

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : construction mécanique

Par :

MAMERI Yamina

KHENOUCHE Wiam

Thème

Modélisation et optimisation des paramètres du procédé de soudage

Par résistance par point

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

M. BENSALD Nasreddine

Président

M. SAHALI Mohand Akli

Rapporteur

M. HARROUCHE Fatah

Examineur

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre encadreur, monsieur SAHALI Mohand Akli. Nous le remercions de nous avoir encadrées, orientées, aidées et conseillées.

Nous remercions également les jurys ; messieurs Bensaid et Harrouche qui nous en fait honneur de juger notre travail.

Nous ne pouvons pas oublié de remercier tous les fonctionnaires du département génie mécanique et du hall de technologie.

Ces remerciements ne seraient pas complets si on n'a pas pensé à les destiner, avec notre profonde reconnaissance, à nos parents qui nous ont offert un environnement favorable pour mener à terme notre travail.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de ressasser leurs prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

Que Dieu les garde et les protège.

A mes frères, Mourad et Rayan,

Pour leur amour et leur soutien indéfectible.

A mon fiancé smail,

Qui m'a soutenue et aidée pour finaliser ce travail.

A mes chères amies, Sarah, Houda, Mouna, Fairouz, Mélissa, feryal, Lili,

Pour votre aide et votre soutien dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

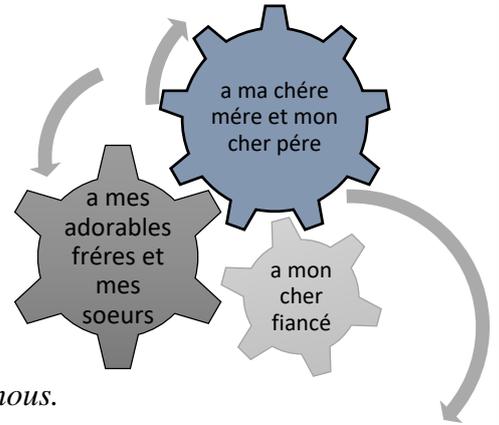
Yamina mameri



Dédicace2

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

*A **ma très chère mère**, honorable, aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour, que dieu la protège pour nous.*



*A **mon père** : pour son sacrifice et son soutien, je lui éternellement reconnaissant.*

*A mes **adorables frères** et **mes sœurs** : ABDU, LARABI, WIDAD, DOUNIA, NAJAT, RAWYA pour leurs disponibilité, leurs soutien moral et leurs encouragements incessant que dieu les protègent leurs donne une vie pleine de réussite et bonheur.*

*A **mon cher fiancé Imad** : qui m'a aidé et supports dans les moments difficiles, je lui souhaite tout le meilleur, bonheur et réussite dans sa vie.*

*A **tous mes amis** : SOINA, MAHAN, AMEL, WISSAM, SILYA qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

A tous ceux que J'aime



Sommaire

Remerciements

Dédicace 1

Dédicace 2

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

Introduction générale.....1

Chapitre I : étude bibliographique

Introduction 4

I.1. Le soudage par résistance 4

I.2. Procède de soudage par résistance 5

I.3 Le soudage par points..... 6

I.3.1. La définition..... 6

I.3.2. Principe du soudage par points 7

I.4. Paramètres de soudage..... 8

I.4.1. Latitude de soudage 9

I.4.2. Durée de vie des électrodes..... 9

I.5. Domaine de Soudabilité..... 10

I.6. Aspect métallurgie de soudage 122

I.7. Aspect thermique du soudage..... 13

I.8. Phénomènes physiques et mécaniques du soudage par résistance par points 13

I.8.1. Phénomènes physiques 13

I.8.2. Phénomènes mécaniques..... 14

Avantages du soudage par points	14
Inconvénients du soudage par points	14
I.9. Domaines d'application du soudage par points	15
I.10. Matériaux concernés	17
I.11. Poste électrode.....	17
I.12. Les électrodes de soudage par point.....	18
I.13. La dégradation des électrodes	19
I.14. Conclusion	20
Chapitre II: Etudes expérimentale	
II.1. Introduction	21
II.2. Matériaux d'électrodes et des pièces soudées	21
II.3. Moyens mis en œuvre.....	22
II.3.1. Moyens d'usinage :	22
On a utilisé un Tour parallèle de modèle SN 40 C comme la montre la (Figure II.1), pour l'usinage des électrodes.....	22
II.3.2. Moyen de découpage :	23
II.3.3. Moyen d'essai :	24
II.4. Les étapes des opérations de soudage par résistance par points	25
II.4.1. Étape 1: préparation des électrodes.....	25
II.4.2. Étape 2 : découpage des tôles	26
II.4.3. Étape 3 : Soudage des plaques en acier noir	28
II.4.4. Étape 4 : Essais de résistance.....	32
II.5. Conclusion.....	34
Chapitre III: modélisation et optimisation des paramètres du soudage par point	

III.1. Introduction	36
III.2. Démarche méthodologique d'un plan d'expérience.....	36
III.3. Régression linéaire multiple	37
III.3.1. Modélisation.....	37
III.3.2. Les hypothèses de la régression multiple	39
III.3.3. Différents types de modèles de régression	40
III.4. Analyse de la variance (ANOVA).....	40
III.5. Analyse de la variance du modèle	41
III.5.1. Le modèle observé.....	41
III.5.2. Les nombres de degrés de liberté	41
III.5.3. L'équation de l'analyse de la variance	42
III.6. Analyse de la variance résiduelle	42
III.7. Test de fisher-snedecor.....	42
III.8. La méthodologie de surface de réponse (MSR)	43
III.9. Optimisation.....	43
III.9.1. Optimisation multi-objectif	44
III.9.2. Surface de réponse.....	45
III.10. Résultats et discussions	45
III.11. La régression linéaire et l'analyse de la variance (anova)	46
III.11.1. La résistance à la rupture.....	46
III.11.2. Essais de validation	48
III.12. Optimisation des paramètres de soudage.....	52
Conclusion.....	55

Liste des figures

Figure I.1 : soudage par résistance.	5
Figure I .2: soudage par point.	6
Figure I .3: soudage a la mollette.	6
Figure I .4 : soudage par bossage.	6
Figure I .5: soudage en bout.	6
Figure I .6 : Représentation schématique des différentes phases d'une opération de soudage.	8
Figure I .7 : Diagrammes de soudabilité.	10
Figure I .8 : a) Variation qualitative du diamètre de bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à $4t^{1/2}$ (t = épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage exprimé en mm).	11
Figure I .9: présentation macro graphique d'un joint soudé.	12
Figure I .10 : domaines d'utilisation de soudage par points.	17
Figure I .11 : Matériels de soudage par résistance (poste, électrode).	18
Figure I .12 : exemple d'une dégradation des électrodes.	19
Figure I .13 : diagramme d'Ishikawa avec paramètres susceptibles d'avoir une influence sur la durée de vie des électrodes.	20
Figure II. 1 : Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie.	22
Figure II.2: cisaille guillotine manuelle KHS e 1000.	23
Figure II.3: une tronçonneuse abrasive manuelle BULER ABRASIMET.	23
Figure II.4 : une soudeuse par point portable.	24
Figure II.5: machine automatique d'essai de traction modèle WDW-50 capacité 50KN.	24
Figure II .6 : des électrodes en bronze.	25

Figure II.7 : usinage Des électrodes en bronze.	26
Figure II .8 : les dimensions des plaques soudées.	26
Figure II .9 : soudage des plaques avec électrode en bronze.	27
Figure II.10 : usinage des électrodes en cuivre.	28
Figure II .11 : Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.	29
Figure II .12 : soudage des plaques avec les électrodes en cuivre.	30
Figure II .13 : les plaques numérotées et soudé.	31
Figure II .14: Essai de traction sur une machine à capacité de 50 kN.	33
Figure II .15 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction.	33
Figure III .1: Identification des solutions optimales au sens de Pareto optimal.	45
Figure III .2: Valeurs observées et valeurs prédites par le modèle de régression de Rr.	48
Figure III .3: Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour une épaisseur des plaque E= -1 (1 mm)	50
Figure III .4: Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour un épaisseur des plaques E= 0 (1.5 mm).	51
Figure III .5 : Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour une Épaisseur des plaques E= 1 (2 mm).	52
Figure III .6 : graphe d'optimisation par algorithme génétique	54

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les avantages et inconvénients du soudage par points.	14
Tableau II.1 : caractéristiques mécaniques de la machine.	22
Tableau II.2 : Présentation des facteurs avec leurs valeurs réelles et codées.	29
Tableau II.3 : Plan d'expériences de Box-Behnken en variables codées.	30
Tableau II.4 : défauts de soudage au point de soudure.	32
Tableau III.1 : Plan d'expériences.	46
Tableau III. 2 : régression linéaire (résistance de la rupture).	47
Tableau III.3 : le plan des essais de validation.	49
Tableau III4 : Paramètres de l'algorithme génétique	53

Liste des notations

Q : quantité de chaleur produite (joule).

R : résistance électrique rencontrée par le courant.

I : intensité du courant.

T : durée du phénomène.

t : variable temps.

A, B : a phase d'accostage.

C : la phase de soudage.

D : la phase de forgeage.

MB : Le métal de base.

ZAT : La zone affectée thermiquement.

ZL : La zone de liaison.

ZF : La zone fondue.

E : épaisseur de plaque (mm).

D : Diamètre d'électrode (mm).

T : Nombre de Cycle.

PE : Un plan d'expérience.

Y: Fonction réponse.

k : facteurs X_1, X_2, \dots, X_k .

N : le nombre d'expériences ;

K : le nombre de facteurs ;

Y : le vecteur colonne des réponses expérimentales.

X: la matrice $N \times P$, appelée matrice du modèle ou matrice des effets.

\mathcal{P} : le nombre de coefficients du modèle postulé.

β : le vecteur colonne des paramètres à estimer

e : Le vecteur colonne des erreurs expérimentales aléatoires.

ε : le vecteur des résidus.

σ : l'écart type.

I : la matrice identité.

β_0 : Les effets moyens des facteurs x_i .

β_{ij} : Les interactions d'ordre un entre les effets des facteurs x_i et x_j .

ddl : nombre de degrés de liberté.

p : moyennes $\mathcal{Y}^{i\dots}$ relatives aux différentes modalités du premier facteur.

q : moyenne \mathcal{Y}^j relatives aux différentes modalités du deuxième facteur.

N_{ni} : le nombre de niveaux.

\mathcal{Y} : Vecteur des réponses expérimentales, mesurées.

$\bar{\mathcal{Y}}$: Moyenne arithmétique des réponse expérimentales, mesurées.

SCE_t : la somme des carrés des écarts totale.

SCE_a : la somme des carrés des écarts factoriels a.

SCE_b : la somme des carrés des écarts factoriels b.

SCE_{ab} : la somme des carrés des écarts l'interaction a×b.

SCE_r : la somme des carrés des écarts résiduels.

ANOVA : Analyse de la variance.

MSR : La méthodologie de surface de réponse.

PMO : problème multi-objectif.

PO : des solutions Pareto optimales.

Rr : Résistance à la rupture en cisaillement (mpa).

GA : L'algorithme génétique.

Introduction

Générale

Le soudage par point, également connu sous le nom de soudage par résistance, est une technique de soudage qui utilise la chaleur générée par la résistance électrique au passage d'un courant élevé à travers les pièces à souder. Cette chaleur provoque la fusion des matériaux au point de contact, créant ainsi une soudure solide. Le soudage par point a été développé au début du XXe siècle, avec Elihu Thomson, un inventeur et ingénieur américain, qui a breveté la première méthode de soudage par résistance en 1885. Cette technique a rapidement trouvé des applications dans l'industrie automobile durant les années 1920-1930 pour l'assemblage de carrosseries en acier, grâce à sa capacité à réaliser des soudures rapides et solides, idéales pour la production de masse. Son utilisation a considérablement augmenté pendant la Seconde Guerre mondiale en raison de la forte demande pour des structures métalliques robustes et la production rapide d'équipements militaires. Aujourd'hui, le soudage par point est couramment utilisé dans diverses industries, notamment l'automobile, l'aéronautique, et l'électronique, souvent intégré dans des systèmes automatisés pour une production efficace et précise. Parmi ses avantages, on compte sa rapidité d'exécution, sa capacité à être facilement automatisé, sa compatibilité avec différents matériaux et sa faible déformation thermique. Cependant, il présente aussi des inconvénients tels que des limitations matérielles, un coût d'équipement élevé, une accessibilité limitée des points de soudure et une qualité de soudure variable selon les conditions de soudage.

La mise en œuvre du soudage par points présente des incertitudes liées à la maîtrise des paramètres tels que le diamètre des électrodes, l'épaisseur des plaques, et le nombre de cycles de soudage. Des travaux de modélisation ont été effectués pour optimiser la résistance des joints de soudure, malgré les défis de couplage thermomécanique, du contact entre les pièces, et du changement de phase du matériau. Ce processus industriel peut conduire à des défauts comme des porosités internes dues à des gaz, des inclusions métalliques, des fissures thermiques et mécaniques, ainsi qu'un mauvais alignement des électrodes. Pour améliorer la qualité et la durabilité des soudures par points, il est crucial de contrôler les paramètres de soudage, choisir des matériaux de haute qualité, et appliquer des procédures d'inspection approfondies.

L'objectif de cette étude est l'identification et la maîtrise des paramètres de soudage influents sur la résistance mécanique du joint de soudure. Ensuite, la modélisation et l'optimisation de ces paramètres.

