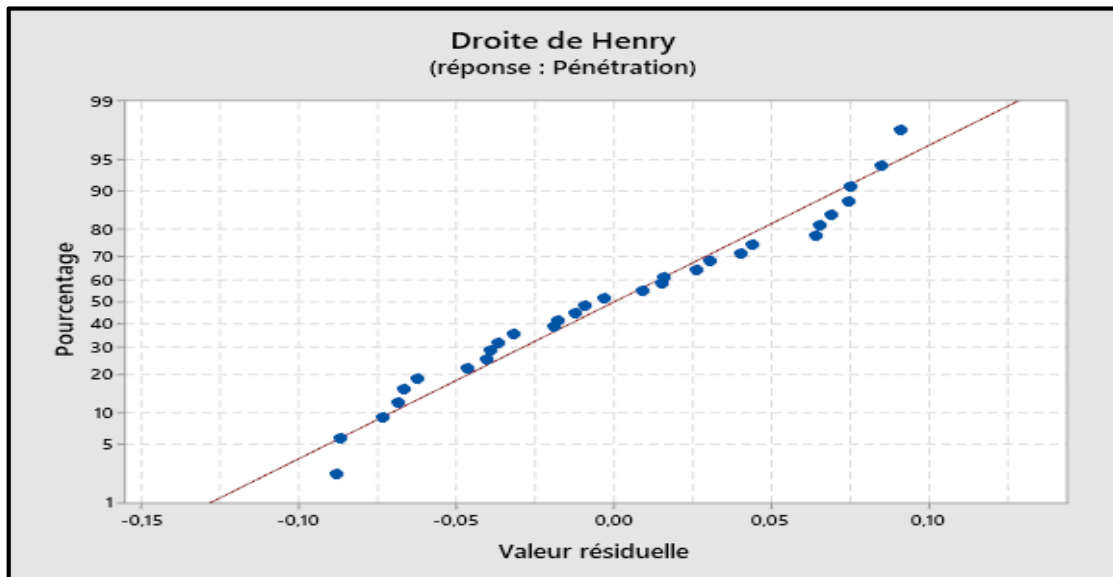
facteur intensité (I) dépasse nettement le seuil de signification. Les autres paramètres affichent un impact beaucoup plus faible, voire négligeable.

En résumé, ce modèle est statistiquement solide et montre clairement que l'intensité du courant est le facteur principal influençant la pénétration. Pour optimiser ce résultat, une attention particulière devra être portée au contrôle précis de ce paramètre, tandis que les autres variables peuvent être considérées comme secondaires dans cette configuration expérimentale.

**Tableau III. 12:** Résultats d'analyse de variance– modèle 4 pénétration (P)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	4	1,62140	0,405350	114,74	0,000
I	1	0,03620	0,036202	10,25	0,004
T	1	0,00034	0,000341	0,10	0,759
F	1	0,00039	0,000392	0,11	0,742
I*T*F	1	0,00228	0,002285	0,65	0,429
Erreur	25	0,08832	0,003533		
Total	29	1,70972			

**R<sup>2</sup>=94,83%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 94,83%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 92,30%**



**Figure III. 46:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – pénétration P)

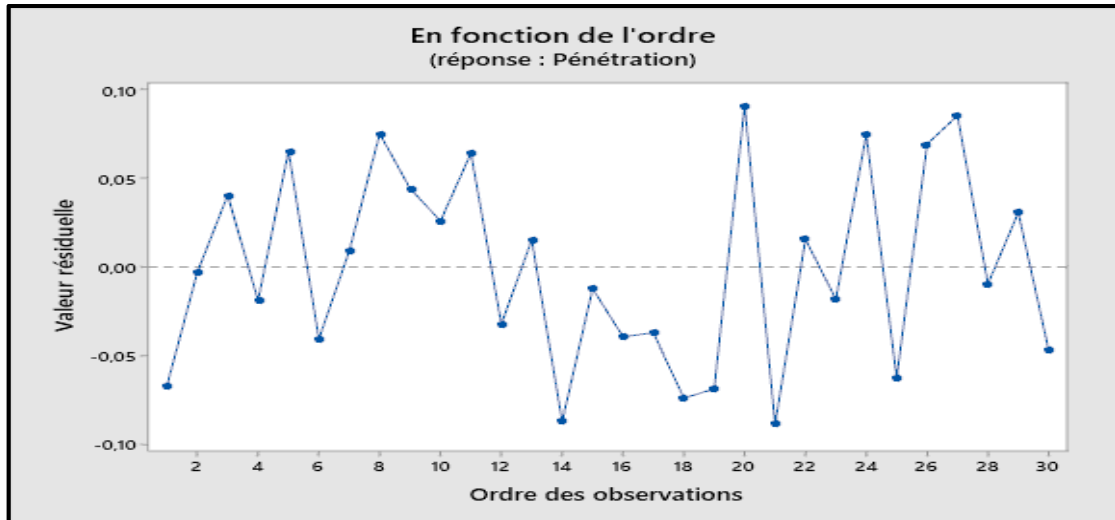


Figure III. 47: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – pénétration P)

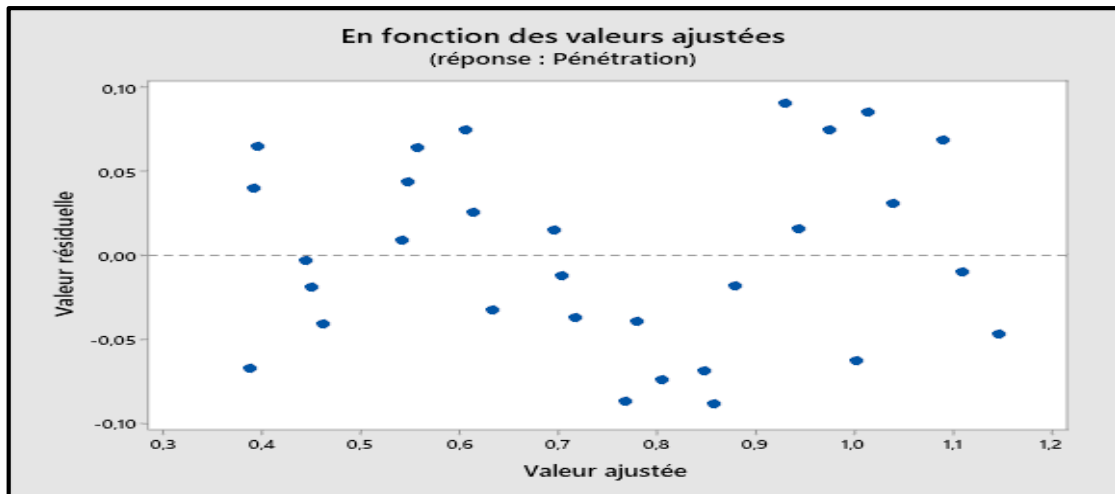


Figure III. 48: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – pénétration P)

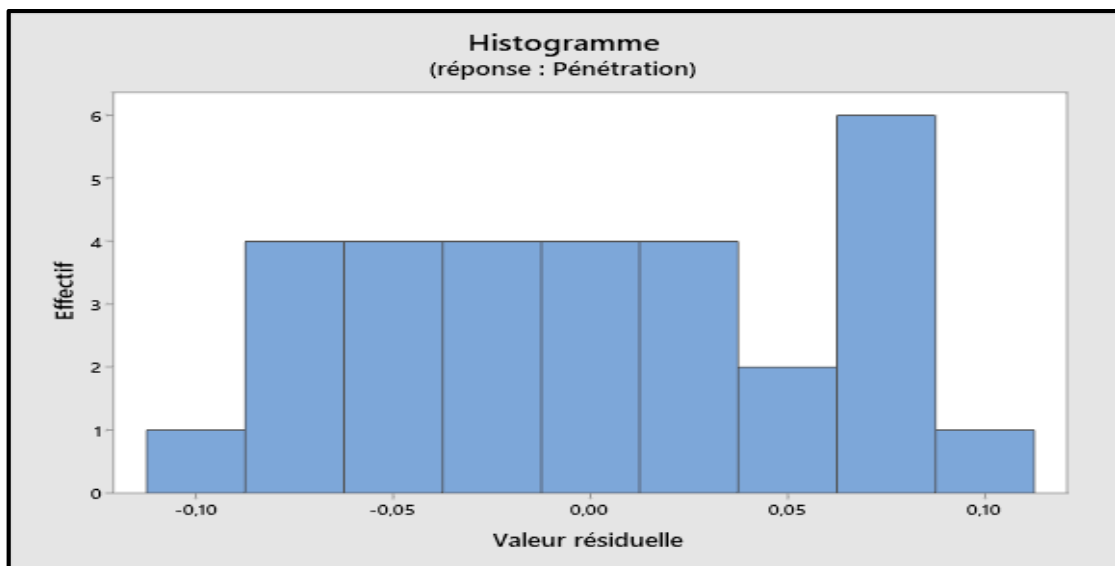


Figure III. 49: Histogramme des résidus (modèle 4 – pénétration P)