Dans ce travail nous souhaitons étudier les effets des paramètres de soudage par résistance par point à savoir : le diamètre des électrodes, le nombre de cycle de soudage, les épaisseurs

Des plaques sur les performances des tôles minces .dans le but de déterminer les conditions opératoires conduisant à une qualité de résistance à la rupture de joint de soudure. L'étude débutera par une recherche bibliographique qui nous permettra de situer le travail et de prendre en main le sujet .pour initier cette étude nous mènerons une campagne d'essais sur poste à souder selon un plan d'expériences bien adapté qu'on a choisie (plan de box-behenken),A partir de ces essais, nous analysons les données on mettant en évidence les effets des paramétrés de soudage par point choisie (le Diamètre des électrodes , le nombré de cycle de soudage, l'épaisseur des plaques) sur les déférentes réponses enregistrées notamment la résistance à la rupture de joint de soudure. Pour cela nous effectuons l'analyse de la variance et régression linéaire, en utilisant le logiciel STATISTICA. Enfin à l'aide de programme MATLAB nous chercher à maximisé la résistance à la rupture de joint de soudure.

Ce travail se compose de trois chapitres, le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique générale de procédé de soudage par point. Puis, le second chapitre expose une étude expérimentale .le dernier chapitre expose un état de l'art des méthodes d'optimisation et de modélisation expérimentales à savoir : régression linéaire multiple, optimisation mono et multi-objectif, et présente une étude de l'influence des paramètres de soudage sur la résistance mécanique à la rupture des pièces soudées.

Chapitre I

ÉTUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Le soudage par résistance par points est une technique d'assemblage incontournable dans les industries modernes. Elle est employée surtout pour créer des joints à recouvrement de différents profils de tôles minces. Cette méthode est basée sur la fusion et l'application d'un effort mécanique dit de forgeage.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les principes de base du soudage par point, analyser les paramètres clés et leurs effets, ainsi que les aspects métallurgiques et les phénomènes mis en jeu. Nous verrons également les avantages et inconvénients de cette technique, ainsi que ses principaux domaines d'application, et la dégradation des électrodes avec paramétrés susceptibles d'avoir une influence sur la durée de vie des électrodes au travers un diagramme causes-effets (ISHIKAWA).

I.1. Le soudage par résistance

Le soudage par résistance est une technique qui permet de joindre de manière permanente deux tôles. Pour cela, une pression mécanique doit être appliquée par les électrodes afin d'assurer un bon contact physique entre les deux éléments à souder. Puis un courant électrique de grande intensité (délivré par transformateur de courant), traverse les deux éléments, créant ainsi un flux de chaleur par effet Joule, les fusionnant au point de contact. Cette méthode ne nécessite pas l'ajout de métal, ce qui en fait un soudage autogène. Les matériaux pouvant être soudés incluent l'acier, l'acier galvanisé ou électro-zingué, l'aluminium, ainsi que des métaux comme le cuivre (en faible épaisseur), le laiton, le zinc, le nickel, l'or, l'argent et le plomb. Cette technique est largement utilisée dans des secteurs tels que l'industrie automobile et aéronautique en raison de sa rapidité d'exécution (largement automatisée), de sa qualité mécanique et de son coût relativement bas.

La quantité de chaleur produite Q [joule] s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T RI^2 dt \dots\dots\dots (1.1)$$

Avec R : résistance électrique rencontrée par le courant,

I : intensité du courant,

T : durée du phénomène,

t : variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les diverses pertes thermiques, la chaleur produite conduit à la fusion des matériaux métalliques usuels. Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact. Les différentes formes du soudage par résistance incluent (à quelques variantes près) une phase de forgeage dont l'importance métallurgique est fondamentale. [1]



Figure I.1 : Soudage par résistance. [2]

I.2. Procède de soudage par résistance

Il existe de nombreux procédés de soudage par résistance tels que:

- le soudage par points : donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue (figure 2) ;
- le soudage à la molette : donnant lieu à une soudure par recouvrement continue et étanche (figure 3) ;
- le soudage par bossages : ou protubérances (figure 4) ;
- le soudage en bout (figure 5) : qui relève également du soudage par forgeage à chaud, dans lequel la chaleur est obtenue par effet Joule (par différence avec d'autres moyens de chauffage, tels l'induction, la friction, l'arc tournant, etc.). [1]

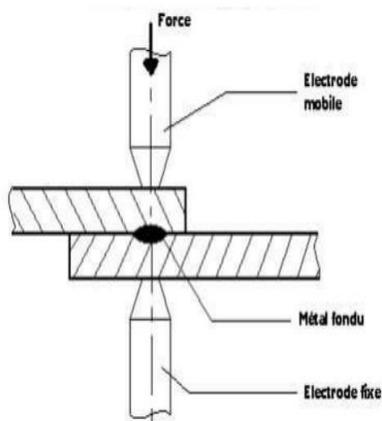


Figure I. 2 :soudage par points. [3].

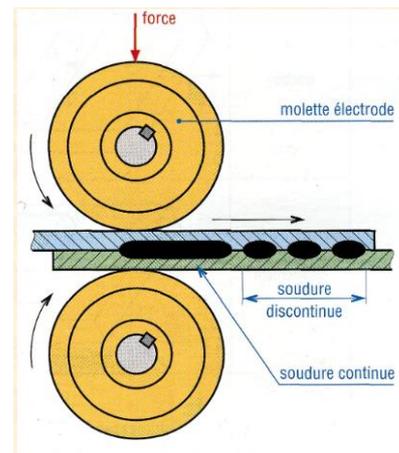


Figure I.3 :soudage à la molette.[4]

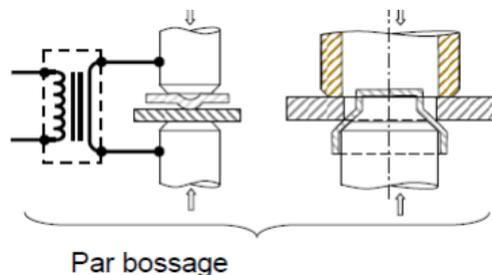


Figure I.4 : soudage par bossage. [5]

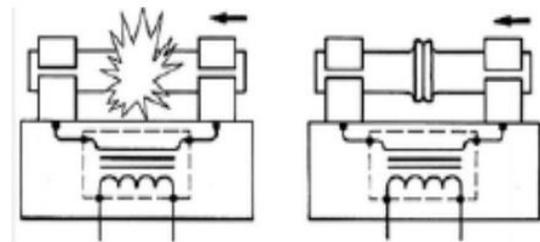


Figure I. 5 : soudage en bout. [5]

I.3 Le soudage par points

I.3.1. La définition

En 1877, Elihu Thomson a introduit le concept du soudage par résistance par points, une méthode encore très répandue dans l'industrie automobile pour l'assemblage de fines feuilles d'acier. Cette technique implique un cycle de soudage bref, habituellement entre 1 et 2 secondes, avec une brève période de passage de courant de quelques dixièmes de seconde. Ce cycle se répète rapidement sur divers points d'assemblage grâce à l'utilisation de robots de soudage. Les électrodes sont essentielles dans ce processus, étant refroidies par une circulation d'eau interne pour éviter la surchauffe. Elles doivent remplir plusieurs fonctions : transmettre l'effort, conduire le courant vers les feuilles d'acier et aider à dissiper l'excès de chaleur de la zone de soudure. En conséquence, le matériau des électrodes doit présenter une haute conductivité électrique et thermique, ainsi qu'une résistance suffisante à la déformation à chaud. Les

électrodes de soudage sont généralement composées d'alliages de cuivre à durcissement structural, comme le Cu-Cr, le Cu-Zr ou le Cu-Cr-Zr. [6]

I.3.2. Principe du soudage par points

Le principe du soudage par points schématisé sur la Fig.6 illustre les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui va créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles. [7]

Un cycle de soudage schématisé sur la Fig.6 se décompose en trois phases principales :

1. la phase d'accostage (A, B) :

Le rôle de cette phase est principalement mécanique. Elle consiste à assurer le contact parfait entre les surfaces à assembler et atteindre le niveau d'effort nécessaire,

2. la phase de soudage (C) :

Cette phase constitue la phase la plus importante. En effet, un courant électrique (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'Ampère) est établi dans le circuit et passe par les tôles à assembler, d'où la naissance d'un effet Joule au niveau de la surface de contact,

3. la phase de forgeage (D) :

Au cours de cette phase l'effort de pression des électrodes sur les tôles est maintenu. Cependant, le courant électrique n'est plus appliqué. Les électrodes assurent également le refroidissement dès que l'effet Joule est interrompu. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. Le maintien de l'effort lors du refroidissement assure une bonne solidification et la formation d'un noyau homogène, et par conséquent une bonne tenue mécanique de l'assemblage. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. [7]

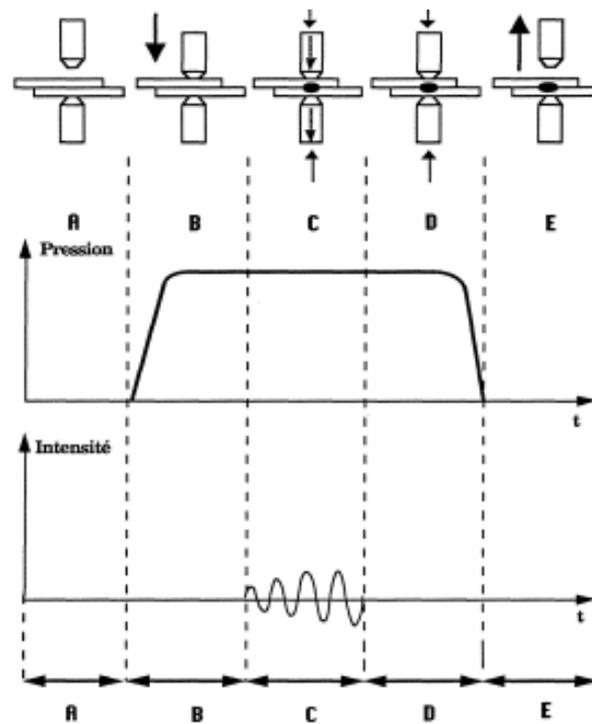


Figure I.6 : Représentation schématique des différentes phases d'une opération de soudage.

[7]

I.4. Paramètres de soudage

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

Dans l'ordre chronologique, l'effort de soudage est la première variable entrant en jeu puisqu'elle intervient dès la phase d'accostage. La valeur à appliquer (de l'ordre de quelques centaines de daN pour des produits d'épaisseur inférieure à 1 mm) dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, la courbe de mise en effort n'est pas linéaire, mais dépend des caractéristiques de la machine à souder.

Le choix du courant de soudage revêt une grande importance car il influe de manière exponentielle sur l'énergie dissipée par effet Joule. L'intensité à fournir, généralement située entre 5 et 20 kA, est conditionnée par les caractéristiques mécaniques des matériaux, l'épaisseur des tôles à souder, ainsi que la présence de revêtements. Habituellement, un courant alternatif monophasé à 50 Hz est employé, permettant une régulation précise de sa valeur moyenne sur

la soudure grâce à un dispositif électronique spécialisé. Bien que non exploré dans cette étude, d'autres types de courants, tels que le courant continu issu d'un redressement et d'un filtrage à partir d'un générateur 1000 H, restent également envisageables.

Le temps de soudage joue un rôle important dans la quantité d'énergie électrique utilisée. Typiquement de l'ordre de quelques dixièmes de seconde, ce temps est ajusté en fonction des caractéristiques des matériaux à souder. Lorsqu'un temps de soudage prolongé est nécessaire, il est fractionné en "pulsations" ou "temps chauds", alternant avec des périodes de "temps froids".

Le temps de forgeage nécessaire à la solidification de la soudure est généralement du même ordre de grandeur que le temps de soudage.

La réalisation d'un point soudé nécessitant environ 1 à 2 secondes, le procédé est adapté aux cadences de production élevées de l'industrie automobile moderne [5]

I.4.1. Latitude de soudage

Celle-ci est définie par des diagrammes constitués de courbes enveloppes, appelées limites inférieures et supérieures. Dans notre étude, ces deux limites sont définies de la façon suivante:

* limite inférieure:

Intensité minimale conduisant à la rupture par déboutonnage d'une éprouvette soumise à un effort de traction cisaillement. Le point qui se forme alors entre les deux tôles en contact est dit "collé".

* limite supérieure:

Intensité maximale proche de celle conduisant à une expulsion du métal fondu. Le point ainsi formé est dit "craché". Le réglage des paramètres de soudage est d'autant plus précis que la zone de soudabilité est étroite. Il est à noter que le domaine de soudabilité est beaucoup plus faible pour les tôles revêtues ou galvanisées que pour les tôles nues. [7]

I.4.2. Durée de vie des électrodes

La durée de vie est le nombre de points, satisfaisant à un critère bien défini, qu'est capable de réaliser, dans des conditions opératoires données (type d'électrode, intensité stable ou variable, cadence de soudage), un jeu d'électrodes. Les conditions d'essais ne faisant pas encore l'objet

d'une norme, chaque laboratoire utilise ses propres spécifications (définition des limites, type d'électrode, essais mécaniques). Il vaut donc mieux éviter de comparer des latitudes entre elles sans avoir préalablement contrôlé leurs conditions de tracé. [7]

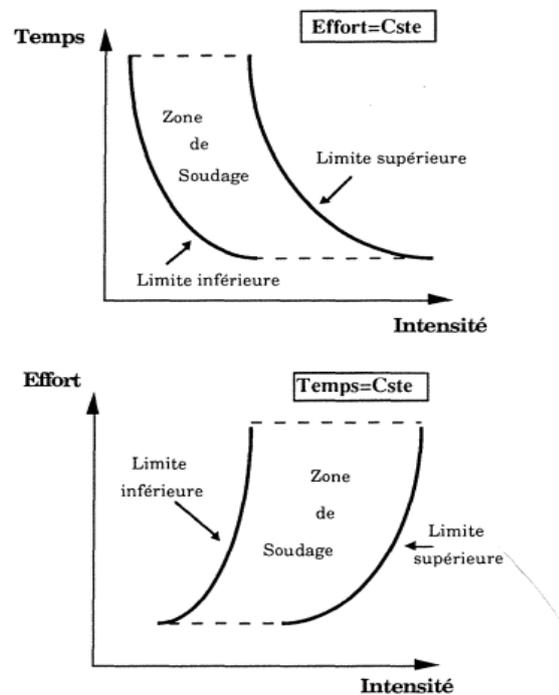


Figure I.7 : Diagrammes de soudabilité. [7]

I.5. Domaine de Soudabilité

Il désigne une plage d'intensités de courant de soudage efficaces qui permettent d'obtenir un point de soudure répondant aux critères de résistance mécanique préalablement définis.