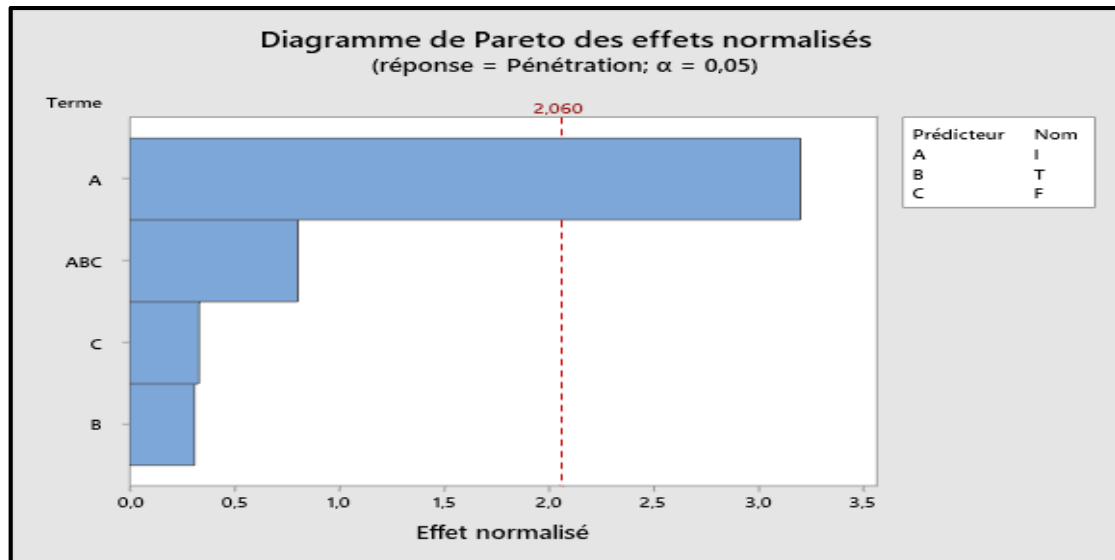


Figure III. 50: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – pénétration P)

### III.6. Analyse de la résistance maximale en traction

Dans cette partie, une **analyse factorielle** a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 19 afin d'étudier l'effet de trois paramètres de soudage — l'intensité du courant (**I**), le temps de soudage (**T**) et la force appliquée (**F**) — sur la résistance maximale en traction (**Rm**). Cette démarche a permis d'établir un modèle mathématique décrivant l'influence de chaque paramètre sur la résistance.

Le tableau III.14 présente les valeurs de résistance maximale en fonction des différentes combinaisons de paramètres utilisées lors des essais. Le tableau III.15 résume les coefficients du modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse factorielle. L'équation (III.13) décrit la relation mathématique entre les paramètres de soudage et la résistance maximale en traction, telle que déterminée par une régression linéaire.

$$Rm = 329,4 + 15,88 I - 6,02 T - 5,22 F \quad (III.13)$$

D'après l'analyse de variance présentée dans le tableau III.15, le modèle est globalement très significatif ( $F' = 82,97$  ;  $p = 0,000$ ), ce qui montre qu'il explique de manière satisfaisante la variation des résultats expérimentaux. Parmi les paramètres étudiés, l'intensité (I) apparaît comme le facteur le plus influent, avec une valeur  $F'$  particulièrement élevée ( $F' = 239,01$ ), indiquant son impact déterminant sur la résistance mécanique. Le temps (T) exerce un effet modéré ( $F' = 6,68$ ), tandis que la force (F) présente une influence faible, mais néanmoins non négligeable. La normalité des erreurs du modèle a été vérifiée à l'aide du diagramme de Henry. La figure montrée (figure III.51) illustre un alignement satisfaisant des points le long de la diagonale, ce qui montre que les erreurs suivent une distribution normale et confirme ainsi la

validité de l'ajustement du modèle. Par ailleurs, l'importance relative des paramètres a été présentée à travers le diagramme de Pareto. La figure montrée (figure III.52) montre clairement que l'intensité (I) domine l'ensemble des facteurs, suivie par la force (F), tandis que le temps (T) exerce une influence plus limitée.

**Tableau III. 13:** Données expérimentales pour la résistance maximale en traction

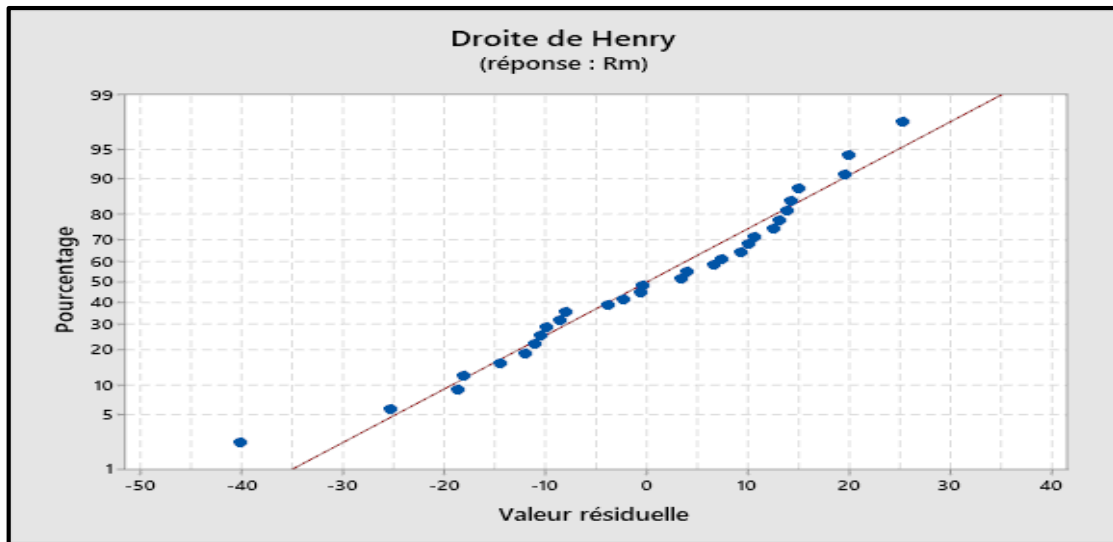
Ordre d'essai	I	T	F	Rm
1	8	10	6	368,942
2	8	10	8	344,455
3	8	11	6	368,126
4	8	11	8	329,762
5	8	13	6	344,455
6	8	13	8	310,989
7	10	10	6	388,632
8	10	10	8	368,126
9	10	11	6	404,857
10	10	11	8	383,634
11	10	13	6	364,045
12	10	13	8	374,84
13	12	10	6	435,874
14	12	10	8	431,793
15	12	11	6	442,404
16	12	11	8	421,998
17	12	13	6	409,754
18	12	13	8	425,263
19	14	10	6	479,708
20	14	10	8	462,81
21	14	11	6	453,831
22	14	11	8	456,28
23	14	13	6	457,096
24	14	13	8	442,263
25	16	10	6	479,951
26	16	10	8	470,972
27	16	11	6	445,669
28	16	11	8	466,891
29	16	13	6	462,81
30	16	13	8	459,545

En conclusion, le modèle présente l'intensité du courant comme le facteur déterminant pour l'amélioration de la résistance maximale en traction. Une maîtrise précise de ce paramètre permet donc d'optimiser la performance mécanique du point de soudure, tandis que le temps et la force, bien que contributifs, jouent un rôle secondaire.

**Tableau III. 14:** Tableau d'analyse des variances- modèle linière résistance maximale (Rm)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	3	63061,4	21020,5	82,97	0,000
I	1	60551,8	60551,8	239,01	0,000
T	1	1692,8	1692,8	6,68	0,016
F	1	816,8	816,8	3,22	0,084
Erreur	26	6586,8	253,3		
Total	29	69648,3			

**R carré=90,54%**  
**R carré (ajust)= 89,45%**  
**R carré (prédit)= 87,36%**



**Figure III. 51:** Résistance maximale de traction prévue par rapport aux valeurs expérimentales

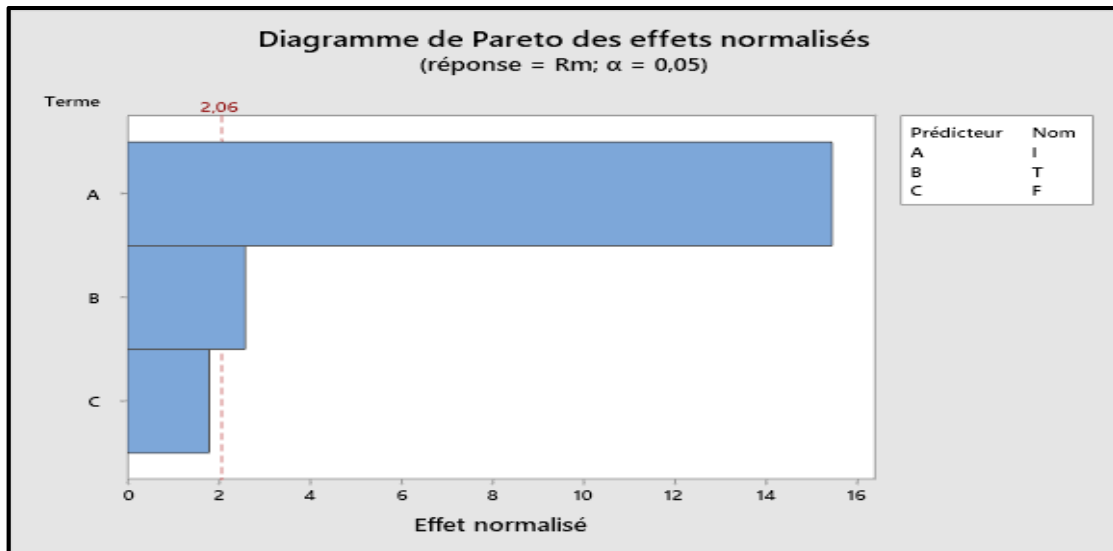


Figure III. 52: Diagramme de Pareto des effets normalisés – résistance maximale Rm

### III.7. Modélisation par régression et analyse de l'influence des paramètres de soudage sur la résistance maximale en traction

Un modèle de régression a été établi afin de mettre en relation la résistance au cisaillement des assemblages soudés par soudage par points par résistance (RSW) avec trois paramètres de soudage principaux : le courant de soudage I, la durée d'application du courant (Temps de soudage) T, et la force de serrage des électrodes F.