Dans la pratique, on parle de diamètre du bouton déboutonné et donc la tenue mécanique varie avec l'intensité efficace. Le critère prédéfini correspondant à la norme est la taille de diamètre du noyau acceptable avec une intensité efficace minimale.

Par « domaine de soudabilité », on entend ainsi l'intervalle de $[I_{min}, I_{max}]$, où I_{min} est l'intensité minimale donnant un diamètre acceptable et I_{max} est l'intensité maximale ne provoquant pas d'expulsion. L'expulsion s'interprète par une chute de signal d'effort en cours de soudage.

On parle souvent de cette limite basse/haute en représentant le domaine de soudabilité. Pour déterminer le domaine de soudabilité, on applique souvent la condition prédéfinie, qui est indiquée par la norme, pour fixer trois paramètres suivants : le temps de soudage, le temps de maintien, et la magnitude de l'effort de soudage.

En pratique, on souhaite d'obtenir la taille de diamètre maximale avant l'expulsion pour une meilleure tenue mécanique à la rupture. Passé le seuil d'expulsion, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille, soit une des faces extérieure de la tôle. Sous l'effet de l'effort exercé par les électrodes, on assiste à une éjection ou une expulsion de métal fondu.

Compte tenu des types d'électrodes, l'intensité de soudage est variée en cas de différent type d'électrode utilisé. Car l'électrode joue un rôle sur la taille du contact pendant le soudage. Il est importants autant que l'intensité, le temps de soudage, le temps de maintien. [8]

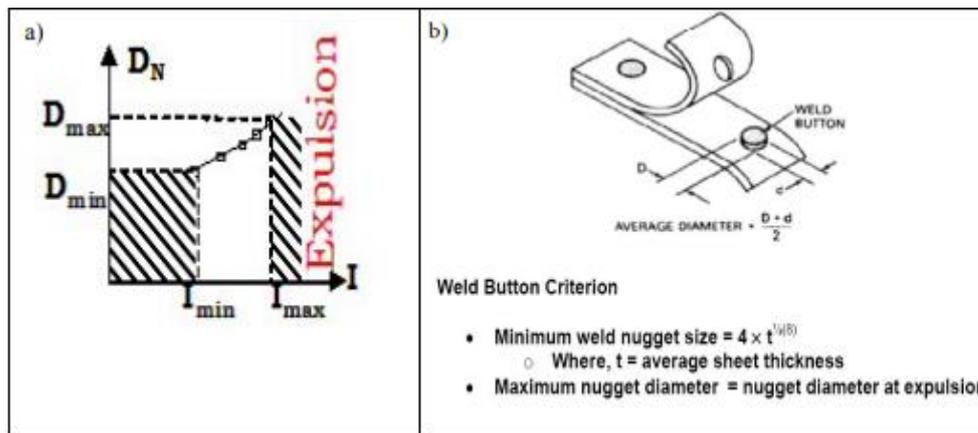


Figure I. 8 : a) Variation qualitative du diamètre de bouton en fonction de l'intensité efficace, b) Critère de diamètre minimal acceptable égale à $4\sqrt{t}$ où t [mm] est l'épaisseur moyenne des tôles d'un assemblage. [8]

Généralement, on peut constater que plus le domaine de soudabilité est situé vers les hautes intensités, plus l'énergie à fournir pour réaliser un bon diamètre du noyau est élevée, ainsi que le domaine de soudabilité est étroit, plus le réglage de la machine de soudage est délicat. En effet, nos études se concentrent sur la taille maximale du noyau et l'intensité trouvée en haut du domaine de soudabilité et la validation de la taille et de la forme de la soudure

I.6. Aspect métallurgie de soudage

La métallurgie du soudage renseigne sur les caractéristiques d'un acier, qui sont fonction de sa structure, de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition de l'acier et du traitement thermique qu'il subit.

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage. On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé :

- Le métal de base (MB)
- La zone affectée thermiquement (ZAT)
- La zone de liaison (ZL)
- La zone fondue (ZF)

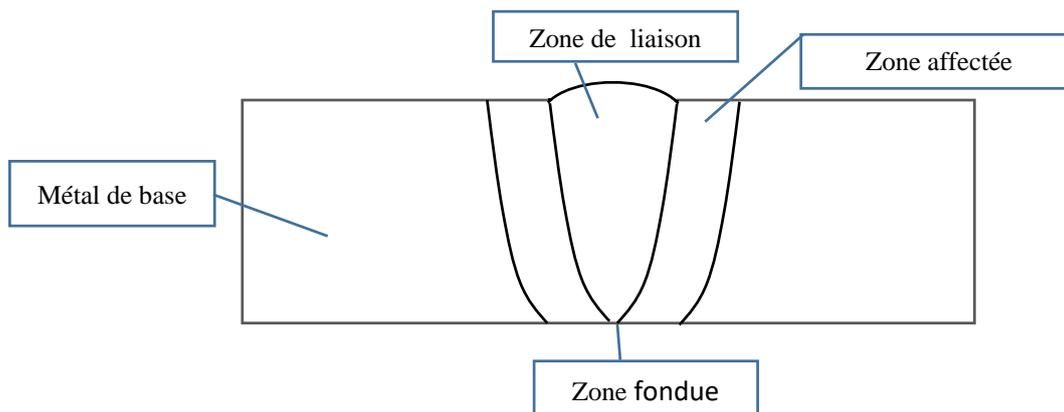


Figure I.9 : Présentation macro graphique d'un joint soudé.[9]

MB : Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.

Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage.

Zone de liaison (ZL)

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.

Zone fondue (ZF)

Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification [10]

I.7. Aspect thermique du soudage

Il est caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent en mouvement, parfois immobile. Le soudage comporte, des échauffements rapides, Si l'on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique du soudage, il est nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent. L'effet de l'échauffement rapide est accusé par la brièveté du séjour à la température maximale, une température qui avoisine la température de fusion. Le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en général élevée, en fonction du matériau, du type procédé de soudage, mais aussi du mode opératoire. Pour ces raisons, toute analyse métallurgique des effets de l'opération du soudage doit être précédée et éclairée par une étude thermique approfondie.

I.8. Phénomènes physiques et mécaniques du soudage par résistance par points

Le soudage par résistance par points est un procédé de soudage qui utilise la chaleur générée par le passage d'un courant électrique intense entre deux tôles métalliques pour créer une soudure. La formation de la soudure implique une série de phénomènes physiques et mécaniques complexes qui influencent la qualité et la résistance de la soudure.

I.8.1. Phénomènes physiques

- **Résistance électrique:** La résistance électrique des tôles métalliques et des électrodes joue un rôle crucial dans la génération de chaleur. Plus la résistance est élevée, plus la chaleur générée est importante.

Effet Joule: Le passage du courant électrique dans les tôles métalliques génère de la chaleur par effet Joule. La quantité de chaleur générée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance des tôles.

- **Fusion du métal:** La chaleur générée par effet Joule fait fondre le métal à l'interface des tôles, créant un "noyau" de métal fondu. La taille du noyau dépend de plusieurs facteurs, tels que l'intensité du courant, la durée du passage du courant et la conductivité thermique des tôles.
- **Solidification du métal:** Une fois que le courant est coupé, le métal fondu se solidifie rapidement, créant une soudure. La vitesse de solidification affecte la microstructure de la soudure et, par conséquent, sa résistance et sa ductilité. [1]

I.8.2. Phénomènes mécaniques

- **Force de serrage:** La force de serrage appliquée par les électrodes est essentielle pour maintenir les tôles en contact étroit pendant le soudage. Une force de serrage insuffisante peut entraîner des défauts de soudure, tels que des porosités ou des inclusions.
- **Déformation des tôles:** Le passage du courant électrique et la chaleur générée provoquent une déformation des tôles. Cette déformation peut être permanente ou résiduelle. La gestion de la déformation est importante pour éviter les distorsions et les contraintes résiduelles dans la pièce soudée.
- **Retrait du métal:** Le métal fondu se contracte lors de la solidification, ce qui peut entraîner un retrait des tôles. Ce retrait doit être pris en compte lors de la conception de la pièce soudée afin d'éviter les déformations et les contraintes résiduelles. [1]

Tableau I.1 : les avantages et inconvénients du soudage par points.[11]

Avantages du soudage par points	Inconvénients du soudage par points
<ul style="list-style-type: none"> - Procédé rapide et efficace ; - Procédé propre ; - Procédé polyvalent ; - Procédé automatisable ; - Bonne résistance mécanique ; - Faible zone affectée thermiquement (ZAT) ; - Bonne précision ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur limitée des tôles ; - Accessibilité des soudures ; - Investissement initial élevé ; - Nécessité d'une expertise technique ; - Risque de porosités ; - Déformation des tôles ;

I.9. Domaines d'application du soudage par points

Le soudage par points est une technique de soudage par résistance largement utilisée dans divers secteurs industriels en raison de ses nombreux avantages, tels que sa rapidité, son efficacité, sa propreté, sa polyvalence et sa capacité d'automatisation. Voici quelques exemples concrets de ses domaines d'application :

- **Industrie automobile:**

- Fabrication de carrosseries de véhicules (tôles d'acier, d'aluminium et d'alliages)
- Assemblage de pièces automobiles (portes, capots, etc.)
- Soudage de composants électroniques (circuits imprimés, connecteurs)

- **Électroménager:**

- Fabrication d'appareils électroménagers (réfrigérateurs, lave-linge, cuisinières, etc.)
- Assemblage de tôles et de composants métalliques
- Soudage de fils et de câbles électriques

- **Aéronautique:**

- Fabrication de structures d'avions (ailes, fuselage, etc.)
- Assemblage de pièces en aluminium et alliages légers
- Soudage de composants critiques soumis à des contraintes élevées

- **Construction métallique:**

- Fabrication de charpentes métalliques (ponts, bâtiments, etc.)
- Assemblage de profilés en acier et en aluminium

- Soudage de structures porteuses

- **Industrie électronique:**

Fabrication de circuits imprimés et de composants électroniques

Soudage de fils et de câbles miniatures

Assemblage de boîtiers et de composants électroniques.

- **Autres applications:**

Fabrication de meubles métalliques

Production de matériel de bureau

Industrie agroalimentaire (fabrication de machines et d'équipements)

Fabrication de jouets et d'articles de sport

Réparation et maintenance de machines et d'équipements

Le soudage par points est également utilisé dans des applications plus spécialisées, telles que la soudure de métaux précieux (or, argent, platine) et la soudure de pièces miniatures dans l'industrie médicale et horlogère. [12]



Figure I.10 : Domaines d'utilisation le soudage par points. [12]

I.10. Matériaux concernés

Permet le soudage de différents métaux comme l'acier, l'inox, l'aluminium...

I.11. Poste électrode

Toutes les machines sont faites sur le même principe, on a deux électrodes (une fixe, l'autre mobile) en alliage de cuivre, refroidies par un circuit d'eau. Les machines peuvent être : portatives, fixes.

Le diamètre de contact de l'électrode doit être d'environ deux fois l'épaisseur de la pièce à souder +3mm et sont chanfreinées (angle de 120°). [13]



Figure I.11 : Matériels de soudage par résistance (poste, électrode).

I.12. Les électrodes de soudage par point

Les électrodes sont des éléments essentiels dans ce procédé de soudage. En effet, elles doivent transmettre l'effort appliqué, conduire le courant électrique injecté dans l'assemblage et évacuer la chaleur produite par la formation du noyau. Par conséquent, le matériau constituant les électrodes doit posséder des conductivités électrique et thermique élevées, mais aussi de bonnes propriétés mécaniques à haute température (résistance aux déformations à chaud). Ce sont les alliages de cuivre, tels que les Cu-Cr, Cu-Zr et Cu-Cr-Zr, qui sont les plus souvent utilisés. L'ajout d'éléments d'alliages en petite quantité permet d'améliorer la tenue mécanique à chaud, tout en limitant la variation des caractéristiques électriques et thermiques. Cette partie décrit, dans un premier temps, les différences constatées entre les cinétiques de dégradation des électrodes qui ont soudé des tôles revêtues ou non. Les différents modes de dégradation que peuvent subir ces électrodes, comme le montre la figure (figure .12), suite à l'accumulation des cycles de soudage, seront exposés. Par la suite, les principales techniques mises en œuvre afin d'améliorer la durée de vie des électrodes seront présentées. [14] [15]



Figure I.12 : Exemple d'une dégradation des électrodes. [12]

I.13. La dégradation des électrodes

La détérioration des électrodes de soudage par points est un processus naturel qui impacte toutes les électrodes, limitant ainsi leur longévité. Cette détérioration se caractérise par divers dommages à la surface des électrodes, notamment l'usure due au frottement, l'érosion, l'adhésion, la diffusion et la formation de composés fragiles. Ces altérations sont provoquées par les contraintes thermomécaniques et les réactions chimiques intenses qui se produisent lors du processus de soudage. Les réglages de soudage, le matériau des tôles à souder, le type de revêtement et l'état initial des électrodes jouent tous un rôle dans la vitesse à laquelle se produit cette détérioration. Des électrodes dégradées peuvent compromettre la qualité des soudures, augmenter la résistance électrique, accélérer l'usure des équipements et entraîner des coûts de maintenance plus élevés. Afin de ralentir ce processus de détérioration et d'étendre la durée de vie des électrodes, il est essentiel d'employer des paramètres de soudage appropriés, de nettoyer régulièrement les électrodes, de choisir des électrodes de qualité et de les stocker correctement. [14] [15] Ce qui est résumé par un diagramme de ishikawa (figure I.13).