L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 19, qui a permis de construire un modèle mathématique décrivant la relation entre ces paramètres de soudage et la résistance mécanique maximale atteinte par les assemblages. Le modèle de régression obtenu est présenté ci-dessous :

$$Rm = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{23} x_2 x_3 \quad (\text{III.14})$$

#### III.7.1. Modèle 1 – Avec effets linéaires et interactions simples :

Le modèle 1, représenté par l'équation (15), relie la résistance maximale en traction (**Rm**) aux trois paramètres de soudage — l'intensité (**I**), le temps (**T**) et la force (**F**) — tout en intégrant un terme quadratique (**I<sup>2</sup>**) et une interaction entre **T** et **F** :

$$Rm = 271 + 49,11 I - 17,5 T - 23,8 F - 1,384 I^2 + 1,64 T \times F \quad (\text{III.15})$$

L'analyse de variance présentée dans le tableau III.15 montre que le modèle est globalement fiable et qu'il explique de manière satisfaisante les variations observées dans la résistance maximale. Parmi les trois paramètres étudiés, l'intensité du courant (I) apparaît comme le facteur principal, avec une influence hautement significative ( $\rho = 0,000$ ). Le modèle montre également que la relation entre l'intensité et la résistance n'est pas strictement linéaire : en effet, au-delà d'un certain seuil d'intensité, la résistance tend à diminuer, ce qui traduit un effet quadratique significatif ( $I^2$ ,  $\rho = 0,001$ ). En revanche, le temps (T), la force (F) ainsi que leur interaction ( $T \times F$ ) ne présentent pas d'effet significatif dans le cadre de ce modèle. L'analyse des erreurs, présentée à travers les figures III.53 à III.56, indique que le modèle est correctement ajusté : les figures montrées révèlent que les erreurs suivent une distribution normale, sont bien réparties et restent homogènes quelle que soit la valeur des résultats prédits. Par ailleurs, le diagramme de Pareto, présenté dans la figure III.57, montre que seuls l'intensité et son effet quadratique exercent une influence notable sur la résistance maximale.

En synthèse, ce modèle présente l'intensité du courant comme le levier principal pour optimiser la résistance du point de soudure, tandis que le temps et la force apparaissent comme des facteurs secondaires, ayant un impact limité.

**Tableau III. 15:** Résultats d'analyse de variance- modèle 1 résistance maximale ( $R_m$ )

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	65763,1	13152,6	81,25	0,000
I	1	5573,2	5573,2	34,43	0,000
T	1	286,3	286,3	1,77	0,196
F	1	203,7	203,7	1,26	0,273
I*I	1	2575,9	2575,9	15,91	0,001
T*F	1	125,8	125,8	0,78	0,387
Erreur	24	3885,2	161,9		
Total	29	69648,3			
<b><math>R^2=94,42\%</math></b> <b><math>R^2</math> (ajusté)= 93,26%</b> <b><math>R^2</math> (prédit)= 91,18%</b>					

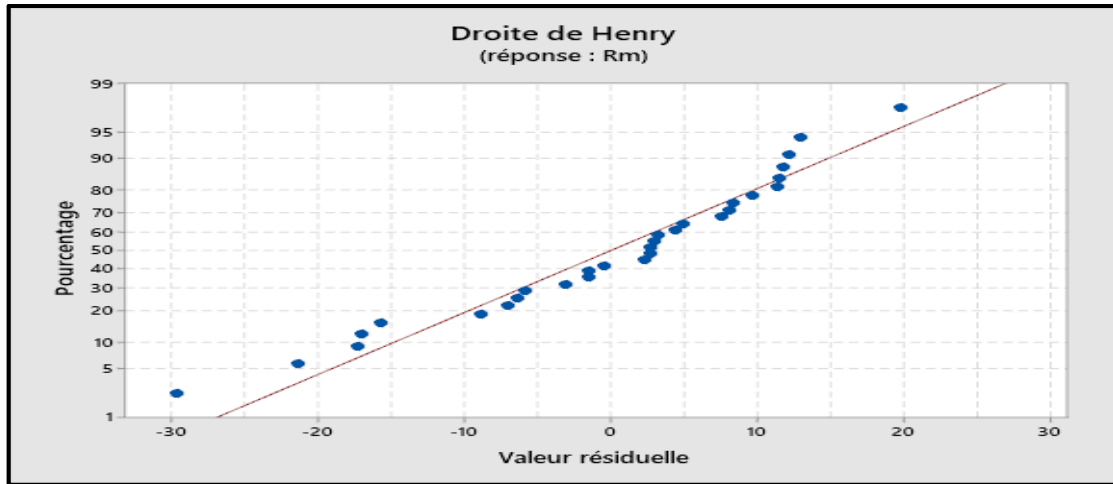


Figure III. 53: Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 1 – résistance maximale Rm)

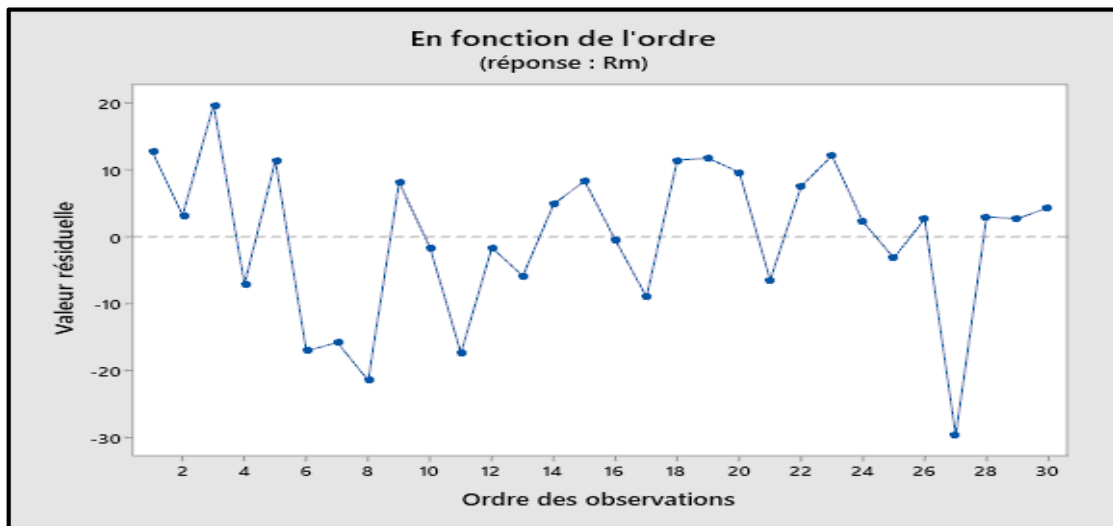


Figure III. 54 : Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 1 – résistance maximale Rm)

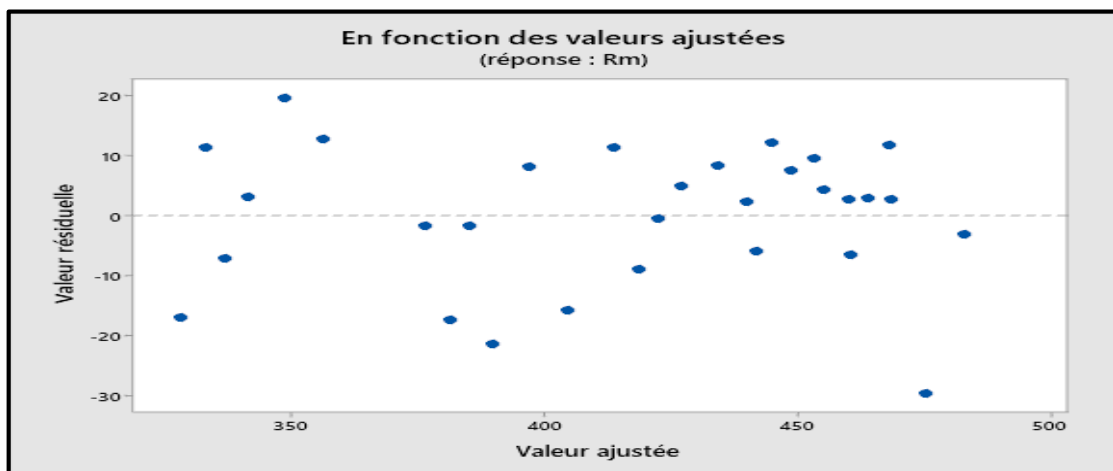


Figure III. 55: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 1 – résistance maximale Rm)

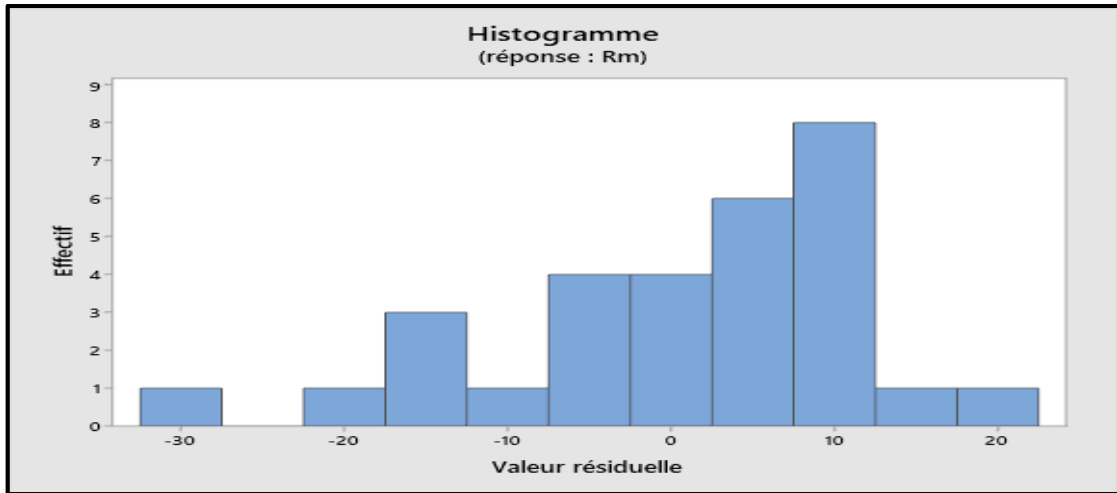


Figure III. 56: Histogramme des résidus (modèle 1 – résistance maximale Rm)

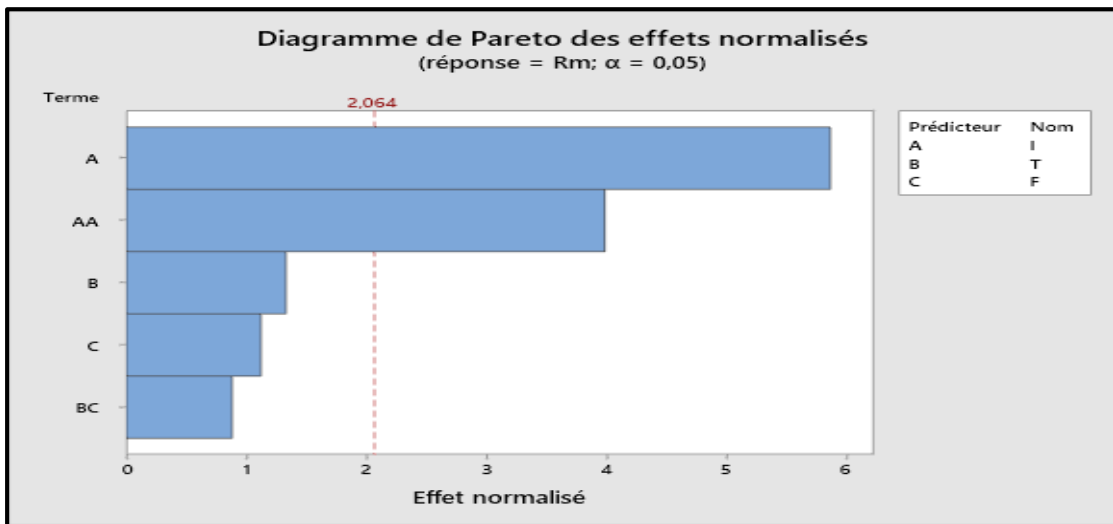


Figure III. 57: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 1 – résistance maximale Rm)

### III.7.2. Modèle 2 – Avec interactions I×T et I × F :

Le modèle 2, défini par l'équation suivante, inclut les effets linéaires de l'intensité (I), du temps (T) et de la force (F), ainsi que deux interactions : (I × T) et (I × F)

$$Rm = 545 - 2,1 I - 11,96 T - 26,4 F + 0,495 I \times T + 1,769 I \times F \quad (III.16)$$

Le tableau III.16 présente les résultats de l'analyse de variance, qui montre que le modèle de régression est globalement valide, avec une valeur F' de 53,40 et une p-valeur extrêmement faible (p= 0,000). Cela indique que, dans l'ensemble, les paramètres inclus dans le modèle exercent un effet significatif sur la résistance maximale (Rm). Toutefois, l'examen détaillé de chaque variable révèle que seul le facteur F est statistiquement significatif (p = 0,042), ce qui en fait le paramètre le plus influent du modèle. Les autres effets, notamment l'intensité I (p =

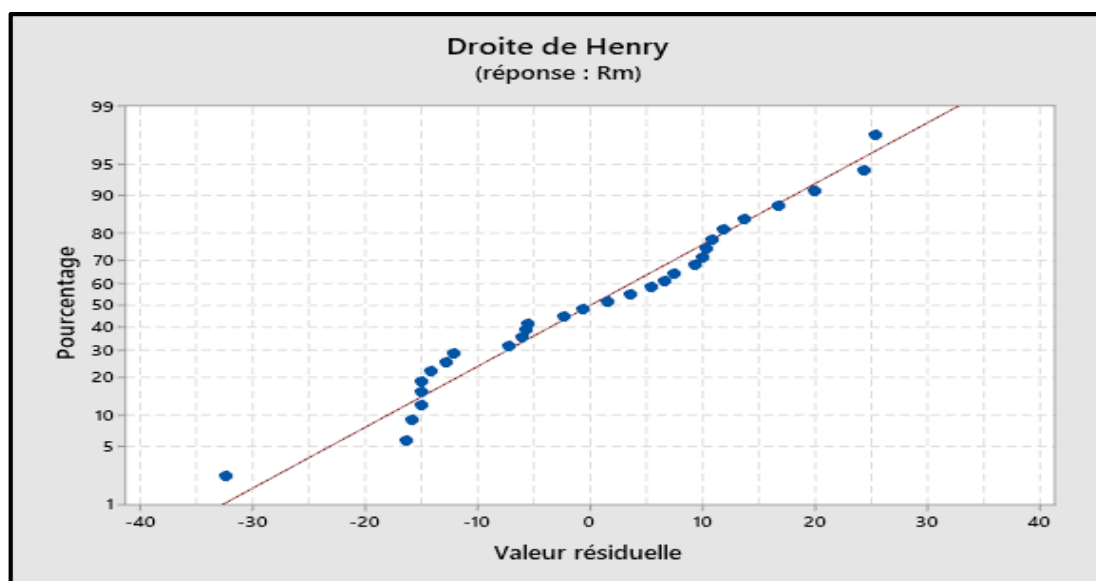
0,856), le temps T ( $\rho = 0,237$ ) ainsi que l'interaction  $I \times T$  ( $\rho = 0,542$ ), ne montrent pas d'impact significatif. L'interaction  $I \times F$ , avec une p-valeur de 0,089, se situe à proximité du seuil de signification, suggérant un effet modéré qui mérite une attention particulière. L'analyse des résidus présentée à travers plusieurs figures confirme que le modèle est correctement ajusté. La figure montrée (figure III.58), correspondant au diagramme de Henry, indique que les erreurs suivent une distribution normale, bien qu'une valeur atypique soit observée à l'observation 27 ( $\rho = -2,36$ ), pouvant correspondre à un point influent. La figure montrée (figure III.59), représentant la répartition des résidus selon l'ordre des essais, montre une dispersion aléatoire, traduisant l'indépendance des erreurs. Par ailleurs, la figure montrée (figure III.60), illustrant les résidus en fonction des valeurs ajustées, révèle une variance homogène autour de zéro. Enfin, la figure montrée (figure III.61), qui présente l'histogramme des résidus, adopte une forme en cloche centrée, renforçant l'hypothèse de normalité. Le diagramme de Pareto présenté dans la figure montrée (figure III.62) montre que le facteur F est le plus influent, suivi par l'interaction  $I \times F$ , tandis que les autres effets présentent un impact limité.