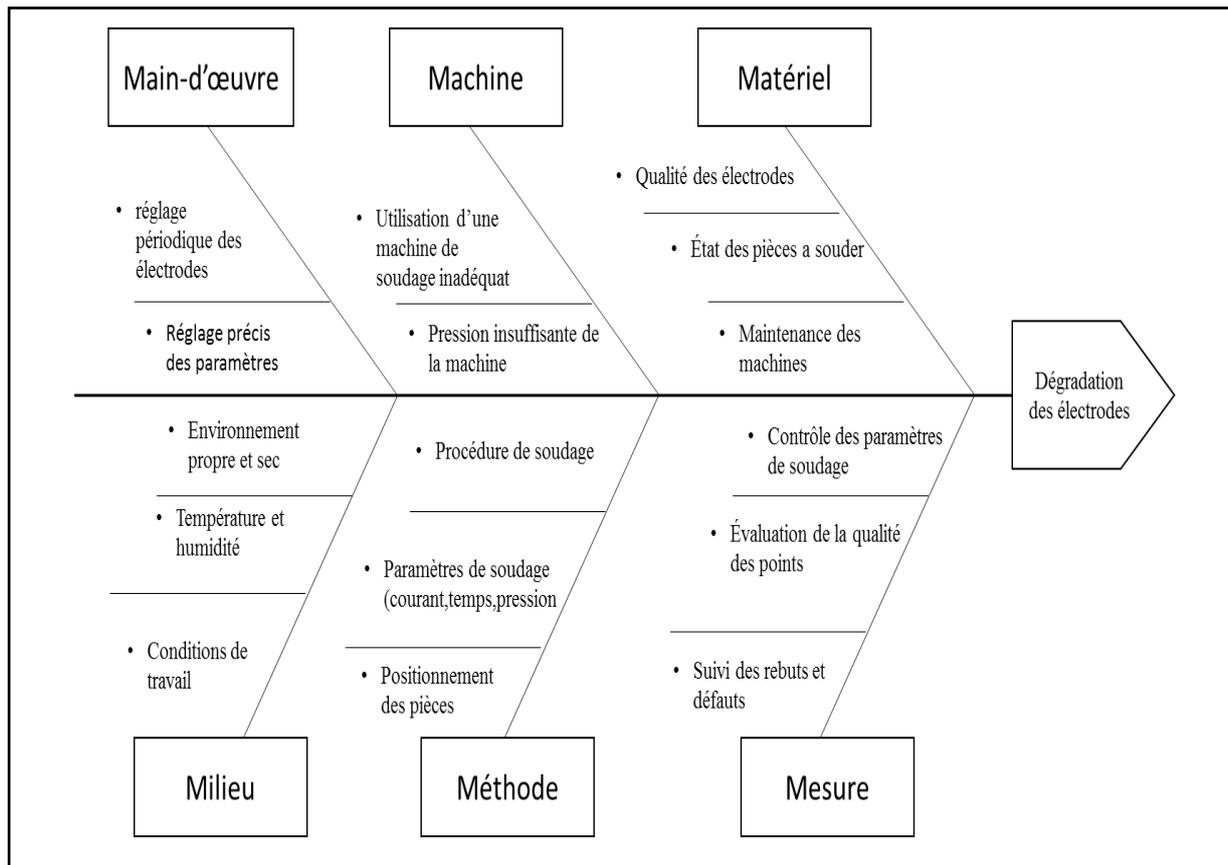


Figure I.13 : diagramme d'Ishikawa avec paramétrés susceptibles d'avoir une influence sur la durée de vie des électrodes.

I.14. Conclusion

Le soudage par points est une méthode industrielle moderne et efficace pour combiner des éléments en tôle, utilisant des électrodes en alliage de cuivre spéciales. Cette technique implique une analyse des paramètres clés et de leurs effets, ainsi que des aspects métallurgiques et des phénomènes mis en jeu. Elle présente des avantages et des inconvénients, et est utilisée dans divers domaines. La durée de vie des électrodes dépend de paramètres spécifiques, qui peuvent être représentés par un diagramme de causes-effets pour faciliter la compréhension et la planification.

Chapitre II

Etude

expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude expérimentale sur le soudage par résistance par points des tôles en acier noir en utilisant des électrodes en cuivre. Les matériaux d'électrodes et les pièces soudées sont des composants essentiels dans de nombreux domaines, notamment dans les applications électriques, mécaniques et biologiques. Dans ce chapitre, nous allons explorer les propriétés et les caractéristiques de ces matériaux, ainsi que les moyens mis en œuvre pour les usiner et les utiliser efficacement. Nous avons mené une expérience de soudage par résistance par points utilisant des électrodes en cuivre et des plaques en acier noir. Les électrodes en bronze ont été initialement utilisées, mais les résultats n'ont pas été satisfaisants en raison de la propriété du bronze. En conséquence, les électrodes ont été changées en cuivre, qui offre des propriétés de conductivité électrique et thermique excellentes, ainsi que des propriétés malléables et résistantes à la corrosion. Les étapes de l'expérience incluaient la préparation des électrodes, le découpage des plaques, le soudage, et les essais de rigidité. Le plan d'expérience utilisé était le plan de Box-Behnken.

II.2. Matériaux d'électrodes et des pièces soudées

L'acier noir est l'un des types de tôle les plus populaires, il n'est donc pas étonnant de le voir un peu partout. Ses utilisations sont vastes, notamment pour les projets de bricolage et d'aménagement. Communément appelé « acier brut », l'acier noir est un alliage de fer et de carbone. Il peut être galvanisé (coulé et revêtu de zinc) ou phosphaté (coulé et revêtu de phosphore) pour améliorer sa résistance à la corrosion. Les plaques de tôles en acier noir sont très fréquemment utilisées. Elles sont solides et polyvalentes et peu coûteuses. Pour cause, c'est l'une des substances les plus abondantes et les plus utiles de la planète, et on le retrouve dans de nombreux objets du quotidien. [16]

Le bronze, un matériau très polyvalent, est largement utilisé dans de nombreuses applications. Cet alliage de cuivre, d'étain et d'autres éléments est prisé pour son excellente résistance, sa durabilité et sa résistance à la corrosion. Ces propriétés distinctives font du bronze un matériau de choix.

Le cuivre est un métal doux, ductile et malléable. Il s'associe à la plupart des non-métaux pour former des composés cuivreux et cuivriques. Le cuivre est peu sujet à l'oxydation à l'air, se recouvrant d'une couche protectrice d'un hydroxy-carbone de couleur vert-gris. Ce métal est un

excellent conducteur d'électricité et de chaleur. Le cuivre courant présente une teinte brun-orange.

II.3. Moyens mis en œuvre

II.3.1. Moyens d'usinage :

On a utilisé un Tour parallèle de modèle SN 40 C (Figure II.1), pour l'usinage des électrodes.



Figure II.1 : Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie.

Tableau II.1: caractéristiques mécaniques de la machine [17]

Espace machine	Tour parallèle
Type	SN 40 C
Poids de la machine	1620 kg
La vitesse de rotation minimum	224 tr/min
La vitesse de rotation maximum	2000 tr/min

II.3.2. Moyen de découpage :

On a utilisé une cisaille-guillotine manuelle comme le montre la (Figure II.2), pour découper les tôles en acier noir.



Figure II.2 : Cisaille guillotine manuelle KHS e 1000.

Une tronçonneuse abrasive manuelle a également été employée, comme illustré dans la (figure II.3), afin de découper les électrodes en longueurs adéquates pour les placer sur le poste à souder.



Figure II.3: Une tronçonneuse abrasive manuelle BULER ABRASIMET 2.

II.3.3. Moyen d'essai :

Nous avons effectué les essais en laboratoire de génie mécanique sur un poste à souder, Comme le montre la (figure II.4).



Figure II.4 : Une soudeuse par point portable.

On a utilisé une machine automatique d'essai de traction modèle WDW-50 D'une capacité de 50KN comme le montre la (Figure II.6).



Figure II.5 : Machine automatique d'essai de traction modèle WDW-50 capacité 50KN.

II.4. Les étapes des opérations de soudage par résistance par points

II.4.1. Étape 1: préparation des électrodes

On a usiné 3 paires d'électrodes en bronze comme le montre la (figure II.6), Avec différents diamètre.



Figure II.6 : Des électrodes en bronze

L'usinage des électrodes a été réalisé comme suit :

Premièrement, Une barre de bronze de 80mm de long a été divisées en deux parties, puis nous avons dressé les faces et charioté à une taille de 10mm, comme illustré dans la figure II.6. Nous leur avons donné une forme conique, la première ayant un diamètre de 3mm, la seconde avec un diamètre de 4.5mm et la troisième avec un diamètre de 6mm. Ensuite, nous avons répété les mêmes étapes pour réaliser leurs paires.



Figure II.7 : usinage Des électrodes en bronze

II.4.2. Étape 2 : découpage des tôles

Des plaques minces en acier noir ont été découpées avec les dimensions 60 x 150 mm pour différentes épaisseurs E pour être ensuite soudées à recouvrement comme le montre la figure ci-dessous. h

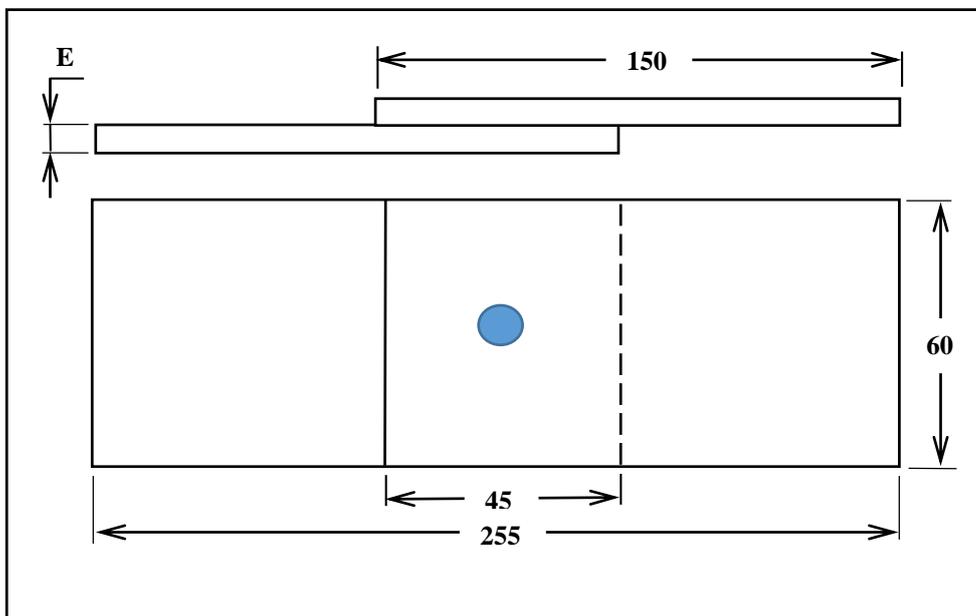


Figure II.8 : les dimensions des plaques soudées.

Les électrodes en bronze ont été utilisées pour réaliser un essai de soudage, mais le résultat n'a pas été satisfaisant, car les électrodes étaient restées collées aux plaques, comme illustré dans la figure II.9. Ainsi, les propriétés du bronze ne nous conviennent pas dans cette expérience.



Figure II.9 : soudage des plaques avec électrode en bronze.

Nous avons changé le matériau des électrodes au cuivre en raison de ses excellentes propriétés de conductivité électrique et thermique, malléable, ductile et résistant à la corrosion. Par conséquent, nous avons répété les mêmes étapes d'usinage précédentes pour fabriquer trois paires d'électrodes en cuivre, comme le montre la figure II.10. Nous avons essayé de souder une plaque avec ces électrodes et les résultats ont été satisfaisants.



Figure II.10 : usinage des électrodes en cuivre

II.4.3. Étape 3 : Soudage des plaques en acier noir

Selon le plan d'expérience Box et Behnken (Figure II.12), une campagne de 15 essais a été réalisée. Ce plan a été proposé en 1960 et permet de créer directement des modèles de second degré. Chaque élément possède trois niveaux : -1, 0 et +1. Il est facile de mettre en place ces plans et ils ont la propriété séquentielle.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Pour quatre facteurs ce plan est construit sur un hyper cube à quatre dimensions. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes ou au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère ou sur une hyper sphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au centre du domaine d'étude. [18]

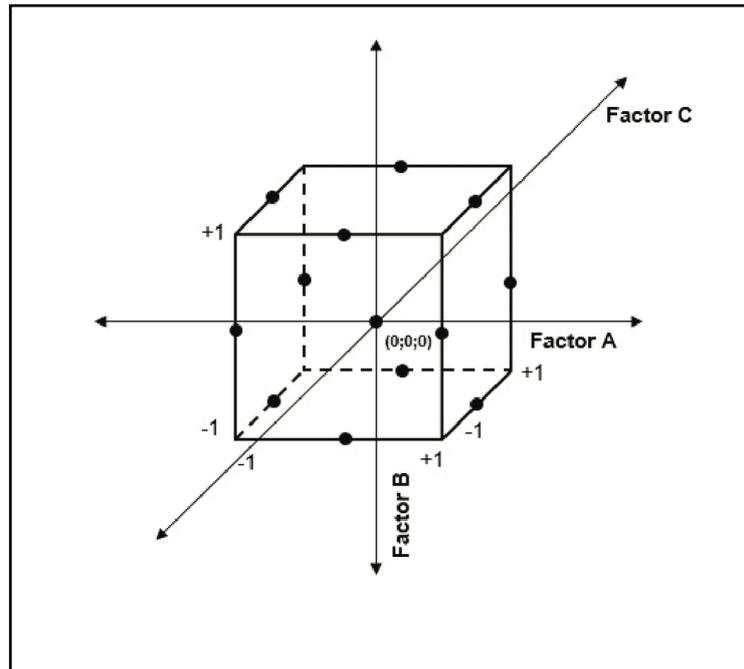


Figure II.11 : Plan de Box-Behnken pour trois facteurs [18]

Dans le plan de Box-Behnken à trois facteurs (variables), chaque facteur a trois niveaux dont les valeurs peuvent être réelles ou codées (-1, 0, +1), tel qu'il est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.2: Présentation des facteurs avec leurs valeurs réelles et codées.

Facteurs Niveaux	Diamètre d'électrode D [mm]	Epaisseur des plaques E [mm]	Nombre de Cycle T
-1	3	1	2
0	4.5	1.5	5
+1	6	2	8

Tableau II.3 : Plan d'expériences de Box-Behnken en variables codées

N° d'essai	D	E	T
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	0	0	0
6	0	-1	-1
7	0	-1	1
8	0	1	-1
9	0	1	1
10	0	0	0
11	-1	0	-1
12	-1	0	1
13	1	0	-1
14	1	0	1
15	0	0	0

Les plaques ont été numérotées conformément au plan d'expérience précédent (Tableau II.2). Les plaques à souder ont été serrées localement entre deux électrodes en cuivre. Un courant de soudage traverse l'ensemble des pièces/électrodes, ce qui entraîne une augmentation de la température et entraîne un forgeage (Figure II.12).

**Figure II.12** : soudage des plaques avec les électrodes en cuivre.

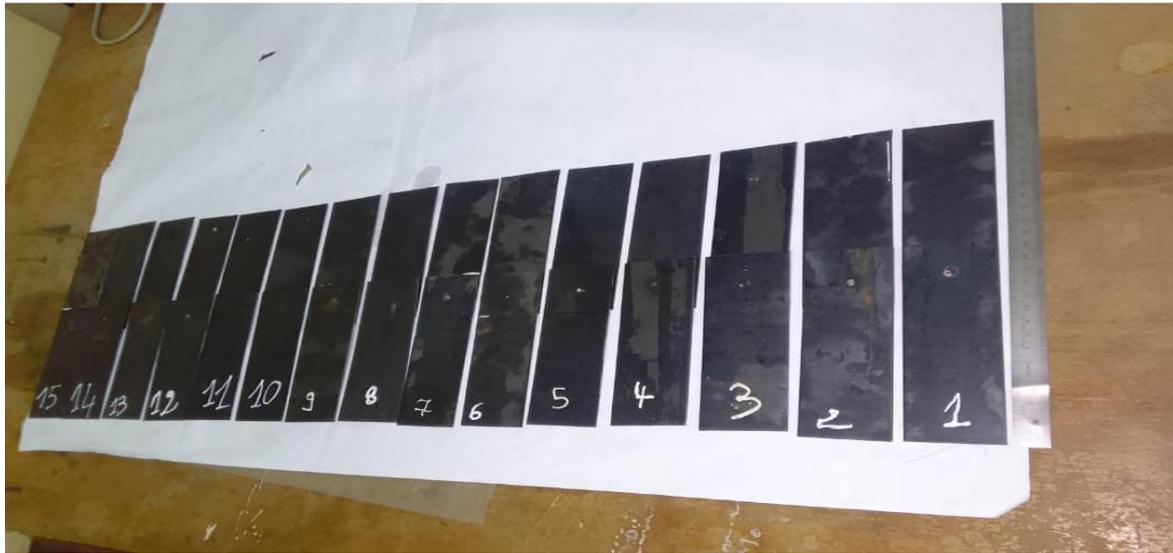


Figure II.13: les plaques numérotées et soudé.

Difficultés rencontrées lors du processus de soudage :

- Formation de calamine sur la surface en contact des deux électrodes, ce qui a nécessité le nettoyage de celles-ci à essai,
- Séparation de certaines plaques après soudage, notamment celles de plus grande épaisseur,
- Après avoir terminé le soudage, nous avons remarqué qu'il y avait des défauts sur le point de soudure comme la montre le (tableau II.3).

Tableau II.4 : défauts de soudage au point de soudure.

Aspect du point		Causes possibles
	Point Percé	<ul style="list-style-type: none"> • Effort trop faible ; • Intensité trop forte ; • Electrode mal ajustée.
	Point cuivré	<ul style="list-style-type: none"> • Effort trop faible ; • Intensité trop forte ; • Usure des électrodes ; • Electrodes mal affûtées.
	Point avec éclat	<ul style="list-style-type: none"> • Effort trop faible ; • Intensité trop forte ; • Mauvaise position de la pince

II.4.4. Étape 4 : Essais de résistance

Des tests de traction ont été effectués sur des plaques soudées à l'aide d'une machine de traction de 50 kN (figure II. 15). Grâce à ces essais, il est possible d'évaluer la résistance maximale au cisaillement des points soudés (Figure II.16).



Figure II.14 : Essai de traction sur une machine à capacité de 50 kN.



Figure II.15 : Eprouvettes rompues après l'essai de traction.

II.5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en œuvre le soudage par points sur des tôles d'acier noir, suivant un plan d'expérience de Box-Behnken. Des essais traction ont été effectués pour tester la qualité des joints de soudure. Néanmoins, quelques difficultés d'ordre techniques ont été rencontrées mais globalement le procédé a pu être maîtrisé.

Chapitre III

Modélisation et

optimisation des paramètres

de soudage par point

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les principes fondamentaux des plans d'expérience et de la méthodologie de surface de réponse, en soulignant leur importance pour la conduite d'expériences scientifiques rigoureuses et l'optimisation des systèmes complexes. Cette approche permet de développer des modèles mathématiques dits de surface de réponse afin de prédire fidèlement la résistance à la rupture des joints soudés en fonction des paramètres. Les résultats de cette étude fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des paramètres de soudage et l'obtention des joints soudés les plus résistants.

III.2. Démarche méthodologique d'un plan d'expérience

Un plan d'expérience (PE) est un outil méthodologique qui permet de mener des expériences scientifiques de manière rigoureuse et efficace. Il s'agit d'un protocole détaillé qui définit les objectifs de l'expérience, les facteurs à étudier, les niveaux de chaque facteur, les réponses à mesurer et la manière dont les données seront collectées et analysées.

La démarche méthodologique d'un PE se décompose en six étapes clés:

1. Définition des objectifs et des réponses: Cette étape consiste à définir clairement les objectifs de l'expérience et à identifier les réponses à mesurer.
2. Choix des facteurs et du domaine expérimental: Il s'agit de sélectionner les facteurs susceptibles d'influencer les réponses, de choisir les niveaux de chaque facteur à étudier et de définir le domaine d'étude pour chaque facteur.
3. Proposition d'un modèle: Cette étape consiste à sélectionner un modèle statistique adapté à la situation. Le modèle doit représenter la relation entre les facteurs et les réponses.
4. Estimation des coefficients du modèle: Les expériences sont réalisées selon le plan défini et les données des réponses sont collectées. Les coefficients du modèle sont ensuite estimés à partir des données collectées.
5. Validation du modèle: Le modèle est validé en utilisant des données non utilisées pour l'estimation. Si le modèle n'est pas valide, il faut proposer un modèle différent.

6. Mise en œuvre et suivi: Le modèle validé est utilisé pour prédire les réponses pour de nouvelles configurations. Les résultats sont suivis et analysés pour s'assurer que le modèle reste valide.

En suivant ces étapes, les chercheurs peuvent s'assurer que leurs expériences sont bien conçues et qu'elles fournissent des données fiables qui peuvent être utilisées pour tirer des conclusions valides.

- Un PE bien conçu permet de collecter des données de manière efficace et d'obtenir des résultats fiables.
 - Le choix du modèle statistique est crucial pour la réussite de l'expérience.
 - La validation du modèle est essentielle pour garantir la fiabilité des prédictions.
- [19]

III.3. Régression linéaire multiple

En l'absence de modèle analytique éprouvé, la prédiction du comportement des systèmes complexes nécessite une étude multiparamétrique expérimentale. Les problèmes expérimentaux peuvent être synthétisés comme suit : ➤ en entrée, des facteurs susceptibles d'influer sur les réponses, jouant le rôle de causes potentielles; ➤ en sortie, un certain nombre de réponses assimilables à des conséquences. L'approche des plans d'expérience présente souvent un intérêt majeur dans l'étude d'un système complexe à plusieurs paramètres. Le but consiste à modéliser le comportement des procédés et/ou des produits afin de mieux prévoir et accroître leurs performances. La modélisation expérimentale doit permettre de définir les conditions d'utilisation optimale et de déterminer les facteurs à contrôler ou à piloter afin de maîtriser le procédé. Lors de la mise au point d'un procédé de fabrication, l'optimisation du fonctionnement d'un système complexe nécessite la construction d'un modèle expérimental.

[20]

III.3.1. Modélisation

L'objectif est la mise en forme d'un modèle, le plus souvent polynomial, décrivant les variations de la fonction réponse Y prenant les valeurs Y_1, Y_2, \dots, Y_N relativement aux valeurs de k facteurs X_1, X_2, \dots, X_k :

$$y = \mathcal{F}(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

Avec :

- N : le nombre d'expériences ;
- K : le nombre de facteurs ;
- y : le vecteur colonne des réponses expérimentales $y_i; y^t = [y_1, y_2, \dots, y_N]$.

La méthode de la régression multilinéaire est l'outil statistique le plus habituellement mise en œuvre pour l'étude de données multidimensionnelles .une variable quantitative y dite à expliquer est mise en relation avec k variable quantitatives x_1, x_2, \dots, x_k dites explicatives.

X: la matrice $N \times \mathcal{P}$,appelée matrice du modèle ou matrice des effets.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2,p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{N1} & x_{N2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{N,p-1} \end{bmatrix}$$

\mathcal{P} : le nombre de coefficients du modèle postulé; β : le vecteur colonne des paramètres à estimer $\beta_i, [\beta^t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_N \end{bmatrix}$$

e : Le vecteur colonne des erreurs expérimentales aléatoires $e_i, [e^t = e_1, e_2, \dots, e_N]$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_N \end{bmatrix}$$

Le modèle matriciel s'écrit sous la forme classique suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2,p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{N1} & x_{N2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{N,p-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_N \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Les réponses calculées par les modèles utilisés ne sont généralement pas exactement égales aux réponses mesurées expérimentalement. Pour chaque expérience existe alors un écart dit de modélisation. Le vecteur ε représentera ces écarts.

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (3.2)$$

Mathématiquement, le vecteur ε des résidus se définit comme suit :

$$\varepsilon = y - \bar{y}$$

L'objectif est donc le calcul du vecteur β , valeur estimée du vecteur β .

III.3.2. Les hypothèses de la régression multiple

Pour calculer les coefficients des facteurs, il est nécessaire de faire les hypothèses suivantes :

La réponse est la somme d'une quantité non aléatoire et d'une quantité aléatoire.

- Les paramètres inconnus sont constants.
- Les écarts de modélisation sont purement aléatoires et ne contiennent pas d'erreurs systématiques.
- Les écarts ne sont pas corrélés entre eux.
- Les écarts sont normalement distribués.
- Les écarts ont une moyenne nulle.
- Les écarts sont issus d'une seule et même population et sont identiquement distribués.
- La distribution des écarts ne dépend pas des niveaux des facteurs.

Ces hypothèses peuvent être résumées par l'équation suivante: $\text{var}(\mathcal{E}) = \sigma^2 I$, ou var représente la fonction variance, σ l'écart type et I la matrice identité.

III.3.3. Différents types de modèles de régression

Pour adapter la forme générale d'un modèle empirique aux objectifs d'une étude, trois types de modèles sont envisageables [21] :

a) Modèle additif sans couplage (ou des facteurs principaux)

Ce modèle est utilisé lorsque l'objectif est de hiérarchiser les effets moyens des facteurs à partir d'une étude de criblage. La forme générale est :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \cdot x_j + \varepsilon \quad (3.3)$$

Où β_0 représente la moyenne arithmétique des réponses mesurées à partir des N expériences du plan.

b) Modèle additif avec couplage (ou avec interactions)

Ce modèle est utilisé lorsque l'on veut préciser l'effet moyen des facteurs par des interactions d'ordre une (interaction entre deux facteurs). La forme générale est :

$$y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (3.4)$$

où les termes β_0 et β_{ij} symbolisant respectivement les effets moyens des facteurs x_i et les interactions d'ordre un entre les effets des facteurs x_i et x_j .

c) modèle polynomial (ou du second ordre avec interactions)

Ce modèle est utilisé lorsque l'on doit trouver un optimum. La forme générale est :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (3.5)$$

Où les termes $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ et β_{ij} symbolisent respectivement les effets moyens des facteurs x_i , les termes du second degré, et les interactions d'ordre un entre les effets des facteurs x_i et x_j . Chacun de ces modèles est associé à une équation permettant d'estimer le nombre d'inconnues à estimer, noté p.

III.4. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique utilisée pour comparer les moyennes de plusieurs groupes. Elle permet de déterminer si les moyennes sont différentes en fonction d'un ou plusieurs facteurs indépendants. L'ANOVA est basée sur la loi de la variance

totale, qui partitionne la variance observée dans un variable en composantes attribuables à différents sources de variation. L'ANOVA est utilisée pour tester l'hypothèse nulle que les moyennes sont égales et pour évaluer l'effet d'un ou plusieurs facteurs sur une variable dépendante. Elle est particulièrement utile pour comparer plus de deux groupes, ce qui est un descriptif des tests t et z. L'ANOVA peut être utilisée pour des analyses de type one-way, two-way, et N-way, en fonction du nombre de facteurs indépendants considérés. [12]

III.5. Analyse de la variance du modèle

La variance est une mesure de dispersion qui est la somme des carrés des écarts(SCE) des observations par rapport à leur moyenne, divisée par un nombre égal au nombre d'observations moins un (nombre de degrés de liberté ddl i).