En conclusion, ce modèle de régression reste globalement fiable ; toutefois, c'est principalement la force (F) qui influence la résistance maximale, constituant ainsi le principal levier pour améliorer les performances mécaniques du point de soudure

**Tableau III. 16:** Résultats d'analyse de variance- modèle 1 résistance maximale (Rm)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	63903,7	12780,7	53,40	0,000
I	1	8,0	8,0	0,03	0,856
T	1	351,6	351,6	1,47	0,237
F	1	1104,0	1104,0	4,61	0,042
I*T	1	91,5	91,5	0,38	0,542
I*F	1	750,8	750,8	3,14	0,089
Erreur	24	5744,5	239,4		
Total	29	69648,3			

$R^2=91,75\%$   
 $R^2$  (ajusté)= 90,03%  
 $R^2$  (prédit)= 87,09%



**Figure III. 58:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 2 – résistance maximale Rm)

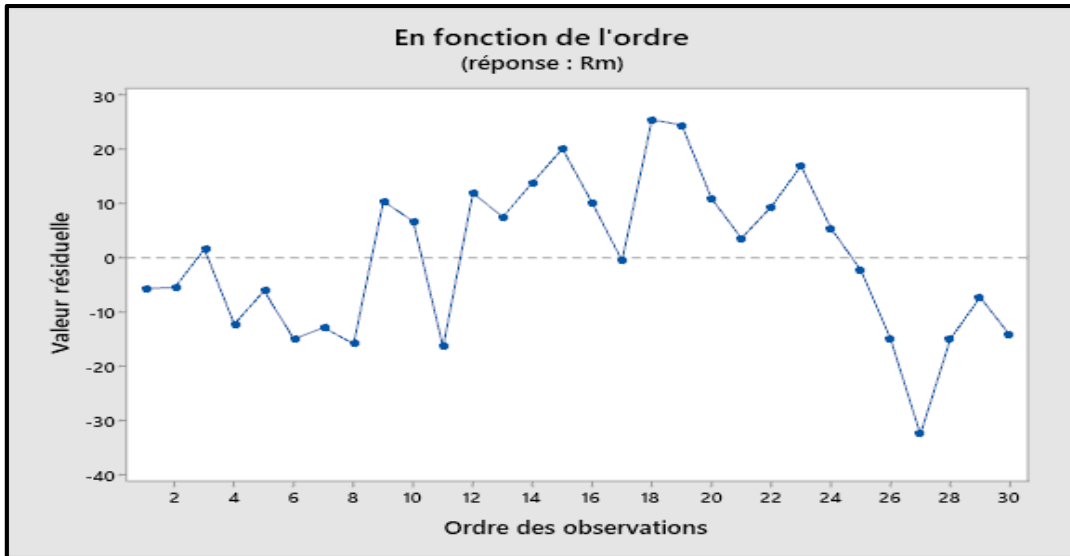


Figure III. 59: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 2 – résistance maximale Rm)

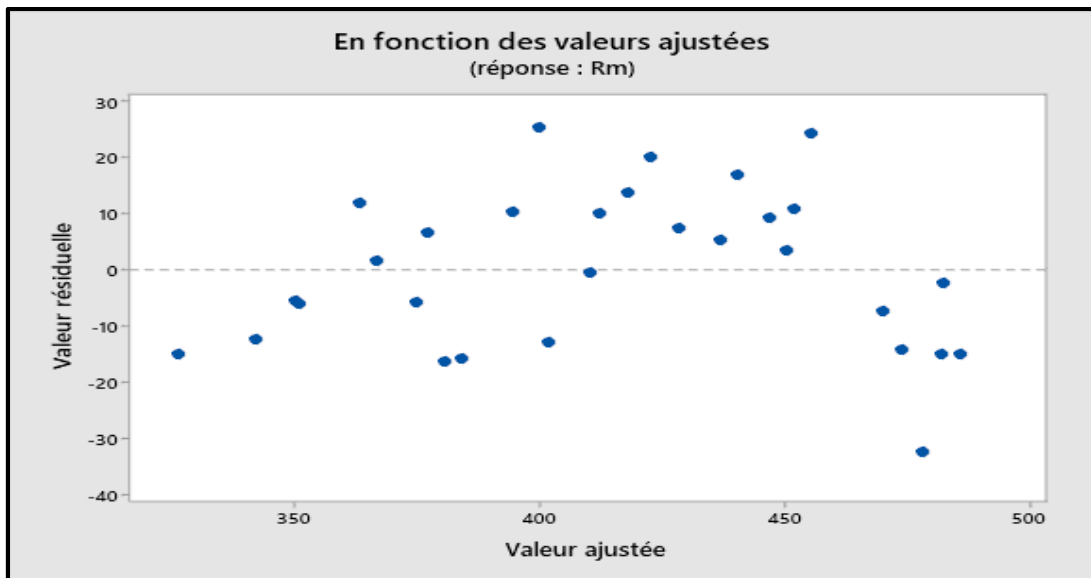


Figure III. 60: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 2 – résistance maximale Rm)

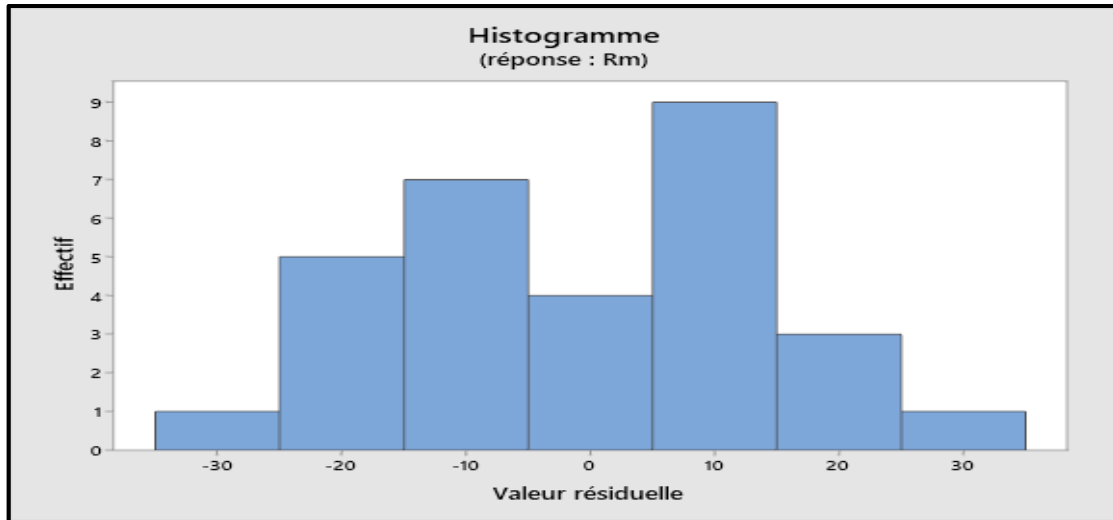


Figure III. 61: Histogramme des résidus (modèle 2 – résistance maximale Rm)

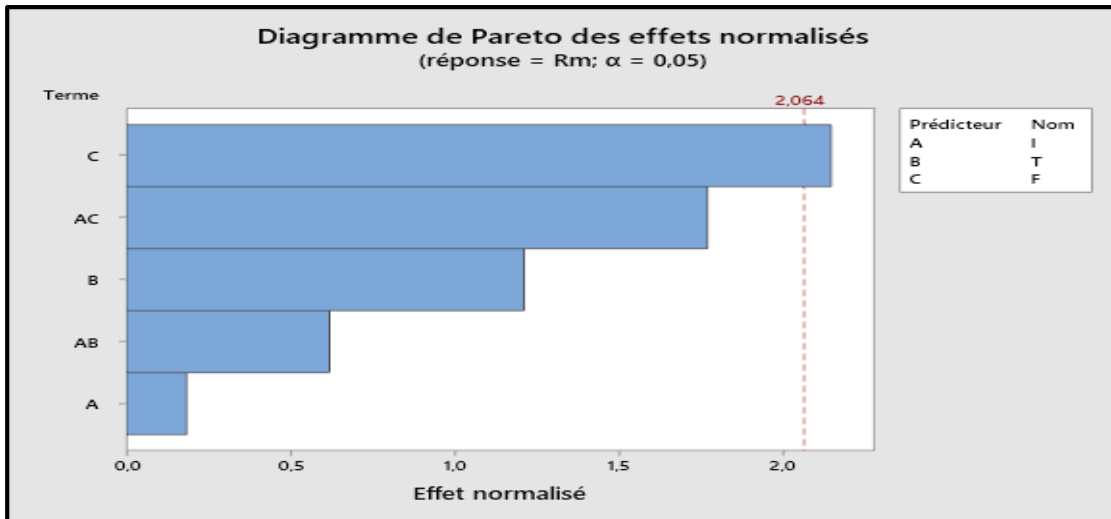


Figure III. 62: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 2 – résistance maximale Rm)

### III.7.3. Modèle 3 : Interaction entre $I^2$ et une interaction triple $I \times T \times F$ :

Le modèle 3, défini par l'équation suivante, inclut les effets linéaires des paramètres de soudage (I, T, F), un effet quadratique de l'intensité ( $I^2$ ), ainsi qu'une interaction triple entre l'intensité, le temps et la force ( $I \times T \times F$ )

$$Rm = 377 + 39,30 I - 16,41 T - 22,04 F - 1,384 I^2 + 0,1237 I \times T \times F \quad (\text{III.17})$$

L'analyse de variance présentée dans le tableau III.17 montre que le modèle est particulièrement fiable, avec une valeur F' de 101,29 et une  $\rho$ -valeur extrêmement faible ( $\rho = 0,000$ ). Cela indique que le modèle explique de manière satisfaisante les variations observées dans la résistance maximale (Rm). Tous les paramètres étudiés présentent un effet significatif sur la

réponse. L'intensité du courant (I) apparaît comme le facteur le plus influent ( $\rho = 0,000$ ), suivie du temps d'application (T,  $\rho = 0,001$ ), de la force (F,  $\rho = 0,004$ ), ainsi que du terme quadratique  $I^2$  ( $\rho = 0,000$ ), soulignant ainsi l'existence d'une relation non linéaire entre l'intensité et la résistance maximale. De plus, l'interaction triple ( $I \times T \times F$ ) est également significative ( $\rho = 0,017$ ), ce qui montre que ces trois paramètres peuvent agir conjointement sur la résistance. L'analyse des résidus, présentée à travers les figures III.63 à III.66, confirme que le modèle est correctement ajusté. Les figures montrées révèlent que les erreurs suivent une distribution normale, qu'elles sont indépendantes et que leur variance demeure stable. La figure montrée (figure III.66), représentant l'histogramme des résidus, présente une forme en cloche centrée sur zéro, renforçant ainsi la validité du modèle. Enfin, le diagramme de Pareto, présenté dans la figure montrée (figure III.67), montre l'importance prépondérante de l'intensité, suivie du temps, de la force, du terme quadratique  $I^2$  et de l'interaction  $I \times T \times F$ .

En conclusion, ce modèle de régression est statistiquement robuste et présente l'intensité du courant comme le principal levier pour optimiser la résistance maximale, tout en mettant en évidence la nécessité de prendre en compte ses effets non linéaires ainsi que ses interactions avec les autres paramètres.

**Tableau III. 17:** Résultats d'analyse de variance- modèle 3 résistance maximale (Rm)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	5	66497,2	13299,4	101,29	0,000
I	1	2835,2	2835,2	21,59	0,000
T	1	1832,9	1832,9	13,96	0,001
F	1	1340,3	1340,3	10,21	0,004
I*I	1	2575,9	2575,9	19,62	0,000
I*T*F	1	859,9	859,9	6,55	0,017
Erreur	24	3151,1	131,3		
Total	29	69648,3			
<b><math>R^2=95,48\%</math></b> <b><math>R^2</math> (ajusté)= <b>94,53%</b></b> <b><math>R^2</math> (prédit)= <b>92,98%</b></b>					

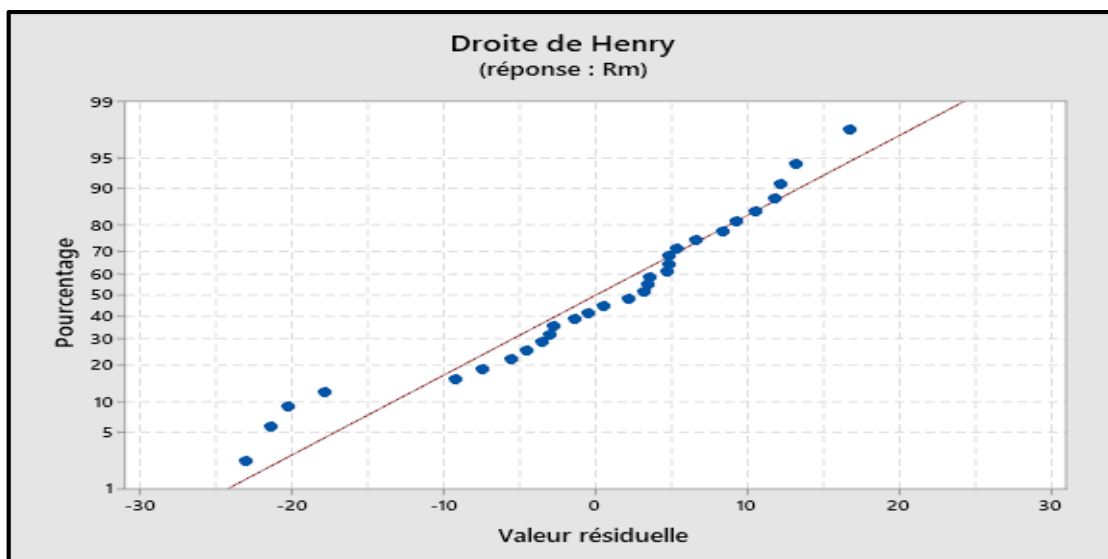


Figure III. 63: Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 3 – résistance maximale Rm)

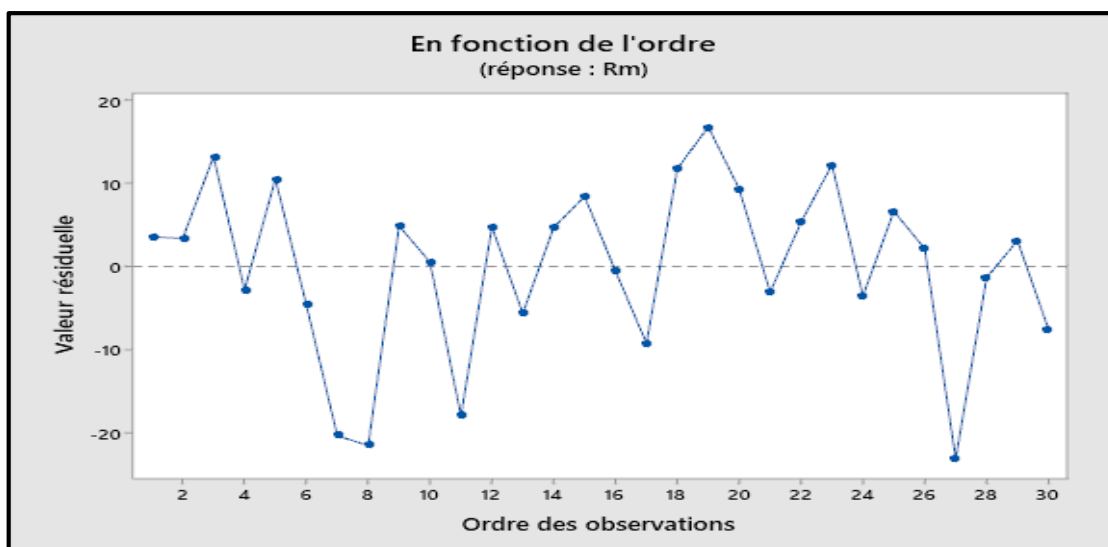


Figure III. 64: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 3 – résistance maximale Rm)

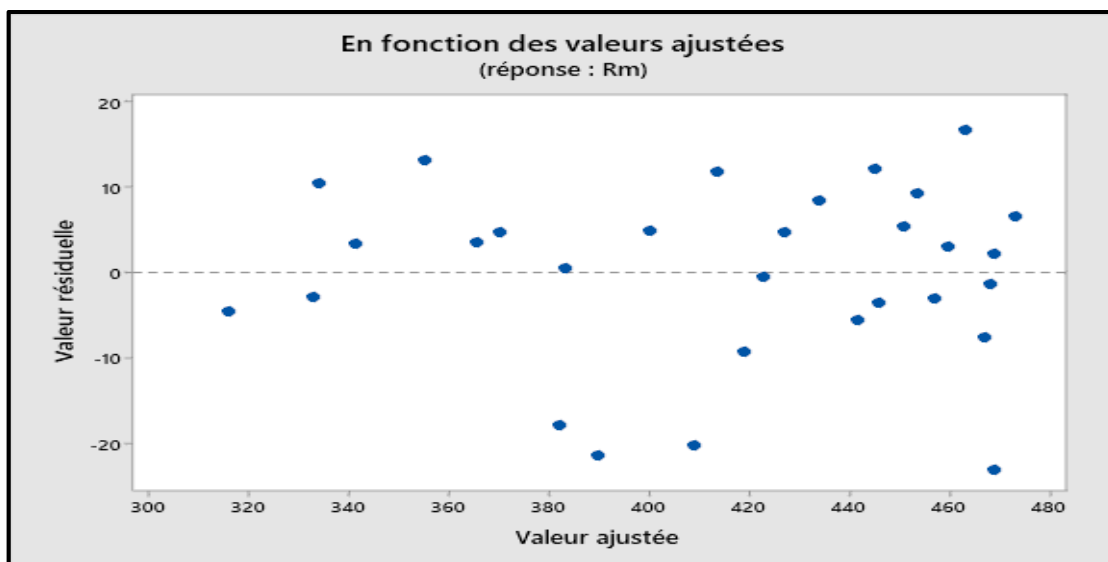


Figure III. 65: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 3 – résistance maximale Rm)