D'une façon générale, en matière de régression, le principe de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et en une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième

Supposons que nous disposions de N observations désignées par $Y_{ijk}(i=1,\dots,p ;j=1,\dots,q ;k=1,\dots,n)$.les deux premier indices concernent les deux facteurs contrôles .le troisième indice concerne les répétitions. Dans ces conditions, nous pouvons calculer $p \times q$ moyennes Y_{ij} relatives aux différents objets, p moyennes $Y^{i\cdots}$ relatives aux différentes modalités du premier facteur, q moyenne Y^j relatives aux différentes modalités du deuxième facteur, et une moyenne générale Y^{\cdots} les étapes d'analyseront les suivantes :

III.5.1. Le modèle observé

$$Y_{ijk} - \bar{Y}^{\cdots} = (\bar{Y}_{i\cdots} - \bar{Y}^{\cdots}) + (\bar{Y}_{\cdot j} - \bar{Y}^{\cdots}) + (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_{i\cdots} - \bar{Y}_{\cdot j} + \bar{Y}^{\cdots}) + \bar{Y}_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \dots (3.6)$$

Cette relation indique que les écarts entre les observations individuelles et la moyenne générale peuvent être considérés comme constitués d'une part d'une composante relative aux différences entre les moyennes observées pour les différentes modalités et la moyenne générale, et d'autre part d'une composante relative aux écarts entre les observations initiales et observées pour les différentes modalités.

III.5.2. Les nombres de degrés de liberté

Les nombres de degrés de liberté associe à un facteur X_i est le nombre de niveaux N_{ni} qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1.les nombres de degrés de liberté sont additifs :

$$N_{ni} - 1 = pqn - 1 = (p - 1) + (q - 1) + (p - 1)(q - 1) + pq(n - 1) \dots \dots \dots (3.7)$$

III.5.3. L'équation de l'analyse de la variance

On obtient l'équation de l'analyse de variance :

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y})^2 = qn \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + pn \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{.ij} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2 \dots \dots \dots (3.8)$$

En utilisant l'indice a pour le premier facteur et l'indice b pour le deuxième facteur, l'équation (3.8) s'écrit :

$$SCE_t = SCE_a + SCE_b + SCE_{ab} + SCE_r \dots \dots \dots (3.9)$$

Avec :

- SCE_t = la somme des carrés des écarts totale ;
- SCE_a = la somme des carrés des écarts factorielles a ;
- SCE_b = la somme des carrés des écarts factorielles b ;
- SCE_{ab} = la somme des carrés des écarts l'interaction a×b ;
- SCE_r = la somme des carrés des écarts résiduels.

III.6. Analyse de la variance résiduelle

La variance résiduelle est liée aux écarts entre les réponses mesurées et les réponses estimées. Elle permet de juger de la qualité du modèle linéaire indépendamment du nombre d'essais réalisés. L'analyse de la variance permet de déterminer l'aptitude du modèle à décrire les variations de la réponse en comparant les variations expliquées et celles non expliquée de la réponse correspond à la variance induite par les facteurs et les interactions, tandis que la variation inexpliquée de la réponse correspond à la variation résiduelle. La variance résiduelle peut être décomposée en deux sources de variabilité :

La variabilité intrinsèque du système étudié et la variabilité due à des facteurs aléatoires non contrôlés au cours des essais. [23]

III.7. Test de fisher-snedecor

Le test de Fisher, parfois appelé aussi test de Fisher-Snedecor, qui sert à la comparaison de deux variances observées. La loi de Fisher survient très fréquemment en tant que loi de la

statistique de test lorsque l'hypothèse nulle est vraie, dans des tests statistiques, et dans l'analyse de la variance (ANOVA) via le test de Fisher. [20]

III.8. La méthodologie de surface de réponse (MSR)

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une technique statistique utilisée pour explorer les relations entre les variables dépendantes et indépendantes impliquées dans une expérience. Elle a été développée par George Box et K. B. Wilson en 1951. L'objectif principal de MSR est de déterminer les variations de la réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significatifs, en utilisant des modèles mathématiques tels que les polynômes pour approximer la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie.

La MSR passe par trois étapes clés :

- 1. Construction du plan expérimental :** Les plans d'expériences, tels que les plans quadratiques (comme les plans centraux composites ou les plans de Box-Behnken), sont utilisés pour définir les paramètres d'expérience.
- 2. Modélisation de la réponse :** Les techniques de régression sont utilisées pour relier la réponse à un ensemble de facteurs. Le modèle de surface des réponses du second degré inclut les effets linéaires, les effets d'interaction et les effets quadratiques des facteurs.
- 3. Représentations graphiques :** Les courbes des surfaces de réponse sont utilisées pour observer le comportement des réponses en fonction des paramètres, ce qui permet d'optimiser le système expérimental.

La MSR est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la chimie, la biologie, la mécanique, et la physique, pour optimiser des processus et améliorer les performances des systèmes. Elle est particulièrement utile pour étudier les effets des paramètres sur des propriétés physiques, comme la couleur du blé blanchi. Exemple de courbe de résidu.

III.9. Optimisation

La résolution de problèmes d'optimisation est devenue centrale dans l'étude de nombreux processus, avec une croissance marquée des problèmes d'aide à la décision formalisés en termes d'optimisation.

L'optimisation vise à trouver le maximum ou le minimum d'une fonction, c'est-à-dire la valeur de x qui produit la valeur de $y=f(x)$ la plus grande ou la plus petite. Ici, $y=f(x)$ est appelée fonction objectif, et elle peut être contrainte par une autre fonction limitant ses arguments.[20]

Pour explorer les différentes méthodes d'optimisation, nous considérons le cas d'une optimisation mono-objectif. Nous distinguons trois familles de méthodes d'optimisation mono-objective :

- Les méthodes déterministes ;
- Les méthodes probabilistes ;
- Les méthodes non déterministes.

III.9.1. Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objective cherche à optimiser plusieurs composants d'un vecteur de fonctions coût. Contrairement à l'optimisation mono-objective, la solution d'un problème multi-objectif (PMO) n'est pas unique mais constitue un ensemble de solutions, connu comme l'ensemble des solutions Pareto optimales (PO). Toute solution de cet ensemble est optimale dans le sens où aucune amélioration ne peut être faite sur un composant du vecteur sans dégradation d'au moins un autre composant. Le premier objectif dans la résolution d'un problème multi-objectif est d'obtenir l'ensemble des solutions Pareto optimales ou d'échantillonner des solutions diversifiées dans cet ensemble. La détermination de l'ensemble PO est la première phase dans la résolution pratique de PMO, suivie par le choix d'une solution à partir de cet ensemble en fonction des préférences du décideur. Ce choix nécessite une connaissance approfondie du problème et de nombreux facteurs associés. En général, un problème d'optimisation multi-objectif s'écrit comme suit [20] :

Minimiser:

$$f(x); f \in R; \text{ avec } f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k] \dots \dots \dots (3.10)$$

Sous les contraintes :

$$h_j(x) \leq 0; j = 1, \dots, m; x \in S \subset R^n$$

Le vecteur $x \in R^n$ a pour composantes (x_1, x_2, \dots, x_n) qui est les inconnues du problème, et S représente l'ensemble des solutions de x dans R_n . La fonction $f(x)$ est appelée fonction objectif

(ou fonction économique) et les contraintes $h_j(x) \leq 0 (j = 1, \dots, m)$ sont les contraintes du problème.

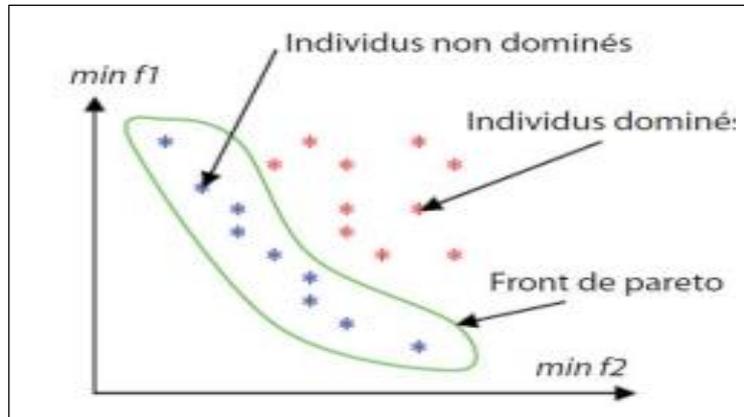


Figure III.1 : Identification des solutions optimales au sens de Pareto optimal.

La (Figure III.1) illustre l'optimisation multi-objectif de deux fonctions f_1 et f_2 visant à leur minimisation : le front de Pareto est l'ensemble des points non dominés constituant les solutions optimales au sens de Pareto. [20]

III.9.2. Surface de réponse

Les courbes d'iso-réponse sont créées en ajustant une fonction de surface de réponse en 3D à un nuage de points en 3D ; ces courbes sont ensuite projetées sur le plan X-Y. Comme pour les surfaces de réponse, les courbes d'iso-réponse permettent d'examiner la relation entre trois variables dans un tracé. Un tracé de courbes d'iso-réponses superposées projette plusieurs tracés de courbes d'iso-réponse en 3D sur un même plan X-Y. Ce type de tracé est crucial dans les paramétrages industriels pour visualiser les résultats d'une expérience avec plusieurs réponses. [20]

III.10. Résultats et discussions

Les coefficients des modèles de surface de réponse pour la résistance à la rupture ont été déterminés à l'aide de la régression linéaire multiple, en utilisant le logiciel de statistiques STATISTICA™.

La réponse mesurée pour chacune des combinaisons du plan sont présentées sur le (tableau III.1).

Tableau III.1: Plan d'expériences

N° Essai	Facteurs d'étude en valeurs codées			Réponse observée
	Diamètre d'électrode D	Epaisseur de plaque E	Nombre de cycle de soudage T	Résistance à la rupture en cisaillement Rr [Mpa]
1	-1	-1	0	434
2	1	-1	0	60
3	-1	1	0	69
4	1	1	0	46
5	0	0	0	268
6	0	-1	-1	79
7	0	-1	1	240
8	0	1	-1	10
9	0	1	1	155
10	0	0	0	292
11	-1	0	-1	56
12	-1	0	1	427
13	1	0	-1	90
14	1	0	1	132
15	0	0	0	308

III.11. La régression linéaire et l'analyse de la variance (anova)

III.11.1. La résistance à la rupture

Le tableau de régression révèle les coefficients des facteurs significatifs du modèle de surface de réponse, avec une évaluation de leur importance par le test de Student et P-value. Il est évident que le facteur le plus influent est C, suivi de D. Un coefficient de détermination

ajusté de 95.31% confirme la capacité exceptionnelle de ce modèle à prédire la résistance à la rupture des joints soudés.

Tableau III.2 : régression linéaire multiple

R²aju = 95, 31 %				
F(9,5)=32638 p<0,00065 erreur d'estimation (écart-type) : 30,39				
	Coefficient de modèle β	Erreur de coefficient de modèle β	Teste de student	p-value
Moyenne β₀	289,33	17,54	16,49	0,00001
C	89,87	10,74	8,36	0,0004
D	-82,25	10,74	-7,65	0,0006
ED²	-94,75	15,19	-6,23	0,001
DE	87,75	15,19	5,77	0,002
E²	-96,16	15,81	-6,08	0,001
DC	-82,25	15,19	-5,41	0,002
C²	-72,16	15,81	-4,56	0,006
D²	-40,91	15,81	-2,58	0,04
EC²	-38,50	15,19	-2,53	0,05

Figure III 2 : représente des valeurs observées et des variables prédites, des variables dépendantes (résistance à la rupture). Les valeurs prédites forment une droite qui traverse l'origine, et les valeurs observées se situent dans l'intervalle des valeurs prédites. Cela confirme que le modèle est bien ajusté aux données observées.

Le modèle de résistance mécanique du joint soudé construit par la méthode de régression linéaire multiple est donné en fonction des paramètres de soudage (en valeurs codées) comme suit :

$$R_r[\text{Mpa}] = 289,33 - 82,25 * D + 89,87 * C + 87,75 * DE - 82,25 * DC - 40,91 * D^2 - 96,16 * E^2 - 72,16 * C^2 - 94,75 * ED^2 - 38,50 * EC^2 \dots\dots\dots (3.11)$$

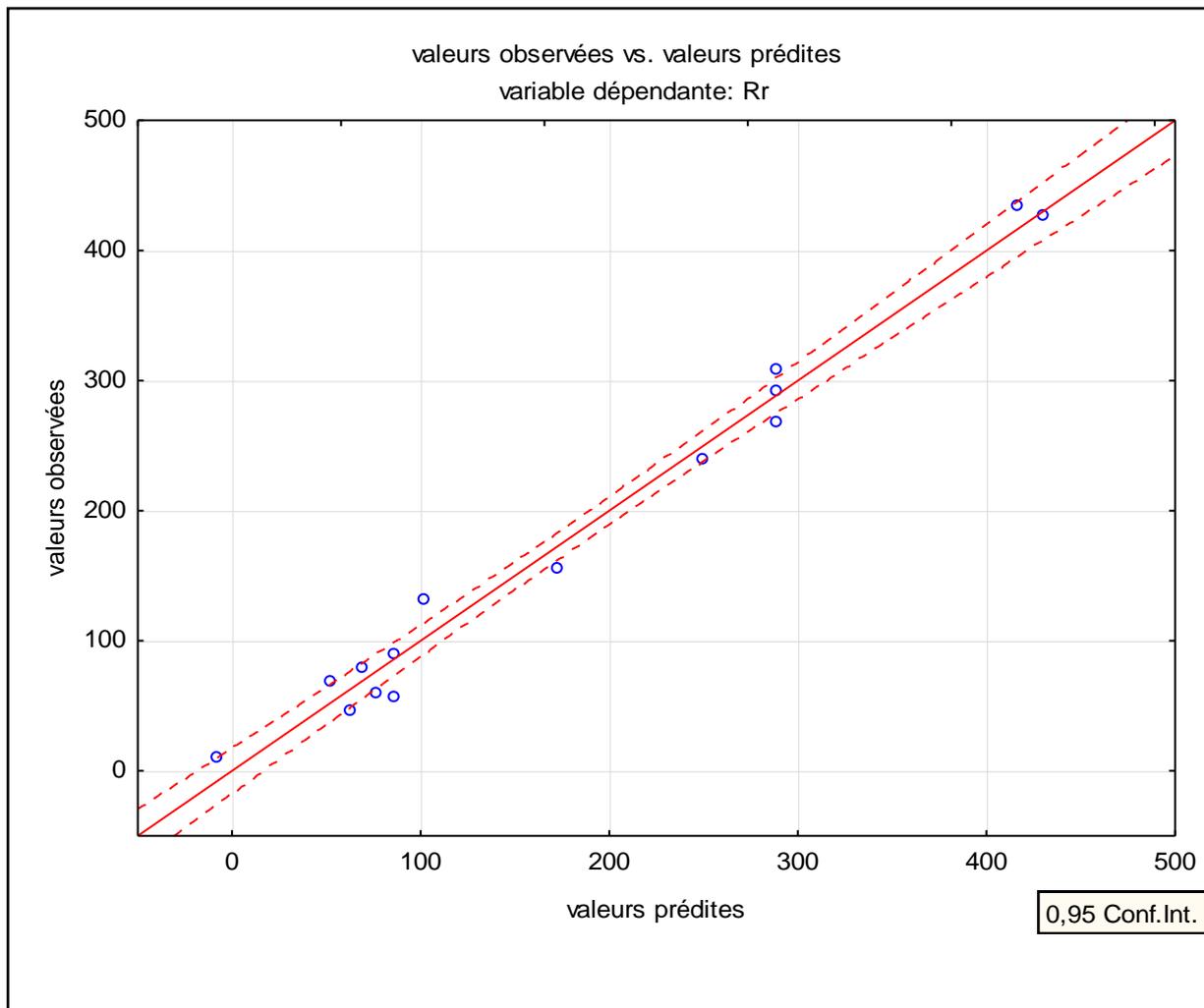


Figure III.2 : Valeurs observées et valeurs prédites par le modèle de régression de Rr.