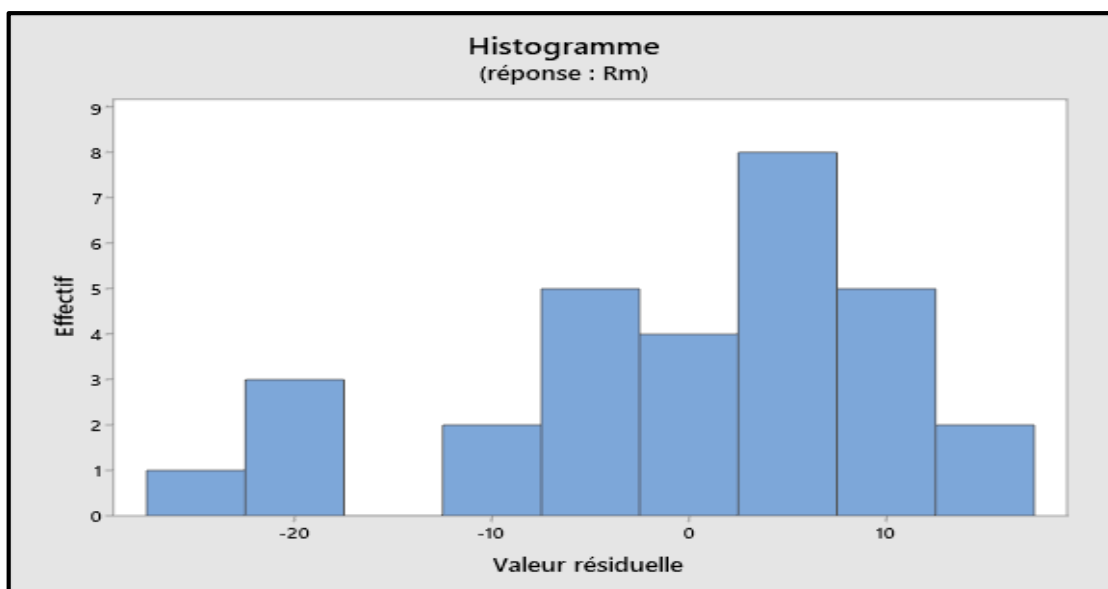
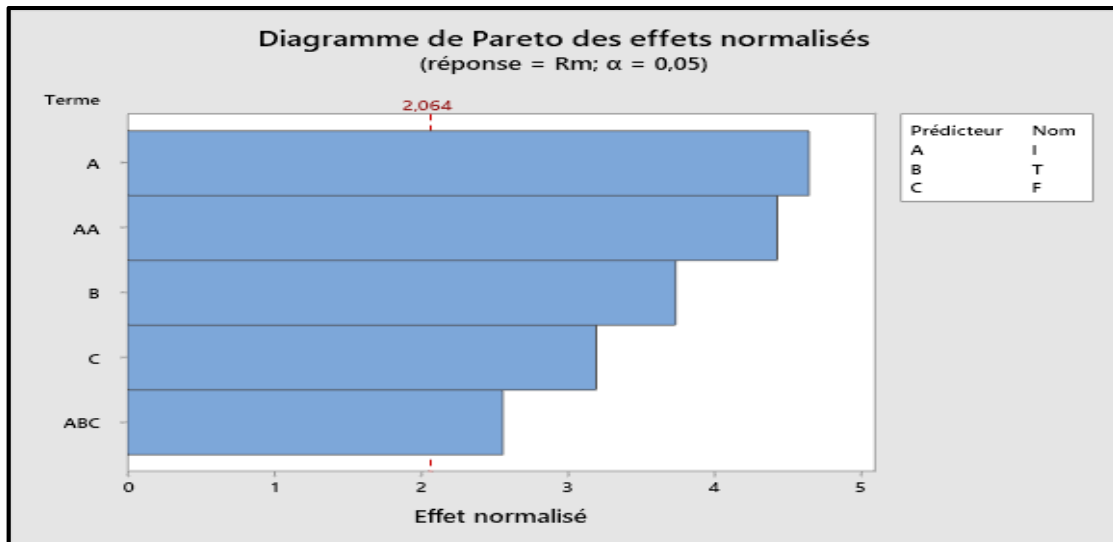


Figure III. 66: Histogramme des résidus (modèle 3 – résistance maximale Rm)



**Figure III. 67:** Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 3 – résistance maximale Rm)

**III.7.4. Modèle 4 – Ajusté avec interaction triple significative :**

Le modèle 4, défini par l'équation suivante, inclut les effets linéaires des trois paramètres de soudage (I, T, F) ainsi qu'une interaction triple (I × T × F), afin d'évaluer leur influence combinée sur la résistance maximale (Rm)

$$Rm = 565 + 6,07 I - 16,41 T - 22,04 F + 0,1237 I \times T \times F \quad (III.18)$$

L'analyse de variance présentée dans le tableau III.18 montre que le modèle est globalement très significatif, avec une valeur F' de 69,76 et une p-valeur extrêmement faible ( $\rho = 0,000$ ). Cela indique que le modèle explique de manière satisfaisante les résultats obtenus. L'analyse des effets individuels révèle que l'intensité (I) n'a pas d'impact significatif sur la réponse ( $\rho = 0,250$ ), contrairement au temps (T) et à la force (F), dont les effets sont clairement établis avec des  $\rho$ -valeurs respectives de 0,009 et 0,023. L'interaction triple (I × T × F) présente une p-valeur de 0,064, légèrement supérieure au seuil de 5 %, suggérant un effet modéré qui pourrait néanmoins influencer la réponse. L'évaluation de la qualité de l'ajustement du modèle, présentée à travers les figures III.68 à III.71, confirme que les hypothèses statistiques sont globalement respectées. Les figures montrées illustrent que les erreurs suivent approximativement une distribution normale, sont bien réparties sans tendance apparente, et présentent une variance stable autour de zéro. De plus, la figure montrée correspondant à l'histogramme des résidus présente une forme en cloche centrée, ce qui renforce l'hypothèse de normalité. Enfin, le diagramme de Pareto, présenté dans la figure montrée (figure III.72),

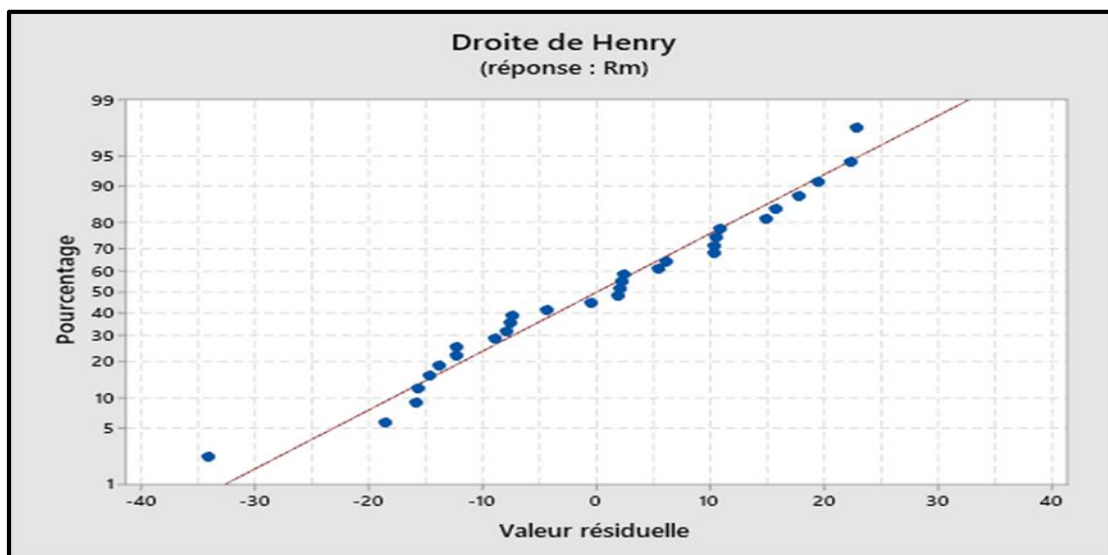
montre que le temps (T) et la force (F) sont les facteurs les plus influents sur la résistance maximale, tandis que l'intensité (I) apparaît comme ayant un effet très limité.

En conclusion, ce modèle présente le temps et la force comme les principaux leviers d'amélioration de la résistance maximale, tandis que l'intensité du courant semble jouer un rôle secondaire dans cette configuration expérimentale.

**Tableau III. 18:** Résultats d'analyse de variance- modèle 4 résistance maximale (Rm)

Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F'	Valeur de $\rho$
Régression	4	63921,3	15980,3	69,76	0,000
I	1	317,5	317,5	1,39	0,250
T	1	1832,9	1832,9	8,00	0,009
F	1	1340,3	1340,3	5,85	0,023
I*T*F	1	859,9	859,9	3,75	0,064
Erreur	25	5727,0	229,1		
Total	29	69648,3			

**R<sup>2</sup>=91,78%**  
**R<sup>2</sup> (ajusté)= 90,46%**  
**R<sup>2</sup> (prédit)= 87,55%**



**Figure III. 68:** Diagramme de probabilité normale des résidus (modèle 4 – résistance maximale Rm)

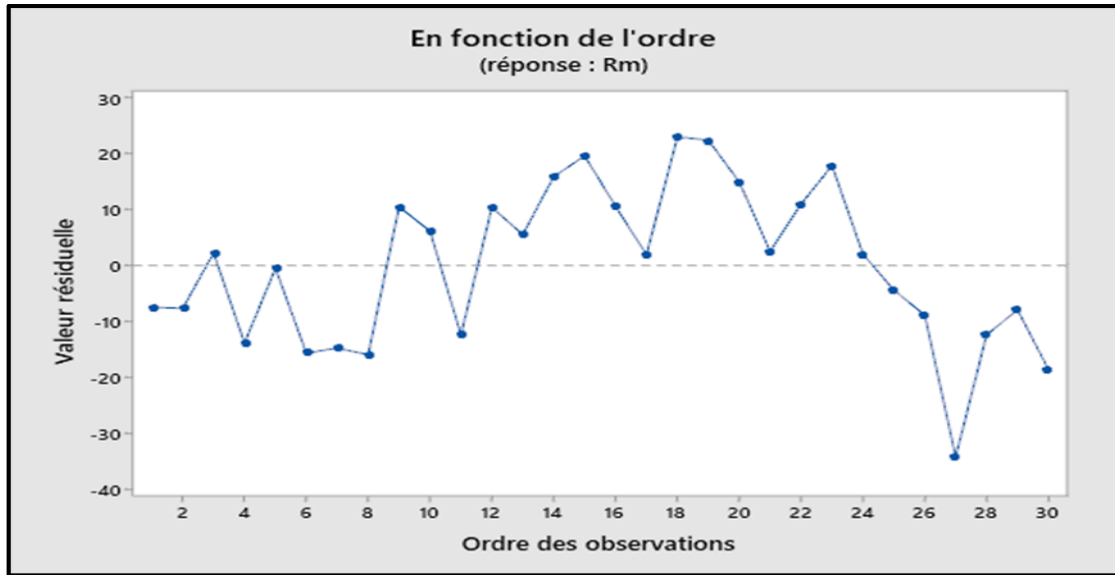


Figure III. 69: Diagramme des résidus par rapport à l'ordre d'observation (modèle 4 – résistance maximale Rm)