III.11.2. Essais de validation

Trois essais de confirmation hors plan d'expériences ont été réalisés afin de valider le pouvoir prédictif du modèle de résistance mécanique construit par régression linéaire multiple Equation (3.10). Les valeurs observées lors de ses essais sont confrontées et comparées aux vars calculées par le modèle avec un intervalle de confiance de 95 % (Tableau III.3).

Tableau III.3: le plan des essais de validation.

N° Essai	Facteurs hors plan d'expériences en valeurs codées			Réponse mesurée Rr [Mpa]	Réponse prédite Rr [Mpa]	
	Diamètre d'électrode D	Epaisseur de plaque E	Nombre de cycles T	Réponse mesurée Rr [Mpa]	Niveau de confiance minimal -95%	Niveau de confiance maximal +95%
16	+1	-1	-1	127	60,63	132,04
17	-1	-1	+1	482	431,42	679,49
18	+1	-1	+1	148	45,38	147,29

Les résultats des essais de validation montrent que les valeurs prédites de la résistance mécanique (Rr) à partir de modèles de régression linéaire multiple sont généralement proches des valeurs observées pour chaque essai. Sur le tableau III.3, on voit que les valeurs observées de (Rr) se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95 % calculé à partir du modèle. Cela confirme la fiabilité des prédictions du modèle dans ces conditions expérimentales spécifiques.

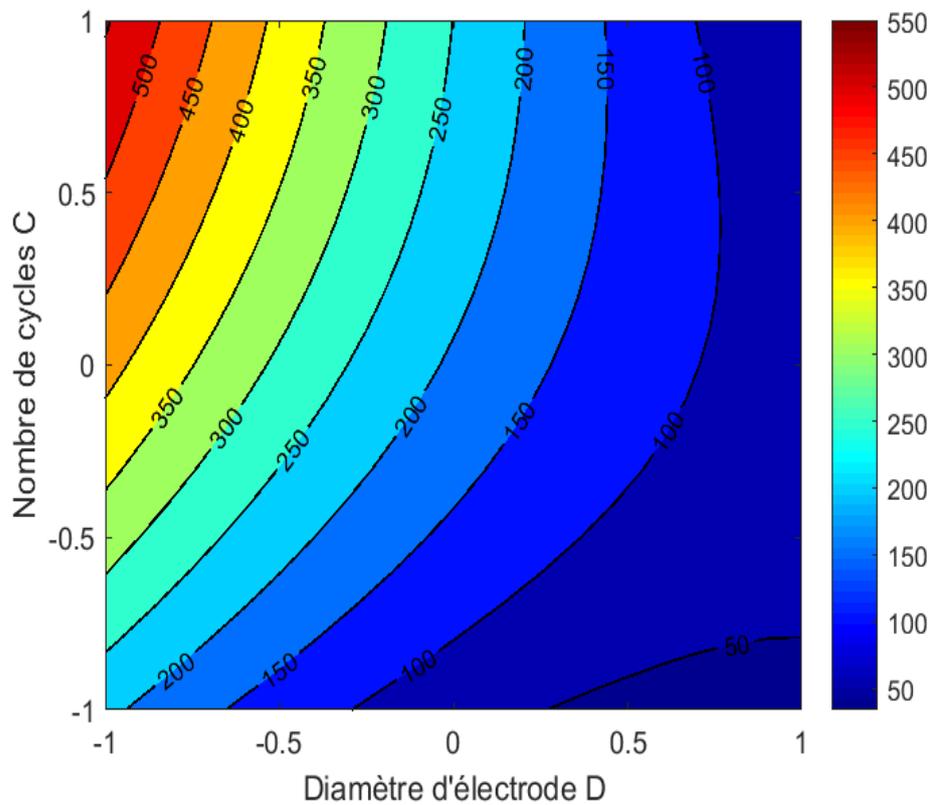


Figure III.3 : Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour une épaisseur des plaques $E = -1$ (1 mm).

On remarque que la résistance à la rupture du point de soudure augmente au fur et à mesure qu'on diminue le diamètre d'électrode et l'épaisseur de plaque (Figure III.4). Nous constatons la plus grande résistance à la rupture du joint soudé (>500 MPA) lorsque D et E sont petits et le facteur C est grand.

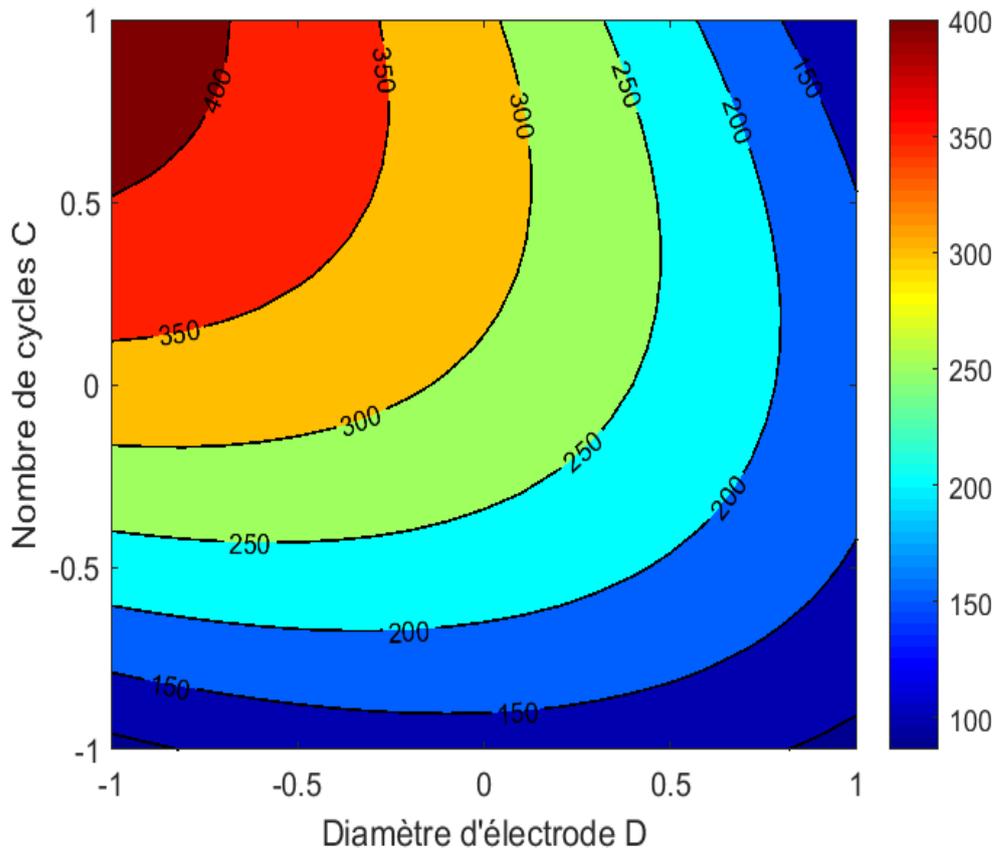


Figure III. 4: Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour une épaisseur des plaques $E=0$ (1.5 mm).

Sur (Figure III.4), lorsque E est moyen, on peut clairement constater l'effet très significatif du facteur C , donc plus le nombre de cycles de soudage est grand et plus le diamètre de l'électrode est petit, on remarque une augmentation de la résistance à la rupture du joint soudé.

* La résistance à la rupture du joint soudé augmente avec le nombre de cycles de soudage (C).

La résistance à la rupture du joint soudé minimale est obtenue pour un diamètre d'électrode de (6 mm) et un nombre de cycles de soudage égal à 2.

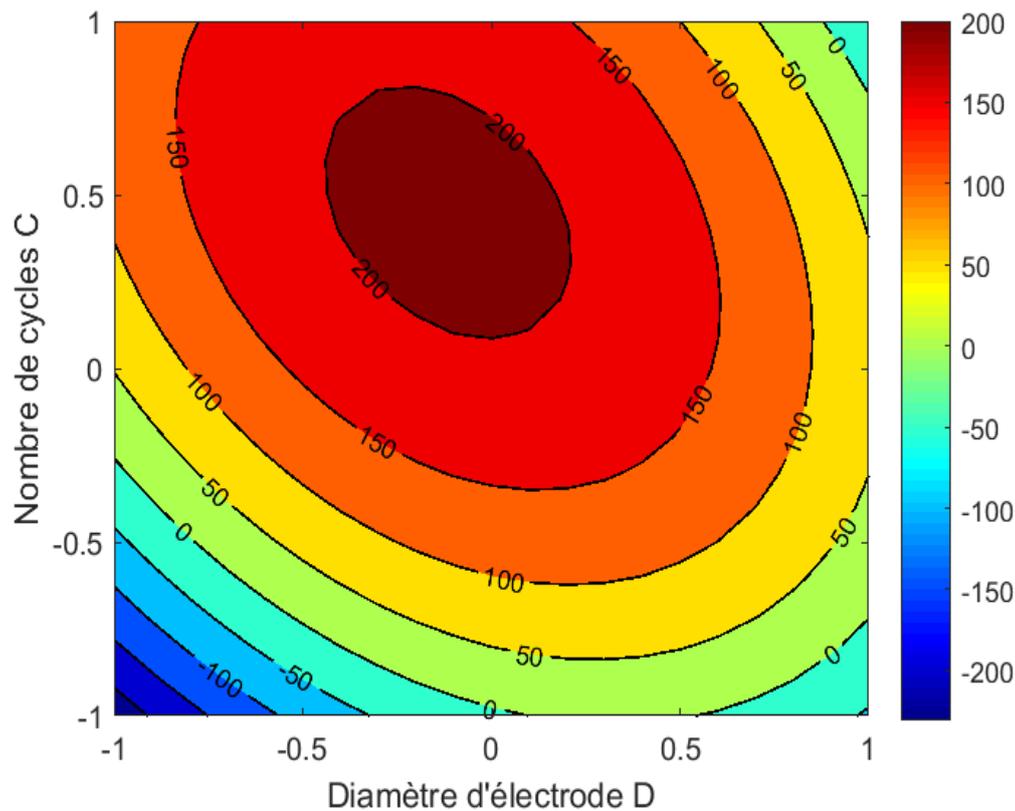


Figure III.5: Surface de réponse de la résistance à la rupture du joint soudé pour une épaisseur des plaques $E=1$ (2 mm).

Dans la figure III.5, on voit que la résistance à la rupture du joint soudé augmente lorsque le facteur D et C est moyen et le facteur E est grand.

Les valeurs les plus élevées de R_r (autour de 200 MPa) se situent au centre de la surface, où D et C sont à des niveaux intermédiaires. Les valeurs les plus faibles de R_r se situent aux extrémités de la surface.

III.12. Optimisation des paramètres de soudage

- **Formulation mathématique du problème d'optimisation**

On désire déterminer les valeurs optimales des paramètres de soudage considérés, qui maximisent la résistance des joints soudés.

Donc, le problème d'optimisation est mathématiquement formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser } R_r(D, E, C) \\ \text{Tel que} \\ -1 \leq D \leq +1 \\ -1 \leq E \leq +1 \\ -1 \leq C \leq +1 \end{array} \right.$$

Eu égard à la complexité de la fonction objectif développée par régression linéaire multiple (modèle à trois variables), l'optimisation graphique par surface de réponse risque d'être moins précise. Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation de l'algorithme génétique afin de résoudre le problème d'optimisation.

- **L'algorithme génétique GA**

En recherche opérationnelle, l'Algorithme Génétique est une méta-heuristique de la grande famille des algorithmes d'évolution, qui utilisent la notion de sélection naturelle des espèces vivantes. Cette technique offre l'avantage de fournir des solutions de très grande qualité en un temps raisonnable.

L'Algorithme Génétique se base au départ sur une population de solutions candidates appelées parfois individus, qui va évoluer de génération en génération jusqu'à la génération qui contient les meilleures solutions, dites « best fitness ».

Chaque individu comprend des propriétés et il peut être sujet à des transformations génétiques (mutation, croisement par exemple).

Chaque individu est évalué et cette valeur d'aptitude (fitness value) est un critère pour sa survie d'une génération à une autre. [24]

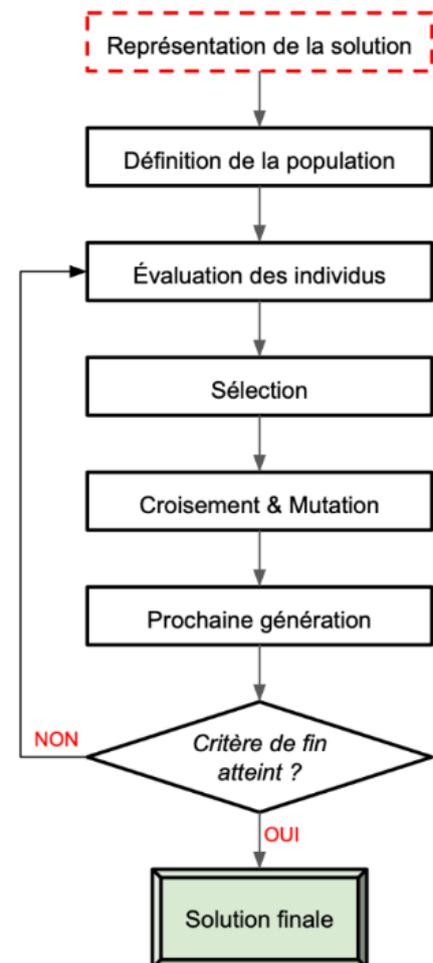


Tableau III.4: Paramètres de l'algorithme génétique

Nombre de population	Nombre de génération	Méthode de sélection	Taux de croisement	Taux de mutation
50 individus	120	Par tournois	0.8	0.02

• Résultats et discussions

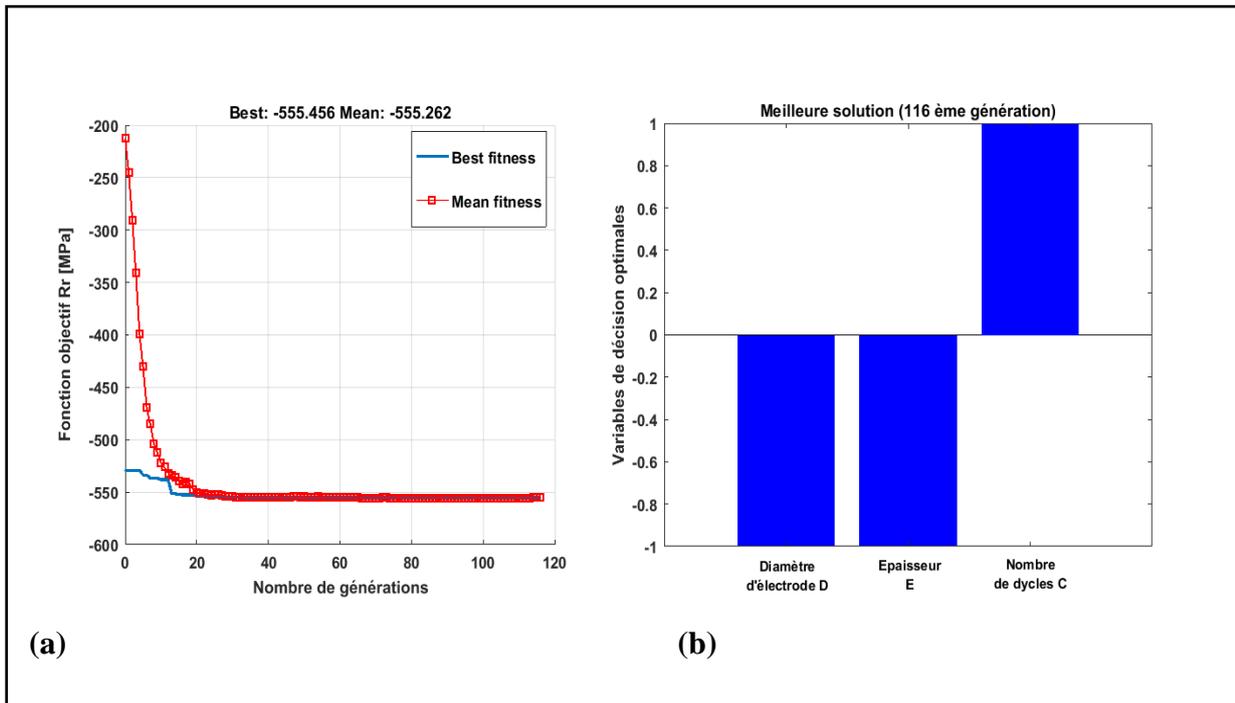


Figure III.6: Graphe d'optimisation par algorithme génétique.

L'algorithme génétique a permis de déterminer les valeurs optimales des paramètres de soudage qui maximisent la résistance des joints soudés :

Tableau II.2: Présentation des facteurs avec leurs valeurs réelles et codées.

Facteurs Niveaux	Diamètre d'électrode D [mm]	Epaisseur des plaques E [mm]	Nombre de Cycle T
-1	3	1	2
0	4.5	1.5	5
+1	6	2	8

Ces valeurs optimales sont représentées par la courbe rouge (a), qui montre la convergence de l'algorithme vers la valeur maximale de Rr après 116 générations.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux des plans d'expérience et de la méthodologie de surface de réponse, soulignant leur importance pour la conduite d'expériences scientifiques.

L'étude a évalué l'influence des paramètres du procédé de soudage par points sur la résistance à la rupture des joints soudés. Un modèle de régression linéaire multiple a été déterminé, montrant que le nombre de cycles de soudage et le diamètre de l'électrode sont les paramètres les plus influents sur la résistance à la rupture. Une diminution du diamètre de l'électrode et une augmentation du nombre de cycles de soudage améliorent la résistance à la rupture. L'épaisseur de la plaque a également un effet significatif, mais moindre.

Les résultats permettent de mieux comprendre l'influence des paramètres sur les propriétés mécaniques des joints soudés et constituent une base de connaissances pour l'optimisation du procédé.

Conclusion

général

Bien que la technique de soudage par résistance par point existait depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs phénomènes sont encore mal compris tels que le choix des conditions opératoires, l'apparition de défauts dans les pièces soudées... etc. D'ailleurs, la plupart des études visant à améliorer les performances de ce procédé sont étudiées expérimentalement. Dans cette étude, une campagne d'expériences a été planifiée et une méthode de surface de réponse a été mise en œuvre en vue d'une modélisation et d'une optimisation de la résistance à la rupture des joints soudés. Le diamètre des électrons, l'épaisseur des plaques soudées et le nombre de cycles de soudage, entre autres, ont été sélectionnés en tant que paramètres de soudage maîtrisables. L'analyse statistique des données d'expérimentation par ANOVA a permis d'identifier les paramètres de soudage influents sur les réponses étudiées.

En effet, la résistance à la rupture du joint est affectée par le diamètre des électrons et l'épaisseur des plaques et le nombre de cycles de soudage. La régression linéaire multiple a permis le développement de modèles fiables pour la résistance à la rupture du joint soudé. Des surfaces de réponse ont été tracées dans le but de comprendre l'évolution des performances citées en fonction des paramètres de soudage. Les paramètres de soudage considérés ont été optimisés. En effet, en vue de maximiser la résistance à la rupture de joint soudé, nous recommandons les dès le début de l'étude.

Cette étude analyse l'impact des paramètres de soudage sur la résistance mécanique des joints réalisés par soudage par résistance (par point).

* Des paramètres tels que le diamètre des électrodes, l'épaisseur des tôles, le nombre de cycles de soudage ont été étudiés.

* Un modèle a été développé pour prédire la résistance à la rupture en fonction des paramètres qui ont été choisis.

* Les paramètres de soudage optimaux pour une résistance maximale ont été déterminés.

Enfin, cette étude pourrait profiter aux étudiants des promotions avenir et être intégrée dans le programme d'enseignement de soudage au département du génie mécanique.

Références Bibliographiques

- [1] Roland CAZES « Soudage par résistance » Ingénieur de l'École Supérieure ,1993.
- [2] « formation soudure par résistance ».
- [3] JOHO.P, le soudage, généralités sur la représentation symbolique des soudures, cours Documents, construction.
- [4] obtention des pièces mécano soudés « soudage autogène».
- [5] SARKIS Elais « mécanique des structures et systèmes, machine de soudage à la molette pour les gaines », mémoire de master, circulaires juin 2012.
- [6] MESSELMi imen.SEMAOUNE fatma Zohra « l'assemblage dissemblable de l'acier par soudage par résistance par points », mémoire de master, laboratoire de traitement de surface matériaux, 2019.
- [7] THIEBLEMONT Eric, « modélisation du soudage par résistance par points », thèse doctorat de l'institut national polytechnique de lorraine, 1992.
- [8] SRIKUNWONG Chainarong, « modélisation de procédé de soudage par points », thèse doctorat de l'école des mines de paris, 2005.
- [9] « mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés tig et laser de tôles d'alliages de titane », institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.
- [10] DANCETTE Sylvain « Comportement mécanique des soudures par points : mécanismes et stratégies de prédiction dans le cas des tôles en acier pour automobile », 2009.
- [11] Soudure par résistance « <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage-parresistance> », avril 2019.
- [12] : SD Service « soudage par résistance », édition 2016.
- [13] BERNARD. A, « ooreka.com/soudage : soudage – préparation–contrôle DMOS », 2019.

- [14] T. Dupuy, « La dégradation des électrodes lors du soudage par points de tôles d'acier zinguées », Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1998.
- [15] H. R. M. Costa, J. S. Dias, R. A. A. Aguiar, R. A. A. Lima, et D. M. Lopes, "Effect of process parameters on lifetime of copper electrodes used in spot welding of IF steel sheets", *Weld. Equip. Technol.*, vol. 27, 2016.
- [16] Melody DOUX, «La tôle noire – Qu'est-ce que c'est et à quoi ça sert ?» Publié le 15 septembre 2021.
- [17] « Manuel d'instructions du tour parallèle SN 40 C », Atelier de mécanique, Université de Bejaia.
- [18] ISMAILI YAMINA, « Optimisation des conditions d'immobilisation de la lipase candida rugosa (CRL) par la Méthode des Surfaces de Réponse (RSM) » mémoire de master, université chahid hamma lakhdar el-oued, 2016.
- [19] PILLET, M. « Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguch » i, Paris : Editions d'Organisation, c1992 ISBN : 2-7081-1442-5; 1992.
- [20] KARED Hicham, BAHLAT Zakia « modélisation et optimisation du procédé de soudage par friction d'un alliage d'aluminium », mémoire de master, 2019.
- [21] LOUVET, F. et DELPLANQUE, L. Témoignage de l'association Expérimentique « Design of experiments : une approche pragmatique et illustrée : the French touch », Orléans, ISBN : 29525126-0-4, 2005.
- [22] CHIBANE, H. « contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire, application aux matériaux métallique et composites » Université François Rabelais De Tours ; 2013.
- [23] Dreesbeke, J.J, FINE, J. et Saporta, G. Plans d'expériences: applications en entreprise [7e Journées d'étude en statistique, 1996, Marseille], l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France; Paris: Éd. Technip, ISBN: 2-7108-0733- (1997).
- [24] YICK, J, Mukherjee. & Ghosal, D. (2008b). wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.

Résumé

La mise en œuvre d'un procédé de soudage par résistance par point présente toujours un certain nombre d'inconnues telles que le diamètre d'électrodes, l'épaisseur des plaques à souder, le nombre de cycle de soudage, le temps, la pression, etc.

Les objectifs que nous nous sommes fixés dans ce travail sont d'abord de déterminer les paramètres de soudage affectant la résistance mécanique du joint de soudure et la puis de modéliser le procédé de soudage et donc ainsi que maximiser la résistance à la rupture. Afin d'atteindre les objectifs Comme annoncé, nous avons réalisé une série d'essai de soudage sur des plaque mince selon la méthodologie des plans expérimentaux et d'analyse statistique en utilisant le programme STATISTICA™ pour les variables d'intérêt, entre; Résistance à la rupture dans la zone affectée par la chaleur. Les modèles de surface de réponse obtenus sont ensuite utilisés pour formuler un problème d'optimisation de processus. À l'aide du logiciel MATLAB™, nous avons déterminé les paramètres de soudage optimaux qui permettent une résistance maximale.

Mots clés : Soudage par résistance par point, plan d'expériences, ANOVA, modélisation, optimisation.

Abstract

Resistance spot welding is a widely used technique in the industry for joining thin sheets. The quality of the weld depends on several parameters, such as electrode diameter, thickness of the sheets to be welded, number of welding cycles, welding time, and applied pressure.

The objectives of this study are to identify the welding parameters that affect the mechanical strength of the weld joint and to model the welding process in order to maximize fracture strength. To achieve these objectives, welding tests were conducted on thin sheets according to a design of experiments and statistical analysis methodology using STATISTICA™ software for the variables of interest, including fracture strength in the heat-affected zone. The response surface models obtained were then used to formulate a process optimization problem. MATLAB™ software was used to determine the optimal welding parameters that maximize fracture strength.

Keywords: Resistance spot welding, design of experiments, ANOVA, modeling, optimization.

ملخص

يقدم تنفيذ عملية لحام البقعة المقاومة دائماً عدداً معيناً من الأشياء المجهولة مثل قطر القطب الكهربائي، وسمك الألواح المراد لحامها، وعدد دورات اللحام، والوقت، والضغط، وما إلى ذلك. الأهداف التي وضعناها لأنفسنا في هذا العمل هي أولاً تحديد معاملات اللحام التي تؤثر على المقاومة الميكانيكية لمفصل اللحام ومن ثم نمذجة عملية اللحام وبالتالي تعظيم مقاومة التمزق. ولتحقيق الأهداف كما أعلننا قمنا بتنفيذ سلسلة اختبارات اللحام على الصفائح الرقيقة وفق منهجية الخطط التجريبية والتحليل للمتغيرات محل الاهتمام، بين؛ قوة الكسر في المنطقة المتضررة STATISTICA™ الإحصائي باستخدام برنامج بالحرارة. يتم بعد ذلك استخدام نماذج سطح الاستجابة الناتجة لصياغة مشكلة تحسين العملية. باستخدام برنامج ، قمنا بتحديد معاملات اللحام المثالية التي تسمح بأقصى قدر من القوة. MATLAB™

الكلمات المفتاحية: اللحام النقطي بالمقاومة، تصميم التجارب، التباين، النمذجة، التحسين.