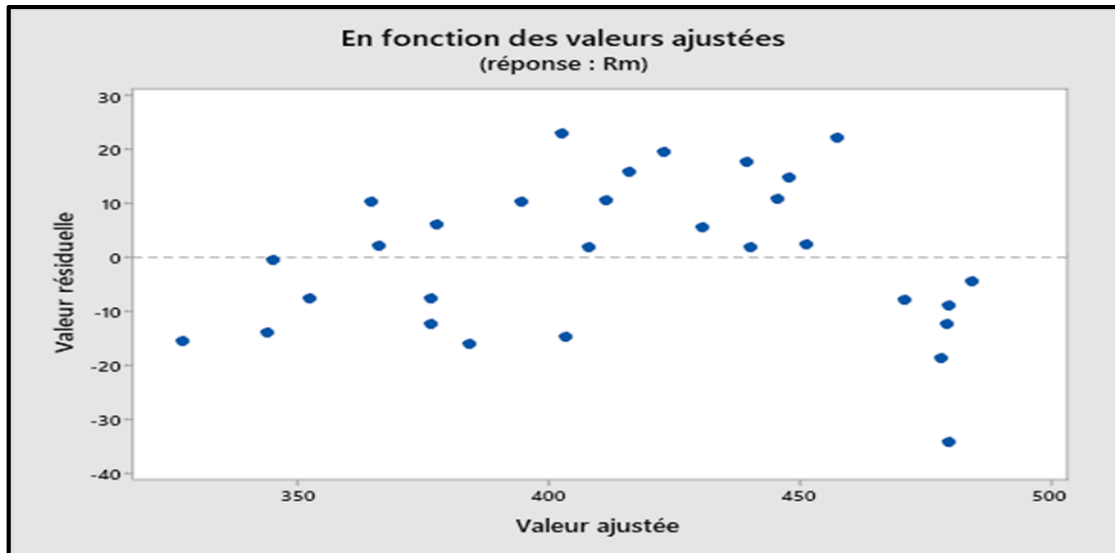


Figure III. 70: Graphique des résidus par rapport aux ajustements (modèle 4 – résistance maximale Rm)

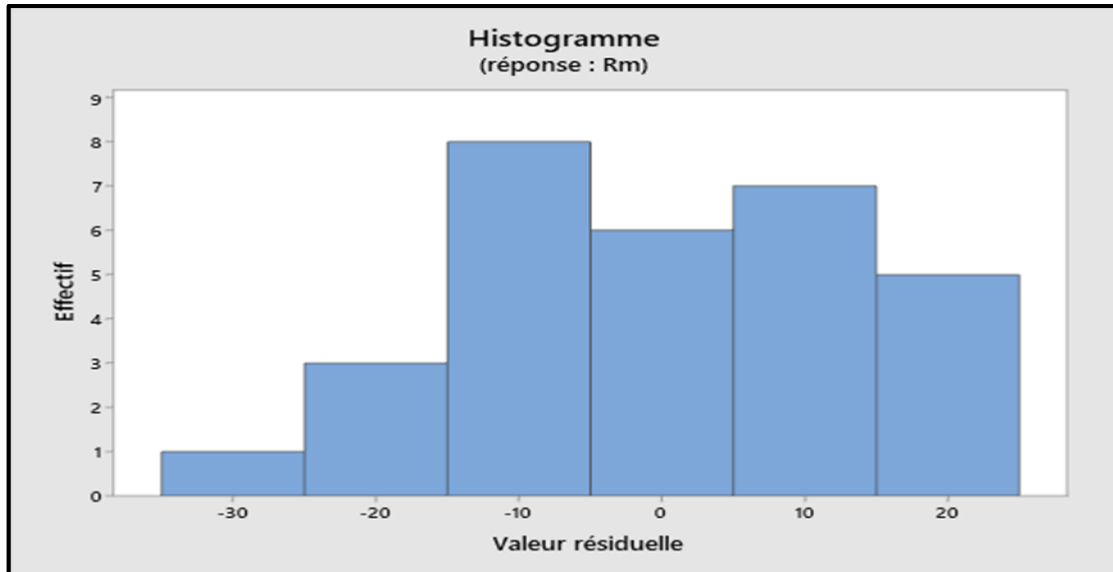


Figure III. 71: Histogramme des résidus (modèle 4 – résistance maximale Rm)

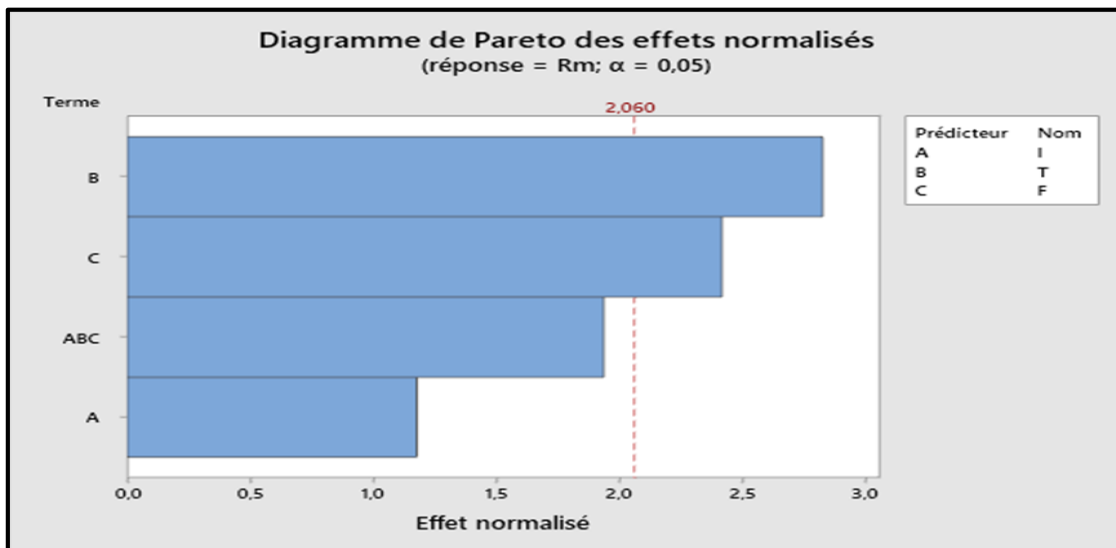


Figure III. 72: Diagramme de Pareto des effets normalisés (modèle 4 – résistance maximale Rm)

### Référence chapitre III :

- [1] Jacques Goupy (2011). Plans d'expériences : Manuel d'utilisation du logiciel Minitab Version 16. <http://www.plansdexpériences.com>.
- [2] Kadir, G. (2021). Factorial experimental design for second law analysis of panel radiators as a function of radiator dimension. Journal of Building Engineering, 43, 1-12.

## **Conclusion Générale**

À travers cette étude, nous avons démontré que l'analyse de régression constitue un outil puissant et fiable pour l'optimisation des procédés de soudage par points. L'approche adoptée, mêlant étude théorique, état de l'art technique et modélisation expérimentale, a permis de mieux comprendre les relations complexes entre les paramètres de soudage (intensité, temps, force) et les réponses mécaniques obtenues.

Les résultats expérimentaux ont clairement mis en évidence que **l'intensité du courant** est le paramètre le plus influent sur les trois caractéristiques mécaniques étudiées : le **diamètre du point de soudure**, la **profondeur de pénétration**, et la **résistance maximale en traction**. Des effets d'interaction et des non-linéarités, notamment les termes quadratiques et les interactions triples, ont également montré une contribution significative dans l'explication des variations des réponses. Grâce à la validation statistique des modèles (valeurs élevées de  $R^2$ , tests ANOVA, diagrammes de résidus), les modèles obtenus offrent une bonne capacité prédictive, utile pour le réglage optimal du procédé.

Ce travail ouvre la voie à une automatisation plus fine des processus de soudage par points, en intégrant des modèles prédictifs dans les systèmes de pilotage. Des perspectives d'amélioration incluent l'élargissement de l'étude à d'autres matériaux, la prise en compte de paramètres thermiques ou géométriques supplémentaires, ainsi que l'utilisation de techniques avancées d'intelligence artificielle pour des prédictions encore plus robustes.